

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №16

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КОМПАКТ-ДИСКОВ

**Цель:** Знакомство с устройством и принципами хранения информации на оптических лазерных дисках. Использование явления дифракции света для определения плотности записи и объема записанной информации. Оценка максимально достижимой плотности записи на лазерных компакт-дисках и минимальных размеров привода CD ROM.

#### Содержание

1. Цифровая форма представление информации
2. Принцип записи и хранения информации на CD
3. Устройство считывающей головки CD-привода
4. Теория метода измерения плотности записи
5. Разрешающая способность линзы
6. Методика проведения измерений
7. **Задания:**
  1. Измерение периода дифракционной решетки CD
  2. Определение информационной емкости CD и плотности записи информации
  3. Определение размеров линзы считывающей головки привода CD ROM
  4. Оценка максимально допустимой плотности записи информации с ИК лазерами
8. Форма отчетности
9. Оборудование
10. Литература
11. Контрольные вопросы
12. Приложение

## **ЦИФРОВАЯ ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ**

Вся информация в компьютере представляется в цифровом двоичном коде. Каждому символу соответствует свой индивидуальный набор единиц и нулей, то есть свой персональный код. Именно по этим кодам компьютер и распознает символ, когда читает его из файла или получает с клавиатуры.

Естественно, что как и на носителях любого другого типа, информация на оптических лазерных компакт-дисках (Compact Disk — CD) хранится также в двоичной форме, то есть записывается в виде набора 1 и 0. Эта единица хранения информации называется битом (bit). Восемь битов составляют еще одну единицу — байт (byte). Напомним, что

1 байт = 8 бит = 23 бит

1 Кбайт = 1024 байт = 210 байт

1 Мбайт = 1024 Кбайт = 210 Кбайт = 1048576 байт = 220 байт

Цифровой способ записи данных применяется не только в компьютерной технике. Эта форма записи очень устойчива к различного рода помехам. При считывании цифровой записи амплитуда сигнала, в отличие от аналоговой формы, не важна. Важно лишь наличие или отсутствие сигнала. Поэтому в настоящее время этот способ хранения информации используется в очень многих отраслях науки и техники. Самым доступным примером этому являются audio- и video-диски.

Все виды оптических дисков имеют разную плотность записи в различной кодировке, что приводит к большим отличиям в их информационной емкости.

### **Внимание !!!**

В этой работе речь идет только об однократно записываемых оптических компакт-дисках. Работа оптических дисков, позволяющих многократно реализовывать цикл запись-стирание, основана на других физических принципах.

## **ПРИНЦИП ЗАПИСИ И ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ НА CD**

В отличие от магнитных носителей (FD и HD), где 1 и 0 отличаются наличием или отсутствием намагниченности магнитного слоя накопителя, на лазерных дисках каждый бит записан в виде наличия или отсутствия отражения лазерного луча от поверхностного оптического диска.

Различают два основных технологических процесса изготовления компакт-дисков: для индивидуальной записи и для выпуска серии одинаковых дисков.

Индивидуальная запись делается на пишущем CD ROM непосредственно на компьютере. В этом случае она ведется на специальные матрицы с тонким (несколько микрон) слоем напыленного в вакууме металла с высоким коэффициентом отражения в ИК-области спектра. Для этого чаще всего используется золото (Au).

Металлический отражательный слой наносится на непрозрачное пластиковое термопластичное основание и сверху покрывается слоем прозрачной пластмассы, призванной защищать его от внешних воздействий. Перед началом записи в записывающем устройстве матрица немного подогревается. В процессе записи в месте фокусировки луча ИК-лазера в нагретом термопласте подстилающего слоя происходит фотохимическая реакция, в результате которой происходит структурная перестройка

поверхностного слоя — ранее гладкая поверхность становится матовой. Поскольку на подстилающий слой предварительно нанесен отражающий металлический слой, то в данном месте он также становится матовым. Из-за потери зеркальности луч лазера, попадающий на этот участок поверхности при считывании, рассеивается, а в приемный фотодатчик попадает света значительно меньше, чем от неповрежденного зеркального участка.



Рис.1. Вид поверхности компакт-диска при большом увеличении (черным цветом показаны участки с нарушенным отражающим слоем)

Сигнал, пришедший от зеркального участка отражающего слоя, интерпретируется как 1, а от матового — как 0. Эти участки диска (матовый и зеркальный) получили название пиксели. На каждом из таких пикселей записывается 1 бит информации. При записи и при считывании диск вращается с постоянной угловой скоростью. Поэтому пиксели должны были бы представлять собой очень маленькие отрезки дуг, длина которых зависит от радиуса. Однако с помощью регулировки длительности лазерного импульса в зависимости от расстояния до оси вращения, длина всех пикселей делается одинаковой.

