

Тема: Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом

Распространяясь в веществе, электромагнитное поле световой волны вызывает вынужденные колебания связанных зарядов (электронов, ионов). Колеблющиеся с частотой вынуждающей силы заряды являются источником вторичных волн. Если среда однородна и изотропна, то в результате наложения первичной и вторичной волн образуется проходящая волна, фазовая скорость которой зависит от частоты. Если в среде имеются неоднородности, то дополнительно происходит рассеяние света. На границе раздела двух сред в результате интерференции первичной и вторичной волн образуется отраженная и преломленная волна.

Прохождение света через вещество также сопровождается поглощением света, т.е. потерей энергии волны.

Поглощение света. Закон Бугера

Поглощением света называется процесс превращения энергии электромагнитного поля волны в другие виды энергии в результате взаимодействия света с веществом.

Поглощение света может выдавать нагревание вещества, фотохимические реакции, выгорание тканей и изменение цвета вещества

Поглощение света в веществе связано с преобразованием энергии электромагнитного поля волны в тепловую энергию вещества (или в энергию вторичного фотолуминесцентного излучения). Закон поглощения света (**закон Бугера**) имеет вид:

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

где I_0 , I - интенсивности света на входе ($x = 0$) и выходе из слоя среды толщины x , $\frac{Вт}{м^2}$,

μ - коэффициент поглощения, зависящий от длины волны λ .

Для диэлектриков $\mu = (10^{-1} \div 10^{-5}) м^{-1}$, для металлов $\mu = (10^5 \div 10^7) м^{-1}$, поэтому металлы непрозрачны для света.

Зависимость $\mu(\lambda)$ объясняется окрашенностью поглощающих тел.

Например, стекло, слабо поглощающее красный свет, при освещении белым светом будет казаться красным.

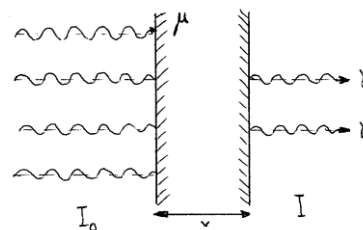


Рис. 1

Рассеяние света. Закон Рэлея

Рассеиванием называется процесс изменения пространственного распределения пучка световых лучей без изменения частот, составляющих его излучений.

Свет, проходя вещество, вызывает колебания электронов в атомах. Колеблющиеся электроны излучают вторичные волны, распространяющиеся по всем направлениям. В случае однородной среды, согласно расчетам, вторичные волны полностью гасят друг друга во всех направлениях, кроме направления распространения первичной волны. Поэтому в идеальной однородной среде рассеяния света не происходит. Вторичные волны не погашают друг друга только при распространении света в неоднородной среде. Результирующая интенсивность имеет довольно равномерное распределение по направлениям. В случае среды без посторонних включений источником оптических неоднородностей являются флуктуации плотности. Эти флуктуации вызваны тепловым движением молекул вещества. Таким образом, процесс рассеяния света сводится к генерации вторичных волн молекулами или частицами включений под действием света. Для сплошной среды рассеяние, по сути, является дифракцией волн на неоднородностях среды.

Характер рассеяния зависит от размеров неоднородностей. Если размеры неоднородностей малы по сравнению с длиной волны (не более $\sim 0,1\lambda$), интенсивность рассеянного света I прямо пропорциональна четвертой степени его частоты:

$$I \sim \omega^4 \sim 1/\lambda^4. \quad (1)$$

Эта зависимость (1) носит название **закона Рэлея**. Её происхождение связано с характером излучения электрического диполя (интенсивность излучения которого $\sim \omega^4$). Особенности излучения диполя объясняется также частичная поляризация рассеянного света. Рассеянный свет преимущественно поляризован в направлении, перпендикулярном направлению рассеяния и направлению распространения первичного луча. Полная поляризация наблюдается в направлениях, перпендикулярных пучку.

