

# **Оптические дисковые системы**

# **Principles of Optical Disc Systems**

**G Bouwhuis, J Braat, A Huijser, J Pasman,  
G van Rosmalen and K Schouhamer Immink**

*Philips Research Laboratories, Eindhoven*

**Adam Hilger Ltd, Bristol and Boston**

# Оптические дисковые системы

*Перевел с английского* В. Г. Цуканов

*Под редакцией* М. Ф. Стельмаха



**Москва**  
**«Радио и связь»**  
**1991**

ББК 32.86  
О-62  
УДК 681.327.68

АВТОРЫ: Г. БОУХЬЮЗ, ДЖ. БРААТ, А. ХЕЙСЕР, ДЖ. ПАСМАН, ДЖ. ВАН РОЗМАЛЕН, К. ШУХАМЕР-ИММИНК

**Редакция переводной литературы**

**Оптические** дисковые системы: Пер. с англ./Г. Боухьюз, Дж. Браат, А. Хейсер и др.— М.: Радио и связь, 1991.— 280 с.: ил.

ISBN 5-256-00378-X.

В книге голландских авторов изложены принципы построения и функционирования оптических дисковых систем. Рассмотрены методы записи и воспроизведения информации, описаны способы изготовления оптических дисков-оригиналов и их копий, приведены примеры использования оптических дисковых систем в различных устройствах.

Для инженерно-технических работников, связанных с разработкой и эксплуатацией систем на оптических дисках.

О  $\frac{2302030500-077}{046(01)-91}$  75-91

**ББК 32.86**

ISBN 5-256-00378-X (рус.)  
ISBN 0-85274-785-3 (англ.)

- © Adam Hilger, Ltd., 1985
- © Перевод на русский язык и примечания. Цуканов В. Г.
- © Предисловие к русскому изданию. Стельмах М. Ф., 1991

## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

В предлагаемой читателю книге изложены основные физические и инженерно-технологические принципы создания оптических дисковых систем. Она написана группой ведущих специалистов фирмы Philips. Как известно, эта фирма наряду с несколькими японскими фирмами внесла существенный вклад в разработку и организацию серийного производства компакт-дисков и лазерных проигрывателей. Разработанные принципы оказались столь плодотворными, что позволили решить ряд крупных проблем в области записи, считывания и хранения информации и, в частности, такие важные для практики, как:

увеличение плотности записи информации до  $10^8$  бит/см<sup>2</sup>, обеспечивающей емкость на один диск до  $10^9 \dots 10^{10}$  бит;

бесконтактное считывание информации и практически неограниченный срок службы диска;

повышение качества и надежности записи и воспроизведения при сравнительно простом способе тиражирования;

уменьшение веса, габаритов и энергопотребления благодаря использованию малогабаритных компакт-дисков, полупроводниковых лазеров и больших интегральных схем.

Удачные технические решения и высокие эксплуатационные характеристики, присущие оптическим дисковым системам, обеспечили им успех в завоевании рынка. Сегодня выпуск дисковых проигрывателей достиг миллионов, а объем выпуска самих дисков измеряется десятками миллионов. Эти результаты получены в ходе длительной проработки сложных научно-технических проблем и использования последних достижений в таких областях, как субмикронная электроника, полупроводниковая лазерная техника, оптика, фотохимия, прецизионная механика и радиотехника. Питы, с помощью которых производится запись информации, имеют субмикронные размеры. Поэтому оптические узлы и все системы проигрывателя должны изготавливаться в условиях высокой технологической культуры и вакуумной гигиены, отвечающих требованиям, предъявляемым к производству больших интегральных схем.

Несмотря на то что книга издана в 1985 г., она не потеряла актуальности — в ней изложены в основном фундаментальные физические принципы создания оптических дисковых систем, а не технические частности.

Для такой быстро развивающейся области, как информатика, шесть лет — большой срок. За этот период появилось много публикаций по данной тематике. Хотя бы для частичного восполнения этого пробела в издание на русском языке включен дополнительный список литературы, вышедшей у нас в стране и за рубежом.

Наряду с совершенствованием бытовой аппаратуры на оптических дисковых системах типа Laser Vision и Compact Disc серьезное развитие получили дисковые системы с цифровой оптической записью информации, предназначенные для периферийных устройств вычислительных машин. Крупномасштабные исследования развернулись в области систем с реверсивными средами записи информации, магнитооптической и голографической памяти. Этим вопросам за истекшие годы был посвящен ряд международных конгрессов, труды которых опубликованы в специальных выпусках зарубежных научных журналов (J. Appl. Phys.— 1988.— Vol. 63.— № 8; J. Appl. Opt.— 1988.— Vol. 27.— № 4; IEEE Trans. Mag.— 1988.— Vol. 24.— № 6; J. Appl. Phys.— 1989.— Pt. 2-28, Suppl. 28-3).

Обилие информации по системам оптической записи послужило основанием для открытия в реферативном журнале ВИНТИ «Радиотехника» специального раздела — фотографическая система записи и воспроизведение сигналов. В этом разделе ежемесячно публикуются рефераты от пятидесяти до ста работ по этой тематике.

# 1. ВВЕДЕНИЕ

*Г. Боухьюз*

В течение последних десяти лет оптический диск нашел множество применений. Маленький диск диаметром 12 см с записанной на его поверхности в цифровом коде звуковой программой быстро завоевал рынок. Диск большего диаметра с видеoinформацией используется в быту и для учебных целей. Возможность записи значительного объема информации и простота тиражирования делают оптический диск очень привлекательным для этих областей применения. В сфере записи и хранения данных системы с прямой оптической записью информации приобретают все большую популярность в качестве периферийных устройств компьютеров.

Простое сканирование по плоской поверхности диска при считывании, обеспечивающее быстрый доступ к информации, — важное требование к системам хранения информации. Дополнительным достоинством оптических дисков является отсутствие физического контакта между считывающей головкой и несущим информацию слоем, так как считывание информации осуществляется пучком света, сфокусированным довольно простыми средствами на этом слое. Прозрачный слой, покрывающий носитель информации, может защищать мелкие детали от повреждений и затеняющих частичек.

Как и в обычной грамофонной записи, информация расположена по спирали, которая называется дорожкой, хотя во многих случаях сплошного углубления или непрерывной линии нет, а дорожка представляет собой спиральный прерывистый пунктир из меток записи (рис. 1.1). Метки являются маленькими областями, имеющими оптический контраст с окружающей их зеркальной поверхностью, например черные элементы в виде черточек или продолговатые углубления (питы) на поверхности. Метки вызывают соответствующие изменения отражения диска вдоль дорожки. Оптическая считывающая головка, которая в данном случае заменяет механическую иглу граммофона, преобразует изменения отражения в электрический сигнал. Объектив головки фокусирует лазерный луч в маленькое пятно на дорожке и направляет свет, отраженный от диска, на фотоприемник. Таким образом, фотоэлектрический сигнал модулируется во времени в соответствии с метками на дорожке вращающегося диска.

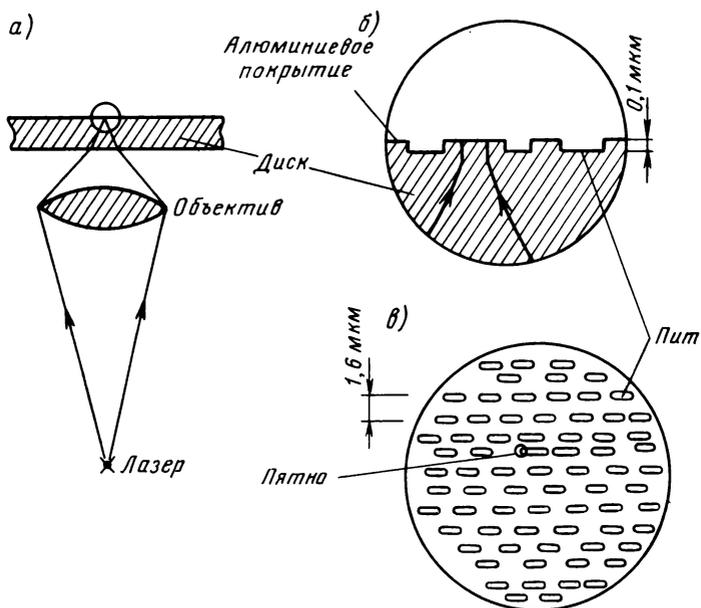


Рис. 1.1. Диск и считывающее пятно:

а — формирование пятна на отражающей рельефной поверхности; б, в — поперечное сечение пит на поверхности и дорожка из пит. Полуширина пятна несколько больше ширины пита

Высокая плотность записи информации достигается с помощью оптических средств, которые представляют собой оптический сканирующий микроскоп со средним увеличением. Предел плотности записи обусловлен дифракцией света, которая определяет минимальный диаметр пятна в фокальной плоскости размером около  $\lambda/2NA$ , где  $\lambda$  — длина волны света,  $NA$  — числовая апертура фокусируемого пучка. Следовательно, плотность информации равна приблизительно  $(NA/\lambda)^2$ , что соответствует  $10^9 \dots 10^{11}$  бит на диск. Это значит, что весь текст данной книги может быть записан на 25 витках видеодиска, которые занимают кольцо шириной 40 мкм. На рис. 1.2 показаны основные оптические элементы считывающей головки. Излучение полупроводникового лазера фокусируется через прозрачную подложку диска на поверхность, несущую информацию, с помощью объектива микроскопного типа. Часть отраженного света, собираемого тем же объективом, направляется на детектор.

На рис. 1.2, а ошибки расположения пятна относительно дорожки (ошибки радиального слежения), по абсолютной величине не превышающие поля зрения объектива, корректируются подвижным наклонным зеркалом. Для сканирования всего диска эта конструкция должна быть укреплена на каретке. На рис. 1.2, б показана конструкция головки, которая благодаря своей компакт-

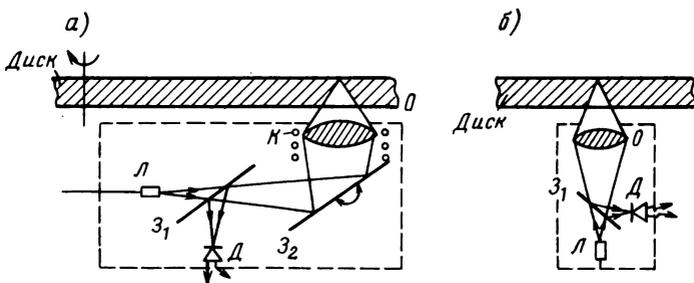


Рис. 1.2. Базовая оптика проигрывателя:

а — луч лазера  $L$ , направляемый с помощью подвижного наклонного зеркала  $Z_2$ , фокусируется объективом  $O$ . Объектив укреплен в катушке  $K$  громкоговорителя, с помощью которой фокальное пятно удерживается на информационном слое. Свет, идущий в обратном направлении, отражается полупрозрачным зеркалом  $Z_1$  на детектор  $D$ . Все устройство передвигается в радиальном направлении под диском; б — компактная конструкция головки (типа «палец») без подвижного зеркала. Малые колебания дорожки с большой частотой отслеживаются головкой в целом

ности может отслеживать малые, но кратковременные ошибки радиального слежения. Цепи управления, которые нужны для коррекции ошибок, нуждаются, естественно, в сигналах рассогласования. Это значит, что в принципе перед детектором необходимо ввести по крайней мере еще один вспомогательный оптический элемент, а сам детектор должен быть комбинированным.

Выбор метода модуляции за счет вариации отражения, а не пропускания обусловлен несколькими причинами. Во-первых, вся оптика для отражающего диска сосредоточена с одной стороны, что упрощает конструкцию проигрывателя. Во-вторых, защитный слой должен находиться только на одной стороне информационного слоя, в то время как при пропускании требуется двусторонняя защита. Это создает ряд проблем при производстве дисков, поскольку в часто используемом случае записи информации в виде микрорельефа оптический контраст не должен теряться. В-третьих, рельефные структуры при отражении должны иметь высоту приблизительно в  $4\lambda$  (около 6) раз меньше, что облегчает массовое тиражирование. Наконец, существует много методов управления фокусировкой, более простых для отражения, чем для пропускания.

Контраст меток может быть обусловлен вариациями интенсивности (коэффициента отражения), модуляцией по фазе отраженного света (рельефные структуры) или изменениями состояния поляризации при отражении. Поскольку массовое производство видеодисков и звуковых компакт-дисков наиболее просто реализуется снятием реплик поверхности матриц, очевидно, оптимальным должен быть выбор рельефных структур. В этом случае поверхность диска содержит углубления — питы (см. рис. 1.1). Если пятно света попадает на участок, где расположен пит, то часть света, отраженная от него, приобретает фазовый сдвиг, что приводит к рассеянию света, возвращающегося в объектив, и умень-

шению сигнала приемника. Изменение сигнала фотоприемника содержит информацию, по которой восстанавливается звуковой, видео- или цифровой сигнал.

Звуковые сигналы записываются на диск в цифровой форме. Отсчеты звукового сигнала берутся с частотой 44,1 кГц, и амплитуда каждого отсчета в звуковом канале преобразуется в цифровую форму, представляемую в виде 16-разрядного двоичного кодового слова. После добавления дополнительных бит и преобразования для целей модуляции и коррекции ошибок поток бит с частотой 4,3218 МГц записывается на диск. «Нули» соответствуют низкому уровню сигнала, а «единицы» — высокому, поэтому дорожка состоит из пит и промежутков дискретной длины. При считывании переход от пита к промежутку должен занимать не более 0,3 мкм для получения времени воспроизведения диска 1 ч.

Видеоинформация записывается в аналоговой форме, так как для цифровой записи требуется слишком широкая полоса частот. Видеоинформация, записанная на диске, содержит сигналы яркости и цветности, закодированные с помощью частотной модуляции (ЧМ) несущей частоты 7,5 МГц, и сигнал звука, вводимый путем широтно-импульсной модуляции ЧМ-сигнала. В результате расстояние между центрами пит варьируется в соответствии с ЧМ, а отношение длины пит к расстоянию между ними (скважность) — в соответствии со звуковыми сигналами.

Хотя оптические принципы известны уже более ста лет, интенсивная разработка оптических дисков на их основе началась только в 70-е годы. Для систем памяти наряду с плотностью бит важным параметром является скорость передачи бит; удовлетворительный результат в этом отношении обеспечили лазеры, с помощью которых удалось получить достаточно высокое отношение сигнал-шум с фотоприемника, на который падает излучение, отраженное от участка менее 1 мкм<sup>2</sup> за время менее 1 мкс. В настоящее время имеется много типов лазеров, среди которых малогабаритные полупроводниковые лазеры особенно хорошо подходят для воспроизведения информации с оптических дисков; мощность излучения может быть достаточной и для того, чтобы выжигать отверстия в металлической пленке с мегагерцевой частотой. Современные устройства содержат также простые и дешевые кремниевые фотоприемники, электро- и акустооптические модуляторы для записи сигналов в реальном масштабе времени на диск-оригинал. Созданы материалы для оптической записи информации на диски, рассчитанные на потребительский рынок и обеспечивающие большой срок службы в сочетании с высокой эффективностью. Содержанием многочисленных проводимых научно-исследовательских программ является совершенствование материалов для оптической записи.

Цель данной книги — описание физических и инженерно-технических принципов, лежащих в основе конструирования опти-

ческих дисковых систем. В этой области важную роль играют многие отрасли знаний, и необходимы совместные усилия ученых и инженеров — специалистов по оптике, электронике, механике и химии. Авторы книги работали в таком содружестве, и каждый писал о своей области разработок. Так что читатель имеет возможность взглянуть на проблему с разных точек зрения и проследить взаимосвязи между различными направлениями исследований.

Несмотря на то что книга в первую очередь посвящена прикладным проблемам разработок оптических дисковых систем, некоторые авторы достаточно много места отвели изложению соответствующих фундаментальных знаний, представляющих более широкий интерес.

Неидеальные условия, встречающиеся на практике, требуют определенного компромисса между возможностями системы и ее ценой. Поэтому много внимания уделено аберрациям оптики, таким дефектам диска, как выпадения, коробление и эксцентрическое вращение.

Вторая глава посвящена рассмотрению оптических аспектов проблемы. Обсуждается передача информации с помощью только одного пятна (оптически разрешимой точки), хотя тщательно изготовленные объективы обеспечивают разрешение до  $10^8$  точек\*. Однако достижимая в настоящее время мощность света ограничивает число каналов, и, кроме того, первым делом инженера по электронике является создание одиночного канала передачи потока данных в виде временной последовательности.

Качество пятна — решающий фактор в достижении значений параметров системы, близких к теоретическим пределам. Поэтому много внимания уделяется теории дифракции, в частности при рассмотрении взаимодействия сканирующего луча со специфической структурой диска: оптическая амплитудная модуляция вдоль дорожки требует совершенно иных способов считывания по сравнению с модуляцией фазовыми структурами. Наряду с основным сигналом обсуждаются способы выделения сигналов коррекции, необходимых для работы систем слежения за фокусом и дорожкой.

Приближения, допускаемые в изложении теории дифракции, адекватно описывают все процессы, если размеры рассматриваемых объектов больше длины волны излучения; однако для описания маленьких пит на диске, имеющих ширину около 0,6 мкм, требуются уже иные допущения. В третьей главе проводится сравнение скалярной и строгой векторной теории дифракции, показывающее, что в скалярном приближении при расчете ошибки могут достигать 15%.

Для качественной записи и считывания информации в систе-

---

\* Иными словами, реализовать  $10^8$  оптических каналов передачи информации.—  
*Прим. перев.*

ме должны удовлетворяться дополнительные требования к фокусировке и слежению за дорожкой. Теория электромеханических устройств и цепей автоматического управления изложена в гл. 4. Автор этой главы принимал участие и в решении проблем сервомеханизмов оптических дисковых систем с самого начала их разработки в фирме Philips и с тех пор сконструировал много типов приводов. В качестве примеров приведены сервосистемы, нашедшие практическое применение.

Следующая глава описывает перенос информации на диск-оригинал для устройств постоянной памяти. Качество изготовления диска-оригинала с видео- или звуковыми программами должно быть таким, чтобы вклад диска-оригинала в ухудшение качества сигнала был пренебрежимо мал. Здесь требуется высокое инженерное искусство во многих областях, включая точную механику и фотохимию.

В гл. 6 обсуждается непосредственная запись. Она осуществляется путем локального изменения отражающей способности тонкого слоя с помощью модуляции мощности света, сфокусированного в точку на поверхности вращающегося диска. Для хранения больших массивов данных представляет интерес среда, изменяющая оптические свойства, например отражение, под действием нагрева. Требования к вероятности появления ошибок даже после нескольких лет хранения очень высоки.

Свойства оптического диска как носителя информации отличаются от свойств магнитных и других обычных средств памяти, особенно в отношении шумов и дефектов. Исследования кодирующих систем и способов модуляции совместно со схемами коррекции ошибок привели к созданию новых форматов для аналоговой видеозаписи, цифровой звуковой записи и непосредственной записи данных на диск. В гл. 7 рассмотрены методы адаптации систем модуляции и кодирования к оптическому каналу и свойствам материала для записи. Много внимания уделено проблемам восстановления потока данных в случае искажения сигналов. Из оптики известно, что потерю информации вследствие дефектов среды записи можно компенсировать путем применения голографических методов. Однако методика коррекции ошибок цифровых дисковых систем настолько эффективна и изящна, что не оставила никаких оснований считать голографический диск более предпочтительным.

В заключительной главе описаны примеры конструкций систем, имеющих на рынке, а также отдельные применения.

Со времени выхода статьи Компана и Крамера [1] появилось много публикаций по вопросам теории и применений оптических дисков. В [2] изложена история развития и дан общий обзор исследований и разработок, ведущихся различными компаниями. В настоящее время также публикуется много статей по оптическим дискам, большинство из которых посвящены мате-

риалам для однократной и реверсивной оптической записи. Однако в целом можно сказать, что основные принципы уже достаточно хорошо проработаны и технология стабилизировалась; это позволило написать книгу об оптических дисковых системах, которые, по-видимому, имеют весьма многообещающие перспективы.

## 2. СЧИТЫВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ С ОПТИЧЕСКИХ ДИСКОВ

*Дж. Браат*

### 2.1. ВВЕДЕНИЕ

Существующие в настоящее время оптические дисковые системы, о которых пойдет речь в этой главе, относятся к типу систем со считыванием микрорельефа, находящегося на поверхности (видео или звукового) диска, либо картины расположения контрастных элементов, например выжженных отверстий на диске для записи цифровых данных [2, 3]. Информация фиксируется в виде последовательности углублений или отверстий вдоль спиральной дорожки. Эта дорожка сканируется световым пятном очень малых размеров, и оптическая система считывания должна обеспечить получение сигнала детектора, который является точной копией сигнала, записанного на диск.

Очевидно, что преобразование вариаций высоты микрорельефа в изменяющийся оптический сигнал на детекторе является принципиально нелинейным процессом. Изменения отражения поверхности диска с выжженными отверстиями также нелинейно преобразуются в изменения интенсивности света на детекторе. На этапе оптического считывания при переходе от амплитуды света к интенсивности неизбежно происходит возведение в квадрат. В конечном итоге интенсивность трансформируется в ток детектора.

В соответствии с концепциями теории линейных систем необходимо определить частотный отклик оптической системы. В данном случае рассматривается пространственная частота (в  $\text{мм}^{-1}$ ), которая представлена одномерной периодической структурой. Мерой частотного отклика на этой специфической пространственной частоте является уменьшение глубины модуляции при отображении периодической структуры оптической системой. Для обеспечения возможности использования принципа линейной суперпозиции при отображении более сложных объектов необходимо, чтобы периодическая структура была слабо модулирована (приближение малых сигналов).

Для оптических дисковых систем частотный отклик (или передаточную функцию) можно определить. Однако из-за значительной модуляции, создаваемой оптическим диском, уже нельзя пренебрегать искажениями сигнала. В частности, их следует учитывать при полном описании сигналов с учетом межсимвольной интерференции на цифровых дисках и интермодуляционных искажений на видеодисках. Более того, взаимовлияние между дорожками трактуется как вероятное следствие близкого расположения дорожек.

Анализ частотной характеристики и качества сигнала проводится в следующих трех разделах данной главы наряду с расчетами отношения сигнал-шум и случаем несовершенной оптической системы. В пятом разделе изложены методы обеспечения оптимальных условий считывания посредством соответствующей фокусировки и слежения за информационной дорожкой с помощью сервосистем, управляемых сигналами ошибок, получаемых оптическими методами. В шестом разделе кратко описан вариант оптической считывающей системы (оптическая головка).

## 2.2. ОПТИЧЕСКАЯ СКАНИРУЮЩАЯ МИКРОСКОПИЯ

В оптических дисковых системах принят способ считывания, основанный на методе сканирующего микроскопа (см. рис. 2.1, *a*). В простейшем виде этот метод включает в себя точечный источник *ТИ*, который проектируется с помощью объектива  $O_c$  на движущийся объект  $O_d$ ; свет, дифрагировавший на объекте, частично попадает на детектор *Д*. Как уже отмечалось, схемы сканирующего и классического микроскопов очень похожи. В [24] показано, что пространственное распределение интенсивности в плоскости изображения классического микроскопа несет ту же информацию об объекте, что и временной сигнал, получаемый при сканировании того же объекта в сканирующем микроскопе. Для удобства на рисунке показаны варианты микроскопов, работающие на пропускание, хотя все сказанное выше справедливо и для отражающих систем.

Аналогия между классическим и сканирующим микроскопами распространяется также на функции сканирующего  $O_c$  и изображающего  $O_n$  объективов, детектора *Д* сканирующего и конденсора *К* классического микроскопов. Известно [26], что конденсор с данной числовой апертурой определяет только когерентность освещения объекта и тщательной коррекции конденсорной линзы не требуется. Однако для обеспечения максимального разрешения объектив  $O_n$  должен быть хорошо скорректирован и сфокусирован на объект. В подразд. 2.2.1 показано, что в случае сканирующего микроскопа аналогичные заключения могут быть сделаны относительно детектора *Д* и сканирующего объектива  $O_c$ .

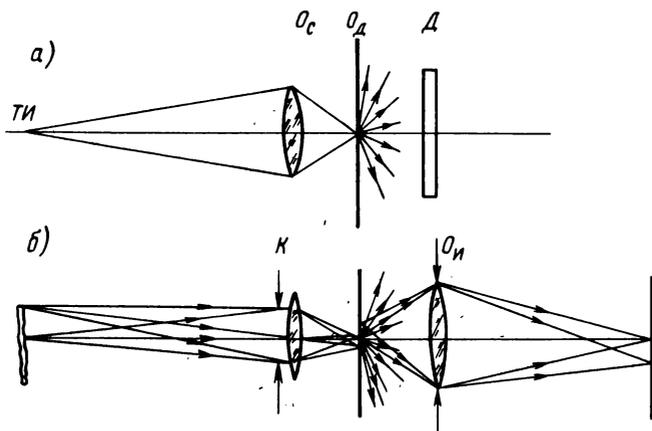


Рис. 2.1. Схематическое изображение сканирующего (а) и классического (б) микроскопов

### 2.2.1. ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СКАНИРУЮЩЕГО МИКРОСКОПА

**Решетка и ее дифракционные порядки.** Для изучения частотной характеристики оптической системы используем слабо модулированный (слабоконтрастный) амплитудный объект (решетку) с определенной пространственной частотой  $f_{\text{пр}}$ , являющейся величиной, обратной периоду решетки  $p$ :

$$f_{\text{пр}} = 1/p.$$

Функция передачи по интенсивности решетки

$$I(u) = a [1 + m \cos(2\pi u/p)] \quad (m \ll 1). \quad (2.1)$$

Функция передачи по амплитуде

$$A(u) = \sqrt{I(u)} \approx \sqrt{a} [1 + \frac{1}{2} m \cos(2\pi u/p)]. \quad (2.2)$$

Плоская волна, падающая на решетку (под углом  $\alpha_0$ ), будет делиться на интенсивную плоскую волну нулевого порядка и две слабые плоские волны первого порядка, направления которых описываются законом дифракции на решетке (рис. 2.2)

$$\sin \alpha_N - \sin \alpha_0 = N\lambda/p \quad (N = -1, 0, +1), \quad (2.3)$$

где  $\lambda$  — длина волны света.

Амплитуда и фаза дифракционных порядков зависит от геометрии решетки и ее положения. На рис. 2.3 показана решетка с ее дифракционными порядками и фазой дифракционных порядков, измеряемой по отношению к определенной точке отсчета  $R$  (для простоты считаем, что свет падает нормально). Волновые фронты

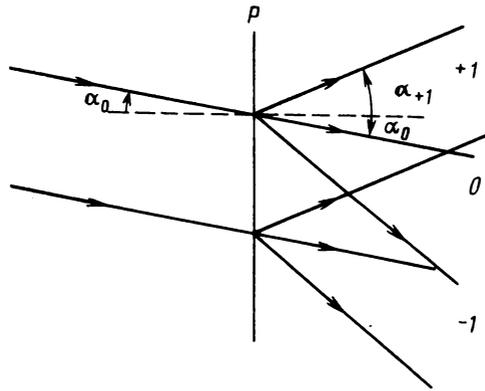


Рис. 2.2. Дифракция плоской волны (обозначенной индексом 0) на решетке  $P$ . Наличие решетки приводит к появлению дифракционных порядков (+1 и -1)

дифракционных порядков обозначим как  $W_0$ ,  $W_{-1}$  и  $W_{+1}$ . Если точка отсчета  $R$  выбрана симметрично относительно решетки (рис. 2.3, а), то волновые фронты  $W_{-1}$  и  $W_{+1}$  должны иметь одинаковую фазу. При смещении решетки (или точки отсчета  $R$ ) изменяются фазы волновых фронтов  $W_{-1}$  и  $W_{+1}$ , а фаза волнового фронта нулевого порядка  $W_0$  не меняется. На рис. 2.3, б дополни-

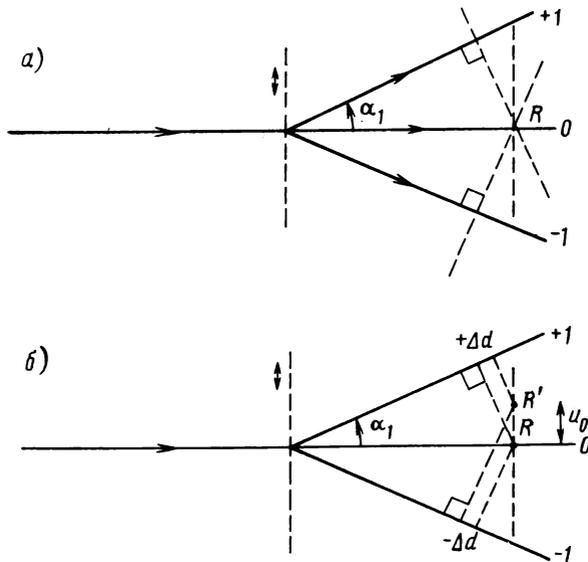


Рис. 2.3. Сдвиг фазы первых дифракционных порядков по отношению к нулевому порядку, обусловленный смещением дифракционной решетки  $u_0$

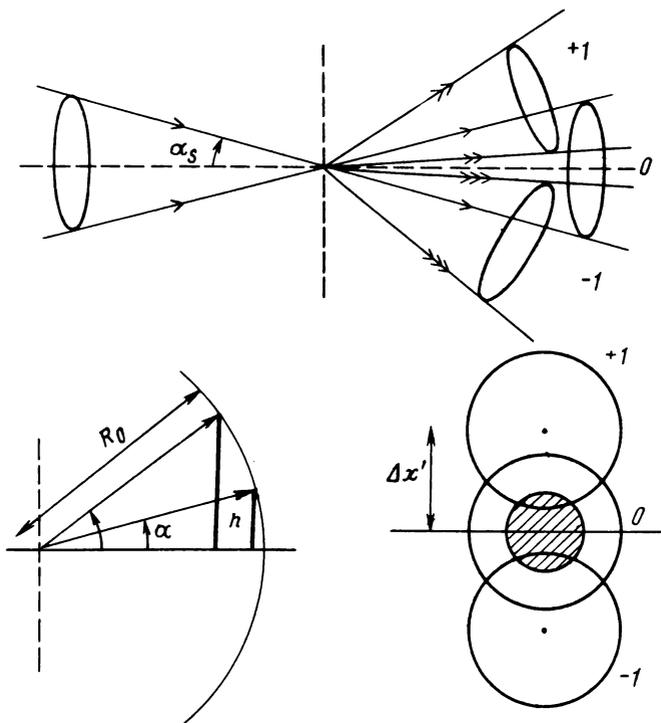


Рис. 2.4. Деление падающей сферической волны на сферические дифрагирующие волны, которые частично перекрываются. Часть дифрагирующего света попадает на детектор, фотоприёмная площадка которого выделена штриховкой

тительный оптический ход порядка  $+1$  равен  $+\Delta d$ , а для порядка  $-1$  получаем  $-\Delta d$ . Из рисунка видно, что

$$\Delta d = u_0 \sin \alpha = u_0 \lambda / p, \quad (2.4)$$

где  $u_0 = RR'$  — смещение решетки.

Следовательно, сдвиг фазы порядков

$$\Delta \varphi = \pm 2\pi \Delta d / \lambda = \pm 2\pi u_0 / p. \quad (2.5)$$

В общем случае для сдвига фазы  $N$ -го порядка можно получить выражение

$$\Delta \varphi_N = 2\pi N u_0 / p. \quad (2.6)$$

Отметим, что положение решетки влияет только на фазу дифракционных порядков, не меняя их амплитуды. Сдвиг фаз детектируется интерференционными оптическими методами. Интерференция не меняющегося нулевого порядка со сдвинутыми по фазе первыми дифракционными порядками несет информацию о положении решетки.

**Интерференция дифракционных порядков.** В сканирующем микроскопе сферическая волна фокусируется на тестовую решетку. Разложим эту сферическую волну на набор плоских волн с различными углами падения (угловой спектр плоских волн [10]). Свет, дифрагировавший на решетке, будет содержать три сферические волны (см. рис. 2.4), частично накладывающиеся друг на друга.

Удобно предположить, что свет проектируется на вогнутый сферический экран с радиусом кривизны  $R_0$  и центром кривизны, расположенным на поверхности решетки. Если высоту  $h$ , измеренную на экране от оси, разделить на радиус  $R_0$ , то получим величину

$$x = h/R_0 = \sin \alpha. \quad (2.7)$$

Закон дифракции на решетке, описываемый уравнением (2.3), линеен по синусу угла падения (синус угла между рассматриваемым и осевым пучками сферической волны часто называется числовой апертурой  $NA$  волны, и эта величина часто используется для характеристики, например, объективов микроскопов).

Если пронормировать  $x$  по отношению к числовой апертуре  $NA = \sin \alpha_s$  падающей сферической волны, то получим

$$x' = \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_s} = \frac{h/R_0}{NA}. \quad (2.8)$$

В координатах  $x'$ ,  $y'$  нулевой порядок заполняет единичный круг, а дифракционные порядки — также единичные круги, но сдвинутые на расстояние

$$\Delta x' = \frac{\lambda/p}{NA} = \frac{\lambda f_{np}}{NA}. \quad (2.9)$$

Детектор  $D$  сканирующего микроскопа должен характеризоваться определенными размерами, выраженными в координатах ( $x'$ ,  $y'$ ). В отражающем сканирующем микроскопе площадь детектора в общем случае должна быть равна площади единичного круга.

Областями, в которых содержится информация о положении решетки, являются области перекрытия нулевого и первых порядков дифракции, где они интерферируют между собой. Согласно (2.6) разность фаз между нулевым и высшими порядками линейно зависит от  $u$  — смещения решетки. В случае прямолинейного движения решетки со скоростью  $s$

$$\Delta \varphi_N = 2\pi Nst/p = 2\pi Nvt, \quad (2.10)$$

где  $v$  — временная частота, равная  $s/p$ .

Взаимное перекрытие трех дифракционных порядков  $A_0$ ,  $A_{+1}$  и  $A_{-1}$ , имеющих сдвиги фаз  $\Delta \varphi_{+1}$  и  $\Delta \varphi_{-1}$ , приводит к появлению зависимости интенсивности  $I(t)$  от времени. Если  $\Delta \varphi_{+1} = -\Delta \varphi_{-1}$  и  $A_{-1} = A_{+1}$ , то

$$\begin{aligned}
 I(t) &= |A_0 + A_{+1} \exp(i\Delta\varphi_{+1}) + A_{+1} \exp(-i\Delta\varphi_{+1})|^2 = \\
 &= A_0^2 + 4A_0A_{+1} \cos(\Delta\varphi_{+1}) + 2A_{+1}^2 + 2A_{+1}^2 \cos(2\Delta\varphi_{+1}) \approx \\
 &\approx A_0^2 \left(1 + \frac{4A_{+1}}{A_0} \cos(2\pi\nu t)\right),
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

где использовано комплексное представление оптических амплитуд. Отношение  $A_{+1}/A_0$  описывается уравнением (2.2) и равно  $m/4$ , если  $A_0 = \sqrt{a}$ ; таким образом, окончательное выражение для зависимости интенсивности от времени следующее:

$$I(t) \approx a [1 + m \cos(2\pi\nu t)]. \tag{2.12}$$

Уравнение (2.12) представляет собой выражение для локальной интенсивности в плоскости детектора, и для получения выходного сигнала эту интенсивность необходимо проинтегрировать по поверхности детектора. Таким образом, размер и положение детектора влияют на изменения коэффициента модуляции  $m$  от пространственной частоты объекта (оптическая передаточная функция (ОПФ) сканирующего микроскопа).

Для детектора с очень малыми размерами (рис. 2.5, а), расположенного в центре дифракционной картины, сигнал будет также малым, но полностью не зависимым от пространственной частоты решетки. Однако, поскольку смещение  $|\Delta x'| > 1$ , на приемник не попадают области перекрытия нулевого и первых порядков, и оптическая передаточная функция получается равной нулю (рис. 2.5, б).

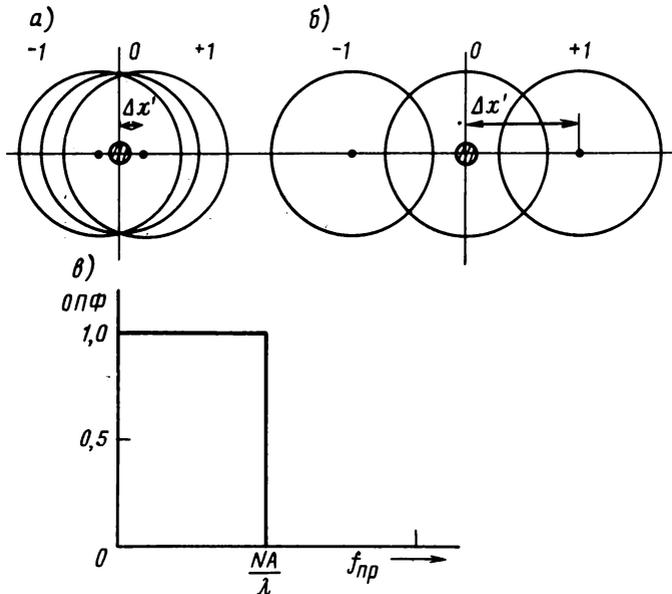


Рис. 2.5. Когерентное детектирование в сканирующем микроскопе с использованием детектора с малым угловым размером (а, б) и соответствующая оптическая передаточная функция (в)

Используя уравнение (2.10), рассмотрим следующие ситуации:

$$|\Delta x'| \leq 1 \text{ или } \begin{cases} f_{\text{пр}} \leq NA/\lambda & \text{ОПФ} = 1, \\ f_{\text{пр}} \geq NA/\lambda & \text{ОПФ} = 0, \end{cases} \quad (2.13)$$

т. е. ОПФ имеет вид, представленный на рис. 2.5, в.

Если размеры чувствительной площадки детектора соответствуют размерам сечения нулевого порядка дифракции, то сигнал на детекторе будет пропорционален размеру областей перекрытия нулевого и первых порядков и монотонно уменьшаться с увеличением  $|\Delta x'|$ . Если  $|\Delta x'| > 2$ , то областей перекрытия не существует. Оптическая передаточная функция получается как отношение перекрытия к полному единичному кругу. Можно показать, что

$$\text{ОПФ} = \frac{2}{\pi} \arccos\left(\frac{\Delta x'}{2}\right) - \frac{\Delta x'}{\pi} \left(1 - \frac{(\Delta x')^2}{4}\right)^{1/2}, \text{ если } f_{\text{пр}} \leq \frac{2NA}{\lambda}; \quad (2.14)$$

$$\text{ОПФ} = 0, \text{ если } f_{\text{пр}} > \frac{2NA}{\lambda}.$$

Для промежуточных размеров детектора  $D$  удобно определить отношение

$$\gamma = NA_D/NA,$$

где  $NA_D$  — синус угла, перекрываемого детектором в плоскости изображений. Изменяя  $\gamma$  от 0 до  $\infty$  (теоретически), получаем кривую ОПФ, показанную на рис. 2.6. Максимально высокая пропускаемая частота  $f_{\text{от}}$  (частота отсечки) описывается выражением

$$\begin{cases} f_{\text{от}} = (1 + \gamma) \frac{NA}{\lambda} & \text{при } 0 \leq \gamma \leq 1, \\ f_{\text{от}} = 2 \frac{NA}{\lambda} & \text{при } \gamma \geq 1. \end{cases} \quad (2.15)$$

Так же как и в классическом оптическом микроскопе, случай  $\gamma = 0$  называется когерентным, а  $\gamma \rightarrow \infty$  — полностью некогерентным. Для сканирующих микроскопов типично значение  $\gamma = 1$ , что соответствует частично когерентному случаю. Хотя ОПФ при изменении  $\gamma$  от 1 до  $\infty$  не меняется, ниже будет показано, что нелинейности при оптическом детектировании являются функцией  $\gamma$ .

Для  $\gamma = 0$  оптическая система линейна по отношению к комплексной амплитуде света, а для  $\gamma = \infty$  — по отношению к интенсивности света. Все промежуточные случаи требуют более детального анализа.

## 2.2.2. ИМПУЛЬСНАЯ И ПЕРЕХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКАНИРУЮЩЕГО МИКРОСКОПА

Оптическая передаточная функция, описанная выше, в принципе не применима для описания высококонтрастных амплитудных объ-

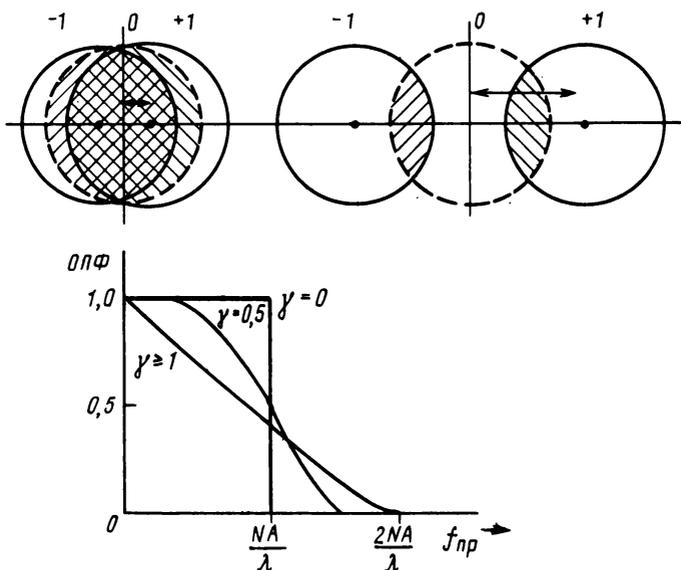


Рис. 2.6. Конфигурация детектора, типичная для отражательного сканирующего микроскопа (размер детектора таков, что полностью захватывает внутренний нулевой порядок). Кривые показывают влияние параметра когерентности  $\gamma$  на ОПФ

ектов. Поэтому необходимо рассмотреть также импульсную и переходную характеристики оптической системы.

В электронных схемах импульсная характеристика наблюдается на выходе при подаче на вход короткого пика напряжения (дельта-функция Дирака). Для оптической системы нужно определить пространственный эквивалент временного импульса; таким эквивалентом является очень маленькая, точечная диафрагма в плоскости объекта. Импульсная характеристика сканирующего микроскопа получается при перемещении этой маленькой диафрагмы в плоскости объекта (плоскости диска), и временная зависимость тока детектора будет соответствовать распределению интенсивности в поперечном сечении сканирующего пятна. В случае идеальной оптической системы это распределение имеет вид дифракционной картины Эйри [10], как показано на рис. 2.7, а.

Переходная характеристика сканирующего микроскопа получается при перемещении непрозрачной полуплоскости («края ножа») в плоскости объекта. Особый интерес представляет значение импульсной (или переходной) характеристики в случае, когда край ножа точно совмещен с центром сканирующего пятна. Сферическая волна, фокусируемая на этом крае, представляет собой набор плоских волн с различными углами падения. Часть плоских волн, попадающих на непрозрачную полуплоскость, поглощается. Очевидно, что в случае полной некогерентности (бесконечно боль-

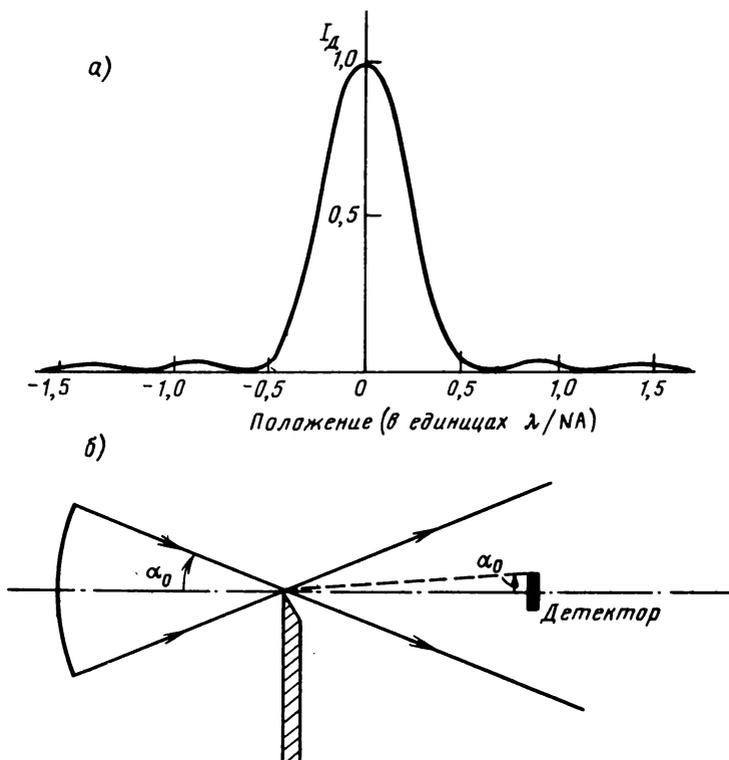
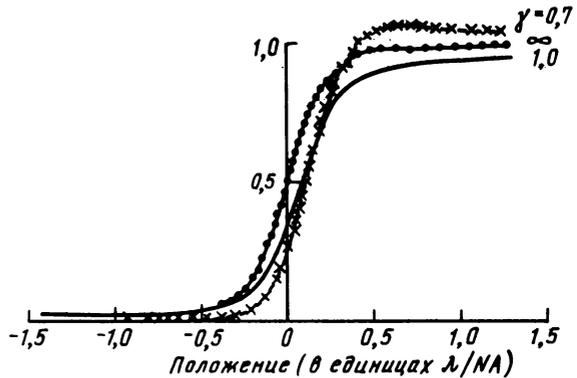


Рис. 2.7. Поперечное сечение распределения интенсивности идеального (цилиндрически симметричного) сканирующего пятна (а) и сканирующее пятно, сфокусированное на краю ножа (б). Ширина распределения по уровню половинной мощности равна приблизительно  $0,5\lambda/NA$ . Рассеянный свет принимается детектором, размеры которого определяются параметром когерентности  $\gamma$

шой детектор) интенсивности ограниченных плоских волн складываются, что приводит к появлению тока детектора, равного половине максимальной величины. В случае полной когерентности (бесконечно малый детектор, рис. 2.7, б) можно сказать, что половина амплитуд плоских волн складывается вместе; результирующая интенсивность, получающаяся при возведении в квадрат этой суммы амплитуд, вызывает ток детектора, равный  $1/4$  максимального значения. Вследствие малого размера детектора сам максимум также уменьшается относительно максимума при полной некогерентности. В случае  $\gamma=1$ , представляющем практический интерес, величина тока детектора равна  $1/3$ , т. е. тому значению, которое было определено теоретически [26] для классического оптического микроскопа.

На рис. 2.8 показаны переходные характеристики сканирующего микроскопа для различных значений  $\gamma$ . Отметим, что только

Рис. 2.8. Переходная характеристика сканирующего микроскопа при сканировании границы раздела черного и белого полей (края ножа). Сдвиг границы полей наблюдается путем детектирования при наличии частичной некогерентности и равен приблизительно  $0,1\lambda/NA$  при  $\gamma=1,0$



при некогерентности ( $\gamma = \infty$ ) оптическая система линейна по интенсивности, и характеристики от смежных краев могут просто складываться по интенсивности.

### 2.2.3. АМПЛИТУДНО-ФАЗОВАЯ РЕШЕТКА

В предыдущем подразделе предполагалось, что решетка вносит только пространственное изменение пропускания или отражения падающего света. Если оптическая длина пути  $nd$  (где  $n$  — коэффициент преломления света) также модулируется, то решетка называется амплитудно-фазовой. Такая решетка изменяет как модуль, так и фазу комплексной амплитуды света. Диски, изготовленные методом прессования или литья, практически совсем не поглощают света, а оказывают влияние только на фазу света; такая «решетка» является чисто фазовой структурой.

На рис. 2.9, *a* показано поперечное сечение углубления или пита на оптическом диске. Сдвиг фазы света, взаимодействующего

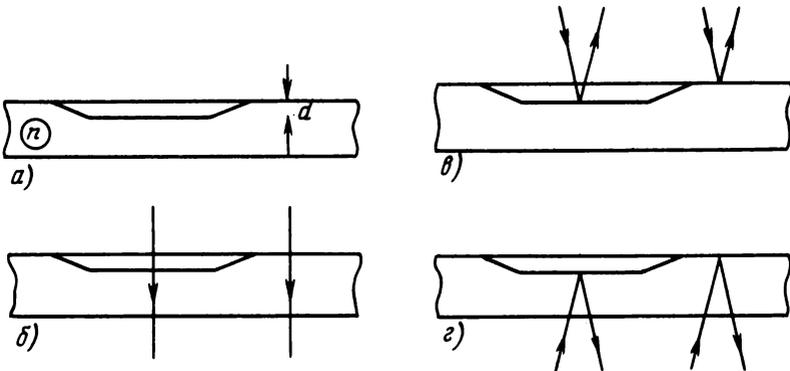


Рис. 2.9. Различные способы считывания фазовой структуры. Оптический контраст изменяется в 6 раз от варианта б к варианту г ( $n$  — коэффициент преломления среды,  $d$  — глубина пита)

щего с этой структурой, зависит от оптического контраста и соответственно от метода считывания. На рис. 2.9, б изображена структура, считываемая проходящим пучком излучения; в этом случае оптическая разность хода (ОРХ) лучей, проходящих через пит и рядом с ним,

$$\text{ОРХ} = (n - 1) d,$$

а разность фаз

$$\varphi_{\text{пр}} = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ОРХ} = 2\pi (n - 1) \frac{d}{\lambda}. \quad (2.16)$$

На рис. 2.9, в диск считывается отражающимся пучком света, направленным на поверхность с питами со стороны воздуха; очевидно, в этом случае

$$\text{ОРХ} = 2d,$$

$$\varphi_{\text{отр. в}} = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ОРХ} = 4\pi \frac{d}{\lambda}. \quad (2.17)$$

Наконец, на рис. 2.9, г представлена структура, считываемая отражающимся пучком, поступающим со стороны подложки; при этом

$$\text{ОРХ} = 2nd,$$

$$\varphi_{\text{отр. п}} = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ОРХ} = 4\pi n \frac{d}{\lambda}. \quad (2.18)$$

Для пластмассовых подложек с коэффициентом преломления, равным приблизительно 1,5, ОРХ меняется от  $0,5d$  до  $3d$  в зависимости от способа считывания.

Можно сделать некоторые выводы о влиянии фазовой структуры на падающее излучение. Если свет, отраженный от пита, находится приблизительно в противофазе со светом, отраженным от окружающей пит плоскости, то наблюдается максимальное его погашение; отраженный поток может достичь нулевого значения при условии точного равенства амплитуд волн, находящихся в противофазе. Положив в уравнениях (2.16) — (2.18)  $\varphi = \pi$ , найдем оптимальную глубину пита  $d$  ( $\lambda = 800$  нм,  $n = 1,5$ ):

$$d = 800 \text{ нм (пропускание)},$$

$$d = 200 \text{ нм (отражение со стороны воздуха)},$$

$$d = 135 \text{ нм (отражение со стороны подложки)}.$$

Очевидно, получить питы, например, глубиной  $0,8$  мкм и шириной  $0,5$  мкм очень сложно. Это обстоятельство заставляет отойти от оптимальной глубины пита для дисков, работающих на пропускание, и, следовательно, в этих условиях должен быть оптимизирован метод считывания. Прежде чем приступить к детальному обсуждению, рассмотрим амплитуды и фазы порядков дифракции света, отраженного от фазовой решетки. Знание комп-

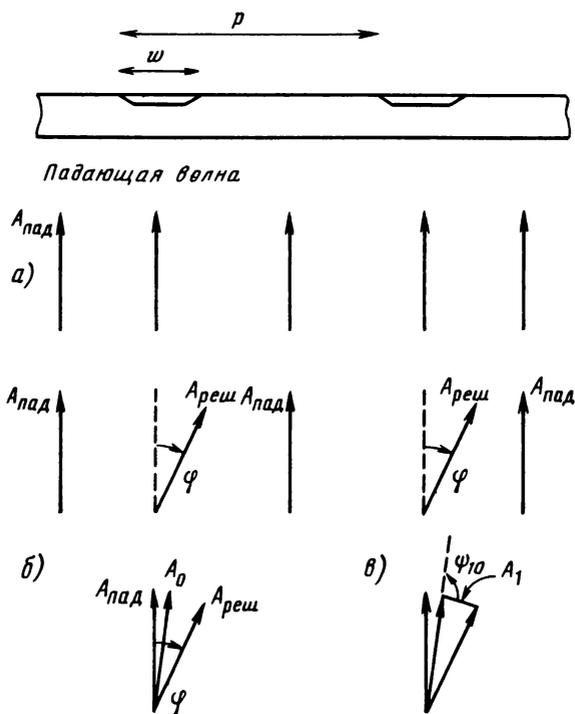


Рис. 2.10. Поперечное сечение оптического диска, содержащего углубления (питы): а — векторная диаграмма фазы падающей и прошедшей волны (прошедшая волна имеет сдвиг фазы  $\varphi$  в местах расположения пит); б — сдвиг фазы прошедшей волны нулевого порядка  $A_0$  по отношению к фазе падающей волны  $A_{пад}$ ; в — графическое представление сдвига фазы  $\psi_{10}$  между нулевым и первым дифракционными порядками

лексной амплитуды порядков позволяет достаточно просто провести оптимизацию метода считывания для различных размеров пит.

**Дифракционные порядки фазовой решетки.** На рис. 2.10 показано поперечное сечение фазовой решетки с углублениями (глубиной  $d$ ). Рассмотрим случай пропускания. Плоская волна, падающая на решетку, имеет постоянные амплитуду и фазу. Фаза света представлена вектором; для падающей волны все векторы синфазные. Непосредственно после решетки нулевой порядок прошедшего света приобретает среднее значение фазы распределения света, которое является суммой  $A_0$  амплитуд, прошедших через углубления и через окружающую углубления плоскость, доля каждой из которых пропорциональна отношению длины пита  $w$  к периоду пит  $p$  (см. рис. 2.10, б). Первые порядки дифракции возникают из-за наличия отклонений амплитуды относительно среднего значения  $A_0$ , вызванных углублениями. На рис. 2.10, в показано, что фаза периодических отклонений определяется разностным вектором  $A_1$  векторов  $A_0$  и  $A_{реш}$ . Из рисунка видно, что раз-

ность фаз между нулевым и первым порядками дифракции соответствует углу  $\psi_{10}$ .

Существует связь между  $\varphi$  — набегом фазы, приобретаемым волной на пути от поверхности до дна пита, и  $\psi_{10}$ . В предельном случае очень малых значений  $\varphi$   $\psi_{10}$  стремится к  $\pi/2$ ; для больших значений  $\varphi$   $\psi_{10}$  увеличивается и достигает значения  $\pi$ , когда  $\varphi$  также становится равным  $\pi$ .

Как было показано в подразд. 2.2.1, фаза первых дифракционных порядков также зависит от положения решетки. Это приводит к следующему выражению для зависящей от времени разности фаз между нулевым и первым порядками дифракции фазовой решетки (с периодом  $p$ ), перемещаемой с линейной скоростью  $s$ :

$$\Delta\varphi_{+1} = \psi_{10} + 2\pi vt,$$

$$\Delta\varphi_{-1} = \psi_{10} - 2\pi vt.$$

**Интерференция дифракционных порядков.** Сигнал, зависящий от времени, возникает в результате интерференции нулевого и первых дифракционных порядков в областях их взаимного перекрытия, находящихся на детекторе. Если первые порядки находятся в противофазе с нулевым порядком ( $\psi_{10} = \pi$ ), то в случае амплитудной решетки сигналы от двух областей перекрытия (см. рис. 2.6) синфазны и алгебраически складываются на детекторе, который суммирует весь световой поток, проходящий через единичный круг (интегрирующее детектирование). В случае фазовой решетки выражение для интенсивности в общей для нулевого и  $+1$  порядков области детектора  $D_{0,+1}$  имеет вид

$$I_{0,+1}(t) = |A_0 + A_1 \exp(+i\Delta\varphi_{+1})|^2 = A_0^2 + A_1^2 + 2A_0A_1 \cos(\psi_{10} + 2\pi vt) \quad (2.19)$$

и аналогично для области  $D_{0,-1}$

$$I_{0,-1}(t) = |A_0 + A_1 \exp(+i\Delta\varphi_{-1})|^2 = A_0^2 + A_1^2 + 2A_0A_1 \cos(\psi_{10} - 2\pi vt), \quad (2.20)$$

где  $A_0^2$  и  $A_1^2$  — интенсивности дифракционных порядков, для которых предполагалось  $A_{+1} = A_{-1}$ , что справедливо для решетки с симметричным профилем.

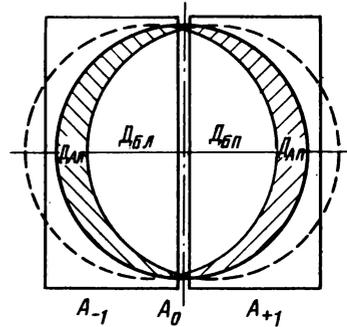
Суммирование двух сигналов дает результирующий сигнал детектора

$$I_D(t) \approx 2A_0^2 + 2A_1^2 + 2A_0A_1 [\cos(\psi_{10} + 2\pi vt) + \cos(\psi_{10} - 2\pi vt)] \cdot \text{ОПФ}(v) = \\ = 2A_0^2 + 2A_1^2 + 4A_0A_1 \cdot \text{ОПФ}(v) \cos \psi_{10} \cos(2\pi vt), \quad (2.21)$$

где ОПФ( $v$ ) определена по (2.14) и, очевидно, пропорциональна области перекрытия  $D_{0,+1}$ .

Часть сигнала детектора, зависящая от времени  $I_D(t)$ , очевидно, пропорциональна  $\cos(\psi_{10})$ . Если  $\psi_{10} = k\pi$ , то получается максимальная модуляция, а для промежуточных значений глубина

Рис. 2.11. Детектирование сигнала с помощью двухплощадочного детектора. Области перекрытия нулевого и первых порядков разделены на две части каждый ( $D_{АП}$  и  $D_{БП}$ ); полезный сигнал получается от заштрихованных областей, обозначенных  $D_{АП}$  и  $D_{АЛ}$



модуляции уменьшается и даже становится равной нулю при значении  $\psi_{10} = \pi/2$ . Это значит, что мелкие фазовые решетки ( $d/\lambda \ll 1$ ) «невидимы» под сканирующим микроскопом, в котором применяется интегрирующее детектирование.

Цернике [26] изобрел принцип фазового контраста для микроскопии, улучшающий видимость слабых фазовых объектов. С целью усиления контраста в случае слабо различимых объектов для сканирующих микроскопов были разработаны различные схемы детектирования [8, 9]. На рис. 2.11 показана чувствительная зона детектора (единичный круг), на который проецируются дифракционные порядки. Вместо одинарного детектора в данном случае использован двойной детектор со щелью, и необходимо рассчитывать сигналы  $I_{дл}$  и  $I_{дп}$ , возникающие на этих детекторах. Общие области обозначены через  $D_A$  и  $D_B$  для левой и правой частей детектора соответственно. Для правой части детектора сигнал

$$I_{дп}(t) = A_0^2_{\text{полукруг}} + A_1^2_{\text{[}D_{АП}+D_{БП}\text{]}} + A_1^2_{\text{[}D_{БП}\text{]}} + 2A_0A_1_{\text{[}D_{АП}+D_{БП}\text{]}} \cos(\psi_{10} + 2\pi vt) + 2A_0A_1_{\text{[}D_{БП}\text{]}} \cos(\psi_{10} - 2\pi vt). \quad (2.22)$$

Для левой части детектора мы можем записать

$$I_{дл}(t) = A_0^2_{\text{полукруг}} + A_1^2_{\text{[}D_{АЛ}+D_{БЛ}\text{]}} + A_1^2_{\text{[}D_{БП}\text{]}} + 2A_0A_1_{\text{[}D_{АЛ}+D_{БЛ}\text{]}} \times \cos(\psi_{10} - 2\pi vt) + 2A_0A_1_{\text{[}D_{БЛ}\text{]}} \cos(\psi_{10} + 2\pi vt). \quad (2.23)$$

Отметим, что области  $D_{АП}$  и  $D_{АЛ}$ , так же как и области  $D_{БП}$  и  $D_{БЛ}$ , равны, поэтому суммирование токов двух фотоприемников дает в результате уравнение (2.21). Однако если токи вычитаются, то получаем следующее выражение:

$$I_{д}(t) = 2A_0A_1_{\text{[}D_{АП}+D_{БП}\text{]}} [\cos(\psi_{10} + 2\pi vt) - \cos(\psi_{10} - 2\pi vt)] + 2A_0A_1_{\text{[}D_{БП}\text{]}} [\cos(\psi_{10} - 2\pi vt) - \cos(\psi_{10} + 2\pi vt)] = 2A_0A_1_{\text{[}D_{АП}\text{]}} \times [\cos(\psi_{10} - 2\pi vt) - \cos(\psi_{10} + 2\pi vt)] = -4A_0A_1_{\text{[}D_{АП}\text{]}} \sin(\psi_{10}) \times \sin(2\pi vt). \quad (2.24)$$

Область  $D_{АП}$  (заштрихованная на рис. 2.11) может быть описана

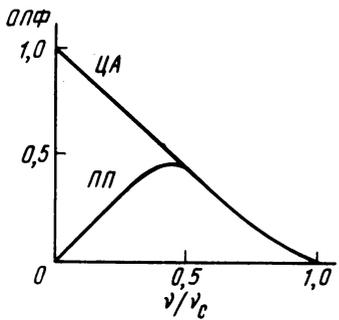


Рис. 2.12. Оптическая передаточная функция в случае детектирования по методу центральной апертуры и пушпульному. Максимум ОПФ по методу ПП расположен на частоте, равной 0,45 оптической частоты отсечки  $\nu_{от}$

в терминах оптических передаточных функций ОПФ ( $\nu$ ) таким образом:

$$D_{АП} \propto \text{ОПФ}(\nu) - \text{ОПФ}(2\nu), \quad (2.25)$$

поскольку  $D_{БЛ} + D_{БП} + D_{АП}$  эквивалентна ОПФ ( $\nu$ ), а  $D_{БЛ} - D_{БП}$  эквивалентна ОПФ ( $2\nu$ ).

На рис. 2.12 показаны стандартная ОПФ ( $\nu$ ) и функция передачи, соответствующая уравнению (2.25). Описанный выше способ детектирования действует наиболее эффективно при  $\psi_{10} = \pi/2 \times \chi$  ( $\sin \psi_{10} = 1$ ). Используемые сигналы на половинках детектора,  $\cos(\psi_{10} + 2\pi\nu t)$  и  $\cos(\psi_{10} - 2\pi\nu t)$ , имеют разность фаз  $2\psi_{10}$ , и для  $\psi_{10} = \pi/2$  они находятся точно в противофазе. На рис. 2.13 показано распределение света на детекторе в различные моменты времени. В соответствии с этими картинками распределения данный метод детектирования получил название пушпульного (ПП) — аналогично соответствующим методам в электронике. Стандартный метод детектирования (интегральное детектирование) получил название «центральная апертура» или ЦА-детектирование. Если угол  $\psi_{10}$  не равен ни  $\pi/2$ , ни  $\pi$ , то возможны обе схемы детектирования. Однако ПП метод обеспечивает слабую передачу сигнала на низких частотах и поэтому имеет более узкую полосу пропускания про- странственных частот, чем метод ЦА.

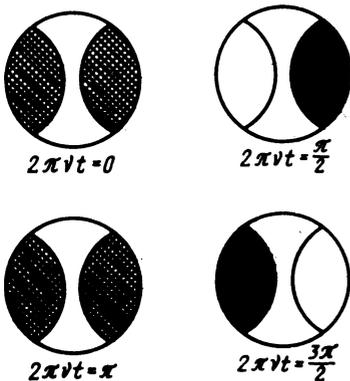


Рис. 2.13. Распределение интенсивности света по поверхности детектора в случае объекта с мелкой фазовой структурой. В областях перекрытия имеются только относительные изменения интенсивности света. В общем случае центральная область почти так же освещена, как и области перекрытия, следовательно, глубина модуляции сигнала мала

### 2.3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЧИТЫВАЕМОГО ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Формирование изображения в классическом микроскопе при различных условиях когерентности освещенности объекта было описано в фундаментальной работе Гопкинсом [14]. Его анализ формирования изображений базировался на частотной характеристике оптической системы, а для расчета влияния степени когерентности на формирование изображения была определена взаимная функция интенсивности, которая является средней величиной произведения комплексных амплитуд, существующих в двух произвольно выбранных точках. В большинстве оптических систем взаимная функция интенсивности зависит только от расстояния между этими двумя точками. В предельном случае полностью некогерентного освещения объекта взаимная функция интенсивности пропорциональна дельта-функции Дирака. Набор пространственных частот (спектр) распределения интенсивности изображения в этом случае равен спектру объекта, умноженному на ОПФ оптической системы. В более общем случае частичной когерентности освещения объекта оценка интенсивности изображения более сложная и в большинстве случаев требует применения численных методов.

Гопкинс применил свою теорию к сканирующему микроскопу, а затем к такому специфическому объекту, как оптический диск, который также относится к сканирующим микроскопам [15]. Оптический диск имеет поверхность с периодически повторяющейся структурой в радиальном направлении (последовательность дорожек) и более сложную структуру в направлении вдоль дорожек. В случае видеодисков существует основная несущая частота сигнала, которая обуславливает точно определенный период пит (или углублений) в направлении вдоль дорожки. В случае цифрового звукового диска последовательность пит в направлении дорожки выглядит почти случайной как по длине, так и по положению пит.

Необходимо изучить частотную характеристику (по амплитуде и фазе) оптической дисковой системы с использованием фурье-анализа периодических структур. Периодичность в радиальном направлении имеется на диске всегда. В направлении дорожек имеются как чистые частоты (одинаковые питы на фиксированных расстояниях), так и периодически повторяющиеся последовательности случайных пит.

Хотя цифровая обработка является сложной, преимущество ее состоит в том, что сигнал полностью определяется для любого положения сканирующего пятна на диске. Оценка сигнала детектора состоит лишь в том, что известные фурье-компоненты перемножаются с функциями косинуса и синуса, аргументы которых варьируются в соответствии с положением пятна вдоль дорожки, а также перпендикулярно к ней (ошибка слежения).

Ниже приведен анализ Гопкинса, используемый далее для

расчета частотной характеристики оптической системы воспроизведения в различных случаях (движение вне дорожки, различная геометрия пит, неточности оптической системы слежения).

### 2.3.1 КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ АНАЛИЗА ГОПКИНСА

Цель математического анализа — нахождение выражения для сигнала детектора. Исходя из распределения амплитуды света, испускаемого источником, сначала рассчитывается распределение амплитуды в сканирующем пятне, расположенном в фокальной плоскости сканирующего объектива. Затем изучается процесс дифракции на структуре диска. На этом этапе предполагается, что структура на диске периодическая; это значительно упрощает анализ. Часть света, дифрагировавшего на диске (или рассеянного им), попадает на детектор (или несколько детекторов) с конечными размерами. Периодичность в радиальном и тангенциальном направлениях позволяет записать сигнал детектора в виде ряда Фурье.

На рис. 2.14, *a* схематически представлено прохождение света в оптической воспроизводящей системе. Хотя большинство оптических дисковых систем построены на принципе отражения, в данном случае показана система с пропусканием для упрощения рассмотрения и анализа оптической схемы. Точечный источник фокусируется сканирующим объективом на оптический диск. Объектив описывается с помощью соответствующей комплексной функции зрачка  $a(h_x, h_y)$ , которая определяет локальное поглощение и сдвиги фаз (например, аберрации), вносимые объективом. Фокусирующее действие объектива описывается введением в функцию зрачка «сферического» фазового множителя.

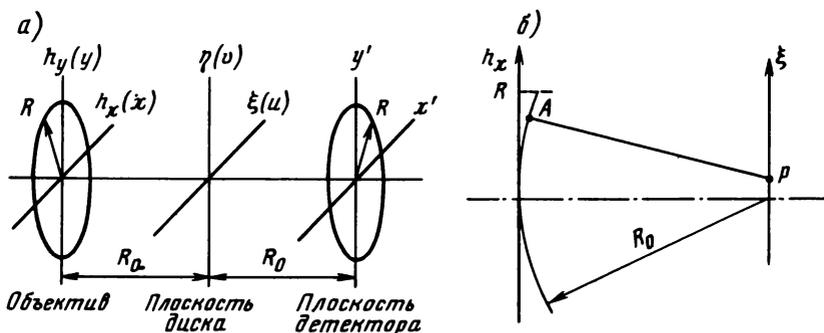


Рис. 2.14. Распространение света от объектива через диск к плоскости детектора (*a*) и оптическая длина пути от произвольной точки апертуры, на которой происходит дифракция, до т.  $P$  на поверхности диска (*б*). Координаты реального пространства отмечены вместе с нормированными координатами, которые заключены в скобки

Реальные пространственные координаты  $(h_x, h_y)$  нормированы по отношению к радиусу зрачка  $R$  объектива следующим образом:

$$x = h_x/R, \quad y = h_y/R. \quad (2.26)$$

Распределение комплексной амплитуды в плоскости диска можно записать с помощью дифракционного интеграла Кирхгофа [10] в предположении дифракции на апертурной диафрагме объектива. При этом комплексную амплитуду в определенной точке  $P$  в плоскости диска получаем суммированием всех оптических возмущений, возникших в результате дифракции света на апертуре объектива и достигающих т.  $P$ . Оптическая длина пути (ОДП) от каждой точки апертурной диафрагмы, на которой происходит дифракция, до т.  $P$  определяет фазы оптических возмущений в т.  $P$ . На рис. 2.14, б показана сферическая волна, прошедшая через апертурную диафрагму и распространяющаяся к поверхности диска.

Комплексная амплитуда  $A(\xi, \eta)$  в плоскости диска

$$A(\xi, \eta) \propto \iint_{\substack{\text{апертурная} \\ \text{диафрагма}}} a(h_x, h_y) \exp\left(\frac{2\pi i}{\lambda} \text{ОДП}(h_x, h_y; \xi, \eta)\right) dh_x dh_y. \quad (2.27)$$

Хорошим приближением для определения ОДП от точки  $(h_x, h_y)$  апертурной диафрагмы до т.  $P(\xi, \eta)$  на поверхности диска является следующее выражение:

$$\begin{aligned} \text{ОДП} &= AP = [(h_x - \xi)^2 + (h_y - \eta)^2 + R_0^2 - h_x^2 - h_y^2]^{1/2} \approx \\ &\approx R_0 + \frac{\xi^2 + \eta^2}{2R_0} - \frac{h_x \xi + h_y \eta}{R_0}, \end{aligned} \quad (2.28)$$

где  $R_0$  — расстояние от апертуры до поверхности диска. Подстановка выражения для ОДП в (2.27) дает

$$\begin{aligned} A(\xi, \eta) \propto \exp\left(\frac{\pi i}{\lambda R_0} (\xi^2 + \eta^2)\right) \iint_{\substack{\text{апертурная} \\ \text{диафрагма}}} a(h_x, h_y) \times \exp\left(-\frac{2\pi i}{\lambda R_0} \times \right. \\ \left. \times (h_x \xi + h_y \eta)\right) dh_x dh_y, \end{aligned} \quad (2.29)$$

где  $R_0$  — то же, что и в (2.28).

Если ввести для координат в плоскости диска нормирующий множитель

$$\lambda \frac{R_0}{R} = \frac{\lambda}{NA} \quad (2.30)$$

и соответственно

$$u = \frac{\xi}{(\lambda/NA)}; \quad v = \frac{\eta}{(\lambda/NA)}, \quad (2.31)$$

то уравнение (2.29) примет вид

$$A(u, v) \propto \exp\left(\frac{\pi i}{R_0(NA)^2} (u^2 + v^2)\lambda\right) \iint_{\substack{\text{апертурная} \\ \text{диафрагма}}} a(x, y) \times \exp[-2\pi i (ux + vy)] dx dy, \quad (2.32)$$

тождественный двумерному преобразованию Фурье из системы координат  $(x, y)$  в систему  $(u, v)$ , за исключением фазового мно-

жителя перед интегралом, который означает, что преобразование Фурье проецируется на поверхность сферы с радиусом  $R_0$ . В дальнейшем изложении этот множитель будет опускаться как несущественный. Функция  $A(u, v)$  и квадрат ее модуля  $|A(u, v)|^2$  описывают соответственно распределения амплитуды и интенсивности в сканирующем пятне. Хотя эти величины при точном анализе не используются, в дальнейшем с их помощью будут рассмотрены несколько примеров форм сканирующих пятен для иллюстрации, в частности, влияния аберраций.

Диск может быть математически описан комплексной функцией отражения (или пропускания)  $R(u, v)$ , которая учитывает его локальную отражательную способность и сдвиг фаз, создаваемые записанной на диске информацией. Предполагается, что функция  $R(u, v)$  — периодическая с периодами  $p'$  и  $q'$  в направлениях  $u$  и  $v$ . Соответственно реальные пространственные периоды

$$p = p'(\lambda/NA), \quad q = q'(\lambda/NA). \quad (2.33)$$

Периодичность функции  $R(u, v)$  позволяет разложить ее в двойной ряд Фурье:

$$R(u, v) = \sum_{m,n} R_{m,n} \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{m}{p'} u + \frac{n}{q'} v \right) \right] \quad (2.34)$$

с коэффициентами  $R_{m,n}$ , определяемыми из уравнения

$$R_{m,n} = \frac{1}{p'q'} \int_{-p'/2}^{+p'/2} \int_{-q'/2}^{+q'/2} R(u, v) \exp \left[ -2\pi i \left( \frac{m}{p'} u + \frac{n}{q'} v \right) \right] dudv. \quad (2.35)$$

Распределение амплитуды света  $A'(u, v)$  в плоскости диска непосредственно после отражения получается путем простого перемножения распределения амплитуды падающего на диск света и функции отражения  $R(u, v)$ :

$$A'(u, v) = A(u, v)R(u, v). \quad (2.36)$$

В гл. 3 с помощью более детального рассмотрения процесса дифракции будет показано, что простое соотношение (2.36) является только приближением, которое дает удовлетворительные результаты, однако не объясняет всех наблюдаемых явлений. При необходимости в данное выражение могут быть подставлены значения дифракционных порядков, рассчитанные с применением методов векторной теории дифракции.

Смещение диска на расстояние  $(u_0, v_0)$  описывается преобразованием

$$u \rightarrow u - u_0, \quad (2.37)$$

$$v \rightarrow v - v_0,$$

и в уравнении (2.34) для функции отражения диска в соответ-

ствии с теоремой Фурье о сдвиге это приводит к появлению фазового множителя

$$R(u - u_0, v - v_0) = \sum_{m, n} \exp \left[ -2\pi i \left( \frac{m}{p'} u_0 + \frac{n}{q'} v_0 \right) \right] R_{m, n} \exp \left[ 2\pi i \left( \frac{m}{p'} u + \frac{n}{q'} v \right) \right]. \quad (2.38)$$

Последним этапом является расчет распространения света от плоскости диска к плоскости детектора; этот этап также подобен преобразованию Фурье. Если обозначить нормированные координаты через  $x'$  и  $y'$  (нормировка производится по отношению к радиусу объектива), то комплексная амплитуда будет описываться выражением

$$A(x', y') = \iint_{\text{площадь диска}} A'(u, v) \exp[-2\pi i(x'u - y'v)] dudv. \quad (2.39)$$

Комплексная амплитуда  $A'(u, v)$  является произведением амплитуды  $A(u, v)$  падающей волны и функции отражения диска  $R(u, v)$ . В соответствии с теоремой Фурье о свертке уравнение (2.39) записывается следующим образом:

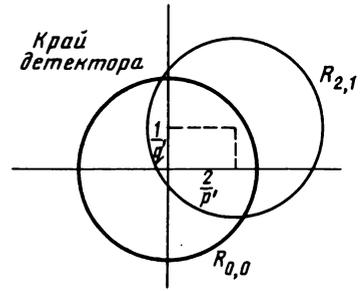
$$A(x', y') = \iint_{-\infty}^{+\infty} a(x, y) r(x - x', y - y') dx dy, \quad (2.40)$$

где  $r(x, y)$  — фурье-преобразование функции отражения диска  $R(u - u_0, v - v_0)$ . Вследствие периодичности функции  $R(u - u_0, v - v_0)$  (см. уравнение (2.34)) ее фурье-разложение содержит набор дельта-функций Дирака, умноженных на комплексные величины  $R_{m, n}$  (2.35) и на фазовые множители (2.38). Подстановка  $r(x, y)$  в (2.40) приводит к выражению

$$\begin{aligned} A(x', y') &= \iint_{-\infty}^{+\infty} a(x, y) \sum_{m, n} \exp \left[ -2\pi i \left( \frac{m}{p'} u_0 + \frac{n}{q'} v_0 \right) \right] \times \\ &\times R_{m, n} \delta \left( x - x' - \frac{m}{p'}, y - y' - \frac{n}{q'} \right) dx dy \approx \\ &\approx \sum_{m, n} \exp \left[ -2\pi i \left( \frac{m}{p'} u_0 + \frac{n}{q'} v_0 \right) \right] R_{m, n} a \left( x' + \frac{m}{p'}, y' + \frac{n}{q'} \right). \end{aligned} \quad (2.41)$$

Уравнение (2.41) подтверждает некоторые результаты, полученные более приближенным путем в подразд. 2.2.3. Амплитуда света после дифракции на диске определяется амплитудами дифракционных порядков  $R_{m, n}$ , которые возникают из-за предполагаемой периодичности структуры на диске и частично перекрываются на детекторе. Распределение фазы и амплитуды внутри каждого кругового дифракционного порядка равно распределению фазы и амплитуды

Рис. 2.15. Иллюстрация дифракции в плоскости детектора. Амплитуда света на детекторе является суммой амплитуд нулевого  $R_{0,0}$  и некоторого числа дифракционных порядков. На рисунке изображен порядок  $R_{2,1}$  с центром в точке  $(2/p', 1/q')$



туды падающей сходящейся волны. Существует дополнительный добавляющийся к каждому порядку дифракции сдвиг фазы, величина которого зависит от номера порядка и положения пятна относительно диска. На рис. 2.15 показана дифракция в плоскости детектора. Сигнал детектора пропорционален интенсивности света, проинтегрированной по площади детектора:

$$S(u_0, v_0) = \iint_{\text{площадь детектора}} g(x', y') |A(x', y')|^2 dx' dy', \quad (2.42)$$

где функция чувствительности детектора  $g(x', y')$ , введенная Вельцелем [23], может, например, получать локально положительные и отрицательные значения в зависимости от того, складываются или вычитаются сигналы от различных элементов многоплощадочных детекторов.

Смещение  $u_0$  в направлении дорожки выражается формулой  $u_0 = \xi_0 / (\lambda / \text{NA})$

и является линейной функцией времени, если диск вращается с постоянной скоростью. Это позволяет определить основную временную частоту  $v_0$ :

$$\xi_0' = st; \quad v_0 = s/p', \quad (2.43)$$

т. е. число периодов  $p'$ , просканированных за 1 с.

Временной сигнал возникает в результате интерференции дифракционных порядков в областях перекрытия (см. рис. 2.15). Сдвиг фазы  $\Delta\varphi$  между дифракционными порядками  $R_{m,n}$  и  $R_{m',n'}$

$$\Delta\varphi = -2\pi i (m' - m) v_0 t - 2\pi i (n' - n) \frac{v_0}{q'} + \arg(R_{m',n'}) - \arg(R_{m,n}). \quad (2.44)$$

Уравнение (2.44) показывает, что гармоники  $v_0$  возникают в том случае, когда  $\mu = (m' - m) > 1$ . Эта гармоника  $\mu v_0$  будет присутствовать в сигнале детектора тогда, когда области перекрытия двух таких порядков находятся на поверхности детектора.

Гопкинс показал, что при соответствующем расположении интерферирующих порядков сигнал детектора описывается выражением

$$S(t, v_0) = \sum_{\mu} [A_{\mu}(v_0) \cos(2\pi\mu v_0 t) + B_{\mu}(v_0) \sin(2\pi\mu v_0 t)], \quad (2.45)$$

и при известных коэффициентах  $A_{\mu}(v_0)$  и  $B_{\mu}(v_0)$  можно однозначно определить сигнал детектора для произвольного времени  $t$  и произвольного радиального смещения (ошибки слежения за дорожкой)  $v_0$ .

Коэффициенты  $A$  и  $B$  определяют некоторые свойства сигнала детектора. Коэффициент  $A_0(v_0)$  описывает зависимость постоянной составляющей сигнала от ошибки слежения за дорожкой;  $A_1(v_0)$  и  $B_1(v_0)$  — амплитуду основной частоты сигнала, а их отношение — меру сдвига фазы в сигнале детектора, возникающего, например, из-за асимметрии считывающего пятна. Содержание вторых гармоник в сигнале определяется коэффициентами  $A_2(v_0)$  и  $B_2(v_0)$ , которые несут информацию об эффективной скважности пит на оптическом диске.

### 2.3.2. СКАНИРУЮЩЕЕ ПЯТНО И ГЕОМЕТРИЯ ДИСКА

При расчете и сравнении свойств оптических считывающих систем необходимо иметь возможность моделирования неидеальных условий воспроизведения. Весьма важными параметрами являются качество сканирующего объектива и точная фокусировка сканирующего пятна на поверхности оптического диска. Различные распределения излучения по углу, зависящие от типов лазеров, также влияют на выходной сигнал детектора. В процессе производства оптического диска получают самые разнообразные формы пит, что приводит к определенным вариациям их размеров в ходе изготовления диска-оригинала. Если известно влияние вариаций размеров пит на сигнал детектора, то можно попытаться минимизировать это влияние для создания высоконадежных и устойчивых процессов изготовления диска-оригинала и оптического диска.

В этом подразделе показано, каким образом учитываются в расчетах абберации и амплитудные вариации светового пучка. Затем описываются наиболее адекватная модель пита и его соответствующие геометрические параметры.

**Параметры луча и геометрия сканирующего пятна.** Комплексная функция зрачка или функция пропускания  $a(x, y)$  определяет амплитуду в поперечном сечении луча, падающего на оптический диск. Из-за круговой формы луча обычно для его описания используют полярные координаты, в которых функция  $a(x, y)$  записывается как

$$a(r, \varphi) = t(r, \varphi) \exp(2\pi i W(r, \varphi)), \quad (2.46)$$

где  $a(r, \varphi)$  — произведение амплитудного и фазового сомножителей.

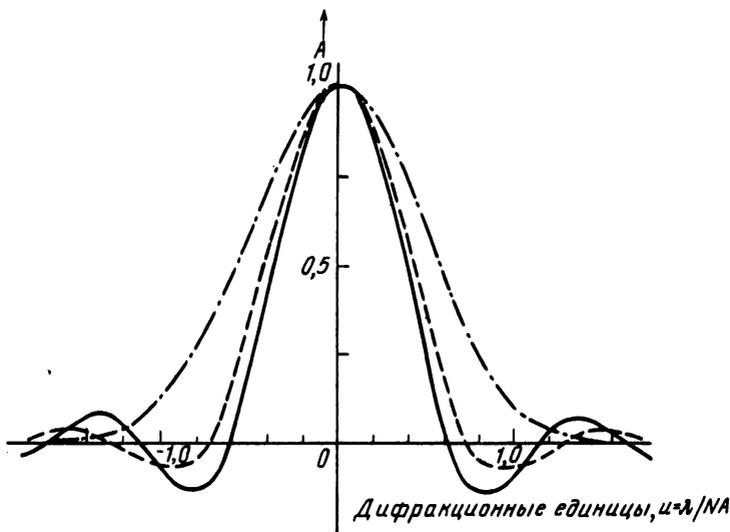


Рис. 2.16. График распределения амплитуды поля в поперечном сечении сканирующего пятна (без aberrаций):

—  $\sigma=0$ ; относительная эффективность на краю апертуры равна 1,00; — — —  $\sigma=1,5$ ; 0,22; — · — ·  $\sigma=2,22$ ; · · ·  $\sigma=8$ ; 0,0003. С увеличением  $\sigma$  центральный максимум сканирующего пятна расширяется, а относительная интенсивность дифракционных колец уменьшается. При  $\sigma=8,0$  край апертуры сильно освещается входящим лучом и дифракционное пятно фактически становится гауссовым без каких-либо дифракционных колец.

Функция  $t(r, \varphi)$  определяет вариации амплитуды и должна быть

$$t(r, \varphi) = \exp\left(-\frac{\sigma}{2} r^2\right) \quad (2.47)$$

в случае гауссова пучка лазера, имеющего интенсивность  $\exp(-\sigma)$  на краю апертурной диафрагмы объектива. Фазовый множитель  $W(r, \varphi)$  описывает aberrации волнового фронта падающего пучка (в единицах  $\lambda$ ). Через основные aberrации  $W(r, \varphi)$  выражается следующим образом:

$$W(r, \varphi) = W_{40}r^4 + W_{31}r^3 \cos(\varphi - \varphi_1) + W_{22}r^2 \cos^2(\varphi - \varphi_2) + W_{20}r^2 + W_{11}r \cos(\varphi - \varphi_1), \quad (2.48)$$

где  $W_{40}$  — сферическая aberrация;  $W_{31}$  — кома;  $W_{22}$  — астигматическая составляющая aberrации волнового фронта. Добавлены также и расфокусировка  $W_{20}$ , и наклон  $W_{11}$  волнового фронта.

После проведения численных расчетов из функции  $a(r, \varphi)$  можно сделать выборку достаточно большого числа точек (обычно около тысячи); по такой выборке можно легко определить отклонения от круговой симметрии, например, для полупроводникового лазера.

Как уже отмечалось ранее, анализ не использует точных выражений для амплитуды или интенсивности сканирующего светового пят-

на. Однако для некоторых случаев особый интерес представляют распределения комплексной амплитуды и интенсивности сканирующего пятна.

На рис. 2.16 показана комплексная амплитуда свободного от aberrаций сканирующего пятна для различных значений параметра Гаусса  $\sigma$ . По горизонтальной оси в качестве масштаба служит «дифракционная единица», равная  $\lambda/NA$ . Для дискового видеопроигрывателя ( $NA=0,4$ ), использующего He—Ne-лазер, эта величина равна 1,6 мкм.

На рис. 2.17 представлены трехмерные графики интенсивности свободного от aberrаций сканирующего пятна (рис. 2.17, а) и нескольких пятен с aberrациями (рис. 2.17, б, в, г).

Aberrации приводят к тому, что световая мощность переходит из центрального максимума сканирующего пятна в яркие круговые максимумы. Если aberrации малы, то существует простое соотношение между интенсивностью центрального максимума (называемой также интенсивностью Штреля) и изменениями волновых aberrаций  $V_v$ , измеренных по всему сечению зрачка объектива [18]. Определив  $V_v$  как

$$V_v = \overline{W^2} - (\overline{W})^2,$$

для нормированной осевой интенсивности сканирующего пятна получим

$$I_0 = 1 - 4\pi^2 V_v,$$

где  $V_v$  выражена в единицах  $\lambda^2$ .

Даже если нет aberrаций, то сканирующее пятно не может иметь бесконечно малые размеры, предсказываемые в приближении геометрической оптики. Сканирующее пятно минимального конечного размера обычно называется дифракционно-ограниченным, так как именно явление дифракции определяющим образом влияет на его размер. Пятно считается дифракционно-ограниченным, если интенсивность в центре пятна  $I_0$  из-за aberrаций не уменьшается ниже 0,8 или

$$4\pi^2 V_v = 0,2 \rightarrow V_v = 0,005\lambda^2. \quad (2.49)$$

Квадратный корень  $V_v$  является среднеквадратическим значением волновой aberrации  $W$  (или среднеквадратическим отклонением (СКО) ОДП), и его величина не должна превышать

$$\text{СКО ОДП} < (0,005\lambda^2)^{1/2} = 0,07\lambda. \quad (2.50)$$

В оптических системах видеопроигрывателей неизбежно возникают aberrации из-за применения высокоапертурных объективов ( $NA \geq 0,40$ ), однако среднеквадратическое значение aberrаций обязательно должно быть меньше, чем его дифракционный предел  $0,07\lambda$ .