При выпуске **серии компакт-дисков** на отражающей поверхности (она здесь открыта) сначала записывается так называемый мастер-диск. При этом лазерный луч уже прожигает (испаряет) отражательный слой. В результате получается зеркальный металлический слой с рядом мельчайших отверстий (пикселей). Далее на отражательный слой, содержащий информацию в виде пикселей, химическим или другим путём осаждается слой другого металла (чаще, никеля) в несколько миллиметров толщиной. После отделения (например, растворения) первого отражательного слоя получается штамп с микроскопическими выступами в тех местах, где лазер при записи уничтожил отражательный слой. С помощью полученного штампа на термопластичной пластмассе изготавливается нужное количество копий мастер-диска. При этом каждому отверстию в отражающем слое мастер-диска на штампованной копии соответствует углубление в термопласте. После штамповки на каждый диск в вакууме напыляется Al, а поверх него наносится защитный слой прозрачной пластмассы (лака). В результате вид записанной информации на штампованном серийном диске становится несколько иной, чем на индивидуальном.

Понять происходящие при этом процессы может помочь схема, показанная на Рис.2.

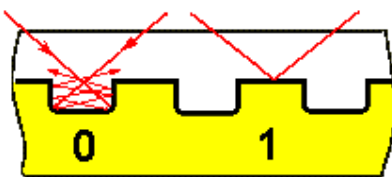


Рис.2. Схематичный разрез компакт-диска, изготовленного штамповкой

Из-за реальных размеров пикселей в несколько мкм определяющую роль здесь играют уже волновые свойства света (о них речь пойдет ниже). Но и такая

(грубая и не очень корректная с этой точки зрения) геометрическая интерпретация поведения световых лучей показывает, что при попадании на углубление (0) свет рассеивается и в апертуру приемной линзы его попадет уже во много раз меньше, чем при отражении от ровной поверхности (1).

Размеры пикселя зависят от характеристик лазерного излучения, параметров фокусирующей линзы, скорости вращения диска при записи и расстоянии до оси вращения. Однако в среднем по всей поверхности диска можно с достаточной для оценки степенью точности считать длину пикселя равной ширине.

### УСТРОЙСТВО СЧИТЫВАЮЩЕЙ ГОЛОВКИ CD-ПРИВОДА

Считывание информации с CD производится с помощью специальной головки, устройство которой схематично показано на Рис.3.

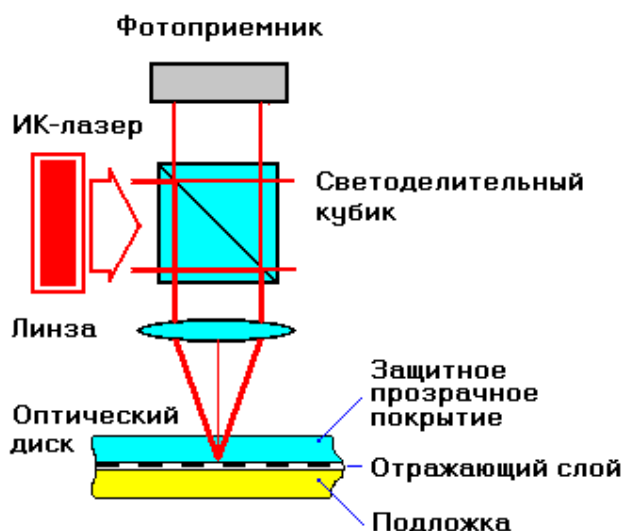


Рис.3. Устройство считывающей головки CD ROM

Фокусировка лазерного излучения и соби́рание отраженного от поверхности CD света осуществляется одной линзой.