Рэлеевским рассеянием (на флуктуационных неоднородностях атмосферы) объясняется, например, голубой цвет неба и красноватый цвет Солнца на восходе и заходе. На восходе и заходе наблюдается свет, в котором в результате рассеяния коротковолновая (фиолетовая) часть спектра ослаблена значительно сильнее длинноволновой (красной) части. В результате Солнце воспринимается как красное. Когда Солнце находится в зените и рассеяние невелико (меньше толща атмосферы, проходимой лучами), оно не имеет красного цвета. Однако в рассеянном атмосферой свете преобладает фиолетовая часть спектра и небо воспринимается голубым.

Дифракция света может происходить в оптически неоднородной среде, например, в мутной среде (дым, туман, запыленный воздух и т.п.). На неоднородностях среды световые волны создают дифракционную картину, характеризующуюся довольно равномерным распределением интенсивности по всем направлениям.

Такую дифракцию на мелких неоднородностях называют **рассеянием света**.

Это явление наблюдается, если узкий пучок солнечных лучей проходит через запыленный воздух, рассеивается на пылинках и становится видимым.

Рассеяние света наблюдается также и в чистых средах, не содержащих посторонних частиц. Например, оно может происходить на флуктуациях (случайных отклонениях) плотности, анизотропии или концентрации. Такое рассеяние называют молекулярным. Оно объясняет, например, голубой цвет неба. Действительно, согласно (1) голубые и синие лучи рассеиваются сильнее, чем красные и желтые, т.к. имеют меньшую длину волны, обуславливая тем самым голубой цвет неба.

Дисперсия света

Дисперсией света называется явление зависимости фазовой скорости распространения световых волн в веществе от их частоты (или зависимость показателя преломления n вещества от частоты ν (или длины волны λ) световой волны)

Разложение в спектр пучка белого света при прохождении его через призму объясняется дисперсией света. Первые экспериментальные наблюдения дисперсии света принадлежат И. Ньютону.

Наиболее отчетливо дисперсия света проявляется при прохождении белого света через призму. За призмой лучи белого света окажутся разложенными на составляющие цвета - в спектр. Полученный спектр называют *призматическим*, в отличие от *дифракционного спектра*, даваемого дифракционной решеткой.

Световая волна в вакууме представляет собой переменное электромагнитное поле высокой частоты, распространяющееся с постоянной скоростью, не зависящей от частоты. Последнее обстоятельство можно считать надежно установленным наблюдениями над астрономическими явлениями. Так исследования затмения удаленных двойных звезд не обнаруживают никаких аномалий в спектральном составе света, доходящего до нас в начале и конце затмений.

При прохождении света через вещество ситуация несколько изменяется. Согласно электронной теории дисперсии, луч белого света "раскачивает" электроны в атомах, причем сильнее всего "раскачивает" в том случае, когда частота световой волны близка к собственной частоте колебаний электрона в среде ν_0 , то есть в случае резонанса. Степень взаимодействия света с веществом, а, следовательно, и скорость распространения света зависит от близости его частоты к резонансной, т. е. от $\nu - \nu_0$, а также от параметра β , характеризующего затухание свободных колебаний электрона.

Согласно электронной теории дисперсии справедлива следующая приближенная формула для показателя преломления вещества:

$$n = 1 + A \frac{\nu_0^2 - \nu^2}{(\nu_0^2 - \nu^2)^2 + \beta^2 \nu^2}$$

где $A = 2\pi N e^2 / m$, N - концентрация атомов, e , m - заряд и масса электрона.

Таким образом, при попадании в обычные среды свет испытывает изменение скорости и притом для разных частот скорость оказывается различной, т.е. показатель преломления среды n зависит от частоты или длины волны в вакууме $n = n(\lambda_0)$. Эта зависимость (как и зависимость фазовой скорости световых волн) называется *дисперсией света*. Следствием дисперсии является разложение в спектр пучка белого света при прохождении его через одну или несколько преломляющих поверхностей, например, через призму.

Величина $D = dn/d\lambda_0$, называемая *дисперсией вещества*, показывает как быстро изменяется показатель преломления с длиной волны. Для всех прозрачных бесцветных веществ зависимость $n = n(\lambda_0)$ имеет в видимой части спектра характер, показанный на рис. 2. С уменьшением длины волны показатель преломления увеличивается, так что дисперсия вещества отрицательна и растет по модулю с уменьшением λ_0 .

