

Конспект лекций по курсу общей физики. Часть III
“Оптика. Квантовые представления о свете.
Атомная физика и физика ядра”
Лекция № 6

4. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

4.1. Дисперсия света. Методы наблюдения

Дисперсией света называются явления, обусловленные зависимостью показателя преломления вещества от длины световой волны.

Для каждого данного вещества показатель преломления n является определенной функцией от длины волны λ :

$$n=f(\lambda).$$

Дисперсией вещества называется величина, определяющая как быстро изменяется показатель преломления n с длиной волны λ .

Дисперсию вещества обозначим η .

$$\eta = \frac{dn}{d\lambda} \quad (1)$$

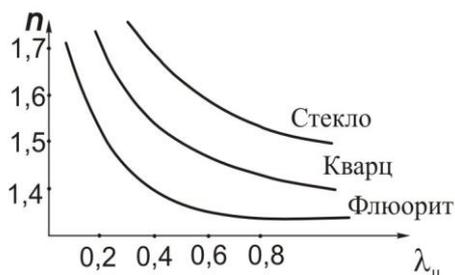


Рис.1

На рисунке 1 приведены кривые дисперсии для нескольких веществ. Для всех **прозрачных** веществ показатель преломления n монотонно возрастает (рис.1) с уменьшением длины волны λ со все возрастающей скоростью. Дисперсия $dn/d\lambda$ отрицательна и растет по модулю с уменьшением λ . Такая дисперсия называется **нормальной**.

Среды, обладающие дисперсией, называются диспергирующими. В диспергирующих средах скорость световых волн зависит от длины волны λ или частоты ω .

Для обнаружения дисперсии применяется любой метод для определения показателя преломления – преломление в призмах, полное внутреннее отражение, интерференционные приборы.

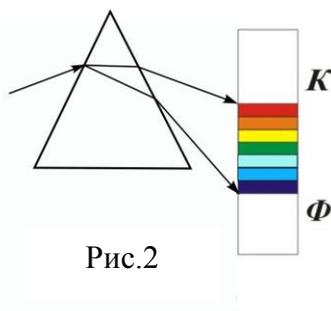


Рис.2

Вопросом возникновения спектра всерьез занялся Ньютон. В своих мемуарах «Новая теория света и цветов» в 1666г. он сообщает, что «достал треугольную стеклянную призму, чтобы с ней произвести опыты над знаменитым явлением цветов». По Ньютону белый

свет дает спектр, а «однородные» цвета (как мы сейчас называем их – монохроматические волны) уже далее не разлагаются на составные цвета.

Свет Солнца дает *сплошной спектр* с непрерывным переходом (рис.2) одних цветов в другие, это означает наличие в солнечном свете колебаний всевозможных длин волн.

Ньютон разработал еще один метод наблюдения дисперсии, метод скрещенных призм (рис.2а).

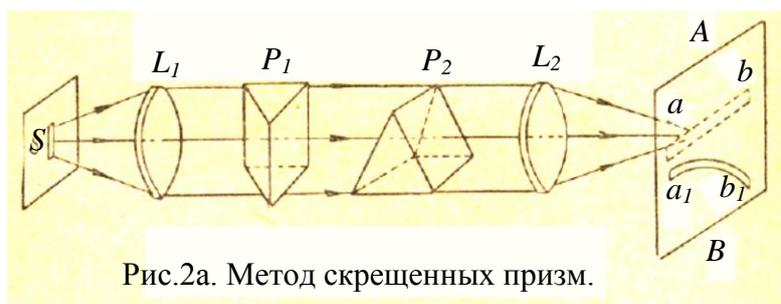


Рис.2а. Метод скрещенных призм.

Белый свет от источника S проходит через две призмы P_1 и P_2 , преломляющие ребра которых взаимно перпендикулярны. Линзы L_1 и L_2 собирают свет на экран. Если в схеме находится только призма P_1 , на экране получается горизонтальный сплошной спектр. Если находятся две призмы, P_1 и P_2 каждый луч будет отклоняться вниз, красный луч сместится на меньшее расстояние, фиолетовый на большее, т.к. показатель преломления фиолетового луча больше, чем красного.

