

4.1. Системы, стандарты и форматы звукозаписи

В вещании звукозапись производится в процессе подготовки, монтажа и архивации речевых и музыкальных программ. Звуковая программа может иметь один канал (моно) — речь диктора, чтение стихов и любой разговорный жанр. Чаще используют два канала (стерео), например для большинства музыкальных программ. В цифровом радиовещании и телевидении число каналов звука достигает 6...8, что обеспечивает пространственное звучание.

Нередко при первичной записи оркестровой музыки возникает необходимость одновременной записи отдельных музыкальных инструментов, тогда число записываемых звуковых сигналов составляет 24...48, а иногда и больше. Звуковые сигналы могут записываться по отдельным дорожкам или в одной с использованием временного уплотнения.

Запись звуковых сигналов осуществляется на движущиеся ленточные или дисковые носители, имеющие специальное покрытие для регистрации звуковой информации в цифровой форме. В процессе записи в НЗ происходят химические, магнитные, оптические или другого рода физические изменения, формирующие дорожки фиксированной ширины, несущие информацию о сигнале. Такая дорожка называется *цифровой фонограммой*.

В вещании используются три системы звукозаписи, отличающиеся физическими принципами регистрации цифровой информации: магнитная, оптическая и магнитооптическая (рис. 4.1). Для профессиональных целей пока больше подходит магнитная или магнитооптическая запись звука. Оптическая запись подразделяется на две группы. Рельефно-фазовая оптическая запись применяется только при массовом тиражировании цифровых звукозаписей на оптических дисках, которые являются готовыми источниками музыкальных программ. Амплитудная оптическая запись используется для архивации цифровых фонограмм.

Стандарт цифровой звукозаписи определяет совокупность данных, включающих в себя технические характеристики носителя с записью звуковой информации, используемые способы анало-



Рис. 4.1. Системы и стандарты цифровой звукозаписи

го-цифрового преобразования, принципы записи и считывания цифровых данных, а также методы помехоустойчивого кодирования и исправления ошибок. В настоящее время цифровая звукозапись производится в трех стандартах: CD-DA, SACD и DVD-Audio (табл. 4.1). Эти стандарты отличаются главным образом характеристиками аналого-цифрового преобразования и числом звуковых каналов. В профессиональной звукозаписи используются два основных стандарта цифровой магнитной звукозаписи: DASH и DAT.

Формат цифровой звукозаписи определяет совокупность данных, включающих в себя технические характеристики носителя

Таблица 4.1

Стандарты цифровой звукозаписи

Стандарт	Модуляция	Разрядность	Частота выборки, кГц	Число каналов	Компрессия
CD-DA	ИКМ	16	44,1	2	Нет
SACD	SDM	1	2 822,4	5,1	Есть (без потерь)
DVD-A	ИКМ	16... 24	48... 192	5,1	Есть (с потерями)
DASH	ИКМ	16, 24	32, 48	2... 48	Нет
DAT	ИКМ	16, 24	48	2	Нет
MD	ИКМ	16	44,1	2	Нет

с записью любых цифровых данных (например, звук, видео), организацию и характеристики цифрового потока, принципы записи и считывания, а также методы помехоустойчивого кодирования и исправления ошибок. В профессиональной звукозаписи используется множество форматов записи: в магнитных системах — HDD, в оптических системах — CD-R, CD-RW, DVD-R, DVD-RW, Blue Ray и HD-DVD. В этих форматах запись звука может производиться в разных стандартах.

Магнитная запись осуществляется магнитным полем, формируемом в очень узком зазоре записывающей головки. При этом вдоль дорожки происходит намагничивание магнитного покрытия НЗ в соответствии со звуковой информацией. Для воспроизведения такой записи применяются индукционные или магниторезистивные головки считывания. В качестве НЗ могут использоваться узкие и широкие магнитные ленты, а также жесткие диски компьютеров.

До настоящего времени этот вид записи является ведущим в радиовещании, так как он обеспечивает наибольшую длительность непрерывной записи звука и на его основе создан громадный парк магнитофонов самого различного назначения. Серьезным недостатком является относительно малое время хранения магнитной записи, которое обычно не превышает 10... 30 лет.

В стандарте DASH осуществляется многоканальная запись звука на движущуюся с большой скоростью широкую магнитную ленту. Фонограмма записывается на множество продольных дорожек с помощью блока неподвижных магнитных головок. В стандарте DAT используется наклонно-строчечная запись стереофонического сигнала на медленно движущуюся узкую магнитную ленту с помощью двух вращающихся магнитных головок. В формате HDD производится многоканальная запись звука на вращающийся жесткий диск компьютера в форме концентрических дорожек с секторной организацией данных. Запись осуществляется медленно перемещающейся по радиусу магнитной головкой.

Оптическая запись осуществляется на дисковых оптических носителях с основой из прозрачного полимера. Запись и считывание звуковой информации производится лазерным излучением, сфокусированным в пятно диаметром 0,3... 1,0 мкм. Практически она реализуется в двух вариантах, отличающихся способами регистрации цифровой информации и назначением.

Рельефно-фазовая оптическая запись применяется для массового изготовления дисков с записью музыкальных программ. Запись и тиражирование таких дисков производится принципиально так же, как изготавливаются виниловые грампластинки, но на более высоком технологическом уровне штамповки. При этом используется механический способ записи, при котором информация

хранится на диске в виде изменений рельефа его поверхности, как это делается на грампластинках. Штампованные диски выпускаются на специализированном производстве. На этих дисках цифровая звуковая информация регистрируется вдоль спиральной дорожки в виде последовательности микроуглублений различной длины и, что очень важно, заданной глубины. Благодаря этому при считывании возникает фазовая модуляция отраженного светового потока. В радиовещании эти диски используются в качестве источника готовых музыкальных программ.

Амплитудная оптическая запись широко используется в профессиональной и бытовой звукозаписывающей аппаратуре. В этом случае цифровая информация регистрируется в виде локальных изменений коэффициента отражения светочувствительного покрытия диска. Для осуществления амплитудной записи массово тиражируются подложки этих дисков с «немой» канавки с нанесением покрытий, имеющих различные характеристики. В зависимости от свойств покрытия запись может производиться только однократно или возможно стирание и повторная многократная запись.