Различают *нормальную* и *аномальную* дисперсии.

Если с увеличением длины волны (или уменьшением частоты) показатель преломления вещества n уменьшается, то такая дисперсия называется *нормальной*, в этом случае $dn/d\nu > 0$ или $dn/d\lambda < 0$.

Наблюдения показывают, что в области полос поглощения, которые совпадают с резонансными частотами собственных колебаний электронов в атоме и атомов в молекуле, дисперсия вещества имеет существенно другой вид (см. рис. 2). Внутри полосы поглощения наблюдается возрастание показателя преломления вещества n с увеличением длины волны λ , то есть ход дисперсии обнаруживает аномалию. На этом участке дисперсия вещества оказывается положительной. Такой ход зависимости $n = n(\lambda_0)$ называется *аномальной дисперсией*, в этом случае

$$dn/d\lambda < 0 \text{ или } dn/d\nu > 0$$

В области аномальной дисперсии поглощение света очень велико.

Разложение белого цвета в спектр призмой и явление радуги после дождя объясняются дисперсией света.

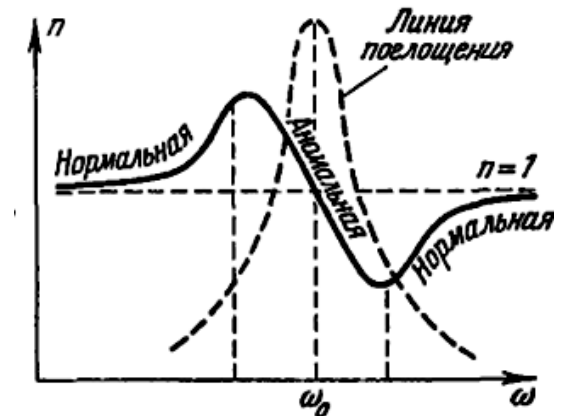
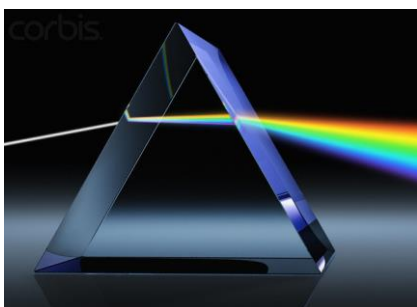
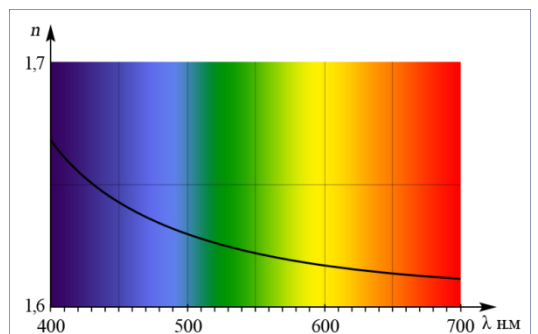


Рис. 2 Нормальная и аномальная дисперсии



Излучение Вавилова – Черенкова

Излучением Вавилова-Черенкова называется явление излучения света электрически заряженной частицей, возникающее при её движении в среде со скоростью v , превышающей фазовую скорость света в этой среде.

$$\cos \theta = \frac{v_{\text{света в вещ}}}{v_{\text{частицы}}} = \frac{c}{n v_{\text{частицы}}}$$

где θ - угол, под которым наблюдается излучение Вавилова-Черенкова,

$v_{\text{света в вещ}}$ - скорость света в веществе, $v_{\text{частицы}}$ - скорость частицы в веществе,

c - скорость света в вакууме, n - абсолютный показатель преломления вещества, в котором движется частица.