При воспроизведении сканирующее пятно еще более искажается из-за расфокусировки и неточностей диска. Если первоначальные

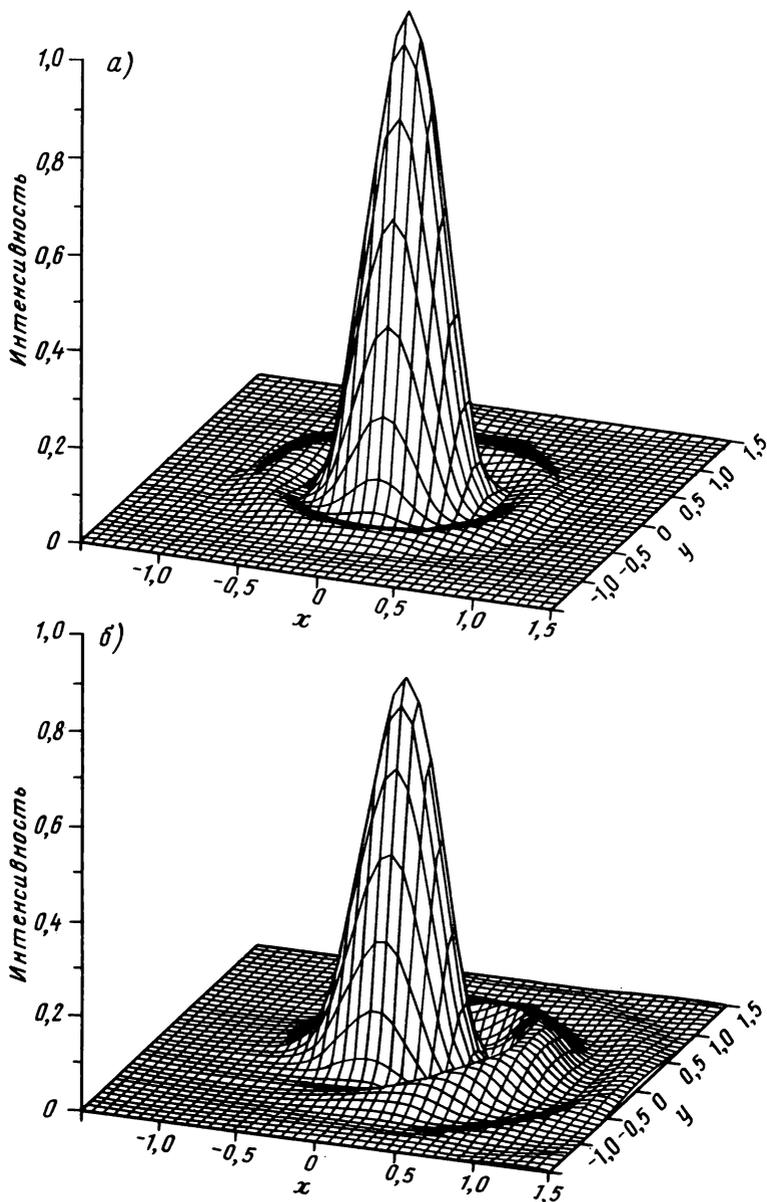
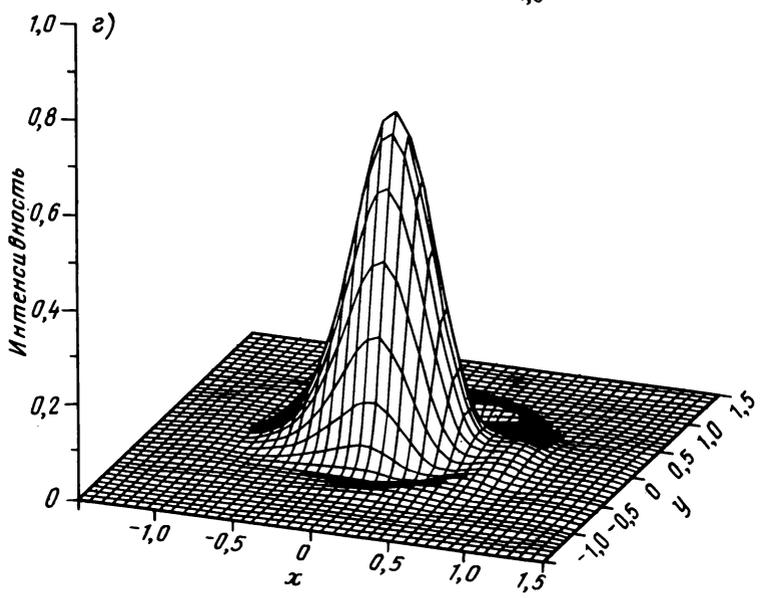
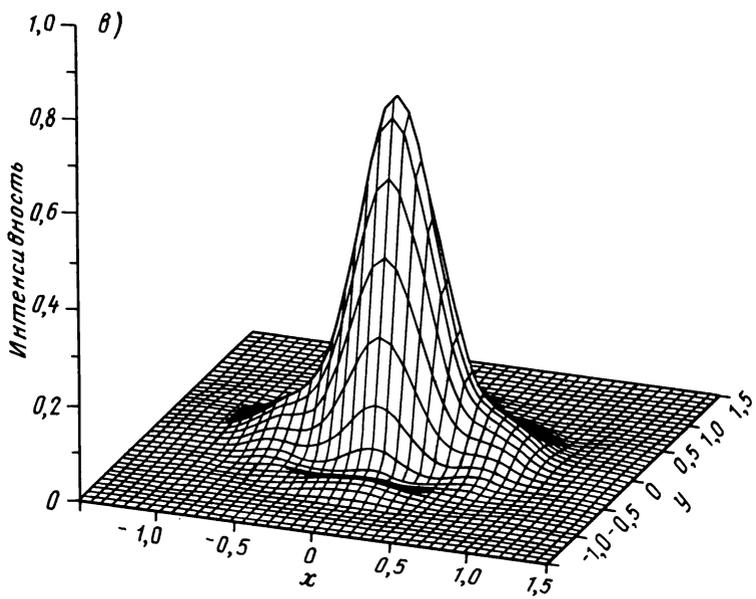
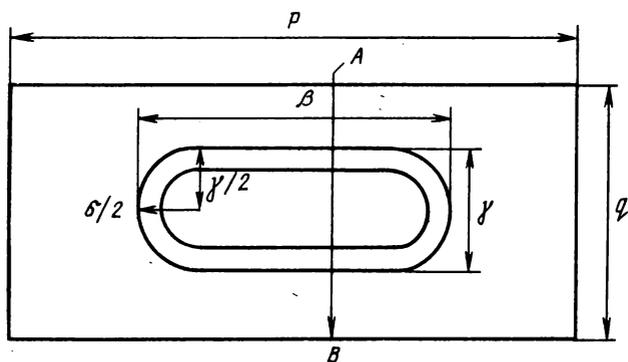
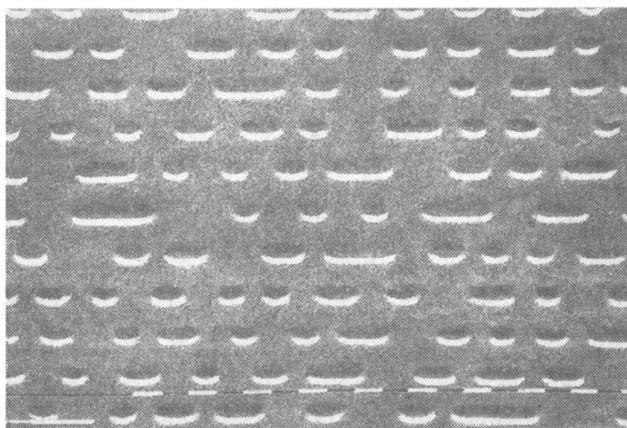


Рис. 2.17. Трехмерное изображение интенсивности сканирующего пятна. Рассто проигрывателя системы Compact Disc ( $\lambda=800$  нм и  $NA=0,45$ ) одна дифракция *a* — фокусируемая волна полностью свободна от aberrаций и картина соответствует распределению ин на имеет коматическую aberrацию и почти «дифракционно-ограниченная» (интенсивность по оси 0,80); астigmatизма такова, что пятно может быть почти «дифракционно-ограниченным». При фокусировании несколько остаточных aberrаций (см. рис. 2.29) и картина соответствует расфокусировке в одну глы ся при воспроизведении



яния по осям  $x$  и  $y$  отложены в дифракционных единицах  $u = \lambda/NA$ . В случае  
 онная единица равна 1,78 мкм:  
 тенсивности картины дифракции Эйри (интенсивность по оси  $z$  нормирована к 1);  $б$  — входящая вол-  
 $в$  — входящая волна имеет астигматизм и сфокусирована в одну из астигматических линий. Величина  
 в астигматическую линию интенсивность по оси пятна уменьшается до 0,70;  $г$  — входящая волна имеет  
 бину фокуса (интенсивность по оси 0,64). Такие искажения пятна могут время от времени наблюдать-



Поперечное сечение  $AB$

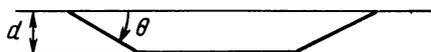


Рис. 2.18. Фотография поверхности оптического диска с цифровой музыкальной информацией на нем (Compact Disc), полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа, и графическое изображение углубления на оптическом диске, используемое в математической модели (масштаб: один белый штрих соответствует 1 мкм)

абберации имеют среднеквадратическое значение, близкое к дифракционному пределу, то скорее всего видеопроигрыватель работать не будет.

**Геометрия диска.** На рис. 2.18 представлена полученная с помощью электронного микроскопа фотография поверхности цифрового звукового диска с питами различной длины, а также чертёж пита, используемый в математической модели, описанной ниже. Пит расположен в центре площадки размером  $p \times q$ , имеет длину  $\beta$ , изме-

ряемую в плоскости диска, и ширину  $\gamma$ . Концы пита имеют полукруглую ( $\gamma/2 = \delta/2$ ) или эллиптическую форму с эксцентриситетом  $\epsilon = \delta/\gamma$ . В продольном сечении пит имеет глубину  $d$  и угол наклона стенок  $\theta$ , меняющийся по контуру пита, если концы пита не полукруглой формы. Данная модель дает удовлетворительные результаты для чисто рельефной структуры. Описание пит, полученных выжиганием отверстий или посредством фазовых переходов в материале для записи (см. гл. 6), более сложное. Эти структуры описываются комбинированными амплитудными и фазовыми профилями поверхности с записью, и в общем случае надо знать изменения комплексного коэффициента преломления материала.

В простейшем случае предполагается, что соседние дорожки являются точной копией центральной, хотя питы несколько смещены. В более сложных моделях диска, используемых для расчетов взаимодействия дорожек, соседние дорожки содержат запись совершенно разных частот.

### 2.3.3. ПОРЯДКИ ДИФРАКЦИИ

В общем случае амплитуды и фазы дифракционных порядков  $R_{m,n}$  численно оцениваются с помощью уравнения (2.35). Если углубления моделируются с помощью прямоугольных ямок с постоянной глубиной (рис. 2.19), то расчет величин  $R_{m,n}$  может быть проведен аналитически. Оптическая глубина пит (считывание с помощью отражения через подложку с коэффициентом преломления  $n$ ) определяется выражением

$$\varphi = 4\pi n \frac{d}{\lambda},$$

где  $\lambda$  — длина волны света в воздухе. Нулевой порядок в данном

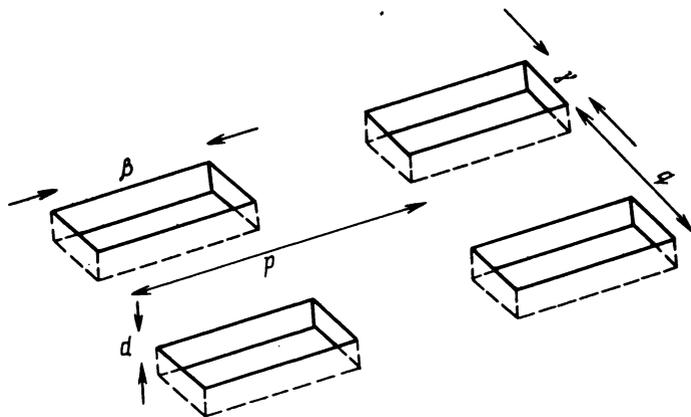


Рис. 2.19. Простая модель диска, основанная на прямоугольных углублениях с вертикальными стенками и постоянной глубиной. Анализ механизма считывания оптических дисков на основе этой модели изложен в [2.16]

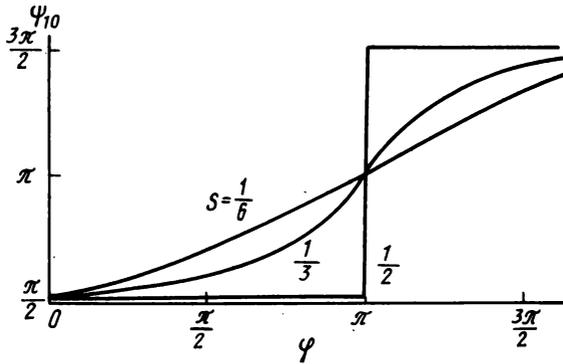


Рис. 2.20. Зависимость разности фаз  $\psi_{10}$  между нулевым и первым порядками от фазовой глубины  $\varphi$  впадин

случае

$$R_{0,0} = 1 + [\exp(i\varphi) - 1] \frac{\beta}{\rho} \frac{\gamma}{q}, \quad (2.51)$$

а порядок с номером  $m$  в направлении дорожки (тангенциальное направление) и с номером  $n$  — в перпендикулярном (радиальном направлении) описывается выражением

$$R_{m,n} = [\exp(i\varphi) - 1] \frac{\beta}{\rho} \frac{\gamma}{q} \operatorname{sinc} \left( \frac{\pi m \beta}{\rho} \right) \operatorname{sinc} \left( \frac{\pi n \gamma}{q} \right), \quad (2.52)$$

где функция  $\operatorname{sinc}(x)$  определяется как  $(\sin x)/x$ . Разность фаз  $\psi_{10}$  между первым радиальным порядком  $R_{0,1}$  и нулевым порядком  $R_{0,0}$

$$\psi_{10} = \operatorname{arg}(R_{0,1}) - \operatorname{arg}(R_{0,0}).$$

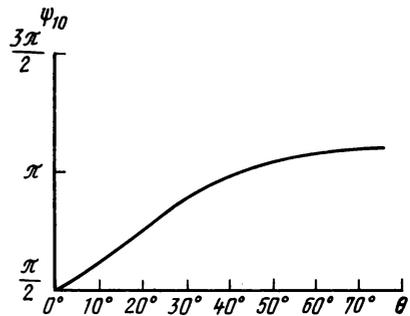
После соответствующих преобразований получаем

$$\psi_{10} = \pi - \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{\operatorname{ctg}(\varphi/2)}{1 - 2\beta\gamma/\rho q} \right). \quad (2.53)$$

На рис. 2.20 представлена функциональная зависимость значения  $\psi_{10}$  от фазовой глубины ямок  $\varphi$ . Параметр  $S$  задается формулой  $S = \beta\gamma/\rho q$ ,

т. е. равен отношению эффективной модулирующей области к общей площади, и принимает значения 0,167; 0,333 и 0,5. Первое значение соответствует структуре пит с периодами в тангенциальном направлении  $\beta/\rho = 0,5$  и радиальном  $\gamma/\rho = 0,33$ . Второе значение соответствует непрерывной дорожке ( $\beta/\rho = 1$ ) и значению  $\gamma/q = 1/3$  и третье значение — непрерывной дорожке, ширина которой равна половине расстояния между дорожками. Отметим, что в этом предельном случае угол  $\psi_{10}$  уже не является монотонно возрастающей функцией

Рис. 2.21. Зависимость разности фаз  $\psi_{10}$  между нулевым и первым порядками дифракции от наклона стенок пит при фиксированной максимальной их глубине 130 нм ( $\lambda=633$  нм, коэффициент преломления подложки 1,50)



$\varphi$ , а принимает дискретные значения  $\pi/2$ ,  $3\pi/2$  и т. д. независимо от значения  $\varphi$ .

Для расчета более реальной модели пита (см. рис. 2.18) необходимо использовать численные методы. На рис. 2.21 изображена зависимость угла  $\psi_{10}$  не от фазовой глубины  $\varphi$ , а от угла наклона стенок  $\theta$ . Увеличение эффективной глубины в процессе изготовления диска-оригинала (см. гл. 5) достигается увеличением угла наклона стенок. По сравнению с рис. 2.20 угол  $\psi_{10}$  возрастает медленнее и в итоге достигает своего предельного значения, определяемого максимальной глубиной пита. В подразд. 2.2.3 было показано, каким образом значение  $\psi_{10}$  определяет выбор оптимального метода детектирования в считывающей системе (пушпульного или центральной апертуры).

#### 2.3.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА

В этом подразделе представлены результаты численного моделирования, в процессе которого варьировались определенные параметры и рассчитывалось влияние этих вариаций на постоянную и переменную составляющие сигнала детектора. Постоянная составляющая сигнала нормирована по отношению к сигналу, получаемому от диска с гладкой немодулированной поверхностью. Для переменной составляющей либо показывается ее изменение за период сигнала, либо строится график амплитуды его основной частоты. Последняя нормирована по отношению к произвольно выбранной стандартной частоте, обеспечивающей точный синусоидальный сигнал воспроизведения. Эта опорная частота  $\nu_{оп}$  выбрана равной  $1/6$  частоты отсечки  $\nu_{от}$  оптической дисковой системы.

Для системы Laser Vision типичные значения  $\nu_{от}$  и  $\nu_{оп}$  следующие:

$$\nu_{от} = 2 \frac{NA}{\lambda} s = 11,6 \text{ МГц}, \quad \nu_{оп} = 2 \text{ МГц}, \quad (2.54)$$

где  $\lambda=633$  нм,  $NA=0,40$ ,  $s=9,20 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Для системы Compact Disc

$$\nu_{от} = 2 \frac{NA}{\lambda} s = 1,40 \text{ МГц}, \quad \nu_{оп} = 230 \text{ кГц}, \quad (2.55)$$

где  $\lambda = 790 \text{ нм}$ ,  $NA = 0,45$  и  $s = 1,25 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

**Коэффициент заполнения апертуры гауссовым пучком  $\sigma$ .** В (2.47) гауссово распределение амплитуды по апертуре объектива определяется константой  $\sigma$  в соответствии с формулой

$$t(r, \varphi) = \exp\left(-\frac{\sigma}{2} r^2\right),$$

где  $r$  — нормированный радиус апертуры. Интенсивность света на краю равна  $\exp(-\sigma)$ , и можно легко показать, что световая мощность, не попадающая в апертуру объектива, также равна  $\exp(-\sigma)$ . Заметное уменьшение части световой мощности, не попадающей в пределы апертуры, приводит к уширению сканирующего пятна (см. рис. 2.16) и низкому значению передаточной функции в высокочастотной области, однако часть общей мощности лазера, попадающей в объектив, увеличивается. Компромисс между этими эффектами показан на рис. 2.22: *а* — для сигналов, нормированных по отношению к полной мощности лазера, *б* — по отношению к мощности лазера, попадающей в объектив в нормальном режиме считывания. Значения, изображенные на рис. 2.22, *а*, пропорциональны амплитуде сигнала, а на рис. 2.22, *б* — глубине

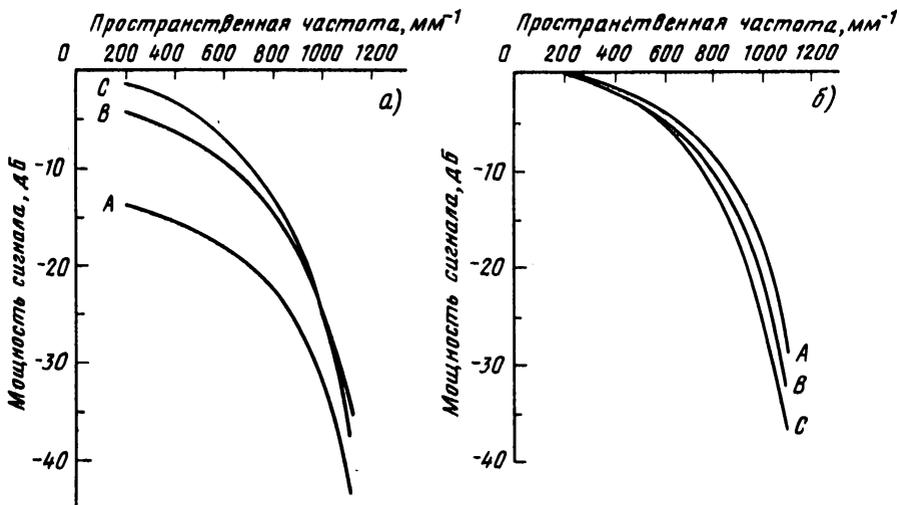


Рис. 2.22. Зависимость мощности сигнала от средней пространственной частоты на диске. Мощность сигнала на определенной пространственной частоте равна возведенному в квадрат отношению амплитуд сигналов на этой пространственной и опорной частотах (кривая *A* — для  $\sigma = 0,25$ ; *B* — для  $\sigma = 1,00$ ; *C* — для  $\sigma = 2,00$ ); *а* — мощность сигнала нормирована по отношению к общей мощности лазера; кривая *A* соответствует строго равномерной амплитуде по всему поперечному сечению луча; в этом случае значительная часть общей мощности излучения теряется, так как не попадает в объектив; *б* — мощность сигнала нормирована по отношению к мощности сигнала на пространственной частоте, равной приблизительно  $200 \text{ мм}^{-1}$  (опорная частота)

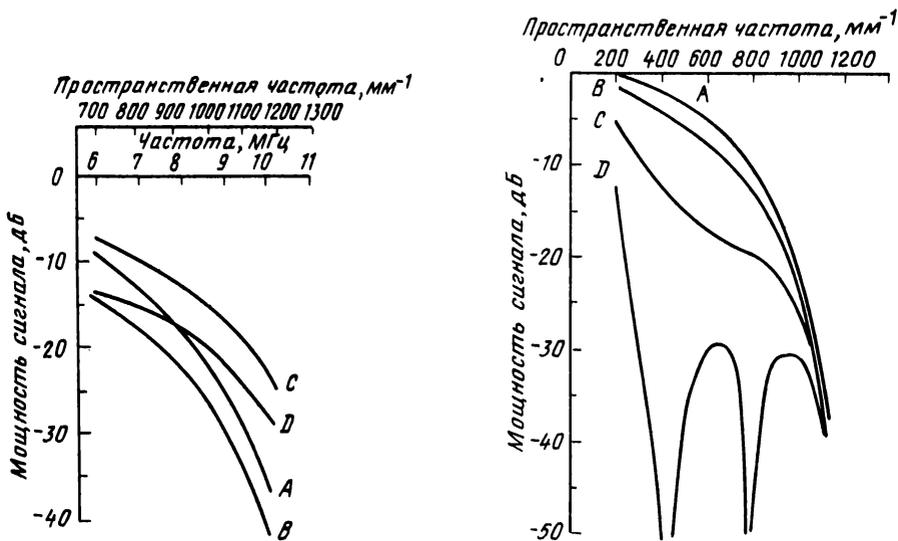


Рис. 2.23. Влияние параметра Гаусса  $\sigma$  и числовой апертуры  $NA$  на частотную характеристику оптического воспроизведения. В качестве уровня 0 дБ — значение мощности сигнала на кривой С, соответствующее пространственной частоте 200  $\text{мм}^{-1}$ . Длина волны света 633 нм. Параметры кривых следующие: А:  $\sigma=1,5$ ,  $NA=0,40$ ,  $\nu_{оп}=11,6$  МГц; В:  $\sigma=0,5$ ,  $NA=0,40$ ,  $\nu_{оп}=11,6$  МГц; С:  $\sigma=1,5$ ,  $NA=0,45$ ,  $\nu_{оп}=13,1$  МГц; D:  $\sigma=0,5$ ,  $NA=0,45$ ,  $\nu_{оп}=13,1$  МГц

Рис. 2.24. Частотная характеристика при различной величине расфокусировки: Кривая А — для  $W_{20}=0$ , среднеквадратичного отклонения ОДП  $\Lambda=0,00\lambda$ ; В — для  $W_{20}=0,25$ ,  $\Lambda=0,07\lambda$ ; С — для  $W_{20}=0,50$ ,  $\Lambda=0,14\lambda$ ; D — для  $W_{20}=0,75$ ,  $\Lambda=0,21$

модуляции. Выбор оптимальных значений определяется из требований к отношению сигнал-шум. Хороший компромисс между мощностью сигнала и частотой отсечки достигается при  $\sigma=1,5$ , что соответствует интенсивности на краю апертуры 0,22.

Описанная выше ситуация относится к дисковым видеопроигрывателям, в которых применяется He — Ne-лазер. Полупроводниковый лазер в системе Compact Disc имеет более сложный профиль интенсивности излучения. Для получения существенно равномерного заполнения апертуры приходится допускать значительные потери мощности излучения, однако требуемый уровень мощности в данной системе значительно ниже, чем в видеодисковой системе.

**Идеальная частотная характеристика.** Рассмотрим график частотной характеристики идеальной оптической системы, полагая, что уровень 0 дБ соответствует передаточной функции на опорной частоте  $\nu_{оп}$ . В случае видеодисковой системы представляющая интерес область частот располагается вблизи несущей ЧМ-сигнала (см. гл. 7), частота которой изменяется от 7,1 до 7,9 МГц (система PAL). На рис. 2.23 показаны четыре случая, значительно отли-

чающиеся друг от друга вследствие различий в величинах параметров.

Высокая числовая апертура NA улучшает частотную характеристику, однако делает систему воспроизведения более чувствительной к нарушениям точности слежения. Например, глубина резкости сканирующего пятна квадратично уменьшается с ростом NA воспроизводящего луча. Аберрация объектива увеличивается в еще более высокой степени с ростом NA, а это значит, что такие объективы являются более критичными к точности их изготовления. Более равномерное освещение апертуры объектива ( $\sigma=0,5$ ) также улучшает частотную характеристику, однако это достигается ценой уменьшения амплитуды сигнала и, следовательно, усложнения электронной схемы детектирования. В данном случае снова необходимо искать компромиссное решение между факторами стоимости, надежности, качества, которые будут определять в конечном итоге конкретную конструкцию.

**Неидеальная частотная характеристика.** В реальных ситуациях сканирующее пятно в большей или меньшей степени искажено из-за неточностей оптики (например, аберраций объектива) и зависящих от времени эффектов типа расфокусировки, наклона диска, локальных дефектов подложки диска. Искажение пятна приводит к деградации частотной характеристики. Сопутствующими явлениями могут быть плохое функционирование систем автоматического регулирования фокуса и радиального слежения, что, в свою очередь, ведет к потере слежения за дорожкой.

Следствиями искажения пятна на телевизионном изображении могут быть низкое отношение сигнал-шум или возникновение выпадений из-за слишком малой глубины модуляции сигнала. В проигрывателе Compact Disc следствием искажения пятна является уменьшение возможности различить уровни сигнала, соответствующие 0 и 1. Это может приводить к увеличению вероятности появления нескорректированной ошибки.

На рис. 2.24—2.30 показаны изменения частотной характеристики, вызванные типичными искажениями волнового фронта (абберациями); числовая апертура сканирующего объектива равна 0,40. Понятие о различных коэффициентах аббераций было дано ранее (см. формулу (2.48)).

На рис. 2.24 показано влияние дефокусировки на частотную характеристику. Ошибка волнового фронта  $W = W_{20}r^2$  приводит к аксиальному (по глубине) смещению  $\Delta z$  сканирующего пятна:

$$\Delta z = 2 \frac{W_{20}\lambda}{(\text{NA})^2}. \quad (2.56)$$

Глубина фокуса  $\Delta Z_f$  определяется условием  $|W_{20}| = 0,25$ , которое обеспечивает качество пятна, практически соответствующее дифракционно-ограниченному пределу. В оптической дисковой системе глубина фокуса обычно составляет 2 мкм и сервосистема

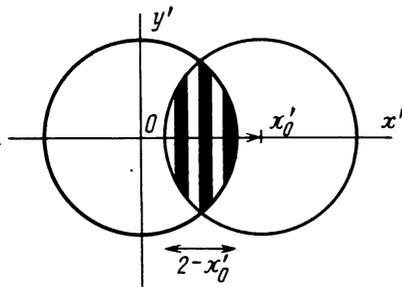


Рис. 2.25. Распределение интенсивности (картина прямых интерференционных полос) в плоскости детектора для случая расфокусированного сканирующего пятна

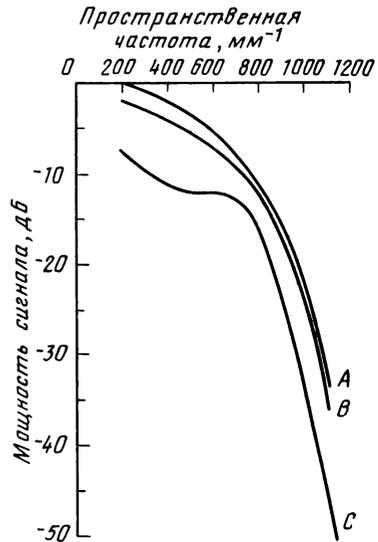


Рис. 2.26. Частотная характеристика при наличии в сканирующем пятне сферической aberrации различной величины. В каждом случае наилучшее положение фокуса выбрано из условия расфокусировки  $W_{20} = -W_{40}$ :  
 Кривая А — для  $W_{40} = 0.0$ ,  $\Delta = 0.00\lambda$ ; В —  $W_{40} = 1.0$ ,  $\Delta = 0.07\lambda$ ; С —  $W_{40} = 2.0$ ,  $\Delta = 0.14\lambda$

фокусировки должна поддерживать сканирующее пятно на таком расстоянии от поверхности диска, изменение которого не превышает глубины фокуса. Влияние расфокусировки на частотную характеристику особенно заметно на средних частотах, лежащих вблизи половины частоты отсечки  $\nu_{от}$  оптической системы. Провалы на частотной характеристике возникают из-за интерференции между нулевым и первыми порядками дифракции.

Локальная разность фаз между двумя смещенными порядками в случае расфокусировки находится с помощью формул на стр. 26, если учесть влияние изменяющегося (квадратичного) волнового фронта

$$\begin{aligned} \Delta\varphi(x', y', t) &= \psi_{10} + 2\pi\nu t + 2\pi W_{1,0}(x', y') - 2\pi W_{0,0}(x', y') = \\ &= \psi_{10} + 2\pi\nu t + 2\pi W_{20}[(x' - x'_0)^2 + y'^2] - 2\pi W_{20}(x'^2 + y'^2) = \\ &= \psi_{10} + 2\pi\nu t + 2\pi W_{20}x'_0^2 - 4\pi W_{20}x'_0 x' \end{aligned} \quad (2.57)$$

и если эта разность фаз является линейной функцией координаты  $x'$ . Максимальное изменение  $\Delta\varphi$  в области перекрытия определяется шириной  $|\Delta x'|$  в направлении  $x'$  (см. рис. 2.25):

$$|\Delta\varphi_{\max}| = 4\pi W_{20}x'_0 |\Delta x'| = 4\pi W_{20}x'_0(2 - x'_0). \quad (2.58)$$

Максимальное отклонение фазы будет при величине  $x'_0 = 1$ , что соответствует половине частоты отсечки. Изменяющаяся разность

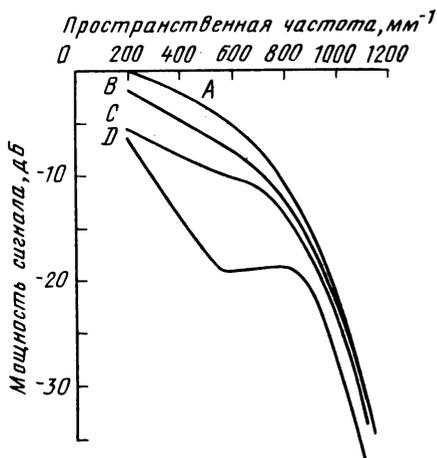


Рис. 2.27. Частотная характеристика при наличии в сканирующем пятне комы различной величины:  
Кривая *A* — для  $W_{31}=0,00$ ,  $\Delta=0,00\lambda$ ; *B* — для  $W_{31}=0,63$ ,  $\Delta=0,07\lambda$ ; *C* и *D* — для  $W_{31}=1,26$ ,  $\Delta=0,14\lambda$ .

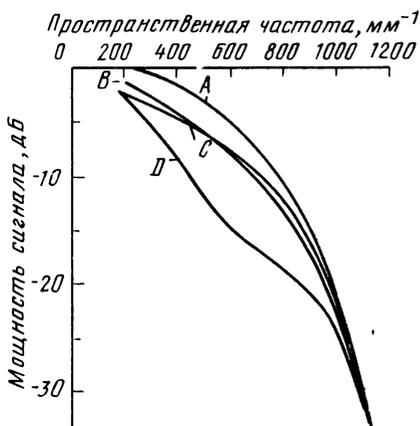


Рис. 2.28. Частотная характеристика при различной степени астигматизма сканирующего пятна. Влияние астигматизма не очень существенно, если выбрано наилучшее положение фокуса либо астигматическая линия перпендикулярна дорожке (кривые *B* и *C* соответственно). Если на поверхность диска фокусируется астигматическая линия, параллельная дорожке (кривая *D*), то наблюдается значительное ухудшение сигнала;  $W_{22}=0,35$ ,  $\Delta=0,07\lambda$ .

фаз  $\Delta\varphi(x', y')$  является причиной интерференционных полос, которые возникают в области перекрытия; это прямые линии в случае чистой расфокусировки. Величина  $\Delta\varphi_{\max}=2\pi$  вызывает почти полное усреднение сигнала в области перекрытия, и подстановка этой величины в (2.58) дает ( $x'_0=1$ )

$$\Delta\varphi_{\max}=2\pi=4\pi W_{20}, \quad W_{20}=0,50, \quad (2.59)$$

или расфокусировку на две глубины фокуса.

Интерференционные полосы при изменении расфокусировки ведут себя аналогично бегущей волне [см. уравнение (2.57)], и направление движения в плоскости детектора меняется на обратное, если расфокусировка меняет знак. Влияние сферической aberrации на частотную характеристику показано на рис. 2.26. Сферическая aberrация сканирующего пятна возникает либо

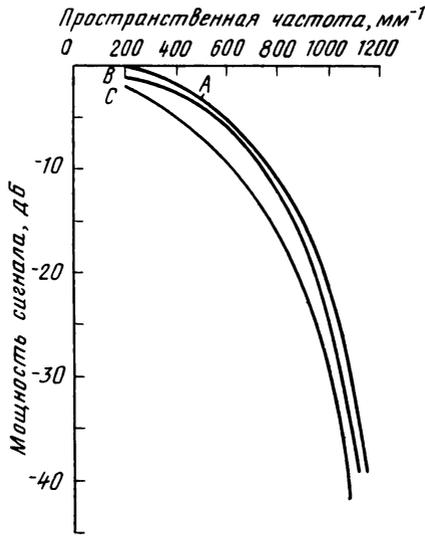


Рис. 2.29. Частотная характеристика при наличии нескольких остаточных aberrаций в падающей волне (кривая *B*). Кривая *C* соответствует добавлению дополнительной расфокусировки, равной одной глубине фокуса, т. е. ситуации, часто встречающейся на практике

из-за объектива (неправильного выбора толщин, расстояний либо коэффициентов преломления линз), либо из-за диска, если его толщина имеет отклонение от номинального значения.

Сферическая aberrация, вносимая плоскопараллельной пластиной, через которую проходит сходящийся пучок с числовой апертурой  $NA$ , описывается выражением

$$W_{40} = \frac{(n^2 - 1)}{8n^3} d (NA)^4, \quad (2.60)$$

где  $d$  — толщина пластины, а  $n$  — ее коэффициент преломления.

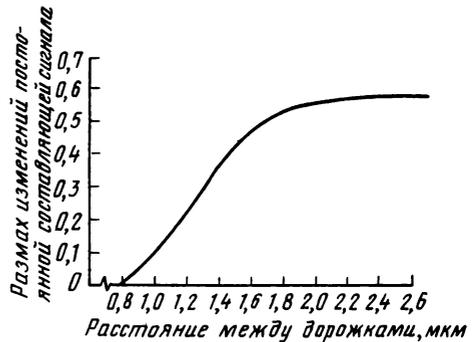


Рис. 2.30. Пределы изменений постоянной составляющей сигнала детектора при пересечении сканирующим пятном информационной дорожки

Таблица 2.1

Система	$\Delta d$ , мм	$n$	$\lambda$ , мкм	NA	$W_{40}$	Среднеквадратичное отклонение ОПД, $\lambda$
Laser Vision	0,1	1,50	0,63	0,40	0,18	0,013
Compact Disc	0,1	1,56	0,78	0,45	0,24	0,017
Цифровой диск	0,1	1,51	0,78	0,55	0,54	0,038

В оптической дисковой системе незначительная сферическая аберрация, вносимая подложкой диска, компенсируется объективом, который должен быть изготовлен таким образом, чтобы вносить такую же аберрацию противоположного знака. На практике проблемы возникают тогда, когда толщина диска имеет отклонения от своего стандартного значения ( $\Delta d$ ). Расчеты показывают резкую зависимость аберрации от значения числовой апертуры оптики.

Из табл. 2.1 видно, что при одном и том же отклонении толщин диска  $\Delta d$  увеличение числовой апертуры на 30% приводит к трехкратному возрастанию сферической аберрации. Для профессиональных применений, например цифровых оптических дисков, это приемлемо.

На рис. 2.27 представлена зависимость частотной характеристики от аберрации типа комы. Кома может возникнуть из-за объектива (децентрировка или наклон линз), а также из-за наклона диска при воспроизведении. Выражение для  $W_{31}$ , обусловленной наклоном диска, имеет следующий вид:

$$W_{31} = \frac{(n^2 - 1)}{2n^3} d (\text{NA})^3 \alpha, \quad (2.61)$$

где  $\alpha$  — угол наклона диска в радианах;  $d$  — толщина диска. Если  $d = 1,2$  мм,  $\lambda = 633$  нм и  $\text{NA} = 0,4$  (система Laser Vision), то  $W_{31} = 0,2$  для наклона диска  $0,5^\circ$ . На рис. 2.27 кривые построены для случаев, когда лепесток комы направлен вдоль дорожек (кривая  $D$ ) и перпендикулярно к ним (кривая  $C$ ). В первом случае влияние комы на частотную характеристику очень сильное, а во втором — значительно меньше. Однако лепесток комы (см. рис. 2.17) во втором случае направлен к соседней дорожке, что приводит к появлению перекрестных искажений сигналов дорожек. Это явление будет рассмотрено в разд. 2.4.

Сфокусированная астигматическая волна дает две смещенные вдоль оптической оси фокальные линии, перпендикулярные друг к другу. Между этими двумя фокальными линиями расположен «наилучший фокус» или «круг с наименьшими искажениями». При считывании одномерной структуры можно уменьшить влияние астигматизма путем расположения фокальной линии параллельно структуре. В оптических дисках считывается двумерная структура и оптимальное считывание в обоих основных направлениях при наличии астигматизма невозможно. На рис. 2.28 кри-

Т а б л и ц а 2.2

Аберрация	Источник	$\lambda$ , мкм	Среднеквадратичное отклонение ОДП, $\lambda$
$W_{40}$	Объектив	0,30	0,020
$W_{40}$	Диск; $\Delta d=0,05$ мкм	0,24	0,017
$W_{31}$	Диск; наклон $\alpha=0,5^\circ$	0,20	0,022
$W_{22}$	Остаточный астигматизм лазерного источника	0,05	0,008
$W_{22}$	Астигматизм поля зрения объектива	0,15	0,025
		Наилучший фокус	0,058

вая  $B$  соответствует позиции «наилучшего фокуса», а кривая  $C$  — случаю, когда фокальная линия перпендикулярна дорожкам. В этих случаях дорожки наилучшим образом разрешаются сканирующим пятном.

Реальные комбинации аберраций, которые могут возникать при считывании информации с диска, приведены в табл. 2.2. Частотная характеристика при считывании пятном такого качества показана на рис. 2.29 (кривая  $B$ ). При считывании с диска может возникать расфокусировка  $\Delta z=2$  мкм ( $W_{20}=0,25$ ); этой ситуации соответствует кривая  $C$ . Если провести сравнение с кривой  $C$  на рис. 2.24 ( $W_{20}=0,5$ ), то оказывается, что они практически совпадают в высокочастотной области. Это значит, что наличие аберраций обуславливает более жесткие допуски на расфокусировку при считывании, и в примере, рассмотренном выше, этот допуск уменьшается до величины, равной одной глубине фокуса объектива. Практически стремятся к получению суммарной аберрации для среднеквадратичного отклонения ОДП лучей, фокусируемых на диск, не более  $0,05\lambda$ . Неточности диска и небольшая дефокусировка приводят к увеличению этого значения до  $0,07...0,10\lambda$ , что соответствует практически дифракционно-ограниченному пятну. С увеличением расфокусировки и другими дефектами борются методами электронной обработки сигнала (компенсация выпадений в видеосигнале либо коррекция ошибок в цифровом сигнале).

В заключение обсудим зависимость уровня постоянной составляющей сигнала от величины радиальной ошибки слежения за дорожкой  $v_0$ . Уровень постоянной составляющей сигнала детектора пропорционален среднему значению светового потока, отражаемого диском, и получается в результате низкочастотной фильтрации сигнала детектора. Изменение уровня постоянной составляющей сигнала как функции ошибки слежения за дорожкой часто используется для получения сигнала управления сервосистемой слежения за дорожкой. На рис. 2.30 представлена зависимость максимальных отклонений постоянной составляющей сигнала от расстояния между дорожками. Стандартное расстояние между дорожками, равное приблизительно  $1,6$  мкм (соответствует про-

пространственной частоте  $600 \text{ мм}^{-1}$ ), близко к половине частоты отсечки  $\nu_{\text{от}}$  оптической системы. Более плотное расположение дорожек (например,  $1,2 \text{ мкм}$ ) приводит к неприемлемым ошибкам слежения за дорожкой из-за малой глубины модуляции и более жестким технологическим допускам при производстве диска. Кроме того, при повышенных значениях радиальной плотности дорожек до недопустимых величин возрастают перекрестные искажения между дорожками.

## 2.4. КАЧЕСТВО СИГНАЛА

В этом разделе рассматриваются отношение сигнал-шум и три других эффекта, определяющие качество сигнала.

Во-первых, рассчитана функциональная зависимость перекрестных искажений между дорожками от таких параметров, как качество сканирующего пятна, расстояние между дорожками, амплитудный или фазовый характер записи и т. д. Перекрестные искажения очень вредны в видеодисках.

Второе явление, характерное для видеодисков, — это генерация интермодуляционных составляющих спектра, обусловленных интерференцией несущей сигнала и поднесущих звука. Интермодуляционные составляющие возникают в том случае, когда процессы записи и формирования рельефа диска-оригинала отклоняются от оптимальных (см. гл. 5). Дополнительную нелинейность вносит финальный этап — считывание. В дальнейшем будет отмечено, какая форма пит и какие условия считывания обеспечивают минимальную интермодуляцию.

Наконец, рассматривается явление, характерное для считывания цифровых сигналов, — межсимвольная интерференция. Она обусловлена тем, что в оптической системе невозможен бесконечно малый (в пространстве) импульсный отклик системы, поскольку сканирующее пятно, определяющее отклик системы, представляет собой не точку, а имеет конечные размеры вследствие дифракции. Более того, имеется нелинейность оптической системы, обусловленная квадратичной зависимостью сигнала детектора от амплитуды света (комплексная амплитуда — интенсивность). Эти эффекты учитываются при расчете момента перехода от 0 к 1 в цифровом сигнале.

### 2.4.1. ПЕРЕКРЕСТНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

Из распределения интенсивности света в сканирующем пятне (см. рис. 2.17) видно, что небольшая часть света попадает на соседние дорожки и вызывает мешающие, нежелательные сигналы от этих дорожек (перекрестные искажения). Распределение амплитуды в сканирующем пятне (см., например, рис. 2.16) позволяет более адекватно описать перекрестные искажения, так как

мешающий сигнал возникает из-за интерференции света, падающего на соседнюю дорожку с нулевым порядком. Этот интерференционный эффект существенно усиливает перекрестные искажения.

Эффект смешения двух изображений (или видеокадров) отчетливо заметен глазом в том случае, когда интенсивность одного изображения превышает 1% интенсивности другого. Поэтому в демодулированном аналоговом видеосигнале уровень перекрестных искажений не должен превышать  $-40$  дБ по отношению к максимальному значению уровня белого основного сигнала. Приемлемый уровень перекрестных искажений в сигнале, считываемом с видеодиска, составляет  $-34$  дБ по отношению к основной несущей ЧМ-сигнала. Дифракционно-ограниченное сканирующее пятно может обеспечить такой уровень перекрестных искажений (при стандартном расстоянии между дорожками  $1,7$  мкм), однако наличие аберраций сразу же увеличивает перекрестные искажения. Случай пятна с комой, лепесток которой направлен к соседним дорожкам, наихудший. Кома может быть обусловлена наклоном оптического диска по отношению к оптической оси объектива. Перекрестные искажения видны на телевизионном экране в виде муаровых полос, которые непрерывно двигаются и меняют свою ориентацию. Простой модели диска для расчетов, которая давала бы удовлетворительные численные оценки для перекрестных искажений в рамках анализа Гопкинса, не существует [15].

Выберем последовательность пяти дорожек, каждая из которых содержит собственную, отличную от других частоту. Эта последовательность затем формально повторяется по всему диску, для того чтобы образовать периодичность в радиальном направлении (рис. 2.31); необходимо рассчитать частотный спектр сигнала детектора для различных радиальных положений сканирующего пятна. На видеодисках частоты соседних дорожек очень близки и находятся в диапазоне девиаций основной ЧМ-несущей. Наибольшее отличие возникает в том случае, когда участок дорожки, содержащий сигнал строчного синхроимпульса, расположен

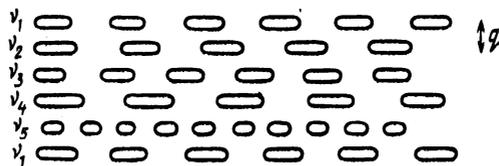


Рис. 2.31. Модель диска, использованная для расчета перекрестных искажений. Каждая дорожка содержит различные пространственные частоты (от  $v_1$  до  $v_5$ ), и данная последовательность дорожек повторяется в радиальном направлении. На мощность сигнала с частотой  $v_1$  практически не влияют дорожки с той же самой частотой, которые находятся на расстоянии пяти периодов дорожек

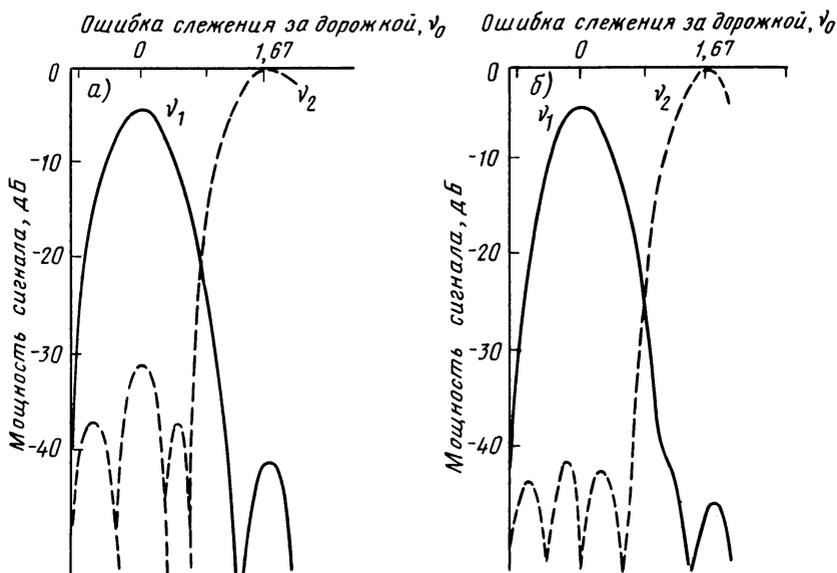


Рис. 2.32. Зависимость мощности сигнала на частотах  $\nu_1$  и  $\nu_2$  от радиального положения  $\nu_0$  для  $NA=0,40$  (а) и  $NA=0,45$  (б). Перекрестные искажения определены как отношение мощности сигнала на частоте помехи (возникающей из-за влияния соседней дорожки) и мощности сигнала на частоте, записанной на сканируемой дорожке. Для получения реального значения помехи предполагается, что ошибка слежения за дорожкой  $\nu_0$  не точно равна 0, а имеет остаточное значение 0,2 мкм. Аберрации сканирующего пятна те же, что и на рис. 2.29, с добавленной к ним расфокусировкой 2 мкм

рядом с участком дорожки, содержащим линию белого изображения; эта ситуация может возникнуть в видеодиске, записанном в режиме с постоянной линейной скоростью (см. гл. 7). Предельные частоты ЧМ-несущей в этом случае равны  $\nu_1=6,9$  МГц и  $\nu_2=7,9$  МГц, что соответствует пространственной частоте соответственно  $800$  и  $920$   $\text{мм}^{-1}$  при скорости сканирования  $8,6$   $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

На рис. 2.32, а показана мощность сигнала на частотах  $\nu_1$  и  $\nu_2$  для различных радиальных положений  $\nu_0$  сканирующего пятна. Идеальное, свободное от аберраций сканирующее пятно обеспечивает очень низкий уровень перекрестных искажений ( $< 40$  дБ). На практике остаточные аберрации объектива и наклон диска, вызывающий кому, уменьшают это значение. Значение коэффициента комы  $W_{31}=0,2$  допустимо, так как оно обеспечивает среднеквадратичное значение ОРХ  $0,022\lambda$ . Другие аберрации — те же, что и на рис. 2.29; дополнительно введена небольшая расфокусировка на величину половины глубины фокуса ( $W_{20}=1/8$ ). Расстояние между дорожками равно  $1,67$  мкм, а числовая апертура составляет  $0,40$ . Перекрестные искажения должны зависеть

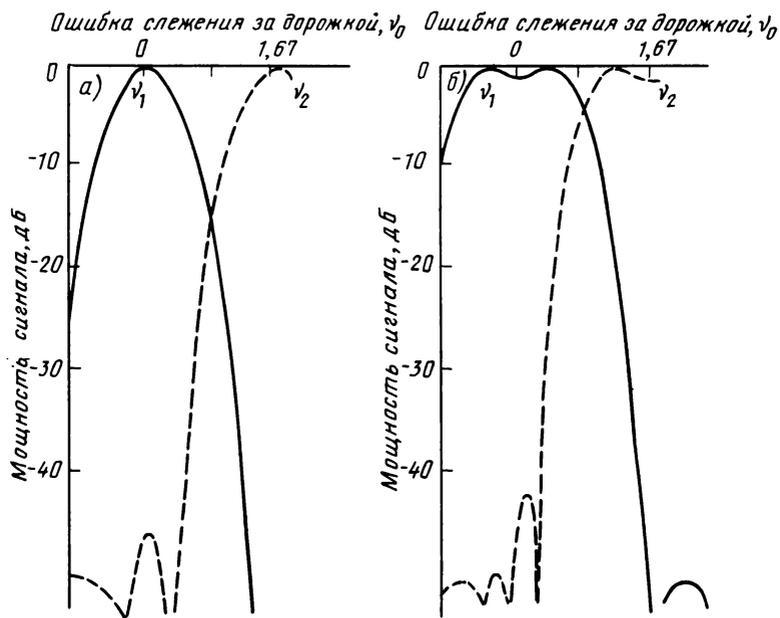


Рис. 2.33. Мощность сигнала на частотах  $\nu_1$  и  $\nu_2$  для случая амплитудной модуляции на диске (выжженные отверстия диаметром 1,0 мкм (а) и 1,5 мкм (б)). Числовая апертура равна 0,45

от размеров сканирующего пятна. На рис. 2.32, б числовая апертура увеличена до 0,45.

Ширина впадин на видеодиске обычно находится в пределах 0,5...0,7 мкм; слишком широкие или узкиепиты существенно снижают амплитуду переменной составляющей сигнала. Однако на цифровых дисках с выжженными отверстиями (или другими, чисто «амплитудными» эффектами) ширина (или радиус) отверстий должна быть равна ширине (или радиусу) пятна, для того чтобы получить максимальный сигнал. Очевидно, что с увеличением диаметра отверстия перекрестные искажения возрастают; это явление иллюстрируется на рис. 2.33 для случаев, когда выжженные отверстия (расположенные через 2 мкм) имели диаметры 1,0 (а) и 1,5 мкм (б) при расстоянии между дорожками 1,67 мкм.

Уровень перекрестных искажений зависит также от средней пространственной частоты информации и имеет тенденцию к увеличению с ростом пространственной частоты. Это становится понятным, если принять во внимание сужение на высоких пространственных частотах перекрытия областей нулевого и первых порядков дифракции, в первую очередь, в тангенциальном направлении, что, естественно, приводит к уменьшению сигнала. Однако на высоких пространственных частотах возникает существенное

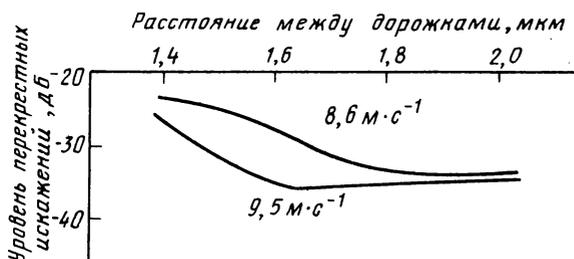


Рис. 2.34. Зависимость уровня перекрестных искажений от расстояния между дорожками при различных скоростях сканирования  $s$

сужение областей перекрытия и в радиальном направлении, а это значит, что эффективная площадь детектора уменьшается в радиальном направлении. Как указано в подразд. 2.2.2, малые значения площади детектора эквивалентны более когерентному режиму считывания информации, и, следовательно, малые сигналы, интерферирующие с существенно когерентной засветкой, становятся более резко выраженными.

На рис. 2.34 изображена зависимость рассчитанного уровня перекрестных искажений от расстояния между дорожками для двух скоростей сканирования ( $8,6$  и  $9,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ). При расчетах предполагалось, что диск находится под наклоном в  $1^\circ$ , т. е. рассмотрен наихудший случай расположения диска. В соответствии с требуемым уровнем перекрестных искажений была выбрана такая комбинация значений расстояния между дорожками и скоростью сканирования, которая дает наименьшее произведение, а следовательно, наибольшие пространственную площадь и время воспроизведения. Для относительно небольших расстояний между дорожками обычно увеличивают скорость сканирования, чтобы получить чистый выигрыш во времени воспроизведения. Если, например, допустим, что уровень перекрестных искажений  $-30$  дБ, то предпочтительнее выбрать скорость сканирования  $9,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  и расстояние между дорожками  $1,4$  мкм, чем соответственно  $8,6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  и  $1,65$  мкм. Помимо незначительного выигрыша во времени воспроизведения такой выбор обеспечивает лучшую передачу сигнала благодаря тому, что пространственные частоты записи на диске уменьшаются. Если требования к перекрестным искажениям более жесткие ( $< -35$  дБ), то необходимо увеличивать расстояние между дорожками, а влияние скорости сканирования уже несущественно. Все описанные выше расчеты были проверены экспериментально; полученные теоретические и экспериментальные данные показали хорошее согласие.

Были предложены методы уменьшения расстояния между дорожками, обеспечивающие при этом постоянный приемлемый уровень перекрестных искажений. Изменением глубины соседних дорожек можно изменять угол  $\psi_{10}$  от дорожки к дорожке приблизительно на  $90^\circ$  (рис. 2.35, а). Каждая дорожка в этом случае считывается собственным, оптимальным для нее способом, на-

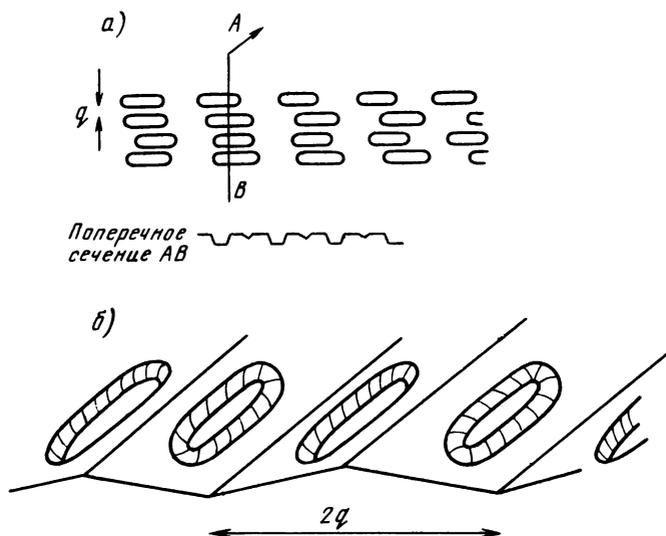


Рис. 2.35. Два метода уменьшения перекрестных искажений между дорожками или расстояния между дорожками при сохранении неизменным их уровня:  
 а — средняя глубина пит меняется от дорожки к дорожке; б — информация записана на склонах V-образных канавок

пример по методу центральной апертуры либо пушпульным; при этом соседняя дорожка «невидима», поскольку ее фазовый угол  $\psi_{10}$  отличается на  $90^\circ$  [4]. Методы центральной апертуры и пушпульный имеют различные оптические передаточные функции (см. рис. 2.12); усовершенствовать систему можно использованием для сдвигов фаз между половинами детектора значения не  $0$  (метод ЦА) и  $180^\circ$  (ПП метод), а  $+90$  и  $-90^\circ$  соответственно. В этом случае подавление перекрестных искажений также эффективно, поскольку частотные характеристики двух режимов считывания эквивалентны. Эксперименты показали, что при таком способе вполне возможно уменьшение расстояния между дорожками почти в 2 раза (от 1,67 до 0,90 мкм).

Другое предложение заключается в том, что запись производится на обоих склонах V-образной спиральной канавки (рис. 2.35, б) с обычным расстоянием между дорожками [20]. Этот метод эффективен в том случае, когда апертура детектора несколько больше, чем апертура сканирующего объектива, и используются соответствующие элементы детектора для считывания положительных или отрицательных склонов V-образной канавки на подложке.

#### 2.4.2. ИНТЕРМОДУЛЯЦИЯ

Основная часть спектрального диапазона видеосигнала занята сигналом яркости. Сигналы цветности и звука расположены в

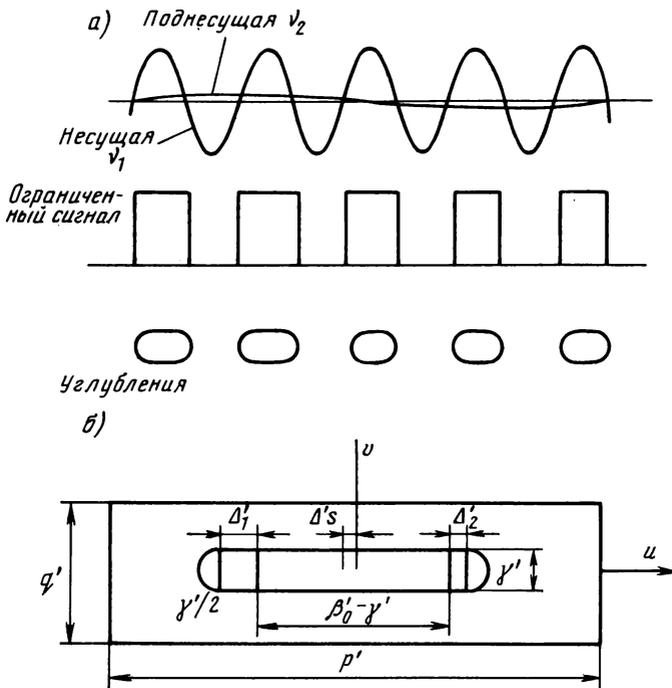


Рис. 2.36. Изменение во времени составного сигнала (а) и модель пита в случае широтно-импульсной модуляции сигнала (б). Наблюдается асимметричное удлинение или укорочение пит

нижней части спектрального диапазона. В ЧМ-сигнале, записываемом на диск, полоса сигнала цветности не отделена от сигнала яркости. Однако два сигнала звука сначала отделяются от видеосигнала, затем переносятся на специальные поднесущие и вновь складываются с основной ЧМ-несущей. На рис. 2.36, а показано изменение во времени такого составного сигнала [22]. После ограничения и усиления сигнала на частоте  $\nu_1$  (основная несущая) модуляция приобретает характер широтно-импульсной (ШИМ) в соответствии с относительно медленными изменениями амплитуды поднесущих (средняя частота  $\nu_2$ ). В [11] рассмотрен эффект воздействия ограничения на сумму двух синусоидальных сигналов. Смещение двух частот  $\nu_1$  и  $\nu_2$  и ограничение суммы приводят к получению последовательности импульсов с меняющейся длительностью (ШИМ). Спектр такого ограниченного сигнала содержит интермодуляционные составляющие (ИС). Частоты  $\nu_1 \pm 2\nu_2$  неизбежно присутствуют в спектре, а частоты  $\nu_1 \pm \nu_2$  присутствуют только в том случае, когда уровень отсечки ограничителя не равен среднему уровню сигнала (его постоянной составляющей). При этом наблюдается асимметрия сигнала, эквивалентная отклонению скважности от значения 0,50.

Процесс оптического считывания не является обратным по отношению к процессу ограничения, и, следовательно, возникают нелинейности, связанные с квадратичным характером детектирования. Однако наличие ИС на частотах  $\nu_1 \pm \nu_2$  не может быть непосредственно связано с понятием асимметрии или скважности углублений вдоль информационной дорожки, так как средний геометрический период двумерных углублений однозначно не определяется. В дополнение к этой неопределенности оптическая переходная характеристика сдвигается по отношению к геометрическому краю, как было показано в подразд. 2.2.2 для контрастного объекта.

Воспользуемся подходом, при котором рассчитываются положение и форма произвольного ( $m$ -го) углубления в дорожке диска-оригинала (на готовом, прессованном видеодиске форма пит может несколько отличаться, однако в общем случае можно учесть небольшое систематическое изменение средней длины пит). Фурье-преобразование функции отражения диска, представляющее собой сумму всех модулированных по длине углублений, дает дифракционные порядки диска. В принципе суммарная и разностная частоты  $\nu_1 \pm \nu_2$  присутствуют в спектрах дифракционных порядков [15].

Во время записи диска-оригинала энергия записывающего луча модулируется электрическим сигналом, который может быть представлен в виде суммы, состоящей из постоянной величины и функции, зависящей от времени; в пространственной системе координат эта функция описывается выражением

$$E(u) \propto \cos\left(\frac{2\pi u}{p'_1}\right) + \epsilon \cos\left(\frac{2\pi u}{p'_2}\right) + \epsilon_0, \quad (2.62)$$

где  $p'_1$  — период пит, а  $p'_2$  — период, соответствующий широтно-импульсной модуляции пит (поднесущей). Предполагается, что  $p'_2 \gg p'_1$ . Типичное значение множителя  $\epsilon$  — относительной величины амплитуды поднесущей — равно 0,10 (уровень — 20 дБ).

Член  $\epsilon_0$  описывает нежелательные изменения записывающего сигнала и определяет среднюю длину пит, модулированных широтно-импульсным методом. Средняя длина пита равна  $\beta'_0$ , а ее значение можно получить, пренебрегая медленно меняющимся членом  $\epsilon \cos(2\pi u/p'_2)$  в (2.62) и приравнявая  $E(u) = 0$ . Положение стенок пита в тангенциальном направлении определяется выражением

$$\cos(\pi\beta'_0/p'_1) = -\epsilon_0. \quad (2.63)$$

Если  $\epsilon_0 = 0$ , то отношение  $\beta'_0/p'_1$  (скважность) равно 0,5. Положение стенок  $m$ -го пита (если его центр близок к  $u = mp'_1$ )

$$\cos\left(\frac{2\pi[m p'_1 + (\beta'_0/2) + \Delta l]}{p'_1}\right) + \epsilon \cos\left(\frac{2\pi[m p'_1 + (\beta'_0/2) + \Delta l]}{p'_2}\right) = -\epsilon_0, \quad (2.64a)$$

и

$$\begin{aligned} & \cos \left( \frac{2\pi[m\rho'_1 - (\beta'_0/2) - \Delta'_2]}{\rho'_1} \right) + \\ & + \varepsilon \cos \left( \frac{2\pi[m\rho'_1 - (\beta'_0/2) - \Delta'_2]}{\rho'_1} \right) = -\varepsilon_0, \end{aligned} \quad (2.64)$$

где  $\Delta'_1$  и  $\Delta'_2$  показаны на рис. 2.36, б. Приближенное решение уравнений (2.64) для малых значений аргумента имеет следующий вид:

$$\Delta'_1 = -\frac{\varepsilon}{2\pi} \rho'_1 \cos \left( \frac{2\pi[m\rho'_1 + (\beta'_0/2)]}{\rho'_2} \right), \quad (2.65)$$

$$\Delta'_2 = -\frac{\varepsilon}{2\pi} \rho'_1 \cos \left( \frac{2\pi[m\rho'_1 - (\beta'_0/2)]}{\rho'_2} \right),$$

при этом предполагается, что  $\varepsilon \ll 1$  и  $\Delta' \ll \beta'$ , что справедливо для малых амплитуд широтной модуляции ( $\varepsilon \ll 1$ ). Смещение центра  $m$ -го пика

$$\Delta's = \frac{\Delta'_1 - \Delta'_2}{2} = \varepsilon \frac{\rho'_1}{\rho'_2} \beta'_0 \sin \left( 2\pi m \frac{\rho'_1}{\rho'_2} \right), \quad (2.66)$$

прирост его длины

$$\Delta\beta' = \Delta'_1 + \Delta'_2 = -\frac{\varepsilon}{\pi} \rho'_1 \cos \left( 2\pi m \frac{\rho'_1}{\rho'_2} \right). \quad (2.67)$$

С помощью этих значений положения и длины произвольного  $m$ -го пика можно рассчитать дифракционные порядки и в конце концов — спектр сигнала детектора. На практике изменение усредненной длины углубления неразрывно связано с одновременным изменением его ширины и наклона стенок (см. гл. 5).

На рис. 2.37 представлены так называемые асимметричные компоненты рассчитанных сигналов, которые соответствуют нескольким уровням мощности излучения на этапе записи диска оригинала. Уровень меняется в пределах 0,7...1,3 от среднего значения. Рассчитанные величины находятся в очень хорошем согласии с измеренными. Видно, что минимум интермодуляции наблюдается при различных уровнях для частот  $(\nu_1 - \nu_2)$  и  $(\nu_1 + \nu_2)$ . Следует ожидать, что из-за особенностей оптической частотной характеристики мощность на частоте  $(\nu_1 - \nu_2)$  будет больше, чем мощность компоненты  $(\nu_1 + \nu_2)$ . Существует область, в которой ситуация обратная. Электронная коррекция оптической частотной характеристики, которая вводит предискажения  $(\nu_1 + \nu_2)$  относительно  $(\nu_1 - \nu_2)$ , еще больше увеличивает разность мощностей этих компонент, к которой модуляция ЧМ-сигнала особенно чувствительна. Заметность интермодуляции на телевизионном экране в этом случае возрастает. Успешно подавить интермодуляционные искажения можно в том случае, когда ИС имеют не минимальное значение, а соответствующую разницу мощностей, которую можно

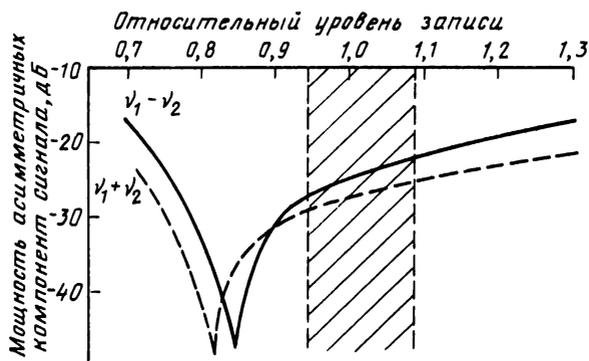


Рис. 2.37. Зависимость асимметричных компонент ИС $_{\nu_1 - \nu_2}$  и ИС $_{\nu_1 + \nu_2}$  от уровня записи на этапе изготовления диска-оригинала. Заштрихованная область соответствует наименьшей заметности интермодуляционных помех на телевизионном экране

рассчитать на основе оптической частотной характеристики (заштрихованная область на рис. 2.37).

Объяснить предыдущие данные можно с помощью рис. 2.38, на котором изображены дифракционные порядки  $R_0$ ,  $R_{\nu_1}$ ,  $R_{\nu_1 - \nu_2}$ ,  $R_{\nu_2}$ ,  $R_{-\nu_2}$  и области их перекрытия, например на правой части детектора. Интермодуляционные составляющие на частотах  $\nu_1 \pm \nu_2$  возникают вследствие интерференции дифракционных порядков

$$\begin{array}{l}
 \text{ИС}_{\nu_1 - \nu_2} \quad R_0 R_{\nu_1 - \nu_2} \quad A + B + C + D, \\
 \quad \quad \quad R_{\nu_1} R_{\nu_2} \quad A + C + D, \\
 \text{ИС}_{\nu_1 + \nu_2} \quad R_0 R_{\nu_1 + \nu_2} \quad A + D, \\
 \quad \quad \quad R_{\nu_1} R_{-\nu_2} \quad A + C.
 \end{array} \quad (2.68)$$

Для упрощения рисунка предполагается, что комплексные амплитуды дифракционных порядков выражаются действительным чис-

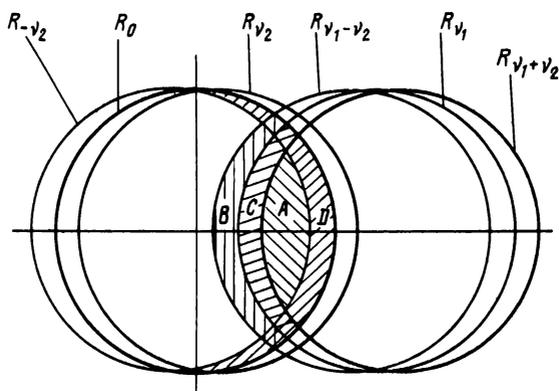


Рис. 2.38. Составные части дифракционных порядков, которые дают вклад в мощность интермодуляционных составляющих ИС $_{\nu_1 - \nu_2}$  и ИС $_{\nu_1 + \nu_2}$

лом и разность фаз между нулевым и высшими порядками равна точно  $\pi$ .

Асимметричные порядки  $R_{v_1-v_2}$  и  $R_{v_1+v_2}$  равны нулю, если воспринимаемая сканирующим световым пятном скважность углублений равна 50%. Оптическая нелинейность, обусловленная интерференцией  $R_{v_1}$  и  $R_{v_2}$  или  $R_{v_1}$  и  $R_{-v_2}$ , приводит к появлению отличных от нуля ИС.

Малые значения интермодуляции возможны при компенсации асимметрии углублений оптической нелинейностью. Если сигналы, вызванные интерференцией дифракционных порядков пронормировать по отношению к соответствующим областям перекрытия, то согласно выражениям (2.68) можно получить

$$\begin{aligned} \text{ИС}_{v_1-v_2} &= -R_0 R_{v_1-v_2} (A+B+C+D), \\ &\quad + R_{v_1} R_{v_2} (A+C+D), \\ \text{ИС}_{v_1+v_2} &= -R_0 R_{v_1+v_2} (A+D), \\ &\quad + R_{v_1} R_{-v_2} (A+C). \end{aligned} \quad (2.69)$$

Если порядки  $R_{v_1-v_2}$  и  $R_{v_1+v_2}$ , а также  $R_{v_2}$  и  $R_{-v_2}$  имеют одинаковые амплитуды, то в соответствии с (2.69)

$$\text{ИС}_{v_1-v_2} = 0, \text{ если } R_{v_1 \pm v_2} = \frac{(A+C+D)}{(A+B+C+D)} \frac{R_{v_1} R_{v_2}}{R_0}, \quad (2.70)$$

$$\text{ИС}_{v_1+v_2} = 0, \text{ если } R_{v_1 \pm v_2} = \frac{(A+C)}{(A+D)} \frac{R_{v_1} R_{v_2}}{R_0}.$$

Из (2.70) видно, что  $\text{ИС}_{v_1-v_2}$  и  $\text{ИС}_{v_1+v_2}$  становятся равными нулю при различных значениях амплитуды порядков  $R_{v_1 \pm v_2}$ . Эти порядки связаны со средней длиной углублений, и поэтому одновременное подавление ИС невозможно. Однако очевидно, что эффективное подавление зависит от отношения частот  $v_2/v_1$ , которое определяет размеры областей перекрытия.

Практически удается получить подавление ИС до уровня  $-40$  дБ, что делает их фактически незаметными на экране телевизора. Трудность подавления перекрестных искажений существенно возрастает, если средняя частота пит на диске достигает оптической пространственной частоты отсечки. На практике частота ЧМ-несущей сигнала не должна превышать предел, равный 70% частоты отсечки.

#### 2.4.3. МЕЖСИМВОЛЬНАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

В подразд. 2.4.1 обсуждалось воздействие перекрестных искажений на аналоговый сигнал типа видеосигнала. Цифровой (бинарный) сигнал не очень чувствителен к небольшим вариациям амплитуды, вызывающим перекрестные искажения, если их уровень не превышает  $-25$  дБ. Однако положение перехода от 0 к 1 и на-

оборот в цифровом сигнале (фронт импульса) должно быть определено с очень большой точностью. При способе модуляции 8/14, который применяется в системе Compact Disc (см. гл. 7), регулируемое оптическим методом положение перехода может отклоняться от его истинного положения не более чем на  $\pm 0,5$  длины тактового импульса. Следовательно, ошибка перехода  $\Delta\xi$  в тангенциальном направлении

$$\Delta\xi = \pm 0,5sT_T = \pm 0,5 \frac{1,25}{4,32 \cdot 10^6} = \pm 0,6 \text{ мкм}, \quad (2.71)$$

где  $s$  — скорость сканирования;  $T_T$  — период тактового импульса. Переход, смещенный по тем или иным причинам из этого допустимого интервала, вызывает появление ошибки. Отклонения момента перехода в основном обусловлены конечными размерами сканирующего пятна в направлении дорожки. Положение зарегистрированного перехода в потоке информации зависит от цифровых данных, которые предшествовали и следуют после сигнала, существующего в данный момент. Это явление называется межсимвольной интерференцией, однако с тем же успехом его можно назвать взаимовлиянием пит в тангенциальном направлении.

Межсимвольная интерференция (МСИ) вызывает сужение «глазков» на глазковой диаграмме цифровых сигналов, что увеличивает вероятность появления ошибки. Для оценки вклада оптики в МСИ, а затем и в увеличение вероятности появления ошибочных бит необходимо провести расчеты оптического сигнала для большого числа различных последовательностей данных на диске. На основании этих данных можно получить среднеквадратичное значение фазового дрожания, обусловленного оптическим считыванием. Если это оптическое «дрожание» добавить к другим источникам шума, то возможно предсказать вероятность появления ошибки. Однако это связано с большими объемом вычислений и затратами времени, требующимися для расчетов, основанных на методе Монте-Карло.

Наложением друг на друга расчетных графиков сигналов от различных последовательностей пит можно получить расчетную глазковую диаграмму и оценить качество цифрового сигнала. Экспериментально такая картина получается на экране осциллографа при подаче на его вход считываемого с оптического диска цифрового сигнала и синхронизации развертки луча осциллографа от тактовой частоты.

На рис. 2.39, а показана глазковая диаграмма при идеальном оптическом считывании; даже в этом случае уже появляется ухудшение частотной характеристики в соответствии с идеальной ОПФ (см., например, кривую А на рис. 2.24). Оптические ограничения на полосу пропускания определяют максимально возможный наклон зависимости тока детектора от пространственной координаты  $\xi$  в соответствии с равенством [19]

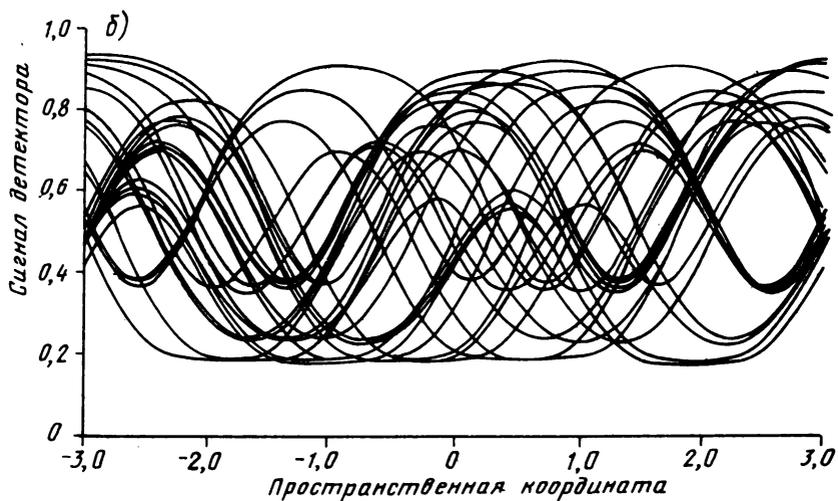
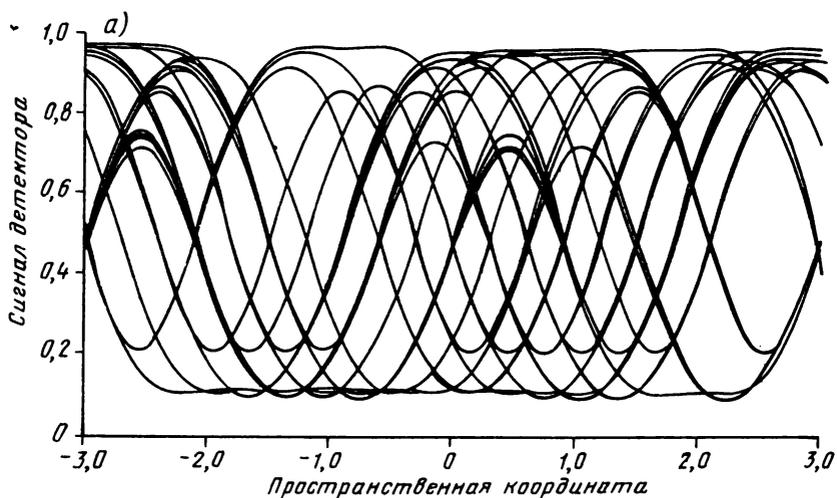


Рис. 2.39. Рассчитанные глазковые диаграммы, которые получаются при наложении сигналов детектора от нескольких различных последовательностей пит на диске для идеальной оптической системы считывания (а) и при считывании астигматическим пятном (б). Эти последовательности построены в соответствии с алгоритмом модуляции 8/14, который принят для системы Compact Disc. Расстояние между двумя переходами (ширина «глазка») равно 0,3 мкм. Одно деление горизонтальной шкалы соответствует 1 мкм

$$\frac{di}{d\xi} = 1,6i_{\max} \frac{NA}{\lambda}, \quad (2.72)$$

где  $i_{\max}$  — максимальное изменение тока детектора при изменении коэффициента отражения от 0 до 100%. Числовая апертура объектива проигрывателя системы Compact Disc обычно равна 0,45, а длина волны излучения лазера на основе GaAlAs — 0,80 мкм.

Серьезные искажения глазковой диаграммы наблюдаются при наличии аберраций, увеличивающих размеры пятна вдоль дорожки, и соответственно МСИ. На рис. 2.39, б показана расчетная глазковая диаграмма при считывании информационной дорожки астигматическим световым пятном, фокальная линия которого параллельна дорожке и расположена на поверхности диска (астигматический коэффициент  $W_{22}=0,35$ ). Глазковая диаграмма сильно размыта, а эксперимент показывает, что в данном случае наблюдается недопустимо высокое значение вероятности появления нескорректированной ошибки. «Глазки» суживаются, увеличивается фазовое дрожание из-за удлиненного сканирующего пятна и соответственно менее крутого наклона переходной характеристики.

Так же как и в видеодисковых системах, в которых коррекция ОПФ осуществляется электронными средствами, переходную характеристику в системе Compact Disc делают круче с помощью так называемых выравнивающих фильтров. Амплитудно-частотная характеристика (модуль) такого фильтра представлена на рис. 2.40. Уровень средних частот поднимают в 2 раза по сравнению с уровнями низких и высоких частот. Переходные характеристики в идеальном случае ( $W=0$ ) и в случае сканирования астигматическим пятном ( $W_{22}=0,35$ ) показаны на рис. 2.41 при детектировании без выравнивающего фильтра (а) и с выравнивающим фильтром (б). Выравнивание делает переходную характеристику круче, однако в то же время несколько увеличивается МСИ из-за появления неравномерности вершин импульсов. На рис. 2.42 показаны

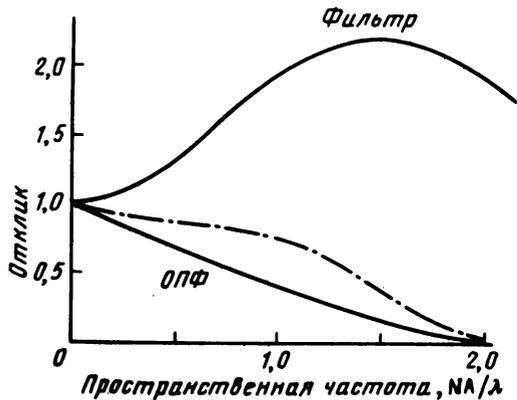


Рис. 2.40. Оптическая передаточная функция и АЧХ выравнивающего фильтра (откорректированная ОПФ тракта изображена штрихпунктирной линией)

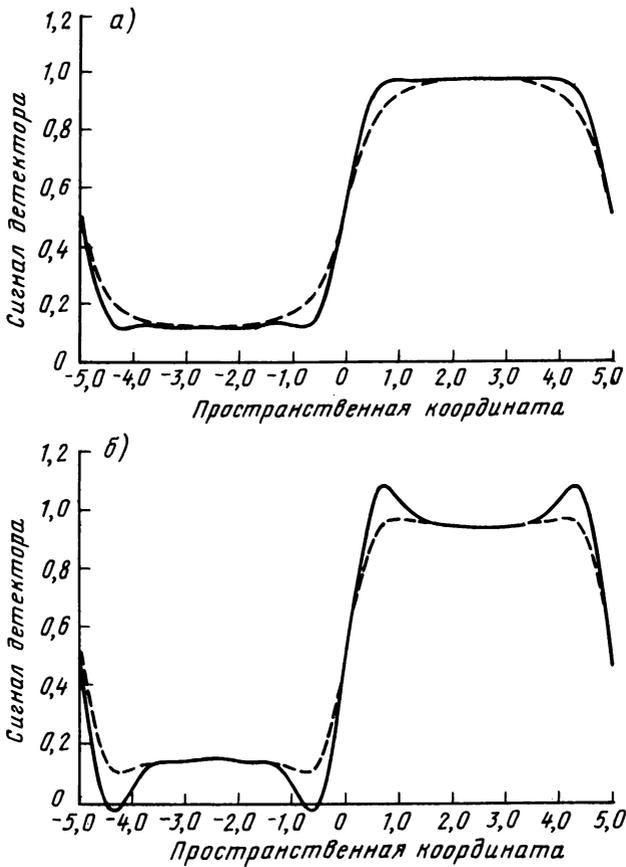


Рис. 2.41. Переходная характеристика оптической воспроизводящей системы для сканирования идеальным (---) и астигматическим (—) пятном при чисто оптическом детектировании (а) и детектировании с электронным выравнивающим фильтром (б)

глазковые диаграммы для тех же исходных данных, что и на рис. 2.39, но с включенным выравнивающим фильтром. Дрожание переходов больше в случае идеального сканирующего пятна, однако оно существенно уменьшается, если диск сканируется астигматическим пятном (фокальной линией).

Наконец, на рис. 2.43 изображены случаи, когда «глазки» полностью пропадают как при наличии, так и при отсутствии выравнивающего фильтра. Расфокусировка сканирующего пятна (без аберраций) равна удвоенной глубине фокуса ( $W_{20}=0,50$ ,  $\Delta z=4$  мкм). В этом случае качественное воспроизведение цифрового сигнала может быть достигнуто только с помощью корректирующего ошибки цифрового кодирования.

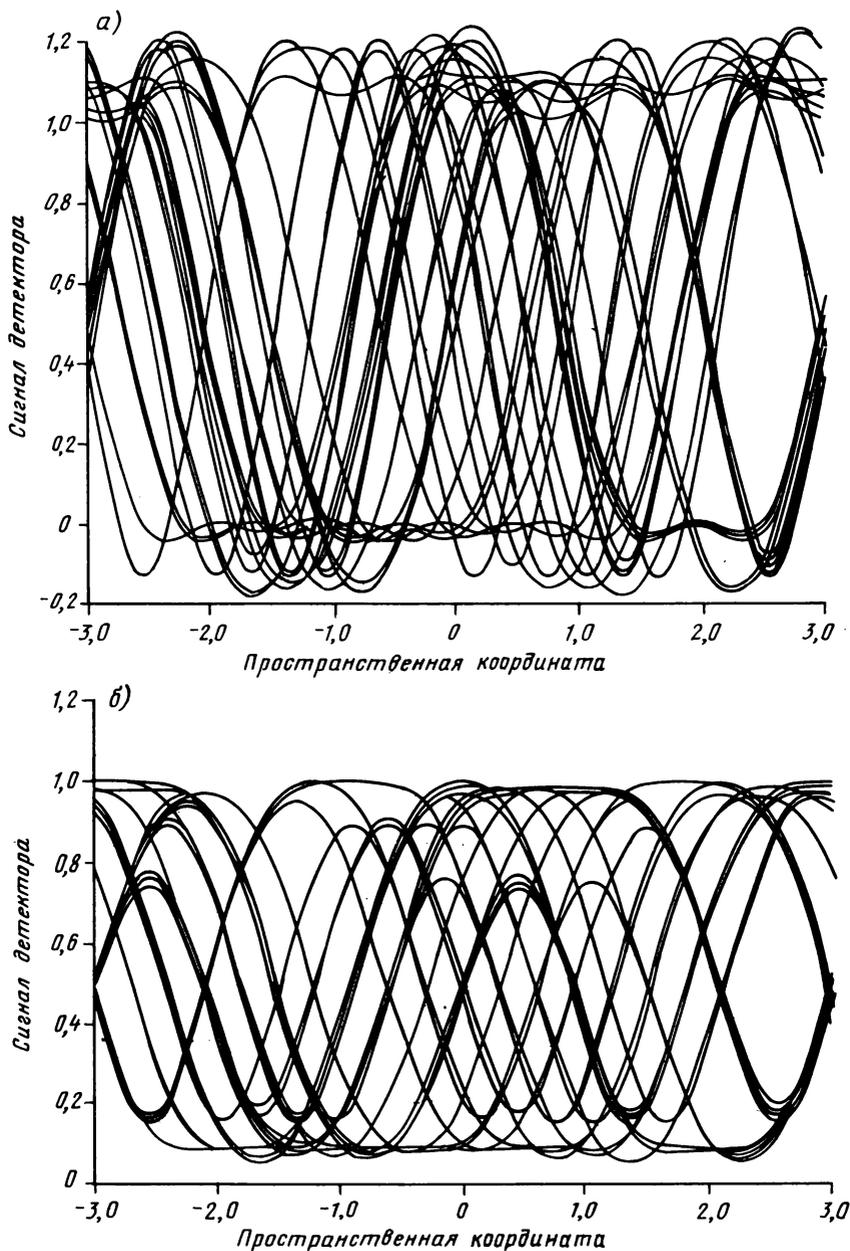


Рис. 2.42. Глазковые диаграммы для тех же исходных данных, что и на рис. 2.39, но с выравнивающим фильтром, введенным в схему детектора, при сканировании идеальным пятном (а) и астигматической линией (б)

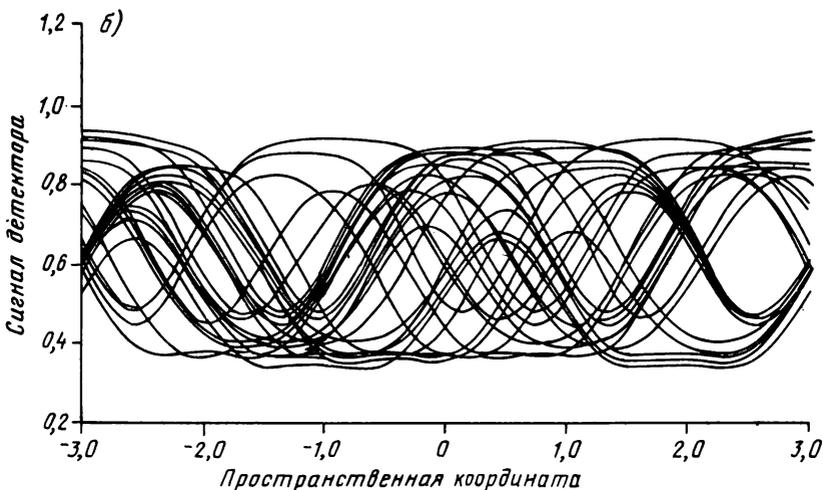
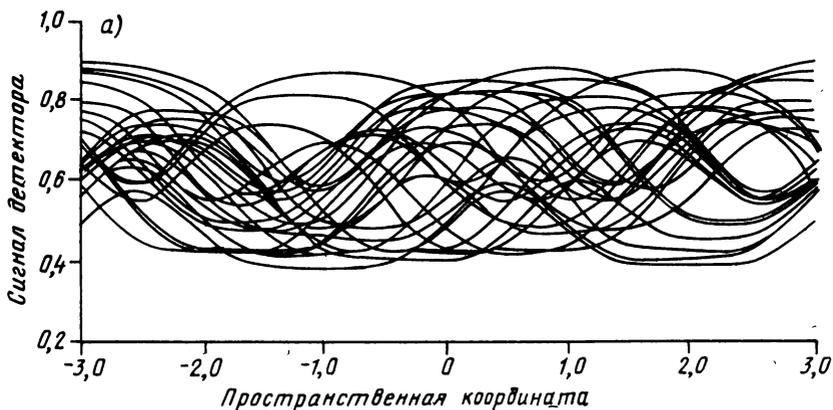


Рис. 2.43. Глазковые диаграммы в случае сильно расфокусированного сканирующего пятна (4 мкм) при отсутствии (а) и при наличии (б) выравнивающего фильтра. Несмотря на то, что на картинке (б) заметно улучшение ОПФ, точное воспроизведение цифрового сигнала может быть осуществлено только с помощью электронной коррекции ошибок, возникающих из-за значительного фазового дрожания фронтов сигнала

#### 2.4.4. ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ-ШУМ

Общая мощность шума в сигнале детектора в оптической дисковой системе является суммой нескольких составляющих, имеющих различную физическую природу, а именно:

- а) темновой шумовой ток детектора;
- б) фотонный дробовой шум;
- в) шум электронного усилителя;

г) шум, вызванный микронеровностями оптического диска (присутствующими также на областях без записи);

д) шум из-за неоднородности элементов записи (углублений пит) на видео- и аудиодисках или магнитных доменов на оптических цифровых дисках).

Принципиальное ограничение определяется дробовым фотонным шумом, а технологические ограничения — микронеровностями поверхности подложки диска. Доминирующим источником шума обычно является неоднородность элементов записи, особенно при записи на непрофессиональном оборудовании\*.

В случае тиражируемых аналоговых видеодисков наиболее существенными источниками шума являются фотонный дробовой шум и шум микронеровностей, подробно рассматриваемые ниже. Для дисков с цифровой информацией отношение сигнал-шум не является критическим параметром.

**Фотонный дробовой шум.** При попадании потока света со средней мощностью  $P_d$  на детектор фотоны генерируют фотоэлектроны с определенной квантовой эффективностью  $\eta_k$  (обычно близкой к единице). Фотоны попадают на детектор нерегулярно; интервал времени между попаданиями отдельных фотонов подчиняется статистике Пуассона. Среднее значение тока детектора

$$i_{cp} = \eta_k \frac{P_d}{h\nu} e = Ne, \quad (2.73)$$

где  $N$  — число фотоэлектронов в секунду;  $e$  — заряд электрона;  $h\nu$  — энергия фотона.

За время наблюдения  $\tau$  число актов генерации фотоэлектронов  $N' = N\tau$ .

$$(2.74)$$

Стандартный разброс пуассоновского статистического процесса равен корню квадратному из числа событий (отсчетов) за период наблюдения. Следовательно, стандартное отклонение тока детектора подчиняется равенству

$$\sigma_i = \sqrt{N\tau} \frac{e}{\tau},$$

а среднее квадратичное значение

$$\overline{i_n^2} = \sigma_i^2 = N\tau \frac{e^2}{\tau^2} = \frac{ei_{cp}}{\tau}. \quad (2.75)$$

Ширина полосы измерения связана с временем наблюдения  $\tau$   $B = 1/2\tau$  [1], что для среднеекватратичных значений тока детектора дает

$$i_n^2 = 2Be i_{cp}. \quad (2.76)$$

\* Запись цифровой информации в домашних условиях.— Прим. перев.

Если глубина модуляции сигнала равна  $m$ , то мощность сигнала синусоидальной несущей частоты пропорциональна  $1/2m^2i_{cp}^2$  и отношение несущая-шум

$$\text{ОНШ} = m^2 i_{cp} / 4Ve. \quad (2.77)$$

Отношение сигнал-шум получается путем интегрирования сигнала и мощности шума в эффективной полосе сигнала, а затем нахождения частного от деления этих величин.

Для видеодисковой системы мощность фотонного шума должна быть по крайней мере на 65 дБ (в  $3 \cdot 10^6$  раз) меньше, чем мощность сигнала несущей при нормированной ширине полосы измерения  $B=30$  кГц [13]. Если глубина модуляции равна 0,15, а квантовая эффективность 0,8, то мощность светового потока на детекторе в соответствии с (2.73) и (2.77)

$$P_d \geq \frac{4B(h\nu)\text{ОНШ}}{\eta_k m^2}, \quad (2.78)$$

а в численном виде ( $\lambda=633$  нм)

$$P_d \geq 15 \text{ мкВт}.$$

Если предположить, что от источника света через оптический канал и диск к детектору доходит 10% излучения, то должен быть использован источник излучения мощностью

$$P_{ист} \geq 150 \text{ мкВт}. \quad (2.79)$$

В соответствии с законами фотометрии мощность света  $P$ , сконцентрированная в когерентном сканирующем пятне,

$$P = L\Omega S, \quad (2.80)$$

где  $L$  — яркость источника;  $\Omega$  — телесный угол сходящейся волны;  $S$  — площадь сканирующего пятна. Произведение  $\Omega S$  имеет порядок  $\lambda^2$  [13]. Подстановкой уравнения (2.79) в (2.80) для минимально допустимой яркости источника получаем

$$L \geq \frac{150 \cdot 10^{-6}}{(0,633 \cdot 10^{-4})^2} = 40\,000 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{ср}^{-1}. \quad (2.81)$$

Эта величина настолько велика, что классические источники света совершенно непригодны для считывания видеодисков.