Форматы дисков CD-R, DVD-R, Blue Ray и HD-DVD предназначены только для однократной записи. Их используют для архивной записи звука в студийных условиях в любых стандартах. Поверхность дисков этих форматов покрывают светочувствительным покрытием на основе органического красителя, у которого при записи под действием лазерного излучения меняется коэффициент пропускания в точном соответствии с записываемой цифровой информацией.

Форматы CD-RW и DVD-RW предназначены для многократной записи. Перезаписываемые диски отличаются тем, что запись на них можно стереть и произвести повторно почти бесконечное число раз. Для обеспечения возможности записи и стирания информации покрытие изготавливается из материалов, которые под действием нагревания от лазерного излучения могут переходить из кристаллического состояния в аморфное и обратно. В радиовещании такие оптические диски часто применяют в студиях для монтажа фонограмм вместо магнитных дисков.

В стандарте MD стереофонический звуковой сигнал записывается на оптическом диске со специальным магнитным покрытием с помощью магнитной головки и лазера со сфокусированным излучением, которые медленно перемещаются по радиусу диска. Фонограмма имеет вид спиральной дорожки. Запись осуществляется слабым магнитным полем при одновременном нагреве его лазерным излучением только в областях дорожки, где температура нагрева выше точки Кюри. Намагниченности фонограммы разной полярности меняют угол поляризации отраженного считывающего светового пучка.

Магнитооптическую запись можно стирать с помощью лазерного излучения и повторно записывать, поэтому технические характеристики магнитных и магнитооптических дисковых рекордеров достаточно близки, и они используются в процессе монтажа многоканальных фонограмм большого объема.

По ориентировочной оценке длительность хранения записи на оптических и магнитооптических дисках профессионального назначения может достигать 100 ... 250 лет.

Развитие стандартов цифровой записи звука происходит в направлениях повышения качества звучания. Для этого используется большее число разрядов, повышается частота дискретизации и происходит переход от стереофонической записи звука к шестиканальной, обеспечивающей более качественное пространственное звучание. Для увеличения непрерывной длительности записи в новых оптических форматах, таких как HD-DVD¹, а также Blue Ray Disc, существенно уменьшена длина волны излучения лазера и повышена апертура фокусирующего объектива, благодаря чему уменьшен диаметр сфокусированного лазерного излучения до 0,3 мкм.

По своему назначению цифровая звукозаписывающая аппаратура разделяется на три группы:

1) студийная аппаратура записи и воспроизведения звуковых сигналов (цифровые магнитофоны, студийные магнитофоны со стерео- и многоканальной записью звука, многоканальные дисковые магнитные рекордеры, магнитооптические накопители, лазерные рекордеры и профессиональные проигрыватели оптических дисков различных форматов);

2) репортерская аппаратура звукозаписи (катушечные и кассетные цифровые стереомагнитофоны, магнитооптические рекордеры);

3) бытовая аппаратура записи и воспроизведения звука (бытовые плееры оптических дисков, стереомагнитофоны и кассетные магнитные плееры).

Отличие этих трех групп заключается прежде всего в технических возможностях аппаратуры.

Первичная студийная запись в аналоговой форме на современных магнитных лентах обеспечивает достаточно высокое качество, поэтому до сих пор она часто используется для создания цифровых дисков в формате CD-DA. Нередко цифровые записи на оптических дисках, изготовленные на основе аналоговых фонограмм, звучат хуже, чем исходный оригинал.

¹ Аббревиатура: CD-DA (Compact Disc Digital Audio), SACD (Super Audio Compact Disc), DVD-A (Digital Versatile Disc Audio), CD-R (Compact Disc Recordable), CD-RW (Compact Disc Rewritable), DVD-R (Digital Versatile Disc Recordable), DVD-RW (Digital Versatile Disc Rewritable), HDD (Hard Disc Digital), DASH (Digital Audio Stationary Head), DAT (Digital Audio Tape Recorder), HD-DVD (High Density DVD), BD (Blue Ray), MO (Magneto Optical), MD (Mini Disc).

CD-RW и DVD-RW предназначены для многократной записи и используются для редактирования фонограмм.

Завершена разработка еще двух форматов оптической записи звука под названием Blue Ray Disc и HD-DVD. Записываемые диски этих форматов имеют диаметр 120 мм, но запись производится лазером с длиной волны излучения всего 405 нм и используется объектив с числовой апертурой 0,85 и 0,6 соответственно, что позволило существенно уменьшить диаметр считывающего пятна света. В формате HD-DVD емкость одного слоя составляет 15 Гбайт, в формате Blue Ray Disc — 23,3 Гбайт. Ведутся работы по дальнейшему повышению емкости таких дисков до 50 Гбайт и выше. Для этого обрабатывается технология увеличения числа слоев от 2 до 6.

7.2. Физические основы оптической записи

Основой оптических систем является использование сфокусированного лазерного излучения для записи и воспроизведения цифровой информации. Размеры сфокусированного пятна света определяют предел поверхностной плотности записи. Излучение полупроводникового лазера фокусируется в пятно микронных размеров с помощью микрообъектива. Его основным параметром является числовая апертура (рис. 7.1), определяемая равенством

$$NA = \varepsilon \sin \Psi_0,$$

где ε — коэффициент преломления материала подложки НЗ; Ψ_0 — угол сходимости светового пучка при фокусировке.

Чем больше значения этих параметров, тем меньше размеры сфокусированного пятна. В справочных данных всегда указывается

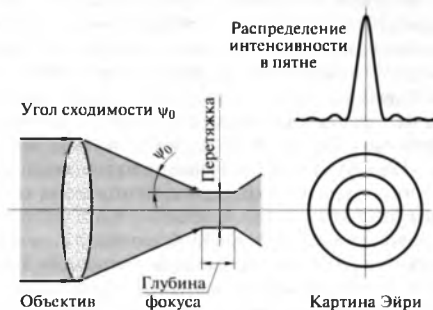


Рис. 7.1. Фокусировка лазерного излучения

апертура объектива с учетом коэффициента преломления. В воздухе $\epsilon = 1$, для материала подложки оптических дисков $\epsilon = 1,55$.