Часть излучения лазера световодительным кубиком направляется на собирающую линзу и фокусируется на отражающую поверхность оптического диска. Если лазерный луч попадает на неповрежденный участок зеркального покрытия, то отраженное от него излучение собирается той же самой линзой и, пройдя световодитель, попадает на фотоприемник, который регистрирует наличие сигнала — это 1. Если покрытие не отражает — фотоприемник ничего не регистрирует, то есть отсутствие сигнала эквивалентно 0. Конечно, на световодителе половина интенсивности лазера и отраженного сигнала теряется, но другие преимущества (компактность, надежность и низкая себестоимость) данной схемы компенсируют этот недостаток. По сравнению с магнитными носителями способ хранения информации на оптических дисках отличается повышенной помехоустойчивостью и надежностью. Защищающий отражательную поверхность слой прозрачной пластмассы может быть и поцарапан и запылен и облит чем-либо. Однако это приведет лишь к тому, что от лазера до отражающего слоя (и обратно до фотоприемника) дойдет только несколько меньше света, поскольку луч лазера фокусируется строго на

отражающую поверхность, проходя слой защитной пластмассы в расфокусированном виде. В результате на дефектах защитного слоя происходит только рассеяние части лазерного пучка. А поскольку интенсивность излучения лазерного диода и чувствительность фотоприемника взяты с большим запасом, то на возможности считывания информации это практически никак не скажется.

Необходимо также отметить, что наиболее опасными (с точки зрения последствий и возможности восстановления) являются царапины, ориентированные по дуге окружности диска или по хорде (особенно во внешней от центра области). Поскольку запись идет по окружности, такие царапины перекрывают большую часть записанной подряд информации. Радиальные царапины гораздо менее опасны.

Audio- и video-диски реагируют на присутствие повреждений гораздо слабее компьютерных. Это происходит потому, что потеря одного-двух (и даже нескольких подряд) битов практически никак не сказывается на воспроизведении звука и изображения. Компьютерные диски с этой точки зрения более чувствительны к погрешностям записи. Но и здесь специальными алгоритмами кодирования можно добиться снижения чувствительности к потере нескольких битов.

Тем не менее, бережливое отношение к компакт-дискам поможет избежать больших неприятностей, связанных с потерей записанной на них информации.

## ТЕОРИЯ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЗАПИСИ

Структуру оптического диска, который предназначен для записи и хранения информации в цифровом виде, можно представить, как плоскую отражательную дифракционную решётку, состоящую из концентрических штрихов, образованных цепочками пикселей. Чтобы считать записанную на компакт-диске информацию необходимо сфокусировать лазерный луч в пятно, соизмеримое с размерами пикселя. А вот если использовать пучок диаметром в несколько десятков или сотен пикселей, то можно получить интегральную по сечению пучка информацию о размерах самих пикселей. В этом случае вследствие явления дифракции отраженный свет будет представлять совокупность дифракционных максимумов, причем основная интенсивность будет сосредоточена в главных максимумах. Положение главных максимумов определяется условием

$$d \sin \varphi = m\lambda, \quad (1)$$

где  $d$  - период решётки,  $\lambda$  - длина волны,  $\varphi$  - угол дифракции,  $m$  - порядок дифракции. Измерив угол дифракции, и, зная значение длины волны света а также порядок дифракции, можно легко на основании соотношения (1) определить период используемой решетки.

В нашем случае  $d$  — это расстояние между центрами штрихов дифракционной решетки или суммарная ширина пикселя и промежутка между дорожками из пикселей. Поэтому ширина каждого пикселя может быть принята равной  $d/2$ . Если же считать, что длина одного пикселя равна его ширине, то площадь, занимаемая одним битом информации, будет равна

$$S_0 \approx \frac{d^2}{2}.$$

Таким образом, определение постоянной решетки дает возможность определить характерный геометрический параметр плотности записи

информации на оптическом диске, поскольку постоянная решётки  $d$  как раз и является параметром площади пикселя – элементарного участка записи информации на диске.

Величина

$$W = 1/S_0 = 2/d^2 \quad (2)$$

представляет собой плотность записи информации или просто плотность информации. Для удобства использования параметр плотности информации  $W$  рассчитывается из расчета количества битов на  $1 \text{ мм}^2$ . Размерность величины  $[W] = \text{бит/мм}^2$ . Отсюда следует, что, зная общую площадь  $S_{data}$ , занятую информацией на диске, можно определить информационную емкость  $Q_{data}$  оптического диска в битах.

$$Q_{data} = S_{data} W \quad (3)$$

### Разрешающая способность линзы

Одной из важнейших проблем, возникающих при разработке новых вычислительных машин, является увеличение плотности записи информации. Как видно из (3), плотность записи сильно зависит от размеров пикселя. Однако волновая природа используемого излучения накладывает ограничения на его минимальный размер и соответственно на расстояние между соседними пикселями. Определим, от каких свойств оптических элементов CD-ROM будет зависеть минимально возможный размер пикселя и в конечном итоге – плотность записи.