4.2. Взаимодействие электромагнитных волн с веществом. Групповая скорость

Электромагнитные волны могут распространяться как в пустоте, так и в различных средах. Взаимодействие излучения и вещества среды имеет два аспекта:

- среда влияет на процесс распространения излучения,
- излучение при прохождении через вещество воздействует на структуру среды.

Причина дисперсии света заключается в различии скоростей распространения лучей разной окраски. Что вообще понимается под скоростью света в среде?

Понятие скорости при волнообразном распространении в случае монохроматической незатухающей синусоидальной волны было введено, как скорость фазы волны, или фазовой скорости v . В действительности все реальные источники волн совершают затухающие колебания, осциллятор обладает ограниченным запасом энергии, следовательно,

колебания носят ограниченный промежуток времени. Реальные волны в той или иной степени отличаются от синусоидальных.

Фактически, если выделен свет определенной длины волны, световые колебания всегда представляют собой сложное колебание, так как некоторое число осцилляторов имеют близкие частоты. Для простоты пусть два осциллятора с близкими частотами излучают монохроматические волны 1 и 2 разной длины и они распространяются с одной и той же фазовой скоростью v в среде (рис.3), где нет дисперсии.

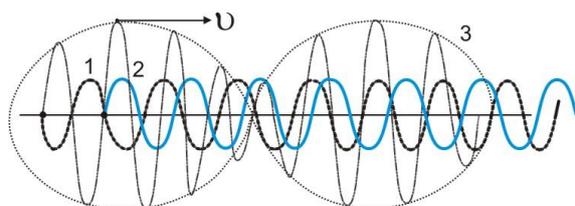


Рис.3

Суперпозиция этих волн дает волну с модулированной амплитудой 3 и с той же фазовой скоростью, т.е. имеет вид импульсов.

Однако среда (за исключением пустого пространства) обычно характеризуется дисперсией, т.е. монохроматические волны распространяются с различными фазовыми скоростями, зависящими от их длины волны, поэтому импульс начинает деформироваться. Учтем еще такой момент – осцилляторы излучают обрывок синусоиды, волновой процесс имеет ограниченное протяжение в пространстве. Таким образом, в результате суперпозиции получается

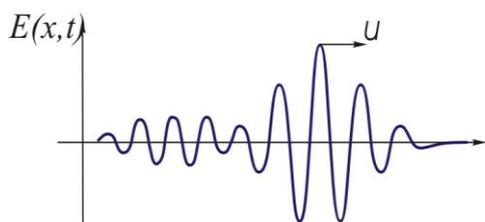


Рис.4

практически одна группа, амплитуда которой отличается от нуля в ограниченной области. Такая группа волны называется **волновым пакетом**. Центру пакета можно приписать скорость u , которая называется **групповой скоростью** (рис.4).

При наличии дисперсии групповая скорость отличается от фазовой. В результате, огибающая амплитуд и слагаемые волны движутся с различными скоростями, что приводит к изменению формы огибающей в процессе распространения волны, т.е. при наличии дисперсии волновой пакет распространяется с изменением формы.

Формула связи групповой и фазовой скоростей называется формулой Рэлея

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda} \quad (2)$$

Из формулы видно: в зависимости от знака $\frac{dv}{d\lambda}$, групповая скорость может быть как меньше, так и больше фазовой скорости.

Энергия волнового пакета сосредоточена в сравнительно небольшом интервале частот, поэтому волновые пакеты называют также **импульсами**. Энергия импульса $E(x, t)$ распространяется с групповой скоростью.

Анализ различных методов определения скорости света показывает, что все они дают групповую скорость. Фазовая скорость есть величина, недоступная для непосредственного измерения.

Основной механизм взаимодействия излучения и вещества таков. Электромагнитная волна своим переменным электрическим полем периодически ускоряет электрические заряды вещества. Ускоренные заряды излучают новые волны. Таким образом, **распространение света в среде есть непрерывное поглощение и переизлучение электромагнитных волн зарядами вещества**.