Отношение несущая-шум, требуемое для считывания информации с цифровых дисков, например компакт-дисков, должно составлять приблизительно 45 дБ в полосе 30 кГц. В данном случае достаточна яркость источника  $400 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ . Однако даже такие альтернативные источники, как ртутная лампа или подвижное светящееся пятно высокоэффективных ЭЛТ, находятся на пределе своих возможностей и технически нерациональны. Требования к мощности (или яркости) источника излучения, предъявляемые оптическими дисковыми системами, легко выполняются только в случае применения He—Ne-лазера или лазера на основе GaAlAs.

**Микронеровности подложки.** Существует несколько методов получения характеристик микронеровностей поверхности. Сканирование поверхности особо чувствительными механическими зондами дает информацию о шероховатости только в одном направлении. Интерферометрические измерения также дают точные данные о шероховатости. Однако наиболее полный метод получения характеристик двумерных неровностей поверхности — измерения направленности интенсивности света, рассеянного поверхностью. При сканировании оптического диска часть света рассеивается на микронеровностях гладкой поверхности, несущей информационные питы, и эта часть когерентно интерферирует с излучением, рассеянным питами. Это приводит к появлению шумового фона, наложенного на полезный сигнал. Чтобы проанализировать шум сигнала, рассмотрим эффекты рассеяния света фазовой решеткой с очень малой высотой структуры. Для отражающей подложки диска с мелкой фазовой решеткой выражение для амплитуды поля имеет вид

$$A(\xi, \eta) = \exp \left[ \frac{i4\pi nd}{\lambda} \cos \left( \frac{2\pi\xi}{p_\xi} \right) \right] \approx$$

$$\approx 1 + \frac{i4\pi nd}{\lambda} \cos \left( \frac{2\pi\xi}{p_\xi} \right) - 8\pi^2 n^2 \frac{d^2}{\lambda^2} \cos \left( \frac{4\pi\xi}{p_\xi} \right), \quad (2.82)$$

где  $d$  — высота структуры фазовой решетки;  $p_\xi$  — период в направлении  $\xi$ ;  $\lambda/n$  — длина волны света в подложке. Дифракционные порядки такой решетки имеют амплитуды:

$$R_0 = 1,$$

$$R_{\pm 1} = i2\pi nd/\lambda, \quad (2.83)$$

$$R_{\pm 2} = -4\pi n^2 d^2/\lambda^2.$$

При считывании с такой мелкой фазовой решетки методом центральной апертуры [см. (2.19) — (2.21)] первое приближение не дает никакой информации из-за того, что фазовый угол  $\psi_{10}$  точно равен  $\pi/2$ . Второе приближение, учитывающее взаимную интерференцию между первыми порядками, а также между нулевым и вторыми порядками дает временную зависимость воспроизведенного сигнала:

$$i_{\text{ЦА}}(t) = \frac{8\pi^2 n^2 d^2}{\lambda^2} \text{ОПФ}(2\nu) \cos 4\pi\nu t, \quad (2.84)$$

где  $\nu$  — временная частота, связанная с пространственным периодом  $p_\xi$ . Этот способ приводит к появлению в сигнале удвоенной частоты.

Воспроизведение пушпульным (двухтактным) методом в приближении малых сигналов приводит к появлению составляющих в соответствии с (2.24): ПП детектирование разработано для

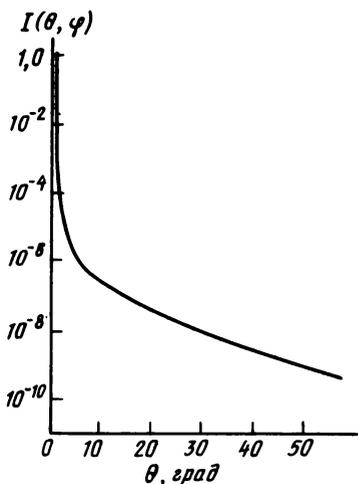


Рис. 2.44. Зависимость интенсивности света  $I(\theta, \varphi)$ , рассеянного полированной металлизированной поверхностью, от угла рассеяния  $\theta$  при  $\varphi=0$  и  $d\Omega=2 \cdot 10^{-5}$  ср

улучшения сигнала в случае мелких фазовых структур. Для угла  $\varphi_{10} = \pi/2$  уравнение (2.24) записывается как

$$i_{\text{ПП}}(t) = \frac{8\pi n d}{\lambda} |\text{ОПФ}(\nu) - \text{ОПФ}(2\nu)| \cdot \sin(2\pi\nu t). \quad (2.85)$$

Двигаясь по поверхности с двумерными случайными микронеровностями, можно рассчитать мощность шума, содержащуюся в определенной полосе при считывании методами ЦА и ПП. Проанализировать шероховатые поверхности можно по измеренной зависимости мощности рассеянного света от угла рассеяния. На рис. 2.44 показана зависимость интенсивности рассеянного света, нормированной по отношению к интенсивности зеркального отражения, от угла рассеяния. Главное направление рассеяния  $(\theta, \varphi)$  связано с компонентами пространственной частоты  $(f_{\xi}, f_{\eta})$  на произвольной поверхности соотношениями

$$f_{\xi} = (\sin \theta \cos \varphi) / \lambda; \quad f_{\eta} = (\sin \theta \sin \varphi) / \lambda, \quad (2.86)$$

а интенсивность рассеянного света  $I(\theta, \varphi)$  в направлении, задаваемом углами  $(\theta, \varphi)$ , пропорциональна спектру мощности шума  $S(f_{\xi}, f_{\eta})$  в соответствии с равенством

$$S(f_{\xi}, f_{\eta}) = \frac{I(\theta, \varphi)}{\lambda^2 \Delta f_{\xi} \Delta f_{\eta} I_{\text{отр}}}, \quad (2.87)$$

где  $I_{\text{отр}}$  — мощность зеркального отраженного света. Величина

$$\lambda^2 \Delta f_{\xi} \Delta f_{\eta} = d\Omega \quad (2.88)$$

определяет телесный угол, перекрываемый детектором в процессе измерений. Увеличение пространственной полосы пропускания  $\Delta f_{\xi}$

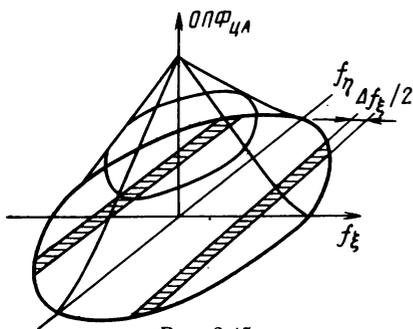


Рис. 2.45

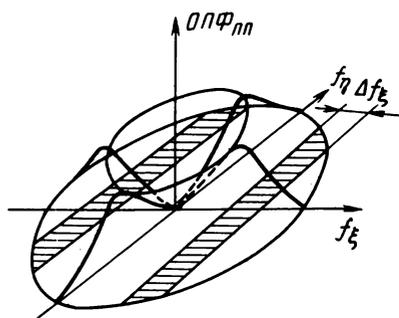


Рис. 2.46

Рис. 2.45. Область интегрирования в зоне пространственных частот, учитываемая при расчете шума, обусловленного шероховатостью диска. Граница круга в плоскости  $(f_\xi, f_\eta)$  соответствует пространственной частоте  $2NA/\lambda$ . Область интегрирования корректируется в соответствии с оптической передаточной функцией для детектирования по методу центральной апертуры

Рис. 2.46. То же, что на рис. 2.45, однако коррекция производится в соответствии с оптической передаточной функцией для пушпульного метода детектирования

связано с возрастанием полосы пропускания  $B$  через скорость сканирования  $s$  равенством

$$B = s \Delta f_\xi. \quad (2.89)$$

При одномерном сканировании (в направлении  $x$ ) поверхности с двумерными случайными неровностями мощность рассеяния в полосе частот  $\Delta f_\xi$  полностью идет на повышение мощности шума. На рис. 2.45 и 2.46 изображена область интегрирования совместно с графиком поверхности весовой функции, определяемой оптической передаточной функцией.

При детектировании по методу ЦА мощность шума  $\overline{i_{ЦА}^2}$  с полосой  $B$  на определенной временной частоте  $\nu$  получается из интенсивности рассеянного света, возведенной в квадрат при пространственной частоте  $f_\xi/2$  с полосой  $\Delta f_\xi/2$ . В случае ПП метода детектирования мощность шума  $i_{ПП}^2$  определяется самой интенсивностью рассеянного света на частоте  $f_\xi$  и при полосе  $\Delta f_\xi$ . Хотя детектирование по ПП методу в принципе более чувствительно к шуму от микрошероховатостей, имеющих на поверхности диска, мощность шума в детектированном сигнале на высоких пространственных частотах остается на приемлемом уровне, так как в этой области интенсивность света, рассеянная микронеровностями поверхности, значительно меньше, чем в низкочастотной области. Исследования показали, что при скорости сканирования  $10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  отношение несущая-шум 64 дБ, измеренное в полосе 30 кГц, может быть обеспечено при детектировании методом ЦА. Эта величина соответствует среднеквадратичному значению высоты шероховатости подложки 3 нм. Пушпульный метод детектирования обеспечивает

значение отношения несущая-шум порядка 55 дБ. Следует отметить, что в одну и ту же полосу частот могут быть «введены» различные составляющие пространственного шума путем простого изменения скорости сканирования  $s$  [см. уравнение (2.89)].

Общая интенсивность захваченного оптической системой пространственного шума определяется числовой апертурой сканирующего объектива. Пространственный шум связан с временным шумом через скорость сканирования; это обстоятельство всегда следует учитывать при оценках вклада шероховатости поверхности в отношении несущая-шум.

## 2.5. СИГНАЛЫ ОШИБОК ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СЛЕЖЕНИЯ

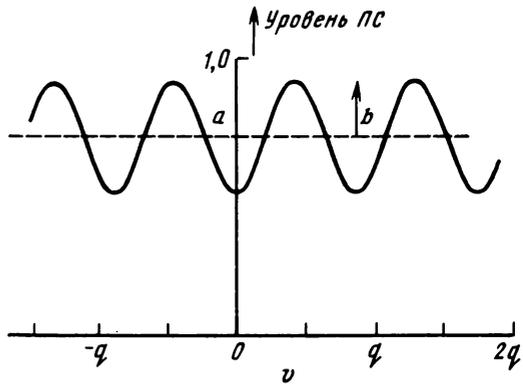
Считывание с оптических дисков принципиально невозможно осуществить без систем автоматического управления, которые обеспечивают радиальное и вертикальное слежение за информационной дорожкой. Скорость сканирования высока (от 1,25 до 25 м·с<sup>-1</sup>), и сканирующее пятно должно поддерживаться в фокусе и на дорожке с субмикронной точностью. Аппаратура должна быть практически нечувствительной к вибрациям и ударам. В ранних экспериментах с видеодисковыми системами использовали механическую стабилизацию фокуса на пленочном диске с помощью вращения диска в узкой воздушной щели. Отклонение фокуса оптической воспроизводящей системы должно составлять не более 1 мкм; при таком допуске обеспечить фокусировку с помощью пассивной механической стабилизации оказалось весьма непросто. Современные оптические дисковые системы, все без исключения, используют для получения точного сканирования информационной дорожки сервосистемы.

Сервосистемы требуют наличия на входе биполярного сигнала ошибки, несущего информацию о знаке и величине коррекции, которую необходимо произвести. Эти сигналы ошибок в основном получаются оптическими средствами, и было предложено много методов получения сигналов радиальной ошибки и ошибки фокусировки. В следующих двух подразделах будут описаны наиболее широко используемые типы сигналов радиальной ошибки и ошибки фокусировки, а также кратко рассмотрены альтернативные варианты, содержащиеся в патентах или предложенные в литературе.

### 2.5.1. СИГНАЛЫ ОШИБКИ РАДИАЛЬНОГО СЛЕЖЕНИЯ

В большинстве случаев при выделении и формировании сигналов ошибок высокочастотные составляющие сигнала детектора интереса не представляют. Сигнал детектора поступает на низкочастотный фильтр, который подавляет высокочастотные колебания, обусловленные питаями или отверстиями. Можно сказать, что питы так быстро движутся перед объективом, что «сливаются» в единую

Рис. 2.47. Изменения постоянной составляющей сигнала детектора в зависимости от радиального положения сканирующего пятна  $u$ . При  $u=nq$  предполагается, что центр пятна совмещен с центральной линией дорожки ( $q$  — расстояние между дорожками)



дорожку усредненной промежуточной интенсивности, а индивидуальныепиты или отверстия уже не различимы.

**Метод двух пятен.** Постоянная составляющая (ПС) сигнала детектора содержит информацию о положении сканирующего пятна относительно информационной дорожки, причем величина ПС будет минимальной, если пятно находится на дорожке (см. рис. 2.47). Для получения адекватного сигнала ошибки применяются два дополнительных сканирующих пятна, которые проецируются на диск со смещением  $v'_0$  относительно оси дорожки. Аппроксимируем вариации ПС функцией косинуса в соответствии с равенством

$$S_{\text{ПС}}(v_0) = a + b \cos\left(2\pi \frac{v_0}{q}\right). \quad (2.90)$$

Тогда два пятна-спутника, детектируемые двумя отдельными детекторами, дадут следующие сигналы:

$$S_1(v_0 + v'_0) = a + b \cos\left(\frac{2\pi(v_0 + v'_0)}{q}\right), \quad (2.91)$$

$$S_2(v_0 - v'_0) = a + b \cos\left(\frac{2\pi(v_0 - v'_0)}{q}\right),$$

где  $q$  — расстояние между дорожками (шаг), а  $v$  — положение основного сканирующего пятна. Зависимость величины  $b$  от шага  $q$  показана на рис. 2.30.

Разностный сигнал  $S_1$  и  $S_2$

$$S_{\text{рад}}(v_0) = -2b \sin\left(\frac{2\pi v'_0}{q}\right) \sin\left(\frac{2\pi v_0}{q}\right). \quad (2.92)$$

Он является уже нечетной функцией радиального положения  $v_0$ . Амплитуда и наклон  $S_{\text{рад}}(v_0)$  максимальны, если  $\sin\left(\frac{2\pi v'_0}{q}\right) = 1$  или  $v'_0 = q/4$ .

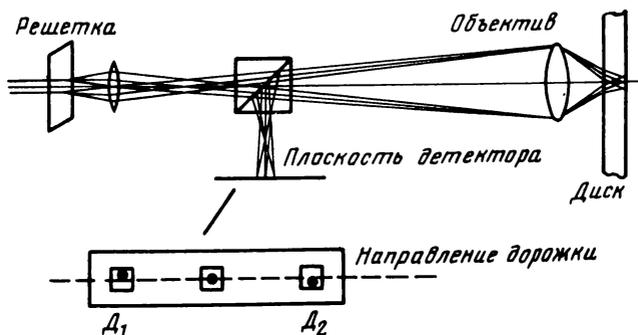


Рис. 2.48. Получение двух вспомогательных пятен-спутников с помощью дифракционной решетки

На рис. 2.48 изображена оптическая схема, в которой пятна-спутники получают с помощью (фазовой) дифракционной решетки, размещенной в диафрагме объектива. Смещение пятен-спутников в радиальном направлении составляет  $q/4$ , в направлении дорожки — гораздо больше (обычно 20 мкм). Изменением углового положения решетки можно изменять смещение  $v'_0$  и тем самым оптимизировать сигнал ошибки радиального слежения  $S_{\text{рад}}$ . Такая система достаточно проста и очень стабильна.

**Радиальный пушпульный (двухтактный) метод.** В методе двух пятен измеряется полная световая мощность пятна в плоскости, сопряженной с поверхностью диска, где пятна снова хорошо разделяются. При этом любое изменение интенсивности света в поперечном сечении отраженных лучей не играет роли. В пушпульном методе слежения, наоборот, эти изменения специально регистрируются, для того чтобы непосредственно из них получить сигнал радиальной ошибки слежения путем разделения потока света, проходящего через зрачок объектива, на две части. На рис. 2.49 показано распределение света в зрачке, состоящее из нулевого и первых порядков дифракции, обусловленных наличием дорожки на диске. Выводы подразд. 2.2.3, где были получены выражения для высокочастотного сигнала, применимы также и для изменения постоянной составляющей сигнала при движении сканирующего пятна от дорожки к дорожке в радиальном направле-

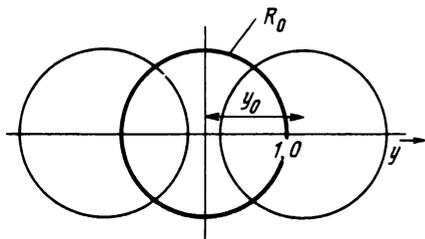


Рис. 2.49. Картина дифракции на детекторе, обусловленная периодической структурой на диске (период равен  $q$ ). Флуктуации интенсивности из-за смещения сканирующего пятна относительно дорожки наблюдаются в областях перекрытия нулевого и первых порядков ( $y_0 = \lambda/qNA$ )

нии. В этом случае аргумент  $t$  сигнала заменяется ошибкой радиального слежения за дорожкой  $v_0$  и в соответствии с (2.24) получается следующее выражение для радиального пушпульного сигнала:

$$S_{\text{рад}}(v_0) \propto \sin(\psi_{10}) \sin(2\pi v_0/q), \quad (2.93)$$

причем значение ОПФ необходимо брать для пространственной частоты, равной  $(1/q)$ : шаг дорожек  $q$  в общем случае постоянен для всего диска и приблизительно равен половине частоты отсечки оптической системы. Пушпульная ОПФ (см. рис. 2.12) имеет в этой точке максимум. Уравнение (2.93) содержит множитель  $\sin \psi_{10}$ , который зависит от средней глубины пит. Питы со средней глубиной, близкой к  $\lambda/4$ , и контрастные (черно-белые) структуры имеют значение  $\psi_{10} \approx \pi$  и дают очень малый пушпульный сигнал. В процессе изготовления диска-оригинала при формировании глубины пит необходимо уходить из этой запрещенной области.

Пушпульный метод получения сигнала ошибки радиального слежения очень просто осуществляется оптическими средствами. Погрешности сигнала радиальной ошибки, обусловленные отклонениями уровней ПС между двумя детекторами, могут быть скомпенсированы посредством постоянной проверки качества считывания по уровню высокочастотного сигнала.

**Метод радиальной вобуляции.** Если придать сканирующему пятну дополнительное движение относительно дорожки, то появляется возможность выделения сигнала радиальной ошибки из вариаций интенсивности света на детекторе, вызванных этим дополнительным движением.

При введении в уравнение (2.90) для уровня ПС на детекторе дополнительного синусоидального перемещения — вобуляции  $w \sin(2\pi v_0 t)$ , накладываемой на ошибку смещения  $v_0$ , получим

$$S(v_0) = a + b \cos\left(2\pi \frac{v_0}{q} + \frac{2\pi w}{q} \sin(2\pi v_0 t)\right). \quad (2.94)$$

Предположим, что изменение во времени ошибки слежения  $v_0$  гораздо медленнее, чем частоты  $v_0$  вобуляции. Фаза детектируемого сигнала на частоте  $v_0$  является функцией ошибки радиального слежения  $v_0$  (см. рис. 2.50) и изменяется на  $\pi$  радиан при пересечении дорожки.

С помощью синхронного детектирования сигнала оптического датчика и самого сигнала вобуляции (снимаемого, например, с катушки привода поворотного зеркала, обеспечивающего вобуляционное движение пятна) можно выделить эти фазовые изменения и получить сигнал радиальной ошибки. При записи уравнения (2.94) в виде

$$S(v_0) = a + b \cos\left(\frac{2\pi v_0}{q}\right) - \frac{2\pi w}{q} b \sin\left(\frac{2\pi v_0}{q}\right) \sin(2\pi v_0 t), \quad (2.95)$$

где предполагается, что амплитуда вобуляции  $w$  мала, и при пере-

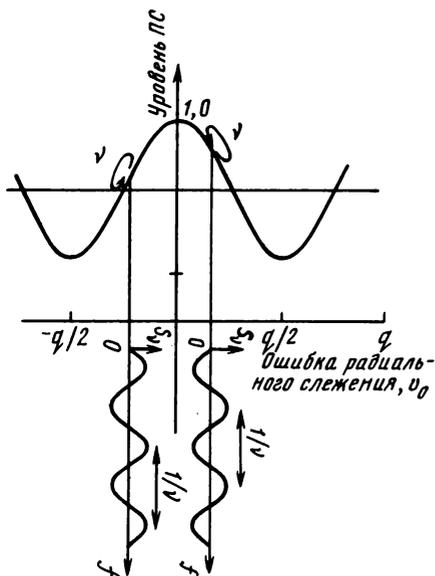


Рис. 2.50. Влияние небольших вариаций радиального положения сканирующего пятна (частота  $\nu$ ) на фазу переменной составляющей сигнала на детекторе. Уровень постоянной составляющей в моменты, когда пятно расположено на дорожке, больше, чем в моменты, когда пятно смещено относительно нее. Такая ситуация возникает, например, в случае дисков с записанной информацией

множении этого сигнала (после узкополосной фильтрации на частоте  $\nu_0$ ) с опорным сигналом привода  $\sin 2\pi\nu_0 t$  получим

$$S_{\text{рад}}(\nu_0) \propto \frac{\pi b \omega}{q} \sin\left(\frac{2\pi\nu_0}{q}\right) [1 - \cos(4\pi\nu_0 t)]. \quad (2.96)$$

После подавления частотной компоненты  $2\nu_0$  имеем сигнал ошибки, биполярный по отношению к сигналу ошибки радиального слежения  $\nu_0$ . Амплитуда сигнала ошибки пропорциональна амплитуде вобуляции  $\omega$ . Величина  $\omega$  ограничена сверху допустимым значением перекрестных искажений; кроме того, если отношение  $\omega/q$  слишком велико, то усложняется процесс фильтрации. Практически используется вобуляция с амплитудой, равной 5...10% ширины сканирующего пятна (0,05...0,1 мкм). Частота вобуляции приблизительно в 10 раз больше, чем ширина полосы сервосистем (15...30 кГц).

Вместо вобуляции пятна с таким же успехом можно использовать вобуляцию дорожки записи на самом диске. Хотя это решение довольно привлекательно, однако оно неприемлемо по существующим стандартам.

Другая возможность получения сигнала радиальной ошибки состоит в том, что наряду с основной, информационной, записываются две дополнительные дорожки, содержащие определенные частоты; точное слежение за информационной дорожкой обеспечивается в том случае, когда детектируются равные сигналы сопутствующих частот. Однако более сложный процесс изготовления диска-оригинала и уменьшение радиальной плотности информации делают этот метод менее привлекательным.

Еще один метод заключается в том, что в сечении отраженного от диска луча устанавливается четырехплощадочный детектор, а сигнал ошибки радиального слежения получается при сравнении фаз высокочастотных сигналов, идущих от каждого из квадрантов [6]. Необходимым условием этого метода является то, что средняя пространственная частота вдоль информационной дорожки должна быть не слишком низкой, поскольку передаточная характеристика этого метода имеет вид пушпульной. В случае видеодисков с постоянной угловой скоростью из-за этого условия возникают проблемы слежения за дорожками, расположенными на внешнем радиусе диска.

## 2.5.2. СИГНАЛЫ ОШИБКИ ФОКУСИРОВКИ

Большинство методов получения сигналов ошибки фокусировки основаны на том факте, что лазерный луч отражается диском точно в обратном направлении только в случае, когда фокус луча находится точно на поверхности диска. Если ввести некоторую асимметрию в оптический путь отраженного пучка, то появляется возможность выделять сигнал отклонения фокуса от поверхности диска. Диск не должен нести никакой информации специально для фокусировки.

**Метод ножа Фуко.** На рис. 2.51 представлена схема метода, использованного Фуко для контроля сферичности астрономических зеркал. Предполагается, что зеркало  $Z$  на рис. 2.51, *a* точное; нож  $H$ , т. е. край непрозрачной плоскости, находится не в фокусе, что приводит к появлению неравномерности в освещенности экрана  $\mathcal{E}$ . Непосредственно вблизи оптимального фокуса распределение света становится [17], однако на небольшом расстоянии  $\Delta Z$  от фокуса становится допустимым геометрическое приближение и расфокусировка приводит к увеличению освещенности одной половины экрана относительно другой. Если в плоскости экрана расположить два детектора  $D_1$ ,  $D_2$ , то сигнал ошибки фокусировки будет равен разности двух сигналов детекторов. Сигнал ошибки фокусировки изменяется от максимального положительного до максимального отрицательного значения при перемещении ножа относительно фокуса на расстояние около четырех глубин фокуса (рис. 2.51, *b*) и не очень быстро спадает до нуля. Это расстояние, измеренное на детекторе, соответствует перемещению поверхности диска на две глубины фокуса вследствие отражательного характера системы. Крутая зависимость разностного сигнала вблизи фокуса \* обеспечивает высокую чувствительность метода к ошибкам фокусировки.

Значительная область расфокусировки, в которой сигнал отличен от нуля, обеспечивает большой диапазон захвата сервосистемы. Слишком малый диапазон захвата может привести к паразитным

---

\* От смещения ножа вдоль оси.— *Прим. перев.*

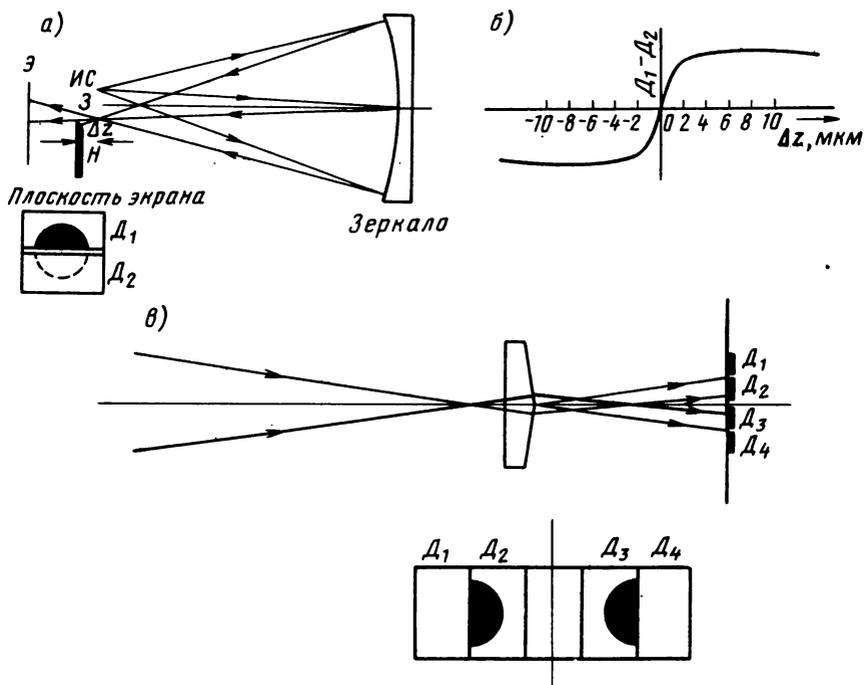


Рис. 2.51. Схематическое изображение устройства для исследования зеркал по методу Фуко при смещении края ножа относительно фокуса на небольшое расстояние  $\Delta z$  (а) и зависимость разностного сигнала двух детекторов от  $\Delta z$  (б); более стабильный вариант метода Фуко, в котором нож заменен бипризмой (в): ИС — источник света; Н — нож; Э — экран; З — центр кривизны зеркала;  $D_1$  —  $D_4$  — детекторы

точкам пересечения сигналом нулевого уровня в момент включения сервосистемы. Положение ножа определяет баланс световых потоков на детекторах при точной фокусировке на диск, а небольшие отклонения фокуса от ножа воспринимаются как сигнал расфокусировки и соответствующим образом «корректируются» сервосистемой. Для уменьшения чувствительности метода к расстройке элементов вместо ножа применяют бипризму (рис. 2.51, в). С помощью четырех детекторов  $D_1$  —  $D_4$  сигнал ошибки выделяют путем соединения их по схеме  $D_1 - D_2 - D_3 + D_4$ . Смещение грани призмы увеличит световой поток, например, на детекторах  $D_1$  и  $D_2$ , однако это не приведет к смещению плоскости настройки фокуса, а лишь немного уменьшит крутизну сигнала. Сигнал детекторов  $D_1 + D_2 - D_3 - D_4$  может быть использован в качестве сигнала ошибки положения призмы.

**Метод частичного перекрытия зрачка.** На рис. 2.52 изображена схема метода, который очень похож на метод ножа Фуко. В данном методе край непрозрачного экрана расположен вдали от точки

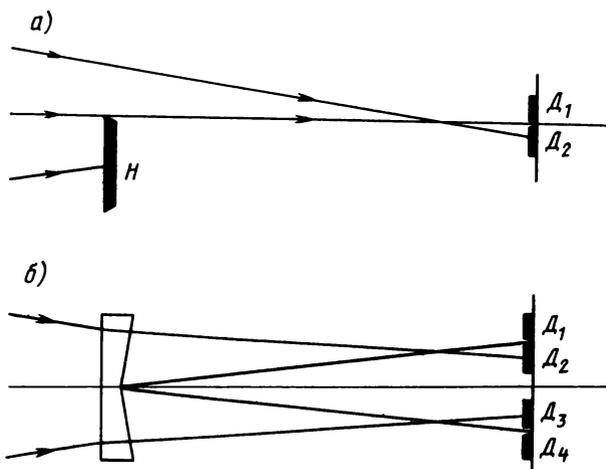


Рис. 2.52. Методы частичного перекрытия зрачка с помощью ножа  $H$ , расположенного далеко от фокуса ( $a$ ), и при замене ножа бипризмой ( $b$ )

фокуса отраженного пучка, а двухплощадочный детектор расположен точно в фокусе. Из построения хода лучей в приближении геометрической оптики видно, что разностный сигнал двухплощадочного детектора может служить достаточно хорошим сигналом ошибки фокусировки. Для определения крутизны сигнала ошибки фокусировки вблизи фокуса необходимо учесть дифракционные эффекты (см. подразд. 2.6.3). Вместо непрозрачного экрана обычно применяют бипризму и два двухплощадочных детектора вместо одного (рис. 2.52, б). Параметром, наиболее чувствительным к смещению элементов, является положение двухплощадочного детектора; применение двоянной конструкции с призмой существенно снижает эту чувствительность.

На рис. 2.53, а показано распределение интенсивности в плоскости детектора. Линия, разделяющая фотоприемные площадки, соответствует координате  $x=0$ . Луч точно фокусируется на детекторе, и распределение интенсивности симметрично. На рис. 2.53, б сканирующее пятно смещено на 2 мкм от положения оптимального фокуса на диске (одна глубина фокуса) и большая часть света падает уже на одну площадку детектора. На рис. 2.54 показан сигнал ошибки фокусировки, полученный по этому методу.

**Астигматический метод.** Этот метод предложен Брико с соавторами [7]. Асимметрия в осевом направлении возле области фокусировки астигматического пучка проявляется в том, что по обе стороны плоскости «наилучшей» фокусировки имеются взаимно перпендикулярные астигматические линии. На рис. 2.55 астигматические линии обусловлены наличием цилиндрической линзы, расположенной в отраженном пучке, а сигнал ошибки фокусировки

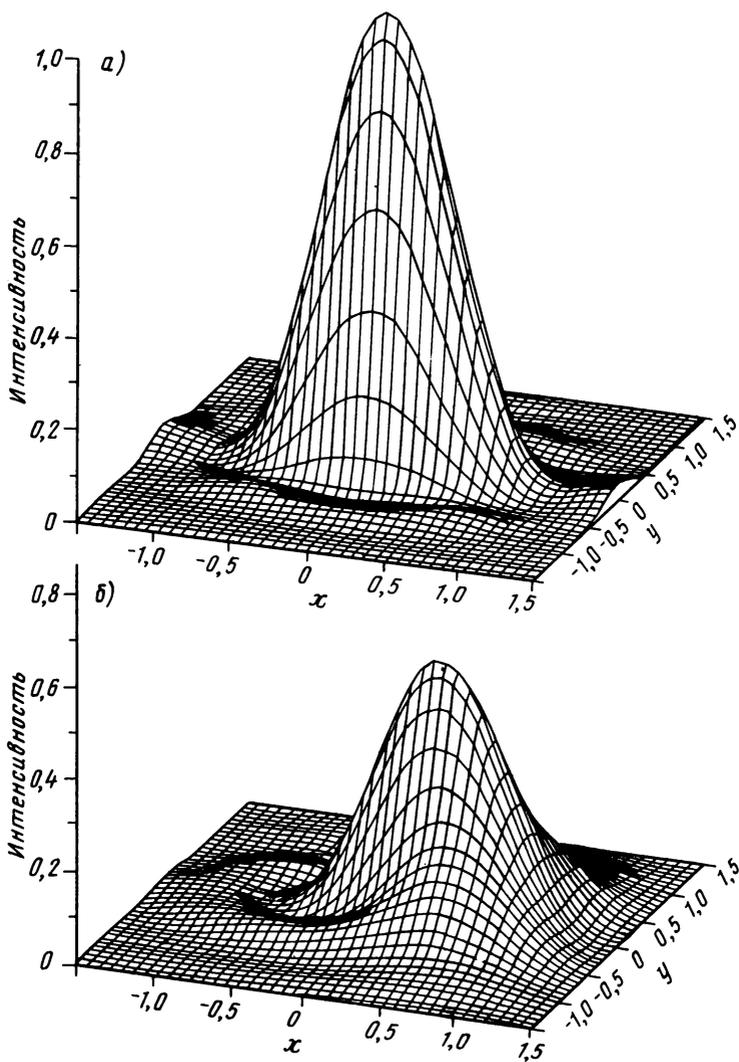


Рис. 2.53. Рассчитанные распределения интенсивности света по поверхности детектора в случае полуперекрытого фокусируемого пучка (см. рис. 2.52) (а) и при смещении сканирующего пятна относительно поверхности диска на 2 мкм (б). Предполагается, что луч, отраженный от диска, aberrаций не имеет. Единицей масштаба по осям является величина  $\lambda/NA$  ( $NA=0,10$  со стороны детектора), равная в данном случае 8 мкм

Рис. 2.54. Сигнал ошибки фокусировки, полученный по методу перекрытия пучка. Вдоль горизонтальной оси отложены значения величины расфокусировки сканирующего пятна относительно оптического диска. Поскольку метод считывания отражательный, смещение фокуса в плоскости детектора в 2 раза больше

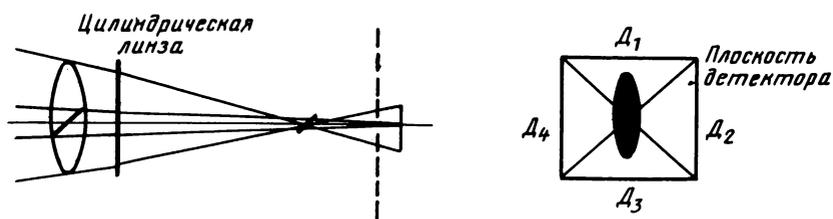
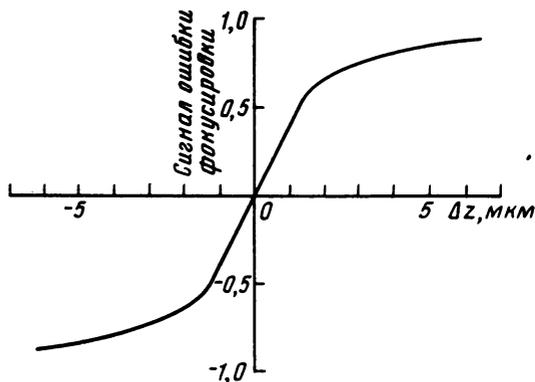


Рис. 2.55. Иллюстрация фокусирования астигматического пучка с двумя астигматическими линиями в фокальной области. Схематически изображено распределение света на детекторе для случая, когда положение детектора близко к положению вертикальной фокальной линии

получается с помощью 4-квadrантного детектора, линии раздела фотоприемных площадок которого расположены под углом  $45^\circ$  к фокальным линиям, причем отдельные квадранты соединены по схеме  $D_1 - D_2 + D_3 - D_4$ .

Оптическая сила цилиндрической линзы определяет расстояние по оси между астигматическими линиями и крутизну сигнала ошибки вблизи фокуса. В данном случае необходимо соблюдать компромисс между диапазоном захвата и чувствительностью. Практически значение астигматической aberrации фронта  $W_{22}$ , равное 3 или 4, является хорошим компромиссом. В режиме точного расположения фокуса на поверхности диска распределение света на 4-квadrантном детекторе соответствует плоскости «наилучшей фокусировки» или «пятна с наименьшими искажениями». Вариации интенсивности света в поперечном сечении пучка в этой астигматической фокальной точке сглаживаются, и поэтому дублирование конструкции нецелесообразно для надежной работы этого устройства.

**Метод критического угла.** Критическим углом называется предельный угол падения света на поверхность раздела между оптически более плотной средой и менее плотной (например, из стекла в воздух), при котором еще наблюдается прохождение света

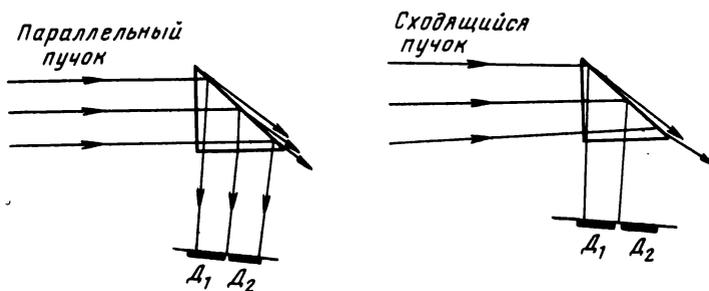


Рис. 2.56. Метод критического угла отражения, основанный на явлении полного внутреннего отражения в призме

в оптически менее плотную среду. Если свет падает под углом, большим критического, то он полностью отражается от поверхности раздела. На рис. 2.56 изображен параллельный луч света от диска, отраженный призмой. Если угол падения на гипотенузную грань призмы близок к критическому, то двухплощадочный детектор равномерно засвечивается потоком излучения. Расфокусировка приводит к тому, что отраженный от диска луч становится сходящимся либо расходящимся, что вызывает разбаланс в освещенности площадки детектора, и разность сигналов площадок может служить в качестве сигнала ошибки фокусировки.

**Полосы расфокусировки.** Данный метод основан на явлении дифракции света на информационной структуре диска. Его принципиальным преимуществом является то, что он всегда выделяет ситуацию, когда луч точно сфокусирован на диске, в то время как во всех вышеперечисленных методах положение фокуса относительно диска зависит от взаимного расположения элементов и стабильности настройки. С другой стороны, этот метод имеет очень малый диапазон захвата\*, что очень усложняет процесс поиска поверхности диска при включении сервосистемы. Данные методы могут быть с успехом использованы совместно с другими, которые позволяют увеличить диапазон захвата.

В подразд. 2.3.4 показано, что в области перекрытия нулевого и первых порядков в тот момент, когда информация выходит из области фокуса, возникают интерференционные полосы. Они движутся с частотой сигнала, и направление движения меняет свой знак при изменении знака расфокусировки. Сигнал ошибки фокусировки можно получить с помощью детектора с соответствующей конфигурацией фоточувствительных площадок [6]. Однако эксперименты показали, что максимально достижимое значение диапазона захвата не превышает 10 мкм.

\* Диапазон смещения фокуса относительно поверхности диска, в котором в принципе можно получить сигнал ошибки.— *Прим. перев.*

## 2.6. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

В подразд. 2.4.4 было отмечено, что для обеспечения высокого значения отношения сигнал-шум в качестве источника света для оптических дисковых систем необходимо использовать лазер. Во всех ранних экспериментах с оптическими дисками использовался He—Ne-лазер, поскольку в то время это был единственный сравнительно дешевый и доступный на рынке лазерный источник. За прошедшее с той поры время очень быстрое развитие получили полупроводниковые лазеры на основе GaAlAs в отношении достижения необходимой мощности излучения и срока службы. Перспективные оптические дисковые системы будут основаны исключительно на полупроводниковых лазерах, что позволит осуществить значительную миниатюризацию оптической системы воспроизведения. Содержимое оптической головки, выполняющей все необходимые функции, может быть помещено в цилиндр высотой около 30 мм и диаметром около 10 мм. В следующих подразделах описывается малогабаритная оптическая головка, состоящая из лазерного источника света, сканирующего объектива и детектора, обеспечивающего получение высокочастотного информационного сигнала, сигналов ошибки радиального слежения и ошибки фокусировки (см. рис. 2.57).

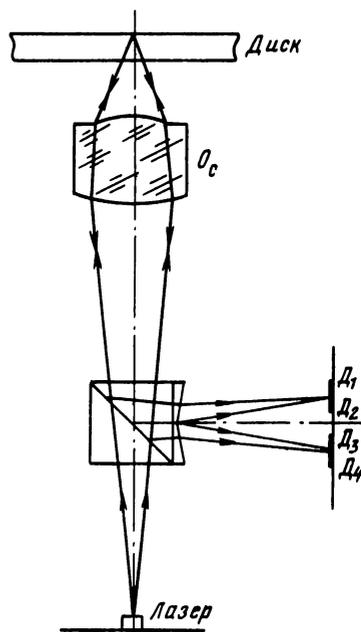


Рис. 2.57. Схематическое изображение малогабаритной оптической головки. Светоделительный куб имеет две призмы с малым преломляющим углом, которые отклоняют свет на четыре детектора:  
 $O_c$  — сканирующий объектив,  $D_1 - D_4$  — детекторы

## 2.6.1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАЗЕР

Физические свойства и генерация излучения лазера на основе GaAlAs были описаны в [21]. Излучающая область лазера представляет собой полосу длиной около 5 мкм и шириной 0,3 мкм. Вся мощность излучения (обычно от 3 до 5 мВт) сконцентрирована в эллиптическом конусе. Угловая полуширина конуса составляет  $\pm 5^\circ$  в плоскости, параллельной полоске, и  $\pm 20^\circ$  в плоскости, перпендикулярной полоске. Для получения равномерного по амплитуде и фазе в поперечном сечении пучка обычно используют поток излучения, распространяющийся в круговом конусе с углом между образующей и осью порядка  $5^\circ$ . Это соответствует полезной числовой апертуре лазерного луча  $NA=0,10$ . Часть излученной мощности лазера, содержащаяся внутри  $NA=0,10$ , составляет около 20% общей мощности (эффективность связи). При больших значениях NA для компенсации астигматизма лазера следует использовать цилиндрическую линзу.

Длина волны генерации  $\lambda$  современных лазеров на основе GaAlAs лежит в ближней инфракрасной области (800 нм) и может варьироваться с помощью изменения химического состава лазера. Исходя из максимальной плотности, которую можно получить на оптическом диске, более предпочтительны меньшие длины волн. Однако имеющиеся в настоящее время полупроводниковые лазеры видимого диапазона ( $\lambda < 700$  нм) имеют малый срок службы и не удовлетворяют по этому параметру требования оптических дисковых головок ( $> 5000$  ч) \*.

Ширина спектра излучения лазера ( $\Delta\lambda$ ) менее 0,1 нм, а спектр практически состоит из одной моды. Длина когерентности лазерного излучения составляет по крайней мере несколько сантиметров. Свет, снова попадающий на лазер после отражения от диска, остается когерентным и вызывает эффекты обратной связи, проявляющиеся в виде быстрых шумовых изменений мощности излучения во времени. Практически снижение отношения сигнал-шум наблюдается в том случае, когда оптическая длина пути от лазера до диска имеет порядок длины когерентности лазерного излучения.

## 2.6.2. СКАНИРУЮЩИЙ ОБЪЕКТИВ

Острая необходимость в уменьшении размеров и массы обусловила активные разработки конструкций микрообъективов для оптической записи. Наряду с миниатюризацией объективов микроскопов получили развитие также и новые направления — разработка линз

---

\* Фирма Imatronics (США) создала промышленный образец полупроводникового лазера на диапазон длин волн 660...685 нм с выходной мощностью 5 мВт. Срок службы лазера составляет более 10000 ч (Lasers & Optronics — 1990. V. 9, № 2, p. 89).— *Прим. ред.*

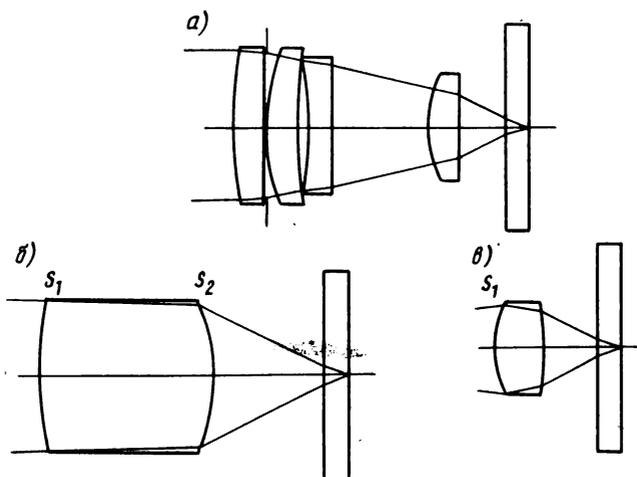


Рис. 2.58. Конструкции сканирующих объективов, состоящих из четырех линзовых элементов со сферическими поверхностями (коллимирующая часть оптической системы опущена) (а), из одиночной линзы с двумя асферическими поверхностями ( $S_1$  и  $S_2$ ), обеспечивающей очень большое поле зрения (б) и одиночной линзы с одной асферической поверхностью ( $S_1$ ), выполняющей функции коллиматора и объектива. Полезное поле зрения ограничено 200 мкм (в)

с асферическими поверхностями или градиентных оптических элементов.

**Традиционный сканирующий микрообъектив.** Объектив собирает полезный конус света, излучаемого лазером, и фокусирует его на поверхность диска, несущую информацию.

Основными параметрами объектива являются его числовая апертура и поле зрения. Вследствие высокой плотности информации на диске NA должна составлять от 0,4 до 0,5 (проигрыватель системы Compact Disc оснащен объективом с  $NA=0,45$ ).

Диаметр требуемого поля зрения непосредственно зависит от способа действия сервомеханизмов. Если оптическая система (лазер, объектив, фотодиод) целиком перемещается как в радиальном, так и в вертикальном направлении, то поле зрения может быть малым, что существенно упрощает конструкцию. Угол и диаметр поля зрения могут быть менее  $\pm 1^\circ$  и 200 мкм соответственно. В системах с произвольным доступом или мгновенным перескоком (см. гл. 4) поле зрения должно быть существенно большим (диаметр до 1000 мкм), а качество пятна в его пределах — «практически дифракционно-ограниченным».

Конструкция классического объектива для оптических головок показана на рис. 2.58, а. Оптический канал формирования пятна считывания делится на коллимирующую часть, которая может состоять из простой плосковыпуклой линзы и соответствующего объектива, состоящего из четырех линз. Для обеспечения фокуси-

ровки объектив движется относительно коллиматора. От микрообъектива он отличается отсутствием хроматической коррекции, поэтому для изготовления требующихся несклеенных дублетов может быть использовано стекло одного типа. Для обеспечения хорошего качества и малого числа линз используется стекло с высокими значениями показателя преломления ( $n = 1,75 \dots 1,80$ ). В табл. 2.3 приведены характеристики типичного объектива.

**Сканирующие объективы с асферическими поверхностями.** Поиски конструкций, альтернативных классическому микрообъективу, велась с целью снижения веса и стоимости. Одна из альтернатив — одиночная линза с асферическими поверхностями [12]. Диаметр поля зрения такой линзы может быть сделан очень большим (некоторая кривизна поля зрения обычно допускается, поскольку дисковый оптический проигрыватель имеет активную фокусировку). Существует большое количество возможных конструкций таких асферических линз, которые имеют большие диаметры поля зрения [5]. Выбор конструкции в основном определяется технологическими допусками (например, минимальной асферичностью поверхностей). Формы для линз с асферическими поверхностями создаются на прецизионном токарном станке, а сама линза изготавливается

Таблица 2.3

Характеристики	Традиционный объектив	Объективы с асферическими поверхностями	
		с большим полем зрения	с малым полем зрения
Фокусное расстояние, мм	8	8	3,7
Числовая апертура	0,45	0,45	0,10 (со стороны входного зрачка) 0,45 (со стороны выходного зрачка)
Диаметр поля зрения, мм	1,0 (отклонение ОДП на расстоянии 400 мкм от центра равно 0,052λ)	2,0 (отклонение ОДП на расстоянии 700 мкм от центра равно 0,047λ)	0,2 (отклонение ОДП на расстоянии 80 мкм от центра равно 0,045λ)
Кривизна поля зрения по краю, мкм	6	24	2
Асферичность (по отношению к оптимальной сферической поверхности):			
$S_1$	—	± 2,5	± 11
$S_2$	—		
Диаметр, мм	7,5	7,5	4,1
Длина, мм	11	—	—
Толщина, мм	—	8,5	3,2
Расстояние между передним и задним фокусами, мм	—	—	26,0
Масса (включая оправу), г	∠ 2	∠ 2	∠ 0,25

методом горячего прессования стекла с укреплением на ее поверхности тонкого асферического слоя пластика; другой метод — инъекционное литье под давлением пластиковых линз с требуемой формой поверхностей. Характеристики асферических линз с большим полем зрения приведены в табл. 2.3 (см. рис. 2.58, б).

Другой тип асферических линз разработан для систем, в которых не требуется большого поля зрения (диаметр меньше 200 мкм). В этом случае достаточно сделать у линзы только одну асферическую поверхность. На рис. 2.58, в показана конструкция линзы этого типа, которая используется в проигрывателе системы Compact Disc. Линза сочетает функции как коллиматора, так и фокусирующего микрообъектива. Характеристики асферической линзы с малым полем зрения даны в табл. 2.3.

**Сканирующие градиентные объективы.** Второе решение, обеспечивающее наличие только одного элемента в конструкции объектива с требуемыми параметрами, заключается в использовании стекла с градиентным показателем преломления вдоль радиуса диска. Градиентный показатель преломления обеспечивает коррекцию сферической аберрации единичной линзы и дифракционно-ограниченное качество пятна вплоть до  $NA=0,40$  [25]. Поле зрения ограничено, однако это не особенно важно, если оптическая система перемещается целиком.

### 2.6.3. ПОДЛОЖКА ОПТИЧЕСКОГО ДИСКА

По пути к поверхности, несущей информацию, свет проходит через пластиковый диск, имеющий стандартизованную толщину 1,2 мм. Принцип считывания через подложку был принят, поскольку позволяет весьма просто и эффективно осуществить защиту информационной структуры и удалить ее от внешней поверхности диска. Противоположная сторона покрывается сначала слоем алюминия, а затем непрозрачным слоем. Диаметр луча света на внешней поверхности диска обычно составляет 0,7 мм. Формально диск является плоскопараллельной пластиной, входящей в состав оптического канала, и поэтому должен иметь оптическое качество. Это означает, что дополнительные аберрации волнового фронта, появляющиеся при прохождении света через диск, так малы, что их влияние на оптическую передаточную функцию системы воспроизведения незначительно. Дополнительные аберрации могут возникнуть вследствие локальных дефектов диска, отклонений толщины от номинального значения либо от неправильной ориентации (наклона) диска. Допустимые отклонения последних двух параметров составляют  $\pm 0,1$  мм и  $\pm 0,5^\circ$  соответственно. Наличие на внешней поверхности диска царапин в тангенциальном направлении может привести к ненадежной работе систем радиального слежения. Поэтому рекомендуется обращаться с дисками очень аккуратно.

#### 2.6.4. ДЕТЕКТОР

Свет, отраженный диском, попадает снова в объектив и направляется в фотоприемный канал с помощью светоделительного куба. На стороне светоделительного куба, обращенной к фотоприемнику, укреплен бипризма, вершинное ребро которой расположено параллельно направлению дорожки на диске (см. рис. 2.57). Бипризма выполняет две функции.

1. Луч света делится на две части по линии вершинного ребра, параллельной дорожкам. Свет, попадающий на детекторы  $D_1$  и  $D_2$  с одной стороны этой линии и на детекторы  $D_3$  и  $D_4$  с другой стороны, используется для получения пушпульного сигнала радиальной ошибки (см. подразд. 2.5.1), для чего детекторы соединяются по схеме  $D_1 + D_2 - D_3 - D_4$ .

2. Свет, отклоненный половиной бипризмы, направляется на два детектора, которые получают одинаковый световой поток, если отраженный луч точно фокусируется на плоскости фотоприемников. Вне фокуса возникает дисбаланс в освещенностях фотоприемников в соответствии с описанным в подразд. 2.5.2 методом частичного перекрытия зрачка. Вторая половина призмы дает аналогичный дополнительный сигнал. Сигнал ошибки фокусировки получается путем соединения детекторов по схеме  $D_1 - D_2 - D_3 + D_4$ . Распределение интенсивности в плоскости детектора и сигнал ошибки фокусировки этого устройства показаны на рис. 2.53.

Заключительная операция — сложение сигналов от всех четырех детекторов, что дает высокочастотный сигнал.

### 3. ВЕКТОРНАЯ ТЕОРИЯ ДИФРАКЦИИ

*Дж. Пасман*

#### 3.1. ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей главе дифракция света на информационной структуре оптического диска рассматривалась на основе скалярной модели, в которой предполагалось, что свет распространяется как волна со скалярной амплитудой  $V(\mathbf{r}, t)$ . Если такая волна дифрагирует на препятствии, то при расчете принимается, что на поверхности препятствия фаза волны преобразуется в соответствии с высотой профиля препятствия. Амплитуда отраженного или прошедшего света находится как амплитуда падающего на поверхность поля, умноженная на коэффициент Френеля для пропускания или отражения при нормальном падении. На практике в случае, когда информация записана в виде углублений, а не участков с измененным коэффициентом отражения, полагают, что эта ампли-

туда постоянно по всей поверхности независимо от локального наклона поверхности.

Данный подход применим только до тех пор, пока длина волны падающего света остается пренебрежимо малой по сравнению с характерными поперечными размерами рассеивающей структуры. С точки зрения физики это значит, что для падающего света поверхность препятствия плоская. Однако на оптическом диске плотность информации так высока, что размеры углублений, несущих информацию, сравнимы с длиной волны света. В этом случае важную роль играет векторный электромагнитный характер света [2, 14]. Следовательно, необходимо трактовать свет как электромагнитную волну с поляризационными свойствами, определяемыми векторными полями  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$  и  $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$  в соответствии с уравнениями Максвелла. На поверхности раздела между двумя средами, где существует оптический контраст, дифракция определяется граничными условиями для локальных электромагнитных полей  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$  и  $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ . В результате возникает зависимость дифракции от состояния поляризации падающего света и оптического контраста.

Хотя скалярная теория, обладающая таким важным преимуществом, как относительная простота, для малых размеров структуры оптических дисков еще дает удовлетворительные результаты, ясно, что в принципе она не применима для описания поляризационных эффектов и для получения более полного описания дифракции на структуре оптических дисков необходимо применять более точную векторную теорию. Обычно эти структуры представляются в виде углублений в диэлектрической или металлической основе, периодичных либо в одном (т. е. непрерывные дорожки), либо в двух (т. е. питы) измерениях. В скалярной теории эти структуры рассматриваются как одномерная или двумерная дифракционные фазовые решетки. Результаты расчетов по векторной теории показывают, что эта концепция должна быть расширена и структуру необходимо рассматривать как более сложную комбинацию амплитудной и фазовой решеток.

В 1907 г. лорд Рэлей предложил метод решения задачи дифракции плоской электромагнитной волны на решетке. В своем труде он рассматривает дальнюю зону дифракции как линейную комбинацию прошедшей и отраженной плоских волн и виртуальных волн, распространяющихся вдоль поверхности решетки. Распространяющиеся плоские волны обычно называются дифракционными порядками, направление которых описывается хорошо известной формулой для решеток:

$$\sin(\theta_d) = \sin(\theta_{\text{пад}}) + m\lambda/p,$$

где  $\theta_d$  и  $\theta_{\text{пад}}$  — углы дифракции и падения по отношению к нормали к поверхности решетки;  $\lambda$  — длина волны света;  $p$  — период решетки;  $m$  — номер порядка дифракции.

Основная проблема электромагнитной теории решетки — опи-

сание того, каким образом электромагнитная энергия падающей волны перераспределяется в дифрагированные волны или, другими словами, какова относительная эффективность дифракционных порядков. Метод Рэля базируется на предположении, известном в настоящее время как гипотеза Рэля о том, что общее электромагнитное поле даже в непосредственной близости от решетки и в углублениях микрорельефа полностью определяется той же суперпозицией дифрагировавших волн, которая формирует дальнейшее поле, и поэтому всеми вторичными волнами в области микрорельефа пренебрегают. С учетом гипотезы Рэля система уравнений может быть получена на основе граничных условий, исходя из которых можно рассчитать амплитуды дифракционных порядков. Область применимости гипотезы была объектом многочисленных дискуссий [5, 7, 8, 17, 1]. В этой книге данный метод не применяется. Возможность строгого решения задачи дифракции на периодической структуре произвольной геометрии и произвольного электромагнитного контраста появилась только в последние 20 лет [12]. В этих методах задача дифракции формулируется в виде дифференциальных или интегральных уравнений.

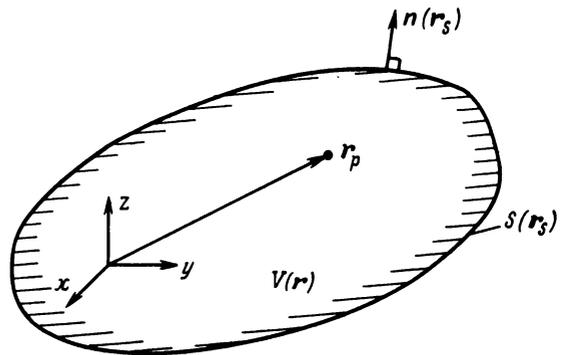
В следующем разделе кратко изложен метод интегрального представления, используемый при расчетах дифракции на структурах оптических дисков. При работе с оптическими дисками имеют место различные дифракционные явления, которые могут быть рассчитаны с помощью векторной теории, в частности при считывании пит на видео- и аудиодисках и предварительной разметке на дисках для цифровых данных. В процессе изготовления диска-оригинала (см. гл. 5) дифракционные эффекты используются для контроля и проверки размеров пит или дорожек [3, 15, 9, 10]. В разд. 3.3 изложены некоторые результаты этих расчетов.

## 3.2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Целью данной книги не было подробное описание всего процесса вывода из уравнений Максвелла интегродифференциальных уравнений, описывающих задачу дифракции. Он приведен в работе [4]. Вместо этого будет дано краткое изложение основных идей физической сущности терминов и обозначений. Читатели, которые интересуются больше результатами теории, чем математики, могут перейти к разд. 3.3.

Уравнения Максвелла описывают локальные свойства электромагнитного поля, которые зависят как от пространства, так и от времени, в произвольной точке  $\mathbf{r}$  и ее окрестности. Если рассматривать поле, меняющееся по гармоническому закону во времени с единственной угловой частотой  $\omega$  (монохроматическое приближение), то можно опустить временную зависимость. Это значит, что берется во внимание только одна частотная компонента временного спектра Фурье электромагнитного поля, а в уравнениях Максвелла

Рис. 3.1. Определение общей геометрии задачи



производная по времени заменяется на множитель  $(-i\omega)$ . После такой замены уравнения описывают только пространственное распределение поля, что в нашем случае представляет главный интерес.

Пространственное распределение полей анализируется с помощью теории Фурье, в которой вместо упомянутого выше временного применяется пространственное преобразование Фурье. С помощью такой операции выводятся интегральные уравнения, которые описывают электромагнитное поле в точке пространства в виде суперпозиции интегралов по поверхности, окружающей данную точку. Тем самым локальный характер уравнений Максвелла заменяется влиянием «удаленного поля». Преобразование уравнений Максвелла в интегральную форму может быть проиллюстрировано на примере общего случая монохроматического поля в области пространства  $V(\mathbf{r})$  (рис. 3.1). Далее будет проведено теоретическое описание дифракции в системе, состоящей из двух таких областей в пространстве: в одной из них имеется излучение, а в другой расположен объект, на котором поле рассеивается или дифрагирует. Интегральные уравнения для обеих областей сшиваются с помощью граничных условий для электромагнитного поля.

Сначала рассмотрим случай монохроматического поля с угловой частотой  $\omega$ , существующего в гомогенной изотропной области пространства  $V(\mathbf{r})$ , ограниченной замкнутой поверхностью  $S(\mathbf{r} = \mathbf{r}_s)$  (см. рис. 3.1). Поверхность может быть как физической границей, так и мнимой.

Если в области  $V(\mathbf{r})$  нет источников поля, то поле внутри области должно удовлетворять уравнениям Максвелла

$$\begin{aligned}
 \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) &= \mathbf{J}(\mathbf{r}) - i\omega \mathbf{D}(\mathbf{r}), \\
 \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) &= i\omega \mathbf{B}(\mathbf{r}), \\
 \nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}) &= \rho(\mathbf{r}), \\
 \nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}) &= 0,
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

где величины  $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ ,  $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ ,  $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ ,  $\mathbf{D}(\mathbf{r})$ ,  $\mathbf{J}(\mathbf{r})$  и  $\rho(\mathbf{r})$  имеют обычный

физический смысл. В нашем рассмотрении временной сомножитель  $\exp(-i\omega t)$  опущен.

Пространственное преобразование Фурье  $\tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{k})$  векторного поля  $\mathbf{A}(\mathbf{r})$  можно определить следующим образом:

$$\tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{k}) = \iiint_{V(\mathbf{r})} \exp(-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \mathbf{A}(\mathbf{r}) d\mathbf{r}. \quad (3.2)$$

Вектор  $\mathbf{k}$ , имеющий амплитуду  $2\pi/\rho$ , — волновой вектор, обусловленный периодичностью распределения поля в пространстве с пространственной частотой  $1/\rho$ . В отличие от обычного интеграла Фурье, в котором интегрирование проводится по всему пространству, здесь интегрирование ведется только по области  $V(\mathbf{r})$ . Это эквивалентно обычному преобразованию Фурье функции в предположении равенства ее нулю за пределами области  $V(\mathbf{r})$ , хотя на самом деле вне  $V(\mathbf{r})$  она может и не равняться нулю. Обратное преобразование Фурье определяется как

$$(\frac{1}{2\pi})^3 \iiint_{\text{все } \mathbf{k}} \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{k}) d\mathbf{k} = \begin{cases} \mathbf{A}(\mathbf{r}), & \text{если } \mathbf{r} \in V, \\ \frac{1}{2} \mathbf{A}(\mathbf{r}), & \text{если } \mathbf{r} \in S, \\ 0 & \text{во всех других точках.} \end{cases} \quad (3.3a)$$

$$\quad (3.3b)$$

$$\quad (3.3c)$$

Наличие трех различных значений правой части равенства обусловлено исходным предположением о том, что интегрирование проводится только по  $V(\mathbf{r})$ .

Для преобразования уравнения Максвелла (3.1) необходимо знать преобразование выражений формы  $\nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r})$ :

$$\begin{aligned} \iiint_{V(\mathbf{r})} \exp(-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r}) d\mathbf{r} &= \iiint_{V(\mathbf{r})} \nabla \times \exp(-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \cdot \mathbf{A}(\mathbf{r}) d\mathbf{r} - \\ &- \iiint_{V(\mathbf{r})} \mathbf{A}(\mathbf{r}) \times \nabla \exp(-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{r} = \oint\oint_{S(\mathbf{r}_s)} \exp(-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \mathbf{n} \times \mathbf{A}(\mathbf{r}) d\mathbf{r}_s + \\ &+ i\mathbf{k} \times \tilde{\mathbf{A}}(\mathbf{k}), \end{aligned} \quad (3.4)$$

где для получения поверхностного интеграла используется теорема Гаусса. В данном случае  $\mathbf{n}$  обозначает внешнюю нормаль к  $S(\mathbf{r}_s)$ .

Следует отметить, что, поскольку область интегрирования  $V(\mathbf{r})$  замкнутая, поверхностный интеграл определяется подынтегральным вектором  $\mathbf{n}(\mathbf{r}_s) \times \mathbf{A}(\mathbf{r}_s)$ . Этот вектор направлен перпендикулярно к  $\mathbf{A}(\mathbf{r}_s)$  и  $\mathbf{n}(\mathbf{r}_s)$  и имеет модуль, равный тангенциальной к поверхности  $S(\mathbf{r}_s)$  компоненте  $A(\mathbf{r}_s)$ . Уравнение (3.1) может теперь быть преобразовано в следующее:

$$i\mathbf{k} \times \tilde{\mathbf{H}}(\mathbf{k}) - \tilde{\mathbf{J}}_s(\mathbf{k}) + i\omega \tilde{\mathbf{D}}(\mathbf{k}) = \tilde{\mathbf{J}}_s^c(\mathbf{k})/i\omega\mu, \quad (3.5a)$$

$$i\mathbf{k} \times \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{k}) - i\omega \tilde{\mathbf{B}}(\mathbf{k}) = -\tilde{\mathbf{J}}_s^m(\mathbf{k}), \quad (3.5b)$$

где поверхностный электрический ток  $\mathbf{J}_s^c(\mathbf{r}_s)$  и аналогично поверхностный магнитный ток  $\mathbf{J}_s^m(\mathbf{r}_s)$  записываются как

$$\mathbf{J}_s^e(\mathbf{r}_s) = -i\omega\mu\mathbf{n} \times \mathbf{H}(\mathbf{r}_s), \quad (3.6a)$$

$$\mathbf{J}_s^m(\mathbf{r}_s) = \mathbf{n} \times \mathbf{E}(\mathbf{r}_s) \quad (3.6b)$$

на поверхности  $S(\mathbf{r}_s)$  и  $\mathbf{J}_s^e = \mathbf{J}_s^m = 0$  во всех других точках. После подстановки выражений  $\mathbf{J}(\mathbf{r}) = \sigma\mathbf{E}(\mathbf{r})$ ,  $\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mu\mathbf{H}(\mathbf{r})$ ,  $\mathbf{D}(\mathbf{r}) = \epsilon\mathbf{E}(\mathbf{r})$  и проведения несложных преобразований уравнений (3.5a) и (3.5b) получаем выражение

$$\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{k}) = [\mathbf{k} \cdot \mathbf{k} - (\sigma - i\omega\epsilon) i\omega\mu]^{-1} \cdot (\tilde{\mathbf{J}}_s^e(\mathbf{k}) + \frac{(i\mathbf{k} \cdot \tilde{\mathbf{J}}_s^e(\mathbf{k})) i\mathbf{k}}{(\sigma - i\omega\epsilon) i\omega\mu} - i\mathbf{k} \times \tilde{\mathbf{J}}_s^m(\mathbf{k})), \quad (3.7)$$

из которого видно, что компонента поля  $\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{k})$  полностью определяется значением поверхностных токов  $\tilde{\mathbf{J}}_s^e$  и  $\tilde{\mathbf{J}}_s^m$ . Поле  $\mathbf{E}(\mathbf{r})$  получается при использовании в уравнении (3.7) обратного преобразования Фурье в соответствии с (3.3). Правая часть уравнения (3.7) состоит из двух сомножителей, что позволяет записать обратное преобразование Фурье в виде интеграла свертки двух обратных преобразований этих сомножителей. Обратное преобразование Фурье второго выражения выполняется непосредственно. Первое выражение — не что иное, как фурье-образ функции, известной в электромагнитной теории как функция Грина  $G(R)$ :

$$G(R) = [\exp(ikR)]/4\pi R, \quad (3.8a)$$

где

$$k = [(\sigma - i\omega\epsilon) i\omega\mu]^{1/2} = (n + i\kappa) 2\pi/\lambda. \quad (3.8b)$$

Эта функция описывает распространение сферической волны с волновым числом  $k$  в среде с коэффициентом преломления  $n$  и затуханием  $\kappa$  на расстоянии  $R$  от локального точечного источника единичной интенсивности. Электрическое поле в точке  $\mathbf{r}_p$  внутри  $V(\mathbf{r})$  находится с помощью выражения

$$\begin{aligned} & \oint_S G(|\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_s|) \cdot \mathbf{J}_s^e(\mathbf{r}_s) d\mathbf{r}_s + (1/k^2) \nabla_p \nabla_p \cdot \oint_S G(|\mathbf{r}_p - \\ & - \mathbf{r}_s|) \cdot \mathbf{J}_s^e(\mathbf{r}_s) d\mathbf{r}_s - \nabla_p \times \oint_S G(|\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_s|) \mathbf{J}_s^m(\mathbf{r}_s) d\mathbf{r}_s = \\ & = \begin{cases} \mathbf{E}(\mathbf{r}_p) & \text{при } \mathbf{r}_p \in V, \\ \frac{1}{2} \mathbf{E}(\mathbf{r}_p) & \text{при } \mathbf{r}_p \in S, \\ 0 & \text{во всех других точках.} \end{cases} \quad (3.9) \end{aligned}$$

Видно, что можно записать выражение для поля  $\mathbf{E}$  в точке  $\mathbf{r}_p$  с помощью выражений для полей на поверхности  $S(\mathbf{r}_s)$  замкнутой области вокруг  $\mathbf{r}_p$ . Другими словами, если известны поля на замкнутой граничной поверхности, то можно рассчитать амплитуды поля в любой точке  $\mathbf{r}_p$  внутри области, ограниченной этой поверхностью. Изложенные выше рассуждения являются строгим доказательством принципа Гюйгенса. Интегралы в (3.9) можно трактовать как су-

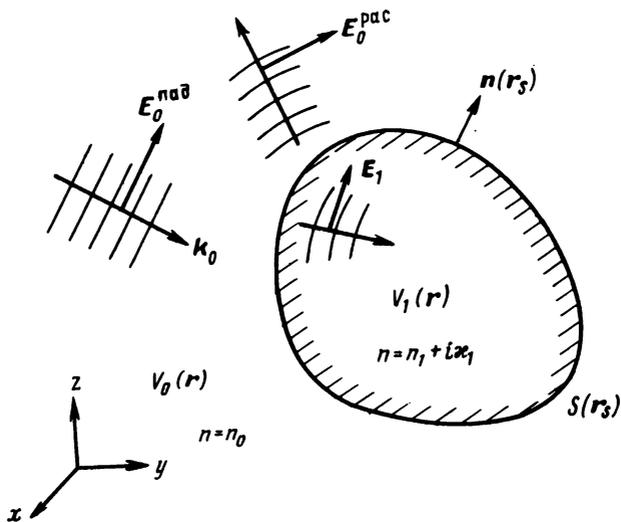


Рис. 3.2. Определение геометрии задачи дифракции

перпозицию интегралов, в которых тангенциальные компоненты магнитных и электрических полей на поверхности  $\mathbf{J}_s^e(\mathbf{r}_s)$  и  $\mathbf{J}_s^m(\mathbf{r}_s)$  описывают силы осцилляторов, а функция Грина определяет импульсный отклик, описывающий переход от  $\mathbf{r}_s$  к  $\mathbf{r}_p$ .

Предыдущие рассуждения касались общего случая волны в однородной среде  $V(\mathbf{r})$ . При обсуждении дифракции мы должны рассмотреть две области  $V_0(\mathbf{r})$  и  $V_1(\mathbf{r})$ , причем первая — область падающей волны, а вторая — рассеивающей (рис. 3.2). Оптический контраст между этими двумя средами в общем случае определяется комплексными показателями преломления сред в областях  $V_0$  и  $V_1$ :  $n_0$  и  $n_1 + i\kappa_1$ , где  $\kappa_1$  — коэффициент затухания. Это значит, что рассеивающая среда может быть диэлектрической ( $\kappa = 0$ ), металлической ( $\kappa > 0$ ) или даже бесконечно проводящей ( $\kappa \gg 0$ ).

Электрические поля  $\mathbf{E}_0(\mathbf{r})$  и  $\mathbf{E}_1(\mathbf{r})$  в областях  $V_0$  и  $V_1$

$$\mathbf{E}_{0,1} = \mathbf{E}_{0,1}^{\text{пад}} + \mathbf{E}_{0,1}^{\text{рас}},$$

где  $\mathbf{E}_{0,1}^{\text{пад}}$  — падающее поле, которое должно присутствовать во всем пространстве при отсутствии оптического контраста, а  $\mathbf{E}_{0,1}^{\text{рас}}$  — рассеянное поле, т. е. разница между реальным полем и падающим.

Поля в двух областях  $V_0$  и  $V_1$  связаны граничными условиями, отражающими тот факт, что тангенциальные компоненты  $\mathbf{E}(\mathbf{r})$  и  $\mathbf{H}(\mathbf{r})$  непрерывны на граничной поверхности:

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \times \mathbf{E}_0(\mathbf{r}_s) &= \mathbf{n} \times \mathbf{E}_1(\mathbf{r}_s), \\ \mathbf{n} \times \mathbf{H}_0(\mathbf{r}_s) &= \mathbf{n} \times \mathbf{H}_1(\mathbf{r}_s). \end{aligned} \quad (3.10)$$

Следуя Хупу [4], можно применить этот анализ к двум областям для получения уравнений для сред 0 и 1.

Для среды 0:

$$\begin{aligned} & \left(1 + \frac{\nabla_p \nabla_p}{k_0^2}\right) \cdot \oint_S G_0(|\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_s|) \mathbf{J}_s^e(\mathbf{r}_s) \cdot dS(\mathbf{r}_s) - \\ & - \nabla_p \times \oint_S G_0(|\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_s|) \mathbf{J}_s^m(\mathbf{r}_s) \cdot dS(\mathbf{r}_s) = \\ & = \begin{cases} -\mathbf{E}^{\text{pac}}(\mathbf{r}_p), & \text{если } \mathbf{r}_p \in V_0(\mathbf{r}), \\ -1/2 \mathbf{E}^{\text{pac}}(\mathbf{r}_p) + \frac{1}{2} \mathbf{E}^{\text{над}}(\mathbf{r}_p), & \text{если } \mathbf{r}_p \in S(\mathbf{r}_s), \\ \mathbf{E}^{\text{над}}(\mathbf{r}_p), & \mathbf{r}_p \in V_1(\mathbf{r}). \end{cases} \end{aligned} \quad \begin{matrix} (3.11a) \\ (3.11b) \\ (3.11в) \end{matrix}$$

Для среды 1:

$$\begin{aligned} & \left(1 + \frac{\nabla_p \nabla_p}{k_1^2}\right) \cdot \oint_S G_1(|\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_s|) \mathbf{J}_s^e(\mathbf{r}_s) dS(\mathbf{r}_s) - \\ & - \nabla_p \times \oint_S G_1(|\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_s|) \mathbf{J}_s^m(\mathbf{r}_s) dS(\mathbf{r}_s) = \\ & = \begin{cases} \mathbf{E}_1(\mathbf{r}_p) & , \text{ если } \mathbf{r}_p \in V_1(\mathbf{r}), \\ \frac{1}{2} \mathbf{E}_1(\mathbf{r}_p) & , \text{ если } \mathbf{r}_p \in S(\mathbf{r}_s), \\ 0 & , \text{ если } \mathbf{r}_p \in V_0(\mathbf{r}). \end{cases} \end{aligned} \quad \begin{matrix} (3.12a) \\ (3.12б) \\ (3.12в) \end{matrix}$$

Здесь (комплексные) волновые числа  $k_0 = kn_0$ ,  $k_1 = k(n_1 + i\alpha_1)$ , где  $k$  — волновое число в свободном пространстве. Аналогичные выражения справедливы для магнитных полей.

Возможны два разных варианта рассмотрения этих интегральных выражений.

1. Рассматриваются только уравнения (3.11б) и (3.12б). Они формируют систему интегральных уравнений, которая позволяет однозначно получить неизвестные  $\mathbf{E}^{\text{pac}}(\mathbf{r}_s)$ ,  $\mathbf{E}_1(\mathbf{r}_s)$ ,  $\mathbf{H}^{\text{pac}}(\mathbf{r}_s)$  и  $\mathbf{H}_1(\mathbf{r}_s)$  на границе. Для численных оценок решений могут быть использованы два метода: в первом, так называемом методе моментов, интегралы по всей поверхности аппроксимируются суммой частных интегралов по подобластям, в которых  $\mathbf{J}_s^e(\mathbf{r}_s)$  и  $\mathbf{J}_s^m(\mathbf{r}_s)$  можно считать постоянными. Тогда получаются матричные уравнения, в которых поля во всех этих областях неизвестны. Решения уравнений представляют собой поля на границе. Недостаток этого метода — в общем случае очень большое число подобластей и, следовательно, высокий ранг матрицы. Второй метод, применимый к периодическим структурам, заключается в разложении выражений для поверхностных токов в ряд Фурье с ограниченным (вследствие периодичности) числом компонент. Эти компоненты могут быть выведены из-под знака интеграла, и вновь получается матричное уравнение, в котором в качестве неизвестных выступают уже фурье-компоненты.

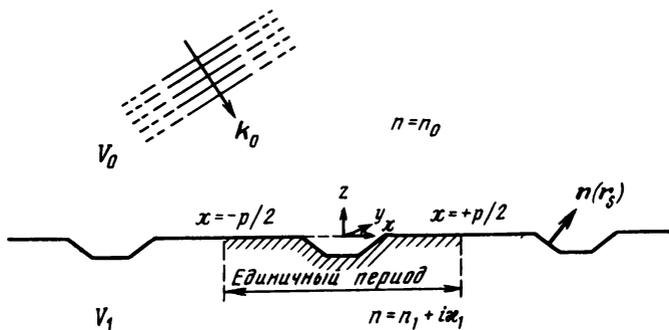


Рис. 3.3. Геометрия дифракции для одномерного периодического профиля решетки с многоугольным сечением

2. Выражения (3.11а), (3.12а), (3.11в) и (3.12в) рассматриваются не как точные уравнения, а как интегральные представления полей  $\mathbf{E}(\mathbf{r}_p)$  и  $\mathbf{H}(\mathbf{r}_p)$  вне границы  $S(\mathbf{r}_s)$  через значения полей  $\mathbf{E}(\mathbf{r}_s)$  и  $\mathbf{H}(\mathbf{r}_s)$  на границе. В этом случае поверхностные токи могут быть сравнительно просто рассчитаны с помощью уравнений (3.11в) и (3.12в), поскольку в них правая часть известна. Если токи известны, то можно их подставить в уравнения (3.11а) и (3.12а) и получить выражение для дифрагировавших полей в точке наблюдения  $\mathbf{r}_p$ . В качестве примера этого метода, предложенного в [18], рассмотрим более подробно случай плоской волны, дифрагирующей на одномерной решетке. Предположим, что профиль решетки многоугольный, его геометрия представлена на рис. 3.3.

Поверхность раздела  $S(\mathbf{r}_s)$  между рассеивающей средой  $V_1$  и свободным пространством  $V_0$  периодична в направлении  $x$  с периодом  $p$  и бесконечно продолжается в направлениях  $x$  и  $y$ .

Если периодическая структура освещается нормально падающей плоской волной, то задача дифракции периодическая и, следовательно, поверхностные токи и дифрагирующие поля должны обладать такой же периодичностью, т. е. они могут быть разложены в ряд Фурье. Если волна падает на поверхность под углом, отличным от  $90^\circ$ , то фаза волны изменяется по поверхности и введением дополнительного инверсного фазового множителя можно восстановить периодичность задачи. В этом случае речь идет о квазипериодических токах, полях и т. д.

Если опустить временной множитель  $\exp(-i\omega t)$ , то падающее поле можно записать в виде

$$\mathbf{E}^{\text{пад}}(\mathbf{r}_p) = \hat{\mathbf{e}}_{\text{пад}} \exp(i\alpha_0 x_p + i\beta_0 y_p - i\gamma_0 z_p), \quad (3.13)$$

где  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$ ,  $\gamma_0$  — компоненты волнового вектора падающей волны  $\mathbf{k}_0$  в направлениях осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  соответственно. Направляющий вектор  $\hat{\mathbf{e}}_{\text{пад}}$  определяет состояние поляризации. Если ограничиться случаем, когда свет распространяется в плоскости  $xz$  (т. е.  $\beta_0 = 0$ ) под углом

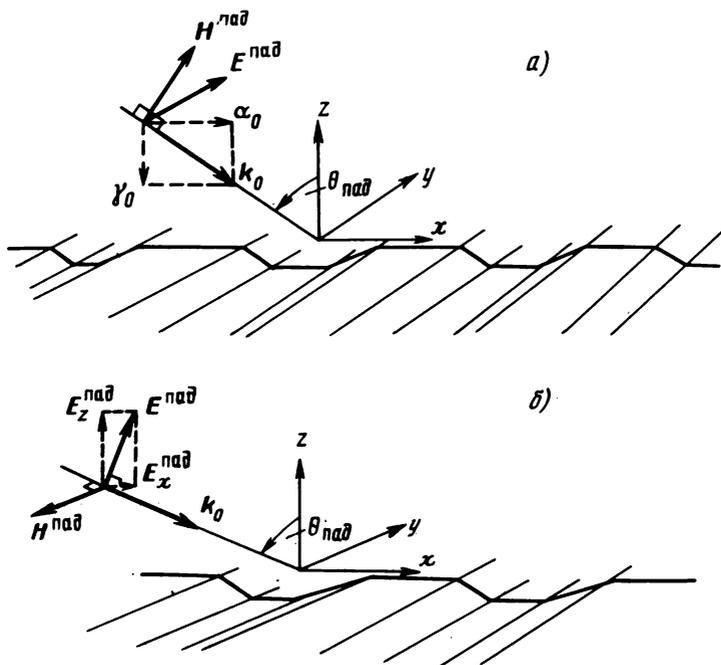


Рис. 3.4. Два линейно независимых состояния поляризации при параллельных дорожкам структуры электрическом ( $E$ -, или  $P$ -поляризация) (а) и магнитном ( $H$ -, или  $S$ -поляризация) (б) векторах падающего света

$\theta_{\text{пад}}$  по отношению к нормали (т. е.  $\alpha_0 = k_0 \sin \theta_{\text{пад}}$ ), то задача дифракции разделяется на две части для двух независимых состояний поляризации, одна из которых описывает дифракцию линейно поляризованной волны, электрический вектор которой параллелен штрихам решетки, а вторая — дифракцию линейно поляризованной волны, магнитный вектор которой параллелен штрихам решетки.

Первый случай называется случаем параллельной  $E$ ,  $TE$ , или  $P$ -поляризации, а второй — случаем перпендикулярной  $H$ ,  $TM$ , или  $S$ -поляризации. Это значит, что между этими собственными состояниями и поляризациями отсутствует взаимовлияние и дифракцию света любой поляризации можно описывать с помощью отдельных решений задачи дифракции обоих ортогональных собственных состояний поляризации. Таким образом, можно записать (рис. 3.4)

$$\mathbf{E}^{\text{пад.} \parallel} = (0, 1, 0) \exp [ik_0(x_p \sin \theta_{\text{пад}} - z_p \cos \theta_{\text{пад}})] \quad (3.14a)$$

для  $P$ -поляризации,

$$\mathbf{E}^{\text{пад.} \perp} = \cos \theta_{\text{пад}}, 0, \sin \theta_{\text{пад}} \exp [ik_0(x_p \sin \theta_{\text{пад}} - z_p \cos \theta_{\text{пад}})] \quad (3.14б)$$

для  $S$ -поляризации.

Так как  $\mathbf{J}(\mathbf{r}_s) \exp(-i\alpha_0 x)$  — периодична, квазипериодические поверхностные токи могут быть разложены в ряд Фурье:

$$\mathbf{J}_s^{e,m}(\mathbf{r}_s) = \exp(i\alpha_0 x) \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \mathbf{j}_l^{e,m} \exp(2\pi i l x_s / p) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} \mathbf{j}_l^{e,m} \exp(i\alpha_l x_s), \quad (3.15)$$

где

$$\alpha_l = \alpha_0 + 2\pi l / p. \quad (3.16)$$

Вследствие того что вектор  $\mathbf{J}_l^{e,m}$  лежит на поверхности, он имеет только две независимые компоненты: одну в направлении  $y$ , а другую — перпендикулярную к  $y$  и направленную вдоль поверхности.

Применим другое, квазипериодическое представление функции Грина  $G_{0,1}(|\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_s|)$  в средах 0 и 1 через плоские волны [12]:

$$G_{0,1}(|\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_s|) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \frac{i}{2\gamma_m^{0,1} p} \exp[i\alpha_m(x_p - x_s) + i\gamma_m^{0,1}(|z_p - z_s|)], \quad (3.17)$$

где  $\gamma_m^{0,1}$  определяется выражением

$$\gamma_m^{0,1} = (k_{0,1}^2 - \alpha_m^2)^{1/2}. \quad (3.18)$$

В производной уравнения (3.17) интегрирование в направлении  $y$  в (3.11) и (3.12) считается всегда выполненным.

Теперь выражения (3.15) и (3.17) подставляются в (3.11в) и (3.12в). Фурье-компоненты  $\mathbf{j}_l^{e,m}$  могут быть вынесены из-под знака интеграла, и если форма профиля  $z_s(x_s)$  известна, то может быть проведено интегрирование по  $x_s$  в пределах одного периода  $-p/2 < x_s < p/2$ . Затем берутся пространственные производные  $\nabla_p$ , и мы приходим к двум уравнениям с двойным суммированием по  $m$  и  $l$ . В правых частях уравнений (3.11в) и (3.12в) имеются выражения  $\exp(i\alpha_0 x_p)$  из (3.13), а в левых частях —  $-\exp(i\alpha_m x_p)$  из (3.17). Поскольку эти выражения при разных  $m$  взаимно ортогональны, можно разложить два уравнения с суммированиями по  $m$  и  $l$  на набор уравнений, где при каждом значении  $m$  производится суммирование только по  $l$ . Это значит, что в конце концов получилась матрица со строками, пронумерованными индексами  $m$  функции Грина и столбцами, пронумерованными индексами  $l$  компонент поверхностного тока.

Неизвестный вектор состоит из компонент  $j_{l,y}^e, j_{l,xz}^m$  для случая Р-поляризации и  $j_{l,xz}^e, j_{l,y}^m$  для случая S-поляризации. Компоненты вектора правой части матричного уравнения известны; все они равны нулю, за исключением одной компоненты с  $m=0$ , которая равна  $\hat{\mathbf{e}}_{\text{пад}}$  в соответствии с (3.13) и (3.14). Это матричное уравнение может быть решено стандартными методами. Если поверхностные токи известны, то их можно подставить в (3.11а) и (3.12а) для получения

фурье-компоненты прошедшего и отраженного полей, из которых легко получаются амплитуды, фазы и интенсивности дифракционных порядков.

Учет двенадцати первых членов фурье-разложения поверхностных токов приводит к матрице ранга 50 и обеспечивает точность расчетов около 1%.

### 3.3. РЕЗУЛЬТАТЫ

#### 3.3.1. ОТЛИЧИЯ ОТ СКАЛЯРНОЙ ТЕОРИИ

В данном разделе изложены результаты расчета с помощью векторной теории дифракции на объектах различной формы и проведено их сравнение с результатами, полученными скалярными методами.

**Прямоугольный пит.** Сначала рассмотрим дифракцию на одиночном прямоугольном углублении (пите) с вертикальными стенками в алюминиевой основе [2]. Геометрия показана рис. 3.5.

Для расчета приняты следующие параметры:  $L=765$  нм,  $W=525$  нм,  $D=110$  нм,  $\lambda=633$  нм,  $n_0=1,0$ ,  $n_1=1,5$ ,  $\kappa_1=6,0$ .

Нормально падающее электромагнитное поле линейно поляризовано, причем вектор  $\mathbf{E}$  направлен параллельно длинной стороне пита. Локальные поля на наружной поверхности и для пита рассчитаны с помощью метода моментов. Согласно скалярной теории разность фаз полей на поверхности подложки и на дне пита должна составлять  $2\pi D/\lambda=0,35\pi$ , а амплитуды электрического и магнитного полей, представляющие собой суммы амплитуд падающей и отраженной волн, будут

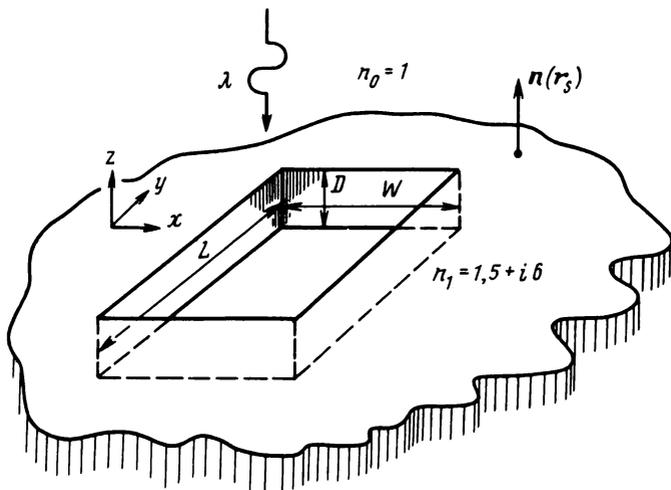


Рис. 3.5. Геометрия рассеяния света единичным прямоугольным углублением в металлической основе

$$|E_y| = \left| \frac{2}{n_1 + 1 + ix_1} \right| |E^{\text{пад}}| = 0,3 |E^{\text{пад}}|,$$

$$|H_x| = \left| \frac{2(n_1 + ix_1)}{n_1 + 1 + ix_1} \right| \left| \frac{k}{\omega\mu} E^{\text{пад}} \right| = 1,9 \frac{k}{\omega\mu} |E^{\text{пад}}|.$$

На рис. 3.6 показаны рассчитанные по векторной теории распределения фазы и амплитуды эквивалентного электрического поверхностного тока  $\mathbf{J}_e$  на дне пита. Заштрихованные области соответствуют прогнозу скалярной теории.

Видно, что имеют место значительные различия между результатами скалярной и векторной теорий. На дне пита вблизи стенок, перпендикулярных к вектору  $\mathbf{E}$  падающей волны, амплитуда больше, чем предсказываемая скалярной теорией, а вблизи стенок, параллельных вектору  $\mathbf{E}$ , — меньше. Фаза больше вблизи стенок, перпендикулярных к  $\mathbf{E}$ .

Эти результаты могут быть объяснены путем сравнения их с решением задачи дифракции на узкой щели в идеально проводящем экране, предложенным Зоммерфельдом [16]. В этом случае падающий свет индуцирует поверхностные токи, которые отражают энергию. Снова можно рассмотреть два состояния поляризации. Если вектор  $\mathbf{E}$  падающей волны направлен параллельно щели, то вблизи нее индуцируются значительные поверхностные токи, которые заходят и на края. Следовательно, значительное количество света отражается краями, которые действуют как линейные источники, и только немного света пройдет сквозь щель. Аналогично обосновывается данный результат и с помощью граничных условий. Поскольку экран является идеальным проводником, электрическое поле должно быть равно нулю внутри экрана. Граничное условие гласит, что тангенциальная компонента электрического поля непосредственно на границе проводника должна быть равна нулю. Если вектор  $\mathbf{E}$  ориентирован параллельно щели, то и в самой щели вблизи ее краев электрическое поле должно быть мало, т. е. на некотором расстоянии за экраном щель кажется более узкой.