Вследствие явления дифракции линза, свободная от аберраций, не дает точечного изображения параллельного пучка света. Получающееся изображение будет иметь вид некоторого круга (диска Эйри), размер которого зависит от диаметра линзы, ее фокусного расстояния и длины волны. Пусть имеются две светящиеся точки, расположенные на некотором расстоянии друг от друга. Тогда каждая из точек вследствие дифракции будет создавать свое изображение в виде светлых кружков. В соответствии с критерием Рэлея эти две точки будут разрешаемыми, если центры дифракционных максимумов будут на расстоянии  $y_0$ , не меньшем радиуса первого темного кольца. Соответствующие расчеты показывают, что величина  $y_0$ , являющаяся количественной характеристикой разрешающей способности объектива будет определяться выражением:

$$y_0 = \frac{0,61\lambda}{n_1 \sin u_1}, \quad (4)$$

где  $u_1$  - апертура пучка, попадающего на объектив,  $n$  - показатель преломления среды, в которой находится линза, апертура линзы,  $\lambda$  - длина волны. Величина  $A = n_1 \sin u_1$  называется *числовой апертурой* объектива. Учитывая, что линза располагается в воздухе ( $n = 1$ ) и на фокусном расстоянии от объекта, то с учетом рис.4 для числовой апертуры получаем

$$\sin u = \frac{R}{\sqrt{R^2 + f^2}}. \quad (5)$$

Здесь  $R$  - радиус линзы, а  $f$  - ее фокусное расстояние.

Тогда формулу (4) можно записать в виде

$$y_0 = \frac{0,61\lambda \sqrt{R^2 + f^2}}{R} \quad (6)$$

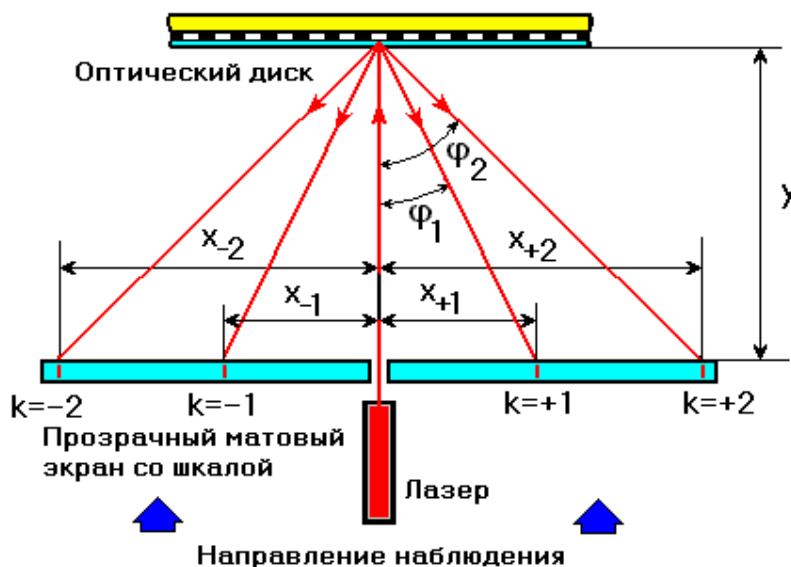


Рис.4. К определению разрешающей способности линзы

Таким образом, при использовании данного объектива две точки будут наблюдаться раздельно, если расстояние между ними не превосходит значение, определяемое условием (4). Это же выражение будет определять минимальное расстояние между пикселями, при котором еще возможно чтение и запись информации на CD-диск. Кроме того, на основании измерения  $f$  и  $y_0$  появляется возможность оценки минимально допустимого размера (радиуса) линзы, способной работать в считывающем устройстве CD ROM. Эта же формула определяет и минимальный диаметр пятна, внутрь которого должен быть сфокусирован свет линзой. Для когерентного света это означает, что в пределах апертуры должен находиться хотя бы первый порядок дифракции. Если в апертуру линзы попадают и лучи, соответствующие дифракционным максимумам более высоких порядков, то качество получаемого изображения повышается. Но условие попадания первого дифракционного максимума является обязательным.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Методика проведения измерений.

Определение плотности записи и общей информационной емкости оптического диска проводится с помощью гелий-неонового лазера ( $\lambda=632,8$  нм) или полупроводникового лазерного диода (655 нм), работающих в красном диапазоне видимого спектра. Схема экспериментальной установки приведена на рис.5.

