

12. СВОЙСТВА СВЕТОВЫХ ВОЛН

12.6. Дисперсия света

Занимаясь усовершенствованием телескопов, Ньютон обратил внимание на то, что изображение, даваемое объективом, по краям окрашено. Он заинтересовался этим и первый «исследовал разнообразие световых лучей и проистекающие отсюда особенности цветов, которых до того времени никто даже не подозревал» (слова из надписи на надгробном памятнике Ньютону). Радужную окраску изображения, получаемого с помощью линзы, наблюдали, конечно, и до него. Было замечено также, что радужные края имеют предметы, рассматриваемые через призму. Пучок световых лучей, прошедших через призму, окрашивается по краям.

Опыт Ньютона был гениально прост. Ньютон догадался направить на призму световой пучок малого поперечного сечения. Пучок солнечного света проходил в затемненную комнату через маленькое отверстие в ставне. Падая на стеклянную призму, он преломлялся и давал на противоположной стене удлиненное изображение с радужным чередованием цветов.

Следуя многовековой традиции, согласно которой радуга считалась состоящей из семи основных цветов, Ньютон тоже выделил семь цветов: фиолетовый, синий, голубой, зеленый, желтый, оранжевый и красный. Саму радужную полоску Ньютон назвал спектром.

Закрыв отверстие красным стеклом, Ньютон наблюдал на стене только красное пятно, закрыв синим стеклом — синее пятно и т. д. Это означало, что не призма окрашивает белый свет, как предполагалось раньше. Призма не изменяет свет, а лишь разлагает его на составные части. Белый свет имеет сложный состав. Из него можно выделить пучки различных цветов, и лишь совместное их действие вызывает у нас впечатление белого цвета. В самом деле, если с помощью второй призмы, повернутой на 180° относительно первой, собрать все пучки спектра, то опять получится белый свет. Выделив какую-либо часть спектра, например зеленую, и заставив свет пройти еще через одну призму, мы уже не получим дальнейшего изменения окраски.

Другой важный вывод, к которому пришел Ньютон, был сформулирован им в трактате «Оптика» следующим образом: «Световые пучки, отличающиеся по цвету, отличаются по степени преломляемости» (для них стекло имеет различные показатели преломления). Наиболее сильно преломляются фиолетовые лучи, меньше других — красные. Зависимость показателя преломления света от его цвета Ньютон назвал дисперсией (от латинского: dispersion - рассеяние).

Показатель преломления зависит и от скорости света в веществе.

Абсолютный показатель преломления $n = \frac{c}{v}$. Луч красного цвета преломляется

меньше из-за того, что красный свет имеет в веществе наибольшую скорость, а луч фиолетового цвета преломляется больше, так как скорость для фиолетового

света наименьшая. Именно поэтому призма и разлагает свет. В пустоте скорости света разного цвета одинаковы. Если бы это было не так, то, к примеру, спутник Юпитера Ио, который наблюдал Рёмер, казался бы красным в момент выхода спутника из тени. Но этого не наблюдается.

Впоследствии была выяснена зависимость цвета от физической характеристики световой волны: ее частоты колебаний f (или длины волны λ). Поэтому можно дать более глубокое определение дисперсии, чем то, к которому пришел Ньютон. *Дисперсией* называется зависимость показателя преломления среды от частоты световой волны.

Зная, что белый свет имеет сложный состав, можно объяснить удивительное многообразие красок в природе. Если предмет, например лист бумаги, отражает все падающие на него лучи различных цветов, то он будет казаться белым. Покрывая бумагу слоем красной краски, мы не создаем при этом свет нового цвета, но задерживаем на листе некоторую часть имеющегося. Отражаться теперь будут только красные лучи, остальные же поглотятся слоем краски. Трава и листья деревьев кажутся нам зелеными потому, что из всех падающих на них солнечных лучей они отражают лишь зеленые, поглощая остальные. Если посмотреть на траву через красное стекло, пропускающее только красные лучи, то она будет казаться почти черной.

Явление дисперсии, открытое Ньютоном, первый шаг к пониманию природы цвета. Основательно понять дисперсию смогли лишь после того, как была выяснена зависимость цвета от частоты колебаний (или длины световой волны).

12.7. Интерференция света

Интерференцией света (от латинского *inter* — взаимно, между собой, и *ferio* — ударяю, поражаю) называется явление наложения когерентных световых волн, в результате которого в одних местах пространства возникают максимумы, а в других — минимумы интенсивности света, при этом происходит перераспределение световой энергии в пространстве.

Когерентными (от латинского *cohaereus* — взаимосвязанный) являются световые волны, разность фаз которых остается постоянной во времени. Источники, которые излучают световые волны, обладают одинаковой частотой (периодом) и неизменной во времени разностью фаз, называют когерентными источниками. При наложении некогерентных световых волн (различной частоты колебаний или разность фаз которых беспорядочно изменяется) происходит только усиление света. Явление интерференции в этом случае не наблюдается. Результат наложения когерентных световых волн, наблюдаемый на экране или фотопластинке в виде регулярного чередования областей повышенной и пониженной интенсивности света, называется интерференционной картиной.

В оптике вводится понятие оптической длины волны — произведение геометрической длины пути волны d на показатель преломления среды n — nd .

Эта величина характеризует число длин волн, которые укладываются в данной среде на протяжении геометрического пути волны. Связано это с тем, что в веществе скорость v распространения света, а следовательно, и длина световой волны λ уменьшаются по сравнению с вакуумом в n раз:

$$v = \frac{c}{n}; \quad \lambda = v \cdot T = \frac{c}{n} T = \frac{\lambda_0}{n}; \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

где c — скорость света в вакууме, λ_0 — длина волны в вакууме, T — период колебаний.

Поэтому на расстоянии g , которое проходит в веществе световая волна, укладывается в n раз больше длин волн по сравнению с вакуумом.

Выясним условия максимума и минимума интенсивности света в точке A при интерференции двух когерентных световых волн, распространяющихся от источников S_1 и S_2 (рис 12.1).

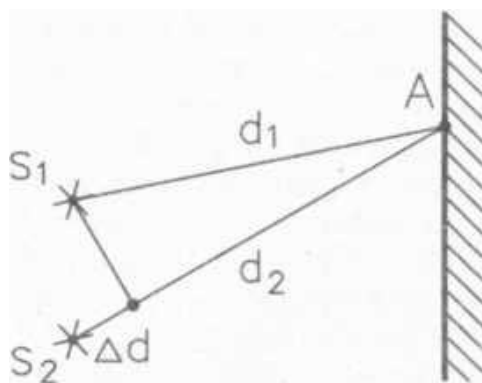


Рис. 12.1

Световые волны от данных источников могут распространяться в различных веществах с показателями преломления n_1 и n_2 , проходя при этом различные пути d_1 и d_2 . Разность Δd оптических длин путей двух лучей называется оптической разностью хода:

$$\Delta d = n_2 d_2 - n_1 d_1$$

Максимальное значение амплитуды результирующей волны будет при условии (условие максимумов в интерференционной картине):

$$\Delta d = n_2 d_2 - n_1 d_1 = k\lambda, \quad \text{где } k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Условие минимумов (ослабления волн):

$$\Delta d = n_2 d_2 - n_1 d_1 = (2k+1)\lambda/2, \quad \text{где } k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

При распространении света в воздухе ($n_1 = n_2 = 1$ и разность хода волн $\Delta d = d_2 - d_1$) условия максимумов и минимумов можно записать в следующем виде.