В другом случае поляризации индуцированные электрические токи направлены перпендикулярно щели, и на краях щели они должны быть равны нулю, поскольку токи не могут выйти за пределы материала. Вследствие этого края не могут излучать и свет свободно проникает через щель. Что касается граничных условий, то на краю вектор электрического поля перпендикулярен поверхности, и, следовательно, поле не обязательно должно быть равно нулю. В этом случае свет, попадающий в щель, испытывает очень слабое влияние краев и подавляющая его часть проходит. Хотя в рассматриваемом случае алюминий не является идеальным проводником на частотах оптического диапазона, тем не менее наблюдаемые поляризационные эффекты могут получить качественное объяснение. Если вектор  $\mathbf{E}$  падающего поля параллелен стенкам, то он в любой точке параллелен проводящей поверхности. Поэтому много света отражается

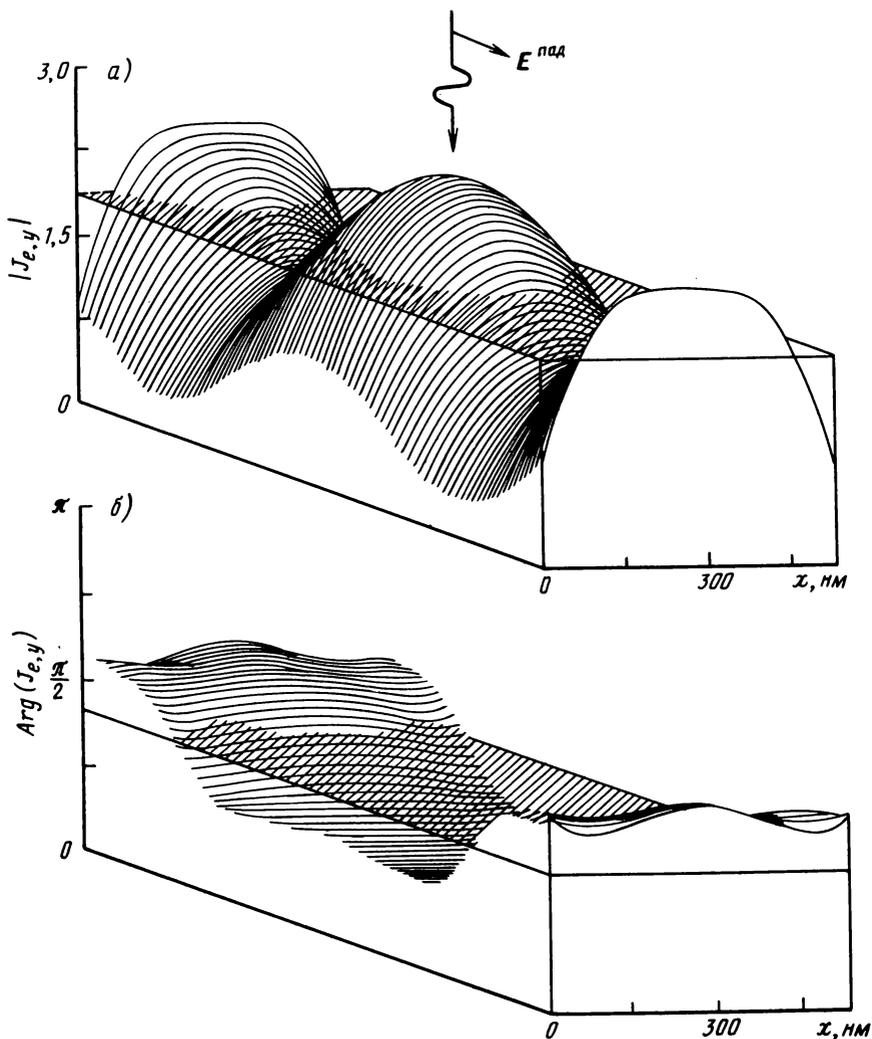


Рис. 3.6. Распределение амплитуды (а) и фазы (б) электрического поверхностного тока  $J_{e,y}$  (в единицах  $kE^{пад}$ ) на дне углубления в алюминии. Оттененная плоскость соответствует распределению, рассчитанному по скалярной теории

краями и стенками, что приводит к малым значениям амплитуд полей на дне пита вблизи стенок. Это также значит, что средняя фаза отраженного света меньше, чем предсказываемая скалярной теорией, и питы кажутся более мягкими. Если вектор  $\mathbf{E}$  перпендикулярен стенкам, то краями отражается мало света, и электрическое поле, принимающее бесконечное значение вдоль границы на стенках, может

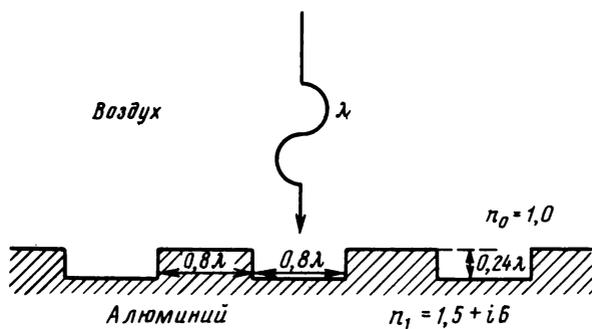


Рис. 3.7. Геометрия рассеяния света для случая прямоугольных дорожек в алюминии

достигнуть дна со сравнительно большой амплитудой и затем отразиться. Поэтому в данном случае набег фазы больше.

Эти поляризационные эффекты становятся более понятными, если рассмотреть дифракцию на структуре, имеющей одну ось, т. е. на решетке из параллельных рельефных дорожек, когда отсутствуют эффекты взаимовлияния двух перпендикулярных стенок вблизи угла пита.

**Дорожки с вертикальными стенками.** Задача распадается на решения для двух чистых состояний поляризации. Геометрия рассеивающей структуры показана на рис. 3.7. Ширина верхней и нижней горизонтальных частей выбрана равной  $0,8\lambda$ , а глубина —  $0,24\lambda$ . Вертикально падающий свет попадает на поверхность алюминия, имеющего комплексный показатель преломления  $n_1 = 1,5 + i0,6$ .

Рассчитанные поверхностные электрические токи на верхней и нижней частях показаны на рис. 3.8 для обоих направлений поляризации падающего света. Скалярные значения представлены горизонтальными линиями. В случае параллельной поляризации падающее электрическое поле во всех точках параллельно поверхности. Видно, что ток на вершине колеблется вокруг скалярного значения, а вблизи края увеличивается. На дне дорожки амплитуда тока принимает нулевое значение вблизи стенок, поскольку падающее поле заблокировано краями и стенками. Разность фаз полей на верхней и нижней плоскостях структуры также меньше, чем предсказывается скалярной теорией.

В случае перпендикулярной поляризации токи на верхней плоскости вблизи краев уменьшаются и отражаются мало света. Электрическое поле свободно распространяется вдоль дорожек, и амплитуда поля на нижней плоскости имеет значительную величину. Разность фаз также велика, и кажущаяся глубина рельефа больше, чем геометрическая.

На основании изложенного выше становится ясно, что поверхностный рельеф модулирует не только фазу, но и амплитуду па-

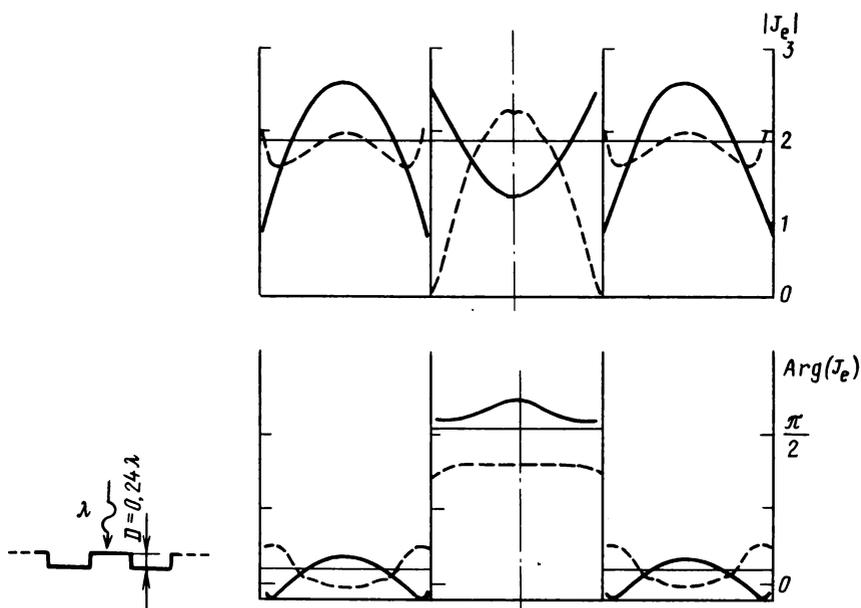


Рис. 3.8. Амплитуды и фазы электрических поверхностных токов на верхней и нижней частях прямоугольных дорожек:  
 - - - - Р-поляризация, — S-поляризация

дающего поля. И, следовательно, структура поверхности действует как комбинированная фазовая и амплитудная решетка.

Фазовая глубина дорожек может быть определена как разность фаз отраженных от верхней и нижней частей структуры полей, измеренная в плоскости непосредственно над структурой. Эта фазовая глубина представляет собой эффективную глубину дорожки для падающего света и, очевидно, зависит от взаимной ориентации вектора поляризации и направления дорожек. Фазовая глубина представляет особый интерес для описания процесса воспроизведения информации с оптических дисков.

Рассмотрим более подробно зависимость поляризационных эффектов от геометрии дорожек. На рис. 3.9 изображены зависимости усредненных значений фазы и амплитуды электрических поверхностных токов на дне дорожек от ширины дорожки  $W$  при заданной глубине  $D=0,24 \lambda$ , а также от геометрической глубины дорожки  $D$  для заданной ширины  $W=0,64\lambda$ . На основании этих графиков можно сделать два вывода: 1) кажущийся размер дорожки всегда больше для перпендикулярной поляризации, чем для параллельной; 2) отличие от предсказаний скалярной теории возрастает для значений  $W$ , меньших  $\lambda$ . При увеличении ширины эти различия уменьшаются. Расхождения со скалярной теорией, обусловленные глубиной  $D$ , сравнительно невелики даже в том слу-

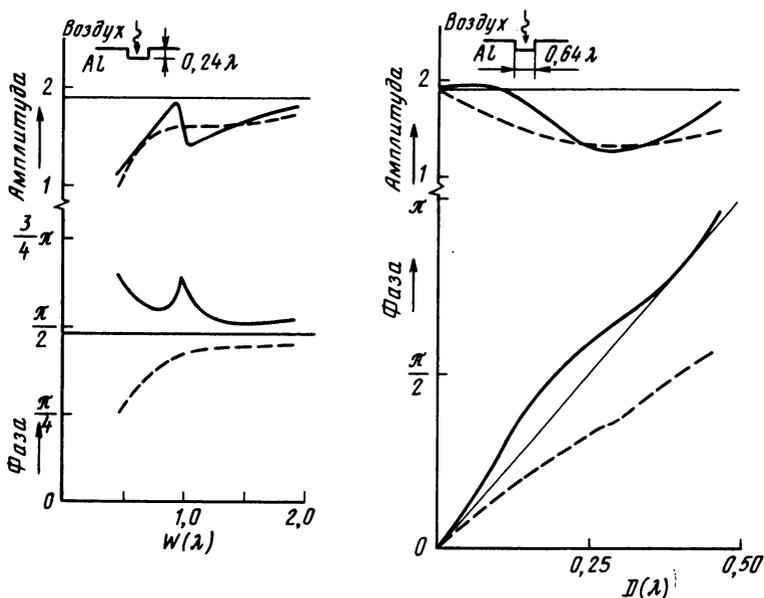


Рис. 3.9. Зависимости усредненных амплитуд и фаз электрических поверхностных токов на дне прямоугольной дорожки от ее ширины  $W$  и глубины  $D$ :  
 --- P-поляризация, — S-поляризация, — зависимости, предсказываемые скалярной теорией

чае, когда глубина дорожек стремится к нулю. Следовательно, как уже отмечалось во введении, критерием применимости скалярной теории являются именно поперечные размеры структуры.

Следует отметить, что указанные закономерности выведены для структуры на хорошо проводящей металлической поверхности, где имеется резкий оптический контраст. В этом случае внутренние электрические поля имеют нулевое значение и граничные условия существенно влияют на картину рассеянного поля. Далее будет показано, что поляризационные эффекты менее выражены при низком оптическом контрасте, например в случае диэлектрической решетке.

До сих пор мы рассматривали распределение полей в питах и дорожках с вертикальными стенками, чтобы проиллюстрировать влияние поляризации. Однако больший практический интерес представляют не поверхностные токи, а амплитуды дифракционных порядков, обусловленные дифракцией на структурах с наклонными стенками и различным оптическим контрастом, которые более близки к реальным ситуациям. Теперь векторная теория дифракции, математический аппарат которой изложен в разд. 3.2, будет применена для описания двух крайних случаев дифракции, которые встречаются в процессе изготовления диска-оригинала. В обоих случаях рассматриваются только дорожки, однако оптический

контраст в первом случае очень низок, а во втором — чрезвычайно высок.

**Изготовление микрорельефа диска-оригинала.** Структура пит записывается на диске-оригинале путем экспонирования тонкого слоя фоточувствительного материала (резиста) модулированным сфокусированным пятном лазерного излучения. Более детально этот процесс описан в гл. 5. Микрорельеф пит на поверхности диска-оригинала возникает при травлении фоторезиста. С целью коррекции небольших вариаций при экспонировании и отклонений режимов обработки процесс травления необходимо постоянно контролировать, с тем чтобы иметь возможность прервать его в тот момент, когда средний объем пита достигнет желаемой величины. Для этого на каждом диске-оригинале записывается специальная тестовая зона; в процессе травления на эту зону направляется луч He — Ne-лазера, который дифрагирует на возникающей при травлении структуре. По данным измерений интенсивностей порядков дифракции прошедшего света определяется стадия травления.

Для расчета изменения интенсивности дифракционных порядков при травлении реальное сечение структуры аппроксимировалось ломаной линией, как показано на рис. 3.10. Было также сделано предположение о том, что наклон стенок при травлении увеличивается, а ширина пита на поверхности фоторезиста остается неизменной. Следовательно, в этой модели вытравливаемая дорожка имеет треугольное сечение до тех пор, пока не достигнет поверхности раздела фоторезист — стекло, а после этого профиль становится трапециевидным. Геометрические и оптические параметры, являющиеся исходными при постановке задачи дифракции, более или менее определяются стандартным процессом изготовления

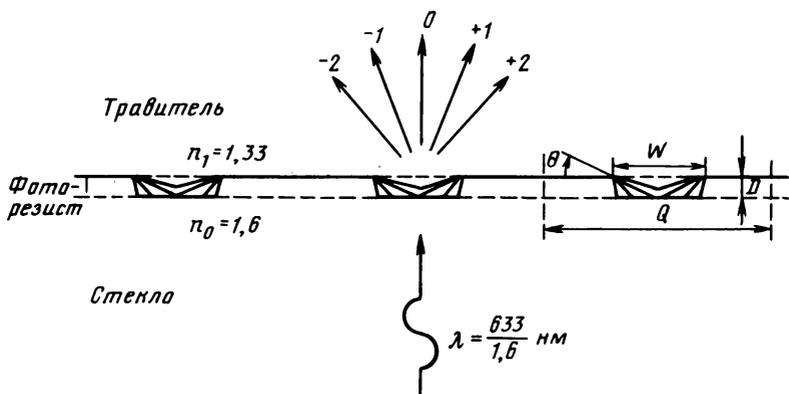


Рис. 3.10. Модель геометрии дифракции в процессе травления фоторезиста

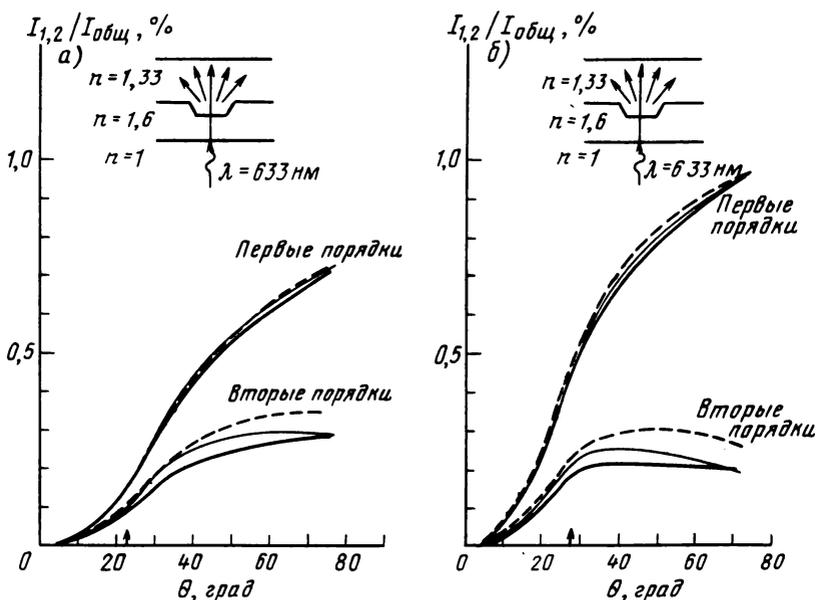


Рис. 3.11. Расчетные зависимости интенсивностей первого и второго порядков дифракции при травлении от угла раскрытия  $\theta$  для дорожек шириной 500 нм (а) и 600 нм (б); толщина фоторезиста 130 нм: — S-поляризация, - - - P-поляризация, † — точка перехода формы поперечного сечения дорожки из треугольной в трапециевидальную, — зависимости, предсказываемые скалярной теорией

диска-оригинала. Период решетки  $Q=1670$  нм, толщина слоя  $D$  составляет 120...130 нм, ширина дорожки  $W \approx 600$  нм, угол наклона  $\theta$  выбран в качестве переменной. Оптический контраст определяется показателями преломления стекла и фоторезиста  $n_0=1,6$  и показателем преломления травителя  $n_1=1,33$ , что приводит к наличию отражения менее 1% света. Поскольку эти два показателя выражаются реальным числом и сравнительно мало отличаются друг от друга, граничные условия несущественно влияют на результаты расчета дифракции излучения с различными направлениями поляризации. Амплитуды полей на поверхности раздела модулируются незначительно, и поэтому поляризационные эффекты будут выражены слабо.

На рис. 3.11 изображены зависимости интенсивностей первого и второго порядков дифракции прошедшего света  $I_1^\perp$  и  $I_2^\perp$  для двух случаев поляризации от угла наклона стенок  $\theta$  для двух значений  $W$ . Отмечены также и величины, рассчитанные по скалярной теории. Как и ожидалось, поляризационные эффекты выражены слабо, особенно для первого порядка. Следует отметить, что в этом случае результаты скалярной и векторной теорий достаточно хорошо совпадают. Направление поляризации оказывает большое влияние на второй порядок дифракции, и, как видно,

кривая, рассчитанная по скалярной теории, располагается между двумя кривыми, рассчитанными по векторной теории. Интенсивности  $I_1$  и  $I_2$  быстро возрастают при увеличении  $\theta$  и, следовательно, объема дорожек до момента достижения стеклянной основы. Начиная с этого момента, отмеченного на рисунке стрелкой на горизонтальной оси, скорость, с которой увеличивается объем канавки из-за увеличения  $\theta$ , начинает уменьшаться вследствие ограничивающего влияния стеклянной подложки, и на графике появляется точка перегиба. Отмечено также, что интенсивность второго порядка проходит через максимум, если  $W \geq 500$  нм. Объясняется это тем, что решетка с шириной штриха, равной половине периода, не дает четких порядков дифракции. Следовательно, когда средняя ширина канавки увеличивается до значений, больших  $Q/4$ , интенсивность второго порядка дифракции начинает уменьшаться.

Для вариантов геометрии структуры, возникающих при травлении стандартного диска-оригинала, можно сделать следующее заключение: интенсивность первых порядков дифракции почти прямо пропорционально зависит от объема канавок; интенсивность вторых порядков дифракции строго определяется отношением ширины канавки к периоду решетки. Эти выводы находятся в согласии с результатами скалярной теории, и, следовательно, для описания и разработки системы управления процессом травления можно применять скалярную теорию. На рис. 5.11 для сравнения с расчетными приведены экспериментальные кривые.

**Микрорельеф на серебре.** Рассмотрим теперь случай высоко-го электромагнитного контраста. В процессе изготовления диска-оригинала после травления слой фоторезиста с питамы методом напыления покрывается тонким слоем серебра, после чего проводятся дифракционные измерения для определения качества диска-оригинала (см. подразд. 5.2.4). Предполагается, что геометрия рассеивающей структуры на поверхности фоторезиста не изменяется в процессе напыления слоя серебра; она показана на рис. 3.12. По сути это та же самая структура, имеющая в сечении трапециевидальную или треугольную форму, однако теперь излучение с длиной волны  $\lambda = 633$  нм падает из воздуха на сильно отражающую металлическую поверхность с комплексным показателем преломления  $n_1 = 0,08 + i 4,1$ , что обеспечивает отражение 98%.

Снова применим векторную теорию, изложенную в разд. 3.2 для расчета амплитуд дифракционных порядков света, отраженного от структуры. В процессе расчета можно получить не только интенсивности, но и фазы порядков. Как отмечалось в подразд. 2.2.3, амплитуда сигнала считывания при воспроизведении в значительной степени определяется разностью фаз нулевого и первых порядков. Эта разность фаз связана с фазовой глубиной дорожки, следовательно, также является функцией геометрических парамет-

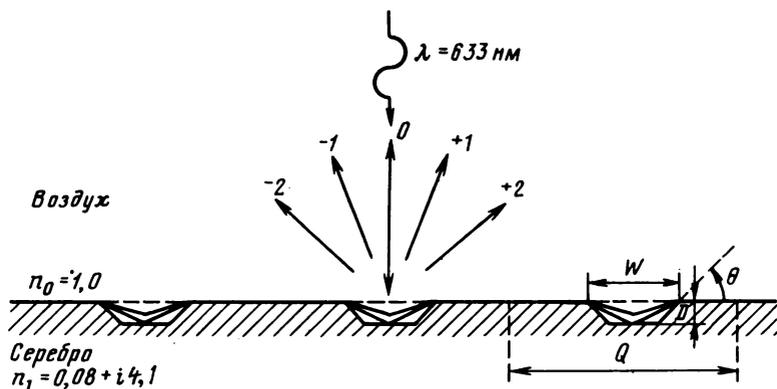


Рис. 3.12. Геометрия дифракции для случая дорожек с многоугольным поперечным сечением в серебре

ров. Измерение этой разности фаз является важнейшим средством проверки и оценки качества как диска-оригинала, так и снятых с него реплик (см. подразд. 5.2.4). Однако в оптическом устройстве для измерения фазы падающий луч света направлен не по нормали к поверхности, а под таким углом, чтобы направление распространения первых порядков дифракции совпадало с падающим лучом (схема Литтрова). Для периода решетки  $Q = 1670 \text{ nm}$  это значит, что угол падения  $\theta_{\text{пад}}$  должен быть равен  $10,9^\circ$ . В наших расчетах этот случай также рассматривается, чтобы теоретически предсказать экспериментально измеряемые значения разности фаз.

На рис. 3.13 приведены несколько расчетных графиков зависимостей интенсивностей (верхние графики,  $\theta_{\text{пад}} = 0^\circ$ ) и разностей фаз (нижние графики,  $\theta_{\text{пад}} = 0$  и  $10,9^\circ$ ) порядков дифракции от угла наклона стенок  $\theta$ . Изображены также аналогичные зависимости, рассчитанные по скалярной теории. Можно отметить значительное влияние состояния поляризации как на интенсивности порядков, так и на разности фаз. Для величин  $W < 575 \text{ nm}$  и  $\theta \leq 30^\circ$  второй порядок  $I_{\frac{1}{2}}$  для S-поляризации становится даже больше, чем первый порядок для P-поляризации. Снова видно, что влияние направления поляризации падающего света уменьшается для больших значений  $W$ ; особенно это справедливо для первых порядков.

Интенсивности вторых порядков дифракции и разности фаз  $\psi$  всегда имеют значительные отличия для двух случаев поляризации даже при достаточно широких дорожках. Данное обстоятельство находится в согласии со свойствами порядков дифракции для случая низкого контраста. Вновь эффективный размер дорожки больше для P-поляризации. Хотя зависимости, следующие из скалярной теории, качественно подобны зависимостям, рассчитанным по векторной теории, видно, что они отклоняются слишком сильно

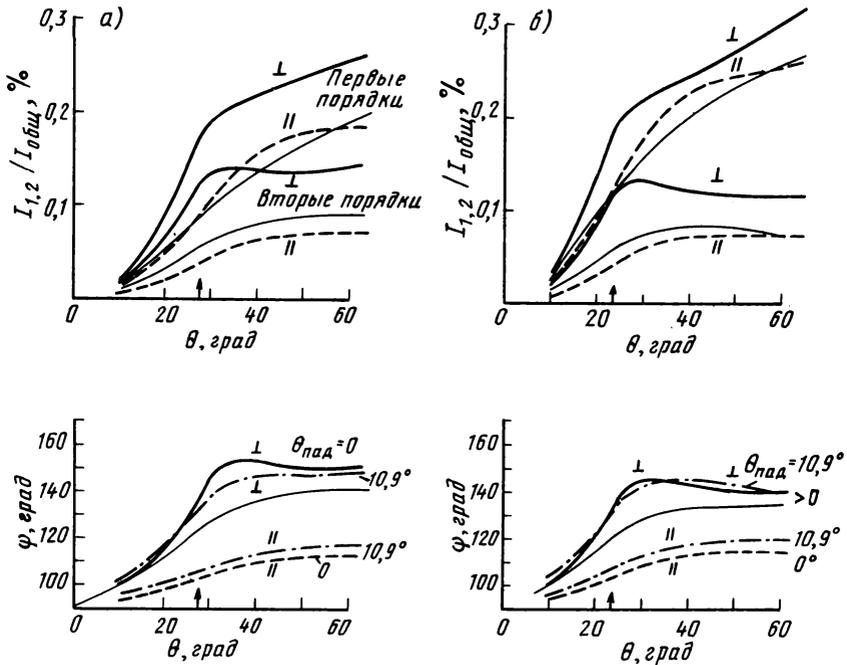


Рис. 3.13. Зависимости интенсивностей порядков дифракции (верхние графики) и разности фаз (нижние графики) от угла наклона стенок  $\theta$  для дорожек глубиной  $D=130 \text{ нм}$  при ширине  $W=500 \text{ нм}$  (а) и  $W=600 \text{ нм}$  (б), рассчитанные для вертикального падения:  
 --- Р-поляризация, — S-поляризация, ——— скалярная теория

и поэтому не пригодны для проведения успешного количественного анализа результатов дифракционных измерений микрорельефа на посеребренных дисках-оригиналах. Методика определения параметров микрорельефа по интенсивности дифракционных порядков рассматривается в следующем подразделе.

### 3.3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ МИКРОРЕЛЬЕФА С ПОМОЩЬЮ ДИФРАКЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В процессе изготовления дисков-оригиналов, а также для контроля конечных продуктов (дисков-оригиналов) очень важно знать геометрические параметры пит и зависимость этих параметров от различных характеристик процесса. Поскольку размеры структур на дисках-оригиналах очень малы, стандартная измерительная техника не может дать точных результатов. Оптическая микроскопия может быть использована для исследований больших дефектов типа частичек пыли, однако получение подробной информации о форме пит или дорожек невозможно, поскольку их размеры меньше

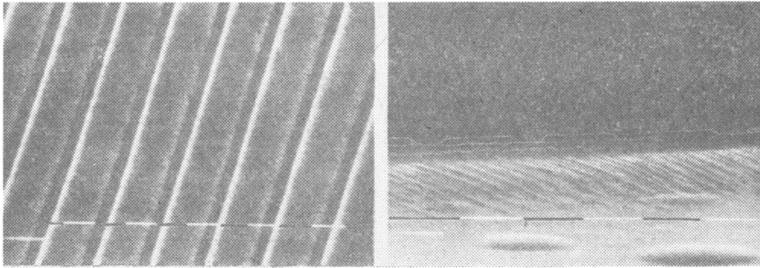


Рис. 3.14. Микрофотографии непрерывных дорожек, полученные с помощью электронного сканирующего микроскопа: слева — вид сверху; справа — поперечное сечение. Каждый горизонтальный белый отрезок соответствует 1 мкм

классического предела, обусловленного разрешающей способностью. Методы, которые позволяют измерять элементы такого масштаба, являются разрушающими; более того, даже с помощью электронной микроскопии достаточно сложно получить точную информацию о ширине, глубине и наклоне стенок дорожек, имеющих глубину около 0,1 мкм (рис. 3.14).

Как отмечалось в подразд. 3.3.1, дифракция света в значительной степени зависит от геометрии, и это обстоятельство позволяет использовать свойства дифракции для определения геометрических размеров. С этой целью на дисках-оригиналах могут быть записаны кольцевые зоны дорожек (тестовые кольца), в которых варьируются определенные параметры записи, такие как интенсивность или диаметр пятна записи. Профиль дорожки будет соответственно изменяться, что, в свою очередь, приведет к различным значениям интенсивностей и фаз порядков дифракции, возникающих при освещении таких тест-зон лучом He — Ne-лазера. Сравнивая эти измеренные величины с результатами соответствующих расчетов по векторной теории, можно получить оценку геометрических параметров дорожек. Для наших расчетов мы снова аппроксимируем профиль отрезками прямой линии, т. е. рассмотрим треугольные или трапециевидальные углубления на плоской поверхности. Геометрия определяется четырьмя параметрами:  $D$  — толщина слоя фоторезиста,  $W$  — ширина верхней части дорожки,  $Q$  — период дорожек, который в данном случае имеет постоянное значение 1670 нм, и  $\theta$  — угол наклона стенок. При расчете интенсивностей порядков предполагается, что излучение направлено по нормали к поверхности, а при расчете разности фаз принимается, что угол падения равен  $10,9^\circ$ , для того чтобы согласовать расчет с реальной геометрией дифракции в оптическом измерителе разности фаз. Во всех случаях длина волны света равна 633 нм.

На рис. 3.15 показано влияние ширины дорожки  $W$ . При очень узких дорожках ( $W=450$  нм) наблюдается очень сильное влияние

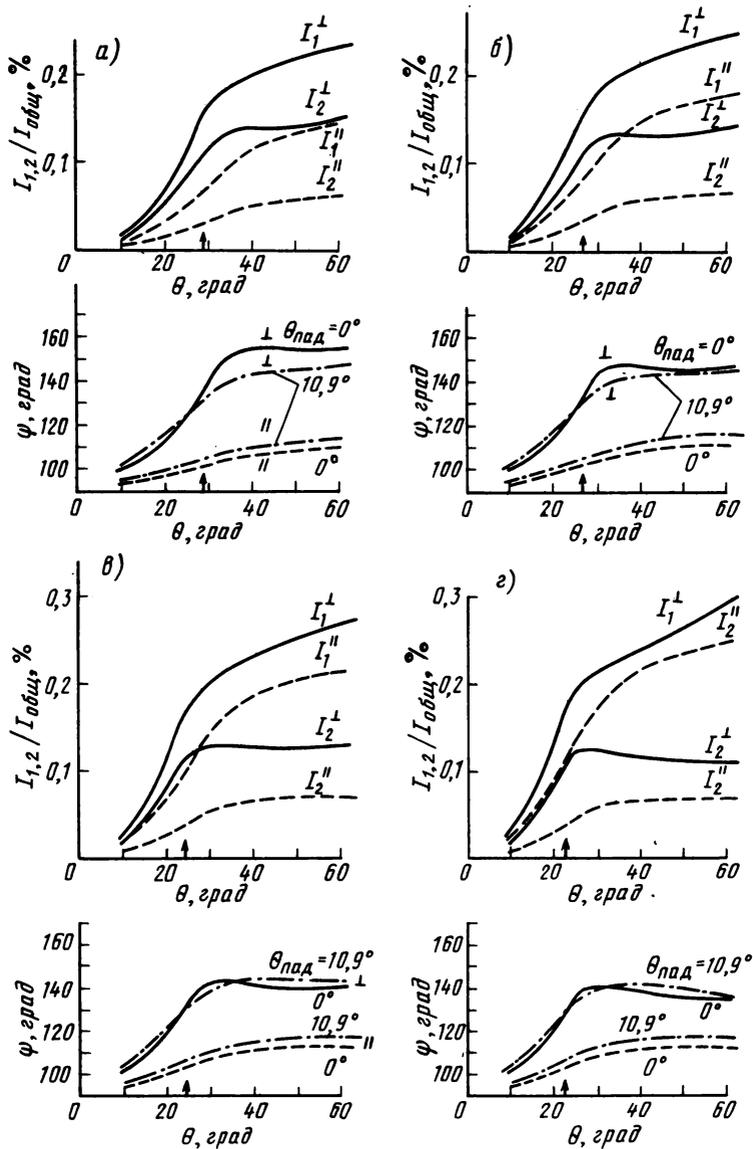


Рис. 3.15. Расчетные зависимости интенсивностей дифракционных порядков и разностей фаз от угла наклона стенок  $\theta$  для дорожек глубиной 125 нм и шириной  $W=450$  нм (а), 500 нм (б), 550 нм (в) и 600 нм (г), рассчитанные для вертикального падения: — — Р-поляризация, — S-поляризация,  $\uparrow$  — точка перехода формы поперечного сечения дорожек из треугольной в трапециевидную

поляризации. В случае S-поляризации интенсивности как первых, так и вторых порядков приблизительно в 2 раза больше, чем соответствующие порядки при P-поляризации, и второй порядок излучения при S-поляризации несколько больше, чем первый порядок при P-поляризации. Аналогично и разность фаз  $\psi$  гораздо больше для случая S-поляризации. Эффекты, связанные с увеличением  $W$ , больше выражены для P-поляризации. По сравнению с первым порядком дифракции света с S-поляризацией первый порядок с P-поляризацией существенно возрастает.

Если на графиках, соответствующих дорожкам с различной шириной, сравнить точки одинаковой глубины, например соответствующие моменту достижения стеклянной основы (отмечены стрелкой), то при P-поляризации второй порядок и разность фаз с увеличением ширины возрастают, а при S-поляризации — уменьшаются, причем разность фаз уменьшается особенно резко. Эти явления вызваны различными эффектами, связанными с граничными условиями для обеих поляризаций. В случае P-поляризации поле сильно проникает в дорожку, поэтому ее эффективная ширина и глубина становятся так малы, что любое увеличение  $W$  приводит к увеличению как эффективной ширины, так и эффективной глубины дорожки, а следовательно, эффективного объема; вследствие этого  $I'_1$  быстро увеличивается. Для второго порядка с P-поляризацией эффективная глубина увеличивается, а ширина остается меньше  $Q/4$ , поэтому  $I'_2$  также возрастает с увеличением  $W$ . При S-поляризации эффективная ширина дорожки гораздо больше  $Q/4$ , следовательно, для больших  $W$  эффективная ширина дорожки достигает  $Q/2$  и  $I'_2$  уменьшается. Это является также причиной уменьшения  $\psi$  для более широких дорожек. Согласно скалярной теории  $\psi$  должна быть равна  $90^\circ$ , если структура имеет скважность  $1/2$ , т. е. если эффективная ширина дорожки равна половине периода.

При стандартном процессе изготовления диска-оригинала ширина дорожки обычно составляет от 500 до 600 нм, и в этой области можно воспользоваться различными поляризационными эффектами, возникающими при варьировании значения  $W$  относительно  $\lambda$ .

Влияние толщины  $D$  слоя фоторезиста иллюстрируется графиками на рис. 3.16 для случая  $W=600$  нм. Оба графика идентичны для малых углов наклона стенок, когда углубление еще не достигло стеклянной подложки; они начинают расходиться только при больших углах наклона. Как и ожидалось, большие расчетные интенсивности получаются при более глубоких дорожках. Эффекты поляризации в основном остаются такими же. Глубина дорожки оказывает большее влияние на разность фаз. В данном случае более глубокие дорожки имеют большую фазовую глубину и соответственно обеспечивают большую разность фаз.

Для иллюстрации применений этого метода на рис. 3.17 изображены примеры экспериментальных значений, измеренных на по-

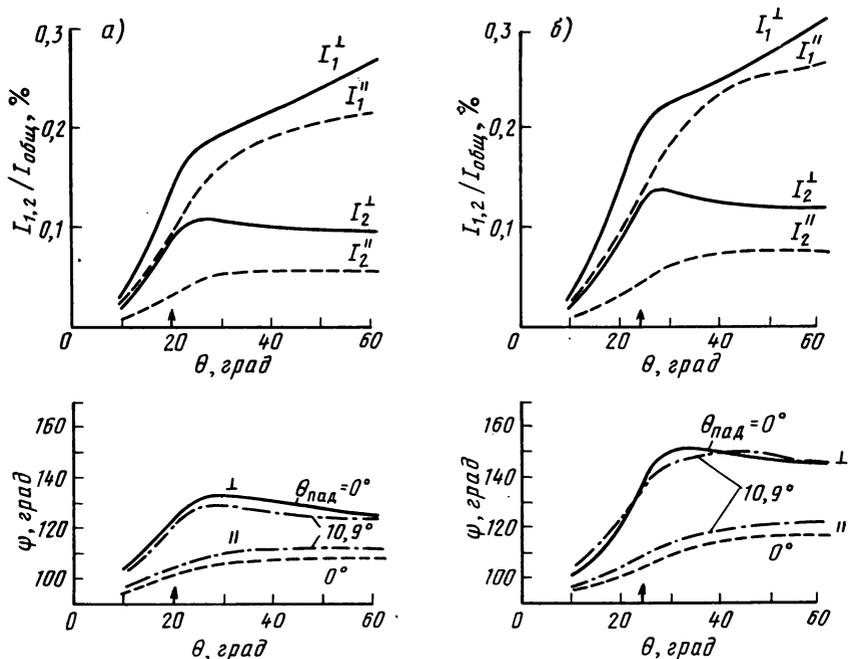


Рис. 3.16. Расчетные зависимости интенсивностей порядков дифракции и разностей фаз от угла наклона  $\theta$  для дорожки шириной 600 нм, глубиной  $D=110$  нм (а) и 135 нм (б):  
 --- Р-поляризация, — S-поляризация,  $\uparrow$  — точка перехода формы поперечного сечения дорожки из треугольной в трапециевидную

серебряном диске-оригинале с тестовыми зонами, записанными световым пятном с различными интенсивностями.

Числовая апертура записывающего объектива, определяющая диаметр светового пятна, равна 0,65 для всех зон. Видно хорошее соответствие экспериментальных и теоретических результатов для случая  $W=575$  нм и  $D=122,5$  нм. Отметим также, что увеличение интенсивности записывающего луча приводит к увеличению угла наклона стенок, в то время как ширина  $W$  остается практически постоянной и только для больших интенсивностей несколько увеличивается.

Таким образом можно определять форму дорожек неразрушающим методом с точностью около 25 нм по  $W$ , 3 нм по  $D$  и  $3^\circ$  по  $\theta$ .

### 3.3.3. РАСЧЕТ СИГНАЛОВ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

**Предварительный рельеф.** На дисках, предназначенных для хранения информации, пользователь записывает свои данные на предварительно созданном микрорельефе поверхности, имеющем

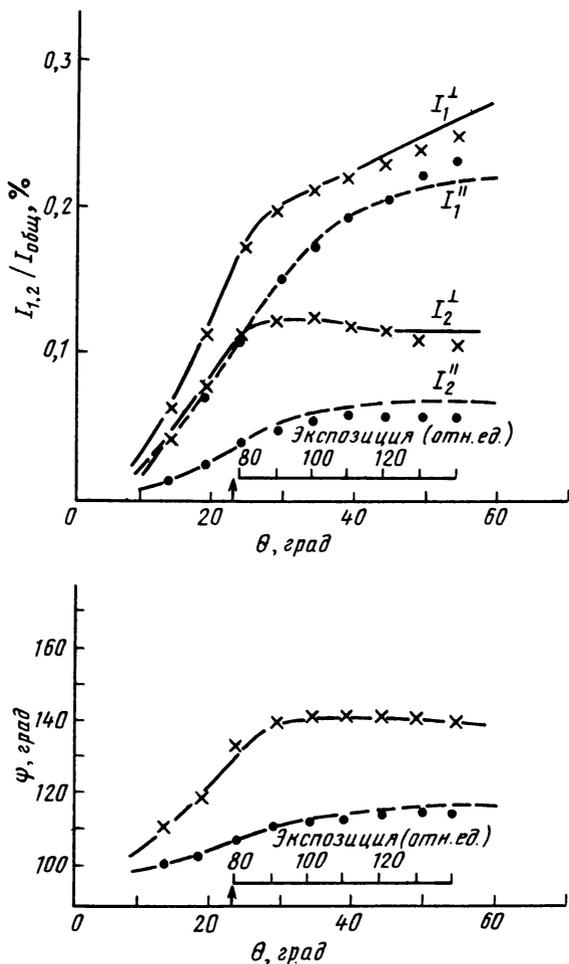
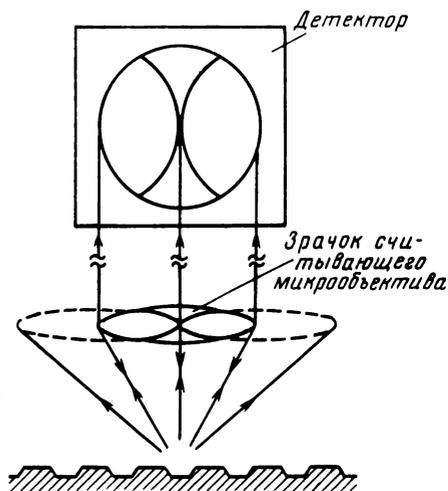


Рис. 3.17. Экспериментальные значения интенсивностей порядков и разностей фаз для Р-поляризации (точки) и S-поляризации (крестики) как функции уровня экспозиции при записи. Измеренные значения наложены на рассчитанные по векторной теории кривые для случая  $W=575$  нм и  $D=122,5$  нм

вид дорожек (см. гл. 6). Эти дорожки состоят из сравнительно короткого заголовка из пит, который содержит адрес и другую служебную информацию; за ним следует гладкая направляющая дорожка, на которой записывается информация пользователя. Направляющая дорожка служит для ведения записывающего пятна во время записи, поиска и считывания. Если пятно света пересекает дорожку, свет дифрагирует в различных направлениях, вызывая появление сигналов считывания, как это описывалось в гл. 2. Для направляющих дорожек особый интерес представляют два вида сигналов считывания.

Рис. 3.18. Схематическое изображение устройства считывания



Первый, так называемый сигнал центральной апертуры (ЦА), получается при собирании всего дифрагировавшего света, который проходит через считывающий объектив. Этот сигнал используется для считывания пик заголовка и информации пользователя, которая была записана в виде модуляции локального отражения. Он всегда положительный, но имеет минимальную амплитуду в том случае, когда центр считывающего пятна находится на центральной линии дорожки.

Второй сигнал, называемый радиальным пушпульным (ПП) или двухтактным, используется как сервосигнал для системы поддержания пятна на дорожке (см. гл. 4). Это разностный сигнал, получающийся вычитанием сигналов считывания с половинок фотоприемника, имеющего две независимые фоточувствительные площадки, разделенные щелью (рис. 3.18). В этом случае сигнал ЦА является суммой сигналов с обеих площадок. Если радиальное положение  $x$  пятна света соответствует центру дорожки или середине между двумя дорожками, то соответствующая дифракционная задача симметрична в радиальном направлении: вправо и влево от дорожки дифрагирует одинаковое количество света. В этих случаях радиальный ПП сигнал равен нулю. Для всех других положений пятна ПП сигнал не равен нулю: он либо положительный, либо отрицательный. Амплитуды как сигнала ЦА, так и ПП определяются амплитудами и фазами дифрагирующих порядков (см. гл. 2), которые, в свою очередь, зависят от геометрии дорожки. С этой точки зрения очевидна целесообразность применения векторной теории дифракции для расчетов этих сигналов как функций геометрии дорожки.

На рис. 3.19 показано распределение порядков дифракции на поверхности детектора для случая, когда плюс первый и минус первый порядки дифракции соприкасаются. Этот случай возникает когда радиальная пространственная частота равна половине частоты отсечки считывающего объектива, т. е. если период дорожек  $Q = \lambda/NA$ , где  $NA$  — числовая апертура объектива. В данном случае достаточно рассмотреть только первые и нулевой радиальные порядки дифракции. На обеих половинках детектора имеются две области различного характера. В районе I области  $S_1$  имеется только нулевой порядок с амплитудой  $A_0$ , который обуславливает

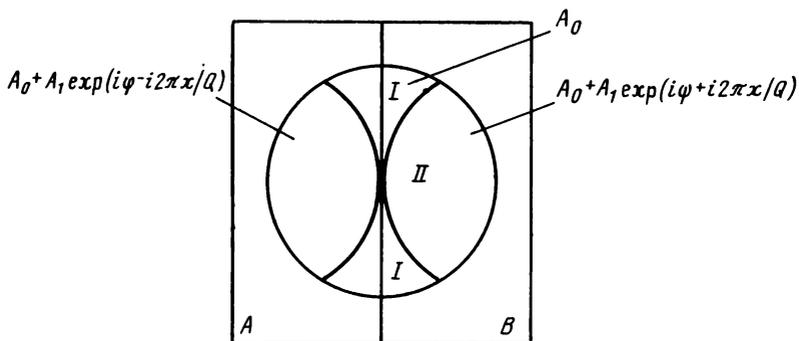


Рис. 3.19. Распределение порядков дифракции в плоскости детектора

электрический сигнал  $S_I |A_0|^2$ . В районе II области  $S_{II}$  первый и нулевой порядки перекрываются, и электрический сигнал определяется их интерференцией

$$S_{II} [|A_0 + A_1 \exp(i\psi + i2\pi x/Q)|^2].$$

Разность фаз между первым и нулевым порядками равна  $\Psi$ , если пятно находится на середине дорожки и линейно изменяется с изменением радиального смещения  $x$ .

Сигналы от обеих половин детектора описываются выражениями

$$I_A(x) = S_I A_0^2 + S_{II} \{A_0^2 + A_1^2 + 2A_0 A_1 [\cos \psi \cdot \cos(2\pi x/Q) + \sin \psi \sin(2\pi x/Q)]\}, \quad (3.19a)$$

$$I_B(x) = S_I A_0^2 + S_{II} \{A_0^2 + A_1^2 + 2A_0 A_1 [\cos \psi \cdot \cos(2\pi x/Q) - \sin \psi \sin(2\pi x/Q)]\}. \quad (3.19b)$$

При сложении и вычитании этих сигналов получаем соответственно сигналы ЦА и ПП:

$$I_{ЦА}(x) = 2S_I |A_0|^2 + 2S_{II} [A_0^2 + A_1^2 + 2A_0 A_1 \cdot \cos \psi \cos(2\pi x/Q)], \quad (3.20a)$$

$$I_{ПП}(x) = 4S_{II} A_0 A_1 \sin \psi \sin(2\pi x/Q). \quad (3.20b)$$

Эти сигналы затем должны быть нормированы посредством деления на величину сигнала, получаемого при отражении от гладкой поверхности. На рис. 3.20 показан общий характер зависимости сигналов ЦА и ПП от радиального смещения.

Особую роль играют две величины: нормированное значение максимальной амплитуды ПП сигнала  $I_{ПП}$ , т. е.  $x = Q/4$ , и нормированное значение амплитуды сигнала ЦА  $I_{ЦА}$  на середине дорожки, т. е. при  $x = 0$ . Значение  $I_{ЦА}$  определяет диапазон сигнала, который можно использовать для считываний, поскольку большие значения  $I_{ЦА}$  позволяют получить больший контраст при локаль-

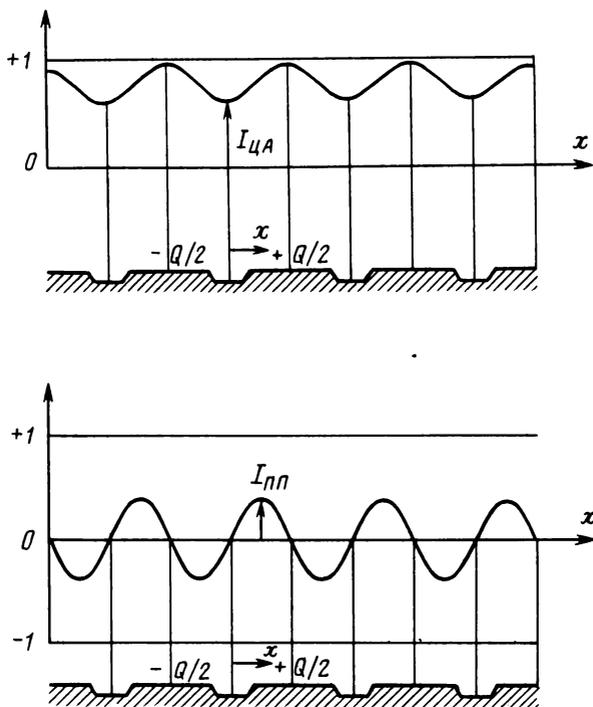


Рис. 3.20. Зависимости сигналов ЦА и ПП считывания от радиального положения  $x$  пятна

ных изменениях отражения, вызванных, например, выжиганием отверстий в отражающем слое (см. гл. 6).

Для оптимального считывания амплитуды сигналов как ПП, так и ЦА должны иметь максимально возможные значения; рассмотрим, как они зависят от геометрии дорожки. Из предыдущих примеров известно, что очень мелкая дорожка дает разность фаз  $\psi$ , несколько большую  $90^\circ$ , что обуславливает большое значение множителя  $\sin \psi$  в выражении для амплитуды ПП сигнала. Однако в этом случае объем дорожки и, следовательно,  $A_1$  малы. Поэтому дорожка должна быть глубже; но в этом случае возрастает величина  $\psi$ . В итоге следует ожидать, что существует некий оптимум зависимости  $I_{\text{ПП}}$  от эффективной глубины дорожки. Эта оптимальная величина возрастает, если взять широкие дорожки, поскольку (см. подразд. 3.2.2.) возникает эффект одновременного уменьшения  $\psi$  и увеличения  $A_1$ . Большие значения  $I_{\text{ЦА}}$  возможны лишь для очень мелких дорожек, когда  $\psi$  близка к  $90^\circ$ , и в общем случае необходимо найти компромисс между  $I_{\text{ЦА}}$  и  $I_{\text{ПП}}$ . Искать его следует для более широких дорожек, так как в этом случае  $\cos \psi$  — наименьший.

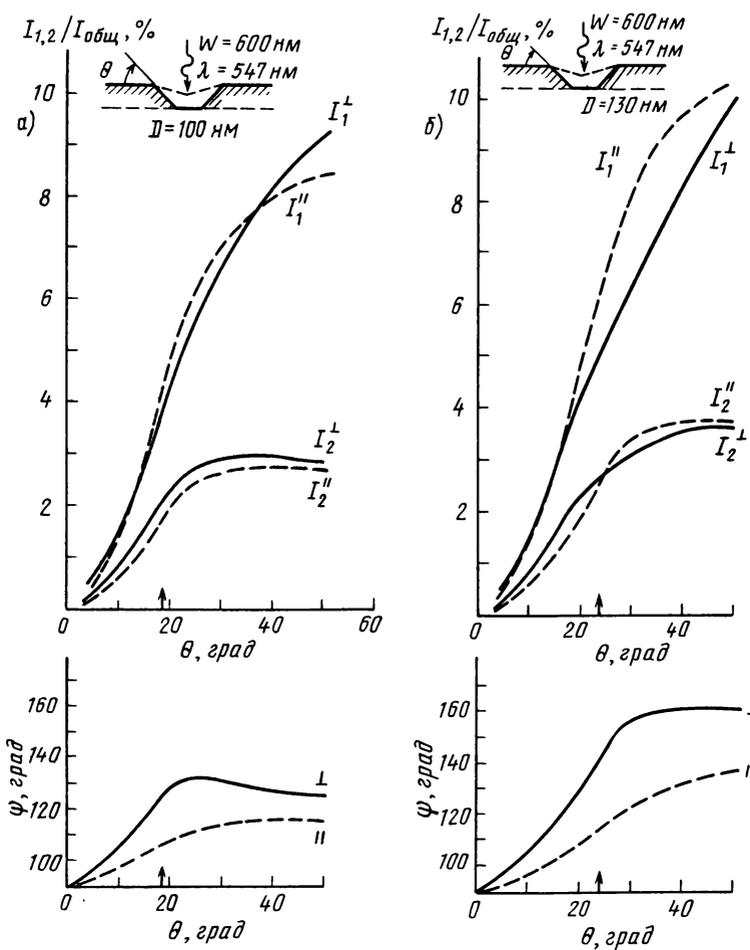


Рис. 3.21. Расчетные графики интенсивностей порядков дифракции и разностей фаз для дорожек шириной 600 нм в теллуридовом сплаве при максимальной их глубине 100 нм (а) и 130 нм (б). Эффективная длина волны в подложке равна 547 нм, показатель преломления теллуридового сплава равен  $n_1 = 3,55 + i1,18$

Для количественной проверки этих качественных выводов с помощью векторной теории сначала поставим адекватную задачу дифракции. Рассмотрим параметры режима считывания стандартной цифровой дисковой системы. В такой системе свет лазерного диода на основе AlGaAs с длиной волны  $\lambda = 820$  нм фокусируется с помощью объектива с числовой апертурой  $NA = 0,52$  через стеклянную подложку с показателем преломления  $n_0 = 1,5$  на слой теллуридового сплава с показателем преломления  $n_1 = 5,3 + i1,8$ . Период дорожек  $Q = 1600$  нм. Поскольку считывание ведется через стеклянную подложку, в 1,5 раза уменьшается как эффективная длина

волны, так и оптический контраст. Отражение от поверхности раздела стекло — теллур составляет 36%. По сравнению с дифракцией луча He—Ne-лазера на серебряном слое в данном случае эффективная длина волны и оптический контраст уменьшены, и для той же геометрии поляризационные эффекты должны быть менее выраженными. На рис. 3.21 показаны интенсивности порядков дифракций и разности фаз, рассчитанные для случая  $W = 600$  нм,  $D = 100$  и  $130$  нм. Расчетные значения амплитуд (а не интенсивностей) и фаз подставлялись в уравнения (3.20), которые учитывают также наличие вторых порядков дифракции. Однако, поступая таким образом, мы делаем приближение: аппроксимируем процесс дифракции падающей сферической волны дифракцией вертикально падающей плоской волны. В нашем случае в стеклянной подложке краевой луч направлен под углом  $20^\circ$  к нормали, и поэтому принятое приближение является довольно удачным. Второе приближение допускается в уравнении (3.19), когда предполагается, что распределение интенсивности света, выходящего из фокусирующего объектива, равномерно по всей площади зрачка. В реальном случае это не выполняется, и для получения точных выражений необходимо интегрировать локальные интенсивности по рассматриваемым областям детектора, а не умножать интенсивности непосредственно на площади  $S_1$  или  $S_{11}$ . Тем не менее если рассматриваются гауссовы лучи, то ошибка очень мала, поскольку интенсивность на краю выходной апертуры зрачка составляет более 25% от интенсивности по центру зрачка.

Максимально возможное значение амплитуды ПП сигнала \* достигает 56%; эта величина соответствует разности фаз  $\psi = 90^\circ$ , и отраженный свет равномерно делится между нулевым и двумя первыми порядками.

На рис. 3.22 представлены расчетные зависимости амплитуд сигналов ЦА и ПП от угла  $\theta$  для  $W = 600$  нм,  $D = 130$  нм. Качественный характер этих зависимостей совпадает с ожидаемым. Отличия зависимостей для различных состояний поляризации в основном обусловлены различиями в разностях фаз  $\varphi^{\parallel}$  и  $\varphi^{\perp}$ . При параллельной поляризации  $\varphi$  ближе к  $90^\circ$ , в то время как амплитуды  $A_{\parallel}^{\downarrow}$  и  $A_{\parallel}^{\uparrow}$  различаются не более чем на 15%. Поэтому максимальные значения амплитуд сигналов как ПП, так и ЦА больше для параллельной поляризации.

Если уменьшить глубину дорожек до 70 нм (рис. 3.23), то амплитуды сигналов ПП и ЦА увеличиваются, поскольку  $\psi$  не может теперь сильно отличаться от  $90^\circ$ . Влияние глубины дорожки  $D$  показано на рис. 3.24, где приведены зависимости  $I_{\text{ЦА}}$  и  $I_{\text{ПП}}$  для дорожки треугольного профиля с углом наклона стенок  $30^\circ$ , которая ограничивается на различной глубине  $D$ . Снова наблюдается

---

\* Амплитуда ПП сигнала нормирована.— *Прим. перев.*

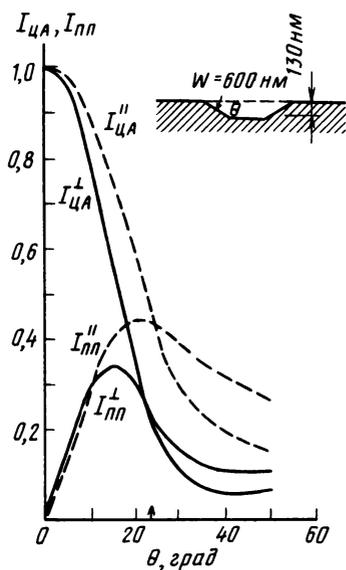


Рис. 3.22. Расчетные зависимости амплитуд сигналов ЦА и ПП для двух направлений поляризации от угла наклона стенок  $\theta$  при  $W=600$  нм и  $D=130$  нм

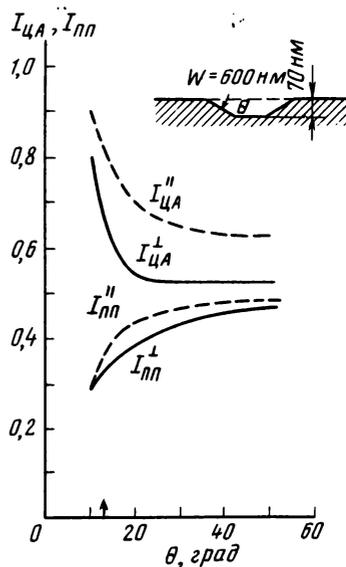


Рис. 3.23. Расчетные зависимости амплитуд сигналов ЦА и ПП для двух направлений поляризации при дифракции на дорожке шириной 600 нм и глубиной 70 нм

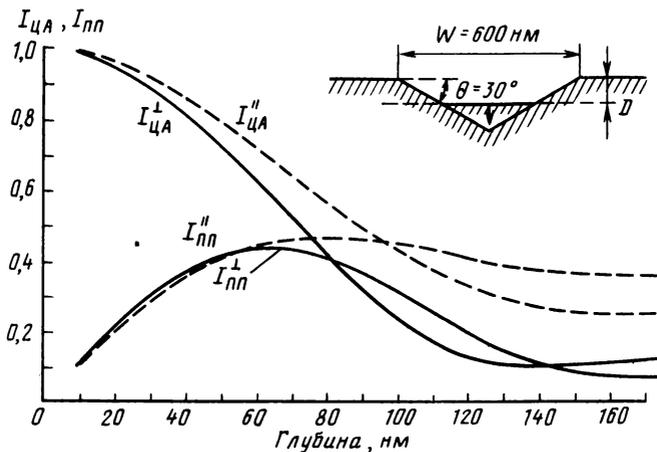


Рис. 3.24. Расчетные зависимости амплитуд сигналов ЦА и ПП от глубины усеченной дорожки для двух направлений поляризации при дифракции на дорожке шириной 600 нм с углом наклона стенок  $\theta=30^\circ$

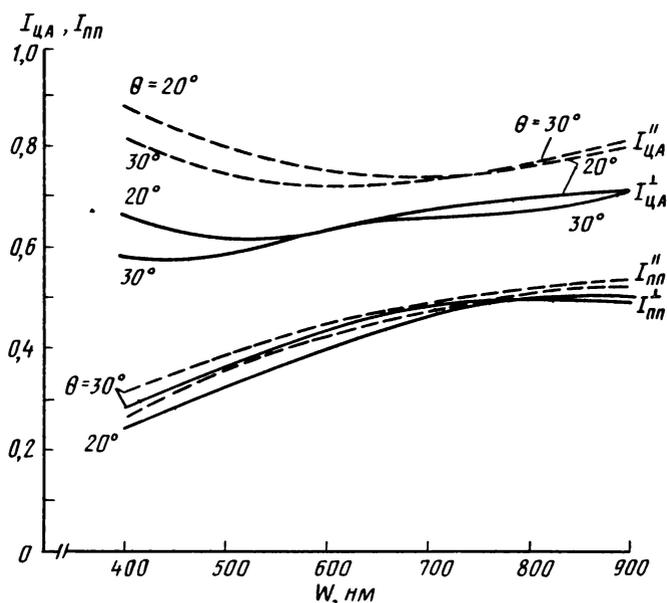


Рис. 3.25. Расчетные зависимости амплитуд сигналов ЦА и ПП от ширины  $W$  для двух направлений поляризации при дифракции на дорожках глубины 160 нм с углами наклона стенок  $\theta = 20$  и  $30^\circ$

оптимум для ПП сигнала. Если усреднить ПП сигнал по обоим состояниям поляризации, то максимальное значение  $I_{\text{ПП}}$  будет соответствовать  $D = 70$  нм, близкой к оптимальной глубине, рассчитанной по скалярной теории:  $D = \lambda/8 = 68$  нм. Расчеты для других углов наклона дают то же значение оптимальной глубины.

Влияние ширины дорожки  $W$  показано на рис. 3.25. Геометрические параметры дорожки следующие:  $Q = 20$  и  $30^\circ$ ;  $d = 60$  нм. Заметно лучшие сигналы получают при расширении дорожки. Этот аспект более детально рассмотрен в работе [11].

В заключение этого раздела рассмотрим рис. 3.26, на котором изображены амплитуды сигналов ПП и ЦА, когда ширина дорожки равна приблизительно половине периода ( $W = 900$  нм). Максимальная глубина дорожки 160 нм, что обеспечивает возможность получения удовлетворительного качества считывания пит заголовков. В этом случае можно получить значения амплитуды ПП 50% и соответствующей амплитуды ЦА более 60%.

**Питы системы Laser Vision.** Проведем анализ процесса считывания сигналов — считывания пит на видео- и аудиодисках. Решение этой дифракционной задачи включает в себя все принципы, изложенные в данной главе.

Поскольку геометрия дифракции является двумерной и описывается функциями как  $x$ , так и  $y$ , решение задачи не разделяется

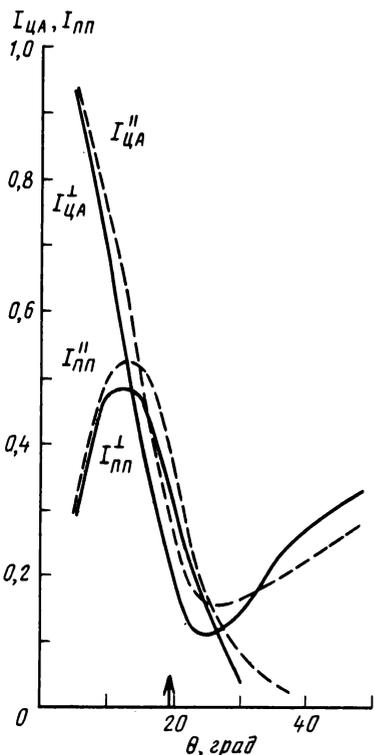


Рис. 3.26. Расчетные зависимости амплитуд сигналов ЦА и ПП от угла наклона стенок  $\theta$  для двух направлений поляризации при дифракции на дорожке шириной 900 нм и глубиной 160 нм

на две линейно независимые части для S- и P-поляризаций. Вместо этого задача дифракции должна быть решена для каждой поляризации падающего света; в качестве примеров выбраны случаи параллельной и перпендикулярной поляризаций.

Так как предполагалось, что высота профиля периодична по двум направлениям, можно разложить поверхностные токи и электромагнитные поля в двойной ряд Фурье. Используем также функцию Грина, периодическую по двум координатам. В результате получают уравнения, из которых можно найти радиальные и тангенциальные компоненты поверхностных токов и полей методами,

изложенными в разд. 3.2. Сигналы считывания могут быть получены из радиальных и тангенциальных порядков дифракции обычными методами.

В нашей модели геометрия пита определяется шестью параметрами (рис. 3.27): ширина пита в верхней части  $W$ , глубина  $D$ , угол наклона стенок  $\theta$ , длина  $L$  прямоугольной части пита, тангенциальный  $P$  и радиальный  $Q$  периоды. Предполагается, что концы пита имеют полукруглую форму, и поэтому общая длина пита равна  $L + W$ .

Однако эффективная длина пита меньше.

Тангенциальная скважность (ТС) определяется как отношение общей длины пита и тангенциального периода  $P$  в процентах. Следовательно, симметричный сигнал записи с временной скважностью 50% дает питы с пространственной тангенциальной скважностью, большей 50%. Другие параметры таковы: длина волны считывающего луча  $\lambda = 633$  нм, числовая апертура  $NA = 0,45$ , показатель преломления подложки  $n_0 = 1,5$ , комплексный показатель преломления отражающего слоя  $(Al)n_1 = 0,08 + i 4,1$ . Эффективная длина волны в подложке равна 422 нм, что для большинства применений меньше, чем ширина и длина пит.

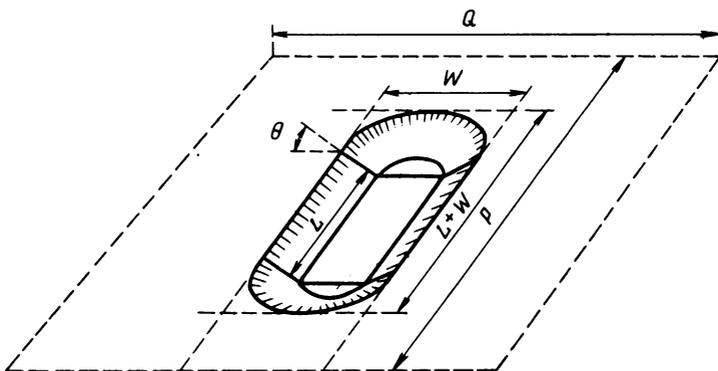


Рис. 3.27. Геометрия единичной ячейки двумерной структуры пит

Наибольший интерес при считывании информации представляет глубина модуляции сигнала ЦА  $M$ , определяемая следующим образом:

$$M = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}),$$

где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  — максимальные и минимальные значения ЦА сигнала считывания, получающиеся при движении считывающего пятна точно по дорожке. На рис. 3.28 приведены расчетные значения зависимости глубины модуляции от глубины пит  $D$  для нескольких величин  $L$ . Рассматриваются два состояния поляризации: вектор  $E$  параллелен и перпендикулярен дорожке. Постоянные параметры для данного расчета  $Q = 1670$  нм,  $\theta = 45^\circ$ ,  $TC = 60\%$ . Видно, что глубина модуляции достигает максимальных значений для различных направлений поляризации при разных значениях  $D$  и эффективная глубина пит больше для света с поляризацией, перпендикулярной к длинной стенке пита. Если глубина пит лежит в интервале 115...130 нм, то для всех длин пит получают высокие значения сигнала и влияние поляризации сравнительно мало.

В заключение отметим, что векторная теория дифракции по сравнению со скалярной точнее описывает дифракционные эффекты на частицах, поперечные размеры которых близки к длине волны излучения. В этом случае поляризационные эффекты наиболее четко выражены, что позволяет использовать их для определения геометрии рассеивающего объекта. Считывание информации с оптического диска всегда выполняется со стороны подложки, в результате чего уменьшается эффективная длина волны приблизительно в 1,5 раза. Это обстоятельство, а также экспериментальные и теоретические результаты, свидетельствующие о слабой выраженности поляризационных эффектов при дифракции излучения на питах, имеющих принятые в настоящее время размеры, позволяют сде-

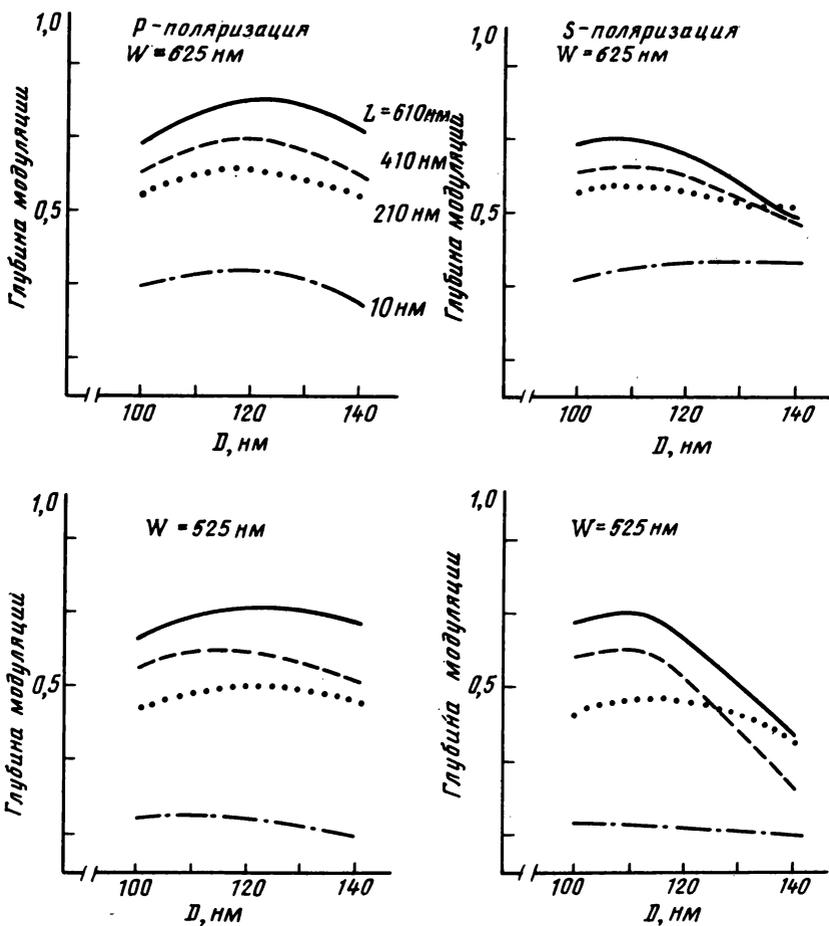


Рис. 3.28. Зависимость глубины модуляции сигнала считывания от глубины пит для двух состояний поляризации — параллельной и перпендикулярной к направлению дорожки. Соответствующий период пит равен  $(L + W)/TC$ , где  $TC = 60\%$  для всех случаев

лать заключение о том, что скалярная теория также может давать удовлетворительные результаты для оптических дисковых систем. Особенно это справедливо для расчетов сложных явлений, таких как взаимное влияние дорожек и интермодуляционные искажения сигналов. В случае двумерной структуры с дополнительной периодичностью по обеим осям расчеты по векторной теории в принципе осуществимы, однако они настолько сложны, что труд по их выполнению часто не оправдывает тех незначительных поправок, которые дает векторная теория для результатов, получаемых по простой скалярной теории.

## 4. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

*Дж. ван Розмален*

### 4.1. ВВЕДЕНИЕ

В отличие от хорошо известного граммофона, в котором считывающая игла механически следует по дорожке, в оптических дисковых системах, использующих бесконтактное считывание дорожки с помощью сфокусированного пучка света, применение подобных механических систем отслеживания дорожки невозможно. Следовательно, сфокусированное пятно должно удерживаться несколькими управляющими системами так, чтобы оно точно отслеживало дорожку.

Наиболее подходящей для этой цели является система автоматического регулирования с обратной связью, общая схема которой изображена на рис. 4.1. Такая система управления положением обеспечивает слежение за движущейся дорожкой с точностью нескольких десятых микрометра, даже если отклонение дорожки в процессе движения достигает величины порядка миллиметра. Ошибка слежения  $\epsilon$  (см. рис. 4.1) равна разности между положением дорожки и считывающего пятна. Возможные ошибки могут быть классифицированы в соответствии с вызывающими их причинами на ошибки диска, ошибки проигрывателя и внешние возмущения, например сотрясения проигрывателя.

Функционирование оптического датчика положения описано в гл. 2. Для стабилизации системы с обратной связью требуется электронная схема. Команды управления преобразуются в реальные перемещения пятна с помощью электромеханических систем (позиционеров).

Для слежения за дорожкой пятном света необходимы по крайней мере две системы управления, одна из которых действует в вертикальном, а другая — в горизонтальном направлениях. Называются они соответственно система автоматического регулирования фокусировки (САРФ) и система автоматического регулирования радиального положения пятна относительно дорожки записи

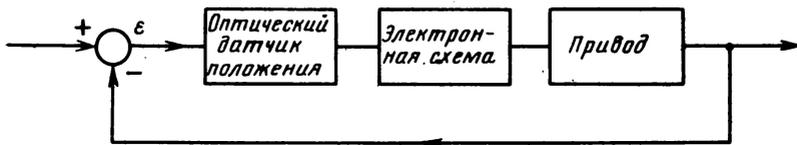


Рис. 4.1. Схема системы автоматического регулирования с обратной связью

(САРД). В видеодисковых системах дополнительно введена система управления в тангенциальном направлении, предназначенная для компенсации вариаций скорости считывания.

Хотя системы, обеспечивающие слежение за дорожкой, схожи для трех существующих оптических дисковых систем — Laser Vision (LV), Compact Disc (CD) и цифровой оптической записи (ЦОЗ), они имеют значительные конструктивные отличия, обусловленные различными свойствами систем. Рассмотрим сначала, как и почему шло развитие системы автоматического регулирования положения.

## 4.2. ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Еще в 1970 г., после первых экспериментов с диском со спиральной дорожкой микрокадров, для специалистов фирмы Philips стало ясно, что данный метод не подходит для запоминания изображения. Вскоре была предложена альтернативная идея — спиральная дорожка углублений (пит), несущая информацию, закодированную в длине пит и интервалах между ними (гладких участках), которая считывается оптическими методами.

Первые эксперименты с дорожкой пит были проведены в середине 1971 г. Первый сигнал, записанный этим методом, поступал с образцового видеогенератора. При воспроизведении этот сигнал был неясно виден сквозь «снег» на экране. Для записи использовалось эллиптическое пятно (1 мкм в тангенциальном направлении шириной 3 мкм), а расстояние между витками дорожки составляло 6 мкм. Основанием диска служила стеклянная пластина толщиной 6 мм с высокой плоскостью поверхности, которая закреплялась по внешнему краю на приводе вращения, имеющем подшипник с воздушной подушкой. Благодаря этому стеклянная пластина могла вращаться с торцевыми биениями поверхности величиной менее 5 мкм и поверхность находилась все время в фокусе. Эксцентриситет, возникавший после того, как диск снимался и затем вновь помещался на устройство записи-считывания, вызвал необходимость разработки системы радиального слежения за дорожкой записи (САРД).

Первой попыткой в этом направлении было использование колеблющегося зеркала с приводом на базе пьезоэлектрической керамики, в результате чего было достигнуто эффективное (в 50 раз) снижение эксцентриситета. Таким образом, эксцентриситет в 15 мкм мог быть снижен до максимального уровня 0,3 мкм. Гораздо лучший результат (снижение эксцентриситета в 500 раз на 25 Гц) был получен с помощью колеблющегося зеркала с электромагнитным приводом (привод с движущейся катушкой). В результате стало возможным уменьшение шага дорожек с 6 до 2 мкм (а затем в 1984 г. до 1,6 мкм), что позволило пропорционально увеличить время проигрывания.

Далее возникла необходимость уменьшить пятно фокусировки, что привело к уменьшению глубины фокуса и, следовательно, к необходимости разработки системы управления фокусировкой. 5 сентября 1972 г. на пресс-конференции была продемонстрирована действующая система Video Long Play (VLP): 30 минут цветного изображения со звуковым сопровождением на стеклянной пластине; проигрыватель, оснащенный системами слежения за дорожкой и за фокусировкой (Philips Technical Review, 1973, 33, 177—93).

Результаты экспериментов с пленочными гибкими дисками, самостабилизирующимися при вращении, были отрицательными, гибкий диск был заменен толстым пластиковым диском. В качестве материала подложки был выбран пластик, поскольку ожидалось, что при этом будут обеспечены определенные преимущества при тиражировании дисков, как при производстве грампластинок. Выбор пластмассовых дисков с толщиной около 1,5 мм повлек за собой повышение требований к обеим системам слежения.

Другая проблема связана с так называемыми временными ошибками, вызванными вариациями мгновенной скорости вращения. В качестве одного из возможных решений этой проблемы в оптическую схему прибора было введено еще одно колеблющееся зеркало, ось вращения которого перпендикулярна оси первого зеркала. Вся оптическая система была размещена на каретке, перемещающейся под диском, и, таким образом, считывающее пятно могло перемещаться от внутренней к внешней дорожке. Для перемещения каретки был введен специальный позиционер, так называемая «гусеница». Этот прецизионный позиционер состоял из двух магнитоуправляемых опор с укрепленным между ними пьезоэлектрическим силовым элементом (рис. 4.2). В таблице показана последовательность включения элементов для перемещения вправо.

Когда появились объективы с увеличенным полем зрения, «гусеница» была заменена приводом на основе винта, электромотора и понижающего редуктора. Сигнал управления положением каретки формировался по среднему положению подвижного зеркала.

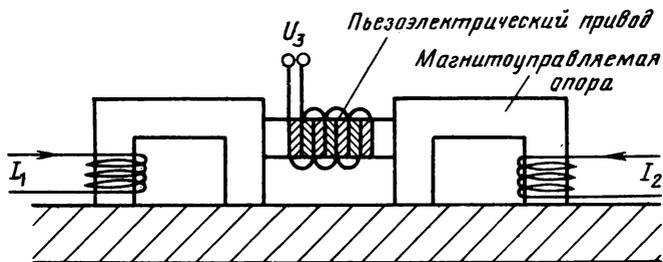


Рис. 4.2. Принцип «гусеницы» для привода каретки

	$I_1$	$U_3$	$I_2$
1	вкл.	положит.	выкл.
2	вкл.	положит.	вкл.
3	выкл.	отрицат.	вкл.
4	вкл.	отрицат.	выкл.
5	вкл.	положит.	выкл.
6	вкл.	положит.	вкл.
	и т. д.		

В настоящее время проигрыватель системы LV снабжен пятью системами автоматического регулирования, а именно: вращения (САРВ), тангенциального слежения (САРТ), радиального слежения за дорожкой (САРД), радиальной подачи каретки (САРРП) и вертикального слежения за фокусировкой (САРФ).

После 1975 г. началась интенсивная работа по совершенствованию системы VLP, обусловленная тем, что, во-первых, увеличилась точность и надежность систем слежения и, во-вторых, в качестве альтернативы громоздкому газовому лазеру как источнику излучения появился маленький полупроводниковый лазер. Комбинация этих двух факторов существенно расширила сферы применения оптической записи. Появилась возможность промышленного выпуска видеопроекторов системы LV, а в лабораториях были начаты работы по трем направлениям.

Первое направление — разработка компактной оптической головки на основе полупроводникового лазера. Основной целью было комплексное решение проблем оптики, радиотехники и автоматического регулирования такой головки. Через год эти рабо-

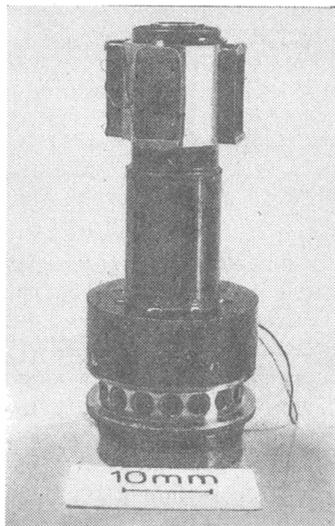


Рис. 4.3. Световое перо

ты привели к появлению так называемого «светового пера» (рис. 4.3), которое благодаря своему малому весу и компактности могло обеспечить точное слежения за движущейся дорожкой.

Второе направление привело к появлению известной системы Compact Disc. Хотя идея этой системы казалась наиболее естественной и очевидной, разработчики при ее реализации столкнулись с рядом новых проблем, в частности с кодированием сигнала, коррекцией ошибок и с отнюдь не последней проблемой обеспечения промышленного выпуска экономически выгодного изделия.

Третье направление развития — внедрение LV-диска в качестве средства памяти для ЭВМ (цифровая оптическая запись). Появилась возможность создания компактной и чрезвычайно емкой памяти для ЭВМ, особенно в комбинации с полупроводниковым лазером. Информация запоминается в виде отверстий, прожигаемых в тонком металлическом слое. Внимание исследователей и разработчиков привлекли, с одной стороны, неограниченные возможности записи большого объема информации, с другой — возможность быстрого доступа к ней.

### 4.3. СПЕКТР ОШИБОК

На первый взгляд может показаться, что необходимость в системах слежения обусловлена только тем, что требуется точно следить за радиальным движением разворачивающейся архимедовой спирали дорожки записи на вращающемся диске. Однако при более тщательном рассмотрении становится ясно, что этот источник ошибок радиального слежения имеет гораздо меньшее значение по сравнению с другими, менее очевидными факторами.

Формально определим ошибку слежения в момент времени  $t$  как разность между требуемым и реальным положением считывающего пятна при отключенных системах слежения. Она обычно описывается в декартовой системе координат  $x, y, z$ . Ось  $z$  выбирается перпендикулярно поверхности диска, т. е. в направлении фокусировки, а ось  $x$  — по радиусу диска. Ось  $y$  соответствует тангенциальному направлению.

Ошибка, представляющая собой сумму отклонений пятна и дорожки, определяется смещением источника излучения, свободными колебаниями зеркала слежения, неточностью движения каретки и ошибками исполнительных механизмов, некруглостью и короблением диска, эксцентricностью центрального отверстия диска и т. д.

Необходимо различать механизмы появления ошибок. В проигрывателе системы LV доминирующую роль играет механический дисбаланс вращающегося диска. Менее важные источники — внешние возмущения, такие как толчки, сотрясения и даже вибрация пола, на котором стоит стол с проигрывателем, вызванная шагами. В проигрывателе системы CD внутренние вибрации гораздо меньше внешних, поскольку скорость вращения и сам диск существ-

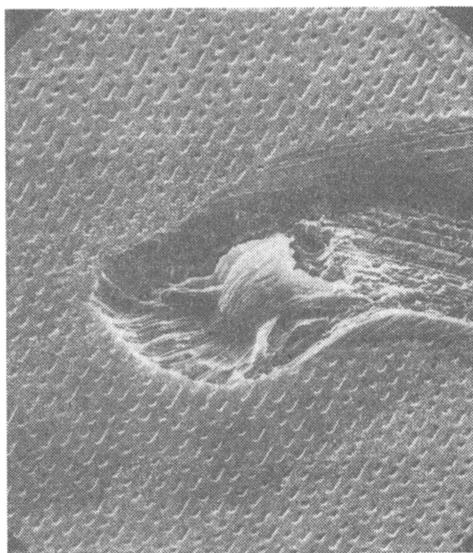


Рис. 4.4. Дефект рабочей поверхности диска

венно меньше. В следующих подразделах обсуждаются ошибки, связанные с дефектами и неточностями диска, системой считывания и внешними возмущениями.

#### 4.3.1. ОШИБКИ ДИСКА

Ошибки диска возникают из-за геометрических отклонений информационного рельефнесущего слоя на диске относительно базовой плоскости диска. Информационный рельеф сформирован на поверхности пластикового диска, который, в свою очередь, является элементом оптического канала воспроизведения. Локальные неточности на диске, как, например, газовые пузырьки, царапины и искажения на рельефнесущей поверхности (см. рис. 4.4), вызыва-

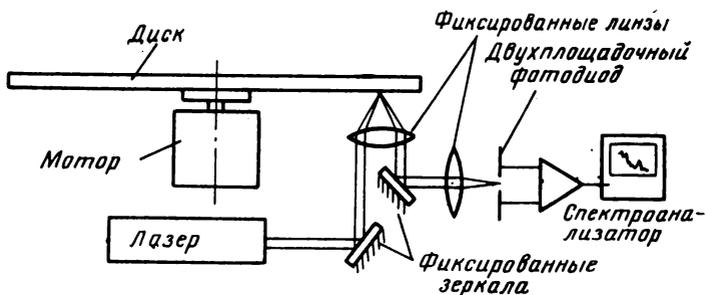


Рис. 4.5. Установка для измерения частотного спектра биений

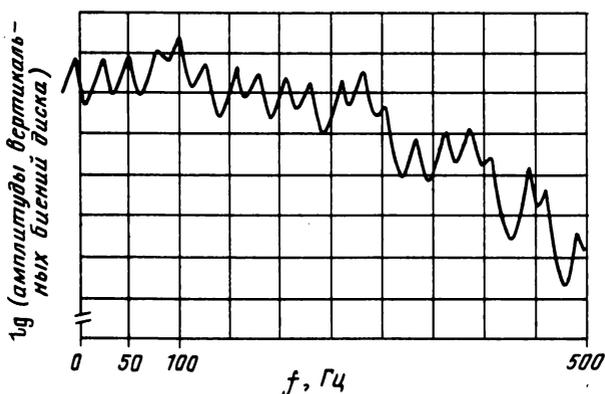


Рис. 4.6. Частотный спектр сигнала фокусировки

ют появления больших ошибок. Другие важные ошибки диска обусловлены короблением, некруглостью и эксцентричным расположением центрального отверстия.

Наибольшими по величине являются вертикальные биения вращающейся рельефнесущей поверхности из-за коробления. Они могут быть описаны в виде зависимости отклонения от времени, однако удобнее описывать этот процесс частотным спектром, измеряемым с помощью установки, изображенной на рис. 4.5.

При вращении диска со скоростью  $25 \text{ об} \cdot \text{с}^{-1}$  частотный спектр биений имеет основную частоту 25 Гц (рис. 4.6). Форма спектров радиальных и тангенциальных ошибок имеет сходный характер.

#### 4.3.2. ОШИБКИ ПРОИГРЫВАТЕЛЯ

Оптический дисковый проигрыватель включает в себя лазер, несколько зеркал, подвижный микрообъектив, укрепленный на позиционере, для фокусирования пятна и фотодиод для детектирования отраженного света. Положение пятна зависит от положения всех составных элементов оптической схемы. В проигрывателе системы LV элементы оптической схемы жестко укреплены на каретке, которая может двигаться в радиальном направлении. Как только подвижные зеркала и каретка начинают перемещаться, возмущающие силы вызывают значительные отклонения пятна. Наибольшая возмущающая сила, обусловленная дисбалансом вращающегося диска, описывается выражением

$$F_c = m\omega^2 r,$$

где  $F_c$  — сила;  $m$  — масса диска;  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота вращения в  $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $r$  — расстояние между центром тяжести диска и осью вращения (для симметричного диска  $r$  равно эксцентриситету).

Для LV-диска с массой 0,2 кг и эксцентриситетом 0,1 мм,

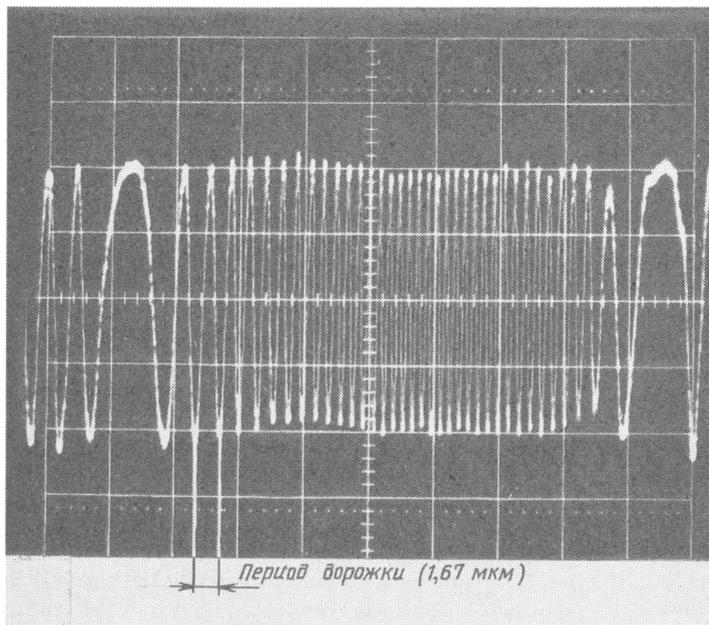


Рис. 4.7. Измеренный сигнал радиальной ошибки

который устанавливается на проигрыватель PAL/ПУС (постоянная угловая скорость) в рабочем режиме ( $f=25$  Гц), сила дисбаланса  $F_c=0,5$  Н.

В результате действия этой силы каретка будет колебаться между двумя крайними точками и появится радиальное смещение пятна величиной 50 мкм или более. Более того, изгибы основания каретки и колебания различных элементов оптической схемы в силу инерции увеличивают смещение пятна до 100 мкм.

Общее радиальное смещение пятна относительно информационной дорожки может быть легко определено, если измерить сигнал радиальной ошибки при отключенной системе радиального смещения в работающем проигрывателе (см. подразд. 2.5.1). На рис. 4.7 показан измеренный таким образом сигнал радиальной ошибки. Каждый период соответствует расстоянию между соседними витками дорожки. В точках возврата (экстремального расстояния между пятном и осью вращения) периоды максимальны. Определив число периодов между экстремальными точками (на рис. 4.7 — 36 периодов), можно вычислить общую величину относительного смещения диска умножением этой цифры на расстояние между витками дорожки (шаг дорожки). Таким образом, сигнал, изображенный на рис. 4.7, соответствует общему отклонению пятна  $36 \cdot 1,67 \text{ мкм} = 60 \text{ мкм}$ .

Другой важный источник ошибок проигрывателя — движущий-

ся объектив. В процессе воспроизведения рельефнесущая поверхность диска отслеживается считывающим объективом; при этом частотный спектр колебаний объектива очень похож на спектр диска, изображенный на рис. 4.6. Реактивные силы, вызванные ускорениями и торможениями объектива массой 10 г, могут быть найдены в любой точке проигрывателя. Это возмущение весьма серьезно, поскольку может возбуждать высокочастотные резонансы конструкции, влияющие на положение пятна.

### 4.3.3. ВНЕШНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

Наряду с внутренними источниками возмущений можно определить также влияние внешних механических сил на отклонение пятна и дорожки. Например, в комнате с деревянным полом шаги могут вызвать ускорения в проигрывателе. Возникают как горизонтальные, так и вертикальные ускорения (рис. 4.8).

В видеопроигрывателе системы LV механические возмущения, вызванные дисбалансом быстро вращающегося диска, в несколько раз больше, чем возмущения из-за внешних воздействий. Поэтому внешние источники возмущений не играли определяющей роли при разработке систем управления видеопроигрывателем.

Для проигрывателя системы CD ситуация совершенно иная. Из-за того, что в этом проигрывателе скорость вращения диска гораздо ниже (максимум 8 оборотов в секунду), масса диска и, соответственно его дисбаланс при заданных геометрических размерах и допусках меньше, силы дисбаланса также значительно уменьшены.