Сфокусированное излучение лазера имеет распределение интенсивности в поперечном сечении, описываемое функцией Бесселя, поэтому нельзя ничего сказать о его диаметре. Под микроскопом же видна дифракционная картина Эйри в виде кольцевых зон с различной интенсивностью света, разделенных черными кольцами, где интенсивность равна нулю (см. рис. 7.1).

Диаметр сфокусированного пятна по первому черному кольцу d_{bk} этой картины определяется равенством

$$d_{bk} = 1,22 \frac{\lambda}{NA},$$

где λ — длина волны излучения лазера.

Для расчета плотности записи и величины считываемого сигнала принято определять размеры светового пятна на уровне 0,5 по интенсивности света, тогда

$$d_{0,5} = 0,61 \frac{\lambda}{NA}.$$

Из этой формулы следует, что в лучшем случае, когда числовая апертура равна 1, диаметр сфокусированного пятна превышает половину длины волны излучения, поэтому предел плотности записи тем выше, чем меньше длина волны излучения.

Разрешающая способность объектива определяет число линий на миллиметр, которое способен различить объектив:

$$\eta = \frac{2NA}{\lambda}.$$

Сфокусированное излучение имеет перетяжку, где излучение является плоской волной, и поэтому диаметр светового пятна почти не меняется (см. рис. 7.1). Длина этой перетяжки называется *глубиной фокуса*. Она связана с апертурой объектива квадратичной зависимостью

$$G = \frac{\lambda}{NA^2}.$$

Глубина фокуса определяет необходимую точность работы системы автоматической фокусировки. Когда ошибка фокусировки превышает половину глубины фокуса, диаметр светового пятна начинает быстро увеличиваться. Это приводит к резкому снижению разрешающей способности объектива и, как следствие, к уменьшению глубины модуляции считываемого сигнала. В табл. 7.3 приведены сравнительные данные по фокусировке

Фокусировка лазерного излучения

Параметр	CD	DVD, SACD	HD-DVD	Blue Ray
Числовая апертура объектива	0,45	0,6	0,65	0,85
Разрешение, лин/мм	1 154	1 846	3 202	4 197
Длина волны лазера, нм	780	650 (635)	405	405
Диаметр пятна по уровню 0,5, мкм	1,06	0,66	0,38	0,29
Глубина фокуса, мкм	$\pm 1,9$	$\pm 0,9$	$\pm 0,48$	$\pm 0,28$

лазерного излучения для различных стандартов и форматов оптической записи.

На рис. 7.2 схематически представлен процесс считывания оптической записи сфокусированным лазерным излучением. Диаметр светового пятна по уровню 0,5 лишь немного превышает ширину дорожки, и с его помощью осуществляется воспроизведение, если длина питов (меток) не меньше этого диаметра.

Приведенному распределению интенсивности вдоль дорожки соответствует точно такое же распределение и поперек, поэтому считывание сопровождается помехами от соседних дорожек и соседних пит. Чем выше плотность записи, тем эти помехи больше.

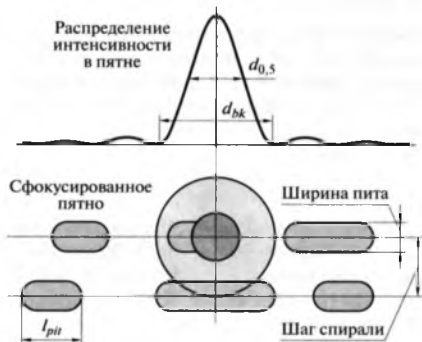


Рис. 7.2. Считывание оптической записи

Плотность оптической записи и емкость диска существенно зависят от выбора канального кода, который прежде всего определяет минимальную длину питов:

$$l_{pit\ min} = \frac{(d+1)V_r}{f_T},$$

где d — параметр канального кода, определяющий минимальный временной интервал кода; V_r — линейная скорость записи; f_T — тактовая частота канального кода.

Линейная плотность записи (вдоль дорожки)

$$D_{lin} = \frac{K_{dch}}{l_{pit\ min}},$$

где K_{dch} — коэффициент плотности канального кода;

$$K_{dch} = \frac{m(d+1)}{n}.$$

Здесь m/n — скорость канального кода.

Поверхностная плотность записи D_s зависит от шага спиральной дорожки Δ_s , который для уменьшения помех от соседних дорожек должен превышать диаметр считывающего пятна

$$\Delta_{sp} = (1,0 \dots 1,5)d_{0,5}.$$

Поэтому эта плотность определяется равенством

$$D_s = \frac{D_{lin}}{\Delta_{sp}}.$$

Существует две емкости оптического диска. Первая называется *физической* и рассчитывается по формуле

$$C_{dt} = D_s \pi (R_{\max}^2 - R_{\min}^2),$$

где R_{\max} и R_{\min} — максимальный и минимальный радиусы зоны записи.

Вторая называется *емкостью пользователя*. Она связана с максимальной скоростью цифрового потока аудиоданных V_{ad} и временем записи T_{rec} :

$$C_{ad} = V_{ad} T_{rec}.$$

Из табл. 7.3 и 7.4 очевидно, что с небольшим увеличением числовой апертуры с 0,45 до 0,8 и уменьшением длины излучения лазера с 0,78 до 0,405 мкм поверхностная плотность в оптических системах записи за 25 лет возросла в 27 раз.