Условие максимума интенсивности света:

$$\Delta d = k\lambda, \text{ или } \Delta d = 2k \frac{\lambda}{2}, \text{ т.е.}$$

разность хода волн равна целому числу длин волн.

Условие минимума интенсивности света:

$$\Delta d = (2k+1) \frac{\lambda}{2},$$

Разность хода волн при этом равна нечетному числу полуволн.

Для получения отчетливой интерференционной картины лучше пользоваться монохроматическим источником света (источником, испускающим колебания только одной частоты, т.е. излучение определенного цвета). Монохроматический источник можно получить с помощью светофильтров.

Французский физик О.Френель (1788-1827) поставил ряд опытов со световыми пучками, в которых наблюдалось явление интерференции света. Он доказал, что для наблюдения интерференции света нужно лучи, исходящие от одного источника света, при помощи какого-либо приспособления направить по различным путям, а затем наложить их друг на друга.

В своих опытах он направлял лучи по различным путям при помощи бипризмы (двух призм с очень малыми преломляющими углами, скрепленными своими широкими поверхностями) или двух зеркал, расположенных друг к другу под углом, близким к 180° . Помещая на пути монохроматического источника света S очень узкую щель, расположенную перпендикулярно рисунку, на экране можно получить интерференционную картинку в виде чередующихся темных и светлых полос, причем в центре против щели S будет светлая полоса.

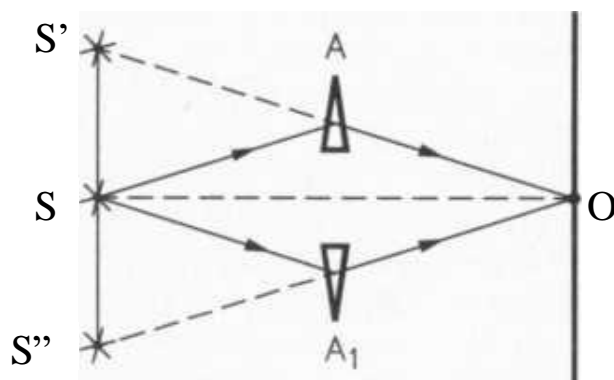


Рис. 12.2

Объяснить это можно тем, что для лучей, идущих из S' и S'' (S' , S'' — мнимые источники света, полученные после того, как лучи источника S преломились, например, в призмах A и A_1 — бипризмах Френеля) в центр экрана O , разность волновых путей равна нулю, т.е. накладывающиеся волны имеют одинаковые фазы. Чем дальше от центра экрана происходит наложение лучей, тем больше становится их разность хода, а следовательно, и разность фаз. Расстояние

между соседними темными (или светлыми) полосами на экране зависит от длины волн, испускаемых источником света S , причем чем меньше длина волны светового излучения, тем чаще расположены интерференционные полосы.

Явлением интерференции света можно объяснить появление радужной окраски стенок мыльного пузыря. Появление цветов тонких пленок, толщина которых не превышает несколько микрометров (мкм), впервые объяснил английский ученый Томас Юнг. Он полагал, что происходит интерференция световых волн, одна из которых **1** отражается от наружной поверхности, а вторая **2** — от внутренней (рис. 12.3)

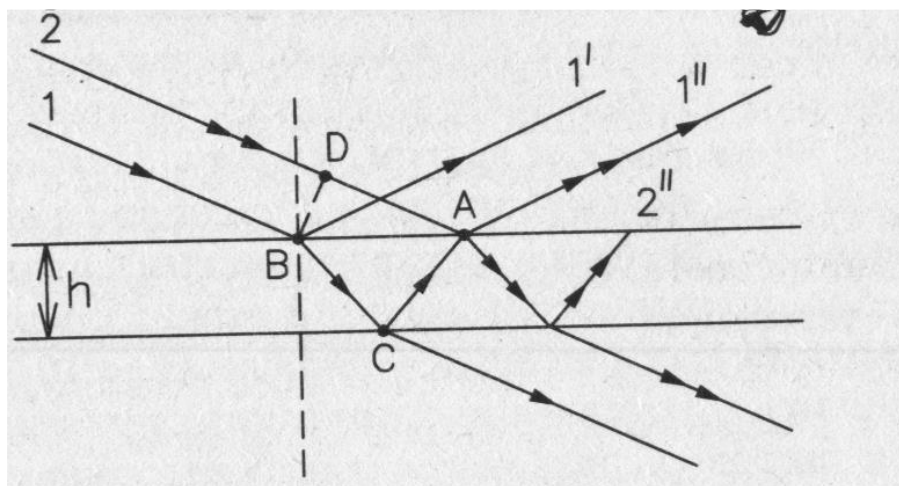


Рис. 12.3

В точке А отраженный луч $2'$ и луч $1''$, преломившийся в пленке, имеет оптическую разность хода

$$\Delta d = (BC + CA) \cdot n - AD,$$

где n — показатель преломления.

Различие в цвете связано с различием в длине волн (или частоте световых волн).

Интерференционная картина наблюдается также при отражении света от нефтяных пленок или тонкого слоя керосина на поверхности воды, которые дают причудливо окрашенную интерференционную картину за счет переменной толщины. Радужная расцветка крыльев стрекоз, жуков и прочих насекомых также объясняется интерференцией солнечного света в прозрачной пленке, покрывающей крылья насекомого и имеющей разную толщину в разных местах.

Интерференционная картина, образуемая на плоско-выпуклой линзе, соприкасающейся с плоскопараллельной пластиной, называется кольцами Ньютона. Интерференционная картина имеет вид концентрических темных и светлых колец.

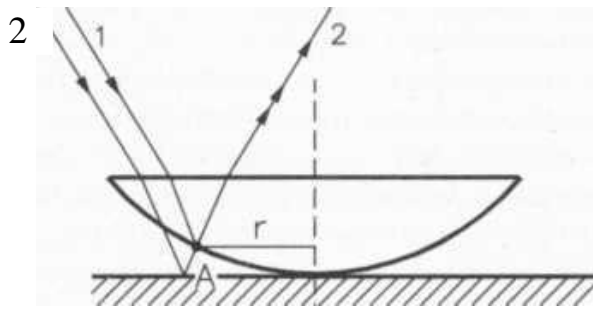


Рисунок 12.4

Луч 2, прошедший больший путь (из-за того, что он дважды проходит воздушный зазор), чем луч 1, в точке А интерферирует с лучом 1. Если вторая волна отстает от первой на целое число длин волн, то волны усиливают друг друга и образуется светлое кольцо. Если же вторая волна будет отставать от первой на нечетное число полуволн, то волны гасят друг друга и образуется темное кольцо. Измерив радиусы r темных колец Ньютона, можно вычислить длины волн, поскольку все точки кольца с радиусом r имеют одинаковую оптическую разность хода.