Для CD-диска с массой 15 г, эксцентриситетом 0,1 мм и  $\omega = 2\pi f = 50 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$  сила дисбаланса

$$F_c = 15 \cdot 10^{-3} \times 50^2 \times 0,1 \cdot 10^{-3} = 3,75 \cdot 10^{-3} \text{ Н.}$$

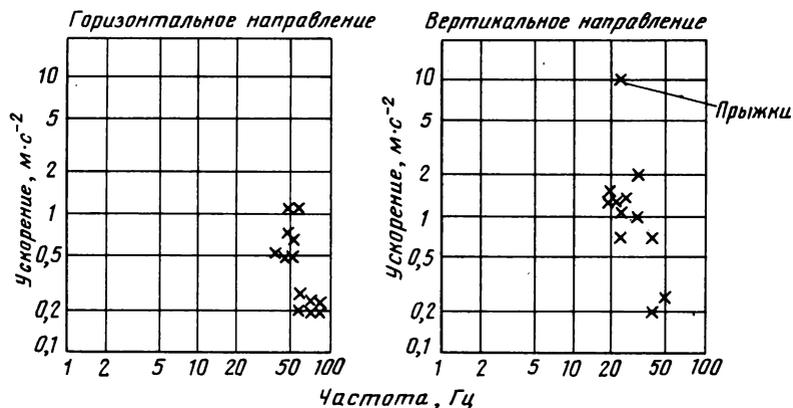


Рис. 4.8. Ускорения, вызываемые хождением по деревянному полу

Видно, что по сравнению с 0,5Н для видеопроеигрывателя для проигрывателя CD внешние возмущения становятся главным источником ошибок. Естественно, это вызывает дополнительные проблемы при использовании проигрывателя в автомашине, а не дома.

#### 4.3.4. СПЕКТР ОШИБОК

После обсуждения различных источников ошибок можно оценить максимальные величины ошибок, ожидаемые при воспроизведении диска. Из-за статистического характера ошибок, связанных с влиянием различных источников, такая оценка всегда соответствует наихудшему случаю.

Ошибки описываются соответствующими частотными спектрами. В качестве примера приведен наихудший случай спектра для ошибки фокусировки видеопроеигрывателя LV (верхняя кривая на рис. 4.9). Спектры других ошибок в радиальном и тангенциальном направлениях для систем LV, CD и др. количественно такие же.

Из рис. 4.9 видно, что частотные компоненты ниже 30 Гц могут иметь максимальную амплитуду 1050 мкм. Выше 1100 Гц эта амплитуда может достигать в максимуме 2 мкм. Пример реального спектра показан на том же рисунке (нижняя кривая).

После определения ожидаемого уровня ошибок можно приступить к рассмотрению требуемого подавления ошибок для уменьшения их до допустимого уровня.

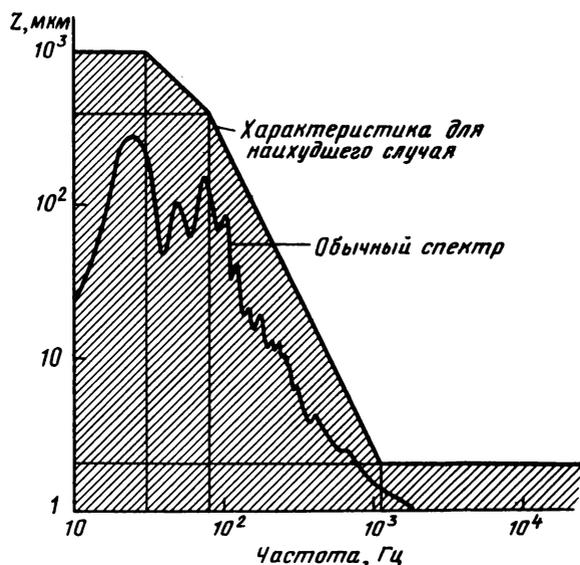


Рис. 4.9. Вертикальные биения LV-диска для наихудшего случая и реальные

## 4.4. ПОДАВЛЕНИЕ ОШИБОК

### 4.4.1. ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ СЛЕЖЕНИЯ

Допустимые отклонения пятна во всех направлениях ограничиваются требованиями, определяемыми оптическим принципом считывания (см. гл. 2). В табл. 4.1 приведены максимально допустимые отклонения пятна для различных систем считывания. Для видеопроигрывателя LV значения даны для оптических систем с лазерами He—Ne и полупроводниковым на основе GaAlAs ( $\lambda = 633$  и  $780$  нм соответственно), для проигрывателя CD — с лазером на основе GaAlAs.

Допуск на радиальную ошибку следует из взаимного влияния соседних дорожек. Диаметр пятна  $d$  (полная ширина по уровню половинной мощности в центре пятна) определяется выражением  $d = \lambda / 2NA = 0,8$  мкм,

где  $\lambda$  — длина волны света;  $NA$  — числовая апертура. Чтобы обеспечить постоянный диаметр пятна, большую длину волны лазера на основе GaAlAs можно компенсировать увеличением числовой апертуры. Поэтому требования к точности радиального слежения для обеих конструкций видеопроигрывателя LV одинаковы. Цифровой сигнал в системе CD позволяет допустить несколько большее значение взаимовлияния дорожек, и следовательно, увеличить ошибку радиального слежения до  $\pm 0,2$  мкм.

Однако одним из следствий увеличения числовой апертуры  $NA$  является уменьшение глубины фокусировки

$$\Delta z = \pm \lambda / 2 (NA)^2 = \pm d / NA,$$

что приводит к значениям  $\pm 1,5$  и  $\pm 2$  мкм.

Ошибки в тангенциальном направлении важны в системе LV, так как вызывают искажение временной базы видеосигнала. Обычно они приводятся в единицах времени, но в табл. 4.1 они преобразованы в ошибки положения.

В дальнейшем тангенциальные ошибки отдельно не рассматриваются, так как они могут быть описаны точно так же, как ошибки радиального слежения.

Таблица 4.1. Максимально допустимые ошибки слежения за дорожкой в мкм

Ошибка слежения	Lazer Vision		Compact Disc
	He — Ne NA = 0,40	GaAlAs NA = 0,50	GaAlAs NA = 0,47
Вертикальная	$\pm 2$	$\pm 1,5$	$\pm 2$
Радиальная	$\pm 0,15$	$\pm 0,15$	$\pm 0,2$
Тангенциальная	$\pm 0,15$	$\pm 0,15$	—

#### 4.4.2. ПОДАВЛЕНИЕ

Сравнение максимальных значений вертикальных биений на рис. 4.9 и допустимых значений ошибок фокусировки из табл. 4.1 показывает, что необходимо уменьшить амплитуду частотных компонент, расположенных ниже частоты 1,1 кГц. Наибольшее подавление (приблизительно в 500 раз) требуется на частотах ниже 30 Гц. Для высоких частот это подавление уменьшается до единицы при 1100 Гц. Разница между радиальным отклонением величиной около 60 мкм (см. рис. 4.7) и ошибкой радиального слежения  $\pm 0,15$  мкм (см. табл. 4.1) показывает, что степень подавления радиального отклонения имеет такой же высокий порядок величины. В следующем разделе теоретически описывается, как с помощью систем автоматического регулирования добиться таких высоких степеней подавления на высоких частотах.

#### 4.5. ТЕОРИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Динамические свойства систем управления обычно рассматриваются в частотной области [2]. Рассмотрим отклик (выход  $y(t)$ ) системы на воздействие гармонического колебания (вход  $x(t)$ ) с частотой  $\omega$  (рис. 4.10). Если система линейна, то отклик будет той же частоты  $\omega$  и система может быть полностью описана своей передаточной функцией  $H(\omega)$ , называемой также усилением и определяемой как отношение выходной амплитуды  $\hat{y}$  к входной  $\hat{x}$ . В общем случае передаточная функция является функцией частоты. Она может быть представлена в виде диаграммы Боде, состоящей обычно из двух частей, одна из которых представляет собой зависимость логарифма отношения амплитуд от логарифма частоты (АЧХ), а вторая — зависимость сдвига фазы  $\varphi$  от частоты (ФЧХ).

В общем случае система автоматического регулирования состоит из нескольких подсистем, каждая из которых может быть описана собственной передаточной функцией. Передаточная функция составной системы, состоящей из подсистем, представляет собой произведение передаточных функций подсистем и может быть получена простым суммированием на диаграмме Боде соответствующих графиков функций благодаря логарифмической шкале амплитудной части диаграммы Боде (АЧХ) и свойству суперпозиции фазовой части (ФЧХ).

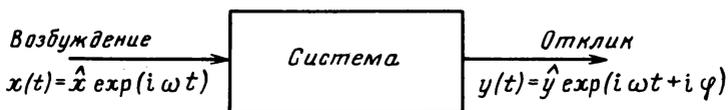


Рис. 4.10. Частотный отклик системы

Взяв в качестве примера систему автоматического регулирования фокусировки, обсудим некоторые аспекты теории автоматического регулирования, представляющие интерес для оптических дисковых систем.

#### 4.5.1. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ФОКУСИРОВКИ

На рис. 4.11 схематически показана система автоматического регулирования фокусировки. Оптическая система дискриминации ошибки, как описано в подразд. 2.5.2, обеспечивает сигнал напряжения, приблизительно пропорциональный ошибке фокусировки. После усиления и соответствующей фильтрации в цепи этот сигнал преобразуется в ток катушки, находящейся в магнитном поле, что вызывает появление вертикально направленной силы, приложенной к объективу (принцип громкоговорителя). Если положение диска слишком высокое, то объектив толкается вверх, и наоборот. Из рисунка видно, что система автоматического регулирования фокусировки является системой с замкнутой петлей обратной связи.

Прежде чем обсуждать свойства системы с замкнутой петлей обратной связи, применим концепцию передаточной функции к системе с разомкнутой петлей обратной связи. На рис. 4.12 показана также система регулирования фокусировки, но в более формализованном виде.

Частные передаточные функции, обозначенные  $H_1(i\omega)$ ,  $H_2(i\omega)$ ,  $H_3(i\omega)$ , изображены на рис. 4.13, а, б, в вместе с общей АЧХ системы с разомкнутой обратной связью ( $\sigma$ ) и ее ФЧХ ( $\delta$ ).

Передаточная функция  $H_2(i\omega)$  электронной цепи компенсации,

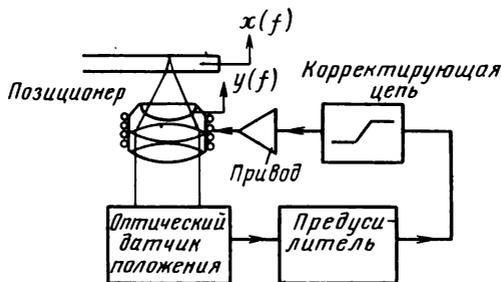


Рис. 4.11. Система автоматического регулирования фокусировки

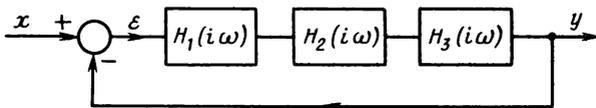


Рис. 4.12. Схема системы автоматического регулирования фокусировки

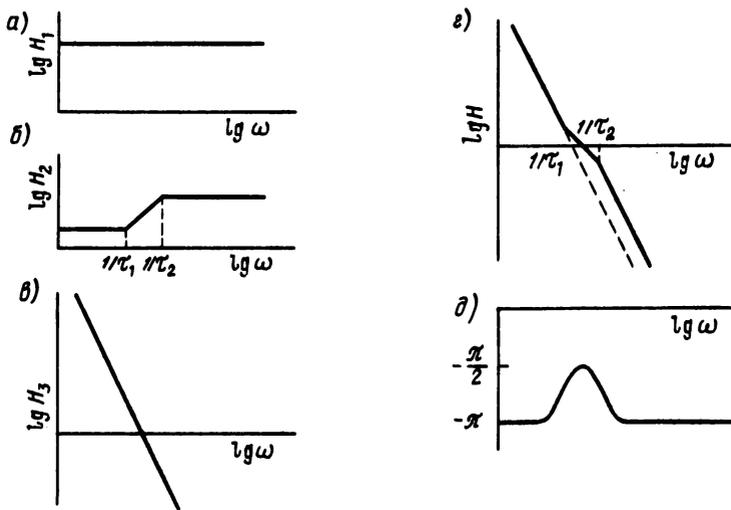


Рис. 4.13. Передаточные функции, общее усиление системы с разомкнутой петлей обратной связи и фазовая характеристика

которая называется также цепью нагрузки, описывается выражением

$$H_2(i\omega) = K_2 \frac{1 + i\omega\tau_1}{1 + i\omega\tau_2}.$$

Ее параметры выбраны таким образом, чтобы обеспечивалась стабильность системы с замкнутой петлей обратной связи, о чем пойдет речь в следующем пункте.

Передаточная функция преобразователя «ток — положение микрообъектива»  $H_3(i\omega)$ , выполненного аналогично конструкции электромагнитного преобразователя громкоговорителя. Если отсутствуют такие эффекты, как трение, упругость и т. п., эта подсистема действует как двойной интегратор и может быть описана следующим образом. Предположим, что через катушку протекает гармонический ток  $I(t) = \hat{I} \exp(i\omega t)$ . В магнитном поле это приводит к появлению вертикальной гармонической лоренцевой силы  $F(t) = \hat{F} \exp(i\omega t)$ , где  $\hat{F}$  — пропорциональна  $\hat{I}$ , действующему на объектив массой  $m$ . В результате эта масса испытывает ускорение  $\ddot{y}(t) = (\hat{F}/m) \exp(i\omega t)$ . Положение  $y(t)$  получается двойным интегрированием ускорения

$$y(t) = \int_{-\infty}^{t_1} \int_{-\infty}^{t_2} \ddot{y}(t_2) dt_1 dt_2 = -\frac{1}{\omega^2} \frac{F}{m} \exp(i\omega t).$$

В результате двойного интегрирования находим, что передаточная функция уменьшается с ростом частоты по закону  $1/\omega^2$ , а

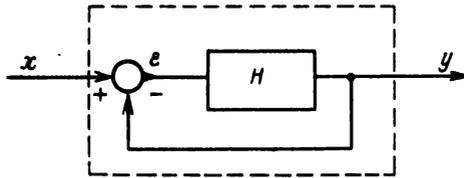


Рис. 4.14. Схема передачи системы в целом

наклон характеристики на амплитудной диаграмме Бode равен  $-2$ . Такая подсистема называется системой второго порядка. В принципе все системы автоматического регулирования положением, использующиеся в оптических дисковых системах, относятся к категории систем второго порядка.

Таким образом, общая передаточная функция системы с разомкнутой петлей обратной связи имеет вид

$$H(i\omega) = - \frac{K}{\omega^2} \frac{1 + i\omega\tau_1}{1 + i\omega\tau_2}. \quad (4.1)$$

Для изучения системы с замкнутой петлей обратной связи схему, изображенную на рис. 4.12, можно представить в виде цепи с одним блоком, описываемым общей передаточной функцией, которую обозначим  $H$  (рис. 4.14). Вход ( $x$ ) и выход ( $y$ ) представляют собой положение дорожки  $x$  и реальное положение считывающего пятна  $y$  соответственно.

Сигнал ошибки  $\epsilon$ , определяемый как разница между требуемым и реальным положением пятна, показан на рис. 4.14 после точки суммирования. Если предположить, что система с замкнутой петлей обратной связи является одной системой (выделена на рис. 4.14 штриховой линией), то передаточная функция этой системы с замкнутой обратной связью может быть легко выведена. Имеем

$$\epsilon = x - y, \quad (4.2)$$

$$y = H(x - y) \text{ или } y = H\epsilon, \quad (4.3)$$

следовательно,

$$\frac{y(i\omega)}{x(i\omega)} = \frac{H(i\omega)}{1 + H(i\omega)}.$$

На рис. 4.15 показаны передаточная функция системы с замкнутой петлей обратной связи  $H/(1 + H)$  и соответствующая передаточная функция системы с разомкнутой петлей обратной связи  $H$ , приведенной на том же рисунке. Видно, что для низких частот смещение пятна  $x$  действительно равно смещению дорожки  $y$ . Другим интересным результатом, получаемым из уравнений (4.2) и (4.3), является отношение

$$\epsilon/x = 1/(1 + H(i\omega)).$$

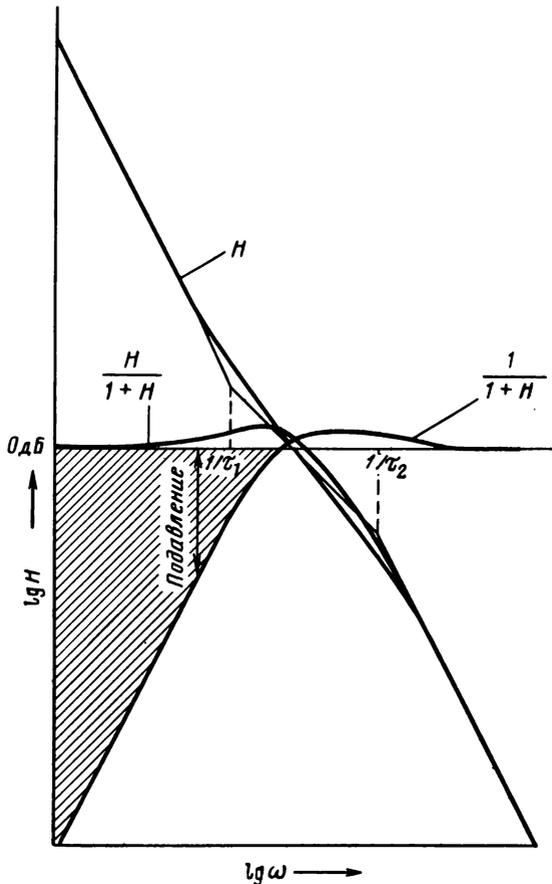


Рис. 4.15. Передаточная функция  $H(i\omega)$  системы с разомкнутой петлей обратной связи

Это выражение дает ту часть входного возмущения  $x$ , которая остается в качестве остаточной ошибки  $\epsilon$  в системе с замкнутой петлей обратной связи. Отношение  $x/\epsilon$ , обратное выражению для остаточной ошибки, определяется как степень подавления

$$R(i\omega) = 1 + H(i\omega).$$

Обычно на диаграмме Бode изображается относительная остаточная ошибка  $\epsilon/x$ , а не степень подавления  $R$  (пример показан на рис. 4.15). Характерной важной точкой является точка пересечения графиков  $H/(1+H)$  и  $1/(1+H)$ , где  $H=1$ . Соответствующая ей частота называется границей диапазона регулирования или просто полосой регулирования. В литературе часто полоса регулирования определяется точкой  $-3$  дБ графика передаточной функ-

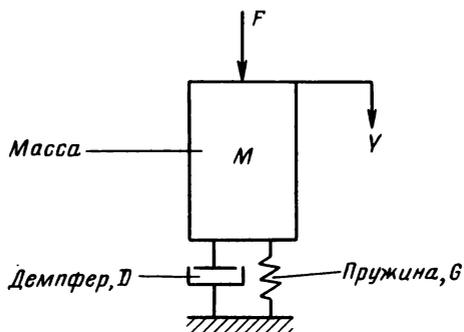


Рис. 4.16. Упругая динамическая система с демпфированием

ции  $H/(1+H)$ . Практически если неизвестна передаточная функция, то удовлетворительным приближением этой величины является положение максимума передаточной функции  $H/(1+H)$ .

Из рис. 4.15 можно сделать вывод о том, что полоса регулирования монотонно возрастает с ростом усиления системы с разомкнутой обратной связью  $H(i\omega)$ . Для обеспечения стабильности системы частоты отсечки  $1/\tau_1$  и  $1/\tau_2$  также необходимо сдвигать в область высоких частот. Увеличение полосы регулирования обеспечивает большее подавление возмущений (заштрихованная область на рис. 4.15).

До сих пор предполагалось, что подвеска объектива свободная, однако существуют и другие конструкции, в которых объектив поддерживается листовыми пружинами. В этом случае преобразование «ток — положение» уже не является простым двойным интегрированием во всем диапазоне частот. Подвеска объектива с использованием плоских пружин представляет собой пример более общего класса упругих динамических систем с демпфированием. Поскольку такие системы обладают резонансными свойствами, которые обязательно следует учитывать при проектировании систем автоматического регулирования, рассмотрим упругие системы с демпфированием подробнее.

На рис. 4.16 схематически показаны основные составные части такой системы, а именно: масса  $M$ , упругость пружин  $G$ , демпфирование  $D$ , сила привода  $F$ . Уравнение движения массы

$$M\ddot{y}(t) + D\dot{y}(t) + Gy(t) = F(t).$$

Если предположить, что действует одна компонента силы с частотой  $\omega$ , то дифференцирование по времени может быть заменено умножением на сомножитель  $i\omega$ , в результате чего получим

$$(-\omega^2 M + i\omega D + G)y \exp(i\omega t) = F \exp(i\omega t).$$

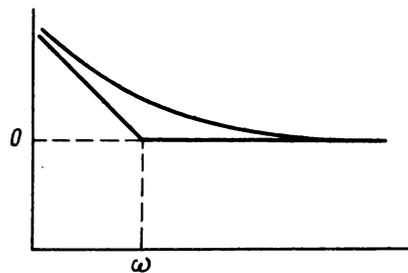
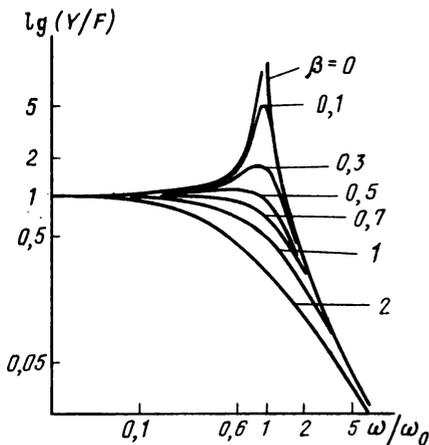


Рис. 4.18. Характеристика корректирующей цепи

← Рис. 4.17. Амплитудная часть диаграммы Боде

Тогда передаточная функция

$$\frac{y}{F} = \frac{1}{G} \left( -\frac{M\omega^2}{C} + \frac{Dj\omega}{G} + 1 \right)^{-1} = \frac{1}{G} \left( -\frac{\omega^2}{\omega_0^2} + \frac{2\beta j\omega}{\omega_0} + 1 \right)^{-1} \quad (4.4)$$

Амплитудная диаграмма Боде этой передаточной функции показана на рис. 4.17 для различных значений коэффициента затухания  $\beta = D/2\sqrt{MG}$ .

Этот график можно сравнить непосредственно с первоначальным графиком передаточной функции второго порядка для свободно подвешенного объектива (см. рис. 4.13, в). Видно, что для очень высоких частот обе передаточные функции одинаковы [ср. уравнения (4.1) и (4.4)]. На низких частотах передаточная функция ограничена жесткостью пружины  $G$ , которая ограничивает усиление уровнем  $1/G$ . На промежуточных частотах проявляются резонансные свойства передаточной функции. Для малых значений коэффициента демпфирования  $\beta$  резонансный пик наблюдается рядом с частотой

$$\omega_0 = \sqrt{G/M}. \quad (4.5)$$

Добротность  $Q$  резонанса, равная  $1/2\beta$ , определяет высоту пика относительно низкочастотного уровня. В оптических дисковых системах  $Q$  принимает значения от 10 до 100 в зависимости от выбора материала пружин. Положительным фактором, обусловленным наличием резонанса, является очень высокое значение усиления системы с разомкнутой петлей обратной связи, что увеличивает подавление возмущений  $R$  и для системы с обратной связью. Однако на более низких частотах ограниченное усиление уменьшает подавление. В значительной степени этот недостаток устраняется тем, что в систему вводится электронная схема задержки, которая

обеспечивает дополнительное усиление на частотах ниже частоты отсечки  $\omega$  электронной схемы (см. рис. 4.18).

#### 4.5.2. УСТОЙЧИВОСТЬ

В предыдущем подразделе рассматривалась только амплитудная часть диаграммы Боде. Как уже отмечалось, передаточная функция описывается не только амплитудой, но и сдвигом фазы, который представляет особый интерес для устойчивости системы автоматического регулирования. Если предположить, что усиление системы с разомкнутой петлей обратной связи  $H(i\omega)$  является комплексной переменной с модулем  $|H(i\omega)|$  и фазой  $\varphi(i\omega) = \arg(H)$ , то передаточная функция системы с замкнутой обратной связью  $H/(1+H)$  может стремиться к бесконечности на частотах  $\omega$ , при которых значение  $H$  близко к  $-1$ . Это значит, что малейшие отклонения диска или даже шумовая составляющая в петле обратной связи приведут к колебательному движению объекта с очень большой амплитудой. Такая система называется неустойчивой. Если одновременно выполняются два условия:

$$|H(i\omega)| = 1 \text{ и } \arg(H(i\omega)) = 180^\circ,$$

то система неустойчива.

Если эти условия не выполняются (приблизительно) на одной и той же частоте, то устойчивость обеспечена. При представлении переменной  $H(i\omega)$  на комплексной плоскости точки неустойчивости или полюсы расположены на отрицательной части реальной оси. Двойной интегратор, описанный в предыдущем подразделе, имеет сдвиг фазы  $180^\circ$  на всей реальной оси частот, на что указывает знак минус в уравнении (4.1). В результате (рис. 4.19) график передаточной функции системы с разомкнутой петлей обратной связи  $H(i\omega)$  пересекает отрицательную часть реальной оси и, следовательно, всегда будет существовать частота, на которой  $H(i\omega)$  равна  $(-1)$ , т. е. будет иметь место нежелательная неустойчивая замкнутая петля обратной связи (положительная обратная связь).

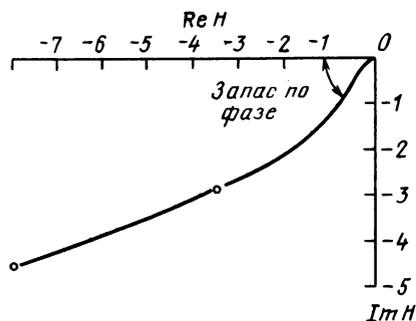


Рис. 4.19. График функции  $H(i\omega)$  в комплексной плоскости

Нестабильность преодолевается введением в состав системы корректирующей цепи с временными константами  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , выбранными по обе стороны частоты, на которой  $|H|$  пересекает линию 0 дБ амплитудной части диаграммы Боде, показанной на рис. 4.13, *г* ( $|H|=1$ ). В диапазоне частот между  $1/\tau_1$  и  $1/\tau_2$  вводится дополнительный сдвиг фазы, равный  $+90^\circ$  в точке наклона функции  $+1$  (см. рис. 4.13, *д*). В результате общая передаточная характеристика системы с разомкнутой петлей обратной связи не проходит через точку  $(-1)$  на рис. 4.19.

Таким образом, устойчивость обеспечивается коррекцией второго из указанных выше условий, в то время как первое удовлетворяется. Минимальное значение сдвига фазы, необходимое для устойчивости системы, часто называют запасом по фазе. Аналогично запас по амплитуде может быть определен как минимальное расстояние по отрицательной части реальной оси между  $H(i\omega)$  и  $(-1)$ .

Результирующая передаточная функция системы с замкнутой петлей обратной связи (см. рис. 4.15) все же фиксирует точку неустойчивости в виде небольшого резонансного пика с амплитудой, большей единицы, около точки  $|H|=1$ . Высота пика определяется демпфированием системы, зависящим от выбора параметров  $\tau_1$  и  $\tau_2$  корректирующей цепи. Уровень пика определяет форму отклика системы на входной сигнал в виде ступеньки. Удовлетворительный компромисс между уровнем превышения и продолжительностью отклика достигается при величине пика около 3 дБ.

В электромеханических устройствах, работающих на высоких частотах, таких как позиционер объектива, часто наблюдаются паразитные резонансы, обусловленные наличием нежелательных упругих связей и элементов, рассмотренных в предыдущем подразделе. В этом случае на участке малого усиления системы с разомкнутой петлей обратной связи с наклоном  $(-2)$  и сдвигом фазы  $180^\circ$  появляются узкие и высокие резонансные пики, которые вызывают нестабильность при достаточно высокой добротности системы, выполняющей условие  $|H|=1$ . Чтобы обеспечить гарантированный запас по амплитуде, частоты таких резонансов должны быть максимально высокими. Это требование приводит к необходимости максимального уменьшения массы подвижной части и увеличения жесткости пружин [см. уравнение (4.5)]. На практике такие резонансные пики часто имеют добротность около 100, следовательно, частоты этих резонансов должны быть по крайней мере в 10 раз выше, чем частота, на которой  $|H|$  пересекает ординату 0 дБ. В принципе уменьшить влияние этих резонансов можно, используя электронный полосовой фильтр, однако из-за ограниченной частотной стабильности как фильтра, так и пика-такие фильтры оказываются малоэффективными. Тем не менее в некоторых особых случаях такие резонансы могут оказаться полезными (см. разд. 4.9).

## 4.6. ПОЗИЦИОНЕРЫ

Необходимые смещения пятна при отслеживании дорожки обеспечиваются электромагнитными устройствами — позиционерами. Если позиционер может смещать пятно более чем в одном направлении, он называется двух- или трехкоординатным (2К или 3К) позиционером.

Прежде чем перейти к детальному обсуждению передаточной функции преобразователя «ток—перемещение», описанной в предыдущем разделе, определим коэффициент передачи позиционера  $K$ . Строго говоря, этот параметр присущ только части передаточной функции, имеющей наклон  $(-2)$ . С учетом этого ограничения  $X = KT$ . Если позиционер описывать его передаточной функцией «ток—ускорение», то коэффициент передачи  $K$  будет иметь размерность  $\text{м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$ . Обычно используется размерность  $g \text{ А}^{-1}$ , где  $g$  — ускорение свободного падения ( $g \approx 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ ).

Для определения  $K$  позиционера типа привода автоматической фокусировки важно измерить ток, вызывающий силу, уравновешивающую массу объектива. Этот простой метод измерения применим также и для позиционеров, которые смещают пятно в радиальном и тангенциальном направлениях посредством соответствующих смещений микрообъектива. Однако он может быть использован для тех систем, в которых ускорение движения пятна равно ускорению движения перемещаемой массы.

Отношение между ускорениями движений пятна и перемещаемой массы называется оптической передаточной функцией  $K_{\text{опт}}$ , которая наряду с передаточной функцией привода  $K_{\text{пр}}$  и механической передаточной функцией  $K_{\text{мех}}$  формирует общую передаточную функцию позиционера. На рис. 4.20 показано формирование общей передаточной функции позиционера из трех передаточных функций.

В позиционере фокусировки коэффициент оптической передачи обычно равен единице либо близок к ней, если входной луч не

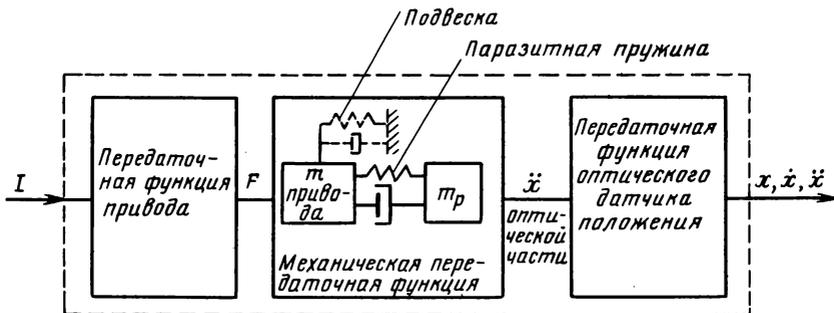


Рис. 4.20. Схематическое представление формирования передаточной функции позиционера в целом

коллимирован. Однако в случае колеблющегося зеркала угловое ускорение зеркала не эквивалентно ускорению пятна, поскольку оно преобразуется объективом.

Коэффициент механической передачи определяется функцией передачи пружинной подвески, состоящей по крайней мере из массы позиционера  $m_{\text{поз}}$  и массы движущейся части  $m_{\text{д}}$  с возможным добавлением пружинной подвески.

Основная функция привода — преобразование тока в силу с максимально возможной эффективностью. Для того чтобы иметь возможность выделить паразитные резонансы, ограничивающие полосу регулирования, предполагается, что массы привода и движущейся части разделены. Они соединены пружиной и демпфером.

При создании подвески на основе упругого элемента он будет влиять на механический коэффициент передачи. Если используются 2К- или 3К-позиционеры, то требования к подвеске, передающей силы от привода к объективу, могут оказаться противоречивыми.

#### 4.6.1. ПРИВОД

Важной составной частью позиционера является привод, представленный на рис. 4.21, который в данном случае питается от источника тока. Хотя полное сопротивление катушки (состоящее из индуктивности  $L$  и сопротивления  $R$ ) не играет особой роли при питании системы током, оно должно учитываться при разработке источника тока и выборе питающего напряжения. Чтобы не потребовалось слишком высокого питающего напряжения и источник тока нормально функционировал, на высоких частотах требуются малые значения постоянной времени  $L/R$ , вследствие чего необходимо использовать катушки с минимальными размерами сердечников.

Средняя рассеиваемая механическая энергия пренебрежимо мала по сравнению с электрической энергией, рассеиваемой на сопротивлении  $R$  катушки. Рассеиваемая мощность  $P = I_{\text{эфф}}^2 R$  вы-

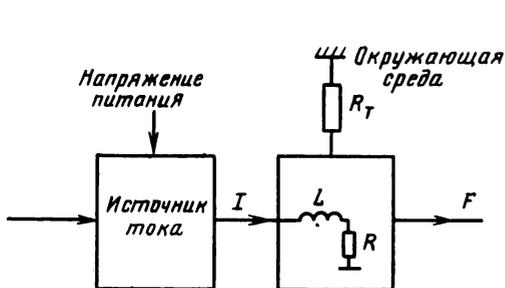


Рис. 4.21. Схема привода позиционера

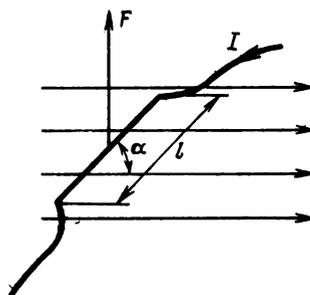


Рис. 4.22. Проводник в магнитном поле

зывает нагрев катушки и поток тепла через тепловое сопротивление  $R_T$  между катушкой и окружающей ее средой:

$$\Delta T = T_{\text{кат}} - T_{\text{окр}}. \quad (4.6)$$

Для теплового баланса

$$\Delta T = PR_T \text{ и } P = I_{\text{эфф}}^2 R,$$

таким образом,

$$\Delta T = I_{\text{эфф}}^2 RR_T. \quad (4.7)$$

Для проводника с током в магнитном поле сила, действующая на проводник,

$$F = BIl \sin \alpha, \quad (4.8)$$

где  $F$  — сила, действующая на проводник;  $B$  — магнитная индукция;  $I$  — ток;  $l$  — длина проводника в поле;  $\alpha$  — угол между током и направлением поля. Сила  $F$  действует перпендикулярно току и направлению магнитного поля (рис. 4.22).

Чувствительность привода, определяемая как  $K_{\text{пр}} = F/I$ , равна  $K_{\text{пр}} = Bl \sin \alpha$ . Помимо чувствительности важно также максимальное значение силы  $F_{\text{max}}$ , которое можно получить в данном приводе. Будем различать пиковое значение силы  $F_{\text{max пик}}$ , определяемое максимальным током и напряжением источника тока, и среднее максимальное значение  $F_{\text{max ср}}$ , зависящее от максимально допустимой температуры катушки привода. Из (4.6) — (4.8) следует, что

$$F_{\text{max ср}} = Bl \sin \alpha \left( \frac{I_{\text{кат}} - T_{\text{окр}}}{RR_T} \right)^{1/2} = K_{\text{пр}} \left( \frac{I_{\text{кат}} - T_{\text{окр}}}{RR_T} \right)^{1/2}. \quad (4.9)$$

Все комбинации элементов приводов, разделенных на стационарные и движущиеся части, приведены в табл. 4.2. Они содержат катушку, постоянный магнит и, возможно, магнитопровод из магнитно-мягкого железа. Незаполненные позиции таблицы соответствуют комбинациям, которые практически невозможны. Пригодные комбинации приводов могут быть разделены на две основные группы, а именно с подвижным магнитом и с подвижной катушкой.

Конструкция с подвижной катушкой имеет ряд преимуществ и недостатков. Помимо проблем обрыва проводников, подводящих ток к катушке, движущаяся часть обычно имеет плохой тепловой контакт с окружающей средой (высокое  $R_T$ ) из-за гибкой подвески. Тепло, выделяющееся в подвижной катушке, приводит к росту температуры подвижной части, что нежелательно, если эта часть чувствительна к температуре, как, например, объектив ( $I_{\text{кат max}}$  должна быть низкой). Как высокое  $R_T$ , так и низкая  $T_{\text{кат max}}$  приводят к уменьшению  $F_{\text{max ср}}$ .

Достоинством системы с подвижной катушкой является то, что

Т а б л и ц а 4.2. Возможные комбинации элементов приводов

	Катушка в воздухе	Постоянный магнит с магнитопроводом	Катушка с сердечником	Катушка с постоянным магнитом	Постоянный магнит в воздухе	Катушка, железный магнит
Катушка в воздухе	—	Громкоговоритель и радиальное слежение проигрывателя CD	—	—	Макет привода объектива для видеопроигрывателя LV	—
Постоянный магнит с магнитопроводом	Фокусирующий 2К-позиционер для цифровой оптической записи (ЦОЗ)	—	Точные электромоторы постоянного тока	—	—	—
Катушка с сердечником	—	Малогобаритные электромоторы постоянного тока	Электромотор переменного тока	—	—	—
Сердечник	Реле Рнда	—	Обычное реле	—	—	Поляризованное реле
Постоянный магнит в воздухе	Привод фокусирования для проигрывателя CD	—	Современное зеркало в видеопроигрывателе LV	Макеты 2К-зеркал	—	—

**Примечание.** В столбцах даны стационарные части, в строках — подвижные.

стационарная магнитная система может быть увеличена и, следовательно, с ее помощью можно обеспечить более сильное магнитное поле (высокая  $B$ ).

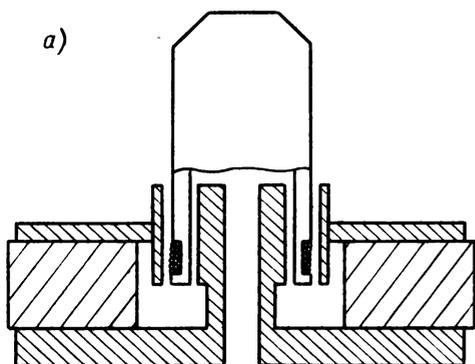
Альтернативным решением может быть конструкция с подвижным постоянным магнитом и неподвижной катушкой. В этом случае отвод тепла от катушки не является серьезной проблемой (низкое  $R_T$ ) и максимально допустимая температура катушки выше ( $T_{\text{кат max}}$  высокая). Но  $F_{\text{max ср}}$  уменьшается из-за ослабления магнитного поля (низкая  $B$ ), поскольку объем магнита меньше.

Высокое значение  $K_{\text{пр}}$  предпочтительно, поскольку обеспечивает как большее значение  $F_{\text{max ср}}$ , так и работу с малыми управляющими токами. Относительно большие токи могут влиять на токи фотодиода оптической схемы дискриминации ошибки, которые меньше управляющих в  $10^6$  раз. При замкнутой петле обратной связи это может привести к нестабильности.

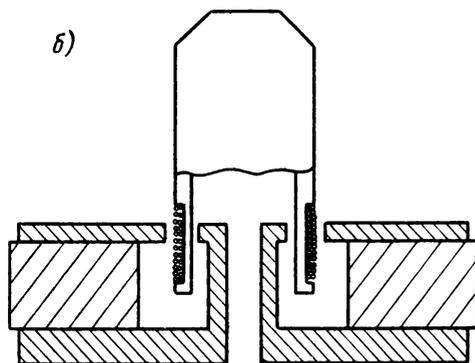
Величина  $K_{\text{пр}}$  для конкретного привода зависит от отклонения микрообъектива от среднего положения. Это приводит к изменению общего усиления системы автоматического регулирования. Для уменьшения этих отклонений длина области магнитного поля должна быть такой, чтобы катушка в крайних положениях перемещения оставалась полностью внутри поля (рис. 4.23, *а*). Более концентрированное поле и длинная катушка дают тот же результат (рис. 4.23, *б*), а именно, более постоянное, хотя и низкое, значение  $K_{\text{пр}}$ . Исходя из этих соображений конструкция обычно выполняется таким образом, чтобы значение  $K_{\text{пр}}$  при смещении катушки менялось приблизительно на 20%.

Такое решение возможно, если подвижная катушка находится в стационарном магнитном поле постоянного магнита с железными магнитопроводами. При выборе конструкции с подвижным магнитом и неподвижной катушкой возникают проблемы, связанные со значительной массой магнита и магнитопроводов.

Альтернативный вариант привода состоит из комбинации магнита и катушки, причем оба элемента находятся в воздухе. В этом случае возможны очень эффективные решения. Чтобы разобраться во взаимодействии сил катушки и магнита, воспользуемся моделью ленточных токов. В этой модели, хорошо описывающей современные магнитные материалы с относительной магнитной проницаемостью, близкой к 1, как, например, феррооксидур и SmCo-сплав, постоянный магнит рассматривается как объем воздуха с током вдоль его поверхности (см. рис. 4.24). Этот ток является функцией конкретного магнитного материала и имеет размерность  $A \cdot \text{мм}^{-1}$ . Характерная его величина для редкоземельных магнитов составляет  $700 A \cdot \text{мм}^{-1}$ . Это значит, что магнит из сплава SmCo высотой 10 мм, намагниченный до насыщения, может быть представлен как объем воздуха с ленточным током 7000 А. Поскольку проводники в зависимости от направления тока в них отталкиваются, либо притягиваются, в рамках этой модели можно достаточно просто



а) Катушка короче зазора с магнитным полем



б) Катушка длиннее зазора с магнитным полем

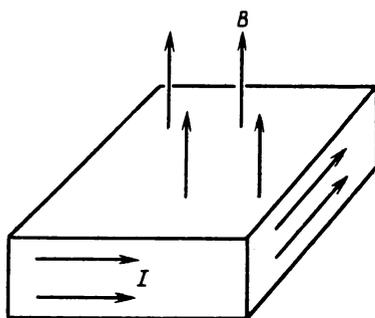


Рис. 4.24. Представление постоянного магнита в виде ленточного тока

← Рис. 4.23. Привод объектива

понять и рассчитать самые оригинальные комбинации из катушки и магнита.

Для расчетов комбинации из катушки и магнита в воздухе используем следующее выражение:

$$dB_p = \mu I_1 \sin \varphi ds / 4\pi r^2,$$

где  $dB_p$  — магнитная индукция в точке  $p$ , обусловленная током  $I_1$ , который протекает по элементу проводника  $dS$ , находящемуся на расстоянии  $r$ ;  $\mu$  — магнитная проницаемость воздуха ( $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{А}^{-2}$ ). Магнитная индукция  $dB$  направлена перпендикулярно к  $dS$  (рис. 4.25).

Если через точку  $p$  проходит проводник с током  $I_2$ , то в соответствии с (4.8) на его элемент в точке  $p$  длиной  $dl$  будет действовать сила

$$dF = \mu I_1 I_2 \sin \varphi \sin \alpha ds dl / 4\pi r^2. \quad (4.10)$$

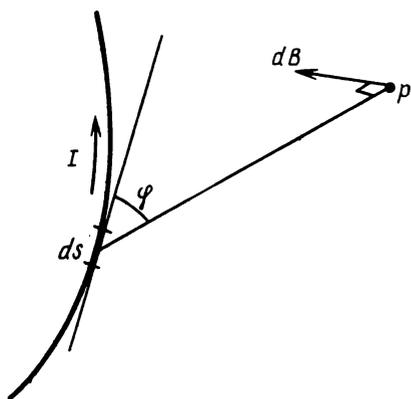


Рис. 4.25. Магнитная индукция в точке  $p$

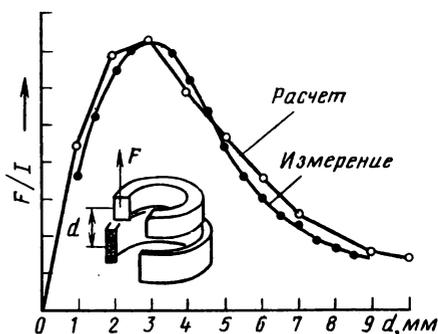


Рис. 4.26. Рассчитанная и измеренная сила взаимодействия между кольцевым магнитом и катушкой

Подстановка  $\mu$  и интегрирование дают

$$F = I_1 I_2 \cdot 10^{-7} \iint \frac{\sin \varphi \sin \alpha}{r^2} ds dl$$

и

$$K_{\text{пр}} = \frac{F}{I_1} = I_2 \cdot 10^{-7} \iint \frac{\sin \varphi \sin \alpha}{r^2} ds dl. \quad (4.11)$$

Используя это выражение, можно с достаточной точностью рассчитать силу с помощью маленького калькулятора. На рис. 4.26 показаны рассчитанная и измеренная силы взаимодействия между кольцевым магнитом и катушкой. Видно, что имеет место достаточно узкий диапазон перемещений, внутри которого сила (следовательно, и  $K_{\text{пр}}$ ) изменяется в допустимых пределах. Этот диапазон увеличивается, если применить два магнита и одну катушку либо один магнит и две катушки, так как суперпозиция двух пиков дает в результате один уширенный (рис. 4.27).

Метод суперпозиции двух пиков использован на практике в конструкции привода 2К-позиционера для магнита видеопроигрывателя LV (рис. 4.28). Объектив, подвешенный таким образом, что может двигаться как по вертикали, так и по горизонтали, имеет на верхнем и нижнем торцах по кольцу из постоянного магнита, которые намагничены вдоль оптической оси. Четыре катушки, расположенные ниже и выше магнитов, притягивают или отталкивают соответствующее магнитное кольцо.

Маленькое зеркальце, которое видно на фотографии, является частью встроенного оптического детектора положения. Между парами катушек (внутренние катушки не видны на фотографии) распо-

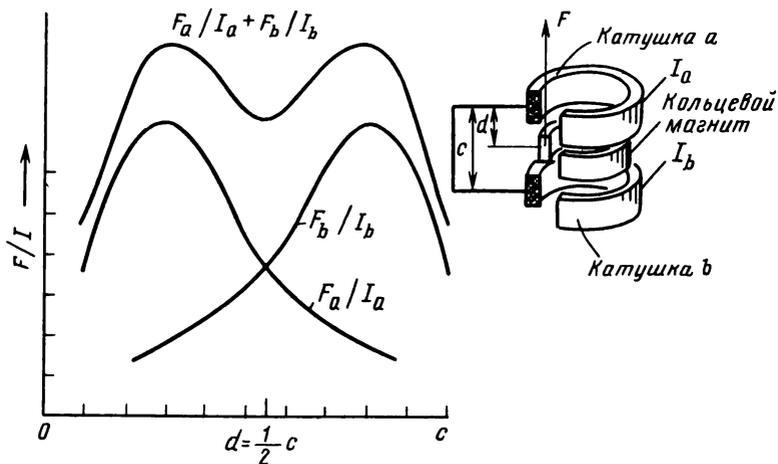


Рис. 4.27. Суперпозиция пиков

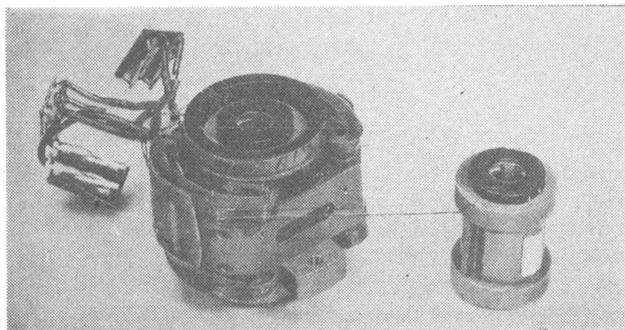


Рис. 4.28. Макет привода 2К-позиционера для видеопроектирователя LV

ложены две серповидные катушки для радиального движения объектива.

#### 4.6.2. МЕХАНИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ

Наряду с оптической передаточной функцией  $K_{\text{опт}}$  и функцией передачи привода  $K_{\text{пр}}$ , рассмотренными в предыдущих подразделах, общая передаточная функция  $K = \ddot{x}/I$  определяется также механической передаточной функцией  $K_{\text{мех}} = \ddot{x}/F$  подвижной части.

В диапазоне частот, где подвижная часть ведет себя как свободно движущееся твердое тело с массой  $m$ , механическая передаточная функция является константой:

$$K_{\text{мех}} = \ddot{x}/F = 1/m. \quad (4.12)$$

Следовательно, для общей передаточной функции  $K$  можно записать

$$K = K_{\text{пр}} K_{\text{онт}} K_{\text{мех}} = \frac{B l \sin \alpha}{m}. \quad (4.13)$$

Для катушки в магнитном поле

$$K = \frac{I_2}{m} \cdot 10^{-7} \iint \frac{\sin \varphi \sin \alpha}{r^2} ds dl, \quad (4.14)$$

если предполагается комбинация катушки и магнита в воздухе.

Максимальное усредненное ускорение пятна  $\ddot{x}_{\text{макс ср}}$ , ограничиваемое рассеянием тепловой мощности, можно получить из (4.9) и (4.12):

$$\ddot{x}_{\text{макс ср}} = K \left( \frac{T_{\text{кат макс}} - T_{\text{окр}}}{RR_T} \right)^{1/2}. \quad (4.15)$$

Если нельзя пренебречь ускорением силы тяжести  $g$ , например для вертикально движущихся элементов, то

$$\ddot{x}_{\text{макс ср}} = K \left( \frac{T_{\text{кат макс}} - T_{\text{окр}}}{RR_T} \right)^{1/2} - g. \quad (4.16)$$

Механическим эквивалентом упомянутого выше электрического взаимодействия может служить сила реакции, вызванная ускорением позиционера массы  $m$ . Эта сила реакции распространяется через конструкционные элементы проигрывателя и может вызвать вибрации диска значительной амплитуды из-за наличия многочисленных механических резонансов.

Превышение амплитуд этих резонансов в зоне считывающего пятна его размеров приводит к неустойчивости. Неустойчивость такого типа вызывает самовозбуждение («подвывание»). Тривиальное решение данной проблемы заключается в уменьшении массы  $m$ , поскольку механическое влияние пропорционально ей. Более изящный выход из положения — компенсации силы реакции от колеблющегося микрообъектива с помощью движущейся в противофазе с объективом массы. Близок к этому принцип, в соответствии с которым стационарная часть привода позиционера укрепляется подвижно и, таким образом, масса этой части действует как компенсирующий противовес. Дополнительное смещение такой «стационарной» части не влияет на передаточную функцию позиционера, так как сила, действующая на эту часть, зависит от положения.

В общем случае механическая функция передачи не равна просто  $1/m$ . Механическая составляющая передаточной функции позиционера зависит от нежелательного воздействия эффектов, обусловленных наличием одного или нескольких упругих элементов системы. Упругие элементы присутствуют всегда, поскольку на практике

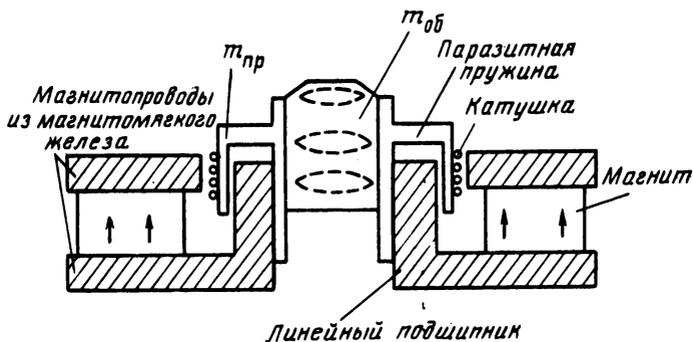


Рис. 4.29. Позиционер объектива видеопроигрывателя LV

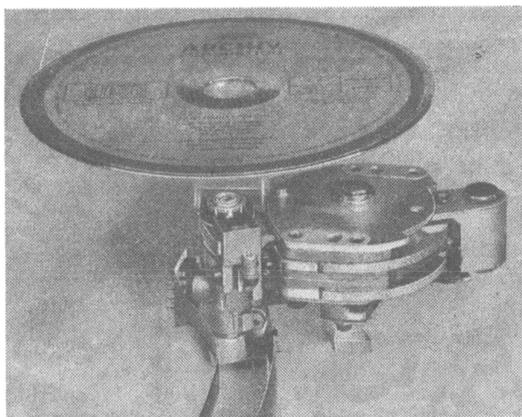


Рис. 4.30. Головка проигрывателя Compact Disc

различные проводники и соединения обладают упругими свойствами. Массы, соединенные с такими пружинами, образуют динамические упругие системы. В большинстве случаев паразитные динамические системы легко выявить и расположить соответствующие резонансы в низкочастотной области. Эти соображения можно обобщить следующим образом: чем сложнее локализация упругой системы, тем выше соответствующая резонансная частота и, следовательно, лучше передаточная функция позиционера.

В реальном позиционере объектива проигрывателя LV, принцип которого показан на рис. 4.29, паразитные упругие системы определяются легко. В этом случае подвеска состоит из линейного подшипника. В большинстве подвесок вместо линейного подшипника используются плоские пружины. Смещение сравнительно мягкой пружины приводит к вариациям  $K_{\text{мех}}$  в диапазоне низких частот ( $f_{\text{рез}} = 100$  Гц), о чем пойдет речь в следующем подразделе, посвя-

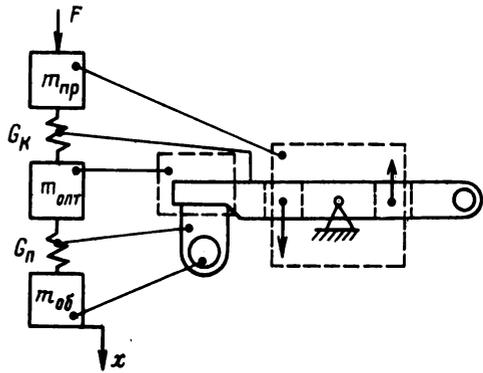
Рис. 4.31. Упрощенная схема головки проигрывателя CD

щенном различным системам подвесок. Очень важно иметь в виду, что пружины подвески благодаря своей конечной массе могут вести себя как системы с паразитными резонансами в высокочастотной области.

Другой пример, в котором легко определяется несколько паразитных резонансов, — конструкция с поворотной головкой (рис. 4.30), которая используется в проигрывателе CD для радиального слежения. На рис. 4.31 представлена очень упрощенная схема поворотной головки. По обе стороны центра вращения, расположенного посередине несущей пластины поворотной головки, укреплены катушки электромагнитного привода. На схеме масса несущей пластины с катушками представлена в виде массы привода  $m_{пр}$ , на которую действует сила  $F$ . На одном конце пластины, которая предполагается недеформируемой, установлено лазерное световое перо массой  $m$ ; предполагается, что это крепление обладает некоторой упругостью  $G_k$ . Объектив с магнитом привода соединен со световым пером посредством двух параллельных листовых пружин, обеспечивающих фокусировку. Масса объектива и магнита обозначена через  $m_{об}$ . Смещение между  $m_{опт}$  и  $m_{об}$  происходит при изгибе листовых пружин ( $G_n$ ). В модели динамической системы, показанной на левой части рис. 4.31, поворотные величины заменены линейными. Надлежащее действие поворотной головки определяется паразитными резонансами. Они имеют сравнительно низкие частоты благодаря относительно большой массе и малым смещениям, обусловленным конструкцией головки. На рис. 4.27 показан 2К-позиционер, в котором механизмы с паразитными резонансами четко определяются. Благодаря компактной конструкции головки частоты паразитных резонансов очень высоки.

Для определения паразитных резонансов конструкции привода могут быть применены два метода.

1. Метод «разомкнутой петли». В соответствии с этим методом смещение пятна измеряется непосредственно. Если это невозможно, то определяется смещение элементов головки, для которых известно, что их смещение пропорционально смещению пятна. Поскольку величины смещений находятся в субмикронной области, особую важность приобретает значение отношения сигнал-шум измерительного прибора. Это уменьшает диапазон измерения до нескольких микрон. Из-за малого диапазона измерения позиционер должен



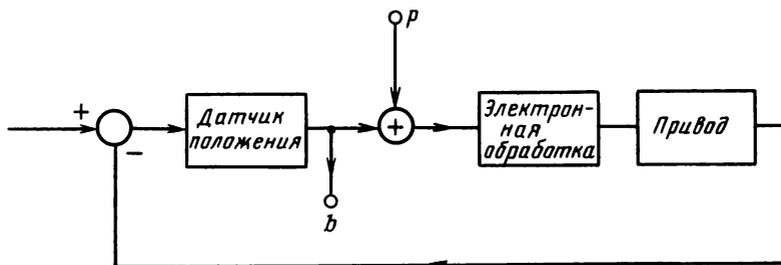


Рис. 4.32. Точки суммирования и измерения в системе с замкнутой петлей обратной связи

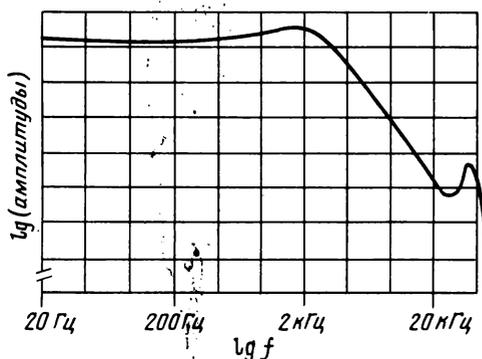


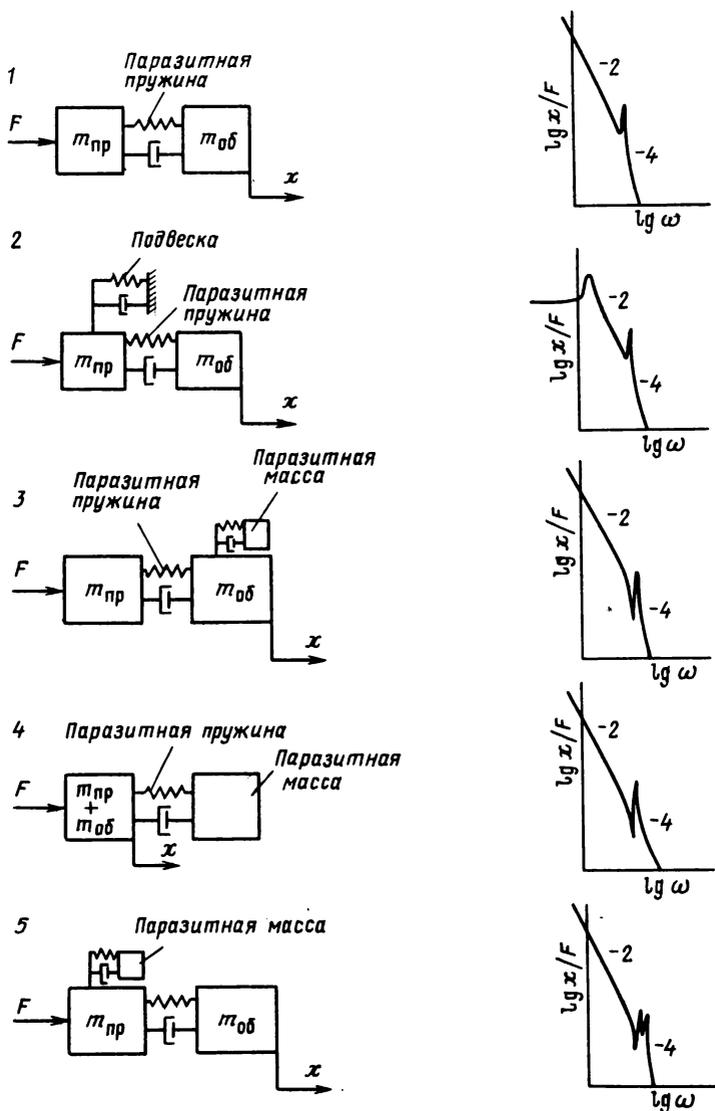
Рис. 4.33. Передаточная функция  $H/(1+H)$

быть укреплен в процессе измерения на своих собственных либо на вспомогательных пружинах.

2. Метод «замкнутой петли». В данном случае применяется то же измерительное оборудование, что и в методе «разомкнутой петли», однако измеряемый сигнал положения после обработки в электронной схеме подключается к катушке. С помощью этой системы измеряется передаточная функция  $H/(1+H)$ . Для измерений по данному методу формируется еще одна суммирующая точка в замкнутой петле обратной связи (рис. 4.32). В точку  $p$  подается синусоидальное напряжение с постоянной амплитудой и изменяющейся частотой. При этом в точке  $b$  измеряется передаточная функция  $H/(1+H)$ . Результат таких измерений приведен на рис. 4.33. Видно, что в частотном диапазоне до предельной частоты регулирования, где  $H$  — мало,  $H/(1+H) = H$ . В высокочастотной области спектра виден пик паразитного резонанса.

В табл. 4.3 представлены встречающиеся типы упругих динамических систем с соответствующими диаграммами Боде. Передаточная функция на рис. 4.33 очень похожа на характеристику системы второго типа из таблицы.

Таблица 4.3. Механическая передаточная функция



#### 4.6.3. ПОДВЕСКА

Для смещения пятна необходимо использовать подвижные оптические компоненты, такие как зеркала или объективы совместно с одним или несколькими приводами.

Основная цель, стоящая при разработке подвески, — обеспечить движение оптического элемента только по жестко заданным направ-

лениям регулирования. Особенно это касается объективов, для которых допустимы лишь очень малые угловые смещения. В то же время эти смещения в направлении регулирования должны быть с очень высокой степенью свободы. Концепцию подвески, которая излагается в данном подразделе, следует понимать в широком смысле. Все конструктивные решения, удовлетворяющие поставленным выше требованиям, называются подвесками. Подвески могут быть типа линейного подшипника, пружинного и электромагнитного типов. Примеры первых двух уже даны ранее. Подвеску электромагнитного типа иногда ошибочно называют плавающей.

В первых образцах объективов,двигающихся на линейных подшипниках (см. рис. 4.29), нежелательный наклон, радиальные и тангенциальные смещения ограничивались путем выбора соответствующих точных подшипников с минимально возможными допусками. Смещение по нормали к диску — требуемая степень свободы — не ограничивается, если не учитывать пренебрежимо малое трение в подшипнике. В рабочем состоянии, т. е. при использовании в позиции фокусирования, точность подшипника высока и силы трения, направленные по нормали к поверхности подшипника, малы.

При включении системы автоматического регулирования фокусировки возникает проблема, заключающаяся в необходимости подведения микрообъектива с малой скоростью к диску на заданное расстояние, при котором начинает действовать оптическая система дискриминации ошибки фокусировки. Это обстоятельство приводит к необходимости еще одной системы управления скоростью подведения микрообъектива к диску. Если микрообъектив имеет пружинную подвеску, то такая система может и не потребоваться, поскольку в низкочастотной области смещения пропорционально управляющему току в катушке [см. подразд. 4.5.1, уравнение (4.4)]. Для такой подвески достаточно в режиме поиска поверхности диска обеспечить медленно возрастающий ток в катушке.

И наоборот, по низкочастотной части управляющего тока можно определить среднее положение подвижной части по отношению к нейтральному положению. Это свойство пружинной подвески ликвидирует необходимость в дополнительных датчиках положения для систем автоматического регулирования фокусировки, радиального и тангенциального смещений.

Наряду с этим, а также и другими преимуществами, как, например, отсутствие трения и люфта, пружинная подвеска имеет ряд недостатков. Два из них уже обсуждались, а именно ухудшение качества слежения в низкочастотной области и появление дополнительных паразитных резонансов в высокочастотной области, обусловленных собственными высокочастотными колебаниями пружин подвески.

Возможными решениями второй проблемы являются уменьшение добротности  $Q$  системы и увеличение частоты паразитных резонансов. Для уменьшения добротности  $Q$  можно ввести дополнитель-

ное демпфирование, например изготовив пружины подвески из специального материала типа резины, обладающего высоким внутренним демпфированием. Резонансную частоту можно увеличить уменьшением паразитной массы пружины. Это приведет к увеличению отношения между паразитной и подвижной массой головки, так что влияние собственных резонансов пружины на передаточную функцию позиционера уменьшится.

Для системы с линейным подшипником, используемой обычно для вертикального слежения, требуется постоянное усилие, чтобы удержать подвижную часть в среднем положении. Избежать дополнительного выделения тепла, вызванного действием этой постоянной составляющей, можно с помощью пружинной подвески. В этом случае постоянное ускорение, равное  $1g$ , не требуется, но необходима дополнительная сила, которая компенсирует изгиб пружины при смещении подвижной части. Величины смещения и изгиба пружин подвески определяют, какой вид подвески более предпочтителен. Для систем с горизонтальным перемещением либо в случаях, когда можно пренебречь силой тяжести, использование пружин всегда приводит к дополнительному рассеянию энергии.

В особых случаях подвеска служит также для передачи управляющей силы. Это имеет место в конструкции поворотной головки проигрывателя CD (см. рис. 4.30).

Плоские параллельные пружины, использующиеся в подвеске для системы фокусировки, должны иметь очень высокую жесткость при изгибе в радиальном направлении. Однако при изгибе в направлении фокусирования жесткость должна быть мала.

Резонансная частота подвески в направлении фокусирования равна 45 Гц. Для системы автоматической регулировки по радиусу с полосой регулирования 900 Гц резонансная частота динамической системы, состоящей из жесткости пружин подвески при изгибе в горизонтальном направлении и массы объектива, должна быть больше приблизительно в 5 раз, т. е. 4,5 кГц (см. разд. 4.5). Для динамической системы с массой  $M$  и жесткостью  $G$  резонансная частота  $f_0 = 1/2\pi\sqrt{G/M}$ ; жесткости  $G_{\text{верт}}$  и  $G_{\text{гор}}$  пропорциональны квадрату резонансной частоты. В настоящее время практически может быть реализовано результирующее отношение 10 000. Следовательно, нельзя ожидать, что для систем автоматического регулирования с позиционерами, управляемыми через подвеску, может быть получена полоса регулирования более 1000 Гц.

Если ось объектива не перпендикулярна к поверхности диска, то считывающее пятно будет искажаться (кома, см. подразд. 2.3.4), что вызовет дополнительные перекрестные искажения. Кома пропорциональна третьей степени числовой апертуры. Для видеопроигрывателей LV, имеющих объектив с высокой NA, обусловленной использованием лазера на основе GaAlAs, это значит, что на телевизионном изображении будут наблюдаться помехи в виде интерференционных полос. Данное явление — следствие наклона поверхности

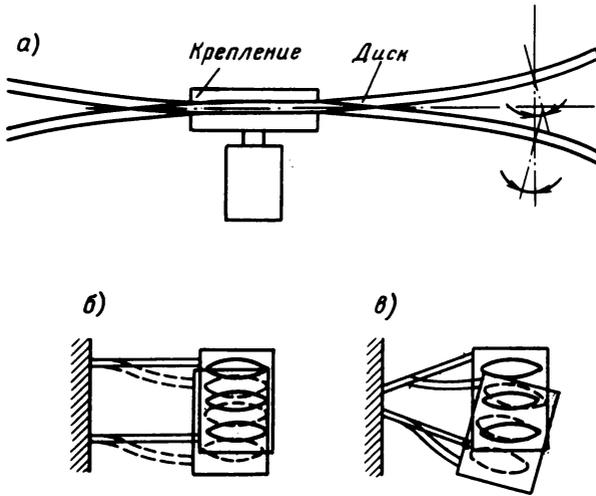


Рис. 4.34. Уменьшение наклона диска (а) при использовании вместо вертикально движущегося объектива (б) объектива с наклонным движением (в)

сти диска относительно оси объектива из-за его зонтикообразной формы. Этот наклон может быть существенно уменьшен, если вместо объектива с вертикальным плоскопараллельным смещением применяется наклоняющийся объектив (рис. 4.34).

Автоматическая компенсация наклона является специфической особенностью позиционеров с электромагнитной подвеской вместо пружинной. Проблемы этого метода подвески играют важную роль для 2К- и 3К-позиционеров, которые будут обсуждаться в следующем подразделе.

#### 4.6.4. ДВУХ- И ТРЕХКООРДИНАТНЫЕ ПОЗИЦИОНЕРЫ

Смещение пятна по трем координатам можно осуществить с помощью конструкции из нескольких позиционеров, использованной в видеопроигрывателе LV (рис. 4.35). Конструкция состоит из объектива,двигающегося по вертикали для фокусирования, и двух независимых колеблющихся зеркал. Этот метод привлекателен тем, что имеется возможность раздельной оптимизации привода и подвески для смещения по каждой координате и, следовательно, получения оптимальной передаточной функции для каждого из трех приводов. Однако использование раздельных приводов требует применения очень высококачественных оптических элементов экстра-класса. В видеопроигрывателе LV — это два зеркала с высококачественной плоской поверхностью и интерференционными отражающими покрытиями. Другой недостаток — большие габариты такой конструкции.

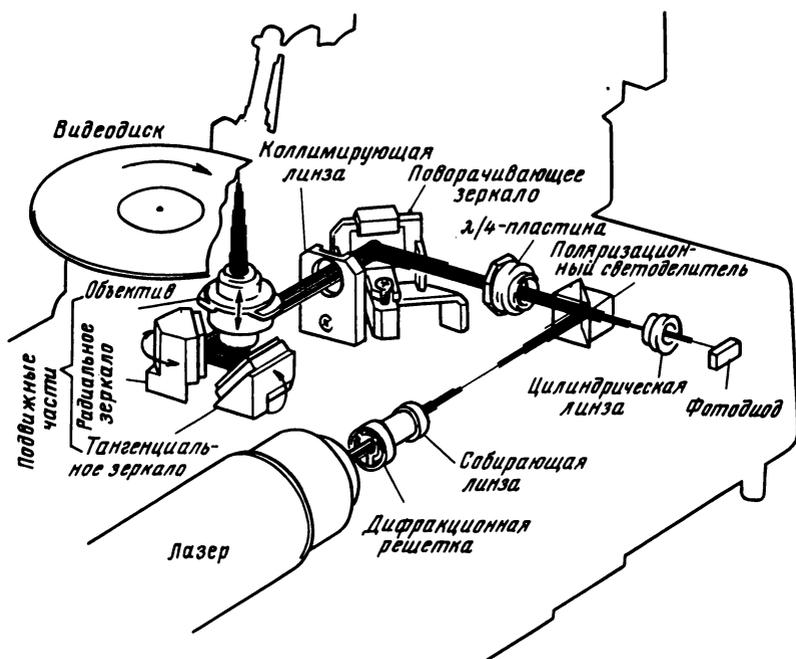


Рис. 4.35. Оптическая схема видеопроигрывателя LV

Альтернативное решение — один позиционер, позволяющий смещать пятно по трем координатам. Преимущества 3К-позиционера носят скорее коммерческий, чем технический характер, поскольку в данном случае можно обойтись без дорогих прецизионных оптических элементов. Трехкоординатное смещение пятна одним подвижным компонентом можно осуществить только с помощью микрообъектива. Альтернативный вариант — движение всего оптического блока, однако при этом используется движение более одного оптического компонента.

Прежде чем далее углубляться в конструкции 3К-позиционеров, обсудим ряд более простых с технической точки зрения 2К-позиционеров. Для проигрывателей CD принципиально важно наличие 2К-позиционера (вертикального и радиального). В проигрывателе LV 2К-позиционер дополняется еще одним 1К-позиционером \*. Первый 2К-позиционер для оптической записи был реализован путем замены двух колеблющихся зеркал в видеопроигрывателе одним, которое может колебаться вокруг двух осей. Зеркало было оснащено точечной опорой, которая в простейшем случае представляет собой резиновый стержень, укрепленный между центром зеркала и фикси-

\* Для смещения пятна в тангенциальном направлении.— Прим. перев.

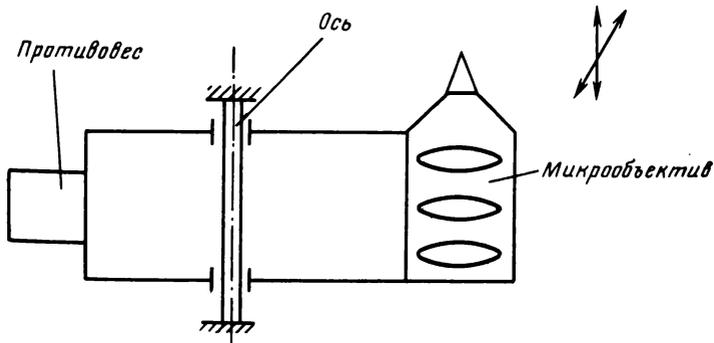


Рис. 4.36. Подвеска 2К-позиционера с линейным подшипником на оси

рованным основанием. Позиционер имеет два привода, обеспечивающие наклон зеркала по двум взаимно перпендикулярным осям, лежащим в плоскости зеркала. В качестве критических оптических параметров зеркала имеют только эти два наклона, и поэтому к другим степеням свободы данного варианта двухкоординатной подвески зеркала требования не предъявлялись.

При использовании в 2К-позиционере микрообъектива возникают серьезные проблемы, связанные с жесткими требованиями к угловым отклонениям; подвеска должна ликвидировать наклон объектива. На рис. 4.36 дан пример такой 2К-подвески. Радиальное смещение обеспечивается поворотом движущейся части с укрепленным на ней эксцентрично объективом. Фокусирование производится скольжением подвижной части по оси. Противовес, требующийся для динамического баланса, является недостатком данной системы, поскольку увеличивает в 2 раза общую массу подвижной части.

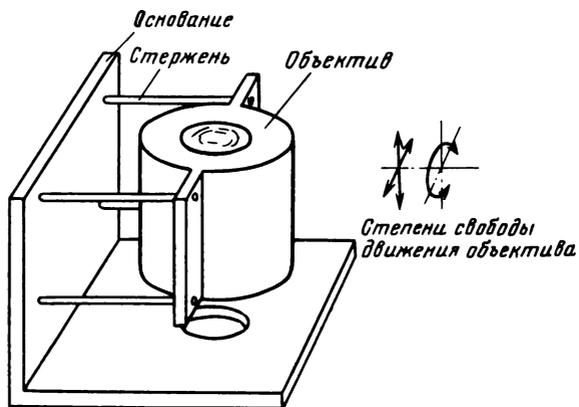


Рис. 4.37. 2К-позиционер с подвеской на четырех гибких стержнях

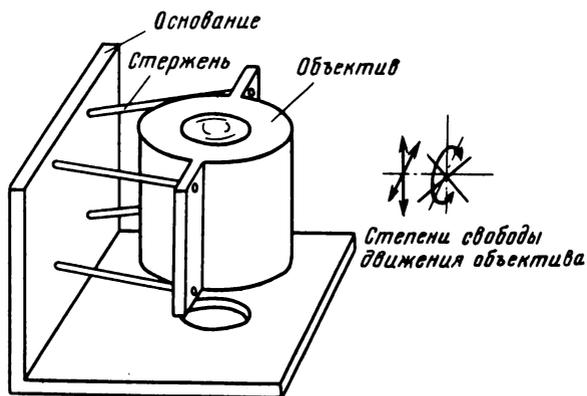


Рис. 4.38. 2К-позиционер с подвеской на четырех гибких стержнях с ограничением наклона

Другой вариант 2К-подвески состоит из четырех параллельных гибких стержней (см. рис. 4.37). Паразитные резонансы стержней могут быть скомпенсированы с помощью покрытия из демпфирующего материала, например резины. Наклон объектива в одном направлении из-за скручивания стержней может быть ограничен до приемлемого уровня, если использовать качественный симметричный привод с очень малыми моментами в направлении наклона. Однако чувствительность к внешним вращающим импульсам остается такой же высокой.

Можно получить заметное увеличение жесткости подвески в плоскости поворота объектива, если расположить гибкие стержни под определенным углом (рис. 4.38). Повышение жесткости в плоскости поворота обусловлено значительной жесткостью материала стержня, который в такой конструкции подвески должен сжиматься или растягиваться при смещении объектива.

Другая конструкция 2К-позиционера — поворотная головка проигрывателя CD — имеет достоинство, заключающееся в большом диапазоне перемещения, однако, как и для всякой удлиненной массивной конструкции, ее применение ограничено узкой и низкочастотной полосой регулирования. То же самое относится и к 2К-позиционеру, разработанному для систем цифровой оптической записи, который также имеет значительное смещение (20 мм, рис. 4.39). В этом позиционере длинная катушка окружена полностью замкнутой магнитной системой. Движение катушки передается на компактную оптическую головку двумя параллельными стержнями, которые служат также радиальной подвеской. Оптическая головка предназначена как для записи, так и для считывания. Фокусирование осуществляется малогабаритным встроенным в оптическую головку приводом, смещающим объектив.

По-другому решена конструкция подвески 2К-позиционера, ко-

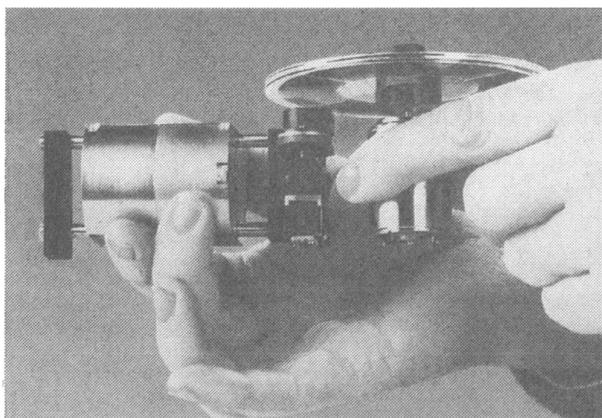


Рис. 4.39. Positionер системы ЦОЗ с расширенным диапазоном радиального перемещения

торый также разработан для цифровой оптической системы записи. Держатель объектива с двумя плоскими гранями (рис. 4.40) может свободно двигаться в вертикальном направлении между двумя стенками — направляющими, покрытыми антифрикционным материалом (рис. 4.41). Поэтому объектив свободно подвешен («плавает») с тремя степенями свободы в двумерном пространстве. Из этих степеней свободы требуются только смещения в радиальном и вертикальном направлениях. Интересной особенностью этого позиционера является то, что нежелательная степень свободы (наклон) контро-

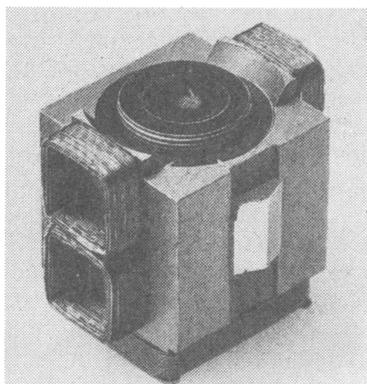


Рис. 4.40. Подвижное крепление микрообъектива для 2К-позиционера с плоским подшипником

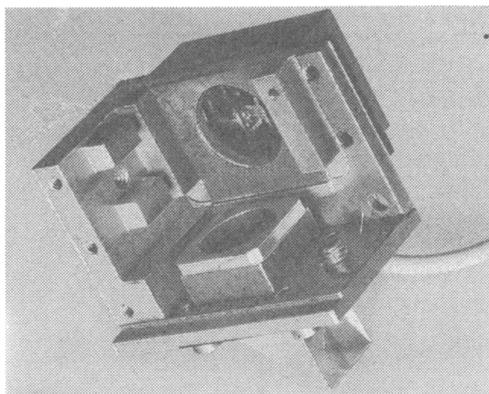


Рис. 4.41. Основа 2К-позиционера с плоскими подшипниками. Бугристый металл в центре, слева и справа — магниты; гладкие полированные области слева и по центру — железная основа

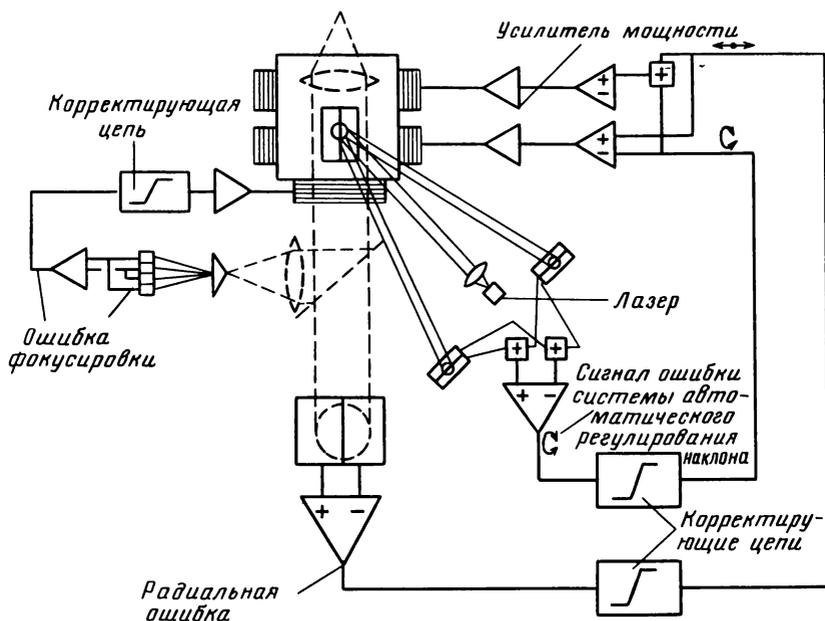


Рис. 4.42. Контуры систем автоматического регулирования 2К-позиционера

лируется системой автоматического регулирования. Благодаря ей исходное положение головки согласовывается с реальным углом наклона диска. Датчиком углового положения для этой системы служит очень узкий пучок света, который делится на два луча (рис. 4.42) отражающей призмой, укрепленной на держателе объектива (см. рис. 4.40). Оба луча попадают на двухплощадочные фотодиоды, где преобразуются в четыре сигнала, из которых получается сигнал наклона.

Помимо принципа слежения за наклоном, на рис. 4.42 показаны объектив с катушками приводов и три системы автоматического регулирования. Радиальный привод разделен на нижнюю и верхнюю части, что дает возможность получения управляющего момента для регулирования наклона. Необходимые постоянные магнитные поля создаются с помощью магнитов и железных магнитопроводов, конструктивно объединенных с корпусом оптической головки (см. рис. 4.41).

На рис. 4.43 показаны компоненты головки, приведенные на рис. 4.40 и 4.41, которые объединены в единую жесткую конструкцию позиционера. Он предназначен для систем с быстрым доступом, которые будут обсуждаться в разд. 4.8, посвященном оптическим кареткам. Конструкция на базе такого «плавающего» позиционера представляет собой вариант для видеопроигрывателя LV, обсужденного ранее (см. рис. 4.28).

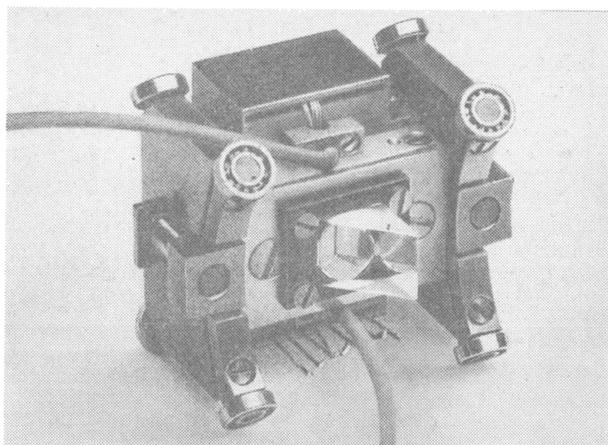


Рис. 4.43. Позиционер быстрого доступа для ЦОЗ

Как и любое твердое тело, объектив имеет шесть степеней свободы — три перемещения и три вращения. В 3К-позиционерах три перемещения объектива определяются системами автоматического регулирования (САР) вертикального, радиального и тангенциального смещений пятна. Одна из трех других степеней свободы — вращение вокруг оптической оси с точки зрения оптики не имеет значения и потому управления не требует. Для управления двумя другими степенями свободы требуются две подвески. В настоящее время применяются электромагнитные подвески, поскольку по качеству они превосходят механические подвески для 3К-позиционеров, в частности, из-за отсутствия паразитных резонансов.

Аналогично рассмотренному выше 2К-позиционеру САР наклона для 3К-позиционеров таких систем требуются две дополнительные системы автоматического регулирования. Соответственно необходимы два дополнительных датчика углового положения, два привода для получения управляющего момента и вся соответствующая электроника. Дополнительной особенностью данной системы является то, что датчики углового положения измеряют угол между осью объектива и поверхностью диска, и поэтому ось объектива остается перпендикулярной к поверхности диска как в радиальной, так и в тангенциальной плоскости.

Вариант конструкции, показанный на рис. 4.28, пригоден для использования в качестве составной части 3К-позиционера с электромагнитной подвеской. В этом случае необходимы три, а не две серповидные катушки, расположенные по окружности под углом  $120^\circ$ . Механическая подвеска удаляется.

Рис. 4.44. Световое перо на мембранной подвеске

Отличные качества ЗК-позиционеров, а именно широкая полоса регулирования, обусловлены двумя характерными особенностями: использованием бесконтактной «нематериальной» подвески, обеспечивающей очень высокие значения частот паразитных резонансов ( $> 20$  кГц) и, следовательно, широкую полосу регулирования, а также применением вариантов конструкций с подвижными магнитами, в результате чего подвижная часть не имеет нежелательных электрических соединений с неподвижной частью. Однако эти преимущества не могут во всех случаях скомпенсировать недостаток, заключающийся в необходимости двух дополнительных систем автоматического регулирования и поэтому вопрос о поиске механического эквивалента ЗК-позиционера остается открытым. Эквивалент должен быть свободен от резонансов и ликвидировать две или три вращательных степени свободы. Решение этой проблемы до сих пор не найдено, хотя существуют конструкции, в которых одна вращательная и две линейные степени свободы ликвидируются с помощью мембраны. Конструкция, в которой реализована эта идея, показана на рис. 4.44 и называется «световое перо», поскольку вся оптическая головка помещена в корпус, напоминающий карандаш. На рис. 4.45 показаны четыре магнитные системы этой конструкции в верхней части и мембрана — единствен-

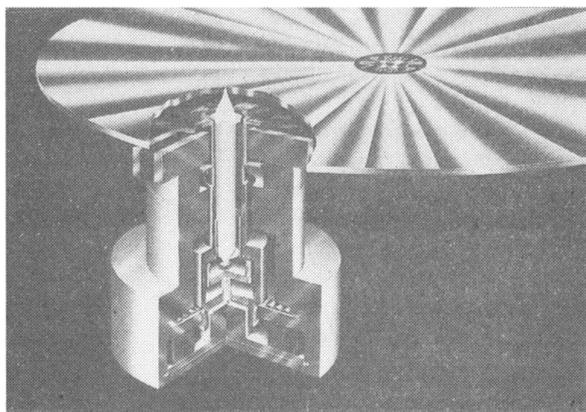
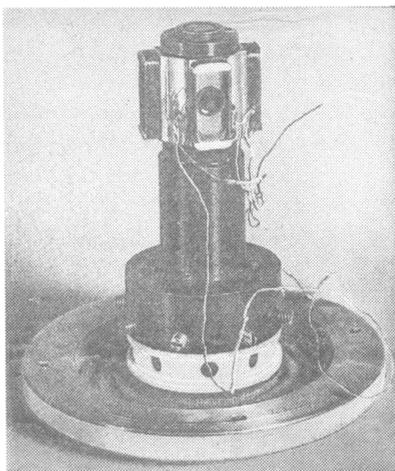


Рис. 4.45. ЗК-позиционер со световым пером

ный механический элемент подвески. Катушка фокусирования со своей магнитной системой расположена непосредственно под мембраной. Керамическое кольцо над мембраной (см. рис. 4.44) обеспечивает теплоизоляцию между катушкой фокусировки, в которой выделяется тепло, и оптической схемой. Смещения верхнего конца светового пера в результате слежения за дорожкой вызывают угловые смещения оси объектива относительно поверхности диска. Чтобы эти смещения не превышали допустимых пределов (для ограничения комы), центр наклона головки, который в данном случае лежит в плоскости мембраны, необходимо расположить далеко от диска, в результате чего возрастают габариты конструкции проигрывателя в целом.

До сих пор предполагалось, что направления перемещения в 2К- и 3К-позиционерах полностью независимы, т. е. привод одного направления вызывает перемещение исключительно в данном направлении. В общем случае это не выполняется из-за неточности привода подвески; в результате появляется взаимовлияние между различными направлениями перемещения. Это не обязательно приводит к нарушению работы системы в целом, поскольку нежелательные смещения обрабатываются соответствующими системами регулирования. Однако если взаимовлияние возникает в других частях систем автоматического регулирования, например в датчиках положения, то комбинация различных взаимовлияний может привести к нестабильности. Из этих соображений взаимовлияние обоих оптических датчиков и позиционеров должно быть под контролем. Взаимовлияние позиционеров в низкочастотной области обусловлено неточностями подвески (например, неровностью плоских пружин в механических подвесках или неточной установкой компонент в электромагнитной подвеске). В области высоких частот взаимовлияние возникает в основном из-за того, что направление некоторых управляющих сил не проходит через центр тяжести подвижной части.

#### 4.6.5. ПЕРЕСКОК

Из особенностей системы LV отметим возможности таких эффектов, как стоп-кадр и быстрое или медленное воспроизведение изображений в прямом и обратном направлениях. Такие спецэффекты возможны при записи полного кадра на одном витке спирали (постоянная угловая скорость — ПУС). В этом случае считывающее пятно быстро перемещается на один или несколько шагов дорожки в радиальном направлении. Если смещение осуществляется во время периода обратного хода луча, то искажения кадра не будут заметны. Это значит, что смещение должно произойти в течение 1 мс.

Если видеопроигрыватель LV работает во взаимодействии с игровым компьютером, то движущееся изображение формируется путем последовательного воспроизведения кадров, которые на диске расположены на расстоянии нескольких сотен витков. В этом случае

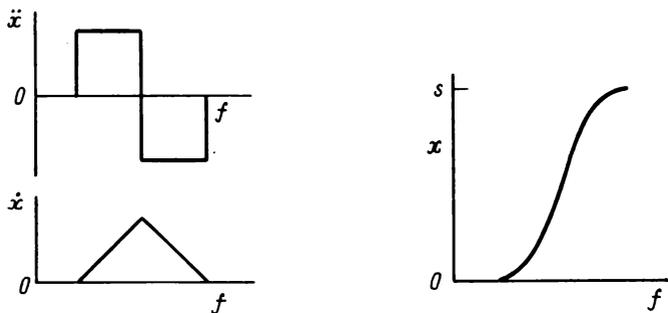


Рис. 4.46. Импульс перескока

пятно должно сместиться также за 1 мс, но на большее расстояние. Игровой компьютер определяет последовательность смещений пятна на разные участки записи, позволяя тем самым формировать различные последовательности воспроизведения отдельных сюжетов или кадров.

Третье применение, в котором требуется быстрое перемещение пятна,— процедура быстрого доступа в ЦОЗ.

Все рассмотренные выше смещения пятна можно осуществить путем так называемой процедуры перескока. При этом петля обратной связи радиального слежения размыкается и одновременно на привод радиального перемещения подается импульс перескока, состоящий из двух последовательных импульсов тока равной амплитуды и противоположного знака (рис. 4.46). Пятно движется сначала с ускорением, потом с торможением и в результате перемещается на расстояние

$$S = \ddot{x}t^2/4,$$

где  $\ddot{x}$  — абсолютное значение ускорения пятна;  $t$  — длительность импульса перескока.