Воспроизведение оптических дисков осуществляется отраженным световым пучком, поэтому основной задачей схемы считыва-

Плотность оптической записи

Формат записи	Размер питов		Плотность записи		Емкость слоя, Гбайт	
	длина минимальная	шаг Δ	D_{lin} , Кбит/мм ²	D_s , Мбит/мм	Data	Audio
CD	0,83	1,66	1,69	1,08	1,1	0,84
DVD-A	0,4	0,74	3,75	5,07	5,55	4,7
HD-DVD	0,23	0,4	6,52	16,3	17,8	15
Blue Ray	0,16	0,32	8,75	27,3	29,9	25

вания записи является разделение прямого и отраженного пучков с минимальными потерями. Упрощенная схема оптической системы, предназначенная только для воспроизведения записи с оптических дисков *отраженным световым пучком*, приведена на рис. 7.3. Лазерное излучение, которым осуществляется воспроизведение записи, обычно имеет *круговую поляризацию*, при которой составляющие с горизонтальной и вертикальной поляризацией равны и сдвинуты по фазе на 90° . Поэтому разделение световых пучков может осуществляться с помощью *поляризационного светоделителя*.

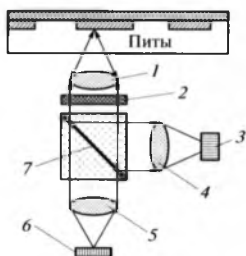


Рис. 7.3. Оптическая головка:

1 — объектив; 2 — пластинка $\lambda/4$; 3 — фотодиод; 4 — линза; 5 — коллиматор; 6 — лазер; 7 — светоделитель

Такой светоделитель имеет почти 100%-й коэффициент пропускания для одной составляющей поляризованного лазерного излучения и также почти 100%-й коэффициент отражения для другой составляющей. Использование явления поляризации света для разделения прямого и отраженного световых пучков позволяет резко снизить потери в оптической системе, и становится возможным осуществлять воспроизведение оптической записи полупроводниковым лазером мощностью всего 0,5... 1,0 мВт.

Излучение полупроводникового лазера сконцентрировано в эллиптическом конусе. Угловая полуширина в одной плоскости равна $\pm 5^\circ$, а в другой —

$\pm 20^\circ$. Коллиматор оптической системы выполняет две функции. Он формирует параллельный пучок света минимальной расходимости и преобразует эллиптический конус излучения в круговой. Четвертьволновая пластина оптического тракта изменяет угол поляризации светового пучка на 45° .

В приведенной схеме через четвертьволновую пластинку световой пучок проходит дважды: сначала, когда он фокусируется на носитель записи, и затем при отражении. Каждый раз четвертьволновая пластинка меняет угол поляризации излучения на 45° . В результате она осуществляет поворот угла поляризации на 90° и таким образом преобразует горизонтальную поляризацию в вертикальную. Поэтому отраженный световой пучок поворачивается на угол 90° и через дополнительную линзу фокусируется на фотоприемник.

Для отражения светового пучка на однослойных оптических дисках наносится металлическое покрытие на основе алюминия или серебра толщиной 50...100 нм с коэффициентом отражения 60...80%. В двухслойных DVD-дисках в качестве полупрозрачного отражающего покрытия применяют золото или специальное поляризационное покрытие на основе кремния с коэффициентом отражения 20...25%. При воспроизведении записи с двухслойных DVD-дисков производится перефокусировка лазерного излучения с одного слоя на другой.

В стандарте SACD для воспроизведения записи используются две оптические головки с разными объективами и лазерами (см. табл. 7.3). Излучение одного лазера фокусируется на дальний слой, а излучение другого лазера — на ближний. В ближнем слое в качестве отражающего используется поляризационное покрытие на основе кремния, которое излучение с одной длиной волны полностью отражает, а излучение с другой длиной волны полностью пропускает. В дальнем слое используется алюминиевое покрытие с высоким коэффициентом отражения (70...80%), как это предусмотрено в стандарте CD.

Оптическая передаточная функция (ОПФ) объектива определяет зависимость глубины амплитудной модуляции выходного сигнала фотоприемника (ФП) от пространственной частоты η воспроизводимой цифровой фонограммы. Оптическая передаточная функция существенно зависит от размера и формы фотоприемника. Если площадь ФП совпадает по размерам с отраженным на него световым пятном, то ОПФ имеет вид графика 1, приведенного на рис. 7.4. При этом ее пространственная частота среза определяется равенством

$$\eta_{\text{срез}} = \frac{2NA}{\lambda}.$$

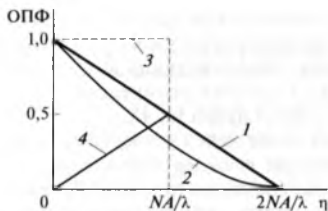


Рис. 7.4. Оптическая передаточная функция объектива с фотоприемником:

1—4 — графики ОПФ(η)

Для системы CD $\eta_{cut} = 1\ 125$ периодов. Частота среза воспроизводимого электрического сигнала f_{elc} , на которой глубина модуляции равна нулю, зависит от линейной скорости записи:

$$f_{elc} = \eta_{cut} V_{rec}.$$

При $V_{rec} = 1,25$ м/с имеем $f_{elc} = 1,4$ МГц.

Передаточная функция на графике имеет такой вид только при условии, что отсутствуют aberrации оптической системы. Ошибки фокусировки приводят к искривлению формы графической зависимости ОПФ и уменьшению разрешающей способности (график 2).

Если размеры ФП малы по сравнению с диаметром светового пятна нулевого порядка, то частота среза ОПФ уменьшается вдвое и ОПФ определяется графиком 3. При других размерах ФП графики ОПФ будут иметь вид промежуточный между графиками 1 и 3. Иногда для считывания используются два ФП, которые располагаются в зонах перекрытия нулевого и первых порядков дифракции. В этом случае считываемый сигнал формируется с помощью дифференциального усилителя, и тогда ОПФ определяется графиком 4. Такой вариант построения оптической схемы возможен, когда нет необходимости воспроизводить низкие частоты.

7.3. Рельефно-фазовая запись

В соответствии со стандартами CD-A, DVD-A и SACD цифровая звукозапись на оптических дисках производится вдоль воображаемой спиральной дорожки в виде последовательности микроуглублений поверхности диска из оптически прозрачного поликарбоната с коэффициентом преломления 1,55. Эти углубления называются *питами*, все они имеют одинаковую ширину

и глубину, а цифровые данные регистрируются в виде дискретных изменений длины этих пит и промежутков между ними в соответствии с используемым канальным кодом.