Интерференция света в современной науке и технике широко используется для точных измерений длин световых волн, показателя преломления газов и других веществ. Приборы, действие которых основано на явлении интерференции, называются интерферометрами. Имеются интерферометры специального назначения. С помощью интерференции можно оценить качество обработки поверхности изделия с точностью до 10^{-6} см, что особенно важно при изготовлении оптических стекол для приборов. Это явление широко используется при спектральном анализе для точного измерения расстояний и углов, для создания светофильтров, зеркал, просветляющих покрытий. На явлении интерференции света основана *голография*.

Наблюдение интерференции света доказывает, что свет при распространении проявляет волновые свойства. Интерференционные опыты позволяют измерить длину световой волны: она очень мала — от $4 \cdot 10^{-7}$ до $8 \cdot 10^{-7}$ м

Просветление оптики основано на явлении интерференции. На поверхность оптического стекла, например линзы, наносят тонкую пленку с показателем преломления n_n , меньшим показателя преломления стекла n_c .

Разность хода световых волн 1 и 2, отраженных от верхней и нижней поверхностей пленки, равна удвоенной толщине пленки $2h$. Длина волны λ_n в пленке меньше длины волны λ в вакууме в n_n раз: $\lambda_n = \frac{\lambda}{n_n}$.

Для того чтобы волны 1 и 2 ослабляли друг друга, разность хода должна быть равна половине длины волны в пленке: $2h = \frac{\lambda_n}{2} = \frac{\lambda}{2n_n}$.

Если амплитуды обеих отраженных волн одинаковы или очень близки друг к другу, то гашение света будет полным. Чтобы добиться этого, подбирают соответствующим образом показатель преломления пленки, так как интенсивность отраженного света определяется отношением коэффициентов преломления двух граничащих сред.

Сейчас даже простые дешевые фотоаппараты снабжены просветленной оптикой.

Гашение света светом не означает превращение световой энергии в другие формы. Как и при интерференции механических волн, гашение волн друг другом в данной области пространства означает, что световая энергия сюда просто не поступает. Гашение отраженных волн у объективов с просветленной оптикой приводит к тому, что весь свет проходит сквозь объектив

12.8. Дифракция света

Если свет представляет собой волновой процесс, то наряду с интерференцией должна наблюдаться и дифракция света. Ведь дифракция — огибание волнами краев препятствий — присуща любому волновому движению. Но наблюдать дифракцию света нелегко, так как волны отклоняются от прямолинейного распространения на заметные углы только на препятствиях, размеры которых сравнимы с длиной волны, а длина световой волны, как мы с вами знаем, очень мала.

Пропуская тонкий пучок света через маленькое отверстие, можно наблюдать нарушение закона прямолинейного распространения света: светлое пятно на экране против отверстия будет иметь большие размеры, чем размеры пучка.

Опыт Юнга. В 1802 г. Т. Юнг, открывший интерференцию света, поставил классический опыт по дифракции (рис. 12.5).

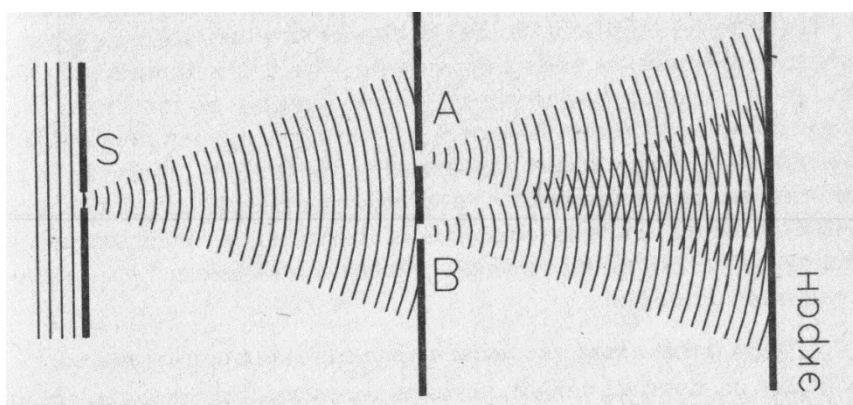


Рисунок 12.5

В непрозрачной ширме он проколол булавкой два маленьких отверстия В и С на небольшом расстоянии друг от друга. Эти отверстия освещались узким световым пучком, прошедшим через малое отверстие А в другой ширме. Именно эта деталь, до которой очень трудно было додуматься в то время, решила успех

опыта. Интерферируют ведь, только когерентные волны. Возникшая в соответствии с принципом Гюйгенса сферическая волна от отверстия A возбуждала в отверстиях B и C когерентные колебания. Вследствие дифракции от отверстий B и C выходили два световых конуса, которые частично перекрывались. В результате интерференции этих двух световых волн на экране появлялись чередующиеся светлые и темные полосы. Закрывая одно из отверстий, Юнг обнаружил, что интерференционные полосы исчезали. Именно с помощью этого опыта впервые Юнгом были измерены длины волн, соответствующие световым лучам разного цвета, причем, весьма точно.

Теория Френеля. Исследование дифракции было завершено в работах О. Френеля. Френель не только более детально исследовал различные случаи дифракции на опыте, но и разработал количественную теорию дифракции, позволяющую в принципе рассчитать дифракционную картину, возникающую при огибании светом любых препятствий. Им же было впервые объяснено прямолинейное распространение света в однородной среде на основе волновой теории.

Этих успехов Френель добился, объединив принцип Гюйгенса с идеей интерференции вторичных волн. Согласно идее Френеля *каждая точка волнового фронта является источником вторичных волн, причем все вторичные источники когерентны* (принцип Гюйгенса Френеля).

Для того чтобы вычислить амплитуду световой волны в любой точке пространства, надо мысленно окружить источник света замкнутой поверхностью. Интерференция волн от вторичных источников, расположенных на этой поверхности, определяет амплитуду в рассматриваемой точке пространства.

Такие расчеты позволили понять, каким образом свет от точечного источника S , испускающего сферические волны, достигает произвольной точки B пространства (рис. 12.6).