Уже было найдено, что

$$\ddot{x} = KI.$$

Таким образом, имеем

$$S = Kit^2/4. \quad (4.17)$$

Тепло, выделяющееся во время перескока,

$$P = I^2R. \quad (4.18)$$

Из (4.17) и (4.18) следует, что

$$P = 16S^2R/K^2t^4. \quad (4.19)$$

Средняя тепловая нагрузка для одного импульса перескока за один оборот, например при работе с игровым компьютером, может быть найдена умножением (4.19) на период повторения импульсов

перескока. Этот период равен  $t/T$ , где  $T$  — длительность одного оборота. Таким образом, средняя рассеиваемая мощность

$$P_{cp} = 16S^2 R / TK^2 t^3. \quad (4.20)$$

Поскольку  $T$ ,  $R$  и  $K$  — константы ( $T$  — системы,  $P$  и  $K$  — позиционера), предел по рассеиваемой мощности зависит от квадрата длины перескока и обратно пропорционален третьей степени длительности импульса перескока.

#### 4.6.6. ПРИНЦИПЫ МАСШТАБИРОВАНИЯ

Важнейшими параметрами, характеризующими позиционер и, следовательно, всю систему автоматического регулирования, являются: передаточная функция позиционера ( $K$ ); максимальное среднее ускорение ( $\ddot{x}_{max\ cp}$ ), ограничиваемое рассеянием тепла; электрическое и механическое взаимовлияния; шумы, обусловленные подвижной и неподвижной частями; полоса регулирования; подавление ошибки слежения. Кроме того, конструкция позиционера должна отвечать некоторым ограничивающим требованиям, предъявляемым, например, к выбираемому материалу, технологичности изготовления, заданному диапазону перемещений, оптическим свойствам, стоимости и т. д.

Важным средством для разработки конструкции позиционера являются правила масштабирования. Эти правила описывают изменение указанных выше параметров, если линейные размеры конструкции увеличить или уменьшить в  $V$  раз. Ограничимся пока рассмотрением систем, в которых катушка и магнит окружены воздухом, так как магнитным системам, содержащим железные магнитопроводы, присущи нелинейные свойства (насыщение). После умножения на коэффициент  $V$  функция передачи или чувствительность позиционера  $K_V$  по отношению к первоначальному значению  $K_0$  [ср. уравнение (4.14)] выражается в виде

$$K_V = \frac{V(I_m)_0}{V^3 m_0} \cdot 10^{-7} \iint \frac{\sin \varphi \sin \alpha}{V^2 r_0^2} V ds V dl_0 = \frac{1}{V^2} K_0,$$

где  $I_m$  — ленточный ток, который зависит только от высоты магнита и, следовательно, должен быть также изменен в  $V$  раз.

После масштабирования из (4.15) максимальное среднее ускорение, ограничиваемое выделением тепла,

$$(\ddot{x}_{max\ cp})_V = \frac{1}{V^2} K_0 \left( \frac{T_{кат} - T_{окр}}{V^{-1} R_0 V^{-2} (R_T)_0} \right)^{1/2} = \frac{1}{V^{1/2}} (\ddot{x}_{max\ cp})_0.$$

Влияние масштабирования на частоты резонансов, ограничивающие полосу регулирования, может быть определено с использованием общего уравнения для динамической упругой системы:

$$(f_{рез})_V = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{V G_0}{V^3 M_0} \right)^{1/2} = \frac{1}{V} (f_{рез})_0.$$

Следовательно, полоса регулирования, ограниченная паразитными резонансами, может быть увеличена в  $V$  раз, если размеры позиционера уменьшить в  $V$  раз. Это уменьшение приводит к улучшению в  $V^2$  раз подавления в той части передаточной функции позиционера, которая имеет наклон  $-2$ .

Электрическое взаимовлияние пропорционально управляющему току привода  $I$ , следовательно,

$$I_V = \frac{\ddot{x}}{V^{-2}K_0} = V^2 I_0,$$

где  $\ddot{x}$  определяется спектром шума и не меняется при масштабировании.

Электрическое взаимовлияние в значительной степени зависит от емкостной или индуктивной связи между сравнительно большим управляющим током привода и гораздо меньшим ( $10^6$  раз) током фотодиода. Хотя электрическая связь также может измениться при масштабировании, тем не менее примем, что она постоянна, поскольку определяющий вклад в электрическую связь вносят такие факторы, как соединительные провода и электронные цепи, которые масштабированию не подлежат.

Ускорения подвижной части позиционера вызывают механическое взаимовлияние через силы реакции, действующие на неподвижную часть. Возмущающие силы равны и противоположно направлены силам приводов, которые при масштабировании меняются в соответствии с равенством

$$F_V = V^3 m_0 \ddot{x} = V^3 F_0.$$

Мы пренебрегли эффектом изменения самой крупной детали стационарной части — несущего основания, поскольку оно не масштабируется. Генерация шума позиционером изменяется как  $V^2$ , поскольку она пропорциональна пространству перемещения. Другим источником шума являются различные элементы конструкции, испытывающие влияние сил реакции, пропорциональных  $V^3$ .

В табл. 4.4 сведены результаты масштабирования. Из таблицы

Таблица 4.4. Результаты масштабирования

Параметр	Коэффициент масштабирования при увеличении размеров в $V$ раз
Передаточная функция привода	$1/V^2$
Максимальное среднее ускорение, ограниченное тепловыделением ( $x_{\max \text{ ср}}$ )	$1/\sqrt{V}$
Паразитные резонансные частоты	$1/V$
Электрическое взаимовлияние	$V^2$
Механическое взаимовлияние	$V^3$
Уровень шума:	
от подвижной части	$V^2$
от неподвижной части	$V^3$

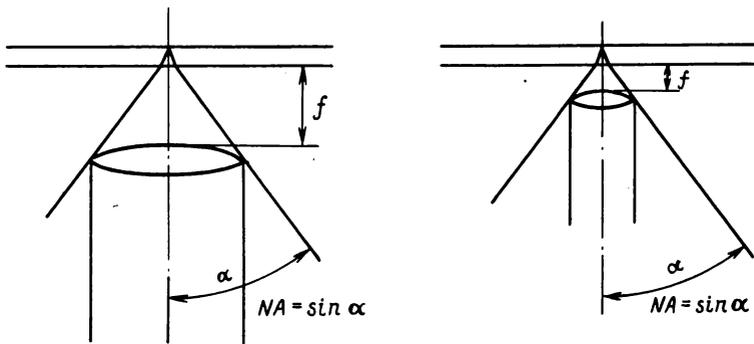


Рис. 4.47. Свободный рабочий отрезок для двух различных диаметров линз

видно, что все параметры улучшаются, если масштаб уменьшается. Однако уменьшение ограничено тем, что отдельные геометрические размеры задаются; это, в частности, требуемый диапазон перемещения, определяемый спектром шума, и свободный рабочий отрезок  $f$  объектива (рис. 4.47), который определяет размеры как объектива, так и колеблющихся зеркал.

#### 4.7. ФАКТОРЫ, ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ ПОДАВЛЕНИЕ

В разд. 4.3 показано, как с помощью систем автоматического регулирования с обратной связью могут быть существенно подавлены обычно встречающиеся ошибки. Рассмотрим возможности достижения еще большего подавления. Сверхсильное подавление требуется в тех случаях, когда возникают высокие уровни помех, например при работе проигрывателя CD в автомобиле, либо когда диск не соответствует стандарту, в частности не содержит качественную запись. Из теории систем с обратной связью следует, что для увеличения подавления необходимо расширять полосу регулирования.

Наряду с рассмотренными ранее факторами, ограничивающими полосу регулирования, такими как паразитные резонансы позиционера и неустойчивость из-за взаимовлияния, существуют еще некоторые обстоятельства, препятствующие расширению полосы регулирования:

- менее «нервная» работа устройства при появлении незначительных дефектов на диске (таких как пузырьки воздуха);
- более низкий уровень шума;
- уменьшенное выделение тепла.

Противоречивые требования, с одной стороны, сильного подавления и, с другой, сужения полосы регулирования, в некоторых случаях разрешаются применением опережающего регулирования. В тех случаях, когда опережающее регулирование не может быть использовано, высокое значение подавления достигается только расширением полосы регулирования. В следующем подразделе

будут показаны предельно достижимые значения полосы регулирования.

#### 4.7.1. ОГРАНИЧЕНИЯ НА ПОЛОСУ РЕГУЛИРОВАНИЯ

В оптических системах регулирование с широкой полосой возможно при соблюдении следующих условий:

- сигнал ошибки с широкой полосой и низким уровнем шума;
- низкий уровень электрического взаимовлияния;
- слабое взаимное влияние через механические колебания;
- отсутствие низкочастотных паразитных резонансов.

Первые два условия в основном относятся к оптике и потому здесь не рассматриваются.

На практике полоса регулирования в значительной степени ограничивается механическим взаимным влиянием и паразитными резонансами, которые определяются электромеханическим качеством позиционера, как было указано в разд. 4.6. Из табл. 4.4 видно, что полоса возрастает с уменьшением размеров движущейся части. На рис. 4.48 показано устройство записи макета видеозаписывающей камеры — аналога широко известной кинокамеры. С его помощью можно на каждой стороне диска диаметром 10 см записать цветное изображение и звук продолжительностью около шести минут. Система радиального слежения этого аппарата — пример того, чего можно достичь посредством значительной миниатюризации подвижной части позиционера. В этой системе радиального слежения в качестве колеблющегося зеркала использован светоделительный куб ( $6 \times 6 \times 6$  мм<sup>3</sup>). На рис. 4.49 показаны подвеска и

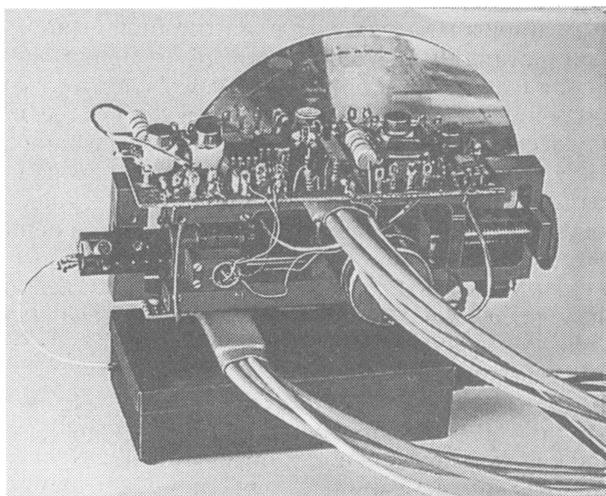


Рис. 4.48. Записывающая часть портативной видеозаписывающей камеры

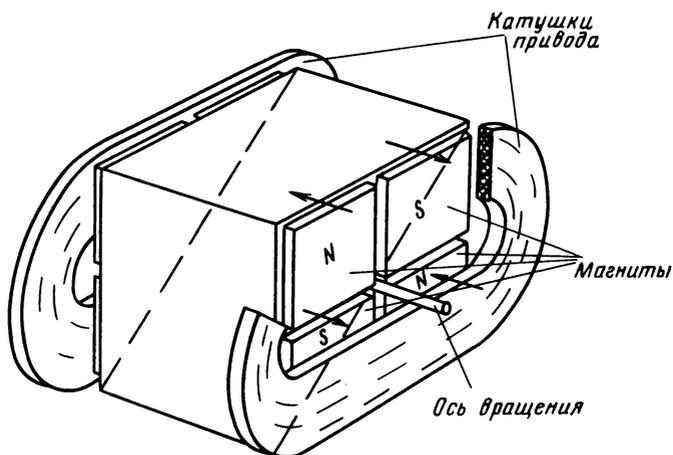


Рис. 4.49. Колеблющийся куб

привод колеблющегося кубика. Благодаря малым размерам и компактной кубической форме достигнута очень высокая полоса регулирования — до 20 кГц, причем паразитные резонансы отсутствуют в диапазоне более чем 100 кГц.

В ближайшей перспективе такие же широкие полосы регулирования будут получены и для приводов на объектив, поскольку сейчас наблюдается тенденция к разработке и изготовлению линз все более и более малых размеров. Кроме того, если заменить механическую подвеску электромагнитной, то станет возможным еще большее расширение полосы регулирования.

#### 4.7.2. СИСТЕМЫ С ОПЕРЕЖАЮЩИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

По определению, системы с опережающим регулированием не имеют на выходе обратной связи. Такие недостатки обратной связи, как возможные нестабильность и дополнительное усиление, требующееся для получения необходимого подавления (т. е. корректирующие цепи), в системе с опережающим регулированием отсутствуют. Поэтому разность между полосой регулирования и самой низкой резонансной частотой может быть выбрана значительно меньшей. Таким образом, опережающее регулирование имеет преимущества в большем подавлении (более широкая полоса регулирования) и меньшей критичности к конструкции (пониженные резонансные частоты). Однако ошибка должна определяться очень точно. Отклик (выход) системы, включая возможные нелинейности, также должен быть точно известен либо предсказуем.

Измерения расстояния с точностью  $\pm 0,5$  мкм в диапазоне 2 мм очень сложны. Однако перемещения с такой точностью вполне осуществимы.

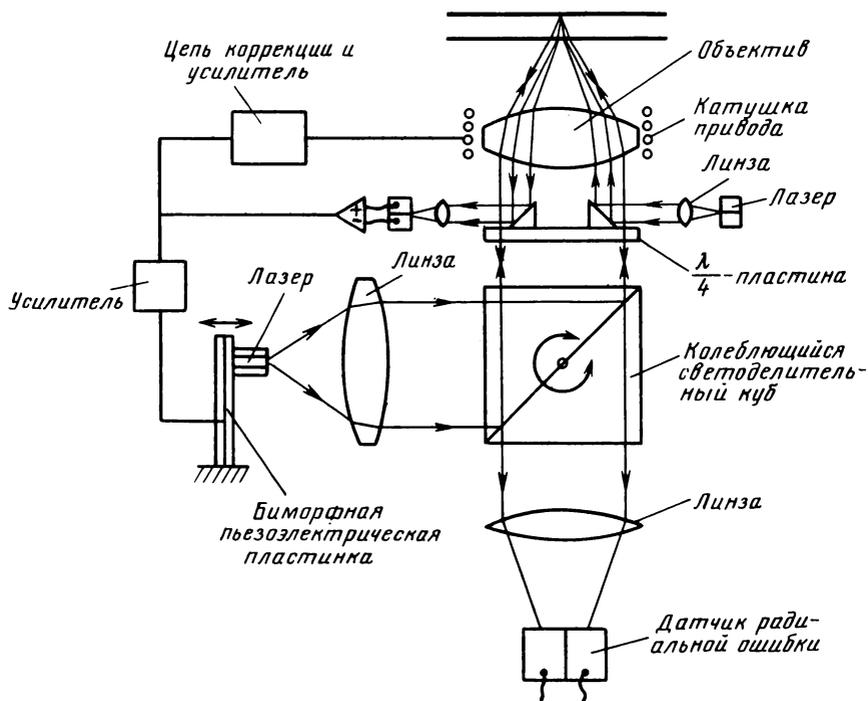


Рис. 4.50. Схема системы с опережающим регулированием

Исходя из этих соображений опережающее регулирование в чистом виде не используется. Однако комбинации опережающего регулирования и обратной связи позволяют достичь значительного подавления при сравнительно низких полосах регулирования обратной связи. В качестве иллюстрации рассмотрим несколько комбинаций, в которых система управления с обратной связью со сравнительно узкой полосой регулирования ( $< 500$  Гц) сочетается с различными видами опережающего регулирования.

Для улучшения системы автоматического регулирования фокусировки нами разработан метод, в котором применен дополнительный привод, смещающий источник света. Вторая отдельная оптическая система служит для системы дискриминации ошибки по принципу внеосевого пучка (рис. 4.50). Второй привод, представляющий собой биморфную пьезоэлектрическую пластинку, на конце которой укреплен твердотельный \* лазер, не влияет на определение положения фокуса и может смещать считывающее пятно в вертикальном направлении относительно пятна фокусировки.

Заметное улучшение подавления ошибки основного пятна достигается путем подачи усиленного остаточного сигнала ошибки в

\* По-видимому, полупроводниковый.— Прим. ред.

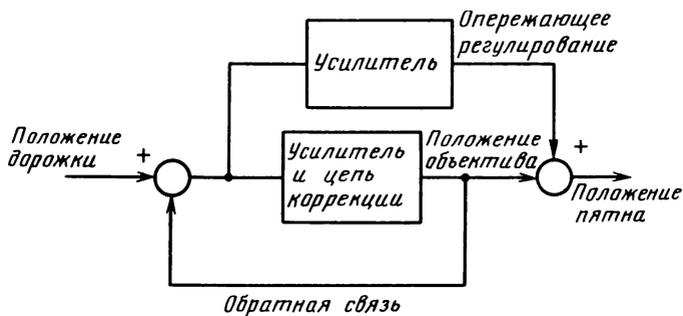


Рис. 4.51. Система автоматического регулирования с обратной связью и опережающим регулированием

нужной фазе на биморфную пьезоэлектрическую пластинку. На рис. 4.51 показана схема данной комбинированной системы автоматического регулирования.

Поскольку во всех существующих оптических системах спиральная дорожка строго периодична, сигнал опережающего регулирования можно получить достаточно просто. В частности, большинство возмущений при высокой скорости вращения видеодиска LV вызвано неточностью его изготовления. Поэтому на каждом обороте возникает приблизительно одна и та же картина ошибок, которая может быть получена из сигнала остаточной ошибки и записана в памяти во время одного оборота и далее в течение второго оборота использована в качестве сигнала опережающего регулирования.

Перезагрузка содержимого памяти после нескольких оборотов, что по сути является очень низкочастотной обратной связью, существенно улучшает отслеживание всех возмущений с частотами, кратными частоте вращения. Этот метод применим для радиального, тангенциального и вертикального слежения.

Подобный метод, применимый только для системы фокусировки, заключается в измерении наклона диска в тангенциальном направлении с помощью дополнительного луча света. Функция, получаемая дифференцированием этого сигнала, пропорциональна вертикальному ускорению поверхности диска, которое должно быть равно ускорению объектива. Затем сигнал ускорения подается на привод фокусировки. Этот метод позволяет заметно улучшить качество слежения за фокусировкой.

На рис. 4.52 показан результат, полученный при использовании двух последних методов.

Для подавления внешних возмущений на каркасе проигрывателя размещаются один или несколько датчиков ускорения, сигналы от которых могут быть использованы в качестве сигналов опережающего регулирования, подаваемых на приводы позиционеров.

Следует отметить, что метод перескока пятна (см. подразд.

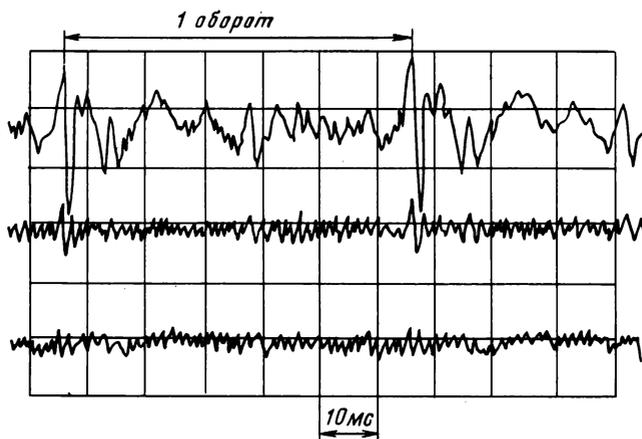


Рис. 4.52. Реальные сигналы остаточной ошибки в схемах фокусировки с обратной связью (верхняя кривая), с дополнительным опережающим регулированием с памятью (средняя кривая) и с использованием сигнала опережающего регулирования, полученного из наклона диска (нижняя кривая)

4.6.5) в том виде, в котором он применяется для современных видеопроигрывателей, также является разновидностью опережающего регулирования.

## 4.8. КАРЕТКА

Позиционеры для радиального слежения обычно имеют малый диапазон смещения пятна. Если применяется колеблющееся зеркало, то допустимое смещение пятна ограничено полем зрения объектива (60...600 мкм), в границах которого пятно смещается относительно микрообъектива. Если пятно смещается путем передвижения всего микрообъектива (2К-, 3К-позиционеры), то диапазон радиального смещения ограничен виньетированием, т. е. случаем, когда часть входного пучка не попадает во входную апертуру микрообъектива. Виньетирование приводит к искажениям и потере мощности пятна. Ограничения из-за виньетирования менее строгие, чем ограничения по полю зрения.

Помимо этих двух оптических пределов, которые обычно ограничивают диапазон смещения около  $\pm 0,5$  мм, есть еще и электромеханические, менее строгие ограничения, обусловленные свойствами подвески и привода. Электромеханическое ограничение приводит к диапазону радиального смещения в несколько миллиметров, если слежение за дорожкой осуществляется перемещением всего оптического блока.

Поворотная головка проигрывателя CD (см. рис. 4.30) и радиальный привод аппарата ЦОЗ (см. рис. 4.39) тем не менее являются

ся примерами устройств, в которых радиальный диапазон перемещения достаточен для считывания всего поля записи на диске. В других случаях для считывания всего поля записи применяется каретка. Если требуется быстрый доступ, в частности если видеопроигрыватель должен обеспечивать перескок на далеко расположенные кадры записи либо в проигрывателе CD, который должен воспроизводить в произвольном порядке фрагменты музыки с интервалом в десятые доли секунды, требуется быстрое перемещение каретки. Для аппаратов ЦОЗ быстрый доступ принципиально необходим.

#### 4.8.1. НАПРАВЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА КАРЕТКИ

Каретка должна двигаться по направляющим таким образом, чтобы она могла свободно перемещаться только в одном направлении, причем, как правило, система автоматического регулирования фокусировки находится в активном состоянии; поэтому небольшие вертикальные смещения каретки, вызванные толчками или вибрациями, допускаются. В этом случае только незначительно уменьшается диапазон перемещения позиционера фокусировки.

Вопреки ожиданиям положение стационарной части позиционера фокусировки, которая крепится на каретке, не оказывает влияния на спектр ошибок, поскольку объектив перемещается силой, не зависящей от его положения. Строго говоря, это имеет место в том случае, если подвеска фокусировки не имеет нейтрального положения. Однако важен наклон каретки, поскольку ее движение должно быть параллельно диску с точностью около  $\pm 0,5^\circ$ .

Иногда используется полустационарная оптическая система, в которой параллельный пучок света из стационарной части направляется в движущуюся головку на каретке. В этом случае движение каретки должно быть параллельно (с точностью  $\pm 0,2^\circ$ ) направлению пучка. Эти не особенно жесткие требования могут удовлетворяться несколькими системами направляющих устройств. Часто используется метод, при котором каретка движется по двум параллельным стержням с подшипниковыми антифрикционными муфтами. Варианты, в которых муфты заменены линейными, шариковыми или роликовыми подшипниками, имеют меньшее трение. Это преимущество имеет также направляющая с V-образной канавкой с шариками, которая используется в каретках пишущих машинок.

#### 4.8.2. ПРИВОД КАРЕТКИ

Привод каретки, исключая линейные приводы, состоит из обычного электромотора с передачей и преобразователя вращательного движения в поступательное перемещение. Привод выполненной

таким образом каретки обычно является самотормозящимся. Это значит, что из-за собственного внутреннего трения каретка не может быть смещена внешней силой. Следовательно, достоинством такой конструкции является то, что внешние возмущения не влияют на систему управления кареткой и дополнительное подавление внешних возмущений не требуется.

Двигатель привода может быть как обычным электродвигателем, так и шаговым. Преимуществами шагового электродвигателя являются однозначная и точная зависимость его угла поворота от управляющего сигнала, а также низкая стоимость; поэтому приводы каретки на основе такого двигателя не требуют датчиков положения. Обычные электромоторы предпочтительны из-за высокого коэффициента полезного действия и доступности.

Для трансмиссии часто используется зубчатый редуктор, хотя для получения более низкого уровня шума иногда применяется и ременная передача.

Существует много вариантов преобразования вращательного движения в поступательное, из которых наиболее часто используются червячная передача, зубчатая рейка, зубчатый ремень, простой ремень (стальной либо из синтетических материалов) и фрикционная передача.

Для стабильного управления кареткой очень важно, чтобы между вращением мотора и смещением каретки не было мертвого хода. Это явление в основном обусловлено мертвым ходом преобразования, для уменьшения которого предварительно нагружается подвижная часть.

Если применяется винт или зубчатая рейка, то гайка или соответственно шестереночный редуктор подпружиниваются. Зубчатый или какой-либо другой ремень всегда натянуты и не имеют какого-либо мертвого хода. Более того, смещение привода, а также масса каретки определяют частоту резонанса, ограничивающую полосу регулирования системы управления кареткой. Обычно для ширины полосы выбирается значение около 5 Гц, следовательно, резонансная частота должна быть больше 25 Гц.

Если применяется линейный двигатель, то проблемы мертвого хода не возникают, поскольку управляющая сила воздействует непосредственно на каретку. Недостатком линейного двигателя является его малая эффективность из-за большого диапазона смещения. Число шагов смещения в единицу времени, длительность периода перескока (быстрого смещения) каретки и расстояние перескока ограничены тепловыделением и имеют низкое значение [см. подразд. 4.6.5, уравнение (4.20)], следовательно, требуется привод с высоким коэффициентом полезного действия.

В механизме быстрого доступа, показанном на рис. 4.53, который разработан для системы ЦОЗ, для этой цели служит электромотор с высоким КПД. Проблемы мертвого хода и смещения решаются путем применения натянутого зубчатого ремня, изготов-

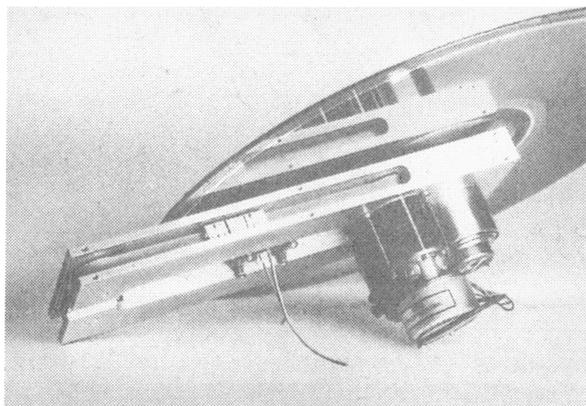


Рис. 4.53. Механизм быстрого произвольного доступа для систем ЦОЗ

ленного из синтетического материала и имеющего сердцевину из стальной ленты. Для обеспечения быстродействия каретки резонансные частоты должны быть увеличены до 500 Гц. Каретка состоит из 2К-позиционера (см. рис. 4.43) с направляющим механизмом на основе восьми шарикоподшипников. Высокое значение резонансной частоты обеспечивается малой массой каретки (33 г), которая наряду с мощными моторами позволяет получать очень высокие ускорения каретки — до  $1000 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ . При таком ускорении даже такая малая масса каретки вызывает силу реакции, действующую на несущую раму конструкции, равную 33 Н. Для предотвращения значительных вибраций разработана система привода, в которой силы и моменты реакции скомпенсированы. Принцип этой системы показан на рис. 4.54. Наконец, на рис. 4.55 приведена комбинация из 2К-позиционера каретки, направляющих и привода.

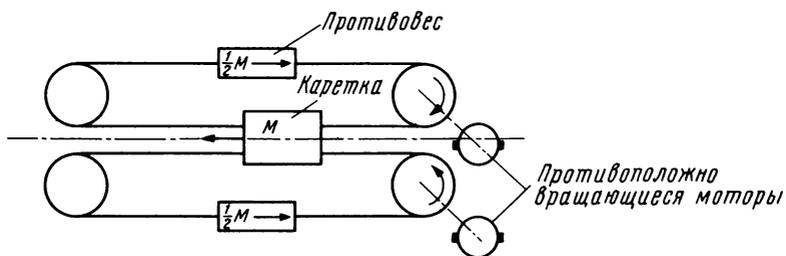


Рис. 4.54. Компенсация сил и моментов

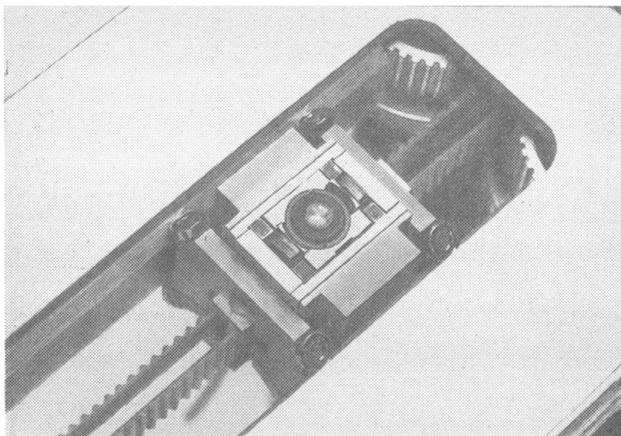


Рис. 4.55. Деталь механизма быстрого произвольного доступа

#### 4.8.3. УПРАВЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЕМ КАРЕТКИ

В процессе длительного считывания диска положение каретки регулируется таким образом, чтобы радиальный позиционер работал в основном вблизи своего нейтрального (среднего) положения. Для этого требуется сигнал положения, несущий информацию об отклонении подвижной части позиционера от нейтрального положения. Если подвижная часть подвешена свободно, то требуется датчик положения.

Для пружинной подвески с нейтральным положением для получения сигнала положения каретки могут быть использованы низкочастотные составляющие управляющего тока радиального позиционера (см. подразд. 4.6.3). Положение каретки может регулироваться, если этот сигнал либо сигнал датчика положения поступает на привод каретки. Частотный сигнал смещений каретки очень низок, так что достаточное подавление смещения каретки может быть получено с помощью системы регулирования, имеющей полосу регулирования всего несколько герц. Это низкочастотное автоматическое регулирование положения каретки может быть использовано для сравнительно медленного доступа в видеопроигрывателе LV или проигрывателе CD, в которых большие радиальные перемещения реализуются путем последовательных перескоков радиального позиционера через несколько (или через одну) дорожек.

Как при игре в гольф, где необходимо из исходной точки загнать мяч в лунку за минимальное количество ударов, пятно должно быть перемещено на требуемую дорожку за минимальное количество перескоков.

В процессе быстрого поиска, который использует возможности

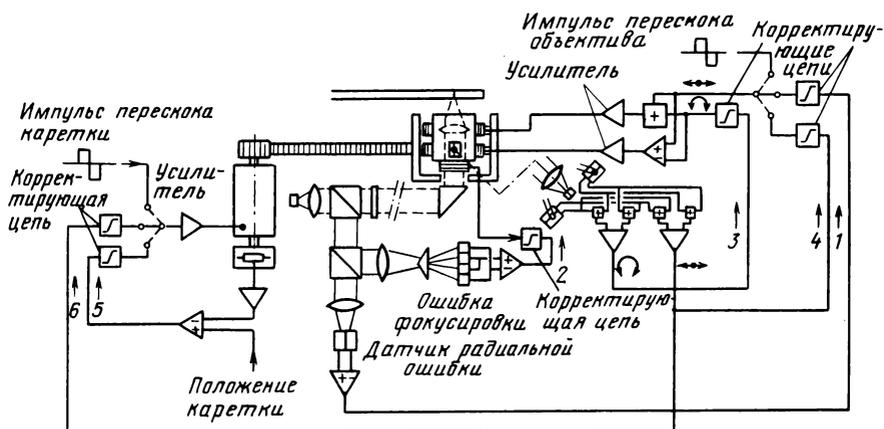


Рис. 4.56. Шесть систем автоматического регулирования механизма быстрого произвольного доступа

привода произвольного доступа, приведенного на рис. 4.53, каретка передвигается в необходимое место с помощью системы опережающего регулирования. Затем с помощью датчика положения измеряется остаточная ошибка положения каретки, и при необходимости каретка перемещается в заданное положение с помощью системы управления с обратной связью. После этого девиация положения пятна становится меньше, чем погрешность системы управления положением каретки. Далее пятно точно устанавливается с помощью системы автоматического регулирования радиального перемещения пятна. Во время движения каретки объектив остается в нейтральном положении, а после остановки каретки позиционер объектива выполняет свои функции по поиску без смещения каретки.

На рис. 4.56 схематически изображены шесть систем автоматического регулирования, формирующих в комплексе систему быстрого доступа устройства, приведенного на рис. 4.53. Цифрами отмечены различные петли обратной связи, некоторые характеристики которых даны в табл. 4.5. В табл. 4.6 крестами отмечены те системы регулирования, которые задействованы при выполнении тех или иных режимов работы проигрывателя.

Приведенный ниже расчет дает грубую оценку возможного времени быстрого доступа. Процедура состоит из перескока каретки и максимум трех перескоков позиционеров в режиме опережающего регулирования, каждый из которых сопровождается управляющим или коммутирующим действием соответствующих цепей обратной связи и последующей идентификацией дорожки посредством считывания адреса заголовка сектора, содержащего номер дорожки. В подразд. 4.6.5 показано, что длительность импульса

Таблица 4.5. Параметры шести систем автоматического регулирования каретки аппарата ЦОЗ

Номер системы	Тип системы	Система измерения	Позиционер	Полоса регулирования, кГц
1	Радиальная	Пушпульный метод	Привод перемещает объектив	6
2	Фокусирование	Метод Фуко	То же	2
3	Наклон	Оптический датчик наклона	»	1
4	Центровка объектива	Оптический датчик положения	»	1
5	Положение каретки относительно корпуса	Потенциометр на оси двигателя	Двигатели каретки	0,1
6	Положение каретки по отношению к объективу	Оптический датчик положения	То же	0,1

Таблица 4.6. Функционирование систем автоматического регулирования аппарата ЦОЗ

Режим	Номер системы					
	1	2	3	4	5	6
Стоп			×	×	×	
Фокусировка		×	×	×	×	
Слежение за дорожкой	×	×	×			×
Изменение положения каретки		×	×	×	×	

Таблица 4.7. Параметры перескоков

Номер перескока	Максимальное расстояние перескока, $\mu\text{м}$	Максимальная длительность перескока, мс	Максимальное время включения, мс	Задержка считывания номера, мс	Суммарное время, мс
1	$80 \cdot 10^3$	17,9	10,0	—	27,9
2	500	4,5	0,2	0,3	5,0
3	100	2,0	0,2	0,3	2,5
4	10	0,6	0,2	0,3	1,1

Время одного оборота 40,0 мс  
 Максимальное время доступа 76,5 мс

перескока зависит от ускорения  $\ddot{x}$  и длины перескока  $s$  следующим образом:

$$t = 2\sqrt{s/\ddot{x}}$$

В табл. 4.7 приведены числовые значения времен перескока, рассчитанные в предположении, что ускорения каретки и позиционера равны соответственно 1000 и 100 м·с<sup>-2</sup>. За время переключения

берется 1 период колебаний, соответствующий граничным частотам полос регулирования соответствующих систем автоматического регулирования, т. е. 100 Гц и 6 кГц для каретки и позиционера соответственно. Идентификация дорожки дает максимальную задержку 0,3 мс; это время, за которое перед объективом проходит один сектор, т. е. 1/128 часть оборота (40 мс). В худшем случае — это время от конца перескока до того момента, когда начнет считываться заголовок сектора. Из табл. 4.7 следует, что максимально возможное время доступа при данных параметрах равно 76,5 мс.

## 4.9. ВОБУЛЯЦИЯ

Вобуляция является альтернативным методом выделения сигналов ошибки как для вертикального, так и для радиального слежения, если частота вобуляции достаточно высока. Однако при низкой частоте вобуляции может быть получен низкочастотный сигнал ошибки для коррекции погрешностей низкочастотной части сигнала ошибки от оптических датчиков, например сигнал о потере поверхности диска.

Этот альтернативный сигнал ошибки получается с помощью небольших периодических смещений пятна либо дорожки (см. разд. 2.5). Второй способ не применяется в серийных аппаратах, так как не соответствует стандарту на диск. Вобуляция пятна широко используется. Пятно может смещаться с помощью объектива, зеркалом либо смещением источника света. Пригодность всех этих методов доказана.

### 4.9.1. РАДИАЛЬНАЯ ВОБУЛЯЦИЯ

Сигнал ошибки, полученный вобуляцией (принудительным колебанием) пятна с амплитудой 0,3 мкм, обеспечивает радиальное слежение требуемого качества. Для меньших отклонений получается слишком низкое отношение сигнал-шум. Частота вобуляции должна быть в 10 раз выше, чем полоса регулирования. Таким образом, для полосы в 3 кГц необходима вобуляция с амплитудой 0,3 мкм и частотой 30 кГц.

Поскольку все позиционеры являются двойными интеграторами, возникают проблемы мощности питания, так как амплитуда вобуляции уменьшается пропорционально квадрату частоты возбуждающего тока. Однако можно успешно использовать механический резонанс. Усиление механическим резонансом более чем в 100 раз ( $Q > 100$ ) дает смещение пятна в несколько десятых долей микрона при приемлемом тепловыделении в приводе вобулятора.

В первом радиальном вобуляторе с полупрозрачным колеблющимся зеркалом, макет которого показан на рис. 4.57, предусматривалась возможность его использования как для вобуляции пятна, так и для радиального слежения. Резонансная частота 33 кГц

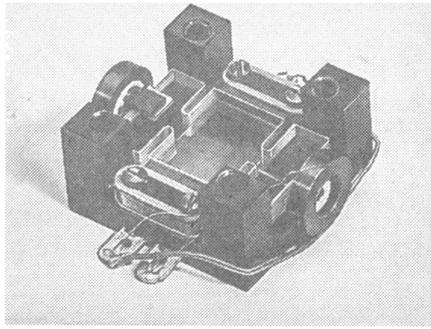


Рис. 4.57. Макет возбуждающего зеркала

была получена с помощью двух вспомогательных грузов, которые при резонансе отклонялись в направлении, противоположном наклону зеркала. Внутренний резонатор состоял из стеклянной пластинки с четырьмя пропилами. Стеклянные перемычки между зеркалом и дополнительными (стеклянными) грузами служили торсионной пружиной динамической упругой системы, передаточная функция которой представлена в табл. 4.3 (поз. 4). Низкое значение демпфирования было обеспечено выбором в качестве материала плавленного кварца, дающего добротность механического резонанса более 100.

Кварцевое зеркало использовалось также и для радиального слежения. Очень большой угол наклона обеспечивается подвешиванием всей кварцевой конструкции на двух резиновых пружинах. Для возбуждения механических резонансных колебаний к одному из дополнительных грузов крепится пьезоэлектрический элемент. Он выдает сигнал ускорения, который может быть использован в качестве сигнала обратной связи для катушек привода радиального слежения.

На рис. 4.58 показан 2К-вариант, в котором колеблющееся

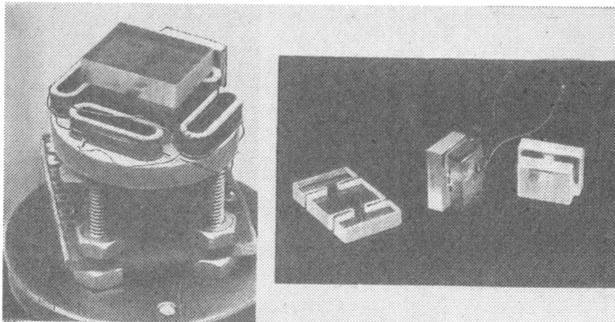


Рис. 4.58. Лабораторная модель 2К возбуждающего зеркала

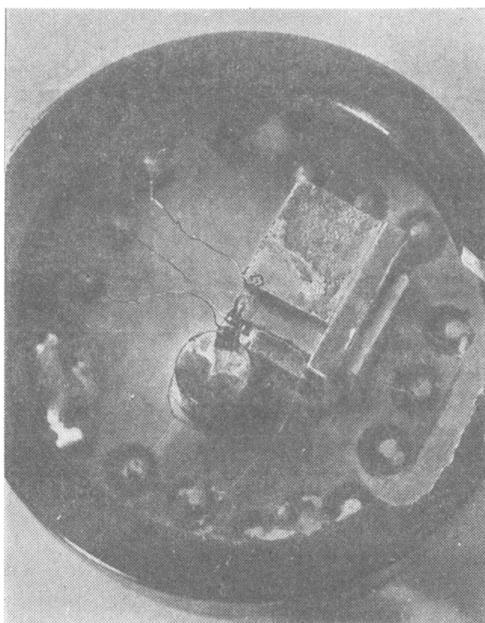


Рис. 4.59. Внутренность «светового пера» видеопроектирвателя LV со стороны выхода

зеркало может наклоняться в радиальном и тангенциальном направлениях вокруг резиновой подвески. Дополнительный груз в нижней части и масса зеркала — в верхней формируют резонансную систему.

На рис. 4.59 показано со стороны выхода световое перо LV, которое содержит лазер (разд. 4.1, рис. 4.3). Пятно, обеспечиваемое этим световым пером, может вобулировать в горизонтальном и вертикальном направлениях с помощью вобуляции лазера на основе  $\text{CaAlAs}$ . Он укреплен на металлическом стержне длиной 3 мм, подвешенном на мембране и приводимом в движение двумя пьезоэлектрическими приводами. Последние возбуждают резонансы по двум направлениям прямоугольного стержня, что дает радиальное и вертикальное колебания лазера с различными частотами. Проводники питания лазера приклеены к стержню для предотвращения их обрыва.

#### 4.9.2. ВОБУЛЯЦИЯ ФОКУСА

Как и для радиальной вобуляции, в данном случае возникает проблема получения достаточно большой амплитуды вобуляции на частоте, которая на порядок выше полосы регулирования.

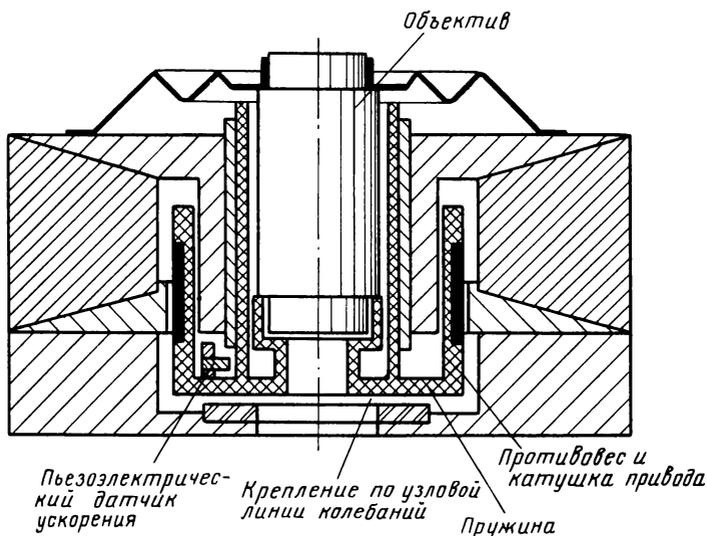


Рис. 4.60. Вобулирующий объектив

Источник света с позиционером, показанный на рис. 4.59, удовлетворяет этому требованию, несмотря на то, что смещение пятна, перпендикулярное к диску, по сравнению со смещением лазера уменьшено в 4 раза из-за отрицательного продольного увеличения оптической системы.

При вобуляции самого объектива отрицательное продольное увеличение оптической системы не имеет значения. Возможная конструкция такого объектива показана на рис. 4.60. Противовес расположен концентрически вокруг объектива в виде кольца. Массы объектива и противовеса соединены между собой с помощью шайбы, которая служит также в качестве пружины. В резонансе противовес и объектив движутся в противофазе. Поскольку эта конструкция позволяет осуществлять также большие вертикальные перемещения объектива для фокусирования, она получила название комбипозиционер объектива.

На рис. 4.61 показана конструкция для вертикальной вобуляции, объединенная с колеблющимся 2К-зеркалом для радиального и тангенциального слежения. Тонкое круглое зеркало колеблется на собственной резонансной частоте, попеременно переходя из выпуклого в вогнутое состояние, и таким образом обеспечивает вертикальную вобуляцию. К держателю зеркало крепится только вдоль концентрической узловой линии для достижения высокой добротности резонанса. Держатель крепится к основанию через резиновый стержень, который обеспечивает наклоны зеркала в радиальном и тангенциальном направлениях и соответственно радиальное и тангенциальное слежение.

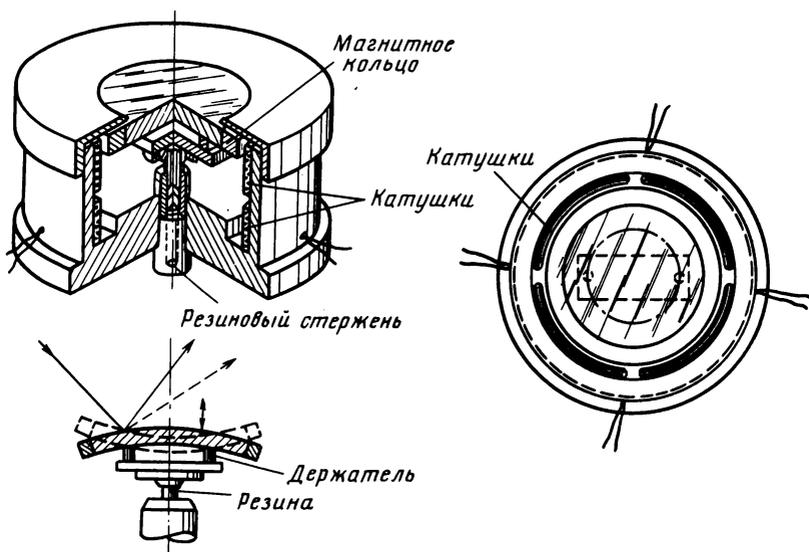


Рис. 4.61. 2К колеблющееся зеркало с вобулящей фокуса

Резонансная вобуляция и наклоны в двух направлениях возбуждаются с помощью четырех катушек и кольца из постоянного магнита, укрепленного по внешнему периметру зеркала. Вобуляция поддерживается подачей на все четыре катушки сигнала, полученного от датчика ускорения, укрепленного на зеркале (положительная обратная связь). Наклоны получаются при подаче на пары противоположных катушек соответствующих противофазных сигналов.

## 5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДИСКА-ОРИГИНАЛА

*Дж. Пасман*

### 5.1. ВВЕДЕНИЕ

Один из основополагающих принципов, который является общим для трех основных оптических дисковых систем, состоит в том, что в этих системах используются диски, на которых информация зафиксирована в виде рельефа на поверхности. Этот рельеф должен содержать закодированную видео- или аудиоинформацию или должен служить для того, чтобы вести считывающее или записывающее

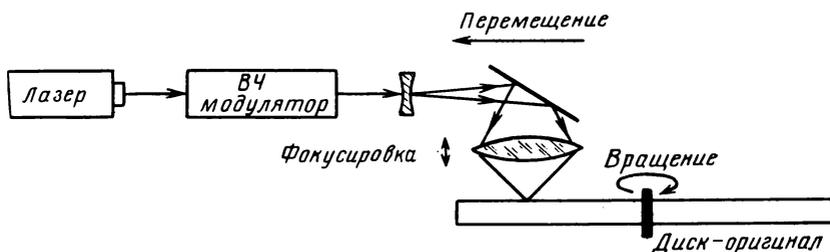


Рис. 5.1. Структурная схема лазерного устройства записи

пятно по диску. Данный принцип рельефной записи обеспечивает относительную простоту процесса массового тиражирования дисков.

Запись информации, например, с видеоленты на диск-оригинал (ДО) в виде рельефа на поверхности осуществляется в процессе изготовления ДО, который, таким образом, является одной из первых ступеней процесса изготовления оптических дисков [9, 11]. Диск-оригинал представляет собой плоскую стеклянную основу, покрытую тонким слоем фоточувствительного материала (резиста) толщиной около 0,12 мкм.

Рельеф на поверхности записывается при экспонировании фоторезиста сфокусированным излучением лазера, интенсивность которого модулируется в соответствии с информацией (рис. 5.1). В экспонируемых участках свет поглощается, что вызывает эффект локального изменения растворимости фоторезиста [10]. Рельефная структура возникает на этапе обработки, когда поверхность резиста подвергается воздействию потока кислотного растворителя, который растворяет фоторезист на экспонированных участках.

Хотя основные принципы экспонирования и обработки фоторезиста на ДО соответствуют хорошо известному процессу оптической микролитографии, используемому для массового производства интегральных микросхем, в данном случае имеются значительные отличия. Одним из таких отличий являются малые размеры и высокое оптическое качество светового пятна, необходимые для получения пит, ширина которых составляет только около 0,6 мкм. Это возможно только в том случае, когда применяется дифракционно-ограниченная оптика и записывающий объектив с высокой числовой апертурой (NA) вплоть до 0,8. Если в качестве источника излучения используется голубая линия  $\lambda = 457,9$  нм излучения аргонового лазера, то может быть получено записывающее пятно с диаметром по уровню половинной мощности от мощности в центре пятна, равным только 0,3 мкм. Однако для общих задач используется несколько пониженное значение NA, около 0,65, которое дает дифракционно-ограниченное пятно с диаметром по уровню половинной мощности 0,35 мкм.

В отличие от микролитографии, где время экспонирования со-

ставляет несколько десятых секунды, экспозиция одного элемента информации или пита на ДО длится около 70 нс при записи несущей видеосигнала 7 МГц в реальном масштабе времени. Вследствие этого интенсивность света в пятне должна быть очень высока, что требует использовать в качестве источника света лазер. Лазерный луч, обычно имеющий мощность 25 мВт, фокусируется в пятно диаметром менее 1 мкм.

Толщина слоя резиста на ДО приблизительно на порядок меньше той, что применяется в стандартной технологии микросхем. Более того, не только абсолютное значение толщины фоторезиста, но и вариации толщины должны укладываться в очень жесткие допуски. Флуктуации толщины фоторезиста, так же как и любое другое отклонение параметров экспонирования и обработки, приводят к появлению микронеровностей, искажению размеров пит и, следовательно, к возникновению дополнительного шума и искажению сигнала. На практике отношение сигнал-шум обычно ограничено шероховатостью поверхности и нерегулярностью размеров пит величиной в несколько нанометров [5].

Прецизионность процесса изготовления диска-оригинала обуславливает высокие требования к идентичности различных ДО и гомогенности каждого ДО, который может содержать до  $3 \cdot 10^{10}$  элементов информации. Все это требует размещения профессиональной аппаратуры в особо чистых условиях (класс 100) с кондиционированием воздуха, а также тщательного контроля процесса изготовления.

## 5.2. ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИСКА-ОРИГИНАЛА

### 5.2.1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА

Прежде чем производить запись, необходимо подготовить как информацию, так и подложку диска. Диск-оригинал представляет собой круглую полированную стеклянную подложку толщиной около 0,5 см и в случае видеодиска — диаметром около 36 см. Его необходимо отполировать, чтобы облегчить работу системы автоматического регулирования фокусировки и уменьшить поверхностные шумы. Диск очищается, проверяется и покрывается органическим адгезионным слоем, поверх которого с помощью центрифуги наносится фоторезист [7, 9]. Толщину фоторезиста можно менять путем разбавления фоторезиста растворителем. Толщина варьируется от 100 до 170 нм для различных применений. Стабильность фоторезиста увеличивается путем сушки, после которой толщина слоя измеряется на интерференционном микроскопе. После этого ДО готов для записи.

Для каждого из трех основных применений оптических дисков имеется собственный характерный сигнал, поэтому сигнал для записи обрабатывается в каждом случае по-своему. Для записи

видеодисков готовится лента-оригинал, на которую записывается полный видео- и аудиосигналы, закодированные по методу, изложенному в разд. 7.1, вместе с кодами заголовков. Коды заголовков на диске имеют вид цифровых адресов изображений, необходимых для работы в таких специальных режимах, как стоп-кадр, обратное и замедленное воспроизведение.

Лента-оригинал требуется также для записи цифрового звукового диска. Она содержит цифровую аудио- и служебную информацию (см. разд. 7.2). Сигналы подаются на кодирующее устройство, в котором осуществляется кодирование по коду Рида — Соломона с перемежением и коду 8/14. Выходной сигнал поступает на модулятор устройства записи.

Информация для систем, в которых запись на диск с направляющей дорожкой ведется самим потребителем (см. гл. 6), полностью определена и в отличие от систем LV и CD может быть подготовлена для записи с помощью специального электронного блока:

### 5.2.2. ЭКСПОЗИЦИЯ

На этапе записи записывающий лазерный луч модулируется быстродействующим электро- или акустооптическим модулятором, на вход которого поступает записываемый сигнал. Таким образом, информация фиксируется в виде модуляции поверхности только в тангенциальном направлении. Хотя была показана возможность дополнительного увеличения плотности информации на диске путем записи данных в форме малых радиальных колебаний дорожки [1], в стандартных применениях она не используется.

Видеосигнал, как показано в разд. 7.1, требует высокого отношения несущая-шум при считывании, поскольку он является аналоговым и имеет широкую полосу. Это вызывает необходимость глубокой модуляции сигнала, воспроизводимой с диска, что, в свою очередь, возможно только при условии глубокой модуляции еще на стадии записи. Такая глубокая модуляция экспозиции резиста на высоких пространственных частотах может быть получена в случае, когда записывающее пятно мало по сравнению с характерным тангенциальным размером пит и промежутков между ними. Другими словами, оптическая передаточная функция (ОПФ) записывающего устройства должна иметь большое значение даже на высоких пространственных частотах. Расстояние между питами  $p$  определяется частотой вращения диска  $f_{вр}$ , радиусом дорожки  $r$  и временной частотой сигнала  $f_c$ :

$$p = 2\pi r f_{вр} / f_c. \quad (5.1)$$

Наименьшее расстояние между питами на LV-дисках дает несущая видеосигнала с временной частотой  $f_c = 7,9$  МГц (сигнал белого поля). При внутреннем радиусе 55 мм и частоте вращения 25 Гц минимальное расстояние между питами равно 1,1 мкм, и, следова-

тельно, максимальная основная пространственная частота  $f_{c.пр} = 900 \text{ мм}^{-1}$ . Однако высшие гармоники этой пространственной частоты должны быть также записаны, чтобы зафиксировать обе полосы ЧМ спектра для получения более глубокой модуляции сигнала воспроизведения.

Оптическая передаточная функция записывающего объектива с числовой апертурой NA имеет частоту отсечки  $f_{от}$ , определяемую как

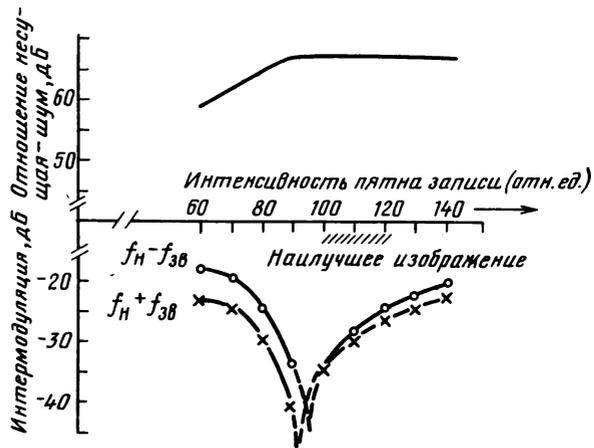
$$f_{от} = 2NA/\lambda = 4370 \cdot NA \text{ мм}^{-1}. \quad (5.2)$$

Удовлетворительные значения отношения несущая-шум, равные 62 дБ, для описанного выше критического случая (измеренные с полосой 30 кГц) получены при использовании объектива с числовой апертурой более 0,6.

Отношение несущая-шум малочувствительно к уровню экспозиции и времени обработки. Даже если экспозиция на 30% выше нормальной, это отношение меняется мало. Более жесткие ограничения накладываются на симметрию видеосигнала. Если уровень экспозиции или время обработки не оптимальны, то средняя тангенциальная скважность периода записи на поверхности ДО отклоняется от симметричного значения 1/2 и в спектре сигнала воспроизведения возникают интермодуляционные составляющие от сигналов яркости, цветности и звука (см. подразд. 7.1.5 и 2.4.2). Такая интермодуляция, приводящая к появлению мешающей интерференционной картины на экране телевизора, ограничивает вариации мощности экспонирующего пучка и времени травления фоторезиста величиной около  $\pm 10\%$ . Для проверки скважности записи разработан специальный тестовый сигнал с модуляцией периода. Он состоит из фиксированной несущей частоты видеосигнала  $f_n = 7,1 \text{ МГц}$ , промодулированной несущей звука  $f_{зв}$ . После усиления и ограничения получается широтно-импульсный сигнал, скважность которого меняется от 30 до 70%. Этот сигнал записывается при различных уровнях экспозиции, и затем измеряется амплитуда комбинационных составляющих, появляющихся в спектре воспроизведенного сигнала из-за асимметрии записи на частотах  $f_n + f_{зв}$  и  $f_n - f_{зв}$  относительно амплитуды основной несущей; результат такого эксперимента показан на рис. 5.2. Наилучшее качество телевизионного изображения получается в том случае, когда уровень интермодуляционных составляющих находится в соответствии с ОПФ считывающего устройства. Чтобы определить значение отношения несущая-шум, измеряется разность между уровнями видеонесущей и шума.

Поскольку оптическая аудиодисковая система во многом отличается от видеодисковой, процесс изготовления диска-оригинала CD специально откорректирован в соответствии с требованиями системы CD. Из-за цифрового характера информации и более узкой полосы сигнала CD (см. разд. 7.2) достаточны более низкие зна-

Рис. 5.2. Примеры зависимостей измеренного значения отношения несущая-шум (верхний график) и интермодуляционных спектральных составляющих от мощности пятна записи для пит наивысшей пространственной частоты



чения отношения сигнал-шум — около 50 дБ (частота несущей 500 кГц,  $400 \text{ мм}^{-1}$ , полоса измерения 10 кГц). Аналогично и размеры пит, изменяющиеся в диапазоне  $150 \dots 500 \text{ мм}^{-1}$ , меньше, чем в обычном видеодиске, приблизительно в 2 раза. Это значит, что для записи можно использовать микрообъективы с пониженной числовой апертурой. Наряду с тем, что понижение числовой апертуры позволяет проще добиться качественного пятна и большей глубины фокуса, появляется еще одно важное преимущество: в радиальном направлении питы более широкие и имеют меньший наклон стенок. Такая более широкая структура обеспечивает увеличение оптического сигнала для импульсной системы слежения за дорожкой без ухудшения сигнала высокой частоты, получаемого по методу ЦА (центральной апертуры, см. стр. 119). Это обстоятельство очень выгодно для проигрывателя CD, в котором применен пушпульный метод слежения.

Степень симметрии является очень важным геометрическим параметром пит, определяющим качество воспроизведенного сигнала. Электроника проигрывателя осуществляет ограничение сигнала, воспроизводимого с диска на определенном заданном уровне (см. подразд. 7.1.5). Этот уровень, называемый уровнем детектирования, выбирается таким образом, чтобы полученный в результате цифровой сигнал не содержал постоянной составляющей. Поскольку частота отсечки считывающей оптики равна  $1150 \text{ мм}^{-1}$ , детектируются также и высшие гармоники рельефа пит. Четные гармоники, в частности вторая, возникают в том случае, если питы слишком длинные либо слишком короткие. При этом они дают эффект смещения «точек пересечения нуля» воспроизводимого сигнала, что требует смещения уровня детектирования для компенсации соответствующей постоянной составляющей. Для пространственных частот, меньших половины частоты отсечки считывающей оптики,

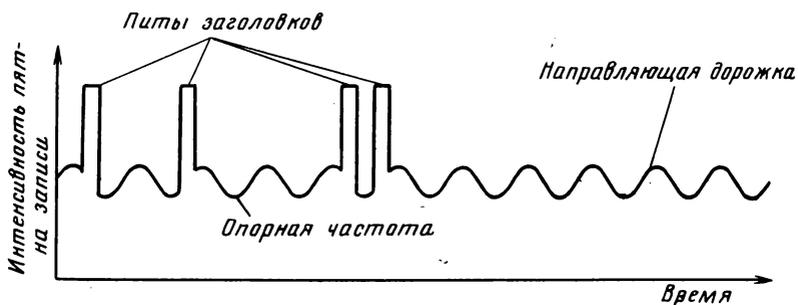


Рис. 5.3. Схематическая диаграмма мощности записывающего пятна на диске для цифровой записи

как в случае CD-диска, сдвиг уровня детектирования не зависит от частоты, поэтому время переключения цифрового сигнала после ограничения всегда совпадает с временем переключения исходного записывающего сигнала. Таким образом, вариации экспозиции либо обработки автоматически компенсируются электроникой. Процесс записи диска-оригинала CD оптимизирован таким образом, чтобы получить повышенное значение отношения сигнал-шум и приемлемый уровень асимметрии. Ясно, что вторые гармоники в системе CD играют меньшую роль по сравнению с интермодуляционными составляющими сигнала в системе LV. Фактически оба эффекта имеют один и тот же источник, а именно несимметричные по длине питы.

На дисках-оригиналах, предназначенных для изготовления дисков с возможностью записи, структура предварительного форматирования (разметки) делится на радиальную по дорожкам и тангенциальную по секторам. Каждый сектор состоит из двух частей: относительно короткого заголовка, состоящего из набора пит, в которых записаны адрес сектора и сигналы синхронизации, и следующей за ним области для записи пользователем своей информации. Между питой заголовка и областью пользователя записывается мелкая направляющая дорожка, которая служит для получения пушпульного сигнала слежения за дорожкой (см. стр. 114). Направляющая дорожка записывается при уменьшенной мощности записывающего пятна (рис. 5.3). Если интенсивность модулирована синусоидальным сигналом от тактового генератора, то в направляющей дорожке может быть записан также и опорный тактовый сигнал, который упрощает синхронизацию всего устройства. В отличие от записи дисков-оригиналов CD и LV, имеющих двухуровневую запись, для ЦОЗ необходимо записывать и промежуточный уровень.

Рассмотрим теперь более подробно записывающий аппарат, лазерное устройство записи, оптическая схема которого приведена на рис. 5.1. Луч аргонового лазера с длиной волны  $\lambda = 457,9$  нм

проходит электро- либо акустооптический модулятор, который модулирует луч по интенсивности в соответствии с ВЧ сигналом, поступающим из обрабатывающей электроники. Для ДО, которые вращаются с постоянной угловой скоростью (в режиме ПУС), интенсивность записывающего пятна должна возрастать с радиусом витка записи, чтобы обеспечить постоянную энергию экспозиции на единицу поверхности. Это медленное изменение мощности может быть осуществлено с помощью того же быстродействующего модулятора либо отдельно путем медленного вращения  $\lambda/2$ -пластинки в пучке, после которой установлен поляризатор. После поляризатора установлен светоделитель, направляющий часть пучка на детектор, сигнал которого сравнивается с заданным уровнем, зависящим от радиуса. В случае записи пластинок с увеличенным временем воспроизведения ДО вращается с постоянной линейной скоростью (в режиме ПЛС), следовательно, уровень экспозиции должен оставаться постоянным, а угловая частота вращения — уменьшаться с возрастанием радиуса.

После расширения пучка лазера отрицательной линзой или телескопом свет поступает на входную апертуру микрообъектива, фокусирующего излучение на поверхность вращающегося диска. Если оптическая система движется линейно по радиусу от центра диска к краю, то на поверхности диска экспонируется спиральная дорожка. Свет, отраженный от диска, собирается тем же объективом и поступает на телевизионное видеоконтрольное устройство, на экране которого отображается пятно на диске; таким образом производится текущий контроль качества пятна в процессе записи. Из-за высокой числовой апертуры микрообъектива, глубина резкости которого  $\Delta z$  определяется выражением

$$\Delta z = \pm \lambda / 2 NA^2 \quad (5.3)$$

и составляет около 0,5 мкм, требуется динамическая система автоматического регулирования фокусировки. Сигнал регулирования получается с помощью дополнительного источника, He—Ne-лазера или на основе GaAlAs, к излучению которого резист нечувствителен. Лучи сводятся с помощью дихроичного зеркала. Сигнал ошибки получается методами бипризмы Фуко либо внеосевого пучка (см. подразд. 2.5.2 и [3]). Для отслеживания биений поверхности ДО в вертикальном направлении вокруг объектива намотана катушка, через которую протекает управляющий ток, и вся конструкция помещена в постоянный магнит (см. гл. 4).

Помимо фокусировки необходимо управлять радиальным перемещением объектива и вращением ДО. Вместе они определяют шаг дорожки, который обычно выбирается в диапазоне 1,4...2,0 мкм. Для ДО CD стандартизован шаг 1,6 мкм. Шаг дорожки выдерживается с точностью 0,1 мкм. Ошибка базы времени от дорожки к дорожке не должна превышать 25 нс. Эти требования удовлетворяются путем применения двигателя вращения с непосред-

ственным приводом с воздушным подшипником. Скорость вращения, контролируемая тахометром, управляется системой автоматического регулирования с обратной связью. Линейное перемещение обычно измеряется индуктивным датчиком скорости, однако для специальных приложений используется более точная лазерная измерительная система, которая позволяет уменьшить радиальную ошибку до 30 нм.

Если принять во внимание размер пит, то очевидно, что запись должна осуществляться в чистом, свободном от пыли помещении. К тому же, как отмечено в [17], наличие влаги оказывает влияние на процесс экспонирования, поэтому необходимо контролировать также и влажность воздуха.

Рассмотрим некоторые теоретические аспекты профиля экспонирования, которым определяется геометрия пит. В качестве примера возьмем описанный выше критический случай наивысшей пространственной частоты на ДО. Эта частота характерна для внутренних витков записи.

В гл. 2 получены выражения для распределения комплексной световой амплитуды в плоскости фокуса линзы. Если идеальная линза освещена равномерно по всему полю, то в фокальной плоскости получается круговая картина распределения интенсивности, известная как диск Эйри [5.2]:

$$I(r) = \left( \frac{2J_1(2\pi NA r \lambda^{-1})}{2\pi NA r \lambda^{-1}} \right)^2 I_0(r=0), \quad (5.4)$$

где  $J_0$  — функция Бесселя первого рода первого порядка. Эта картина состоит из яркого центрального пятна, окруженного последовательными темными и светлыми кольцами. Ширина пятна определяется длиной волны света и числовой апертурой NA. Есть два критерия ширины пятна: диаметр по уровню половинной мощности в центре картины и диаметр первого темного кольца  $d$ . Последний определяется выражением

$$d = 1,22\lambda/NA. \quad (5.5)$$

Хотя для величин  $NA \geq 0,5$  световое пятно несколько отличается от картины Эйри [6,13], эти отличия не настолько велики, чтобы нельзя было применить простую модель диска Эйри для данного случая. Если взять объектив с числовой апертурой  $NA=0,6$ , то найдем, что пятно записи имеет распределение интенсивности с диаметром первого темного кольца, равным 930 нм. Предположим, что вращающийся ДО непрерывно экспонируется этим пятном, движущимся от центра к краю. Относительно ДО пятно движется по спирали с тангенциальной скоростью  $v$ . Получающийся в результате профиль локальной экспозиции может быть рассчитан интегрированием для каждой точки картины Эйри в тангенциальном направлении. Поскольку поглощение фоторезиста на

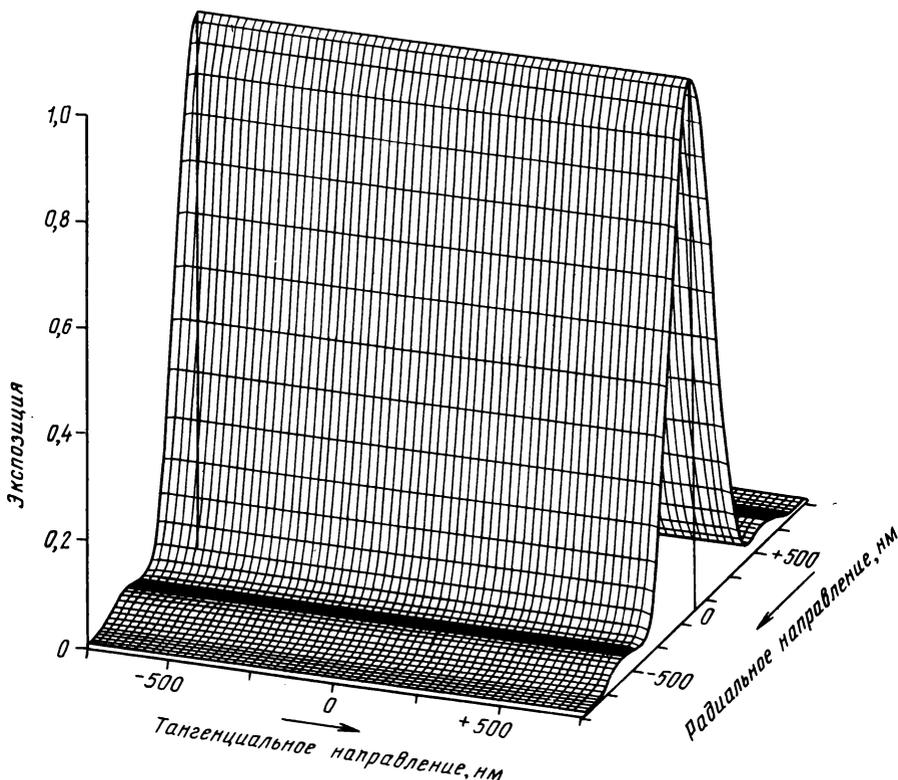


Рис. 5.4. Профиль экспозиции непрерывной дорожки, записанной с помощью объектива с  $NA=0,6$  и скважностью 100%. Первый минимум располагается на расстоянии около 450 нм от центра

длине волны экспонирующего излучения низкое, изменением экспозиции в вертикальном направлении пренебрегают.

Результирующий профиль экспозиции, нормированный по уровню экспозиции в центре, показан на рис. 5.4. В радиальном направлении эффект первого темного и светлого колец четко отмечается. Конечно, здесь нет модуляции в тангенциальном направлении. Картина меняется, если пятно модулируется по интенсивности. Профиль экспозиции в этом случае рассчитывается путем вычисления интеграла свертки в тангенциальном направлении от функции распределения интенсивности  $I(x, y)$  и функции «наличия» пятна  $H(t)$ , которая равна единице, если модулятор включен, и нулю, если модулятор выключен. При тангенциальном периоде 1100 нм и скважности 50%  $H(t)$  равна единице в положениях  $x' (=vt)$ , если  $-275 \text{ нм} < x' - mp < 275 \text{ нм}$ , тогда

$$E(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} J(x - vt, y) H(t) dt. \quad (5.6)$$

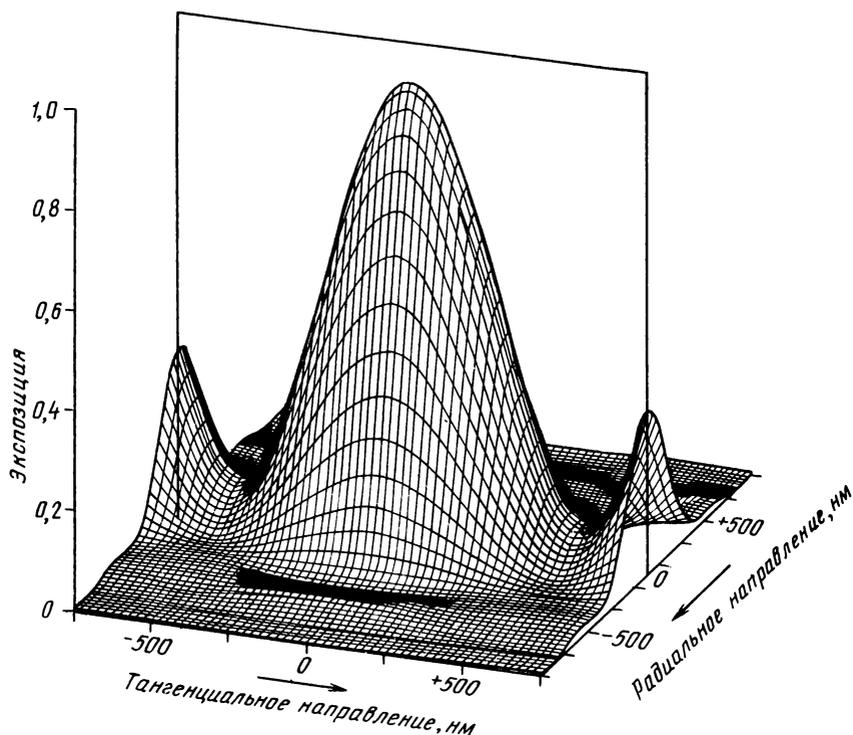
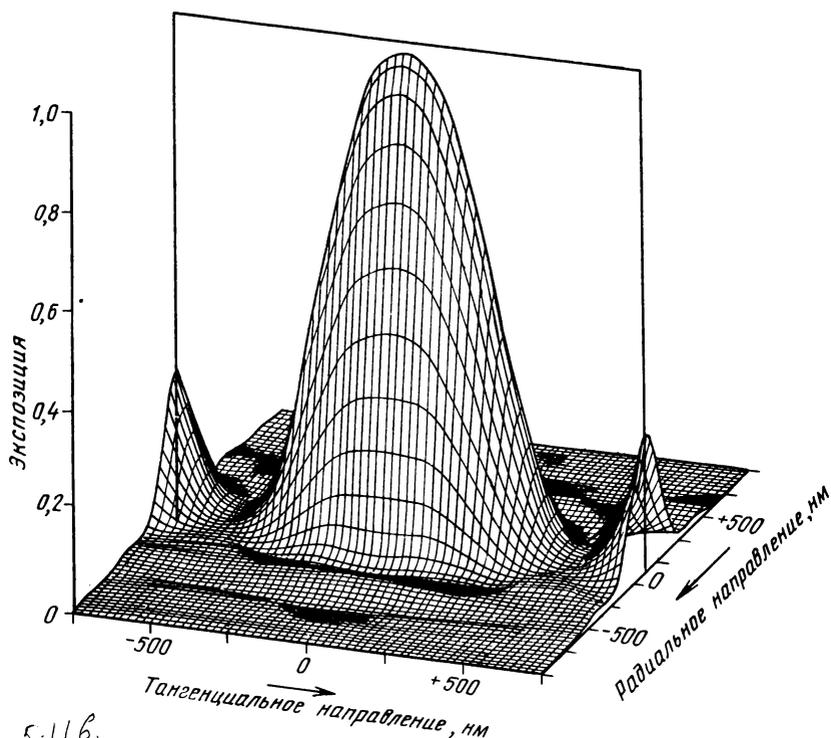


Рис. 5.5. Профиль экспозиции пит, записанных с помощью объектива с  $NA=0,6$  и скважностью 50% (период в тангенциальном направлении  $p=1100$  нм)

На рис. 5.5 показан профиль экспозиции для этого случая, также нормированный по отношению к интенсивности в центре при непрерывной экспозиции. Видно, что в максимуме экспозиции не достигает 100% и между питами имеются участки нежелательного экспонирования. Это обусловлено конечными размерами пятна, которые больше размера пита. Только в том случае, когда длина пит и промежутки между ними больше размера пятна, экспозиция будет достигать 100%. Это является иллюстрацией концепции ОПФ объектива, которая действует как низкочастотный фильтр для пространственных частот. На диск передаются только низшие гармоники функции наличия пятна  $H(x)$ , поэтому глубина модуляции меньше единицы. Увеличение полосы линзы за счет выбора  $NA=0,8$  (рис. 5.6) приводит к росту глубины модуляции.

Рассмотрим влияние модуляции скважности. Ранее обсуждался случай модуляции скважности от 30 до 70% для тестового сигнала (стандартная поднесущая звука модулирует скважность между 45 и 55%). Профили экспозиции для  $NA=0,6$  показаны на рис. 5.7 и 5.8. Можно просуммировать основные данные рис.



5.116.

Рис. 5.6. Профиль экспозиции пит, записанных с помощью объектива с  $NA=0,8$  и скважностью 50% ( $p=1100$  нм)

5.4—5.8, изобразив на одном рисунке радиальные и тангенциальные сечения, проходящие через точку  $x=y=0$  для различных значений скважности (рис. 5.9). Видно, что градиент экспозиции меньше в направлении дорожки, чем в направлении радиуса. Следовательно, стенки пита будут более пологими в радиальном направлении. Это значит, что эффект модуляции скважности заключается не только в модуляции длины пита, но и в изменении ширины и средней глубины профиля экспозиции. Это нежелательное нелинейное свойство. На практике имеются два механизма, которые снижают это отрицательное влияние. Первый: максимум профиля экспозиции, который должен был бы сформировать самую глубокую часть пита в слое фоторезиста достаточно большой толщины, ограничивается поверхностью раздела между фоторезистом и стеклянной подложкой. Любая дополнительная экспозиция, достигшая этой границы, не может еще более углубить пит. Поэтому эффект различного уровня максимума экспозиции для различных скважностей практически незаметен. Второй: процесс обработки резиста в областях между питами, сформирован-

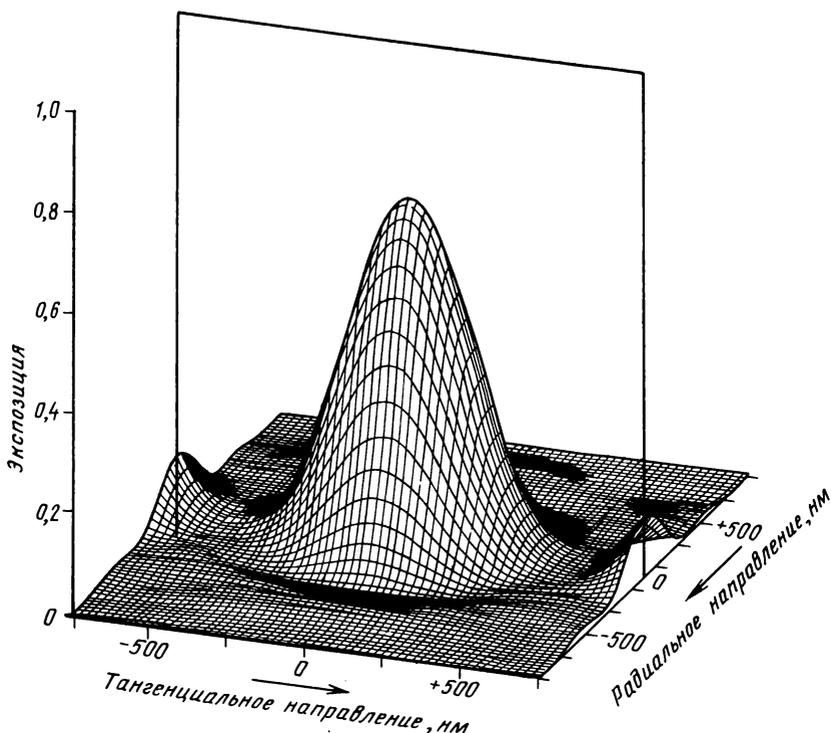


Рис. 5.7. Профиль экспозиции пит, записанных с помощью объектива с  $NA=0,6$  и скважностью 30% ( $p=1100$  нм)

ными уровнями экспозиции при повышенной скважности, замедляется из-за нелинейной зависимости скорости травления фоторезиста от экспозиции. Скорость травления определяется как скорость, с которой толщина экспонированного фоторезиста уменьшается в процессе обработки. Для тонких слоев фоторезиста короткое время экспозиции и высокая интенсивность света, используемые в оптической записи, дают квадратичную зависимость скорости травления от экспозиции. Это значит, что между питами, где экспозиция сравнительно мала, при травлении фоторезист практически не удаляется.

Совместное влияние конечной толщины фоторезиста и квадратичного характера зависимости скорости травления от экспозиции может быть интерпретировано как процесс ограничения, выполняемый после низкочастотной фильтрации сигнала микробъективом.

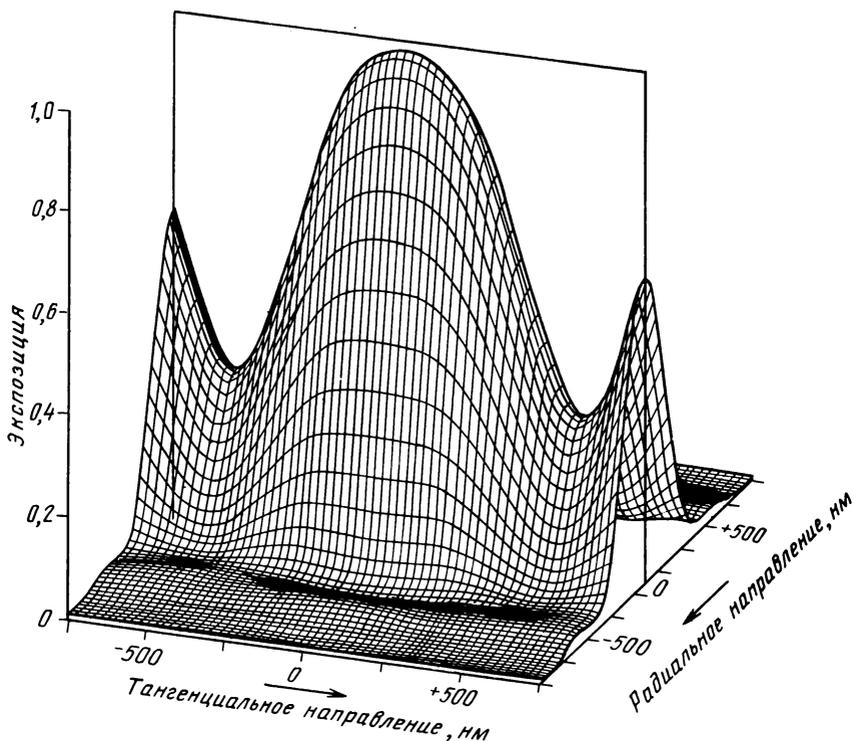


Рис. 5.8. Профиль экспозиции пит, записанных с помощью объектива с  $NA=0,6$  и скважностью 70% ( $r=1100$  нм)

### 5.2.3. ТРАВЛЕНИЕ

Если определено понятие скорости травления и известен профиль экспозиции, то можно рассчитать геометрию пит в процессе и после травления. В первом приближении конечный профиль пита равен профилю скорости травления, полученному при возведении в квадрат профиля экспозиции. На рис. 5.10 показано радиальное сечение конечного профиля скорости травления непрерывной дорожки, записанной с помощью объектива с  $NA=0,6$ . Видно, что этот профиль уже, чем исходный профиль экспозиции. Модель может быть уточнена, если учесть удаление резиста, идущее не в вертикальном направлении, а перпендикулярно поверхности раздела резист — травитель. Это значит, что скорость травления не скалярная, а векторная величина, всегда направленная по нормали к поверхности раздела и постоянно меняющаяся с изменением рельефа этой поверхности. Данное свойство математически описывается нелинейными дифференциальными уравнениями в

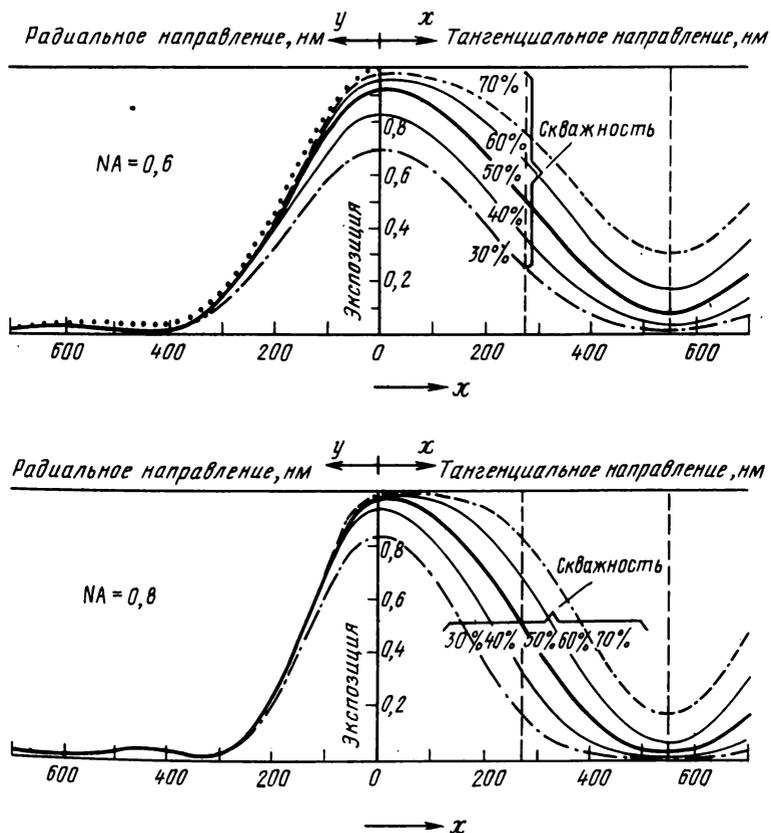


Рис. 5.9. Сечения профиля экспозиции по центральной линии в радиальном и тангенциальном направлениях при  $NA=0,6$  и  $0,8$  для различных значений скважности

частных производных, решение которых представляет собой пространственный профиль поверхности в любой момент времени процесса травления. Результат такого расчета приведен на рис. 5.10. Основной эффект заключается в том, что, как и следовало ожидать, профиль глубины шире в тех местах, где градиент профиля велик. Результирующая ширина углубления на поверхности фоторезиста в этом случае составляет около 550 нм.

Травление фоторезиста осуществляется с помощью кислотных травителей, которыми орошается поверхность вращающегося ДО. Экспонированные области селективно травятся в течение 20...30 с. Поскольку время травления, так же как и профиль экспозиции, определяет тангенциальную симметрию, процесс травления должен быть остановлен в нужный момент. Неизбежные небольшие вариации свойств фоторезиста, условий записи и параметров обра-

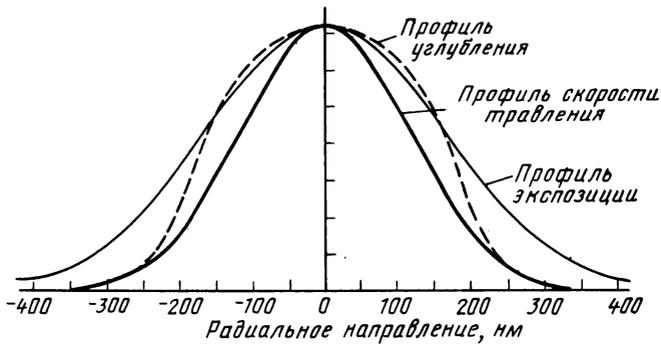


Рис. 5.10. Сечения в радиальном направлении расчетных профилей экспозиции, скорости травления и глубины непрерывной дорожки, записанной с помощью объектива с  $NA=0,6$

ботки могут быть скомпенсированы изменением времени травления. Поэтому процесс травления должен тщательно контролироваться и останавливаться в тот момент, когда структура пит оптимальна. Такой контроль осуществляется путем регистрации интенсивности дифракционных порядков, возникающих при освещении лучом He—Ne-лазера специальной технологической тестовой зоны записи, экспонированной особым образом. Как показано в подразд. 3.3.1, интенсивность первого порядка дифракции может служить мерой для вытравленного объема резиста и поэтому может быть использована для текущего контроля процесса травления. В зависимости от конкретного приложения в технологическую тестовую зону записывается либо питовая структура, либо

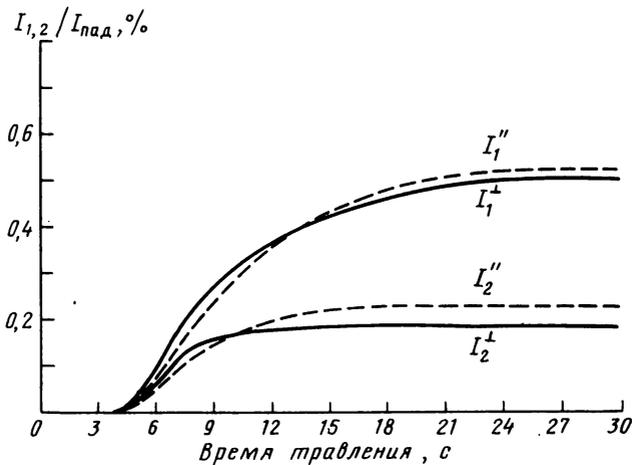


Рис. 5.11. Пример зависимости интенсивности порядков дифракции для S- (— — —) и P-поляризации (—) от времени травления для непрерывной дорожки

непрерывная дорожка. Для основных применений необходимо регистрировать только интенсивность первых порядков относительно нулевого. На рис. 5.11 приведены графики изменения интенсивностей первого и второго порядков для двух ортогональных направлений поляризации падающего света, получающиеся при травлении непрерывных дорожек.

#### 5.2.4. ДАЛЬНЕЙШАЯ ОБРАБОТКА

После травления измеряются интенсивности первого и второго порядков дифракции прошедшего света по всей зоне записи. ДО для получения информации о качестве и стабильности геометрии пит.

После прохождения этого теста на поверхность ДО с фоторезистом напыляется тонкий металлический слой (например, серебра), который увеличивает отражательную способность информационной структуры. Затем ДО проигрывается на специальном тестовом проигрывателе, в котором предусмотрена возможность всесторонней радиотехнической проверки качества сигнала, воспроизводимого с ДО. Важными радиотехническими параметрами являются следующие: значения отношений несущая-шум и сигнал-шум; амплитуды сигналов ЦА и ПП; интермодуляция, или уровень вторых гармоник, обусловленных асимметрией; наличие выпадений сигнала. Сигнал также декодируется для контроля звука и изображения.

Для регулирования процесса и промежуточного контроля на посеребренном ДО могут быть проведены дифракционные измерения по определению геометрических параметров записи (см. разд. 3.3). Интенсивности дифракционных порядков и разность фазы между первым и нулевым порядками измеряются для двух поляризаций. Это измерение выполняется следующим образом.

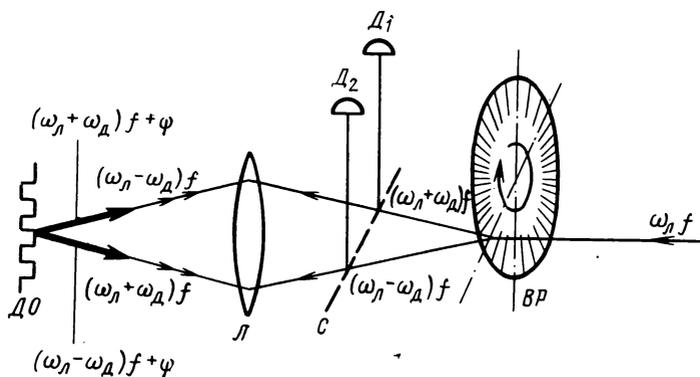


Рис. 5.12. Схема устройства для измерения фазы:

ВР — вращающаяся дифракционная решетка, работающая на пропускание; С — светоделитель; Л — линза; ДО — диск-оригинал;  $D_1$  и  $D_2$  — детекторы

Луч He—Ne-лазера падает перпендикулярно на вращающуюся дифракционную решетку, работающую на пропускание («колесо со спицами») (рис. 5.12). Вращение приводит к тому, что оптические частоты двух первых порядков сдвигаются на  $+\omega_d$  и  $-\omega_d$  вследствие эффекта Доплера. Линза фокусирует оба порядка на решетчатую структуру ДО с таким увеличением, что для каждого из двух лучей направление отражения минус первого порядка совпадает с направлением падения луча (схема Литтрова) и, следовательно с отраженным нулевым порядком дополнительного луча. Минус первые порядки получают сдвиг фазы  $\psi$  по отношению к нулевым порядкам. Свет, отраженный в двух направлениях, выводится из оптической схемы и измеряется с помощью двух детекторов, которые дают зависящий от времени сигнал, возникающий вследствие интерференции первого и нулевого порядков:

$$I_1 \sim \cos(2\omega_d t + \psi),$$

$$I_2 \sim \cos(2\omega_d t - \psi).$$

Простое радиотехническое измерение фазы между сигналами дает удвоенное значение разности фаз  $\psi$ .