Запись производится с одной стороны диска, а считывание осуществляется с противоположной стороны сквозь достаточно толстую прозрачную основу диска сфокусированным лазерным излучением на отражение. При воспроизведении такой записи важную роль играет глубина пит, из-за которой возникает отличие длин оптических путей отраженного света от углублений и поверхности диска. Это создает фазовую модуляцию считывающего светового пучка. Так как эта модуляция связана с изменениями рельефа поверхности, то такая запись часто называется *рельефно-фазовой*.

Фактически это механический способ записи, каким производилась первичная запись грампластинок с помощью резца. Он обеспечивает наибольшее время хранения дисков, так как на них не оказывают влияния сильные магнитные или электрические поля, не возникает процессов окисления или коррозии. Практически такая запись реализуется путем тиражирования дисков с использованием никелевой матрицы, как это делалось ранее при изготовлении виниловых грампластинок.

Глубина фазовой модуляции максимальна, когда фазовый сдвиг отраженных лучей от пит и промежутков между ними φ равен π . В соответствии с законами геометрической оптики требуемая для этого глубина пит h_p рассчитывается по формуле

$$h_p = \frac{\varphi \lambda}{4\pi \varepsilon},$$

где λ — длина волны излучения лазера; ε — коэффициент преломления основы оптического диска.

Если используется лазер с инфракрасным излучением ($\lambda = 780$ нм) и материал диска имеет коэффициент преломления 1,55, тогда $h_p = 126$ нм.

Приведенная формула верна, когда размеры пит существенно больше диаметра считывающего пятна. Когда они соизмеримы, при расчетах надо учитывать волновую природу света и реальную геометрию питов, и тогда необходимая глубина пит может быть как меньше, так и больше расчетной. Чем меньше их размеры и короче длина волны излучения лазера, тем больше могут быть расхождения. Практически глубина пит на CD-диске равна 0,11 мкм, а на дисках DVD-A и SACD — 0,16 мкм. Она подбирается экспериментально по максимуму глубины модуляции. На рис. 7.5 запись представлена в виде разреза поперек дорожки, чтобы можно было показать глубину пит и разность хода отраженных световых лучей.

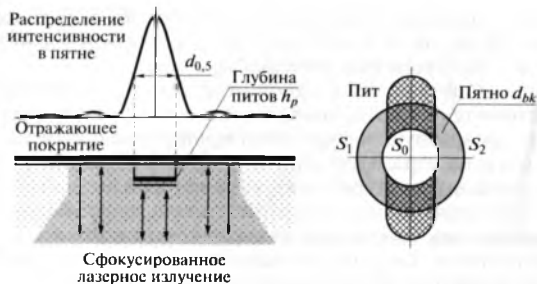


Рис. 7.5. Считывание рельефно-фазовой записи на отражение

Другое необходимое условие для считывания рельефно-фазовой записи — равенство световой энергии, отраженной непосредственно от пита (S_0) и окружающей его поверхности диска ($S_1 + S_2$). Когда считывающее пятно находится посередине пита, на ФП происходит интерференция противофазных световых пучков и значение тока приближается к нулю. При этом выполняется преобразование фазовой модуляции света в амплитудную модуляцию тока ФП с максимальным значением глубины модуляции. Для того чтобы энергии противофазных световых пучков были равны, необходимо, чтобы диаметр считывающего пятна света по уровню 0,5 был больше ширины питов почти в два раза. Это объясняется неравномерным распределением интенсивности в сфокусированном пятне света. Если диаметр пятна равен ширине дорожки или меньше ее, то глубина фазовой модуляции будет очень мала и таким пятном воспроизвести рельефно-фазовую запись невозможно.

Третьим условием считывания рельефно-фазовой записи является выбор оптимальных размеров и формы ФП, располагаемого в плоскости изображения объектива. *Дорожка с питами* представляет собой нерегулярную фазовую отражающую решетку, на которой происходит дифракция света. Дифракция вдоль направления дорожки с питами наиболее сильно проявляется, когда световое пятно находит и сходит с пита, а также когда длина пита близка к радиусу светового пятна.

При дифракции светового пучка света возникают два и более дополнительных отраженных световых пучков. Они называются *порядками дифракции* ($0, \pm 1, \pm 2$ и т.д.). Для фазовой решетки интенсивность этих порядков затухает медленно, на скорость затухания сильное влияние оказывает глубина пит. Угол отклонения этих пучков ψ_d зависит от пространственной частоты η фазовой решетки и длины волны лазерного излучения λ :

$$\Psi_d = \arcsin(\lambda\eta).$$

Чем больше пространственная частота, тем больше угол отклонения. Фазовый сдвиг между 0-м и ± 1 -м порядками определяется следующими формулами:

$$\Delta\varphi_{+1} = \pi + 2\pi V_{\text{rec}}\eta t; \quad \Delta\varphi_{-1} = \pi - 2\pi V_{\text{rec}}\eta t,$$

где π — сдвиг, который обусловлен глубиной пит; t — текущее время.

Очевидно, что переменные, составляющие фазы в двух зонах перекрытия, сдвинуты по фазе на угол π .

При больших периодах решетки световые пучки всех порядков почти полностью перекрываются. С уменьшением периода решетки зона перекрытия уменьшается (рис. 7.6). При некотором значении η она становится равной нулю (перекрытия нет) и запись перестает воспроизводиться. В схеме воспроизведения на отражение объектив пропускает нулевой порядок дифракции и только те высшие порядки дифракции, которые с ним перекрываются. Остальные высшие порядки фильтруются объективом пространственно.

В зонах перекрытия возникает интерференция между нулевым и более высокими порядками дифракции (см. рис. 7.6). При этом фазовая модуляция светового потока преобразуется в амплитудную модуляцию тока ФП. Если размеры ФП совпадают с размерами светового пятна нулевого порядка, то происходит интегрирование интерференционной картины по всей площади ФП. При этом переменная составляющая тока ФП, обусловленная интерференцией световых пучков, определяется равенством

$$I_{\Sigma} = 4A_0A_1OTF(\eta)\cos(2\pi\eta V_{\text{rec}}t),$$

где A_0 , A_1 — интенсивности дифракционных 0-го и 1-го порядков соответственно; $OTF(\eta)$ — оптическая передаточная функция объектива.