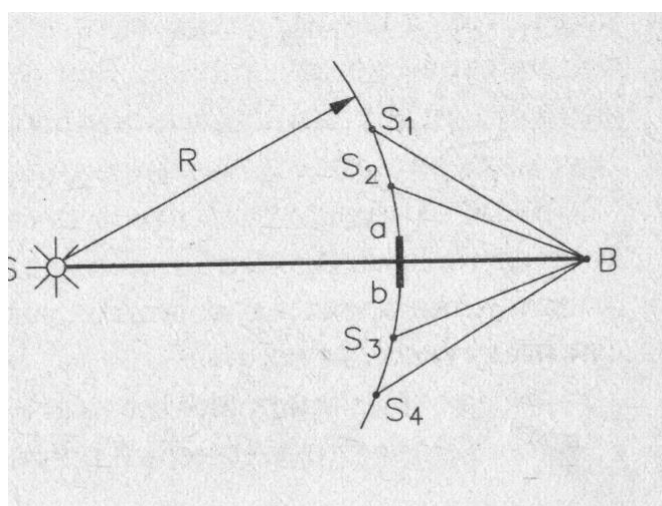


Рисунок 12.6

Если рассмотреть вторичные источники на сферической волновой поверхности радиусом R , то результат интерференции вторичных волн от этих источников в точке B оказывается таким, как если бы лишь вторичные источники на малом сферическом сегменте aB посылали свет в точку B . Вторичные волны, испущенные источниками, расположенными на остальной части поверхности, гасят друг друга в результате интерференции. Поэтому все происходит так, как если бы свет распространялся вдоль прямой SB , т. е. прямолинейно.

На основе этой теории Френель доказал прямолинейность распространения света и рассмотрел количественно дифракцию на различного рода препятствиях.

Дифракционные картины от различных препятствий. Расчеты, сделанные Френелем, полностью были подтверждены экспериментом. Из-за того что длина световой волны очень мала, угол отклонения света от направления прямолинейного распространения невелик. Поэтому для отчетливого наблюдения дифракции нужно либо использовать очень маленькие препятствия, либо не располагать экран далеко от препятствий. При расстоянии между препятствием и экраном порядка метра размеры препятствия не должны превышать сотых долей миллиметра. Если же расстояние до экрана достигает сотен метров или нескольких километров, то дифракцию можно наблюдать на препятствиях размерами в несколько сантиметров и даже метров.

На рисунке 12.7 схематично показаны дифракционные картины от различных препятствий: *а* — от тонкой проволоочки; *б* — от круглого отверстия; *в* — от круглого экрана.

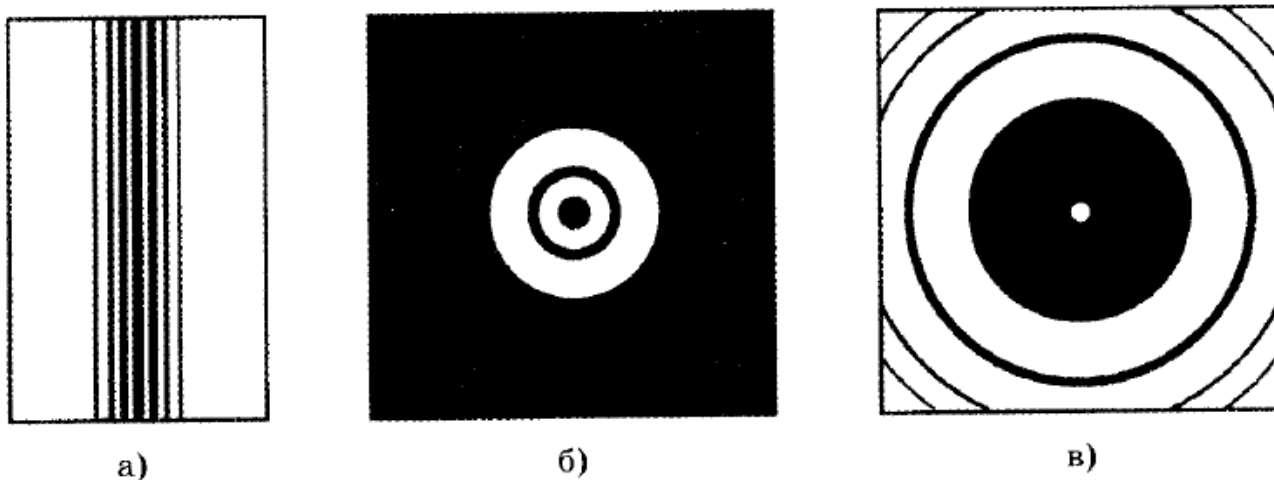


Рисунок 12.7

Вместо тени от проволоочки видны светлые и темные полосы; в центре дифракционной картины от отверстия появляется темное пятно, окруженное светлыми и темными кольцами; в центре тени, образованной круглым экраном, видно светлое пятнышко, а сама тень окружена темными концентрическими кольцами.

Границы применимости геометрической оптики. Все физические теории отражают происходящие в природе процессы лишь приближенно. Для

любой теории могут быть указаны определенные границы ее применимости. Можно ли применять в конкретном случае данную теорию или нет, зависит не только от той точности, которую обеспечивает эта теория, но и от того, какая точность требуется при решении той или иной практической задачи. Границы применимости теории можно установить лишь после того, как разработана более общая теория, охватывающая те же явления.

Все эти общие положения относятся и к геометрической оптике. Эта теория является приближенной. Она неспособна объяснить, например, явления интерференции и дифракции света. Более общей и более точной теорией является волновая оптика. Согласно ей, закон прямолинейного распространения света и другие законы геометрической оптики выполняются достаточно точно лишь в том случае, если размеры препятствий на пути распространения света *много больше длины световой волны*. Но совершенно точно они не выполняются никогда. Действие оптических приборов описывается законами геометрической оптики. Согласно этим законам можно различать с помощью микроскопа сколь угодно малые детали объекта; с помощью телескопа можно установить существование двух звезд при любых малых угловых расстояниях между ними. Однако в действительности это не так, и лишь волновая теория света позволяет разобраться в причинах предела разрешающей способности оптических приборов.

Разрешающая способность микроскопа и телескопа. Волновая природа света налагает предел на возможность различать детали предмета или очень мелкие предметы при их наблюдении с помощью микроскопа. Дифракция не позволяет получить отчетливые изображения мелких предметов, так как свет распространяется не строго прямолинейно, а огибает предметы. Из-за этого изображения получаются размытыми. Это происходит, когда линейные размеры предметов меньше длины световой волны.

Дифракция также налагает предел на разрешающую способность телескопа. Вследствие дифракции волн у края оправы объектива изображением звезды будет не точка, а система светлых и темных колец. Если две звезды находятся на малом угловом расстоянии друг от друга, то эти кольца налагаются друг на друга, и глаз не может различить, имеются ли две светящиеся точки или одна. Предельное угловое расстояние между светящимися точками, при котором их можно различать, определяется отношением длины волны к диаметру объектива.

Этот пример показывает, что с дифракцией приходится считаться всегда, при любых препятствиях. Ею при очень тщательных наблюдениях нельзя пренебрегать и в случае препятствий, размеры которых значительно больше, чем длина волны.