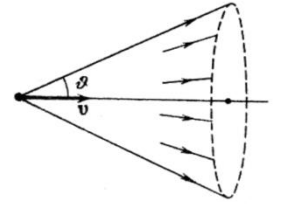
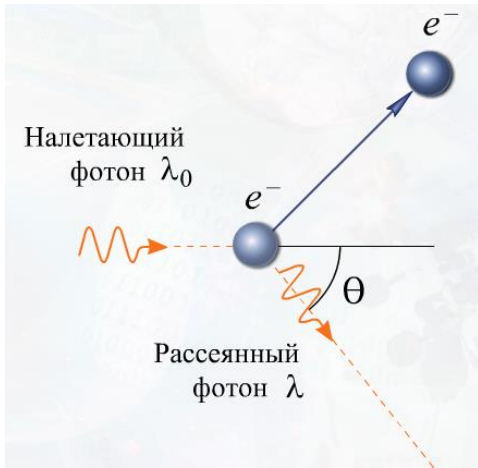


Рис. 3

Эффект Комптона

Эффектом Комптона называется явление упругого рассеивания рентгеновского или гамма излучения на свободных и слабо связанных с атомом электронах, которое сопровождается увеличением длины волны рассеянного электромагнитного излучения.



Изменение длины волны рентгеновского излучения при комptonовском рассеивании:

$$\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta) = 2 \frac{h}{mc} \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

где $\Delta \lambda$ - изменение длины волны рентгеновского излучения в результате рассеяния,

λ_0 - длина волны рентгеновского излучения до рассеяния,

λ - длина волны рентгеновского излучения после рассеяния,

h - постоянная Планка,

m - масса частицы, на которой происходит рассеяние рентгеновского излучения, c - скорость света в вакууме,

θ - угол рассеяния рентгеновского излучения,

Дифракция рентгеновских лучей на пространственной дифракционной решётке

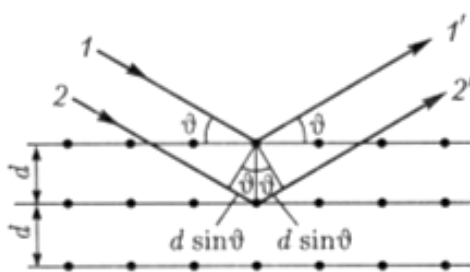


Рис. 4

Если луч монохроматического рентгеновского излучения падает на поверхность кристалла под углом скольжения θ , а затем отражается от атомов кристалла, то на экране можно наблюдать дифракционную картину.

При падении параллельного пучка монохроматических рентгеновских лучей 1 и 2 под углом скольжения θ на кристалл вещества, ЭМ поле волны действует на электроны атомов кристаллической решётки. Эти атомы становятся источниками вторичных когерентных волн 1' и 2', которые интерферируют между собой. Эти вторичные волны гасят друг друга по всем направлениям кроме направлений, в которых наблюдаются дифракционные максимумы и которые можно определить по формуле **Вульфа-Бреггов**:

$$2d \sin \theta = m \lambda$$

где θ - угол скольжения; λ – длина волны падающего на кристалл рентгеновского излучения, m ;

d - межплоскостное расстояние (расстояние между атомными плоскостями в кристалле), m ;

$m = 1, 2, 3 \dots$ - целое число, определяющее порядок спектра.