Время хранения CD-дисков с рельефно-фазовой записью в нормальных климатических условиях всего 10... 15 лет. Это свя-

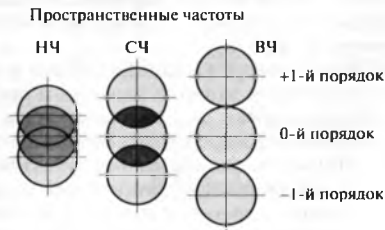


Рис. 7.6. Дифракция света в плоскости фотоприемника

зано с коррозией отражающего покрытия из алюминия. Такой же срок хранения у дисков SACD, в которых в качестве отражающего покрытия слоя с низкой плотностью записи также используется пленка алюминия. По опубликованным данным в DVD-дисках используются металлические отражающие и полупрозрачные покрытия для однослойных и двухслойных вариантов изготовления с коэффициентом отражения 65 и 30 % соответственно. Однако ничего неизвестно о материале этих покрытий. Предполагаемый срок хранения DVD-дисков от 50 до 300 лет. Однослойные и двухслойные DVD-диски изготавливаются из двух склеенных подложек толщиной 0,6 мм. При указанном сроке хранения наиболее вероятно, что отражение обеспечивается без применения металлических покрытий, например путем изменения коэффициента преломления материала каждой подложки вблизи ее информационной поверхности.

К *дефектности* CD-дисков особых требований не предъявляется, достаточно, чтобы вероятность ошибочных бит не превышала значения 10^{-3} . Требования к качеству дисков DVD (SACD) значительно более жесткие: размеры воздушных пузырьков не должны превышать 100 мкм, дефекты в виде темных пятен должны быть меньше 200...300 мкм, расстояние между дефектами вдоль дорожки — не менее 15...20 мм.

Поликарбонат, из которого изготавливаются оптические диски, достаточно мягкий материал и его легко поцарапать даже ногтем, поэтому брать диски в руки можно только за края. Их нельзя класть на стол прозрачной поверхностью, нельзя касаться этой поверхности пальцами и оставлять их отпечатки. На этих отпечатках происходит дифракция лазерного излучения, и воспроизведение становится невозможным.

Поверхность диска может протираться от пыли и даже полироваться для удаления царапин. Если оптические диски используются в помещениях с сильной запыленностью в виде очень мелкого песка, при длительной работе вся поверхность диска покрывается сеткой очень мелких царапин. Из-за этих царапин возникает дифракция лазерного излучения, и воспроизведение становится невозможным.

Оптический метод воспроизведения записи в значительной мере позволяет исключить влияние царапин и дефектов дисков на качество воспроизведения. Это обеспечивается тем, что сфокусированное излучение лазера имеет большой угол сходимости ($2\psi_0$), около 60° . При этом диаметр светового пятна на поверхности диска равен 0,8 мм, поэтому возможные дефекты внешней поверхности в виде мелких царапин и пылинок размером до 0,5 мм находятся далеко вне фокуса объектива, они пространственно фильтруются объективом и не оказывают влияния на качество

воспроизведения. Это является одним из важнейших преимуществ оптической записи.

Изготовление оптических дисков с рельефно-фазовой записью музыки включает в себя шесть этапов:

- запись цифровой мастер-ленты;
- изготовление диска-оригинала;
- запись на диск-оригинал первичной фонограммы;
- изготовление мастер-диска;
- изготовление никелевой матрицы и тиражирование дисков.

Цифровая *мастер-лента* содержит готовую музыкальную программу с тайм-кодом. Необходимая информация пользователя (название и длительности всех составных частей альбома и др.) готовится на компьютере и вводится с него в канал записи. Мастер-лента готовится на студии звукозаписи режиссером с помощью многорожечных цифровых магнитофонов.

Основа *диска-оригинала* изготавливается из оптического стекла, диаметр его 220 мм, толщина 10 мм. Он тщательно полируется и контролируется, вероятность дефектов на диске не должна превышать 10^{-6} . На поверхность диска наносится слой фоторезиста толщиной примерно равной $1/4$ длины волны излучения лазера, используемого в проигрывателе.

Фоторезист должен иметь максимальную чувствительность в области светового излучения используемого для записи лазера. Запись первичной фонограммы производится с помощью прецизионного лазерного рекордера (рис. 7.7). Для записи используется гелий-кадмиевый газовый лазер, у которого длина волны излу-

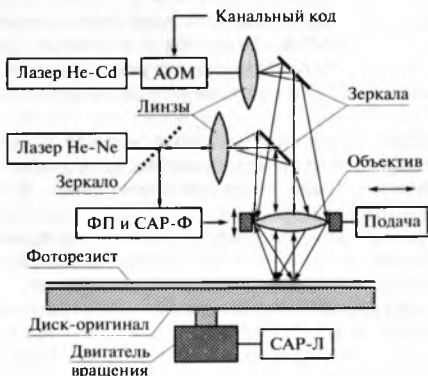


Рис. 7.7. Функциональная схема лазерного рекордера для изготовления дисков-оригиналов

ния 440 нм (синий цвет) и мощность излучения около 15 мВт. Его излучение фокусируется микрообъективом с числовой апертурой 0,9 в пятно диаметром 0,3 мкм.

Такой объектив имеет глубину фокуса всего 0,5 мкм, поэтому требуется эффективная автоматическая фокусировка (САР-Ф). Она осуществляется с помощью вспомогательного гелий-неонового газового лазера, полупрозрачного (п/п) зеркала и фотоприемника. Длина волны излучения этого лазера 632 нм (красный цвет) и мощность излучения 5 мВт. Фоторезист нечувствителен к такому излучению. Зеркало разделяет падающий и отраженный световые пучки

При записи осуществляется амплитудная модуляция излучения гелий-кадмиевого лазера с помощью акусто-оптического модулятора (АОМ). На вход модулятора подается звуковая информация в канальном коде. Излучения обоих лазеров оптически суммируются и фокусируются одним объективом.