### 5.3. ТИРАЖИРОВАНИЕ

Проверка завершает процесс изготовления диска-оригинала; затем на посеребренной поверхности ДО гальванопластическим методом наращивается слой никеля. Когда никелевая копия отделяется от диска-оригинала, информация на сравнительно мягком слое фоторезиста разрушается. Никелевая копия, содержащая «негатив» поверхностной структуры диска-оригинала, называется никелевым оригиналом (НО). Никелевый оригинал может быть использован для мелкосерийного тиражирования дисков либо для изготовления нескольких позитивных копий. В последнем случае позитивные копии наращиваются гальванопластическим методом на поверхности никелевого оригинала после предварительной ее обработки химическими методами. Тем же способом с каждой позитивной копии могут быть сняты несколько негативных вторичных никелевых копий, которые используются в качестве матриц при массовом тиражировании. В общем случае для видео- и аудиодисков используются различные методы тиражирования.

Первый метод, фотополимеризационный (ФП) процесс, разработан специально для тиражирования видеодисков [8,4]. Его технологическое преимущество заключается в том, что не требуются высокие давление и температура. Вследствие того, что в данном процессе отсутствует термоциклирование, пластиковая реплика не испытывает термических ударов при охлаждении, которые могут привести к появлению в ней нежелательного двулучепреломления.

Базовым принципом тиражирования информационной струк-

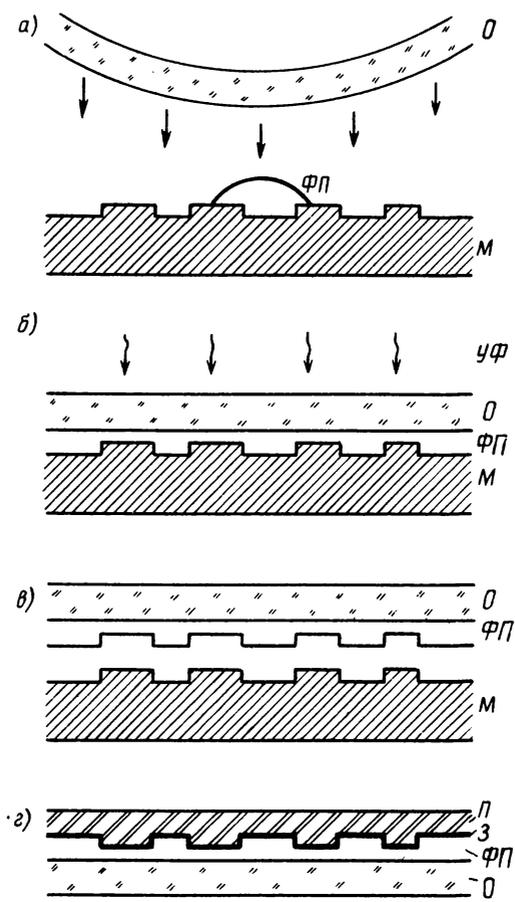


Рис. 5.13. Схематическое изображение фотополимеризационного процесса тиражирования:

а — жидкий ФП лак распределяется по поверхности матрицы (М) с помощью выгнутой основы (О), б — УФ экспонирование через подложку, которое отверждает ФП лак; в — отделение основы от матрицы; г — ФП слой покрывается металлическим зеркалом (З) и защитным покрытием (Л). Два таких диска склеиваются вместе, и получается двусторонний видеодиск. Публикуется с разрешения Philips Technical Review

туры является индуцированная ультрафиолетовым излучением полимеризация смеси мономеров с фотоинициатором на поверхности никелевой копии (рис. 5.13). Основой диска служит пластиковая полиметилметакрилатовая (ПММА) дисковая подложка толщиной 1,2 мм, покрытая адгезивным слоем, увеличивающим сцепление ФП слоя и основы. На центр никелевой копии наносится несколько миллилитров ФП лака, и затем на нее опускается ПММА подложка, которая выгнута внешним давлением в виде перевернутого зонтика и в первую очередь касается никелевой копии в центре.

При дальнейшем опускании подложки ФП лак растекается к внешнему краю диска, покрывая поверхность никелевой копии слоем 10...30 мкм. Затем лак экспонируется через основу УФ излучением с длиной волны около 350 нм. Лак полимеризуется и твердеет. Когда подложка отделяется от никелевой матрицы, несущий информацию твердый ФП слой остается на подложке, и никелевая матрица готова для нового цикла. После заключительного ультрафиолетового облучения, которое окончательно отверждает ФП слой, на информационную структуру наносится отражающий металлический слой (алюминий или серебро). Затем уязвимое металлическое зеркало покрывается защитным слоем. Два диска склеиваются вместе, и таким образом получается герметичный двусторонний видеодиск, рассчитанный на двухчасовую видеопрограмму.

Этот принцип ФП тиражирования в настоящее время применяется также при производстве дисков для хранения данных. Однако в этом случае в качестве отражающего слоя служит сплав на основе теллура. Этот аспект более детально рассматривается в гл. 6.

Реплики компакт-дисков изготавливаются методом инъекционного литья под давлением, который в данном случае заменил пресование обычных «черных» звуковых пластинок. Материалом для дисков является гранулированный поликарбонат (ПК), из которого весь диск с информационным микрорельефом отливается за один прием. В этом процессе ПК нагревается в прессе. Затем расплавленный ПК впрыскивается под давлением в литьевую форму, состоящую из двух матриц, одна из которых содержит негативный информационный рельеф, а другая — гладкая. Литьевая форма нагрета до температуры, несколько превышающей температуру стеклования полимера. Материал под давлением заполняет форму и затем быстро охлаждается, после чего прозрачный ПК-диск готов к металлизации. На сторону с информационным рельефом напыляется отражающее алюминиевое покрытие, которое затем покрывается защитным лаком. После точного вырезания с помощью штампа центрального отверстия диск маркируется.

При контроле процесса используются оптические методы обнаружения пузырьков воздуха, мелких пылинок и проколов в отражающем слое. Кроме того, контролируются такие оптические параметры материала диска, как вариации коэффициента преломления, двулучепреломление и толщина. Проводится выборочное проигрывание дисков для проверки сигнала радиального слежения, количества выпадений и т. д.

#### 5.4. НЕТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИСКА-ОРИГИНАЛА

В этом разделе описан процесс изготовления диска-оригинала, который в настоящее время широко используется фирмой Philips.

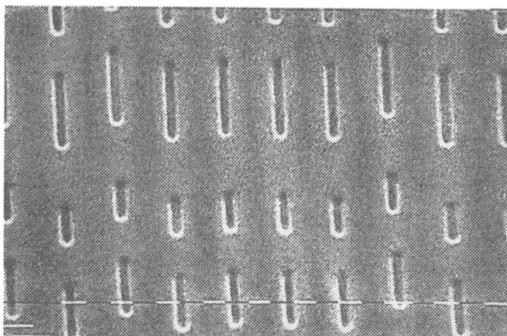
Он удовлетворяет всем системным стандартам, которые согласованы различными производителями оптических дисковых систем. Естественно, дальнейшее развитие не остановилось после выхода стандарта. Новые разработки могут вести как к усовершенствованию существующих процессов и систем внутри стандартов, так и к появлению совершенно новых возможностей и даже новых систем (см. гл. 8). Примеры разработок обоих типов в области изготовления дисков-оригиналов, реализованные в исследовательских лабораториях фирмы Philips, описаны в следующих двух подразделах. Они также иллюстрируют основные направления развития, а именно: совершенствование и оптимизация процесса, структуры диска, считываемого сигнала, а также увеличение плотности записи информации, что, в свою очередь, ведет к увеличению времени воспроизведения, емкости носителя и т. д. Оба примера предусматривают возможность добавления к существующему устройству записи ДО дополнительного, полностью независимого оптического канала, формирующего дополнительное записываемое пятно.

#### 5.4.1. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РЕЛЬЕФА

Как отмечалось в подразд. 3.3.3, ЦА-сигнал фокусировки, а также ПП-сигнал слежения за дорожкой обеспечиваются предварительным рельефом на оптическом диске и оптимальным в том случае, когда ширина направляющих дорожек равна приблизительно половине шага спирали записи. Питы разметки формируются практически тем же методом, что и питы на LV-или CD-дисках, которые должны иметь ширину около 0,6 мкм. В общем случае направляющая дорожка записывается тем же пятном, что и питы разметки, а это приводит к тому, что должен быть найден компромисс между противоречивыми требованиями к широкой направляющей дорожке и узким питам разметки. Такой компромисс может обеспечить достаточно хороший (но не максимально возможный) сигнал считывания, если используется шаг дорожки 1,6 мкм [12]. Однако ситуация меняется, если требуется большой шаг. Увеличение шага дорожки приводит к уменьшению амплитуды первого порядка дифракции (см. подразд. 3.3.2) и увеличению разности фазы  $\psi$ , а также к уменьшению эффективной площади перекрытия  $\Pi$  (см. рис. 3.19) из-за уменьшения радиальной пространственной частоты. Все это приводит к слишком малому сигналу слежения за дорожкой [см. уравнение (3.206)].

Простейшее решение этой проблемы состоит в том, чтобы разделить обе функции записываемого пятна, использовать два независимых оптических канала и два записываемых пятна. Как было показано в подразд. 5.2.2, ширина дорожек в значительной степени определяется шириной пятна, которая может быть изменена путем изменения апертуры фокусирующей линзы, точнее, изменением числовой апертуры экспонирующего сфокусированного све-

Рис. 5.14. Фотография оптимизированной структуры направляющих дорожек и пит заголовка на диске для цифровой записи, полученная с помощью растрового электронного микроскопа. Шаг дорожек 2,4 мкм. Один штрих соответствует 1 мкм



тового луча. Широкая направляющая дорожка получается при записи отдельным дополнительным пятном, если дополнительное пятно света, прежде чем попасть в фокусирующий объектив, уменьшается в диаметре с помощью диафрагмы. Если мощность дополнительного пятна также независимо регулируется и устанавливается ниже, чем мощность основного пятна, то в результате можно получить оптимальную широкую и неглубокую направляющую дорожку без ухудшения качества считывания пит разметки, которые записываются основным пятном.

Дополнительное преимущество такого метода состоит в том, что появляется возможность записывать питы разметки, а в дальнейшем и питы информации пользователя между направляющими дорожками, а не на них. Как было показано в подразд. 3.3.3, максимум сигнала считывания достигается между дорожками, а минимум (достаточный для считывания) — на дорожках (см. рис. 3.18). С помощью диска, записанного таким образом, можно получить при шаге дорожки 2,4 мкм пушпульный сигнал 110% (размах) и сигнал по центру апертуры 96%. На рис. 5.14 показана фотография такой структуры, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа. Из-за малого контраста электронов для мелкой и широкой структуры направляющей дорожки на фотографии она плохо видна между питами разметки.

#### 5.4.2. ДОРОЖКИ ЗАПИСИ РАЗЛИЧНОЙ ГЛУБИНЫ

Информационная емкость оптических дисков может быть увеличена путем уменьшения расстояния между дорожками записи. Однако при воспроизведении возникают проблемы. Поскольку считывающее пятно имеет конечные размеры, уменьшение расстояния между дорожками приводит к росту их взаимовлияния, т. е. перекрестных искажений.

В подразд. 2.4.1 показано, что эта проблема может быть решена следующим образом. Соседние дорожки записываются с различными уровнями экспозиции, что приводит к различной их глубине.

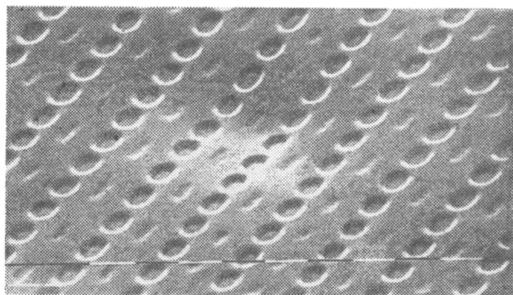


Рис. 5.15. Фотография двойной спирали пит стандарта Laser Vision (глубокие питы) и стандарта Compact Disc (мелкие питы), полученная с помощью растрового электронного микроскопа. Шаг дорожки глубоких пит 1,8 мкм. Один штрих соответствует 1 мкм

Если глубокие и мелкие питы считываются соответственно амплитудным и фазовым (тангенциальным) образом, то эффективное расстояние между дорожками может быть уменьшено наполовину без увеличения перекрестных искажений. С использованием этого принципа были записаны ДО, на которых между спиральными дорожками обычных пит с шагом 1,8 мкм записана дополнительная спираль пит с малой глубиной с помощью описанного выше дополнительного оптического канала, модулируемого независимо. На рис. 5.15 показана фотография такой структуры, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа. Ясно, что для пит с малой глубиной, которая не достигает стеклянной подложки при обработке, шум от поверхности из-за малого их объема больше, чем для обычных пит. Поэтому увеличение отношения несущая-шум несущественно для регистрации аналогового видеосигнала. Однако появляется дополнительная возможность записи на дополнительной спирали цифровой информации, например программы для компьютеров, либо звука в стандарте CD, сопровождающего видеопрограмму. Поскольку основная дорожка глубоких пит записывается обычным образом, такие диски полностью совместимы с обычным видеодиском.

В этой главе рассмотрено, каким образом информация любого типа — аналоговая, видео, цифровая аудио, предварительный рельеф, разметка — может быть записана на диске-оригинале строго определенным образом с помощью экспонирования слоя фоторезиста сфокусированным лазерным лучом определенного диаметра, интенсивность которого модулируется. Эта информация, представляющая собой кодированный по высоте профиль, может быть сравнительно просто и точно тиражирована с помощью диск-реплики в большом количестве; очевидно, это имеет большое значение, если предполагаемое применение дисков направлено на удовлетворение широкого потребительского рынка.

## 6. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

*А. Хейсер*

### 6.1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка видеодисковой системы Laser Vision и ее реализация в практических устройствах явились бесценным вкладом в технологию оптической записи. Большинство решений оптических и сервомеханических узлов, найденных при разработке этой системы, применяются до сих пор; они успешно используются и в других системах, таких как система цифрового звукового воспроизведения Compact Disc (см. гл. 7, 8). Кроме того, созданы предпосылки для практической реализации и внедрения другого метода оптической записи информации: прямая запись, или считывание непосредственно после записи (СНПЗ).

Технология оптической записи, созданная в рамках системы Laser Vision и используемая также в системе Compact Disc, первоначально была разработана для целей тиражирования информации. В соответствии с этой технологией запоминание информации происходит в процессе изготовления диска-оригинала (см. гл. 5) не в реальном масштабе времени: непосредственно после процесса записи информация на диске-оригинале зафиксирована в скрытой форме и не может быть считана. Для формирования на диске-оригинале оптически считываемой структуры фоточувствительный слой на нем должен быть подвергнут специальной обработке, подобной проявлению фоторезиста и металлизации. Более того, диск-оригинал — это только промежуточный носитель информации, используемый при изготовлении матрицы-штампа, с помощью которой производится массовое тиражирование оптических дисков, предназначенных только для воспроизведения информации (см. гл. 8).

На дисках, применяемых в системе СНПЗ, информация может быть записана в форме, допускающей ее считывание сразу после записи. Эта особенность — запись информации в реальном масштабе времени — существенна для использования оптической записи в устройствах памяти, например, для компьютерных систем. Для данной сферы применения записываемая информация часто имеет узко специализированное назначение и требование тиражируемости такой информации не является принципиальным.

Оптическое записывающее устройство системы СНПЗ по своей сути не что иное, как обычный воспроизводящий аппарат типа оптического проигрывателя Laser Vision или Compact Disc. Единственным дополнением является возможность увеличения интенсив-

ности лазерного излучения до уровня, значительно превышающего уровень, обычно используемый при воспроизведении информации. При повышенной мощности излучения лазера обеспечивается «запись» оптически считываемых следов в чувствительном слое СНПЗ-диска и, следовательно, запоминание информации.

Поскольку воспроизведение информации с СНПЗ-дисков полностью соответствует принципам, изложенным в предыдущих главах, будем в этой главе рассматривать только те аспекты, которые связаны с материалами для изготовления СНПЗ-дисков. В следующих разделах обсуждаются некоторые существенные особенности материалов для СНПЗ-дисков, обусловленные системными требованиями. В разд. 6.4 описаны различные эффекты, используемые для записи на СНПЗ-диски, и приведены примеры их практического использования. Общесистемные аспекты и применения технологии прямой оптической записи читатель может найти в гл. 8 и относящемся к ней списке литературы.

## 6.2. ОСОБЕННОСТИ СНПЗ-МАТЕРИАЛОВ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ СИСТЕМНЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ

Как отмечалось в гл. 1, принципы оптического считывания могут быть реализованы при использовании любого эффекта, изменяющего состояние падающего света при отражении или прохождении (системы с прохождением излучения через носитель оказались непрактичными и поэтому здесь не рассматриваются). Помимо фазовых структур, используемых в системах Laser Vision и Compact Disc, среды для прямой записи включают также «черно-белые» контрастные структуры, т. е. обладающие способностью изменять интенсивность или поляризационное состояние падающего света. Эти эффекты должны иметь место в материалах с приемлемым оптическим поглощением на длине волны лазера, используемого для записи. Во всех СНПЗ-материалах, представляющих практический интерес, эффекты вызываются термическими явлениями, т. е. след формируется благодаря локальному росту температуры в результате поглощения энергии излучения лазера, сфокусированного на материале. Как правило, след, обеспечивающий оптимальный сигнал при воспроизведении, должен быть сформирован за 50...100 нс в результате действия светового излучения мощностью 10 мВт, сфокусированного в пятно диаметром 1 мкм, т. е. импульсов с энергией 0,5...1 нДж и плотностью потока энергии около 1 МВт/см<sup>2</sup>. Это ограничение по энергии обусловлено предельной мощностью лазерного излучения, которую могут обеспечить полупроводниковые лазеры. Считается, что лазеры этого типа являются источниками излучения, наиболее подходящими для прямой оптической записи [7]. Их использование возможно только при наличии достаточного оптического поглощения СНПЗ-материалов в ближнем инфракрасном диапазоне, т. е. на длинах волн генерации

между 780 и 880 нм, характерных для современных полупроводниковых лазеров на основе GaAlAs.

Чтобы получить запись с минимальными затратами энергии, нагреваемый объем должен быть настолько мал, насколько возможно. Так как площадь пятна не может быть менее  $1 \text{ мкм}^2$ , СНПЗ-материалы используются в виде тонкой пленки. Оптимальная толщина пленки определяется не только термическими требованиями: она зависит от оптического контраста между участками с записью и без записи, а также определяется технологической проблемой создания однородной (свободной от дефектов) пленки. В зависимости от конкретной комбинации материала и эффекта толщина слоя обычно составляет от 5 до 100 нм.

Для обеспечения механической устойчивости эти сверхтонкие пленки наносятся на подложку, которая является теплоотводом и отрицательно влияет на чувствительность СНПЗ-слоя. Это влияние сводится до минимума тем, что для обеспечения адиабатических условий нагрева используются короткие записывающие импульсы, а в качестве материала подложки — вещества с низким коэффициентом теплопроводности, такие как пластик, стекло, металлы с пластиковыми покрытиями. Влияние выбранной подложки должно быть учтено при оптимизации толщины пленки.

Расчеты температуры [21] показывают, что в теллурических пленках на подложках из полиметилметакрилата (ПММА) можно достичь температуры примерно 1000 К при воздействии импульса сфокусированного излучения длительностью 100 нс и мощностью в пятне 5 мВт, т. е. с энергией 0,5 нДж. При такой температуре в этих слоях возможно образование отверстий, действующих при воспроизведении сигналов с дисков как черные участки на поверхности с высоким отражением (см. разд. 6.4). При длительности световых импульсов менее 100 нс радиальный тепловой поток вдоль плоскости тонкой пленки настолько мал, что размер области записи полностью определяется диаметром пятна излучения. Из этого следует, что при работе оптического записывающего устройства в режиме воспроизведения плотность записи определяется величиной, обратной размеру пятна, или, иными словами, оптической частотой отсечки  $2NA/\lambda$ .

Как уже отмечалось, чувствительность не является единственным критерием, характеризующим сочетание среды и эффектов в ней при прямой записи (СНЗП). На втором месте стоит требование к значению отношения сигнал-шум записи, которое должно обеспечивать свободное от ошибок воспроизведение записанной информации. Отношение сигнал-шум ограничивает возможности применения сред с прямой записью. При аналоговом кодировании видеoinформации (частотная модуляция сигналов) требуется значительно большее отношение сигнал-шум по сравнению с цифровыми методами кодирования данных (широко- и фазоимпульсная модуляция). Мощность воспроизведенного сигнала определяется

модулирующей способностью элемента записи, т. е. оптическим контрастом между питом и его окружением, а также интенсивностью света, отраженного от диска. Если мощность сигнала на фотоприемнике мала, то отношение сигнал-шум ограничивается дробовым шумом детектора [14]. Этого можно избежать повышением интенсивности света в считывающем пятне. Однако при достижении интенсивности света порога записи произойдет разрушение чувствительного слоя носителя. Следовательно, помимо высокой чувствительности СНПЗ-слой должен обладать выраженной пороговой энергией записи, ниже которой никакого изменения в слое не происходит. Очевидно, для обеспечения достаточной мощности считывающего пучка порог энергии должен быть очень близок к номинальной энергии записи.

В большинстве реальных систем СНПЗ отношение сигнал-шум ограничивается шумом самого материала («шум диска»). Типичным источником шума диска являются неровности его поверхности или границы раздела слоя и подложки, а также образование невоспроизводимых участков, появляющихся из-за нарушения условий процесса записи. В связи с этим аморфные материалы для прямой записи обеспечивают лучшее отношение сигнал-шум, чем слои с крупнокристаллической структурой материала, при одном и том же оптическом контрасте.

Третьей важной особенностью СНПЗ-материалов являются характеристики сохраняемости. Так как запись данных зачастую проводится с целью их архивного хранения, большое значение приобретает срок службы материалов для СНПЗ-носителей. Критерии сохраняемости сильно зависят от конкретной системы, использующей эти носители. Например, при хранении цифровых данных возможно использование известных способов коррекции ошибок, применяемых с целью восстановления первичных данных и исключения сбоев, возникающих в результате процессов старения. Реальный срок службы тем длительнее, чем более мощный помехозащитный код используется.

При аналоговой видеозаписи на дисках ухудшение сигналов вследствие старения вызывает выпадения в воспроизводимом ТВ изображении. Кроме того, вследствие большой избыточности таких сигналов трудно определить место, в котором уже невозможно декодировать информацию об изображении.

Другой проблемой является оценка влияния эффектов старения. Так, для архивных целей необходимый срок службы дисков определен от 10 до 30 лет (в настоящее время информация, хранящаяся на магнитной ленте, должна быть регенерирована через каждые два года). Следовательно, сохраняемость носителей может быть исследована только методами ускоренного старения, при которых носитель помещают в искусственные климатические условия с повышенной влажностью и температурой. Известно множество различных стандартизованных методов испытаний носителей

на старение, однако полное соответствие полученного таким образом срока службы оптических дисков реальному сроку хранения до настоящего времени не изучено [17].

### 6.3. ОПТИЧЕСКИЙ СНПЗ-ДИСК

Чувствительный слой, нанесенный на подложку, конструктивно оформляется в виде диска, готового к употреблению. Для оптических СНПЗ-дисков общепринятой является конструкция с воздушным зазором, так называемый «воздушный сэндвич» [19], или ее различные варианты. Две прозрачные подложки из пластика или стекла соединяются в оптический диск, показанный на рис. 6.1. Чувствительные слои, представляющие собой в данном случае покрытие из пленки теллура толщиной 30 нм на обеих основах, находятся внутри диска и таким образом защищены от механического повреждения и загрязнений. Если материал подложки газонепроницаем и соединение основ герметично, то чувствительный слой изолирован от окружающей атмосферы. Эта изоляция помогает преодолеть эффекты типа коррозии чувствительного слоя — зачастую основную проблему обеспечения требуемого срока службы.

Запись на диске с конструкцией, приведенной на рис. 6.1, осуществляется «через подложку», т. е. таким же образом, как считывание информации в системах Laser Vision и Compact Disc. В тех случаях, когда запись должна проводиться «через воздух» по причинам, обсуждаемым в следующем разделе, может быть

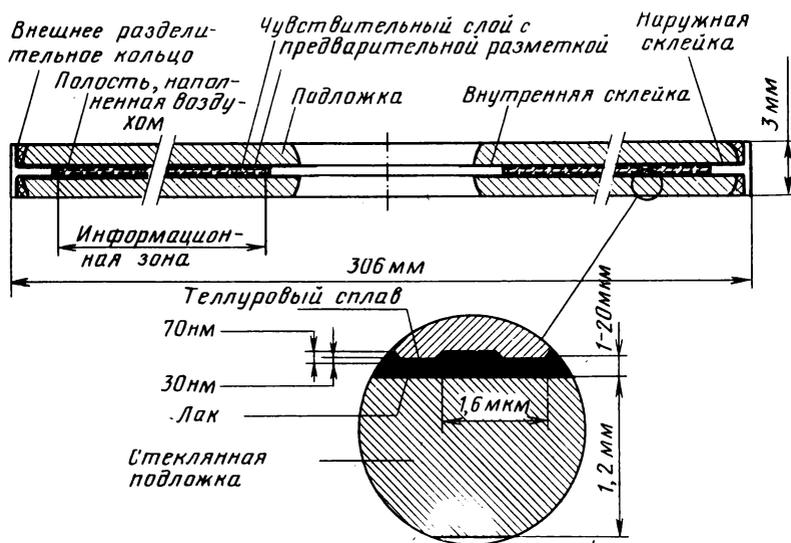


Рис. 6.1. СНПЗ-диск на основе сплава Те типа «воздушный сэндвич» [6.25]

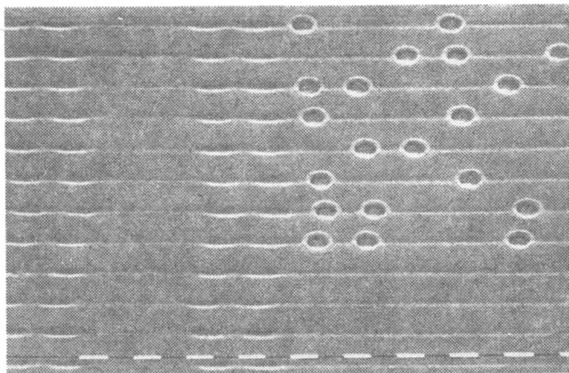


Рис. 6.2. Фотография поверхности СНПЗ-диска с предварительной разметкой — направляющими дорожками (слева) и записанными данными («отверстия» справа), полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа. Одно деление масштабной шкалы соответствует 1 мкм

применено то же решение: одно из оснований изготавливается без покрытия, прозрачным, и через него свет фокусируется на чувствительном слое, нанесенном на второе основание. Естественно, для записи «через воздух» можно иногда использовать и незащищенную поверхность чувствительного слоя. В профессиональных применениях диск почти всегда находится в защитной кассете для предотвращения механических повреждений. В этом случае остается только одна проблема — устойчивость к коррозии чувствительного слоя диска.]

На рис. 6.1 представлен другой (системно-ориентированный) вариант конструкции, обычно применяемый для оптических СНПЗ-дисков, — подложка с предварительным рельефом [7]. Концепция предварительного рельефа показана на рис. 6.1 на примере тонкого фотополимерного (ФП) покрытия, нанесенного на стеклянную подложку с необходимой для обеспечения механической прочности толщиной. Структура предварительного рельефа сформирована на поверхности отверждаемого ультрафиолетовым излучением ФП лака по технологии, сходной с используемой при производстве дисков системы Laser Vision (см. гл. 5). Возможно и обычное литье под давлением из пластика, которое также применяется для тиражирования видеодисков. Формирование предварительного рельефа часто объединяется с разметкой — введением служебной информации теми же технологическими приемами, что и создание предварительного рельефа в виде «дорожек». Пример такого диска показан на рис. 6.2. На нем приведена микрофотография поверхности диска с дорожками, разнесенными на 1,6 мкм; с левой стороны — служебная информация, полученная методами копирования, а с правой — записанные данные в форме отверстий, проплавленных в тонком слое теллурического сплава. Этот тип так называемой аблятивной записи рассматривается в следующем разделе.

## 6.4. ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ СНПЗ

Как отмечалось в предыдущих разделах, все представляющие практический интерес СНПЗ-эффекты вызываются тепловым воздействием излучения. В принципе возможно использование и фотонных эффектов, т. е. детектируемых оптическими методами изменений состояния материала, вызванных прямым взаимодействием фотонов с этим материалом [8].

Были попытки применения в качестве материалов для СНПЗ-диска фотохромных и дихроичных материалов [24]. Однако до настоящего времени практически не существует ни одного прототипа материала для СНПЗ-диска с каким бы то ни было фотонным механизмом записи. Поэтому ограничимся рассмотрением обширного класса термически индуцированных эффектов и соответствующих материалов, но только тех из них, которые уже показали свою пригодность для практического применения. Это значит, что данные среды удовлетворяют сформулированным ранее требованиям, касающимся чувствительности и достижимого отношения сигнал-шум. Однако аспекты, связанные со сроком службы материала, в большинстве случаев исследованы не полностью. Это свидетельствует о том, что разработка технологии оптической записи еще далека от завершения (см. разд. 8.5).

В соответствии с механизмами термически индуцированных эффектов запись можно приблизительно разделить на три типа: аблятивная; с использованием фазовых переходов; термомагнитная или магнитооптическая. Эти различные типы оптической записи рассмотрены и проиллюстрированы характерными примерами в следующих подразделах.

### 6.4.1. АБЛЯТИВНАЯ ЗАПИСЬ

Аблятивная оптическая запись основана на эффектах, характеризующихся тем, что при плавлении или испарении тонкого слоя в нем происходят геометрические изменения, которые можно зарегистрировать оптически. Аблятивная запись — процесс необратимый, поэтому данный метод можно применять только для систем с одноразовой записью (см. разд. 8.5).

**Термоперфорация.** Наиболее изученным способом аблятивной записи является термоперфорация («прожигание отверстий») в тонких металлических или полуметаллических пленках. На рис. 6.2 показаны примеры термоперфорации в пленке теллурселенового сплава. Схематически процесс показан на рис. 6.3, а. Из соображений обеспечения высокой чувствительности большая часть исследований процесса термоперфорации проводилась на материалах с низкой температурой точки плавления: висмут, индий, теллур [17]. Однако низкая температура точки плавления используемых материалов — не единственный параметр, обеспечивающий

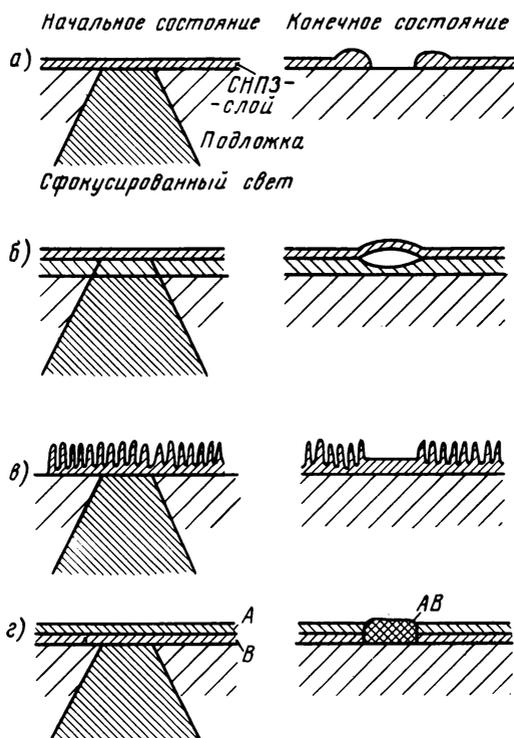


Рис. 6.3. Различные механизмы образования следов при прямой оптической записи: а — выжигание отверстий (абляция); б — формирование пузырьков (везикулярная запись); в — изменение текстуры поверхности; г — сплавление двухслойной структуры

высокую чувствительность этого типа записи. В расплавленном участке тонкого слоя, находящегося на поверхности подложки, не обязательно образуется отверстие. Причина образования отверстия заключается в понижении свободной энергии системы «тонкая пленка — подложка». Это может происходить вследствие различия поверхностной энергии (поверхностного натяжения) пленки и подложки, которое приводит к геометрическим изменениям: переходу локально расплавленной пленки (начальное состояние) в отверстие (конечное состояние) [20].

Моделирование процесса образования отверстия показывает наличие потенциального барьера между начальным и конечным состояниями [20, 6], который должен быть преодолен в процессе воздействия лазерным лучом.

Для времени менее 100 нс этот процесс не может произойти при температуре точки плавления тонкой пленки. Эксперименты с пленками теллура, индия, висмута на полиметилметакрилатной основе [20] показали, что в момент образования отверстия темпе-

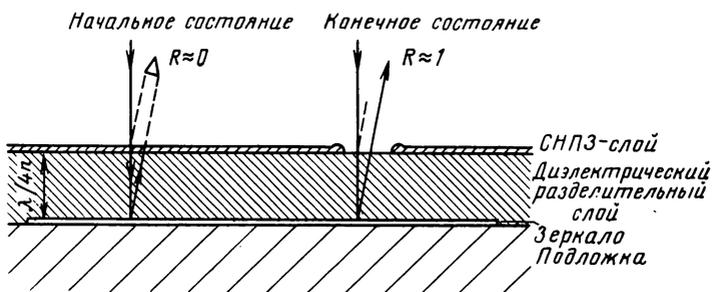


Рис. 6.4. Принцип действия антиотражающей трехслойной структуры

ратура в центре расплавленного участка значительно превосходит температуру точки плавления, причем измеренная чувствительность не зависит от температуры точки плавления. Следовательно, образование отверстия должно инициироваться определенными механизмами, понижающими потенциальный барьер между начальным и конечным состояниями. Предлагались различные механизмы инициации [6], например образование вздутий за счет возрастания давления на границе раздела «слой — подложка», градиенты поверхностного натяжения (эффект Марангони), структурирование поверхности расплавляемого слоя и границы раздела «слой — подложка», отрицательное давление в слое напыленного материала.

Высота барьера, препятствующего образованию отверстий, является функцией толщины слоя. Следовательно, очень тонкие слои обладают относительно большей чувствительностью. Однако для тех случаев, когда произведение толщины слоя на коэффициент экстинкции СНПЗ-материала становится меньше единицы, поглощение энергии пропорционально уменьшается и ожидаемого увеличения чувствительности не происходит. Решением этой проблемы является введение чувствительного слоя в состав антиотражающей, так называемой трехслойной структуры [3]. Такая трехслойная структура показана на рис. 6.4. Эта четвертьволновая антиотражающая структура представляет собой тонкий чувствительный слой, выполняющий роль полупрозрачного зеркала, и высокоотражающий слой, например алюминиевый, разделенные непоглощающим диэлектрическим слоем с коэффициентом преломления  $n$ . Толщина диэлектрика должна быть согласована с длиной волны записывающего лазера. При толщине диэлектрической прослойки примерно  $\lambda/4n$  можно получить антиотражающую структуру с отражением, близким к нулю (полное отсутствие отражения света неприемлемо, так как система автофокусировки записывающего объектива основана на приеме отраженного от диска излучения). При образовании отверстия в чувствительном слое антиотражающая структура локально разрушается и отражение в этом месте

повышается до значений, соответствующих металлическому зеркальному покрытию. Таким методом в трехслойной структуре можно получить высокий контраст.

Условия антиотражения в трехслойной структуре достигаются при значительно более тонких регистрирующих слоях, чем в однослойной среде записи. Тем не менее поглощение энергии в тонком регистрирующем слое значительно выше. Поскольку прослойка диэлектрика и зеркальное покрытие практически не вносят потерь, в такой трехслойной структуре поглощается до 95% падающего света при 5%-ном отражении. Это в 2...3 раза больше той энергии, которая поглощается в оптимизированных однослойных покрытиях. Трехслойные регистрирующие среды действительно более чувствительны, чем однослойные системы, при использовании тех же материалов чувствительного слоя с низкой точкой плавления. Для достижения оптимальной чувствительности трехслойной структуры излучение на регистрирующий слой должно поступать со стороны воздуха (с «действием через воздух»).

В конструкции с «действием через подложку» чувствительный слой должен располагаться между подложкой и диэлектрическим слоем (пленкой). При этом тепловые потери в материале структуры увеличиваются почти в 2 раза и чувствительность слоя существенно падает.

Чувствительностью трехслойной структуры зачастую жертвуют с целью повышения устойчивости среды к коррозии. Это дает возможность применить для записи материалы с высокой точкой плавления, например золото и титан, что способствует увеличению срока службы оптических дисков. Тем не менее получены высокочувствительные среды для записи со сроком службы от 10 до 30 лет на основе одиночных слоев из материалов с низкой точкой плавления, например соединений  $\text{Te—Se}$  [17, 29].

Кроме металлических и полуметаллических материалов для термоперфорации пригодны чувствительные слои из органических красителей [15, 13, 26]. Органические красители могут иметь селективное очень сильное поглощение на длине волны записывающего лазера. Такие слои очень чувствительны к лазерному излучению из-за их малой теплопроводности и низкой температуры плавления, или разложения. Более того, в этих материалах достигается очень большое значение отношения сигнал-шум, так как собственный шум диска аморфных слоев практически отсутствует. Указанная особенность делает материалы такого типа особенно пригодными для видеозаписи и цифровой оптической записи с высокой плотностью информации. Органические красители имеют и другое преимущество — слои изготавливаются простым и дешевым методом нанесения покрытий на центрифуге, а не вакуумным напылением, которое применяется при производстве оптических записываемых структур с металлическими соединениями и полуметаллами.

Тем же преимуществом обладают так называемые «суспензированные» полимеры, представляющие собой взвесь очень мелких металлических частиц, например серебра, в прозрачном полимере. Оптическое поглощение такого материала велико вследствие рассеяния света металлическими частицами, а термодинамические характеристики слоев и чистого полимера близки, т. е. они являются хорошей регистрирующей средой для прямой оптической записи. Отражение материалов мало, и образованные при записи отверстия имеют низкий контраст. Такой материал применяется не только для оптических дисковых носителей, но и для носителей в виде «оптических» лент и карт [10].

**Везикулярная запись.** Другим аблятивным эффектом является образование пузырьков [12, 9]. Принцип этой записи показан на рис. 6.3, б. Регистрирующая среда представляет собой двухслойную структуру полимер — металл. При облучении металл нагревается вследствие поглощения света. Тепло передается полимеру, который разлагается при повышенных температурах (несколько сотен градусов Цельсия). Выделяющиеся газы отделяют металлическую пленку от полимера и деформируют ее, образуя вздутие (пузырек), диаметр которого почти равен диаметру записываемого пятна. Правильным выбором материала и толщины металлического слоя можно предотвратить разрыв пузырька при записи. При воспроизведении информации такого вида пузырьки выполняют роль рассеивателей падающего светового излучения лазера. При этом возможно получение контраста до 40% и отношения сигнал-шум, более чем достаточного для цифровой записи [9].

**Текстурированные слои.** Если текстурированная поверхность, подобная изображенной на рис. 6.3, в, была локально нагрета выше точки плавления материала, то расплавленная область под влиянием сил поверхностного натяжения застывает в виде плоского участка. Для обеспечения значительного оптического поглощения период поверхностной структуры делается значительно меньше, чем длина волны падающего на нее света. Плоские участки поверхности хорошо отражают, поскольку выбирается материал с хорошими отражающими свойствами. Оптический контраст следа записи на текстурированной поверхности может быть высоким, но и шум такого носителя значителен.

Существует много методов получения текстурированной поверхности, большинство из них основывается на использовании пленок германия [27]. Другим решением данной проблемы является использование текстурированных полимерных слоев с нанесенным металлическим отражающим покрытием. В этом случае эффект записи происходит не из-за расплавления полимера, а вследствие его деформации под влиянием повышенной температуры.

#### 6.4.2. ЗАПИСЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

При записи с использованием фазовых переходов геометрические изменения чувствительного слоя в принципе отсутствуют. Вместо этого изменяются его оптические константы, что приводит к изменению отражения и соответственно к появлению оптического контраста. При этом оптический контраст обычно невысок, так как оптические константы начального и конечного состояний отличаются незначительно. Контраст можно улучшить путем использования эффекта оптической интерференции, подбирая толщину слоя. На рис. 6.5 приведен результат такого подбора для поликристаллического соединения  $\text{TeSeSb}$ , которое после записи (в данном случае — плавления) застывает в аморфном состоянии с незначительно измененными оптическими константами. Данное соединение может быть использовано и для термоперфорации. В этом случае оптимальная толщина слоя составит около 25...30 нм, в то время как для записи с использованием фазового перехода из кристаллического в аморфное состояние оптимум лежит около 100 нм. Более толстый слой помогает также избежать образования сквозных отверстий в расплавленной области, при появлении которых возникает недопустимый шум в записанном сигнале.

Если при записи не происходят необратимые геометрические изменения регистрирующего слоя, то среда с фазовым переходом может быть использована в реверсивном режиме записи. Записанное состояние — метастабильное, а стертое (т. е. начальное) — стабильное при комнатной температуре. В противном случае среда с фазовым переходом может служить материалом только для аблятивной однократной записи.

**Сплавление двухслойных структур.** Существует большое количество двухслойных структур на основе химических элементов или

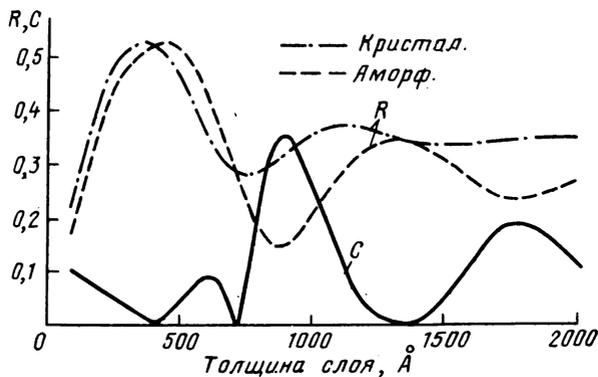
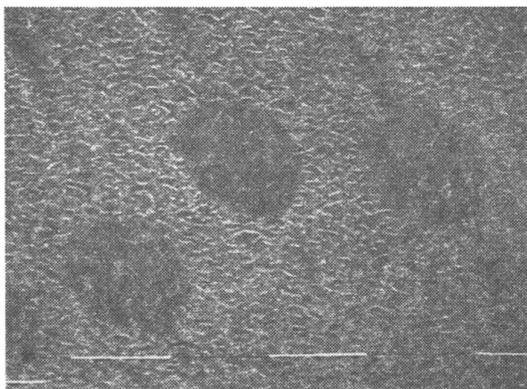


Рис. 6.5. Зависимость отражения  $R$  пленки сплава  $\text{TeSeSb}$  от толщины слоя и соответствующий оптический контраст  $C$  между кристаллическими и аморфными состояниями ( $\lambda = 800$  нм)

Рис. 6.6. Фотография шероховатой кристаллической поверхности сплава TeSeSb, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа, на которой записаны аморфные участки путем локального расплавления



соединений, образующих сплав при лазерном нагреве (см. рис. 6.3, з). Структуры этого типа очень чувствительны, так как оптическое излучение только инициирует экзотермическую реакцию между компонентами структуры, проходящую за счет внутренней химической энергии. Хорошо изучены двухслойные структуры Pt—Si и Rh—Si [1].

**Сегрегация.** Методами нанесения в вакууме можно создать тонкие многокомпонентные слои, которые под действием записывающего излучения разделяются на две или несколько стабильных фаз. Хорошо известными примерами могут быть недоокислы, из которых недоокисел теллура  $\text{TeO}_x$ , где  $x=1,1$  обладает хорошими свойствами для СНПЗ. При расплавлении это вещество распадается на прозрачный окисел ( $\text{TeO}_2$ ) и высокоотражающий металл (Te), которые отдельно кристаллизуются при комнатной температуре. Следы записи становятся более отражающими, чем окружающая их поверхность.

**Запись на переходе из кристаллического состояния в аморфное.** Третьей категорией фазовых переходов является переход из кристаллического состояния в аморфное. Многие расплавленные халькогениды имеют тенденцию застывать в аморфном состоянии при термической закалке. При оптической записи скорость спада температуры области, подвергшейся действию излучения, достигает  $10^9$  град·с<sup>-1</sup>. В таких условиях практически любое вещество становится аморфным. На рис. 6.6 показаны аморфные участки в окружении шероховатой поликристаллической поверхности, полученные на пленке TeSeSb. Возможно и обратное использование фазового перехода, когда запись представляет собой поликристаллические участки на поверхности аморфного слоя. Этот эффект был продемонстрирован на веществах  $\text{Te}_3\text{Sb}_2$  и  $\text{Se}_3\text{Sb}$  [31]. Аморфный слой нагревается до температуры, близкой к точке плавления, но не превышающей ее, в отличие от записи с использованием перехода из кристаллического состояния в аморфное. В дан-

ном случае процесс записи — это фактически локальный отжиг нестабильного аморфного слоя. Хотя явление отжига хорошо известно, но в оптической записи это отнюдь не тривиальный процесс, поскольку перекристаллизация должна происходить за время порядка 100 нс (длительность записывающего импульса) и вместе с тем аморфные участки должны быть стабильными на протяжении многих лет хранения при комнатной температуре.

Поскольку запись на переходе из кристаллического состояния в аморфное наблюдалась как в прямом, так и в обратном направлении фазового перехода, запись данного типа может быть реверсивной. В этом случае при записи происходит переход из кристаллического состояния в аморфное при локальном расплавлении слоя. Стирание данных — это переход из аморфного состояния в кристаллическое под действием отжига. Поскольку максимальные температуры на этапах записи и отжига различные, время, необходимое для отжига аморфного следа, существенно больше, чем время охлаждения расплавленного участка после действия импульса записи. Однако применение эффекта фазового перехода в реверсивной записи представляет интерес только в том случае, если стирание данных может быть осуществлено в реальном масштабе времени, т. е. без изменения скорости вращения носителя. Решение данной проблемы основывается на применении двух разделенных пятен — одно для записи и считывания, другое — для стирания.)

Пятно для записи и считывания, применяемое в оптическом устройстве записи, обычно имеет диаметр около 1 мкм; стирающее пятно — удлиненное, площадью около 10 мкм<sup>2</sup>, фокусируемое тем же объективом, который формирует пятно для записи и считывания.

Стирающее пятно, создаваемое отдельным (полупроводниковым) лазером, расположено перед пятном для записи и считывания на той же дорожке так, что его длинная ось параллельна дорожке. Таким способом удается на порядок увеличить длительность нагрева при отжиге. Тем не менее время отжига остается слишком коротким, порядка нескольких наносекунд при нормальной частоте вращения диска. До настоящего времени имеется только одно сообщение о композиции, для которой быстрое время отжига сочетается с противоречащим требованием хорошей стабильности при комнатной температуре. Эта композиция является сплавом недоокисла теллура, германия и олова [28], в котором фазовый переход, вероятно, происходит в маленьких частичках теллура, содержащихся в матрице из TeO<sub>2</sub>. Добавка германия обеспечивает стабильность композиции при комнатной температуре, а олово, очевидно, ускоряет процесс перекристаллизации и активно влияет на него только при повышенной температуре. Такие параметры записи, как чувствительность и отношение сигнал-шум, достигают значений, при которых возможны цифровая запись и видеозапись невысокого качества. Одной из возможных проблем записи на

фазовом переходе из поликристаллического состояния в аморфное является воспроизводимость цикла запись — стирание. Поскольку на этапе записи материал временно расплавлен, то такие эффекты, как сегрегация материала, испарение летучих компонентов, необратимый перенос расплава как в аблятивном процессе могут привести к своеобразной «усталости» материала, ограничивающей число полноценных циклов. В сплаве  $\text{TeO}_x - \text{Ge} - \text{Sn}$  этот эффект наблюдается на первых нескольких циклах в виде деградации отношения сигнал-шум. Однако деградация стабилизируется на допустимом уровне (около 3 дБ и менее) и далее остается неизменной в течение 1 млн циклов [28].

### 6.4.3. МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ

Теперь рассмотрим использование магнитооптических эффектов в оптической записи. Магнитооптическая запись является комбинацией оптической записи и обратимых характеристик магнитных материалов. Фактически она очень напоминает вертикальную магнитную запись — новое направление в сверхплотной магнитной памяти.

Вместо термина «магнитооптическая запись» (МО) иногда используется термин «термомангнитная запись». Это обусловлено особенностями механизма записи, который схематически иллюстрируется рис. 6. Магнитооптическая среда состоит из тонкого слоя ферро- или ферритомангнитного материала с выраженным свойством намагничиваться в одном из двух возможных направлений. Так же как и в других системах СНПЗ, запись производится нагреванием тонкой пленки лазерным импульсом. При нагреве слоя до критической температуры  $T_c$  (точки Кюри) коэрцитивное магнитное поле  $H_k$  в материале слоя падает до нуля. В этой точке материал может быть

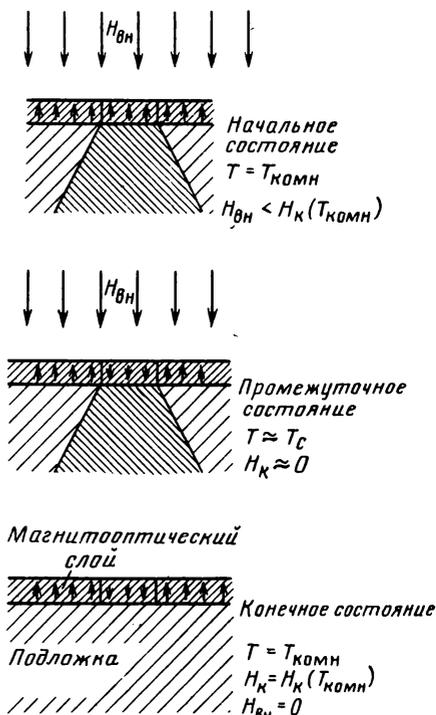


Рис. 6.7. Схематическое представление процесса записи (и стирания) в магнитооптическом СНПЗ-слое

поляризован небольшим внешним полем  $H_{вн}$  в направлении, противоположном первоначальной намагниченности. По окончании импульса нагретый участок охлаждается и восстанавливаются его свойства постоянного магнита, но с противоположным направлением намагниченности даже в отсутствие внешнего поляризующего поля  $H_{вн}$ .

Если лазерный импульс короткий и теплопроводность материала не слишком высока, то размер перемагниченного участка определяется профилем распределения температуры, соответствующим размеру пятна. Размеры внешнего поля  $H_{вн}$  не имеют особого значения, поскольку оно гораздо меньше поля внутри материала  $H_k$  при комнатной температуре, и поэтому не требуется ограничивать его размерами перемагничиваемого участка.

Описанный выше метод записи получил название «запись в точке Кюри» и используется для СНПЗ-носителей на основе ферромагнитных пленок. В ферромагнитных материалах наблюдается термомагнитный эффект другого типа, называемый «запись в точке компенсации». Он основан на различных температурных зависимостях намагниченности двух магнитных подрешеток в ферримagnetиках. Ферримagnetик может иметь определенную температуру компенсации  $T_{комп}$ , зависящую от состава материала, при которой общая намагниченность двух подрешеток равна нулю. В окрестности точки  $T_{комп}$  магнитное поле  $H_k$  обратно пропорционально  $(T - T_{комп})$ , т. е. является резко спадающей функцией температуры. Если выбран материал с  $T_{комп}$  ниже комнатной температуры, то можно получить достаточно низкое поле внутри материала  $H_k$  ( $H_k < H_{вн}$ ) при температуре, которая значительно ниже точки Кюри. При комнатной температуре, близкой к  $T_{комп}$ , внутреннее поле  $H_k$  ферримagnetика может быть гораздо больше, чем внешнее поле ферромагнетика.

Способность к вертикальному намагничиванию существенна для процесса воспроизведения записанных данных. Считывание осуществляется оптическими методами с использованием эффектов Керра и Фарадея. Эти эффекты заключаются в изменении состояния поляризации света в результате его взаимодействия с намагниченной средой. Наиболее резко они проявляются при совпадении направления намагниченности среды с направлением распространения света. При отражении эффект Керра приводит к незначительному повороту плоскости поляризации линейно поляризованного света. Направление этого вращения положительное либо отрицательное, в зависимости от того, как направлен вектор намагниченности материала — по направлению распространения света либо против. При считывании диск с магнитной записью модулирует пучок считывающего излучения лазера, если оно проходит через поляризатор, перпендикулярный к одной из осей поляризации излучения. Для малых значений поворота плоскости поляризации глубина модуляции пропорциональна углу Керра  $\theta$ .

Термомагнитная запись существенно отличается от магнитной записи, в которой форма следа записи определяется распределением в пространстве магнитного поля, создаваемого записывающей головкой. В случае магнитной записи следы записи малого размера могут быть сформированы только очень маленькой головкой, расположенной вплотную к магнитному слою. В видеомагнитофонах записывающая головка находится в контакте с носителем, что приводит к износу как носителя, так и ленты.)

В профессиональных магнитных дисковых системах используется так называемый принцип винчестера, в соответствии с которым записывающая головка «летит» очень близко (на расстоянии нескольких микрон) над поверхностью без контакта с ней [11]. Тот же принцип использован и при считывании магнитной записи, очевидно, с теми же последствиями. Магнитная запись на базе технологии винчестера требует соблюдения чистых беспыльных условий в зоне носителя и головки, для чего каждый блок привода с диском герметизируется. Поэтому магнитные дисковые системы с высокой плотностью записи относятся к типу устройств с «фиксированным шпинделем», в которых носитель, его привод и считывающая головка представляют собой неделимый блок, т.е. они очень дороги и неприемлемы для многих областей применения.)

Ранние эксперименты по магнитооптической записи были проведены на MnVi-пленках [30], однако хорошие результаты тогда получены не были. Крупнокристаллическая структура этих пленок привела к слишком высокому уровню шума, что воспрепятствовало их практическому применению. В современных работах исследуются ферримагнитные сплавы редкоземельных и переходных металлов (РЗ — ПМ), например TbFe, CdFe, CdCo. Из сплавов структуры  $PZ_{(1-x)}PM_x$ , где  $x=0,6...0,8$ , можно получать аморфные тонкие пленки с осью легкого намагничивания, перпендикулярной к поверхности [41]. С точки зрения шума носителя преимущества аморфного состояния тонкой пленки очевидны. Однако имеется недостаток, заключающийся в том, что частый переменный нагрев (запись—стирание) в одной точке может привести к перекристаллизации, разрушающей вертикальную анизотропию. Поэтому предпочтение отдается записи в точке компенсации, которая возможна в некоторых из этих сплавов, а не записи в точке Кюри. В этом случае максимальная температура в момент записи может быть значительно меньше, чем температура перекристаллизации, которая для аморфных пленок составляет около  $250^\circ\text{C}$ . Основная проблема в использовании сплавов с точкой компенсации заключается в сильной зависимости  $T_{\text{комп}}$  от стехиометрии сплава. В наиболее популярном сплаве CdFe точка компенсации смещается приблизительно на  $100^\circ\text{C}$  при изменении соотношения между компонентами всего на 1% [4]. Поэтому для достижения высокой гомогенности и воспроизводимости требуется высокоразвитая прецизионная технология нанесения пленок.)

Для этих материалов важное значение имеет низкий уровень шума диска, поскольку угол вращения Керра очень мал, обычно  $0,2...0,4^\circ$ . Даже при отсутствии шума диска отношение сигнал-шум, обусловленное только дробовым шумом, не позволяет осуществить высококачественную запись видеоинформации (стандарт Laser Vision). Следовательно, в настоящее время сфера применения магнитооптической записи ограничена только областью цифровой информации с приемлемыми значениями плотности скорости записи [5] и низким качеством видеозаписи.)

Обусловленное дробовым эффектом отношение сигнал-шум, которое пропорционально  $\theta R^2$ , где  $R$  — коэффициент отражения магнитооптического слоя, можно увеличить, вводя магнитооптический слой в резонансную систему типа трехслойной структуры [23]. Многократные внутренние отражения увеличивают угол вращения Керра  $\theta$ , но в то же время коэффициент отражения падает. Тем не менее общий результат улучшается: коэффициент отражения  $R$  может быть уменьшен лишь до определенного значения, а отношение сигнал-шум возрастает не более чем на  $3...5$  дБ. Это увеличение может быть получено только применением сложной напылительной техники и уменьшением толщины покрытия. Толщина в этом случае составляет  $10$  нм вместо  $100$  нм в однослойной структуре; это оказывает влияние на длительность срока службы носителя. Редкоземельные и переходные металлы легко окисляются, и соответственно чем тоньше слой, тем меньше срок его службы. Практически магнитооптический слой, вероятно, не сможет работать без герметизации. Это можно объяснить тем, что диэлектрическая прослойка трехслойной структуры может одновременно выполнять функции защитного покрытия. В настоящее время исследуется возможность использования плотных покрытий из  $\text{AlN}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiN}$ ,  $\text{SiO}_2$  для изготовления таких трехслойных структур.)

Особый интерес представляет определение минимально возможного размера следа записи и его стабильности, которые зависят от магнитных свойств слоя — намагниченности  $M$ , внутреннего магнитного поля  $H_k$  и энергии доменной стенки  $\sigma$  [18]. Недавно сообщалось [22], что минимальный размер следа записи, который пропорционален  $\sigma/MH_k$ , в сплавах РЗ — ПМ не может быть получен менее  $1$  мкм.)

## 7. КАНАЛЬНОЕ КОДИРОВАНИЕ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ДИСКОВЫХ СИСТЕМ

*К. Шухамер-Имминк*

### 7.1. ФОРМАТЫ КОДИРОВАНИЯ ВИДЕОСИГНАЛОВ PAL и NTSC В СИСТЕМЕ LASER VISION

#### 7.1.1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СИСТЕМЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

Используемые формат модуляции и кодирования выбраны таким образом, чтобы удовлетворять специфическим требованиям оптического канала. Основными особенностями канала являются ограничение полосы сигнала и асимметрия процесса записи. Размеры элемента записи, ограничивающие полосу сигнала, определяются конечным диаметром пятна и тангенциальной скоростью дорожки. Длина дорожки зависит от диаметра диска и интервала между дорожками, поэтому тангенциальная скорость прямо связана с временем воспроизведения. Как указывалось в гл. 2, оптимальный диаметр пятна определяется длиной волны  $\lambda$  излучения лазера и числовой апертурой NA фокусирующего объектива. Абсолютная ширина полосы сигнала при оптическом воспроизведении  $v = 2NA/\lambda$ .

Пространственная частота  $\nu$  на диске и тангенциальная скорость дорожки определяют частоту электрического сигнала:

$$f = v_T \nu = 2\pi R f_{вр} \nu,$$

где  $R$  — радиус сканируемой дорожки;  $f_{вр}$  — угловая частота вращения диска. Если угловая частота вращения фиксирована, то частотная характеристика является функцией радиуса.

На рис. 7.1 представлены амплитудно-частотные характеристики воспроизводящей системы для нескольких радиусов, соответствующие числовой апертуре 0,4 и длине волны 633 нм (He-Ne-лазер). Угловая скорость вращения диска 25 Гц, что соответствует телевизионному стандарту PAL (в случае стандарта NTSC 30 Гц). Частота отсечки на внутреннем радиусе ( $R = 55$  мм) равна 10,9 МГц и возрастает до 29 МГц на внешнем радиусе ( $R = 145$  мм). Для записи используются более короткие длины волн и более высокие числовые апертуры. Например, для  $\lambda = 458$  нм и  $NA = 0,7$  частотная характеристика записи расширяется в 2,5 раз по сравнению с характеристикой считывания (см. гл. 5).

На выбор системы модуляции существенное влияние оказывает наличие шумов и нелинейных элементов в канале передачи. Можно отметить три основных источника шумов [12]:

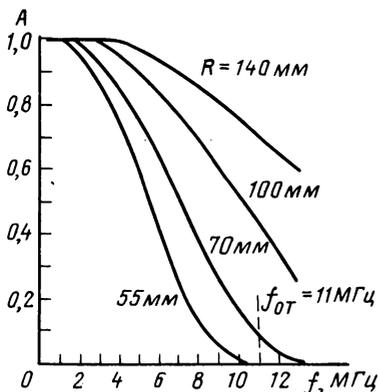


Рис. 7.1. Амплитудно-частотные характеристики воспроизводящей системы. Параметр кривых — радиус сканирования

шум диска, обусловленный шероховатостью поверхности диска и отклонениями размеров пит;  
шум предусилителя;  
шум лазера.

В канале передачи имеется несколько нелинейных элементов [11, а также см. гл. 2]. Двухуровневый сигнал записи обычно формируется с помощью усилителя-ограничителя в ЧМ-модуляторе. Асимметрия срабатывания ограничителя приводит к отличному от нуля значению усредненного по времени сигнала записи, которое обуславливает наличие интермодуляционных составляющих от различных частот источника. Другие нелинейности появляются на стадиях записи, обработки и тиражирования. Сам метод воспроизведения также нелинеен.

### 7.1.2. ПРИМЕРЫ СХЕМ КОДИРОВАНИЯ СИГНАЛА

Сигнал цветного телевидения в основном состоит из черно-белого (яркостного) сигнала и цветовой информации (сигнала цветности), вводимой с помощью поднесущей. При стандарте разложения сигнала PAL на 625 строк частота поднесущей составляет 4,43 МГц, при стандарте 525 сигнала NTSC — 3,58 МГц. Ниже будет показано, что в большинстве систем кодирования композиционный сигнал цветности снова делится на сигналы яркости и цветности. Сигнал яркости проходит через узкополосный фильтр для выполнения требований по ширине полосы, обусловленных средой записи, что приводит к увеличению времени воспроизведения. Недостатком этой техники является снижение разрешения телевизионного изображения как по яркости, так и по цвету.

Особенностью оптической дисковой записи является то, что записываются два уровня, называемые пит и плоскость. Следовательно, в видеодисках могут быть применены только частотная, фазовая и (или) широтно-импульсная модуляция. В [25] приведе-

ны примеры основных систем модуляции, которые применяются в настоящее время в различных перечисленных ниже видеодисковых системах.

А. Линейные последовательные системы. Примером является система TRIPAL [5], использованная в видеодисковой системе TELDEC. Система записи характеризуется линейной последовательностью сигналов красного ( $R$ ), зеленого ( $G$ ) и синего ( $B$ ) цветов с полосой 600 кГц, которая затем расширяется до 3 МГц, чтобы ввести информацию о яркости.

Б. Система с переносом цвета вниз. В данном случае цветовая поднесущая переносится в область нижних частот и складывается с ЧМ-сигналом яркости с помощью широтно-импульсной модуляции [19]. Этот принцип заложен во все потребительские видеоманитофоны.

В. Система со скрытой поднесущей. Видеодисковые системы RCA и VHD используют так называемую систему модуляции со скрытой поднесущей [7]. Термин «скрытая поднесущая» указывает на метод, при котором цветовая поднесущая и ее модуляционные составляющие располагаются в относительно низком частотном диапазоне внутри широкополосного сигнала яркости таким образом, чтобы обеспечить минимальную интерференцию, а также возможность легкого разделения в проигрывателе сигналов яркости и цветности и преобразования их в стандартный формат NTSC (или PAL).

Г. Прямая или составная система модуляции. В этой системе, используемой в формате Laser Vision, стандартные сигналы PAL или NTSC прямо переводятся в ЧМ-сигнал и записываются на диск 25.

В данной системе не нужна обработка исходного сигнала с целью выделения цветовой поднесущей, ухудшающая качество изображения, и видеосигнал может быть декодирован в проигрывателе с помощью только одного частотного демодулятора. Следовательно, основными мотивами выбора кодирования составного сигнала в системе Laser Vision являются обеспечение качественного изображения и простота декодирующей электроники. Другим преимуществом выбора нестандартизованного МККР композитного формата является легкость ввода в сигнал информации типа телетекст, что делает систему Laser Vision очень привлекательным источником видеoinформации.

В следующем подразделе более детально изложены трудности, связанные с прямой частотной модуляцией композитного сигнала.

### 7.1.3. ПРЯМАЯ ЧАСТОТНАЯ МОДУЛЯЦИЯ

Трудности, возникающие при прямой частотной модуляции, обусловлены в основном особенностями спектра составного видеосигнала PAL или NTSC. Как правило, огибающая спектра

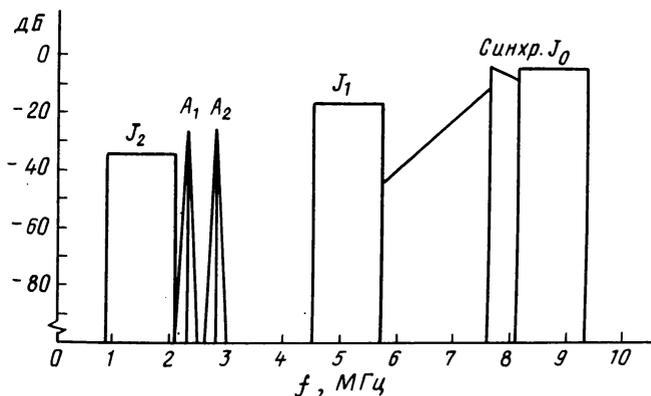


Рис. 7.2. Частотный спектр видеосигнала системы NTSC

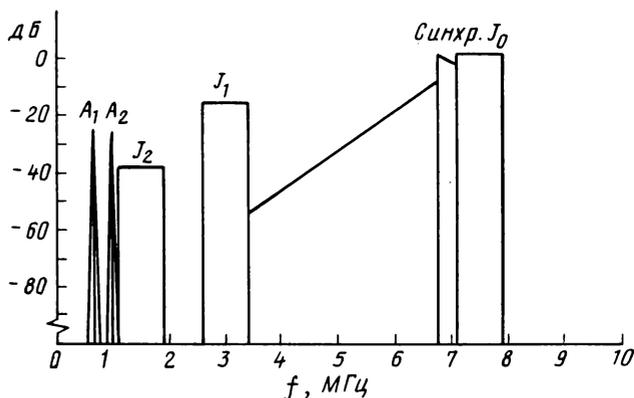
понижается с увеличением частоты. Пик наблюдается на частоте цветовой поднесущей. При прямой частотной модуляции, как уже отмечалось, возникает большое количество боковых составляющих, которые после демодуляции могут интерферировать на телевизионном изображении. Проведенные эксперименты показали, что, в частности, спектральные составляющие цветовой поднесущей вызывают эффект типа муаровых полос, снижающий качество изображения. Изучение источников интерференции может быть основано на простой модели, в которой основная несущая модулируется по частоте синусоидальным сигналом с частотой  $\omega_0$ , соответствующей цветовой поднесущей. Будем следовать работе [25].

Если основная несущая  $J_0$  с частотой  $f_0$  модулирована по частоте сигналом поднесущей частоты  $f_{\text{пн}}$ , то спектр после ограничения представляет собой бесконечную сумму

$$f(t) = J_0(m) \cos \omega_0 t - J_1(m) [\cos (\omega_0 - \omega_{\text{пн}}) t - \cos (\omega_0 + \omega_{\text{пн}}) t] + J_2(m) [\cos (\omega_0 - 2\omega_{\text{пн}}) t + \cos (\omega_0 + 2\omega_{\text{пн}}) t] + \dots,$$

где  $J_0(m)$ ,  $J_1(m)$  — функции Бесселя, аргументом которых является индекс модуляции  $m$ . Хотя это выражение описывает спектр бесконечной ширины, хорошо известно, что амплитуды спектральных составляющих, определяемые функциями Бесселя  $J_0(m)$ ,  $J_1(m)$  и т. д., резко падают с ростом индекса модуляции  $m$ . Индекс модуляции может быть найден следующим образом. В случае сигнала системы NTSC ЧМ-модулятор имеет девиацию частоты от уровня черного до уровня белого 8,0...9,2 МГц. Частота, соответствующая уровню синхрои́мпульсов, находится на 7,5 МГц. На рис. 7.2 показан спектр закодированного видеосигнала. Видно, что основная несущая  $J_0$  и боковые полосы первого и второго порядков цветовой поднесущей находятся на расстоянии 3,58 МГц. На рисунке показаны также две несущие  $A_1$  и  $A_2$ , используемые для передачи звука (см. подразд. 7.1.4). Для улучшения отношения сигнал-шум демодулированного видеосигнала применяется преэ́мфазис (предыскажения).

Рис. 7.3. Частотный спектр видеосигнала системы PAL



Максимальное усиление на высоких частотах при записи  $a=2$ . Итоговый индекс модуляции для боковых составляющих сигнала цветности

$$m = \frac{a\Delta\omega}{\omega_{\text{цв}}} \frac{V_{\text{цв}}}{V_{\text{я}}},$$

где  $2\Delta\omega$  — девиация от уровня черного до уровня белого (1,2 МГц);  $V_{\text{цв}}$  — размах сигнала цветности;  $V_{\text{я}}$  — амплитуда сигнала яркости от уровня черного до уровня белого. Для  $V_{\text{цв}}=675$  мВ (75% насыщенного синего или красного цвета) имеем  $m=0,32$ ,  $J_1=-16$  дБ и  $J_2=-38$  дБ.

Для системы PAL ситуация несколько иная. Для удовлетворения требований к полосе сигнала (в системе PAL частота поднесущей 4,43 МГц) в этом случае частота основной несущей уменьшена до 7,6 МГц. Основания этого выбора будут изложены далее. Уменьшение частоты основного сигнала приводит к появлению спектральных составляющих второго порядка, сопровождающих положительную частоту  $2 \times 4,43 - 7,6 = 1,22$  МГц. Спектральная составляющая  $J_2(m)$  сигнала цветности интерферирует с высокими частотами сигнала яркости при демодуляции. Ограничение частоты несущей  $f_0$  определяется просто  $f_0 = 2f_{\text{пн}} - f_0 + B_{\text{в}}$ , где  $B_{\text{в}}$  — полоса видеосигнала (5,5 МГц) и  $f_{\text{пн}}$  — поднесущая системы PAL (4,43 МГц), т. е.  $f_0 > 7,18$  МГц. Частотный спектр закодированного видеосигнала системы PAL приведен на рис. 7.3. Несущие звукового сигнала  $A_1$  и  $A_2$  обсуждаются в следующем подразделе.

#### 7.1.4. ОБРАБОТКА ЗВУКА В ВИДЕОДИСКОВОЙ СИСТЕМЕ

На рис. 7.2 и 7.3 изображены спектры видеосигналов систем NTSC и PAL, содержащих также и звуковые сигналы. Стерефонические звуковые сигналы закодированы с помощью частотной модуляции двух несущих и введены в видеосигнал с помощью

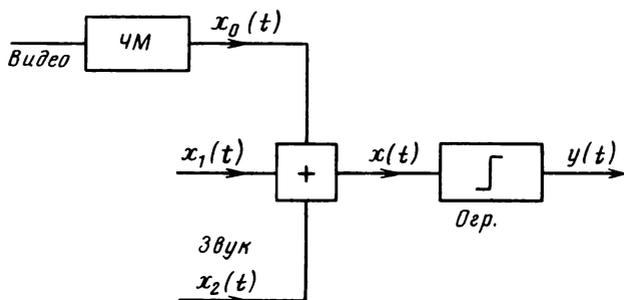


Рис. 7.4. Формирование широтно-импульсного модулирующего сигнала

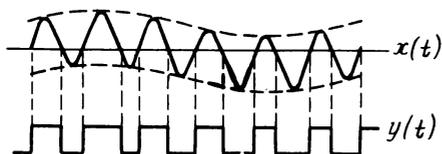


Рис. 7.5. Принцип широтно-импульсной модуляции во временной области (обозначения аналогичны рис. 7.4)

широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Как видно из рис. 7.4, ЧМ-стереосигналы  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  линейно складываются с сигналом на выходе ЧМ-модулятора видеосигнала и затем поступают на ограничитель. Это приводит к широтно-импульсной модуляции сигнала, как показано на рис. 7.5. Уровень звуковых несущих составляет  $-26$  дБ относительно немодулированной несущей видеосигнала как в системе PAL, так и в NTSC. В системе NTSC частоты звуковых несущих равны  $2,31136$  МГц ( $146,25 \times F_{стр}$ ) для канала I (левый) и  $2,812499$  МГц ( $178,75 \times F_{стр}$ ) для канала II (правый) ( $F_{стр}$  — частота строк, равная  $15734$  Гц). Частоты звуковых несущих расположены относительно несущей видеосигнала так, что спектральные составляющие звука находятся между спектральными составляющими видеосигнала, т. е. обеспечивается минимальный уровень интермодуляционных искажений в декодированном видеосигнале.

Перед кодированием в звуковой сигнал вводится предскажение, что приводит к максимальному уклону  $150$  кГц.

#### 7.1.5. НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ

Как показано в предыдущих разделах, в существующем формате Laser Vision аналоговые звуковые ЧМ стереосигналы складываются с закодированным видеосигналом с помощью широтно-импульсной модуляции. Максимальное отношение сигнал-шум в звуковых каналах формата Laser Vision для стандарта 525 системы

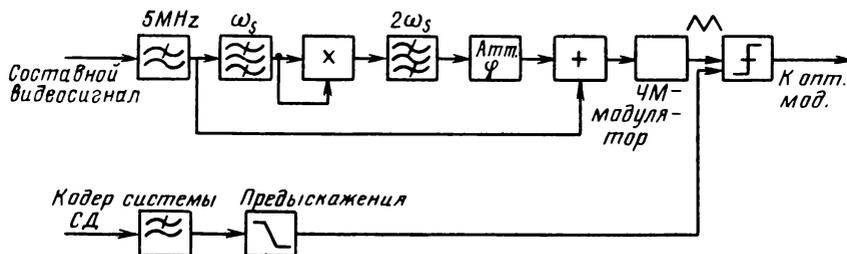


Рис. 7.6. Пример реализации подавления боковой полосы второго порядка  $J_2$ . Ослабление и сдвиг фазы  $\varphi$  подобраны таким образом, что они компенсируют  $J_2$

NTSC сейчас составляет около 70 дБ, включая улучшение на 15 дБ за счет использования системы шумоподавления [7.1].

Для стандарта 625 систем PAL и SECAM в формате Laser Vision звуковой сигнал приблизительно на 10 дБ превышает сигнал в системе NTSC. Для потребителей, предпочитающих музыкальные видеопрограммы, такие как концерты и оперы, любое улучшение качества звука очень важно. Цифровая звуковая система Compact Disc имеет исключительное качество звучания (см. разд. 7.2). Эти соображения обуславливают необходимость исследования возможности совмещения видеосигнала системы Laser Vision и звукового сигнала Compact Disc на одном диске [17].

Сначала вернемся к предыдущему разделу, где описывается спектр сигнала формата Laser Vision. На рис. 7.2 изображен спектр сигнала NTSC в формате Laser Vision. Видно, что диапазон частот от постоянного тока до 2 МГц не используется. Первая звуковая поднесущая расположена на частоте 2,3 МГц. В диапазоне до 2 МГц существует гармоника второго порядка сигнала цветности  $J_2$ , которая не используется при декодировании и может быть практически полностью подавлена радиотехническими средствами. Схема цепи приведена на рис. 7.6 [8].

По своей сути метод является компенсационным: сначала отфильтровывается сигнал цветности композитного видеосигнала. Вторая гармоника этого сигнала генерируется с помощью квадратурного устройства и полосового фильтра. Затем в первоначальный композитный сигнал системы добавляется удвоенный по частоте сигнал цветности с необходимой амплитудой и фазой. После частотной модуляции гармоника  $J_2$  подавляется. Теперь в нашем распоряжении полный спектр от постоянного тока до 2 МГц. Полоса, требуемая для звукового ШИМ-сигнала, например в формате Compact Disc (16-битное линейное квантование с частотой выборки 44,1 кГц), составит приблизительно 1,4 МГц (см. также следующий раздел). Добавление цифрового звукового сигнала становится совсем простым, и при этом снова применена широтно-импульсная модуляция. Двухуровневый модулированный сигнал (может быть использована модуляция 8/14 аналогично тому, как это сделано

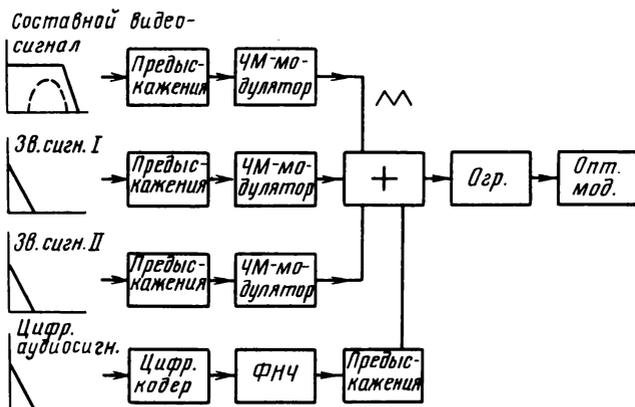


Рис. 7.7. Структурная схема системы обработки и кодирования комбинированного видео- и цифрового звукового сигнала. Для форматов PAL и NTSC схемы одинаковы; изменяются некоторые параметры. Следует иметь в виду, что для формата PAL несущие аналогового звукового сигнала должны быть исключены. В этом случае ЧМ-модулятор дополняется схемой компенсации  $J_2$  (см. рис. 7.6)

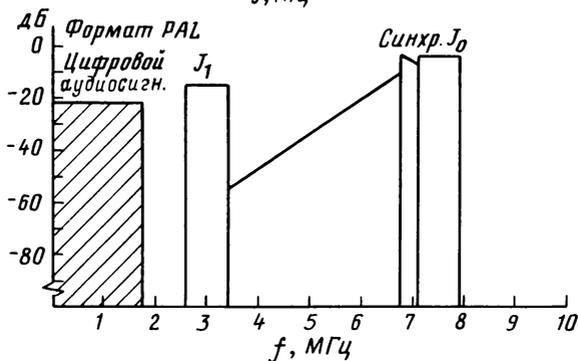
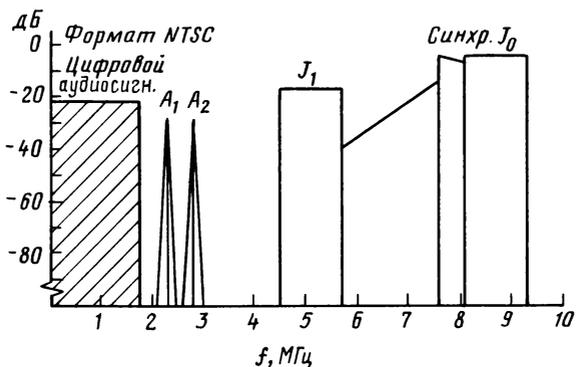


Рис. 7.8. Результирующие спектры телевизионных форматов NTSC и PAL

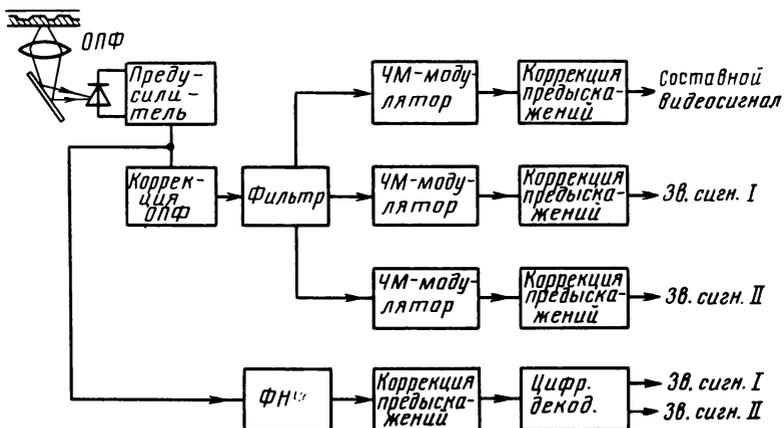


Рис. 7.9. Структурная схема обработки сигнала в видеопроеигрывателе Laser Vision. Цифровой звуковой сигнал может быть выделен линейной фильтрацией

в системе Compact Disc) пропускается через фильтр низкой частоты (ФНЧ) для подавления интерференции в изображении, в него вводятся предискажения и сигнал направляется на вход широкоимпульсного модулятора видеокодирующего устройства. Расширение кодирующего устройства производится непосредственно (рис. 7.7). На рисунке изображено стандартное видеокодирующее устройство с добавочным входом широкоимпульсного модулятора. Результирующие спектры телевизионных форматов NTSC и PAL изображены на рис. 7.8, где ясно видна полоса частот, занятая цифровым звуковым сигналом. Сам видеопроеигрыватель системы LV требует минимальной доработки (рис. 7.9): необходимо выделить низкочастотную составляющую сигнала фотодиода и подать ее на стандартный ШИМ-декодер, аналогичный декодеру системы CD, который может быть применен в неизменном виде.

Очевидно, что вновь разработанная система совместима с видеопроеигрывателем, предназначенным для работы в старом формате. К сожалению, это возможно только для формата NTSC. В случае формата PAL несущие аналогового звукового сигнала расположены на частотах 0,5 и 0,7 МГц. Иными словами, для добавления цифрового сигнала необходимо удалить эти несущие.

Было проведено много экспериментов по исследованию отношения сигнал-шум цифрового сигнала, закодированного в низкочастотной области спектра. В лабораторных условиях исследовался процесс считывания при неидеальных оптических ситуациях (дефокусировка и нарушение слежения за дорожкой). Эксперименты показали, что количество ошибок до их коррекции больше, чем в случае воспроизведения компакт-диска в нормальных

условиях, однако после коррекции ошибок отмечено совсем немного фрагментов неудовлетворительного качества.

Возможности цифрового сигнала не ограничены его применением исключительно для звука; он также может быть использован для хранения цифровой информации. Если учесть, что LV-видеодиск содержит 50 000 кадров для варианта ПУС, то легко убедиться, что закодированный в низкочастотной области цифровой канал на диске имеет емкость 0,5 Гбайт для получасового воспроизведения. Иными словами, 10 кбайт информации на кадр. Это обеспечивает колоссальные возможности для хранения информации.

## 7.2. ЦИФРОВАЯ ЗВУКОВАЯ СИСТЕМА COMPACT DISC

В середине 70-х годов были начаты исследования, связанные с возможностью хранения высококачественной звуковой информации на оптических дисках. В первых экспериментах применялась частотная модуляция с высоким индексом модуляции для улучшения отношения сигнал-шум демодулированного звукового сигнала. Эксперименты показали, что система на основе частотной модуляции не может дать удовлетворительных результатов. Основной причиной этого вывода послужил тот факт, что мельчайшие дефекты на диске, называемые выпадениями, приводили к ясно слышимым щелчкам. Единственным выходом было применить «цифровой звук». В этом формате сигнала студийный звуковой сигнал измеряется через фиксированные временные интервалы (осуществляется дискретизация), квантуется и затем обрабатывается цифровыми схемами, хорошо известными в области цифровых компьютеров.

Преимуществом цифрового формата является возможность использования корректирующей выпадения схмотехники, с помощью которой можно исправить большинство встречающихся ошибок.

Совместное использование схем коррекции ошибок и аппроксимации сигнала позволяет справиться почти с любым нарушением детектируемого сигнала. Недостатком использования цифрового звукового сигнала является существенное увеличение полосы частот, необходимое для его передачи или записи. Скорость передачи цифрового звукового сигнала, используемого в системе Compact Disc, около  $2 \text{ Мбит} \cdot \text{с}^{-1}$ . Как было показано, плотность записи информации на оптическом диске достигает  $1 \text{ бит} \cdot \text{мкм}^{-2}$ , т. е. время воспроизведения одностороннего диска диаметром 12 см более 1 ч. Эту гигантскую емкость можно сравнить, например, с емкостью гибких мини-дисков, обычно используемых в персональных компьютерах. Эти диски имеют емкость около 1...2 Мбит, что эквивалентно только 0,5...1 с длительности проигрывания.

Другой специфической особенностью системы CD является то, что наряду со звуковой информацией записываются данные управ-

ления и контроля, так называемые C&D биты. Эти данные включают прежде всего такую информацию для слушателя, как время проигрывания, имя композитора и название музыки. Служебный канал C&D имеет емкость около  $70 \text{ кбит} \cdot \text{с}^{-1}$  и полностью отделен от звуковых каналов.

В системе LV сигнал записывается с помощью частотной модуляции. Каждый переход от плоскости к питу и наоборот содержит информацию для видеодекодера. Фактически возможна любая разность между минимальным и максимальным значениями длин пита и плоскости. В случае формата Compact Disc это не так. Здесь интервалы между переходами могут принимать только девять значений и все длины интервалов кратны определенной единице.

В системе Compact Disc аналоговый звуковой сигнал дискретизируется с частотой  $44,1 \text{ кГц}$ , что в соответствии с критерием Найквиста достаточно для воспроизведения максимальной частоты звука  $20 \text{ кГц}$ . Число бит на один элемент дискретизации равно 32, т. е. 16 для правого и 16 для левого каналов стереозвука. Это соответствует отношению сигнал-шум, обусловленному квантованием, более 90 дБ.

Простое вычисление показывает, что первичный поток информации составляет  $44,1 \times 1000 \times 32 = 1,41 \cdot 10^6$  бит звукового сигнала в секунду. Биты звукового сигнала сгруппированы в так называемые кадры, каждый из которых содержит шесть исходных элементов дискретизации стереофонического сигнала.

Биты для коррекции ошибок вводятся в соответствии с CIRC [26]. После этого поток информации (на каждые три бита исходной информации вводится дополнительный бит) составляет  $4/3 \times 1,41 = 1,83 \text{ Мбит/с}$ . Затем в каждый блок добавляется 8 бит служебной C&D информации и полный поток модулируется в соответствии с правилами модуляции 8/14 (восемь в четырнадцать — ВЧМ) [13]. В коде ВЧМ блоки из 8 бит информации преобразуются в 17 канальных бит со специфическими особенностями, позволяющими использовать их в оптических каналах. После введения синхронизирующих последовательностей скорость передачи информации в канале равна  $4,3218 \text{ Мбит} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Полученный таким образом двухуровневый сигнал используется в процессе изготовления диска-оригинала (см. гл. 5) для включения или выключения лазерного луча, воздействующего на диск-оригинал.

Считывание диска осуществляется в основном таким же образом, что и дисков Laser Vision. В проигрывателе сигнал фотодиода демодулируется ВЧМ-декодером. Демодулированная информация поступает в цепи коррекции ошибок и детектирования, где исправляется большинство ошибок диска.

Например, изменения скорости диска, обусловленные его эксцентриситетом, вызывают вибрации и искажения. Эта проблема может быть просто решена использованием буферной памяти [6].

Ввод информации в буферную память осуществляется со скоростью, зависящей от скорости вращения диска, а вывод потока данных — со скоростью, синхронизированной с частотой опорного кварцевого генератора. Средняя скорость диска контролируется с помощью данных об усредненном объеме буферной памяти. Из буферной памяти информация извлекается уже с точностью, определяемой кварцевым генератором, и вводится в цифроаналоговый преобразователь [10, 22], где восстанавливается аналоговый стереосигнал. В следующих подразделах описаны основные принципы выбора системы модуляции 8/14, а также способ обнаружения и исправления ошибок на диске с помощью дополнительных бит, коррекции ошибок и проверки на четность.

### 7.2.1. СИСТЕМНЫЕ АСПЕКТЫ И МОДУЛЯЦИЯ

Как отмечалось выше, информация из схемы коррекции ошибок передается в модулятор, который преобразует поток информации в двухуровневый сигнал со специфическими особенностями.

Выбор кода канала может оказаться сложным вопросом, если учесть физические свойства канала передачи. Одним из важных факторов является эффективность использования поверхности записи, т. е. число бит на единицу поверхности, которые могут быть достоверно записаны на диске. Другой фактор — достоверность считывания информации. Достоверность системы определяется погрешностями, которые могут быть допустимы на оптической дорожке. Будет показано, что выбор конкретной системы кодирования влияет на предельные допуски на конструкцию диска и проигрывателя. Наиболее важным параметром канала передачи является его полоса пропускания. В оптических дисковых системах полоса пропускания непосредственно зависит от диаметра пятна считывания и скорости сканирования. Диаметр пятна  $d$ , определяемый как полная ширина кривой распределения интенсивности излучения на полувысоте, может быть рассчитан по формуле

$$d = 0,5\lambda/NA,$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения лазера;  $NA$  — числовая апертура фокусирующего объектива. Для получения высокого значения плотности записи информации в радиальном и тангенциальном направлениях  $d$  должен быть как можно малым. Выбранный для системы CD лазер — это небольшой лазер на основе AlGaAs с длиной волны излучения около 700 нм. Это значит, что  $NA$  должна быть предельно большой. Однако с увеличением  $NA$  предельные конструкционные допуски оптической дорожки резко ужесточаются. Например, допуск локального наклона диска относительно оптической оси пропорционален  $(NA)^{-3}$ , допуск на толщину диска —  $(NA)^{-4}$  и глубину фокусировки —  $(NA)^{-2}$ . С учетом взаимосвязи

всех этих факторов было выбрано значение  $NA=0,45$ , при котором  $d \approx 1$  мкм.

Рассмотрим теперь свойства полосы пропускания двухуровневых канальных кодов. Существует много кодов, однако ни один из них не может быть выбран как абсолютно наилучший. Поэтому в их основу следует положить теоретические данные, так называемые максэнтропийные последовательности с ограниченными длинами серий, играющие ключевые роли в разработках канального кодирования и применяющиеся в системах хранения информации. Выбор ВЧМ-системы модуляции для компакт-диска полностью основан на теории так называемых бинарных последовательностей с ограниченными длинами серий. Эта теория разработана Каутцем [18], Тангом и Балом (1970) [24]. С использованием системы обозначений Танга определим бинарную  $(d, k)$ -последовательность как последовательность, одновременно удовлетворяющую следующим двум условиям:

( $d$ )-ограничение: две логические единицы разделены не менее чем  $d$  последовательными логическими нулями;

( $k$ )-ограничение: число последовательных логических нулей не более  $k$ .

Последовательность, удовлетворяющая ( $d$ )- и ( $k$ )-ограничениям, называется  $(dk)$ -последовательностью. Последовательности, удовлетворяющие только ( $d$ )-ограничению, называются ( $d$ )-последовательностями. Из  $(dk)$ -последовательности можно получить двоичную последовательность с ограниченными длинами серий, содержащую не менее  $(d+1)$  и не более  $(k+1)$  последовательных нулей (или единиц), с помощью суммирования по модулю 2  $(dk)$ -последовательности. В этом случае единицы  $(dk)$ -последовательности указывают на положение перехода нуля в единицу (или единицы в ноль) в последовательности с ограниченными длинами серий. Танг и Бал [27] вывели простые рекуррентные соотношения для числа различных  $(dk)$ -последовательностей длины  $n$  как функции ограничений  $d$  и  $k$ . Рассмотрим для простоты только  $d$ -ограниченные последовательности. Тогда число различных двоичных последовательностей  $N(n)$  длины  $n$

$$N(n) = \begin{cases} n+1, & 1 \leq n \leq d+1, \\ N(n-1) + N(n-d-1), & n > d+1. \end{cases}$$

Асимптотическая скорость передачи информации  $R$ , определяемая как максимальное количество бит информации ( $< 1$ ) на один канальный бит, передаваемое посредством последовательности с ограниченными длинами серий, зависит от определенных ограничений и описывается формулой

$$R = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \log_2 N(n).$$

Для больших  $n$  число различных  $d$ -последовательностей

$$N(n) \sim \mu^n,$$

где  $\mu$  — наибольший корень уравнения

$$z^{d+1} - z^d - 1 = 0.$$

Тогда максимальное значение скорости передачи информации

$$R = \log_2 \mu.$$

Подобные соотношения могут быть выведены для последовательностей с  $d$ - и (или)  $k$ -ограничениями. Например, при  $d=1$  для кодовых слов длиной  $n$  получаем числа:  $N(n)=2, 3, 5, 8, 13, 21$  и т. д., которые образуют последовательность чисел Фибоначчи.