4.3. Элементарная теория дисперсии

В основу теории дисперсии входит электромагнитная теория света и электронная теория вещества. Взаимодействие света с веществом в классической и квантовой трактовке, фактически, рассматривается с учетом одних и тех же основных существенных положений.

Классическая теория дисперсии была разработана после создания Г. Лоренцем электронной теории строения вещества. Теория была принята в то время с известной долей скептицизма. **Тем не менее, она представляет собой вершину развития классической теории электромагнетизма и направляла все исследования по электронной теории.**

В основу ее положено следующее соображение. **Дисперсия является следствием зависимости поляризованности атомов от частоты электрического поля.**

Для качественного понимания ряда оптических явлений **можно ограничиться гипотезой о существовании внутри атомов и молекул внешних электронов, связанных квазиупруго.**

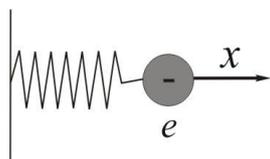


Рис.5

Если такой электрон вывести из положения равновесия, сообщив ему энергию, он приходит в колебание, затем теряет энергию на излучение. В результате, колебания будут затухающими.

Под влиянием **внешнего поля электрон сместится на расстояние x** из положения равновесия (рис.5), тем самым **превращая атом в диполь с дипольным электрическим моментом**

$$p = ex$$

Смещением ядра из положения равновесия пренебрегаем, поскольку масса ядра больше массы электрона.

Для простоты каждый атом считается диполем с одним внешним оптическим электроном.

Если в единице объема среды находится N атомов, то дипольный электрический момент

$$P = Nex.$$

Поляризованность вещества задается внешним электрическим полем напряженностью E и диэлектрической восприимчивостью вещества ϵ

$$P = \epsilon E.$$

Проанализируем **механизм поляризации атома или молекулы** в электрическом поле световой волны. Составим уравнение движения связанного электрона. Нам предстоит решить задачу о вынужденных колебаниях электронов.

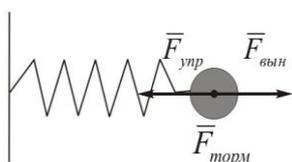


Рис.6

Механической аналогией системы электрон – атом может служить система шарик, соединенный пружиной с неподвижной стенкой.

В первом приближении можно считать, что на электрон действуют три силы (рис.6).

1. Вынуждающая сила.

Каждый электрон находится под воздействием лоренцевой силы

$$F_{\text{вын}} = eE = eE_0 \sin \omega t,$$

где E_0 - амплитуда и ω – частота электрической волны.

2. Возвращающая сила.

Возвращающая сила имеет характер упругой силы связи

$$F_{\text{упр}} = -kx,$$

где k - коэффициент упругой связи.

3. Тормозящая сила.

Растрата колебательной энергии, в основном, связана с взаимодействием атомов между собой. Сила трения зависит от скорости v движения электрона

$$F_{\text{торм}} = -r v = -r \dot{x},$$

где r – коэффициент сопротивления.

Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний электрона массы m в поле суммарной силы имеет вид

$$m\ddot{x} = eE_0 \sin \omega t - kx - r\dot{x} \tag{3}$$

Упростим это выражение

$$\ddot{x} + 2\beta \dot{x} + \omega_0^2 x = f \sin \omega t,$$

где $\frac{r}{m} = 2\beta$, β – коэффициент затухания,

$\frac{\kappa}{m} = \omega_0^2$, ω_0 – собственная частота колебаний электрона,

$\frac{eE_0}{m} = f$.

Уравнение имеет решение в форме затухающей волны. Однако решение не представляет затруднений, если считать установившийся режим вынужденных колебаний незатухающим ($\beta \rightarrow 0$):

$$x = A \sin \omega t,$$

где

$$A = \frac{eE_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}.$$

Пользуясь известным уравнением для диэлектрической проницаемости среды $\varepsilon = 1 + \varkappa$, найдем абсолютный показатель преломления среды, $n = \sqrt{\varepsilon}$.

$$\varepsilon = 1 + \varkappa = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E} = 1 + \frac{Ne^2 x}{\varepsilon_0 E}$$

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{m\varepsilon_0(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (4)$$

- это уравнение дисперсии Зельмейера (1871г).