Дифракция света определяет границы применимости геометрической оптики. Огибание светом препятствий налагает предел на разрешающую способность важнейших оптических инструментов — телескопа и микроскопа

На явлении дифракции основано устройство оптического прибора — дифракционной решетки.

Дифракционная решетка представляет собой совокупность большого числа очень узких щелей, разделенных непрозрачными промежутками. Хорошую решетку изготавливают с помощью специальной делительной машины, наносящей на стеклянную пластину параллельные штрихи. Число штрихов доходит до нескольких тысяч на мм; общее число штрихов превышает 100 000. Наилучшими качествами обладают так называемые отражательные решетки. Они представляют собой чередующиеся участки, отражающие свет и рассеивающие его. Рассеивающие свет штрихи наносятся резцом на отшлифованную металлическую пластину. Решетка разлагает свет в спектр и позволяет очень точно измерять длины световых волн.

12.9. Поляризация света

Явления интерференции и дифракции не оставляют сомнений в том, что распространяющийся свет обладает свойствами волн. Но каких волн — продольных или поперечных?

Длительное время основатели волновой оптики Юнг и Френель считали световые волны продольными, т. е. подобными звуковым волнам. В то время световые волны рассматривались как упругие волны в эфире, заполняющем пространство и проникающем внутрь всех тел. Такие волны, казалось, не могли быть поперечными, так как поперечные волны, в соответствии с воззрениями того времени, могут существовать только в твердом теле. Но как могут тела двигаться в твердом эфире», не встречая сопротивления? Ведь эфир не должен препятствовать движению тел. В противном случае не выполнялся бы закон инерции.

Однако постепенно накапливалось все больше и больше экспериментальных фактов, которые никак не удавалось истолковать, считая световые волны продольными.

Опыты с турмалином. Рассмотрим подробно один из таких экспериментов, очень простой и эффектный. Это опыт с кристаллами турмалина (прозрачными кристаллами зеленой окраски).

Кристалл турмалина принадлежит к числу так называемых одноосных кристаллов. Возьмем прямоугольную пластину турмалина, вырезанную таким образом, чтобы одна из ее граней была параллельна оси кристалла. Если направить нормально на такую пластину пучок света от электрической лампы или солнца, то вращение пластины вокруг пучка никакого изменения интенсивности света, прошедшего через нее, не вызовет (рис. 12.8).

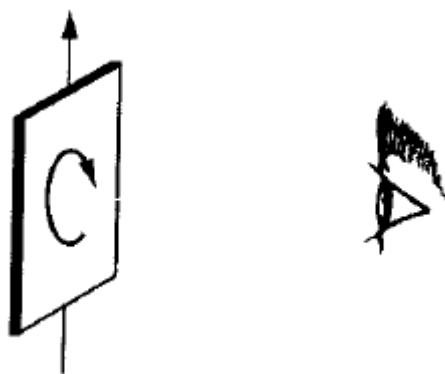


Рисунок 12.8

Можно подумать, что свет только частично поглотился в турмалине и приобрел зеленоватую окраску. Больше ничего, кажется, и не произошло. Но это не так. Световая волна проявила новые свои свойства.

Эти новые свойства проявляются, если пучок света заставить пройти через второй точно такой же кристалл турмалина (рис. 4.55,а), параллельный первому. При одинаково направленных осях кристаллов опять ничего интересного не происходит: просто световой пучок еще более ослабляется за счет поглощения во втором кристалле. Но если второй кристалл вращать, оставляя первый неподвижным (рис. 4.55,б), то обнаружится удивительное явление — гашение света. По мере увеличения угла между осями интенсивность света уменьшается. И когда оси перпендикулярны друг другу, свет не проходит совсем (рис. 12.9,в). Он целиком поглощается вторым кристаллом. Как это можно объяснить?

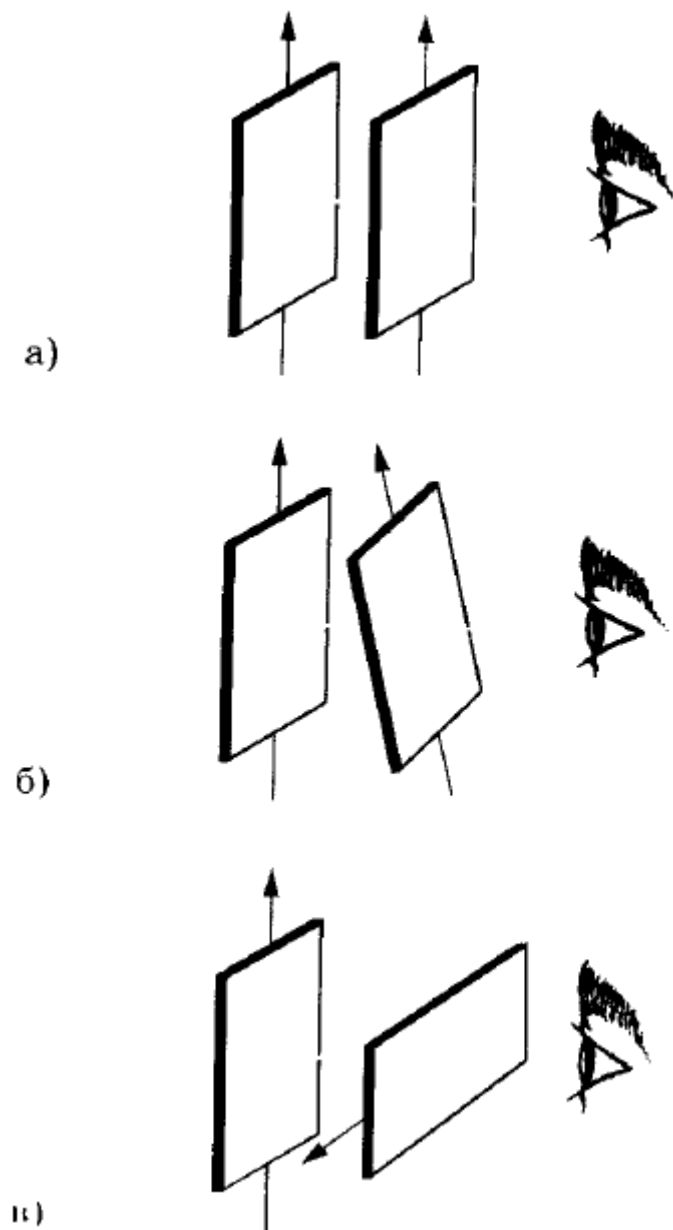


Рисунок 12.9

Поперечность световых волн. Из описанных выше опытов следуют два вывода: *во-первых*, световая волна, идущая от источника света, полностью симметрична относительно направления распространения (при вращении кристалла вокруг луча в первом опыте интенсивность не менялась); *во-вторых*, волна, вышедшая из первого кристалла, не обладает осевой симметрией (в зависимости от поворота второго кристалла относительно луча интенсивность прошедшего света изменяется).