При записи *диск-оригинал* вращается против часовой стрелки, а оптическая головка с объективом перемещается по радиусу диска. Запись производится с постоянной линейной скоростью V_{rec} , поэтому частота вращения диска ω , об/мин, зависит от радиуса записи R_{rec} :

$$\omega = \frac{60V_{rec}}{2\pi R_{rec}}.$$

Скорость радиальной подачи оптической головки определяется заданным шагом между дорожками так, чтобы за один оборот диска головка смещалась на заданный шаг спиральной дорожки. Стабилизации линейной скорости записи и скорости радиальной подачи головки осуществляются с помощью прецизионной механики и систем автоматического регулирования линейной скорости записи САР-Л и радиальной подачи оптической головки САР-РП.

Под действием модулированного лазерного излучения засвечивается фоторезист. В нем происходят невидимые физико-химические изменения, как в обычной фотопленке. В соответствии с временными интервалами канального кода в фоторезисте формируются невидимые питы. Далее следует этап проявления, при котором в засвеченных местах фоторезист вымывается и образуются углубления, соответствующие питам. Затем диск покрывается тонкой пленкой серебра, чтобы сделать его отражающим. Такой диск с записью фонограммы называется *мастер-диск*. Качество его тщательно контролируется на специальных проигрывателях.

Мастер-диск используется для изготовления никелевой матрицы электролитическим способом (рис. 7.8). С помощью этой матрицы изготавливаются рабочие матрицы «мама» и «папа».



Рис. 7.8. Процесс изготовления никелевой матрицы

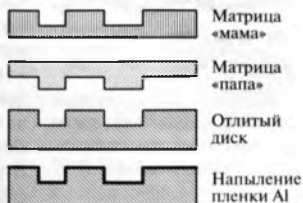


Рис. 7.9. Тиражирование оптических дисков

Тиражирование оптических дисков осуществляется с помощью матрицы «папа» из оптически прозрачного поликарбоната с коэффициентом преломления 1,5. Тиражирование может выполняться литьевым методом или методом прессования. После тиражирования на информационную поверхность каждого диска наносится отражающее покрытие из алюминия и защитное покрытие (рис. 7.9), на которое клеится этикетка.

7.4. Амплитудная запись

Амплитудная запись производится на оптических дисках форматов CD-R, DVD-R, CD-RW, DVD-RW, HD-DVD и Blue Ray. Она отличается от фазо-рельефной тем, что в процессе записи на светочувствительном покрытии вдоль спиральной дорожки цифровая информация регистрируется в виде темных штрихов, а не углублений, называемых *метками*. На отражающей поверхности диска метки имеют пониженный коэффициент отражения. Ширина их одинакова, а длина и расстояние между ними меняются дискретно в соответствии с используемым канальным кодом, так же как это имеет место при изготовлении дисков с рельефно-фазовой записью.

Физика считывания амплитудной записи. В процессе считывания отраженный световой пучок модулируется метками по интенсивности. При этом глубина модуляции тем больше, чем меньше диаметр считывающего пятна света. Неизбежно возникающая дифракция света на элементах записи в данном случае не имеет принципиального значения, не столь важны и размеры фотоприемника.



Рис. 7.10. Волнообразные канавки и служебные питы на поверхности оптических дисков

Амплитудная запись производится на записываемых и перезаписываемых дисках всех форматов, называемых *болванками*. Эти болванки массово тиражируются, как и диски с рельефно-фазовой записью. Отличие состоит в том, что при изготовлении диска-оригинала на слое фоторезиста записывается спиральная «немая» дорожка в виде канавки, имеющей глубину, ширину и шаг в соответствии с форматом записи. Между канавками

при изготовлении дисков записывается служебная информация в рельефно-фазовом виде (питы): требуемая мощность лазера, возможная скорость записи, временные и адресные коды.

В процессе записи диска-оригинала с помощью амплитудной модуляции производится периодическое отклонение светового пучка в радиальном направлении. Этот процесс называется *вобуляцией*. Одновременно производится частотная модуляция вобулирующего сигнала, с помощью которой записывается сигнал времени, позволяющий формировать тактовую частоту при воспроизведении записи с этих дисков.

В результате на штампованных болванках канавка имеет волнообразный характер (рис. 7.10). Такая форма канавки позволяет осуществлять радиальное слежение за положением записывающего пятна света относительно центра канавки. При тиражировании на поверхность болванки сначала наносится отражающее покрытие, а потом она вся покрывается тонким светочувствительным покрытием, но амплитудная запись производится только по дну канавки.

В каждом формате используются свои параметры вобуляции и частотной модуляции. Например, на CD-R-дисках частота и амплитуда вобуляции соответственно равны 22,5 кГц и 0,03 мкм, а кварцевая частота сигнала времени — 1 кГц. Частота вобуляции DVD-RW-дисков является функцией частоты вращения ω и определяется произведением 2880ω , при $\omega = 20$ Гц она равна 57 600 Гц.

Записываемые диски форматов CD-R и DVD-R. Основой конструкции таких дисков является подложка *E* из оптически прозрачного поликарбоната толщиной 1,2 мм у CD-дисков и 0,6 мм у DVD-дисков, на внутренней поверхности, на которой имеется спиральная канавка (рис. 7.11). У дисков указанных форматов в качестве светочувствительного покрытия используется тонкая прозрачная пленка фталоцианинового или цианинового органического красителя *D*. Такая пленка чувствительна к ла-

зерному излучению с длиной волны 635... 780 нм, и при нагреве этим излучением до температуры выше 100 °С она меняет свой цвет и становится для него непрозрачной. Поэтому после записи поверхность диска имеет высокий коэффициент отражения и не прозрачные информационные («черные») метки.