Квантовомеханический расчет приводит к результатам такого же вида с некоторыми уточнениями.

Как показывают опыты, каждое вещество обладает не одной частотой ω_0 собственных колебаний оптического электрона, а характеризуется определенным набором различных частот $\omega_{ок}$. Таким образом, после суммирования по всем значениям $\omega_{ок}$ получаем закон дисперсии в виде

$$n^2 = 1 + \frac{N}{\varepsilon_0} \sum_{\kappa} \frac{e^2 / m}{\omega_{ок}^2 - \omega^2}.$$

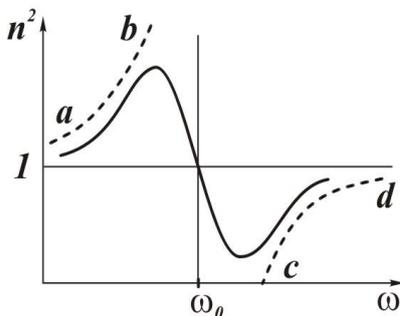


Рис.7

Точные измерения показали: расхождение с опытом составляет в 2- 3%.

Это выражение позволяет объяснить явление дисперсии. График закона показан на рисунке пунктиром (рис.7).

1. При частотах заметно отличающихся от ω_0 , сумма в формуле справа мала по сравнению с единицей, $n^2 \approx 1$ (это соответствует точкам *a* и *d*).

2. При $\omega \rightarrow \omega_0$ слева на графике функция стремиться в $+\infty$, справа – в $-\infty$. Т.е. функция терпит разрыв.

Таким образом, уравнение дисперсии имеет смысл лишь для частот, отличающихся от собственных частот колебания электронов.

3. Более точная теория дисперсии учитывает затухание колебаний, график этой функции обозначен сплошной линией и называется **дисперсионной кривой**. Участки *ab* и *cd* называются областями **нормальной** дисперсии, показатель преломления растет с возрастанием частоты волны. Участок *bc*, вблизи резонансной частоты называется областью **аномальной** дисперсии, здесь показатель преломления уменьшается с возрастанием частоты волны. Аномальная дисперсия наблюдается в областях частот, соответствующих полосам интенсивного поглощения. В области аномальной дисперсии понятие групповой скорости теряет смысл, т.к. велико поглощение.

4.4. Наблюдение аномальной дисперсии

Американский физик Р.Вуд (1869-1925г.) для наблюдения аномальной дисперсии использовал метод скрещенных призм в парах натрия (рис.8). Одной призмой взята стеклянная призма P_1 , другая P_2 соз-

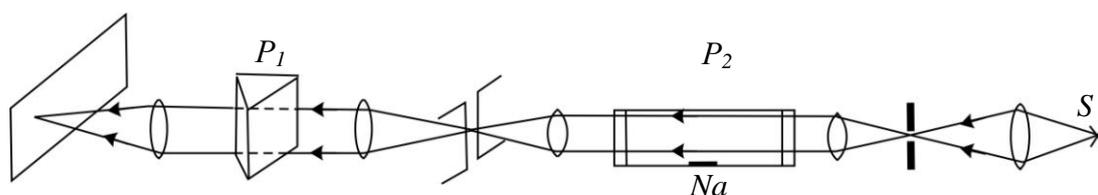


Рис.8. Метод наблюдения аномальной дисперсии в парах натрия.

дается искусственно. Источник S – дуга между электродами из металлического натрия. Металлический натрий в откачанном сосуде P_2 нагревается снизу, одновременно охлаждается верхняя часть сосуда. Плотность паров натрия будет неоднородной, снизу больше, наверху меньше. В результате формируется «призма» P_2 , скрещенная с P_1 . Благодаря аномальному характеру дисперсии спектр окажется не монотонно изогнутым, а обнаружит характерные изгибы вблизи линий поглощения (рис.9).



Рис.9. Атомная дисперсия в парах натрия.

Явление **аномальной дисперсии имеет большое значение для выяснения свойств вещества.**