Продольные волны обладают полной симметрией по отношению к направлению распространения (колебания происходят вдоль этого направления, и оно является осью симметрии волны). Поэтому объяснить опыт с вращением второй пластины, считая световую волну продольной, невозможно.

Полное объяснение опыта можно получить, сделав два предположения.

Первое предположение относится к самому свету. *Свет — поперечная волна*. В падающем от обычного источника пучке световых волн происходят колебания всевозможных направлений, перпендикулярных направлению распространения волн (рис. 12.10).



Рис. 12.10

Согласно этому предположению световая волна обладает осевой симметрией, являясь в то же время поперечной. Волны, например, на поверхности воды такой симметрией не обладают, так как колебания частиц воды происходят только в вертикальной плоскости.

Световой поток, в котором колебания происходят по всем направлениям, перпендикулярным направлению распространения волн, называется естественным светом. Такое название оправданно, так как в обычных условиях источники света излучают такой поток. Данное предположение объясняет результат первого опыта. Вращение кристалла турмалина не меняет интенсивность прошедшего света, потому что падающая волна обладает осевой симметрией (несмотря на то, что она поперечная).

Второе предположение относится не к световой волне, а к кристаллу. Кристалл турмалина обладает способностью пропускать световые волны с колебаниями, происходящими *в одной определенной плоскости* (плоскость P на рисунке 12.11). Такой свет называется поляризованным или, точнее, плоско поляризованным в отличие от естественного света, который может быть назван также неполяризованным.

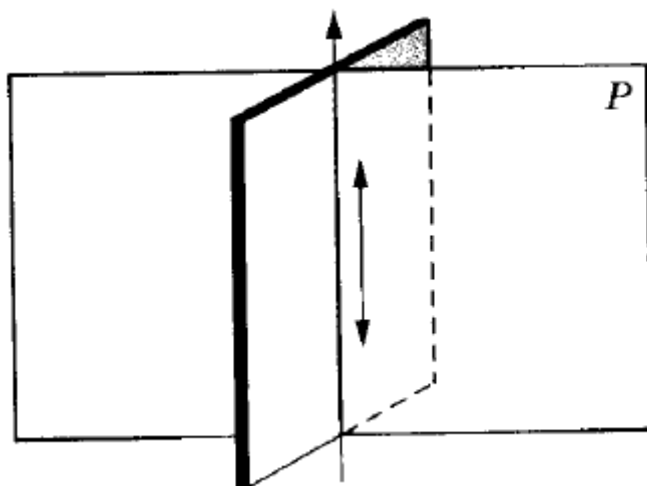


Рисунок 12.11

Это предположение полностью объясняет результаты второго опыта. Из первого кристалла выходит плоскополяризованная волна. При скрещенных кристаллах (угол между их осями 90°) она не проходит сквозь второй кристалл. Если оси кристаллов составляют между собой некоторый угол, отличный от 90° , то проходят колебания, амплитуда которых равна проекции амплитуды волны, прошедшей через первый кристалл, на направление оси второго кристалла.

Итак, кристалл турмалина преобразует естественный свет в плоскополяризованный.

Механическая модель опытов с турмалином. Нетрудно построить простую наглядную механическую модель рассматриваемого явления. Можно получить поперечную волну в резиновом шнуре так, чтобы колебания быстро меняли свое направление в пространстве. Это аналог естественной световой волны. Пропустим теперь шнур сквозь узкий деревянный ящик (рис. 12.12).

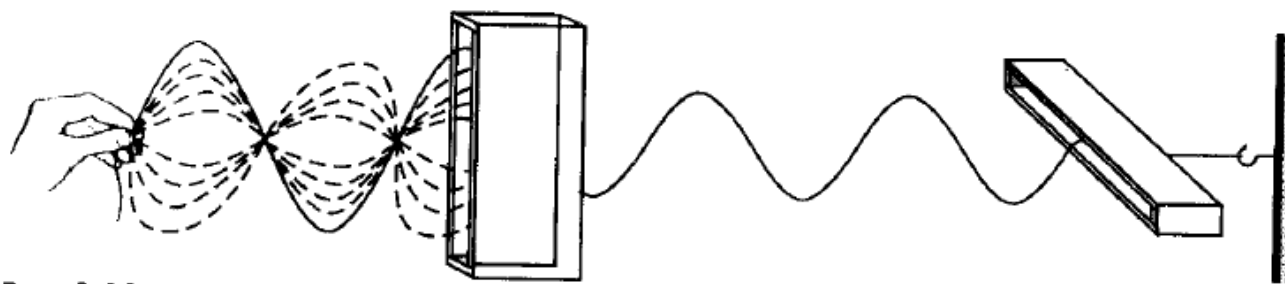


Рисунок 12.12

Из колебаний всевозможных направлений ящик «выделяет» колебания в одной определенной плоскости. Поэтому из ящика выходит поляризованная волна. Если на ее пути имеется еще точно такой же ящик, но повернутый относительно первого на 90° , то колебания сквозь него не проходят. Волна целиком гасится.

Поляроиды. Не только кристаллы турмалина способны поляризовать свет. Таким же свойством, например, обладают так называемые поляроиды. Поляроид представляет собой тонкую ($0,1$ мм) пленку кристаллов герпатита, нанесенную на целлулоид или стеклянную пластинку. С поляроидом можно провести те же опыты, что и с кристаллом турмалина. Преимущество поляроидов в том, что можно получать большие поверхности, поляризующие ентг. К недостаткам поляроидов относится фиолетовый оттопок, который они придают белому свету.

Прямыми опытами доказано, что световая волна является поперечной. В поляризованной световой волне колебания происходят в строго определенном — поперечном направлении.

12.10. Оптические квантовые генераторы

Для источников света характерна некогерентность излучения, а именно, *излучение источников в целом складывается из некогерентных между собой потоков, испускаемых микроскопическими элементами.* Примерами некогерентного излучения могут служить: свечение газового разряда, тепловое свечение естественных и искусственных источников, люминесценция. В начале 60-х годов были созданы источники света иного типа, получившие название лазеров. В противоположность некогерентным источникам, э/м волны, зарождающиеся в разных частях лазера (удаленных друг от друга на макроскопические расстояния), оказываются когерентными между собой. В этом отношении лазеры аналогичны источникам когерентных радиоволн. Когерентность излучения проявляется практически во всех свойствах лазера.

Энергия излучения зависит от подводимой энергии. Особенностью лазерного излучения является способность к концентрации энергии во времени, в пространстве, в направлении излучения, в спектре. Для нескольких лазеров характерна высокая монохроматичность излучения. В других лазерах используются очень короткий импульсы (10^{-12} сек), поэтому мгновенная мощность такого излучения может быть очень большой. Световой поток, выходящий из лазера, обладает очень высокой направленностью. Такое излучение можно сфокусировать на ничтожно малой площади и создать большую мощность. Напряженность электрического поля лазерного излучения составляет порядка 10^4 В/см, напряженность электрического поля солнечного света на экваторе – 10 В/см.