Оптический контраст такой записи тем выше, чем больше коэффициент отражения металлического покрытия *C*. Поэтому толщина покрытия достаточно большая, от 50 до 100 нм, и выполняется оно из серебра или его сплавов, у которых коэффициент отражения достигает 65...85 %. Для дисков профессионального назначения для этих целей используется золото и даже платина. Они очень дорогие. Для защиты информационного слоя от повреждений и воздействия воздушной среды дисков CD-R применяется лаковое покрытие *B*. Поверх него клеится этикетка *A*. Однослойные диски DVD-R отличаются тем, что вместо защитного покрытия приклеивается подложка из поликарбоната толщиной 0,6 мм. Она более надежно защищает информационный слой. В односторонних двухслойных DVD-R-дисках в одном слое используется отражающее покрытие из серебра, а в другом — полупрозрачное покрытие из золота.

Цианиновый краситель обладает сине-зеленым (цвет «морской волны») или насыщенно синим оттенком рабочей поверхности. Фталоцианин в большинстве случаев практически бесцветен, с бледным оттенком салатового или золотистого цвета, из-за чего диски на основе фталоцианинового активного слоя часто называют «золотыми». Сложно сказать, какой из этих двух типов слоев лучше. Цианиновый краситель более терпим к предельным сочетаниям мощности чтения (записи), чем «золотой» фталоцианиновый, поэтому зачастую диски на основе цианинового слоя проще считывать на некоторых дисководов. Фталоцианин — более современная разработка. Диски на основе этого активного слоя менее чувствительны к солнечному свету и ультрафиолетовому излучению, что способствует увеличению долговечности записанной информации и несколько более надежному хранению в неблагоприятных условиях.

При записи с однократной скоростью сканирования используются лазеры с мощностью 4...8 мВт. При 40-кратном (40×) повышении скорости требуется увеличение мощности лазера до 40 мВт. Под действием лазерного излучения температура красителя повышается до 250 °С, в нем происходят химические изменения

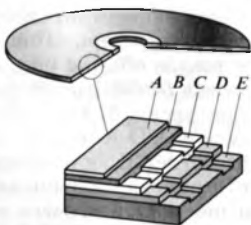


Рис. 7.11. Конструкция диска CD-R

и коэффициент отражения уменьшается с 75 до 25 %. Отношение сигнал-шум при записи составляет около 47 дБ. Вероятность дефектов обычно оценивается значением частоты ошибочных блоков *BLER*, равной примерно 20 бл/с, тогда как стандартом CD допускается *BLER* = 220 ошибочных блоков/с. Срок хранения записи на CD-R-дисках с алюминиевым покрытием не превышает 10... 15 лет. Если используется отражающее покрытие из серебра, то это время увеличивается до 75... 100 лет. Еще больше время хранения записи на очень дорогих профессиональных CD-R-дисках с золотым или платиновым покрытием — достигает 200 лет. Примерно такой же срок хранения у DVD-R-дисков. Критерием времени хранения является увеличение вероятности ошибочных блоков выше допустимого значения.

Перезаписываемые диски форматов CD-RW и DVD-RW. У дисков CD-RW и DVD-RW информационная поверхность диска со спиральной канавкой покрывается тонкой пленкой материала, который может под влиянием температуры переходить из кристаллического состояния в аморфное с заметным изменением коэффициента отражения. В качестве такого материала используется множество сплавов, имеющих низкую температуру кристаллизации. Например, сплав серебра, индия, сурьмы и теллура имеет температуру кристаллизации 200 °С. У него в кристаллическом состоянии коэффициент отражения около 35 %, а в аморфном состоянии он уменьшается до 25 %. Похожие характеристики имеет сплав германия, сурьмы и теллура, у него температура кристаллизации 150... 200 °С, а температура плавления — 600 °С.

Подложка у дисков этих форматов такая же, как и у записываемых дисков. Термочувствительное покрытие наносится между двумя слоями диэлектриков (рис. 7.12). Химический состав активного слоя определяют такие важные показатели, как время и температура кристаллизации, толщина слоя — коэффициент

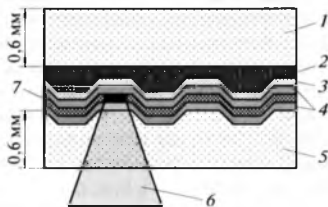


Рис. 7.12. Конструкция диска DVD-RW:

1 — подложка из поликарбоната; 2 — связывающий слой; 3 — пленка алюминия; 4 — буферные слои ZnS-SiO₂; 5 — подложка со спиральной канавкой; 6 — сфокусированное излучение; 7 — краситель



Рис. 7.13. Запись, стирание и считывание информации с CD-RW-дисков

отражения, а состав и толщина окружающих диэлектрических слоев — теплопроводность и соответственно время охлаждения слоя в процессе термической записи. Слой алюминия также выполняет буферную роль.

Диски CD-RW также имеют отражающее покрытие из серебра, золота или платины. Цвет у них серо-коричневый. Контраст записи на этих дисках значительно меньше, чем на CD-R-дисках, и они читаются не на всех дисководов.

Изначально светочувствительный слой находится в кристаллическом состоянии. Запись производится импульсным сфокусированным лазерным излучением, которое в течение длительности короткого управляющего импульса около 12 нс нагревает его выше температуры плавления 500...700 °C (рис. 7.13). По окончании действия этого импульса происходит быстрое охлаждение активного слоя до температуры ниже кристаллизации, поэтому он переходит в аморфное состояние. Быстрое охлаждение достигается благодаря высокой теплопроводности окружающих покрытий. Результат охлаждения — предотвращение образования центров кристаллизации, поэтому роста кристаллической фазы не происходит и материал переходит в аморфное состояние.

Для стирания записи и возвращения активного слоя в кристаллическое состояние необходим нагрев ниже температуры плавления, но выше температуры кристаллизации — около 200 °C. Время этого нагрева должно быть больше времени кристаллизации. Таким образом, запись производится коротким импульсом большой мощности, а стирание — более длительным импульсом меньшей мощности.

Запись сигналов осуществляется в канальном коде, когда цифровая информация передается в виде различной длины временных интервалов от $3T$ до $14T$. Этим временным интервалам соответствуют серии коротких мощных световых импульсов от 3 до 14 подряд (рис. 7.14). В стандарте CD T_{\min} равно 694 нс, а в стандарте DVD—38 нс, им и соответствует длительность световых импульсов записи около 12 нс.