Рис.5. Схема экспериментальной установки

Луч лазера через отверстие в экране направляется на поверхность оптического компакт-диска, помещенного в юстируемый зажим. Компакт-диск следует установить так, чтобы лазерный пучок падал нормально на одну из точек горизонтального диаметра диска. В этом случае луч нулевого порядка дифракции отразится обратно в отверстие на экране, а лучи, соответствующие первому и второму порядкам дифракции, попадут на экран и расположатся симметрично центральному отверстию. Абсолютно строгой симметрии можно

не добиваться, поскольку измеренные расстояния от нулевого до положительного и отрицательного максимумов каждого порядка усредняются при дальнейшей обработке.

Ввиду того, что записанная на компакт-диске дифракционная решетка образована концентрическими линиями, форма дифракционных максимумов на экране может для некоторых участков быть дугообразной.

При правильной юстировке дифракционная картина имеет вид, подобный показанному на рис.6.

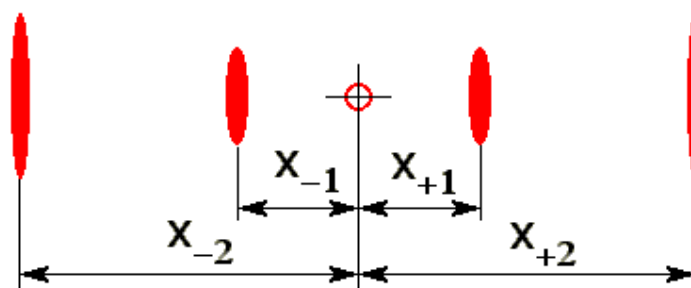


Рис.6. Вид дифракционной картины на экране (без учета масштаба)

Если дифракционные максимумы расположены вдоль наклонной прямой, то луч лазера попадает на диск выше или ниже горизонтального диаметра. В этом случае диск надо сместить в вертикальной плоскости в нужную сторону.

После измерения соответствующих расстояний диск передвигается вдоль горизонтального радиуса, и цикл повторяется для новой точки падения луча.

### ЗАДАНИЯ

#### Задание 1. *Определение периода дифракционной решетки $d$ оптического диска*

1. Направить излучение лазера в отверстие экрана, на компакт-диск.
2. Измерить расстояние от диска до экрана ( $L$ ).
3. По шкале экрана определить расстояния  $x+1$ ,  $x+2$ ,  $x-1$  и  $x-2$  для первых двух порядков дифракции (рис. 6).
4. Провести описанные в п.3 измерения для разных точек на поверхности оптического диска (на разных расстояниях от его оси). Количество проведенных измерений должно быть не менее 8. Для этого следует сдвигать экран вместе с закрепленным на нем лазерным диодом.
5. По формуле (1) в предположении нормального падения луча лазера на диск, рассчитать значения периода  $d$  дифракционной решетки.
6. Здесь  $x$  является средним значением для  $+m$  и  $-m$  порядков дифракции.
7. Полученные экспериментальные и расчетные данные занести в Таблицу 1.
8. Провести статистическую обработку, т. е. определить среднее значение и доверительный интервал периода дифракционной решетки  $d$  оптического диска.
9. Поскольку индивидуальные и серийные компакт-диски изготавливаются по разной технологии, попробуйте найти и объяснить отличия в дифракционной картине, создаваемой этими дисками. Для этого выньте диск из держателя (или разверните его) и направьте отраженное от диска излучение на стену.

На расстоянии в 1-2 м ширина дифракционных максимумов увеличится и разница, если она есть, проявится более отчетливо.



### Задание 2. Измерение информационной емкости CD

Площадь, занятая на диске информацией, может быть определена соотношением:

$$S = \frac{D_2^2 - D_1^2}{4} \quad (8)$$

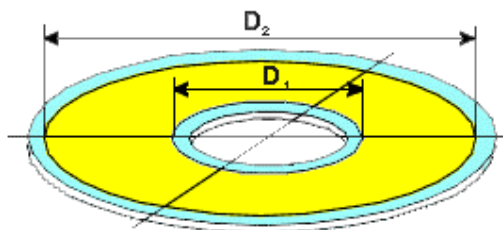


Рис.7. Параметры для определения части площади оптического диска, занятой информацией

1. С помощью линейки и(или) штангенциркуля измерить внутренний  $D_1$  и внешний диаметры  $D_2$  зоны оптического диска, на которой записана информация (рис.7).
2. По формулам (2, 3 и 8), используя полученные в Задании 1 результаты, вычислить информационную ёмкость  $Q_{data}$  оптического диска (в Мбайт).
3. Определите плотность записи информации  $W$ .
4. Сравните расчетные значения плотности записи с реальными значениями.
5. Оцените максимальное количество информации (в Мбайт), которое может быть записано на стандартном 5-ти дюймовом компакт-диске при рассчитанной плотности записи.