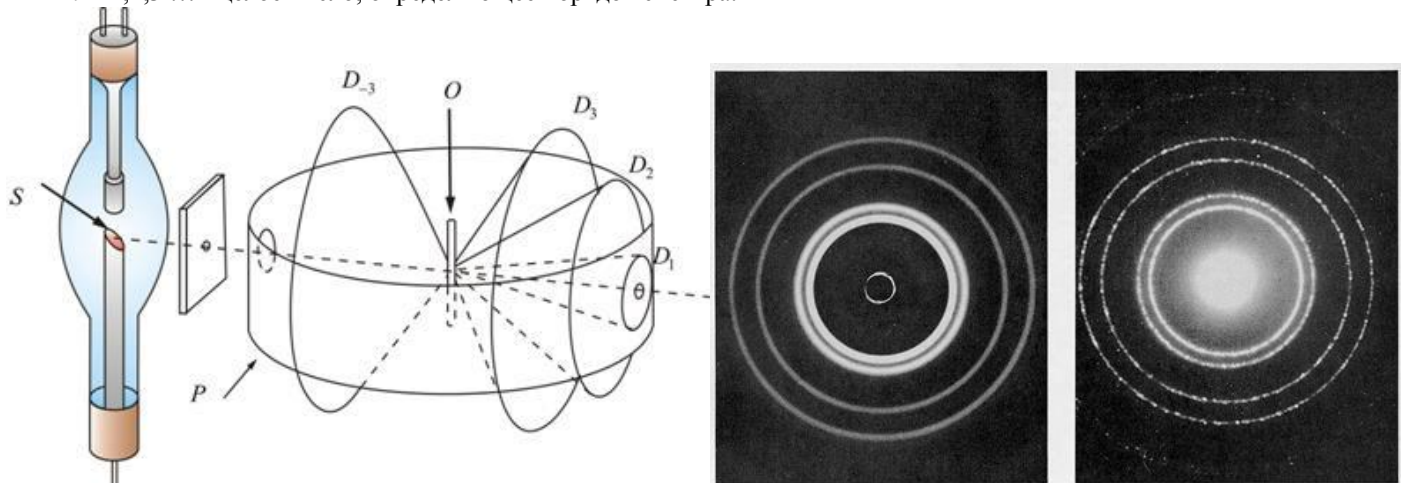


Рис. 5 Дифракция рентгеновских лучей на поликристаллическом веществе

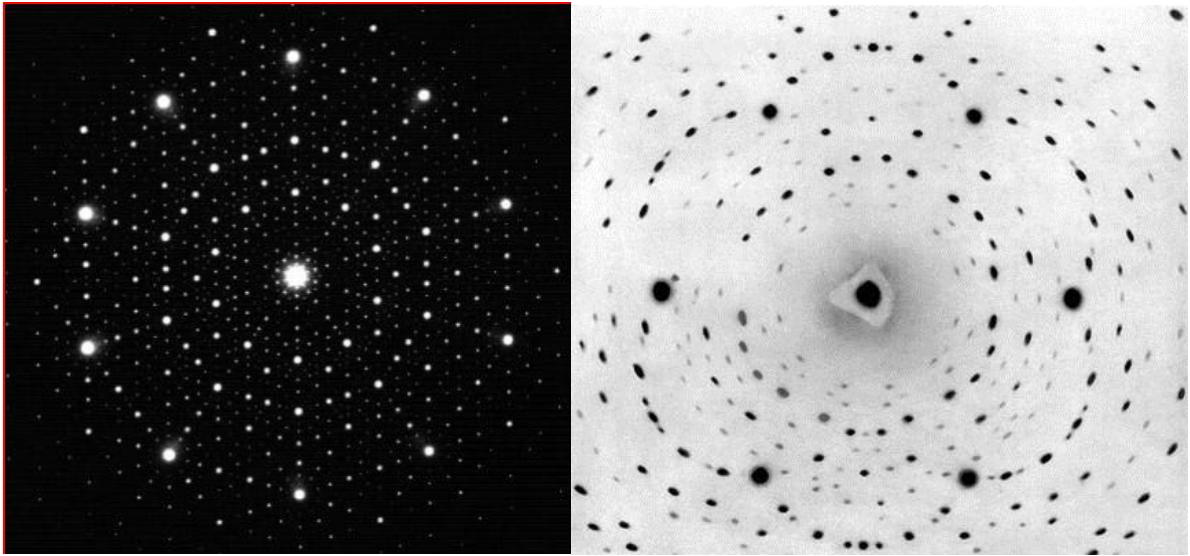


Рис. 6 Дифракция рентгеновских лучей на кристалле вещества

Давление света

При падении света на вещество он оказывает на него давление. Впервые давление света доказал в 1899 году русский ученый Лебедев.

Давление света, падающего перпендикулярно на поверхность можно рассчитать на формуле:

$$p = \frac{h\nu}{c} N (1 + \rho) = \frac{E}{c} (1 + \rho) = \omega (1 + \rho)$$

p – давление света, Па; $h\nu$ – энергия, падающего кванта, Дж; N – число падающих квантов за 1 с,;

c – скорость света в вакууме, $\frac{м}{с}$; ρ – коэффициент отражения света, безразм;

E – энергетическая освещенность поверхности, Дж; ω – объемная плотность энергии излучения, $\frac{Дж}{м^3}$.

Давление света объясняется действием силы Лоренца со стороны магнитного поля световой волны на колеблющиеся под действием электрического поля волны электроны вещества.