В процессе модуляции входной поток информации преобразуется в выходной поток ограниченных групп. В общем случае блок из  $m$  последовательных бит информации преобразуется в  $n$  последовательных канальных бит. Такой формат называется блоковым канальным кодом. Существование максимального значения скорости передачи попросту отражает тот факт, что  $m/n < R = R(d, k)$  для любых конечных значений  $m$  и  $n$ . Если требуется передать (записать) определенное фиксированное количество информации за единицу времени, то для компенсации  $d$ - и  $k$ -ограничений тактовая частота канала должна быть по крайней мере в  $1/R$  раз больше, чем тактовая частота потока данных. Иными словами, длительность канального бита короче длительности информационного бита по крайней мере в  $R$  раз. Отношение минимального физического расстояния \* к длине информационного бита для последовательности с ограниченными длинами серий, полученной в результате сложения по модулю 2 из  $(dk)$ -последовательности, в этом случае

$$T_{\min}/T = (d+1)R(d, k),$$

где  $T$  — длительность информационного бита. В табл. 7.1 приведены значения  $R$  и  $T_{\min}/T$  для различных значений  $d$ , представляющих практический интерес. Как  $R$ , так и  $T_{\min}$  нормированы на длительность одного информационного бита. Значения  $R$  и  $T_{\min}/T$  в таблице являются теоретическими максэнтропийными пределами.

Анализ данных табл. 7.1 показывает, что при увеличении  $d$  минимальное расстояние между переходами  $T_{\min}$  может быть увеличено, скорость  $R$  уменьшается с ростом  $d$ . Можно сделать качественный вывод о том, что  $T_{\min}/T$  определяет наибольшую относительную частоту сигнала, который должен проходить через канал без искажений. Из таблицы ясно виден обмен между  $T_{\min}/T$ , т. е. наивысшей записываемой частотой сигнала, и временной точностью  $R$ . Важность изучения максэнтропийных последовательностей состоит в том, что они не зависят от конкретной реализации канального кода. Достоинство, делающее данное исследование

---

\* Минимальной длины канального бита.— Прим. перев.

Таблица 7.1. Максимальная скорость  $R$  и  $T_{\min}/T$  для различных  $d$

$d$	$R$	$T_{\min}/T$
1	0,69	1,38
2	0,55	1,65
3	0,46	1,84

еще более привлекательным с практической точки зрения, состоит в том, что реализация канальных кодов аппаратными средствами позволяет легко достигать 90...95% максимальных значений, приведенных в таблице работы [2].

Масштабирование результатов компьютерного моделирования максэнтропийной последовательности приводит к общей теории, независимой от конкретной реализации системы модуляции.

Качество цифрового канала обычно оценивается с помощью «глазковой диаграммы», которая получается при наблюдении сигнала на осциллографе, синхронизированном с тактовой частотой потока бит. На экране получается суперпозиция сигналов от различных пит и промежутков. Демодулятор проигрывателя определяет, является сигнал положительным или отрицательным в моменты переключения тактовых импульсов (штриховая кривая на рис. 2.41) и, таким образом, восстанавливает поток бит. Ромбический участок, ограниченный осциллограммами на экране осциллографа (см. рис. 2.39, *a*), называется «глазком». Он может исчезать из-за погрешностей канала. Сигнал на рис. 2.39, *a* рассчитан для идеальной оптической системы. На рис. 2.43 проиллюстрирован эффект значительной расфокусировки в 4 мкм; обычно широкополосные свойства канального кода оценивают по зависимости высоты глазка от тангенциальной плотности записи. Минимально допустимая величина сигнала в моменты дискретизации определяется по наилучшему раскрытию глазка или наименьшей его высоте. Если предположить, что процесс считывания линейный, то выходной сигнал оптического канала является сверткой импульсного отклика оптического канала и структуры пит на диске. Если структура пит идеально двухуровневая, а импульсный отклик оптического канала имеет, например, форму гауссова распределения, можно весьма просто рассчитать зависимость высоты глазка от тангенциальной плотности информации [15].

На рис. 7.10 представлена зависимость минимальной высоты глазка в худшем случае от нормированной плотности информации, причем в качестве параметра служит  $d$  и, следовательно,  $T_{\min}$ . Все эти расчеты базируются на теоретической максимальной скорости передачи максэнтропийного кода. Высота глазка для реальных кодов может быть найдена с помощью пересчета масштаба горизонтальной оси посредством константы, равной отношению реальной и максэнтропийной скоростей передачи. Из рисунка можно

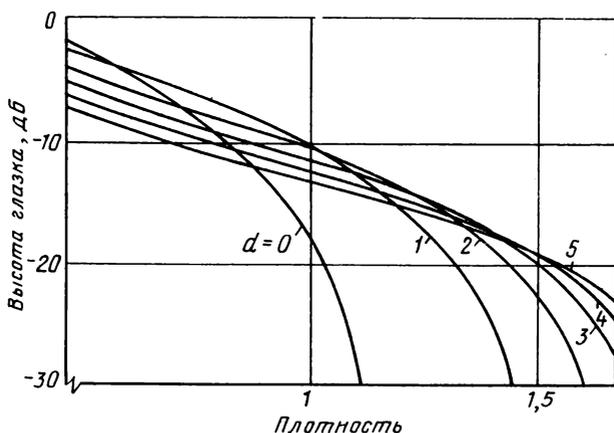


Рис. 7.10. Зависимость высоты глазка от нормированной плотности информации

сделать следующие важные выводы. Раскрытие глазка уменьшается с увеличением скорости передачи для всех значений  $d$ . Видно, что для величин  $d' > d$  раскрытие глазка первоначально меньше для малых плотностей, однако уменьшается медленнее. В результате при определенной плотности раскрытие глазка в обоих случаях одинаковое, а при дальнейшем росте плотности становится больше для  $d' > d$ . Из рисунка видно, что при разработке модуляционной системы с высокой плотностью выбор  $d$  зависит как от минимально допустимого раскрытия глазка, так и от плотности информации. Отметим, что преимущество системы при  $d=2$  по сравнению с системой при  $d=1$  незначительно, если можно допустить минимальное раскрытие глазка, меньше чем 28% (—11 дБ) от его максимального значения.

Другим выводом из расчетов является то, что для больших  $d$  наклон кривых меньше. Иными словами, система становится менее чувствительной к изменениям полосы пропускания канала передачи. Этот параметр особенно важен для оптических дисков, расфокусировка и коробление которых оказывают самое непосредственное влияние на полосу пропускания при воспроизведении. Таким образом, читатель может убедиться, что выбор модуляционной системы существенно влияет на величину допусков параметров диска и системы считывания.

Выше обсуждались только два из множества параметров, от которых зависит выбор общих характеристик системы. Еще одним параметром является энергия низкочастотных составляющих считываемого сигнала. Она должна быть возможно малой по трем причинам.

Во-первых, системы автоматического регулирования фокусиров-

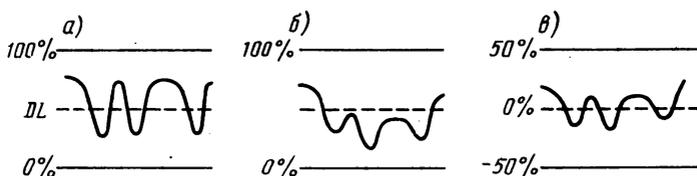


Рис. 7.11. Считанный сигнал: качественного (а), загрязненного (б) и загрязненного после высокочастотной фильтрации (в) дисков. DL — уровень отсечки (с разрешения Philips Techn. Rev., 40, 1982)

ки и слежения за дорожкой используют низкочастотные компоненты информационного сигнала, которые могут интерферировать с сигналами сервосистем. Вторая причина иллюстрируется на рис. 7.11, где изображен считываемый сигнал для чистого диска (а) и загрязненного, например, отпечатками пальцев или поцарапанного (б). Ухудшение качества диска приводит к снижению амплитуды и усредненного уровня сигнала. Падение уровня ниже уровня сравнения приводит к неправильному считыванию сигнала. Ошибки этого типа корректируются с помощью фильтрации низкочастотных составляющих. Такая фильтрация (связь по переменной составляющей) обеспечивает пропускание только переменной нескаженной составляющей, не содержащей низкочастотных компонент. В-третьих, цепи коррекции и восстановления бинарного сигнала могут быть сделаны гораздо проще и эффективнее, если при их разработке допустить, что в среднем сигнал содержит равное количество нулей и единиц. В этом случае уровень сравнения может быть определен с помощью усреднения сигнала фотодиода.

**Модуляционная система ВЧМ.** На основании многих экспериментов, а также учета системных аспектов различных канальных кодов нами была выбрана модуляционная система ВЧМ. На рис. 7.12 схематически представлена общая картина потока бит в системе кодирования. Информация делится на кадры. Один кадр содержит шесть выборок стереосигнала, или  $2 \times 16 \times 6$  бит. Они разделены на символы по 8 бит. Таким образом, поток бит  $B_1$  содержит 24 символа в кадре. В  $B_2$  добавляется 8 символов для проверки на четность и 1 символ служебной информации, что в сумме составляет 33 информационных символа. В модуляторе каждый символ преобразуется в другой, содержащий уже 14 бит, с использованием определенного алгоритма кодирования (см. таблицу соответствия). Затем к этому добавятся три «связующих бита» из сообщений, которые станут понятны позже. После добавления 27 бит синхронизации на один кадр получается поток  $B_i$ . Добавляемые биты синхронизации служат для того, чтобы в проигрывателе была обеспечена возможность установления правильной последовательности символов. Структура бит синхронизации характерна только для них и никогда не встречается среди остального потока бит. Можно легко подсчитать, что кадр при модуляционной системе

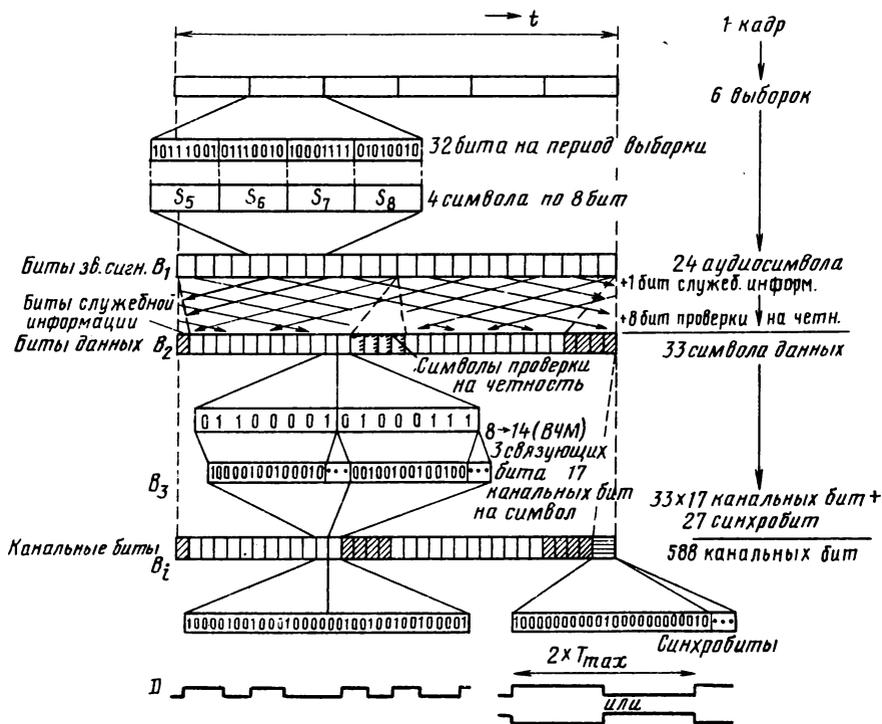


Рис. 7.12. Поток бит в системе кодирования Compact Disc (с разрешения Philips Techn. Rev., 40, 1982)

ВЧМ содержит 588 канальных бит. Наконец,  $V_i$  преобразуется в сигнал управления для записывающего лазера. Следует отметить, что на рис. 7.12 последовательность  $V_i$  не означает «пит» или «промежуток»; единица соответствует началу или концу пита ( $dk$ -последовательность).

Разработанный алгоритм кода ВЧМ имеет  $T_{\min}$  из 3 и  $T_{\max}$  из 11 канальных бит. В терминах предыдущего раздела это значит, что данный код имеет  $d=2$  и  $k=10$ . Простое исследование с помощью ЭВМ показывает, что для воспроизведения всех 256 возможных 8-битных групп при условии  $d=2$  и  $k=10$  требуется по крайней мере 14 канальных бит. Расчет на ЭВМ показывает, что при данных ограничениях возможны более чем 256 14-битных символов. 256 канальных символов обеспечивают степень свободы для выбора таблицы соответствия. Она сформирована с помощью ЭВМ таким образом, что перевод канальных символов в информационные может осуществляться простыми средствами в аппарате воспроизведения.

Связующие биты между 14-битными группами необходимы по

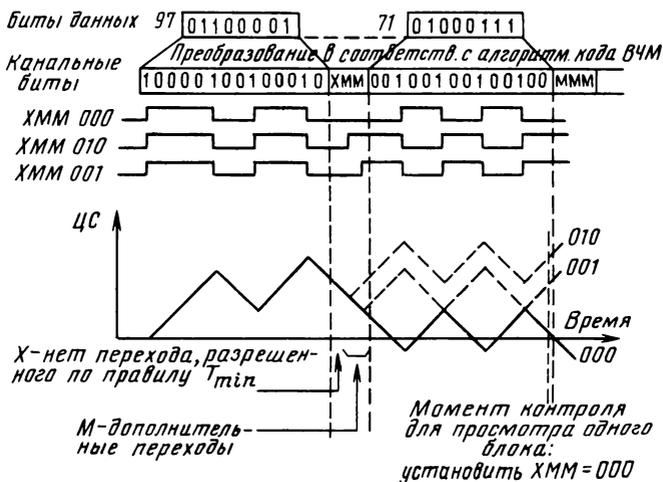


Рис. 7.13. Стратегия минимизации низкочастотных составляющих ВЧМ-сигнала

следующим причинам. Ограничения на длины серий удовлетворяются только тогда, когда между канальными символами добавляется по крайней мере 2 вспомогательных бита. Если существует опасность, что серия станет слишком короткой, то в качестве связующего бита выбирается 0, если серия слишком длинна, то для одного из них выбирается 1. При этом сохраняется значительная свобода в выборе связующих бит, что можно использовать для минимизации низкочастотной составляющей сигнала. Двух связующих бит достаточно для выполнения ограничений на длины серий. С целью обеспечения достаточно эффективного подавления низкочастотной составляющей добавляется третий бит, несмотря на то, что при этом теряется 6% плотности записи информации на диске. Вся информация содержится в 14-битных символах; связующие биты не содержат информации и при демодуляции удаляются из потока бит.

На рис. 7.13 показан принцип выбора связующих бит. Мерой постоянной составляющей является цифровая сумма (ЦС), которая определяется как разность между суммарной длиной бит и суммарной длиной промежутков, отсчитываемых от начала дорожки. Рисунок показывает перевод двух символов данных в два символа ВЧМ-сигнала. В соответствии с ограничением по  $T_{\min}$  первый из связующих бит в данном случае должен быть равен нулю; эта позиция обозначена X. Две следующие позиции — произвольные; они обозначаются M. На рис. 7.13 изображена зависимость ЦС от времени для трех возможных комбинаций связующих бит: 000, 010, 001. Расчет основан на предположении, что ЦС равна нулю в начале первого символа. Модулятор устроен таким образом, что он выбирает комбинацию связующих бит, обеспечивающую минимум ЦС в конце символа. Из примера, изображенного на рис. 7.13,

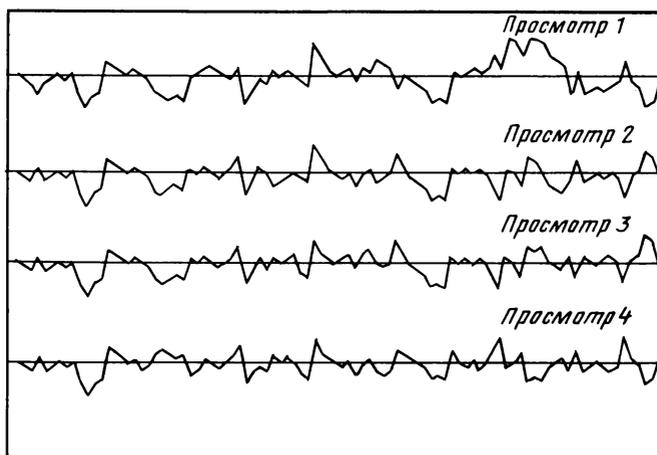


Рис. 7.14. Примеры зависимостей значения цифровой суммы от времени (произвольные блоки) для стратегии с 1-, 2-, 3- и 4-символьным обзором

видно, что в данном случае должна быть выбрана комбинация 000. При использовании такой простой стратегии составления последовательности обеспечивается существенное подавление шума в частотном диапазоне сервосистем ( $< 020$  кГц).

Однако этот простой алгоритм имеет некоторые очевидные недостатки. Существуют такие комбинации канальных символов, для которых нет выбора. В этих случаях обработка блоков с целью минимизации ЦС — не лучший метод; более предпочтительна стратегия, уменьшающая отклонения ЦС за более длительный период передачи. Другими словами, следует искать компромисс между качеством отдельного блока и качеством длинных последовательностей блока.

В некоторых случаях различные возможные комбинации связующих бит дают одну и ту же ЦС в коде символа. В этих случаях наш простой алгоритм с коротким интервалом обзора (17 канальных бит) может сделать произвольный выбор. Поскольку два альтернативных выбора могут дать противоположные результаты, окончательный выбор придется делать по данным, находящимся вне рассматриваемого блока.

В [16] приведен алгоритм, при котором просматривается больше чем один символ. Для оценки этой более сложной процедуры использовалась микроЭВМ. На рис. 7.14 показаны полученные на выходе кодера зависимости от времени ЦС в конце каждого передаваемого символа для четырех интервалов обзора. Видно, что кривые с более длинным интервалом обзора располагаются ближе к нулевой линии и существует несколько мест, где стратегия обзора, предполагающая более далекий просмотр, допускает большие

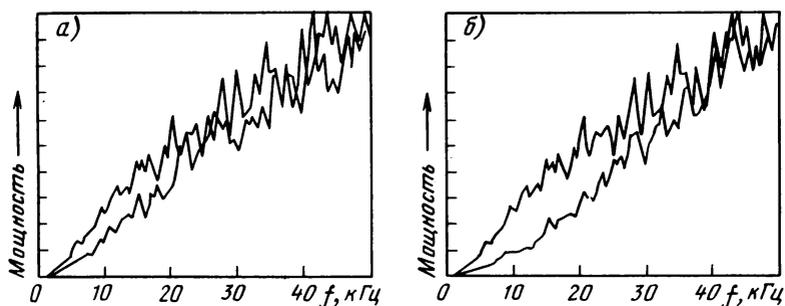


Рис. 7.15. Функция плотности мощности ВЧМ-сигнала в низкочастотной области ( $< 50$  кГц) для стратегий с 1- и 2-символьным (а) и 1- и 4-символьным (б) обзором. Масштаб по оси мощности — линейный

отклонения ЦС для того, чтобы на более поздней стадии получить меньшие девиации.

На рис. 7.15, а, б изображены функции плотности мощности модулированного сигнала в диапазоне частот  $0..50$  кГц. Сравнение сделано для 1-, 2- и 4-символьных интервалов обзора (см. рис. 7.14). Абсолютное улучшение общей мощности, усредненное по диапазону частот сервомеханизмов, для 4-символьного интервала обзора составляет около 10 дБ по отношению к односимвольной стратегии обзора. Несмотря на то, что эксперименты показали эффективность более сложной стратегии составления последовательности, в международном стандарте для компакт-диска принята простая односимвольная стратегия обзора.

## 7.2.2. ИСПРАВЛЕНИЕ ОШИБОК И МАСКИРОВАНИЕ, КОД РИДА — СОЛОМОНА С ПЕРЕМЕЖЕНИЕМ (CIRC)

Важнейшим достоинством цифровой звукотехники является то, что в цифровой форме кодирования можно применять системы исправления ошибок, которые могут ликвидировать практически любое искажение сигнала. Как отмечалось во введении, в первых экспериментах по звуковой записи на оптическом диске для улучшения отношения сигнал-шум демодулированного звукового сигнала использовалась широкополосная частотная модуляция. Однако выпадения (относительно длинные интервалы искаженного сигнала) вызывают слышимые щелчки. Следует иметь в виду, что плотность записи на компакт-диске такова, что размеры бит лежат в субмикронной области; при этом почти невозможны запись и воспроизведение информации без ошибок. Наиболее частыми причинами ошибок являются: пыль и царапины на диске-оригинале; нарушение процесса обработки диска-оригинала; пузырьки и паразитная дифракция в пластиковой подложке; царапины и отпечатки пальцев на подложке; нарушение формы пятна при считывании, приводящее к потере слежения за дорожкой и расфокусировке. Введение

в формат компакт-диска коррекции ошибок позволяет осуществлять массовое производство компакт-дисков с записями, которые могут воспроизводиться без заметного шума. Ниже обсуждаются принципы исправления ошибок и методы их реализации в формате Compact Disc с помощью кода Рида — Соломона с перемежением (CIRC).

**Принципы исправления ошибок.** Полное математическое описание теоретических основ коррекции ошибок выходит за рамки данной книги. Читатель может ознакомиться с этими вопросами по учебникам [3, 20], содержащим обширную библиографию. Здесь обсуждаются только основные принципы исправления ошибок, настолько близкие к реальным, насколько это возможно.

Допустим, что нужно передать определенное количество цифр по каналу, в котором возможно возникновение ошибок. Например, необходимо передать по телеграфу возраст трех детей: 5, 6 и 8 лет. Если по каким-либо причинам одна из цифр изменится, получатель отправления не сможет обнаружить (и исправить) ошибку. Простейший путь обеспечения возможности обнаружения ошибки — это суммирование всех чисел и передача кроме них самих их суммы (19) по тому же каналу. Если одно из принятых чисел ошибочно, то, проверив сумму, получатель обнаружит ошибку. Он не сможет ее исправить и должен будет сделать повторный запрос. Из данного примера видно, что только одна из четырех цифр может быть ошибочной. Если ошибочны более чем одна цифра, то не во всех случаях ошибка может быть обнаружена. Улучшенный вариант нашего простого кода с обнаружением ошибок может быть получен, если снова сложить все четыре цифры и передать вторую проверочную сумму.

Из этого простого примера можно сделать два важных вывода: если необходима более надежная передача, то за это надо больше платить (в нашем примере мы должны заплатить на почте за четыре слова вместо трех);

существует определенное ограничение на количество ошибочных цифр, которые можно обнаружить.

В предыдущем примере возможно только обнаружение ошибки; однако существует возможность и ее исправления.

Допустим необходимо передать  $k$  чисел  $X(1), X(2), \dots, X(k)$ . Добавим  $(n-k)$  проверочных чисел:  $X(k+1), \dots, X(n)$ , которые называются символами проверки на четность. Отношение  $k/n$  называется скоростью кода. В нашем примере  $k=3, n=4$  и  $R=k/n=3/4$ . Исправление ошибки возможно, если разумным образом добавлены  $n-k > 1$  проверочных символов. Предположим  $n-k=2$  и выберем  $X(k+1)$  и  $X(n)$  следующие:

$$\begin{aligned} X(1) + X(2) + \dots + X(n) &= 0, \\ X(1) + 2X(2) + \dots + kX(n) &= 0. \end{aligned}$$

Обозначим принятые символы через  $R(j) (1 \leq j \leq n)$  и допустим,

что при передаче допущена только одна ошибка в символе  $X(i)$ ; тогда  $R(i) = X(i) + E(i)$ ,

где  $R(i)$  — ошибочно принятый символ и  $E(i)$  — возникшая в нем ошибка. Получатель вычисляет следующие две проверки, так называемые «синдромы»:

$$S1 = R(1) + R(2) + \dots + R(n)$$

и

$$S2 = R(1) + 2R(2) + \dots + nR(n).$$

Если при передаче ошибки не произошло, т. е.  $E(i) = 0$ , то просто  $S1 = S2 = 0$ . Если же  $E(i) \neq 0$ , то с помощью подстановки находим  $S1 = E(i)$  и  $S2 = iE(i)$ .

Анализируя этот результат, неожиданно обнаруживаем, что можем исправить ошибку, которая появилась при передаче; первый синдром  $S1$  равен значению ошибки  $E(i)$ , а ошибочная позиция может быть найдена как  $i = S2/S1$ . Простая подстановка позволяет восстановить символ  $X(i)$ .

Из этого примера можно сделать важные выводы:

можно не только обнаруживать ошибки, возникшие при передаче, но и исправлять их;

в данном примере с двумя символами проверки на четность можно применить различные стратегии декодирования: только обнаружение ошибок и исправление ошибок, если это возможно.

При исправлении ошибок мы не сможем обнаружить более одной ошибки. Ясно, что в случае, когда ошибочны два и более символов, данный метод коррекции неприемлем. Только обнаружение ошибки возможно, если ошибочны не более двух символов. Заметим, что можно осуществлять своего рода обмен между числом исправляемых и обнаруживаемых ошибок: прием с исправлением ошибок позволит обнаружить меньше ошибок, чем прием только с обнаружением, при котором, с другой стороны, не удастся ничего исправить. Далее будет показано, что аналогичная ситуация возникает и в реально применяемом для системы Compact Disc корректирующем коде CIRC. Из приведенного примера можно сделать общий вывод: для исправления  $t$  ошибок кодовое слово должно содержать  $(n - k) = 2t$  проверочных символов. Ясно, что при декодировании  $t$  ошибок нужно знать как величины ошибок, так и их позиции в последовательности, следовательно, необходимо  $2t$  независимых уравнений для нахождения этих значений и позиций.

В примерах, приведенных в данном разделе, была использована обычная арифметика, изучаемая в начальной школе. В реально применяемых кодах используется арифметика конечных полей, или полей Галуа (по имени разработавшего ее французского математика XIX века Эвариста Галуа). Корректирующие коды, при-

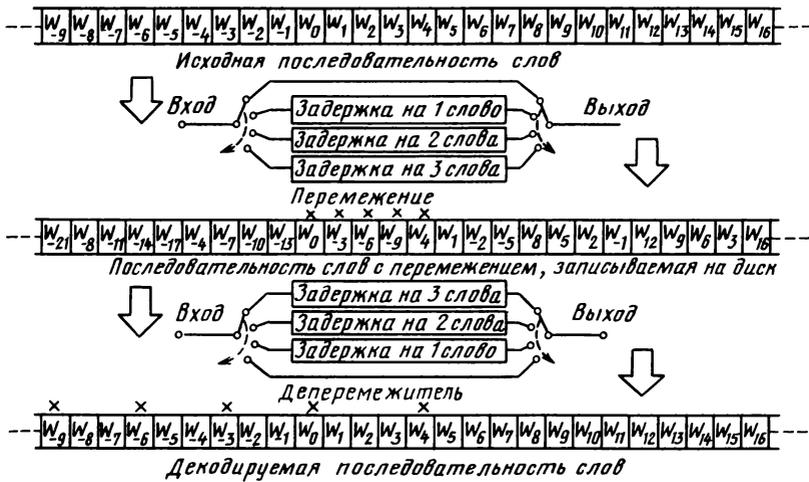


Рис. 7.16. Простая схема перемежения и деперемежения с использованием линий задержки

меняемые на практике, часто основаны на коде Рида — Соломона, названного по имени создавших его ученых [3,20].

**Перемежение.** Как было показано, исправление ошибок возможно, если в последовательности символов их ожидается не слишком много. Ошибки никогда не встречаются в единственном числе, поэтому простые коды, исправляющие одиночные или двойные ошибки, неприменимы, если наряду с ними не введено «перемежение» информации. Перемежение является способом, с помощью которого первоначальная последовательность символов (включая символы проверки на четность) преобразуется таким образом, что ошибки более равномерно распределяются среди большего числа кодовых слов. Обратный процесс называется деперемежением.

Процесс перемежения легче всего объяснить на простом примере. На рис. 7.16 показана схема, содержащая три линии задержки, причем задержка в каждом из каналов цепи составляет 0, 1, 2 и 3 кодовых слова. На входе цепи установлен мультиплексор, который синхронно направляет входной символ в одну из линий задержки. На выходе мультиплексор снова формирует уже преобразованную последовательность для дальнейшей передачи. Предположим, что во время передачи возникли две ошибки, отмеченные крестиком. После деперемежения ошибки расположились реже, чем раньше, так что две ошибки оказались в двух различных кодовых словах. Это позволяет применить код, исправляющий одну ошибку, для исправления двух ошибок. Можно легко доказать, что использование большего количества линий задержки с большим временем задержки позволяет корректировать более длинные «пакеты» ошибок.

В системе Compact Disc применен более совершенный способ

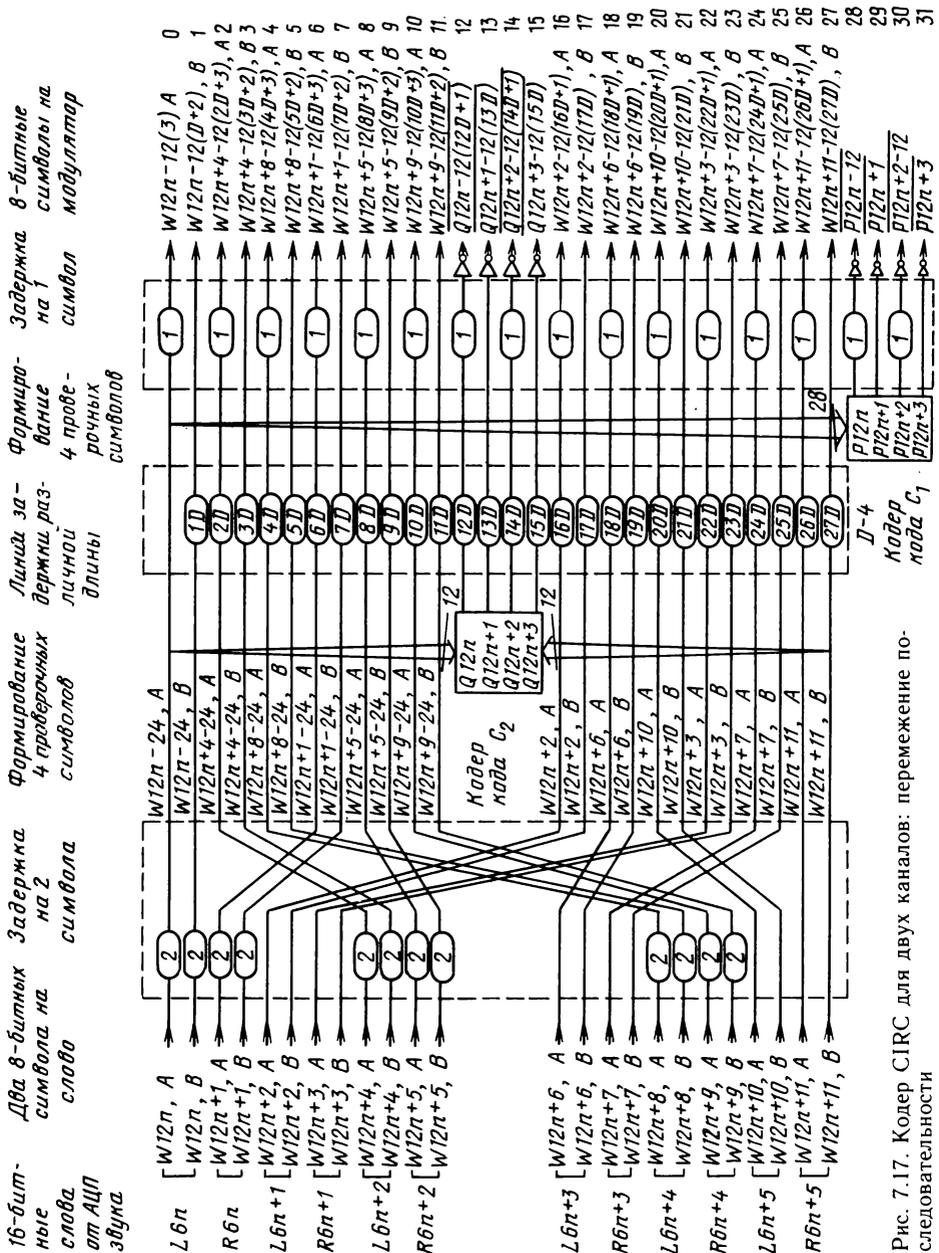


Рис. 7.17. Кодер SIRC для двух каналов: переименование по-следовательности



перемежения, который очень удобен для звуковой информации.

**Код Рида — Соломона с перемежением (CIRC).** Исправляющий ошибки код, использующийся в системе Compact Disc, включает в себя не один, а два кода  $C_1$  и  $C_2$  с «перекрестным» перемежением. Для кода  $C_1$  имеем  $n_1=32$  и  $k_1=28$ , а для  $C_2$   $n_2=28$ ,  $k_2=24$ . Скорость передачи CIRC  $(k_1/n_1)(k_2/n_2)=3/4$ . Иными словами, 25% информации, записанной на диске, используется для проверки на четность. Коды  $C_1$  и  $C_2$  могут исправлять до  $(n_1-k_1)/2 = (n_2-k_2)/2 = 2$  ошибок в каждом кодовом слове. Структура кодера CIRC показана на рис. 7.17. В общем кодер CIRC включает в себя перекрестное перемежение [9] и два кода Рида — Соломона. Последовательность кодирования описана ниже.

**Перемешивание (скремблирование) и задержка двух символов.** Блоки данных, представляющие собой исходную информацию для кодера, состоят из двенадцати 16-битных слов (6 полных выборок стереосигнала) каждый. Число 12 выбрано [27], так как имеет простые множители 2, 3, 4, что позволяет в будущем легко расширить систему до трех или четырех каналов передачи. Исходные двенадцать 16-битных слов делятся на 24 символа по 8 бит, и формируется блок символов, который подвергается обработке. Затем вводится задержка на два символа для тех 12 символов, которые используются для экстраполяции в том случае, когда декодер кода  $C_1$  не обнаруживает ошибки, а декодер кода  $C_2$  обнаруживает неисправляемую ошибку. Далее символы перемешиваются и вычисляются 4 избыточных символа проверки на четность, что дает в результате  $24 + 4$  символа на уровне кодера кода  $C_2$ . Эти 28 символов с помощью линий задержки с различными задержками подвергаются «перекрестному перемежению». Задержки были выбраны с учетом того, что для промежуточного хранения информации используется память с произвольным доступом объема 16 кбит. После перемежения снова формируются кодовые слова и символы проверки на четность в соответствии с кодом  $C_1$ . Эти 4 символа проверки на четность добавляются в последовательность, и в результате получается 32 символа на уровне кодера кода  $C_1$ .

Если сигнал с выхода кодера кода  $C_1$  записывать непосредственно на диск, то символы внутри блока будут располагаться рядом друг с другом и ошибки, возникающие на границах символов, вызовут двухсимвольный сбой, что снизит корректирующие возможности кодирования. Чтобы преодолеть этот недостаток, вводится односимвольное перемежение. Окончательный сигнал для записи на диск получается после инвертирования символов проверки на четность. Поскольку при обработке ошибок в CIRC операции в основном производятся с 8-битными символами, метод модуляции ВЧМ, описанный выше, также может приводить к возникновению ошибок в символах, но не приведет к „размножению“ малых ошибок.

**Возможности кода CIRC.** Декодер CIRC показан на рис. 7.18.

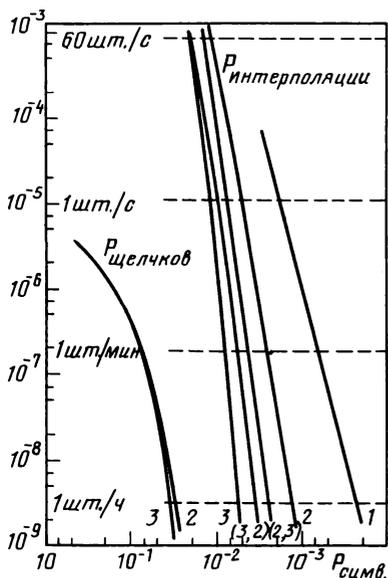


Рис. 7.19. Характеристики нескольких стратегий декодирования. При расчете предполагалось, что все ошибки носят случайный характер

Коды  $C_1$  и  $C_2$  — коды Рида—Соломона с четырьмя проверками, исправляющие две ошибки.

Данные форматы кодов  $C_1$  и  $C_2$  позволяют использовать различные стратегии декодирования. На рис. 7.19 изображены графики, иллюстрирующие возможности кода CIRC при различных стратегиях декодирования (в предположении ошибок случайного характера) [27]. В табл. 7.2 показаны возможности кода при обработке «пакетов» ошибок. В таблице приведены длины коррекции, представляющие собой

длину последовательности пораженных бит, которая может быть восстановлена, а также длина экстраполяции, т. е. длина последовательности пораженных бит, которая не может быть полностью исправлена, однако может быть восстановлена методами интерполяции звукового сигнала.

Таблица 7.2. Возможности кода CIRC

Параметр	Значение
Максимальная длина полностью исправляемого пакета ошибок	$\approx 4000$ бит данных (т. е. $\approx 2,5$ мм длины дорожки записи на диске)
Максимальная длина интерполируемого пакета ошибок для наилучшего случая	$\approx 12\,300$ бит данных (т. е. $\approx 7,7$ мм длины дорожки записи на диске)
Скорость появления неинтерполируемого пакета ошибок	Один пакет за 10 ч при вероятности появления ошибки $ВПО = 10^{-4}$ 1000 пакетов в минуту при $ВПО = 10^{-3}$
Скорость появления необнаруживаемой ошибки (щелчки)	Менее одной за 750 ч при $ВПО = 10^{-3}$
Скорость передачи кода	Пренебрежимо мала при $ВПО = 10^{-4}$
Структура декодера	3/4 Одна специальная БИС и одна микросхема памяти с произвольным доступом на 2048 8-разрядных слов
Возможности дальнейшего развития	Декодирующая схема может быть использована также и для 4-канального квадрофонического сигнала

## 8. ПРИМЕНЕНИЯ

*А. Хейсер*

### 8.1. ВВЕДЕНИЕ

Принципы оптической записи, изложенные в предыдущих главах, нашли свое воплощение в реальных системах. Характеристики некоторых систем уже описаны в соответствующих разделах. Данная глава посвящена рассмотрению этих систем в более общем плане, а также обсуждению существующих в настоящее время и перспективных применений.

Технология оптической записи используется как в профессиональной, так и в потребительской сферах. Такое разделение в значительной степени искусственно, поскольку системам оптической записи присущ профессиональный характер. Удобнее различать сферы применения по особенностям хранения информации, т. е. использования таких систем в качестве устройств памяти разного рода. В соответствии с этим принципом можно разделить системы на постоянную, предназначенную только для считывания памяти (ПЗУ); постоянную память с однократной записью и многократным считыванием (ППЗУ); память с многократным циклом «запись — многократное считывание — стирание» (ОЗУ). Аббревиатуры в скобках аналогичны тем, которые широко используются для обозначения классов интегральных кремниевых микросхем, выполняющих практически те же функции. Однако для оптических записывающих систем, выполняющих функции ППЗУ и ОЗУ, часто используются другие термины. Эти аббревиатуры или названия обычно подчеркивают одну из характерных особенностей технологии оптической записи, например СНПЗ — для системы со считыванием непосредственно после записи, ЦОЗ — для цифровой оптической записи и «дозаписываемый диск», типичный для сред с однократной записью. Различие между потребительскими и профессиональными системами в настоящее время состоит в том, что в существующих потребительских применениях устройства оптической записи представляют собой ПЗУ, носители для которых могут тиражироваться в массовых количествах и при малых затратах (см. гл. 5).

В потребительской сфере на рынке уже имеются видеодисковая система Laser Vision и цифровая аудиосистема Compact Disc. Лицензии на эти системы приняты во всем мире, а их характеристики приобрели статус всемирного стандарта. Стандартизация такого рода весьма существенна для потребительского изделия, поскольку рынок требует большого количества источников программных и аппаратных средств.

Требования к стандартизации устройств памяти в профессио-

нальной области жестко определены необходимостью их совместимости «по разъемам». Стандартизация сред и носителей при этом носит вторичный характер. Кроме того, профессиональные системы оптической записи находятся пока в преддверии выхода на рынок, и обратная связь от потребителя неизбежно значительно изменит характеристики, присущие им в настоящее время. Поэтому сейчас можно представить только самые общие параметры этих систем. Не рассматриваются также системы со стиранием информации, в которых преимущества оптической записи сочетаются с реверсивностью магнитных носителей. Хотя сейчас нет уже никаких сомнений по поводу осуществимости реверсивной оптической записи, такие системы, вероятно, не будут внедрены в ближайшее время.

## 8.2. ВИДЕОДИСКОВАЯ СИСТЕМА LASER VISION

Бум в технологии оптической записи был вызван представлением оптической дисковой системы Video Long Play международной прессе на конференции, организованной исследовательскими лабораториями фирмы Philips 5 сентября 1972 г. [3]. Дальнейшее развитие привело к внедрению этой системы в 1976 г. на рынок США. Тогда же название системы заменено с VLP на Laser Vision. Это было сделано для того, чтобы отличить ее от других видеодисковых систем, основанных на неоптических головках считывания, разработанных в то же десятилетие [8.7].

Для внедрения на европейский рынок в 1982 г. исходная система, основанная на стандарте NTSC, была переработана на телевизионный формат PAL, принятый всеми странами Европы. Основное отличие заключается в частоте кадров — 30 Гц для NTSC по сравнению с 25 Гц для PAL. Эти величины определяют максимальную частоту вращения видеодиска, который содержит по крайней мере один полный кадр на оборот.

На стандартном диске диаметром 30 см спираль непрерывной информационной дорожки начинается на радиусе 55 мм и кончается на радиусе 145 мм. Наряду с 30-сантиметровым диском принят другой вариант — диск с внешним диаметром 20 см и тем же внутренним радиусом записи, полностью совместимый со всеми техническими средствами Laser Vision. Между внутренними и внешними дорожками информация может быть записана в режиме как с постоянной угловой (ПУС), так и с постоянной линейной (ПЛС) скоростью, причем в обоих случаях в начале записи содержится один полный кадр на виток.

В режиме ПЛС емкость диска используется оптимальным образом, так как плотность записи постоянна по всей поверхности. Это значит, что дорожка на внешнем радиусе содержит около 2,5 видеок кадров на оборот, т. е. обеспечивается время воспроизведения подвижного изображения около 1 ч на одну сторону, достаточное для художественного фильма. В процессе считывания ин-

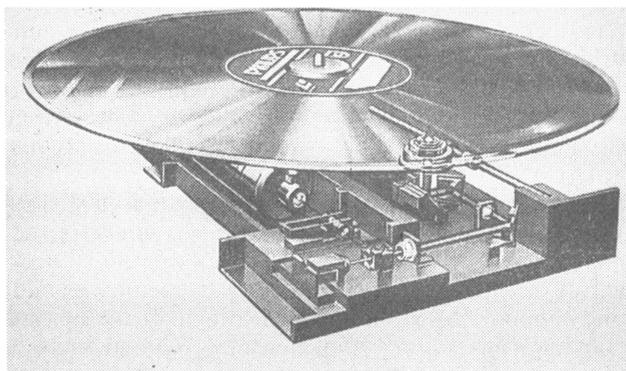


Рис. 8.1. Общий вид проигрывателя системы Laser Vision на базе He—Ne-лазера

формации от внутреннего до внешнего радиуса частота вращения диска уменьшается, чтобы обеспечить постоянство скорости дорожки относительно считывающего пятна.

В режиме ПУС частота вращения диска поддерживается постоянной и не зависит от радиуса. Каждая дорожка содержит только один видеокادر на оборот; 50 000 дорожек на одной стороне диска обеспечивают около 30 мин подвижного изображения или, что более важно, 50 000 отдельных изображений с произвольным доступом к каждому из них.

Режим ПУС особенно удобен для интерактивного использования видеодисков, например (программируемые) учебные материалы и руководства для целей образования. Для интерактивного использования видеодисков принципиальную роль играют такие особенности режима ПУС, как возможность неограниченное время воспроизводить любую дорожку в режиме «стоп-кадра», замедленное воспроизведение информации в обоих направлениях; ускоренный просмотр и переход по адресу; автоматический поиск кадра по его номеру. Стандартный проигрыватель Laser Vision (рис. 8.1) может воспроизводить записи на дисках как в режиме ПЛС, так и ПУС.

### 8.3. ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ LASER VISION

Важной тенденцией развития проигрывателей Laser Vision для работы в интерактивном режиме (ILV) является их стыковка с (персональными) компьютерами. Для этой цели разработан специальный формат для диска, который предусматривает наличие служебной программы для компьютера, записываемой в стандартном звуковом канале на диске. Таким образом, программное обеспечение, которое используется совместно с диском, может быть загружено в компьютер непосредственно с самого видеодиска. Сле-

довательно, для запуска ILV-программы, которой управляет компьютер, не требуется дополнительной памяти.

Введение цифрового звука формата Compact Disc в стандарт Laser Vision [8] представляет особый интерес с точки зрения применения в аппаратуре ILV. Вместо 50 000 высококачественных видеок кадров диск может содержать более 500 Мбайт информации с произвольным доступом, т. е. 10 кбайт на кадр. Это сочетание позволяет создать очень мощные базы данных для различных применений в области информационных систем, из которых в настоящее время применяются слайды и микрофиши.

Система ILV нашла специальное применение в видеоиграх и обучении с помощью фильмов. Электромагнитные приводы зеркал позволяют осуществить так называемый «магнитный перескок», т. е. произвольный доступ через несколько сотен дорожек за короткий период кадрового синхроимпульса между двумя последовательными кадрами. Эта особенность позволяет создавать из кадров, расположенных на диске в произвольном порядке, подвижные видеосюжеты без видимых прерываний между отдельными изображениями. В ILV-видеоиграх проигрыватель будет создавать последовательность кадров в соответствии с правилами конкретной игры и действиями играющего.

Помимо развлечений видеоигры на основе системы Laser Vidio нашли профессиональное применение в таких системах, как тренажеры и имитаторы летной обстановки, для создания реалистических визуальных эффектов.

#### 8.4. ЦИФРОВАЯ АУДИОСИСТЕМА COMPACT DISC

На ранних этапах исследования системы VLP было установлено, что технология оптической записи с успехом может быть использована для хранения и воспроизведения звуковых сигналов. Очевидные преимущества этого способа состоят в том, что отсутствует износ носителя и по сравнению с обычной грампластинкой оптический диск имеет чрезвычайно высокую информационную емкость, т. е. длительное время воспроизведения фонограммы. Хотя эти особенности весьма важны, нынешний успех техники оптической записи в области звуковоспроизведения не может быть полностью объяснен только ими. Введение цифровой обработки сигнала, которое стало возможным благодаря огромной емкости оптического диска, обеспечило резкое повышение качества звуковоспроизведения в системе Compact Disc. Так же как и для системы Laser Vision, идея цифровой аудиосистемы Compact Disc родилась и была развита в исследовательских лабораториях фирмы Philips. На завершающей стадии разработки, перед выходом на рынок, между фирмами Philips и Sony было достигнуто соглашение о совместной программе подготовки к лету 1980 г. стандарта для предъявления заинтересованным сторонам. Тем временем было принято почти 100 лицензий, обеспечивающих спецификации стандарта, и система Compact

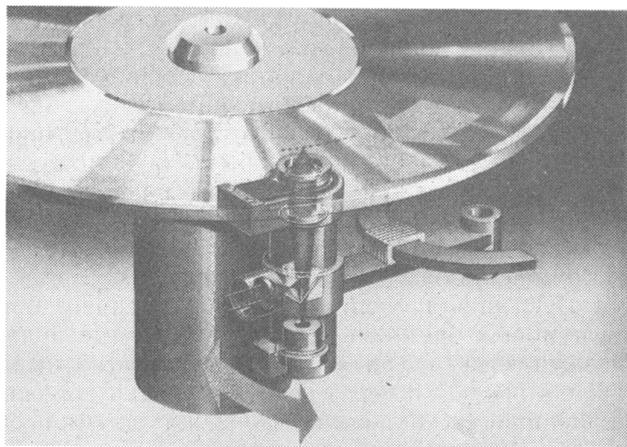


Рис. 8.2. Оптическая головка считывания проигрывателя системы Compact Disc фирмы Philips. Высота оптического канала на базе полупроводникового лазера несколько более 40 мм

Disc приобрела статус мирового стандарта (цифровой звуковой компакт-диск, 1982 г.).

Наряду с высоким значением отношения сигнал-шум (свыше 90 дБ), плоской амплитудно-частотной характеристикой до 20 кГц и отсутствием детонации в данной системе возможна цифровая обработка звукового сигнала и, следовательно, коррекция ошибок и интерполяция искаженных сигналов. С точки зрения системы весьма важной особенностью является возможность введения незвуковой информации в виде бит управления и отображения. Они могут содержать дополнительную информацию для слушателя, такую, как название музыки, время воспроизведения и т. д., а также информацию для внутреннего использования в системе воспроизведения, например запись с предискажением, паузы и применение в незвуковых системах (см. разд. 8.5).

По сравнению с системой Laser Vision, возможности которой более или менее ограничены пределами технологии оптической записи, в систему Compact Disc заложены обширные возможности дальнейшего развития как диска, так и проигрывателя. Важным отличием между системами Laser Vision и Compact Disc является то, что последняя полностью базируется на полупроводниковом лазере на основе GaAlAs с двойной гетероструктурой. Полупроводниковый лазер излучает свет с длиной волны около 800 нм, в отличие от широко используемого в аппаратах первого поколения системы Laser Vision He—Ne-лазера с длиной волны генерации 633 нм. Малогабаритные полупроводниковые лазеры позволяют создавать очень компактные конструкции оптических каналов, гармонично сочетающихся с компакт-диском диаметром 120 мм и, следовательно, с аппаратом воспроизведения (см. рис. 8.2).

## 8.5. ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ COMPACT DISC

Емкость компакт-диска составляет почти 1 Гбайт цифровой информации. В сочетании с возможностью быстрого доступа, свойственной дисковым системам, на основе компакт-диска можно создать гигантскую постоянную память для применения в областях, не связанных со звуковой информацией. Форматы CD как звуковой, так и ПЗУ стандартизованы. Поскольку формат CD-ПЗУ совместим со звуковым стандартом CD, диски CD-ПЗУ могут воспроизводиться на стандартном CD аудиопроигрывателе, имеющем выход цифровой информации.

Применения CD-ПЗУ в первую очередь связаны с распространением программного обеспечения компьютеров, для которого в настоящее время используются магнитные ленты или флоппи-диски. Преимущества компакт-диска для этих целей очевидны как с точки зрения поставщиков программ, так и с точки зрения пользователей — низкая стоимость носителя, обусловленная возможностью массового тиражирования, в сочетании с огромной емкостью. Более того, распространение компакт-дисков весьма простое: его можно пересылать по почте без предосторожностей, необходимых при пересылке магнитных носителей. Он обеспечивает также защиту данных, которые не деградируют со временем.

Другое применение — распространение больших баз данных, которые могут быть закодированы цифровым образом, например телефонные справочники, каталоги, руководства и т. п.

Хотя для систем Laser Vision и Compact Disc профессиональные сферы применения в общем совпадают, небольшие размеры компакт-диска делают его более предпочтительным. Например, для хранения карт автомобильных дорог комбинация компакт-диска с видеопамятью более предпочтительна, чем видеодиск — типичный носитель для хранения визуальной информации. Поскольку данное применение должно быть разработано для автомобиля, малые габаритные размеры аппарата — необходимое требование.

## 8.6. СИСТЕМЫ С ОДНОКРАТНОЙ ЗАПИСЬЮ

Как уже упоминалось во введении к этой главе, профессиональные системы иные, чем Laser Vision и Compact Disc, в настоящее время на рынке отсутствуют. Несколько изготовителей анонсировали системы с возможностью записи и даже продали несколько прототипов. Все системы, анонсированные до настоящего времени, принадлежат к классу памяти с однократной записью (ППЗУ). Они делятся аналогично устройствам класса ПЗУ на две категории, а именно аналоговые и цифровые системы записи и хранения информации. Типичная емкость диска диаметром 30 см составляет около 50 000 видеокадров или «аналоговой» информации, или

1 Гбайт цифровой информации. Скорость передачи данных достигает  $10 \text{ Мбит} \cdot \text{с}^{-1}$ . Все системы с однократной записью базируются на применении полупроводниковых лазеров на основе  $\text{CaAlAs}$  как для записи, так и для воспроизведения. Кроме того, в большинстве систем используются диски с предварительным рельефом, обеспечивающим слежение за дорожкой, и разметкой, облегчающей произвольный доступ к информации. Применение лазеров на основе  $\text{GaAlAs}$  и предварительного рельефа на дисках позволяет разрабатывать малогабаритные дешевые и удобные оптические системы записи [8.1].

Преимущество лазерных диодов на основе  $\text{CaAlAs}$  в оптических записывающих системах состоит в том, что интенсивность излучаемого ими света может быть модулирована посредством модуляции электрического тока через диодную структуру. Газовые лазеры требуют внешнего модулятора света типа акусто- или электрооптических модуляторов. С точки зрения габаритов и стоимости преимущества использования полупроводникового лазера по сравнению с комбинацией газового лазера и модулятора так велики, что они попросту отодвигают на задний план недостатки полупроводниковых лазеров, связанные с несколько большей длиной волны излучения — около 800 нм. Последнее ограничивает как информационную емкость диска, которая обратно пропорциональна квадрату длины волны, так и скорость передачи данных, обратно пропорциональную длине волны.

Предварительный рельеф на диске позволяет использовать концепцию обычного оптического проигрывателя типа Laser Vision или Compact Disc. С его помощью можно обойтись без высокоточного шпинделя, необходимого в устройствах записи диска-оригинала. С системной точки зрения предварительный рельеф открывает возможность предварительной разметки диска, которая часто используется в цифровых записывающих устройствах. Она обеспечивает точный адрес блоков записанной информации или свободных областей, на которые можно произвести запись, что очень важно для свободного доступа как в режиме записи, так и считывания. Простейший способ предварительной разметки состоит в том, чтобы разделить дорожки предварительного рельефа на несколько секторов. Каждый сектор состоит из (первоначально) свободной области для записи, т. е. поля данных, и заголовка, содержащего служебную информацию для использования внутри системы: номера дорожки и сектора, синхробайты, субкоды и т. д., которая зафиксирована с помощью технологии создания предварительного рельефа. Существует специфическая форма предварительной разметки, заключающаяся в том, что в дорожки предварительного рельефа вводится небольшая модуляция по глубине [2]. Эта модуляция используется для получения опорного пилот-сигнала для синхронизации сигналов в поле данных во время записи или считывания. Предварительный рельеф и информация заго-

ловков формируются на поверхности подложки оптического диска при отливке по технологии, аналогичной тиражированию носителей при производстве видео- и компакт-дисков. Матрицы являются репликами дисков-оригиналов, процесс записи которых описан в гл. 5.

Основная область применения систем с однократной записью — долговременное, архивное хранение информации. Время сохранности записанной информации при этом должно быть не менее 10 лет, а в некоторых случаях — более 30 лет. На информацию, записанную на диске, оказывает влияние старение чувствительного слоя и подложки. Старение в основном приводит к появлению мелких локальных дефектов в виде микроотверстий и тонких трещин чувствительного слоя [6]. Эти дефекты, называемые выпадениями, искажают высокочастотный сигнал при воспроизведении.

Важнейшей характеристикой носителей для архивного хранения является отказ. Этот параметр видеозаписи сложно оценить численно. Количество выпадений, которое может содержать изображение, ограничивается числом, при котором его воспроизведение станет невозможным из-за значительного искажения изображения. Для цифровой информации отказ фактически наступает в тот момент, когда в любом месте диска единичный бит не может быть правильно считан. Более общее определение можно получить, если установить соответствие отказа с вероятностью неправильного считывания бита, называемой вероятностью появления некорректированного ошибочного бита. В зависимости от характера информации абсолютная величина этого параметра колеблется от  $10^{-10}$  до  $10^{-14}$ .

Эти чрезвычайно жесткие требования к системам оптической цифровой записи могут быть удовлетворены только с помощью комбинации процедуры «перезаписи» и применения кодов с коррекцией ошибок. Вероятность появления ошибочного бита обычно колеблется от  $10^{-6}$  до  $10^{-4}$ . Она может быть уменьшена путем использования более мощных систем коррекции ошибок. Однако в конечном счете возможности коррекции ошибок в значительной степени расходятся на исправление первичных дефектов, имеющих на диске в самом начале его эксплуатации. Поэтому ни один код с коррекцией ошибок не может обеспечить коррекцию всех накапливающихся при старении диска ошибок, и отказ наступает вскоре после того, как информация записана на диск. Решение этой проблемы основано на перезаписи первоначально нарушенных данных. Записанная на диск информация может быть проверена на ошибочность при сравнении ее с исходным блоком данных в процессе считывания непосредственно после записи. В зависимости от длины блока, т. е. сектора длиной 1...5 кбит, вероятность появления ошибочного бита порядка  $10^{-5}$  приводит к тому, что перезаписывается всего несколько процентов информации. Однако пе-

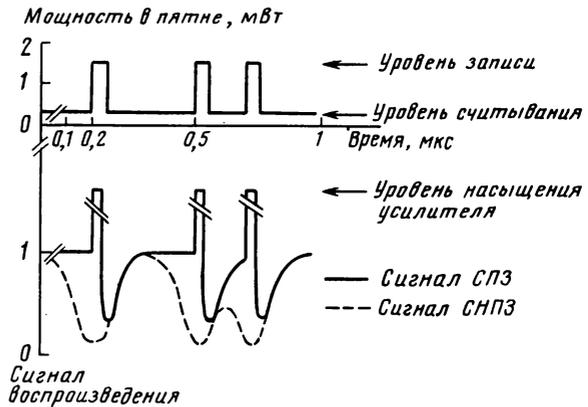


Рис. 8.3. Сигналы детектора при считывании в процессе записи

реззапись сильно влияет на емкость памяти диска, а также на скорость передачи информации при записи. Перезапись информации ведется на следующий сектор той же самой дорожки. Процедура перезаписи, очевидно, подвергается той же проверке данных, что и обычная запись.

Проверка данных может быть выполнена после или же в процессе записи. Используются три метода.

1. Записываемые данные считываются пятном для записи и считывания на следующем после момента записи обороте диска. Тогда записанная информация в реальном масштабе времени сравнивается с исходной, сохраняющейся в буферной памяти.

2. Считывание в процессе записи (СПЗ) с проверкой в реальном масштабе времени описанным выше образом. Метод основан на том факте, что импульс записи короче, чем время, в течение которого пятно для записи и считывания «видит» место, где должен быть записан считываемый след. Следовательно, существует возможность определить, записан след или нет (рис. 8.3). Чтобы осуществить считывание в процессе записи требуется специальная детектирующая схема, которая может очень быстро восстанавливаться из состояния насыщения, в которое она попадает во время действия записывающего импульса большой мощности.

3. Непосредственное считывание после записи с помощью второго (только считывающего) пятна, которое движется после записывающего пятна на расстоянии нескольких микрометров (рис. 8.4). Основная трудность этого способа — исключение влияния оптического излучения высокоинтенсивного записывающего пятна, попадающего в фотоприемный канал считывания. Для уменьшения этого влияния до приемлемого уровня применяются лазеры с различной длиной волны в комбинации с интерференционными фильтрами [8.2].

Каждый из трех методов имеет свои достоинства и недостатки. Первый метод дешев и удобен, однако скорость передачи инфор-

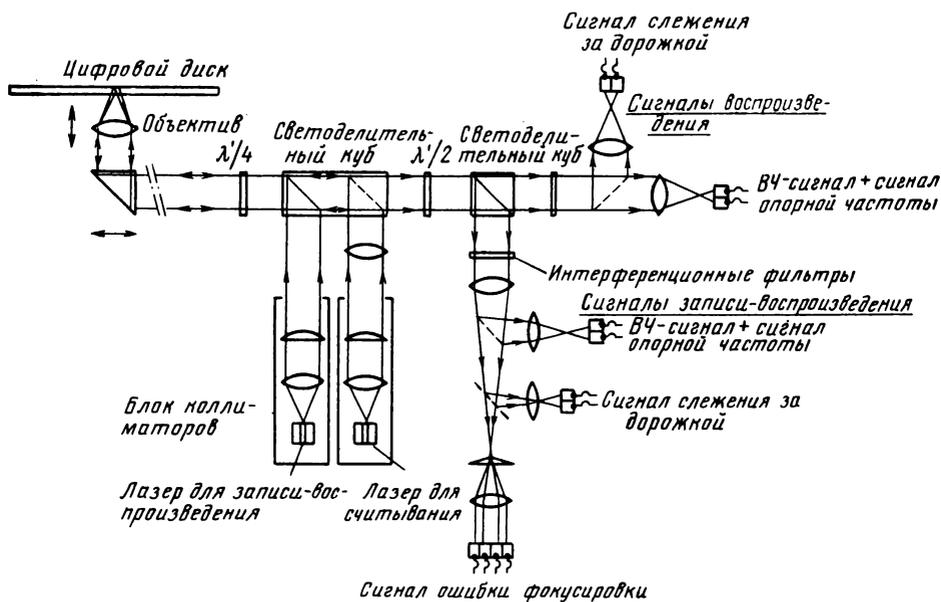


Рис. 8.4. Оптический узел записи и считывания в двухлучевой системе записи. Два лазера работают на разных длинах волн

мации при записи очень резко уменьшается, по крайней мере в 2 раза, если длина анализируемого фрагмента информации занимает полное кольцо, а в более общем случае — в  $(s + 1)$  раз, где  $s$  — число секторов на один оборот. Метод с двумя пятнами не уменьшает скорости передачи данных и удобен. Конечно, аппарат становится более сложным, поскольку практически вдвое больше нужно элементов оптики и электронных схем, а это ведет к удорожанию. По-видимому, оптимальной альтернативой является метод СПЗ, который обеспечивает простоту конструкции аппарата и не уменьшает скорости передачи данных при записи. Применение этого метода дает наилучшие результаты в том случае, когда скорости следования по дорожке и передачи данных не слишком высоки.

## 8.7. ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ С ОДНОКРАТНОЙ ЗАПИСЬЮ

Поскольку системы с однократной записью еще не вышли на рынок, о многих применениях этих систем можно только догадываться. Большинство разработок систем и носителей сконцентрировано на цифровой записи данных в приборах типа периферийных устройств записи в реальном масштабе времени и банков данных для компьютеров. Тем не менее некоторые носители для однократной записи применимы и для записи «аналоговых»

данных, т. е. видеoinформации, сравнимой по качеству со стандартом Laser Vision.

Однократная видеозапись найдет применение в тех областях, где требуется свободный доступ к кадру, а возможность массового тиражирования информации не играет особой роли. Непосредственная связь с интерактивными системами (см. разд. 8.3) очевидна. Наглядными примерами могут служить видеоархивы и обучение с помощью видеофильмов, причем последнее применение должно очень скоро внедриться в практику, так как позволяет сэкономить много времени и денег. В данном случае видеопленки кинопрограммы (обычно содержащие от четырех до шести частей для фильма длительностью 1,5 ч) полностью записываются на видеодисках с однократной записью. Несколько интерактивных видеопроигрывателей, соединенных с компьютером, дают возможность руководителю обучения оперативно создавать фильм или телевизионную программу с помощью компьютера.

Как отмечено в предыдущем разделе, системы с однократной оптической записью будут применяться в тех областях, где требуется архивное хранение больших массивов информации. Это обычно требуется при хранении документов, для которых в настоящее время используется большое количество разных носителей.

Наиболее общая форма хранения документов — сохранение их оригиналов или копий. Однако для хранения бумаг необходимо много места, поиск документов сложен, требует много времени и труда. Более компактный метод — копирование документов на микрофильм. Хотя микрофиши и нашли широкое применение, они неудобны для пользователя, а запоминание осложняется необходимостью фотографического процесса.

Более современный метод — перевести документы в цифровую информацию, которая может запоминаться электронными устройствами, передаваться по кабелям, воспроизводиться на печатающих устройствах или графопостроителях, а также отображаться на высокоразрешающих ЭЛТ. Документы, составленные с помощью компьютера и речевых процессоров, изначально имеют цифровую форму. Другие документы, например рукописи, чертежи и фотографии, могут переводиться в цифровую форму с помощью оптических считывающих устройств — сканеров. В качестве носителей для запоминания этих цифровых данных очень удобны диски с однократной записью, так как они имеют большую емкость и быстрый свободный доступ. Емкость диска в 1 Гбайт эквивалентна приблизительно 500 000 документов формата А4, если данные получены с помощью компьютера или речевого процессора. Если документы обрабатываются на сканерах, то емкость памяти, исчисляемая в количестве страниц, определяется числом элементов разложения одной страницы.

В системах массовой памяти, базирующихся на технике оптической записи информации, например в системе Megaloc [9],

хранение документов осуществляется описанным выше методом. Система состоит из различных периферийных средств — сканер с разрешением 4 млн элементов на лист формата А4, принтер и ЭЛТ с высоким разрешением. Сердце системы — устройство однократной оптической записи, совмещенное с кассетным накопителем на 64 дисках. Среднее время доступа в системе с одним диском 150 мс, а время загрузки диска из пассивного накопителя менее 20 с. Взаимодействие с системой ведется с помощью клавиатуры; работает она под управлением компьютера. Хотя система может быть расширена с помощью дополнительных кассетных накопителей, емкость даже одного базового блока трудно вообразить... 30 млн документов, которые могут быть произвольно выбраны за несколько секунд.

Эти системы основаны на оптической записи и могут быть успешно применены в тех случаях, когда значительное количество данных должно сохраняться длительное время [5]. Такие обширные базы данных требуются, например, в госпиталях для хранения рентгеновских снимков в течение многих лет. В типичном госпитале (100 койкомест) ежегодно делается около 30 000 рентгеновских снимков, для хранения которых в цифровой форме требуется около  $10^{12}$  бит на год. При хранении каждого снимка в среднем 10 лет получается банк данных емкостью более  $10^{13}$  бит. Еще большие банки данных необходимы для библиотек (до  $10^{14}$  бит), хранения электронных изображений, таких как информация с метеорологических спутников (ежегодно составляет  $10^{14}$  бит), картография (база данных, содержащая государственную карту США в цифровой форме, около  $5 \cdot 10^{14}$  бит).

Необходимо отметить, что для файловых систем хранения документов можно использовать и средства магнитной записи. В настоящее время существуют отдельные образцы таких систем на магнитной ленте. Магнитная лента имеет недостаток: очень длительный доступ. Магнитные дисковые системы, наоборот, обеспечивают быстрый доступ аналогично оптическим дискам. Однако магнитные диски винчестерского типа с высокой емкостью очень дороги и представляют собой системы с фиксированным шпинделем [4]. Эти обстоятельства неприемлемы в тех случаях, когда важную роль играет стоимость хранения бита информации — существенный параметр для электронных файловых систем. Отсутствие стираемости в системах с однократной записью, обычно трактуемое как их наибольший недостаток, не играет особой роли или даже желательно для файловых систем. Если к этому добавить великолепное соотношение стоимости и возможностей, то становится ясно, что в перспективе системы с однократной оптической записью, несомненно, найдут еще более широкое применение в области хранения информации, чем это можно представить себе сегодня.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### К главе 1

1. Compaan K and Kramer P 1973 The Philips 'VLP' system *Philips Tech. Rev.* **33** 178–80
2. Korpel A 1980 Laser applications: video disc in *Laser Applications* Vol. 4 71–123 (New York: Academic)

### К главе 2

1. Bennett W R 1960 *Electrical Noise* (New York: McGraw-Hill) p. 15
2. Bouwhuis G and Braat J J M 1978 Video disk player optics *Appl. Opt.* **17** 1993
3. ——— 1983 Recording and reading of information on optical disks in *Applied Optics and Optical Engineering* ed R Shannon (New York: Academic)
4. Braat J J M 1983a Optically read disks with increased information density *Appl. Opt.* **22** 2196
5. ——— 1983b Aspherical lenses in optical scanning systems *Proc. SPIE* **399** 294
6. Braat J J M and Bouwhuis G 1978 Position sensing in video disk read-out *Appl. Opt.* **17** 2013
7. Bricot C, Leheureau J C, Puech C and le Carvenec F 1976 Optical readout of videodisc *IEEE Trans. Consum. Electron.* **CE-22** 304
8. Broussaud G, Spitz E, Tinet C and le Carvenec F 1974 A video disc optical design suitable for the consumer market *IEEE Trans. Broadcast Telev. Receivers* **BTR-20** 332
9. Dekkers N and de Lang H 1974 Differential phase contrast in a STEM *Optik* **41** 452
10. Goodman J W 1968 *Introduction to Fourier Optics* (San Francisco: McGraw-Hill) pp. 37–42, 48–53, 63–5
11. de Haan M R and Velzel C H F 1977 Intermodulation and moiré effects in optical video recording *Philips Res. Rep.* **32** 436
12. Haisma J, Hugues E and Babolat C 1979 Realization of a bi-aspherical objective lens for the Philips Video Long Play System *Opt. Lett.* **4** 70
13. Heemskerk J P J 1978 Noise in a video disk system: experiments with an (AlGa) As laser *Appl. Opt.* **17** 2007
14. Hopkins H H 1953 On the diffraction theory of optical images *Proc. R. Soc. A* **217** 408
15. ——— 1979 Diffraction theory of laser read-out systems for optical video discs *J. Opt. Soc. Am.* **69** 4
16. Korpel A 1978 Simplified diffraction theory of the video disk *Appl. Opt.* **17** 2037
17. Linfoot E H. 1950. The Foucault test in *Recent Advances in Optics* (Oxford: Clarendon) pp. 128–74
18. Maréchal A 1947 Etude des effets combinés de la diffraction et des aberrations géométriques sur l'image d'un point lumineux *Rev. Opt. Theor. Instrum.* **26** 257

19. Maréchal A and Françon M 1970 in *Diffraction, Structures des Images* (Paris: Masson et Cie) p. 62
20. Nagashima M 1983 High density optical disk with V-shaped grooves *Appl. Phys. Lett.* **42**(2) 144
21. Thomson G H B 1980 *Physics of Semiconductor Laser Devices* (New York: Wiley) pp. 287–307
22. Vaanholt H 1982 The coding format for composite PAL video signals and stereo sound in LaserVision optical video disc systems *4th Int. Conf. on Video and Data Recording, Southampton* (London: IERE) pp. 351–65
23. Velzel C H F 1978 Laser beam reading of video records *Appl. Opt.* **17** 2029
24. Welford W T 1960 Length measurement at the optical resolution limit by scanning microscopy in *Optics in Metrology* ed P Mollet (Oxford: Pergamon) pp. 85–91
25. Yamamoto N 1982 Selfoc microlens with a spherical surface *Appl. Opt.* **21** 1021
26. Zernike F 1934 Beugungstheorie des Schneidenverfahrens und seiner verbesserten Form, der Phasenkontrastmethode *Physica* **1** 689
27. ——— 1938 The concept of degree of coherence and its applications to optical problems *Physica* **5** 794

### К главе 3

1. van den Berg P M 1981 Reflection by a grating: Rayleigh methods *J. Opt. Soc. Am.* **71** 1224–9
2. Dil J G and Jacobs B A J 1979 Apparent size of reflecting polygonal obstacles of the order of one wavelength *J. Opt. Soc. Am.* **69** 950–60
3. Dil J G and Wesdorp C A 1979 Control of pit geometry on video discs *Appl. Opt.* **18** 3198–202
4. de Hoop A T 1977 *Modern Topics in Electromagnetics and Antennas* PPL Conference Publication 13 (Stevenage, Herts: Peter Peregrinus) Ch 6
5. Lippmann B A 1953 Note on the theory of gratings *J. Opt. Soc. Am.* **43** 408
6. Lord Rayleigh (J W Strutt) 1907 On the dynamical theory of gratings *Proc. R. Soc. A* **79** 399–416
7. Meecham W C 1956 Variational method for the calculation of the distribution of energy reflected from a periodic surface *J. Appl. Phys.* **27** 361–7
8. Millar R F 1969 On the Rayleigh assumption in scattering by a periodic surface *Proc. Camb. Phil. Soc.* **65** 773–91
9. Olijhoek J F, Peek T H and Wesdorp C A 1981 Mastering for Philips optical disc systems, Eur. Conf. on Opt. Syst. and Appl. 1980 *SPIE* **236** 464–6
10. Pasman J H T 1983 Rigorous diffraction theory applied to video disc geometries Max Born Centenary Conference 1982 *SPIE* **369** 674–80
11. Pasman J H T, Olijhoek J F and Verkaik W 1985 Third international conference on optical mass data storage 1985, Developments in optical disc mastering *SPIE* **529** 62–8
12. Petit R 1967 Sur la diffraction d'une onde plane par un reseau infiniment conducteur *C.R. Acad. Sci., Paris* **264** 1441–4

13. ——— (ed) 1980 *Electromagnetic Theory of Gratings* (Berlin: Springer)
14. Ping Sheng 1978 Theoretical considerations of optical diffraction from RCA VideoDisc signals *RCA Rev.* **39** 512–55
15. Roach W R, Carroll C B, Firester A H, Gorog I and Wagner R W 1978 Diffraction spectrometry for VideoDisc quality control *RCA Rev.* **39** 472–511
16. Sommerfeld A 1964 *Optics* (New York: Academic) §39
17. Yasuura K 1971 A view of numerical methods in diffraction problems *Progress in Radio Science 1966–1969* ed. W V Tilston and M Sauzada (Brussels: Union Radio-Scientifique Internationale) pp. 257–70
18. Wirgin A 1979 Simplified theory of the diffraction of an electromagnetic wave by a perfectly conducting biaxial periodic surface *Opt. Comm.* **28** 275–9

#### К главе 4

1. Bögels P W 1976 System coding parameters, mechanics and electromechanics of the reflective video disc player *IEEE Trans. Consum. Electron.* **EC-22** 309
2. Dorf R C 1980 *Modern Control Systems* (New York: Addison Wesley)
3. Harris C M and Crede C E 1976 *Shock and Vibration Handbook* (New York: McGraw Hill)
4. den Hartog J P 1956 *Mechanical Vibrations* (New York: McGraw Hill)

#### К главе 5

1. Braat J J M and Bouwhuis G 1978 Optical video discs with undulating tracks *Appl. Opt.* **17** 2022–8
2. Born M and Wolf E 1975 *Principles of Optics* (Oxford: Pergamon) pp. 395–8
3. Bouwhuis G and Braat J J M 1978 Video disc player optics *Appl. Opt.* **17** 1993–2000
4. Haverkorn van Rijsewijk H C, Legierse P E J and Thomas G E 1982 Manufacture of LaserVision video discs by a photopolymerization process *Philips Tech. Rev.* **40** 287–97
5. Heemskerk J P J 1978 Noise in a video disc system: experiments with an (AlGa)As laser *Appl. Opt.* **17** 2007–12
6. Hopkins H H 1943 The Airy disc formula for systems of high relative aperture *Proc. R. Soc.* **69** 116–28
7. Jacobs B A J 1978 Laser beam recording of video master discs *Appl. Opt.* **17** 2001–6
8. Kloosterboer J G, Lippits G J M and Meinders H C 1982 Photopolymerizable laquers for LaserVision videodiscs *Philips Tech. Rev.* **40** 298–309
9. Olijhoek J F, Peek T H and Wesdorp C A 1981 Eur. Conf. on Opt. Syst. and Appl. 1980, Mastering for Philips optical disc systems *SPIE* **236** 464–6
10. Pačansky J and Lyerla J R 1979 Photochemical decomposition mechanisms for AZ-type photoresists *IBM J. Res. Dev.* **23** 42–55
11. Pasman J H T 1983 Max Born Centenary Conference 1982, Rigorous diffraction

- theory applied to video disc geometries *SPIE* **369** 674–80
12. Pasman J H T, Olijhoek J F and Verkaik W 1985 Third international conference on optical mass data storage 1985, Developments in optical disc mastering *SPIE* **529** 62–8
  13. Richards B and Wolf E 1959 Electromagnetic diffraction in optical systems II. Structure of the image field in an aplanatic system *Proc. R. Soc. A* **253** 358–79

#### К главе 6

1. Ahn K, DiStefano T, Herd S, Mazzeo N and Tu K 1982 High-sensitivity silicide films for optical recording *CLEO Proc.* (1982) 140
2. Akahira N, Ohta T, Yamada N, Takenaga M and Yamashita T 1982 Sub-oxide thin films for an optical recording disk *SPIE Proc.* **329** 195
3. Bell A and Spong F 1978 Antireflection structure for optical recording *J. Quantum Electron.* **14** 487
4. Biesterbos J 1979 Properties of amorphous rare earth–transition metal thin films relevant to thermomagnetic recording *J. Physique* **40** C5-274
5. Braat J, Schouhamer-Immink K and Urner-Wille M 1983 High density magneto-optical recording *SPIE Proc.* **420** 206
6. Broer D and Vriens L 1983 Laser-induced optical recording in thin films *Appl. Phys. A* **32** 107
7. Bulthuis K, Carasso M, Heemskerk J, Kivits P, Kleuters W and Zalm P 1979 Ten billion bits on a disk *IEEE Spectrum* August issue
8. Chen D and Zook J 1975 An overview of optical data storage technology *Proc. IEEE* **63** 1207
9. Cornet J 1983 Deformation recording process in polymer–metal bilayers and its use for optical storage *SPIE Proc.* **420** 86
10. Drexler J 1983 The Drexon product family for laser recording and digital-data storage; a status report *SPIE Proc.* **420** 57
11. Elphick M 1983 Winchester disk technology spins into new orbits *Computer Design* (January) 89
12. Freese R, Willson R, Wald L, Robbins W and Smith T 1982 Characteristics of bubble-forming optical direct-read-after-write (DRAW) media *SPIE Proc.* **329** 174
13. Gravesteyn D, Steenbergen C and van der Veen J 1983 Single wavelength optical recording in pure, solvent-coated infrared dye layers *SPIE Proc.* **420** 327
14. Heemskerk J 1978 Noise in a video disk system: experiments with an (AlGa)As laser *Appl. Opt.* **17** 2007
15. Howe D and Wrobel J 1981 Solvent-coated organic materials for high density optical recording *J. Vac. Sci. Technol.* **18** 92
16. Huijser A 1984 Optical recording *Physica* **127** B 90
17. Huijser A, Jacobs B, Vriens L, Markvoort J, Spruijt A and Vromans P 1983 Ageing characteristics of digital optical recording (DOR) media *SPIE Proc.* **382** 270
18. Huth B 1974 Calculations of stable domain radii produced by thermomagnetic writing *IBM J. Res. Develop.* **18** 100

19. Kenny G 1979 *US Patent* 4 074 282
20. Kivits P, de Bont R, Jacobs B and Zalm P 1982 The hole formation process in tellurium layers for optical data storage *Thin Sol. Films* **87** 215
21. Kivits P, de Bont R and Zalm P 1981 Superheating of thin films for optical recording *Appl. Phys.* **24** 273
22. Kryder M, Meiklejohn W and Skoda R 1983 Stability of perpendicular domains in thermomagnetic recording material *SPIE Proc.* **420** 236
23. Mansuripur M and Cornell G 1983 Magneto-optical recording *SPIE Proc.* **420** 206
24. Ralston L 1983 An evaluation of photochromic and photodichroic materials for write, read, erase applications *SPIE Proc.* **420** 186
25. Rooijmans C and Verhoeven J 1983 Characteristics of the Optical Media Laboratory disk *SPIE Proc.* **420** 18
26. Sporer A 1984 Laser marking process in an oriented dye film *Appl. Opt.* **23** 2738
27. Suh S, Craighead H, Howard R and Schiavone L 1983 Morphology dependent contrast measurements of microscopically textured germanium films *SPIE Proc.* **382** 199
28. Takenaga M, Yamada N, Ohara S, Nishiuchi K, Nagashima M, Kashiura T, Nakamura S and Yamashita T 1983 New optical erasable medium using tellurium suboxide thin film *SPIE Proc.* **420** 173
29. Terao M, Horigome S, Shigematsu K, Miyauchi Y and Nakazawa M 1983 Resistance to oxidation of Te-Se optical recording films *SPIE Proc.* **382** 276
30. Unger W and Rath R 1971 Thermomagnetic writing in homogeneous MnBi films *IEEE Trans. Mag.* **MAG-7** 885
31. Watanabe K, Oyama T, Aoki Y, Sato N and Wiyaoaka S 1983 New optical recording material for direct-read-after-write (DRAW) disks *SPIE Proc.* **383** 191

#### К главе 7

1. Badger G and Allen R 1982 The audio side of the Laser video disc *72nd Convention AES, Anaheim, Preprint* 1935 (F-5)
2. Beenker G F M and Schouhamer Immink K A 1983 A generalized method for encoding and decoding run-length-limited binary sequences *Trans. Inform.* **IT-29** 751-4
3. Berlekamp E R 1968 *Algebraic Coding Theory* (New York: McGraw-Hill)
4. Bogels P 1976 System coding parameters, mechanics and electro-mechanics of the reflective video disc player *IEEE Trans. Consum. Electron.* **CE-22** 309-17
5. Bruch W 1967 Das TRIPAL verfahren *Funkschau* **18** 563-5 (in German)
6. Carasso M G, Peek J B H and Sinjou J P 1982 The Compact Disc digital audio system *Philips Tech. Rev.* **40** 151-5
7. Clemens J K 1978 Capacitive pickup and the buried carrier encoding system for the RCA video-disk system *RCA Rev.* **39** 33-59
8. Coleman C H 1977 Moiré interference reducing circuit for FM video recorders *US Patent* 4, 052, 740
9. Doi T T 1982 Error correction codes for digital audio *Proc. AES Premier Conf.*,

- Ryetown (New York: Audio Engineering Society) pp. 147–77
10. Goedhart D, van de Plassche R J and Stikvoort E F 1982 Digital-to-analog conversion in playing a Compact Disc *Philips Tech. Rev.* **40** 174–80
  11. de Haan M R and Velzel C H F 1978 Intermodulation and moire effects in optical video recording *Philips Res. Rep.* **39** 436–59
  12. Heemskerck J P J 1978 Noise in a video-disk system *Appl. Opt.* **17** 2007–21
  13. Heemskerck J P J and Schouhamer Immink K 1982 Compact Disc: system aspects and modulation *Philips Tech. Rev.* **40** 157–64
  14. Hoeve H, Timmermans J and Vries L B 1982 Error correction and concealment in the Compact Disc *Philips Tech. Rev.* **40** 166–72
  15. Immink K A Schouhamer and Aarts R M 1983 Maximization of recording density in Te-alloys *Proc. Int. Soc. Opt. Eng., Geneva (SPIE 396)* 181–8
  16. Immink K A Schouhamer and Gross U 1983 Optimization of low-frequency properties of eight-to-fourteen modulation *Radio Electron. Eng.* **53** 63–6
  17. Immink K A Schouhamer, Hoogendijk A H and Kahlman J A 1983 Digital audio modulation in the PAL and NTSC LaserVision video disc coding formats *74th Convention AES, New York Preprint* 1997 (also *IEEE Trans. Consum. Electron. CE-29* 543–51)
  18. Kautz W H 1970 Fibonacci codes for synchronization control *IEEE Trans. Inform. Theory* **17** 436–61
  19. Kenney G C and Hoogendijk A H 1974 Signal processing for a video disc system (VLP) *IEEE Trans. Broadcast. Telev. Recep.* **BTR-20** 217–29
  20. Lin S 1970 *An Introduction to Error-Correcting Codes* (Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall)
  21. Ogawa H and Schouhamer Immink K A 1982 EFM – The modulation for the Compact Digital audio disc *Proc. AES Premier Conf., Ryetown* (New York: Audio Engineering Society) pp. 117–24
  22. van de Plassche R and Dijkmans E C 1982 A monolithic 16-bits D/A conversion for digital audio *Proc. AES Premier Conf., Ryetown* 54–62
  23. Pritchard D H, Clemens J K and Ross M D 1981 The principles and quality of the buried-subcarrier encoding and decoding system *IEEE Trans. Consum. Electron. CE-27* 352–9
  24. Tang D T and Bahl L R 1970 Block codes for a class of constrained noiseless channels *Inform. Control* **17** 436–61
  25. Vaanholt H 1982 The coding format for composite PAL video signals and stereo sound in the LaserVision optical videodisc system *4th Int. Conf. on Video and Data Recording, Southampton* (London: IERE) pp. 351–65
  26. Vries L B, Immink K A, Nijboer J G, Hoeve H, Doi T T, Odaka K and Ogawa H 1980 The digital Compact Disc system: modulation and error correction *67th Convention AES Preprint* 1674 (New York: Audio Engineering Society)
  27. Vries L B and Odaka K 1982 CIRC—The error-correcting code for the compact disc digital audio system, *Proc. AES Premier Conf., Ryetown* (New York: Audio Engineering Society) pp. 178–88

1. Bulthuis K, Carasso M, Heemskerk J, Kivits P, Kleuters W and Zalm P 1979 Ten billion bits on a disc *IEEE Spectrum* **16** 26
2. Carasso M and Huijser A 1982 Principles of optical recording systems with AlGaAs lasers and pregrooved discs *Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics, Phoenix* p. 30
3. Compaan K and Kramer P 1973 The Philips VLP system *Phillips Tech. Rev.* **33** 178  
Compact Disc digital audio Special issue 6 1982 *Phillips Tech. Rev.* **40** 150–80
4. Elphick M 1983 Winchester disk technology spins into new orbits *Computer Design* (January) 89–102
5. Goldberg M 1983 Large memory applications for optical disks *SPIE* **382** 20
6. Huijser A, Jacobs B, Vriens L, Markvoort J, Spruijt A and Vromans P 1983 Ageing characteristics of DOR media *SPIE* **382** 270
7. McCoy D 1978 The RCA SelectaVision videodisc system *RCA Rev.* **39** 7
8. Schouhamer Immink K, Hoogendijk A and Kahlman J 1984 Digital audio modulation in the PAL and NTSC optical video disc coding formats *J. Audio Eng. Soc.* **32** 883
9. de Vos J 1980 Megadoc, a modular system for electronic document handling *Phillips Tech. Rev.* **39** 329

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звездин А. К., Котов В. А. Магнитооптика тонких пленок.— М.: Наука, 1988.— 192 с.
2. Накадзима Х., Огава Х. Цифровые грампластинки: Пер. с японского/Под ред. В. Г. Королькова.— М.: Радио и связь, 1988.— 166 с.
3. Михайлов В. И., Князев Г. И., Макарычев П. П. Запоминающие устройства на оптических дисках.— М.: Радио и связь, 1991.— 224 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие редактора перевода .....	5
<b>1. ВВЕДЕНИЕ</b> .....	7
<i>Г. Боухьюз</i> .....	
<b>2. СЧИТЫВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ С ОПТИЧЕСКИХ ДИСКОВ</b> .....	13
<i>Дж. Браат</i> .....	
2.1. Введение .....	13
2.2. Оптическая сканирующая микроскопия .....	14
2.3. Математическая модель считываемого оптического сигнала .....	29
2.4. Качество сигнала .....	52
2.5. Сигналы ошибок оптических систем слежения .....	74
2.6. Оптические системы воспроизведения .....	85
<b>3. ВЕКТОРНАЯ ТЕОРИЯ ДИФРАКЦИИ</b> .....	90
<i>Дж. Пасман</i> .....	
3.1. Введение .....	90
3.2. Математический анализ .....	92
3.3. Результаты .....	101
<b>4. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ</b> .....	127
<i>Дж. ван Розмален</i> .....	
4.1. Введение .....	127
4.2. История вопроса .....	128
4.3. Спектр ошибок .....	131
4.4. Подавление ошибок .....	137
4.5. Теория систем автоматического регулирования .....	138
4.6. Позиционеры .....	147
4.7. Факторы, ограничивающие подавление .....	174
4.8. Каретка .....	179
4.9. Вобуляция .....	186
<b>5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДИСКА-ОРИГИНАЛА</b> .....	190
<i>Дж. Пасман</i> .....	
5.1. Введение .....	190
5.2. Процесс изготовления диска-оригинала .....	192
5.3. Тиражирование .....	207
5.4. Нетрадиционные методы изготовления диска-оригинала .....	209
<b>6. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ</b> .....	213
<i>А. Хейсер</i> .....	
6.1. Введение .....	213
6.2. Особенности СНПЗ-материалов, обусловленные системными требованиями .....	214
6.3. Оптический СНПЗ-диск .....	217
6.4. Оптические эффекты, обеспечивающие СНПЗ .....	219
<b>7. КАНАЛЬНОЕ КОДИРОВАНИЕ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ДИСКОВЫХ СИСТЕМ</b> .....	231
<i>К. Шухамер-Имминк</i> .....	

7.1. Форматы кодирования видеосигналов PAL и NTSC в системе Laser Vision .....	231
7.2. Цифровая звуковая система Compact Disc .....	240
<b>8. ПРИМЕНЕНИЯ .....</b>	<b>259</b>
<i>A. Хейсер</i> .....	
8.1. Введение .....	259
8.2. Видеодисковая система Laser Vision .....	260
8.3. Профессиональные применения системы Laser Vision .....	261
8.4. Цифровая аудиосистема Compact Disc .....	262
8.5. Профессиональные применения системы Compact Disc .....	264
8.6. Системы с однократной записью .....	264
8.7. Применения систем с однократной записью .....	268
Список литературы .....	271
Дополнительный список литературы .....	277

Производственное издание

**БОУХЬЮЗ Г., БРААТ ДЖ., ХЕЙСЕР А. и др.**

## **ОПТИЧЕСКИЕ ДИСКОВЫЕ СИСТЕМЫ**

Заведующий редакцией **Ю. Г. Ивашов**  
Редактор **Н. И. Гормакова**  
Переплет художника **М. Э. Зельцера**  
Художественный редактор **В. В. Алексеев**  
Технический редактор **З. Н. Ратникова**  
Корректор **Н. В. Козлова**

### **ИБ № 2023**

Сдано в набор 03.09.90. Подписано в печать 17.04.91. Формат 60×88<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная № 2. Гарнитура Литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 17,50. Усл. кр.-отт. 17,50. Уч.-изд. л. 17,94. Тираж 10 000 экз. Изд. № 22868. Зак. № 1224. Цена 3 р. 50 к.

Издательство «Радио и связь». 101000, Москва, Почтамт, а/я 693

Набор в ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография» Государственного комитета СССР по печати. 113054, Москва, Валуевая, 28

Печать и изготовление тиража в Московской типографии № 4 Государственного комитета СССР по печати. Москва, И-41, Б. Переяславская, 46