Для микроскопического описания спектральных свойств светового излучения Эйнштейн ввел представление о вынужденном испускании. Одно из его основных свойств состоит в том, что волны, испускаемые атомами в этом процессе, имеют такую же частоту и такую же фазу, что и действующая на атом волна. Благодаря указанному свойству, фазирование излучения удаленных атомов обеспечивается вынужденным испусканием. Условие (6), необходимое для получения мощного направленного излучения от макроскопического источника, может осуществляться благодаря вынужденному испусканию. Действительно, волны, испускаемые атомами в разных точках пространства, будут синфазно складываться, если разность начальных фаз этих волн компенсируется соответствующей разностью хода вторичных волн S_j .

Принцип работы лазера

Для эффективного использования света в технике связи и других областях науки и техники, надо добиться синхронного и синфазного излучения атомов, То есть так называемого когерентного излучения. Впервые идею получения такого излучения высказал Фабрикант в 1939 г. Можно представить себе следующую упрощенную схему получения когерентного излучения.

Пусть имеется цепочка атомов, вытянутых в прямую линию. Если все эти атомы находятся в возбужденном состоянии, то внешний фотон, ударив в

крайний атом по направлению вдоль цепочки, вызовет излучение фотона из этого атома, причем излученный фотон будет иметь такую же энергию и такое же направление излучения, что и ударивший фотон. Таким образом, будут двигаться вдоль цепочки уже 2 фотона ==> лавинообразная реакция. В результате световой поток усиливается в огромное число раз.

Теоретически коэффициент усиления может достигать 10^{20} . Важно, что в результате такого усиления будет двигаться поток фотонов с одинаковой энергией и направлением. В действительности, кроме атомов, находящихся в возбужденном состоянии и способных дать когерентное излучение под действием фотонной бомбардировки, всегда имеются атомы, находящиеся в основном невозбужденном состоянии. Эти атомы поглощают энергию ударивших их фотонов, и тем самым уменьшают энергию выходного когерентного излучения – уменьшают усиление света. Если число возбужденных атомов будет равно числу невозбужденных, то усиление света не получится. Таким образом, для усиления света и получения когерентного излучения, необходимо, чтобы число возбужденных атомов было больше находящихся в невозбужденном состоянии. То есть должна быть инверсная заселенность энергетических уровней. Надо переселить в большинстве атомов электроны на более удаленные от ядра орбиты (более высокие уровни энергии). Чтобы усиление света происходило в течение необходимого промежутка времени нужно все это время сохранять инвертированное состояние вещества, то есть поддерживать большое число возбужденных атомов. Для этого надо к данному веществу подводить тем или иным способом энергию, вызывающую возбуждение атомов (процесс накачки). Квантовый усилитель можно превратить в генератор, если осуществить в нем ПОС, при которой часть энергии излучения с выхода возвращается на вход и снова усиливается. Идею создания таких генераторов выдвинули Басов и Прохоров (сов. ученые) и Таунс (амер. ученый). Принцип лазера (ОКГ) можно пояснить рисунком.

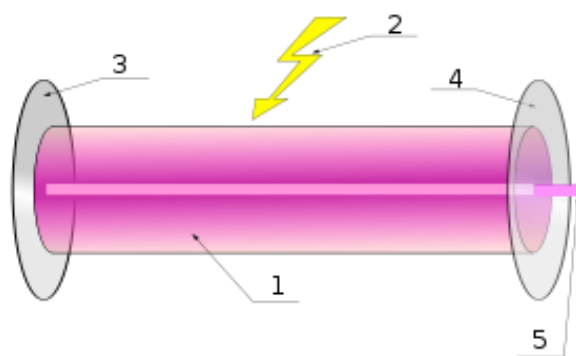


Рис. 12.13. Схема лазера: 1 — активная среда; 2 — энергия накачки лазера; 3 — непрозрачное зеркало; 4 — полупрозрачное зеркало; 5 — лазерный луч.

Все лазеры состоят из трёх основных частей: 1) активной (рабочей) среды; 2) системы накачки (источник энергии); 3) оптического резонатора (может отсутствовать, если лазер работает в режиме усилителя).

В пространстве, заполненном активной средой между двумя плоскими зеркалами, одно из которых является полупрозрачным, движется поток излучаемых атомами фотонов. Большая часть этого потока проходит через полупрозрачное зеркало 4 излучается во внешнее пространство в виде когерентного луча. А небольшая часть потока отражается, движется обратно, усиливается по пути, отражается от зеркала 3, снова движется к зеркалу 4, где отражается частично и т.д. Конечно, какой-то внешний источник должен поддерживать инверсное состояние активной среды, и тогда через зеркало 2 все время будет излучаться когерентный поток фотонов. Система двух зеркал, в пространстве между которыми могут существовать стоячие или бегущие э/м волны оптического диапазона, называется оптическим генератором.

В настоящее время в качестве рабочей среды лазера используются различные агрегатные состояния вещества: твёрдое, жидкое, газообразное, плазма. В обычном состоянии число атомов, находящихся на возбуждённых энергетических уровнях, определяется распределением Больцмана:

$$N = N_0 \exp(-E/kT),$$

здесь N — число атомов, находящихся в возбуждённом состоянии с энергией E , N_0 — число атомов, находящихся в основном состоянии, k — постоянная Больцмана, T — температура среды.

Иными словами, таких атомов, находящихся в возбужденном состоянии меньше, чем в основном, поэтому вероятность того, что фотон, распространяясь по среде, вызовет вынужденное излучение также мала по сравнению с вероятностью его поглощения. Поэтому электромагнитная волна, проходя по веществу, расходует свою энергию на возбуждение атомов. Интенсивность излучения при этом падает по закону Бугера:

$$I_l = I_0 \exp(-a_1 l),$$

здесь I_0 — начальная интенсивность, I_l — интенсивность излучения, прошедшего расстояние l в веществе, a_1 — коэффициент поглощения вещества. Поскольку зависимость экспоненциальная, излучение очень быстро поглощается.

В том случае, когда число возбуждённых атомов больше, чем невозбуждённых (то есть в состоянии инверсии населённостей), ситуация прямо противоположна. Акты вынужденного излучения преобладают над поглощением, и излучение усиливается по закону:

$$I_l = I_0 \exp(a_2 l),$$

где a_2 — коэффициент квантового усиления.

В реальных лазерах усиление происходит до тех пор, пока величина поступающей за счёт вынужденного излучения энергии не станет равной величине энергии, теряемой в резонаторе. Эти потери связаны с насыщением

метастабильного уровня рабочего вещества, после чего энергия накачки идёт только на его разогрев, а также с наличием множества других факторов (рассеяние на неоднородностях среды, поглощение примесями, неидеальность отражающих зеркал, полезное и нежелательное излучение в окружающую среду и пр.).