### Задание 3. Определение размеров линзы считывающей головки привода CD ROM

Поскольку линейные размеры пикселя на оптическом диске должны быть не меньше разрешающей способности линзы  $y_0$ , определяемой формулой (5), то появляется возможность оценки минимально допустимого размера (радиуса) линзы, способной работать в считывающем устройстве CD ROM. Для этого достаточно считать  $d = y_0$ .

1. Исходя из рассчитанных углов дифракции в первом порядке и ориентируясь на геометрии эксперимента (Рис.5), определить максимальный радиус входной линзы  $R$  считывающей головки устройства для чтения компакт-дисков при длинах волн излучения полупроводниковых лазеров, равных 930 нм, 1100 нм и 1240 нм.  
Оценить возможность использования одной линзы для всех указанных длин волн. Определить диаметр такой линзы.
2. Принять, что линза располагается на расстоянии  $L = 5,0$  мм от поверхности оптического диска и в неё должны попадать только лучи первого порядка дифракции.

### Форма отчетности

**Отчет должен содержать:**

Результаты сделанных измерений.

Результаты расчетов и построенные на миллиметровке графики.

Оценке погрешностей.

Ответы на теоретические вопросы по теме лабораторной работы

### Оборудование.

Гелий-неоновый лазер ЛГ-209 или лазерный диод видимого диапазона.  
Юстируемый зажим для оптического диска.  
Экран со шкалой.  
Линейка и штангенциркуль  
Набор оптических дисков с разным типом записанной информации (audio, video- CD).

### Литература

#### Основная

1. Маскевич А.А. Оптика. Учебн. пособие / А.А. Маскевич.- Инфра-М, Новое знание, Минск-Москва, 2012.- 656 с.
1. Матвеев А.Н. Оптика. Учеб. пособие для физ. спец. вузов.-М.:Высш. шк., 1985.-351 с.
2. Бутиков Е.И. Оптика. . Учеб. пособие для вузов/Под ред. Н.И. Калитиевского М.:Высш. шк., 1986.-512 с.
3. Саржевский А.М. Оптика. В 2-х т. Учеб. пособие для физ. спец. ун-тов.-Мн.: Из-во “Университетское”, 1984.- Т. 1-2.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 4. Оптика. -Учеб. пособие. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985.- 751.с.
5. Маскевич А.А. Физический практикум по оптике. ГрГУ, 2000 г.

#### Дополнительная

1. Лансберг Г.С. Оптика. -Учеб. пособие.М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976.- 926 с.
2. Калитиевский Н.И. Волновая оптика.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Пер. с англ. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973.- 719 с.
4. Ахиизер А.И., Ахиизер И.А. Электромагнетизм и электромагнитные волны. Учеб. пособие для вузов.- М.:Высш. шк., 1985.-504 с.
5. Иродов .Е.И. Сборник задач по общему курсу физики. .- М., :Высш. шк., 1985.
6. Балаш В.А. Сборник задач по курсу общей физики. Учеб. пособие для физ. фак. пед. ин-тов.-”Просвещение”, 1978.-208 с.

### Контрольные вопросы

1. В чём заключается явление дифракции света? Какие условия являются необходимыми для наблюдения дифракции?
2. Чем обусловлено конечное значение разрешающей способности линзы?
3. Объясните принципы записи информации на компакт-дисках.
4. Опишите методику определения информационной ёмкости оптического компакт-диска.
5. Как изменится методика проведения измерений падения зондирующего лазерного луча на оптический компакт-диск под углом?
6. Почему плотность записи информации на компакт-дисках зависит от длины волны используемого лазера?
7. Как устроена считывающая головка привода CD ROM? Чем ограничиваются размеры её оптических элементов?

8. Обоснуйте причину выбора ИК-лазера в считывающих головках компакт-дисков.
9. Предложите пути повышения информационной емкости компакт-дисков.