Для создания инверсной населённости среды лазера используются различные механизмы. В твердотельных лазерах она осуществляется за счёт облучения мощными газоразрядными лампами-вспышками, сфокусированным солнечным излучением (так называемая оптическая накачка) и излучением других лазеров (в частности, полупроводниковых). При этом возможна работа только в импульсном режиме, поскольку требуются очень большие плотности энергии накачки, вызывающие при длительном воздействии сильный разогрев и разрушение стержня рабочего вещества. В газовых и жидкостных лазерах (гелий-неоновый лазер, лазер на красителях) используется накачка электрическим разрядом. Такие лазеры работают в непрерывном режиме. Накачка химических лазеров происходит посредством протекания в их активной среде химических реакций. При этом инверсия населённостей возникает либо непосредственно у продуктов реакции, либо у специально введённых примесей с подходящей структурой энергетических уровней. Накачка полупроводниковых лазеров происходит под действием сильного прямого тока через р-п переход, а также пучком электронов. Существуют и другие методы накачки (газодинамические, заключающиеся в резком охлаждении предварительно нагретых газов; фотодиссоциация, частный случай химической накачки и др.)

Основные типы лазеров

В настоящее время существует большое количество лазеров различного типа. Они различаются активной средой и способом накачки. В качестве активной среды используются твердые, жидкие и газообразные вещества, а из множества способов накачки наиболее универсальны оптический и с помощью электрического разряда в самой активной среде. Накачка может быть непрерывной и импульсной. Последняя удобна для получения импульсного лазерного излучения и выгодна тем, что активная среда меньше нагревается.

Твердотельные лазеры

Активной средой являются диэлектрические кристаллы или специальное стекло. Возможность лазерного излучения существует у нескольких сотен различных диэлектрических кристаллов. Примером может служить лазер на рубине. Является исторически первым. Рубин представляет собой оксид Al_2O_3 с примесью ионов Cr^{3+} . Лазер на рубине дает излучение темно-красного света $\lambda = 0,69$ мкм. Различные стекла для лазеров активируют редкоземельными элементами. Генерируемое излучение у твердотельных лазеров на стеклах в основном имеет длину волны 1 мкм. Применяют исключительно оптическую накачку. Источником накачки может служить вспомогательный лазер.

Жидкостные лазеры

В качестве активной среды чаще всего используются растворы органических красителей или специальной жидкости, активированные редкоземельными элементами. Известно несколько сотен различных органических красителей, пригодных для лазеров. Излучение с $\lambda=0,3\div1,3$ мкм. То есть от ультрафиолетового до инфракрасного. Для жидкостных лазеров применяют непрерывную и импульсную активную накачку, либо накачку от газоразрядной лампы.

Газовые лазеры

Много разновидностей. Одна из них – фотодиссоционный лазер. В нем применяется газ, молекулы которого под влиянием накачки диссоциируют (распадаются) на 2 части, одна из которых оказывается в возбужденном состоянии и используется для лазерного излучения. Большую группу газовых лазеров составляют газоразрядные лазеры, в которых активной средой является разряженный газ. Накачка осуществляется электрическим разрядом, тлеющим или дуговым, который создается током высокой частоты. Имеется несколько типов газоразрядных лазеров – ионные (излучение получается за счет переходов электронов между энергетическими уровнями ионов), на атомных переходах и молекулярные.

Полупроводниковые лазеры

Когерентное излучение получается вследствие перехода электронов с нижнего края зоны проводимости на верхний край валентной зоны. Существует два типа:

1) Пластина беспримесного полупроводника, в котором накачка осуществляется пучком быстрых электронов, возможна и оптическая накачка. В качестве полупроводника используется GaAs, CdS, CdSe. Накачка электронным пучком вызывает сильный нагрев полупроводника, отчего лазерное излучение ухудшается. Лазер на GaAs охлаждают до $T=80$ К.

2) Инжекционный лазер. В нем имеется p-n переход, образованный двумя примесными полупроводниками. Грани перпендикулярной плоскости p-n перехода отполированы и служат в качестве зеркал оптической накачки. На такой лазер подается прямое напряжение, под действием которого понижается барьер в p-n переходе и происходит инжекция электронов и дырок. В области перехода начинаются интенсивные рекомбинации носителей заряда, при которых электроны переходят из зоны проводимости в валентную, и возникает лазерное излучение.

Краткие итоги раздела

Скорость света в вакууме определена экспериментально. Она примерно равна 300 000 км/с. Во всех средах скорость света меньше, чем в вакууме.

Преломление света на границе двух сред обусловлено изменением скорости при переходе света из одной среды в другую. Относительный показатель

преломления двух сред равен обратному отношению скоростей света в этих средах.

Показатель преломления света, как впервые установил Ньютон, зависит от его цвета. Цвет же определяется частотой колебаний (или длиной световой волны). Зависимость показателя преломления света от частоты колебаний называется дисперсией. Дисперсия приводит к тому, что призма разлагает белый свет в спектр. Скорость света и длина волны уменьшаются при переходе из вакуума в среду. Частота колебаний при этом остается неизменной.

Световые волны одинаковой длины волны, имеющие постоянную во времени разность фаз, называются когерентными. При наложении когерентных волн друг на друга наблюдается интерференция света. Волны усиливают или ослабляют друг друга в зависимости от разности хода между ними. Когерентные волны образуются, например, при отражении световых волн от двух поверхностей тонкой пленки. Так как разность фаз колебаний интерферирующих волн зависит не только от толщины пленки, но и от длины волны, то при освещении пленки белым светом образуется цветная интерференционная картина.

Световые волны огибают препятствия, сравнимые по размерам с длиной световой волны. Это дифракция света. Так как длина световой волны очень мала (порядка 10^{-5} см), то наблюдение дифракции света затруднено и требует специальных приспособлений. Дифракция света налагает предел на разрешающую способность микроскопа и телескопа.

Законы геометрической оптики выполняются при условии, что размеры препятствий на пути световых волн много больше длины волны.

На явлении дифракции основано устройство дифракционной решетки: совокупности большого числа одинаковых щелей, разделенных узкими промежутками. Решетка разлагает белый свет в спектр; с ее помощью можно измерять длины световых волн.

Световые волны поперечны. Это доказано экспериментально при наблюдении прохождения света через анизотропные среды — кристаллы. Световая волна, в которой колебания происходят в определенной плоскости, называется поляризованной. Свет, создаваемый обычными источниками (естественный свет), не поляризован. Колебания в световой волне происходят по всем направлениям в плоскости, перпендикулярной направлению ее распространения.

Согласно электромагнитной теории, свет представляет собой поперечную электромагнитную волну. Экспериментальное доказательство поперечности световых волн явилось важным этапом в признании справедливости электромагнитной теории света.