***Лекция 6***

**4.7.2. Преломление света**

Преломление луча света происходит при переходе из одной среды в другую. Причина преломления - изменение скорости распространения. Применим для получения закона преломления принцип Ферма.

Пусть скорость распространения света в некоторой среде равна ***v***, в вакууме - ***c.*** Обычно скорость распространения света в среде меньше скорости в вакууме. Это означает, что для прохождения некоторого пути ***l*** в веществе потребуется несколько большее время

 ***Z***

 ***A***

 ***α1 z***

 ***0 α2 X***

 ***B***

.

Мы ввели обозначение ***n = c/v***, эта величина называется показателем преломления. Произведение ***ln*** называют оптической длиной пути. Для вакуума ***n = 1***. Если ***n > 1***, то время распространения света от точки ***A*** до точки ***B*** будет уменьшаться при отклонении пути распространения от прямолинейного, причем при таком отклонении, когда длина пути в вакууме несколько увеличивается, а в веществе - уменьшается.

Подсчитаем время распространения света между точками ***A*** и ***B***. Пусть (***xA,zA***) и(***xB,zB***)- координаты точек, ***z*** - координата точки преломления луча. В вакууме и в веществе свет проходит расстояния

 и ,

время распространения -

.

Согласно принципу Ферма



.

Используя введенное ранее обозначение, мы можем записать закон преломления в виде:

.

Получим теперь закон преломления иначе, анализируя пересечение границы плоской волной.

 ***α1***

 ***α1 λ0***

 ***λn α2***

 ***α2***

Нарисуем фронты волны таким образом, чтобы они проходили через максимумы напряженности электрического поля при одинаковом их направлении. Они будут совпадать с гребнями волн. Тогда расстояние между фронтами будет равно длине волны света.

Частота колебаний в вакууме и в оптически более плотной среде (***n > 1***), естественно, одинакова. Значит, длины волны в этих средах различаются так же, как различаются скорости, - в ***n*** раз. Это приводит к “излому” фронтов на поверхности оптически плотной среды, причем углы между фронтами и этой поверхностью ***α1*** и ***α2*** равны углам падения и преломления (как углы со взаимно перпендикулярными сторонами).

Треугольники, в которых отрезки длиной ***λn*** и ***λ0*** являются катетами, имеют общую гипотенузу. Поэтому,

.

Мы вновь получили закон преломления.

**4.7.3. Дисперсия и поглощение света**

Полученное нами ранее выражение для скорости распространения света является достаточно грубым приближением. Однако, оно позволяет в принципе понять причину зависимости скорости света от частоты.

Заметим, что удовлетворительное описание зависимости фазовой скорости от частоты полученное нами выражение дает лишь при не слишком малой величине разности ***ω0*** и ***ω***. Иначе амплитуда колебаний электронов становится слишком большой и некоторые наши утверждения оказываются неверными. Так, мы считали, что при колебании электронов не происходит диссипации механической энергии, что при больших амплитудах оказывается неверным. Кроме того, возникают некоторые проблемы с фазой колебаний.

Мы знаем, что при резонансе разность фаз колебаний вынуждающей силы (электрического поля ) и координаты равно ***π/2***. Это легко понять и запомнить после такого рассуждения.

При резонансе максимальны амплитуда и диссипация энергии. Значит, при резонансе максимальна мощность вынуждающей силы. Для этого необходимо, чтобы сила изменялась в фазе со скоростью:

.

Умножение экспоненты на мнимую единицу как раз и означает изменение фазы колебаний на ***π/2***. В таких условиях не будет пропорциональности между электрическим полем  и поляризованностью вещества  - они просто не совпадают по фазе, например, обращаются в нуль в разные моменты времени.

 ***X***

 ***0***

 *** ***

При малых потерях даже при не слишком большом различии ***ω0*** и ***ω*** разность фаз колебаний электрона и электрического поля можно считать равной нулю (при ***ω*** < ***ω0***) или ***π*** (при ***ω*** > ***ω0***). Это обстоятельство важно для нас по нескольким причинам.

Зависимость разности фаз от частоты мы в свое время обсуждали. Тем не менее представляется уместным сказать здесь об этом несколько слов.

Рассмотрим этот вопрос на примере движения грузика на пружине. При действии медленно изменяющейся силы (***ω*** < ***ω0***) наличие грузика, собственно, несущественно - внешняя сила уравновешивается упругой силой деформированной пружины, и в соответствии с законом Гука эта сила пропорциональна смещению грузика. Поэтому изменение координаты, смещение происходит в фазе с силой.



 ***n***

***1 ω***

 ***ω01 ω02***

Более удивительным представляется случай, когда частота вынуждающей силы больше резонансной частоты, когда смещение и сила изменяются в противофазе: не просто понять, почему грузик смещается, например, вверх, тогда как сила направлена вниз, “тянет” его в противоположную сторону. Для этого может быть предложено такое объяснение.

При большой частоте несущественным оказывается наличие пружины. Движение грузика определяется законом Ньютона, т.е. в фазе с силой изменяется *ускорение*, а это последнее - изменяется *в противофазе* со смещением.

Общий ход показателя преломления от частоты показан на рисунке. При частотах ***ω01***, ***ω02*** происходит поглощение света, при частотах меньших или больших этих значений показатель преломления оказывается больше или меньше единицы. Это означает, что скорость распространения волны в веществе оказывается больше или меньше скорости света в вакууме. И это обстоятельство непосредственно связано с фазами колебаний электронов. Сколько-нибудь точный расчет, приводящий к такому результату, провести с нашим уровнем знаний не представляется возможным. Попробуем, тем не менее, понять причины изменения скорости распространения волны хотя бы качественно.

Дело в том, что, вообще говоря, скорость распространения электромагнитной волны и в веществе равна скорости волны в вакууме. Но при этом, проходя некоторый тонкий слой вещества, волна возбуждает в нем колебания электронов. В свою очередь, колебания электронов создают некоторую вторичную волну, которая складывается с волной, приходящей к этому слою. И здесь нам нужно провести достаточно тонкое рассуждение.

Сказанное означает, что *за слоем* колебания представляют собой сумму двух колебаний: колебаний проходящей волны и другой, “вторичной” волны, излученной колеблющимися электронами. Естественно, мы будем рассматривать (бесконечно) тонкий слой и амплитуда колебаний вторичной волны (бесконечно) мала. Но при этом амплитуда результирующих колебаний должна остаться прежней. Это возможно только в том случае, если эти колебания различаются по фазе на **±*π/2***. И это приводит к удивительному результату.

 ***dE dE***

 ***E’ E***

 ***E E”***

 ***ωt+δ-kx ωt-δ-kx***

 ***ωt-k’x ωt-k”x***

Обратимся к векторной диаграмме, которую мы уже неоднократно использовали для сложения колебаний. Пусть на этой диаграмме колебания проходящей волны представлены вектором длиной ***E***, а вторичной волны ***dE.*** Как мы выяснили, эти векторы перпендикулярны и на рисунке показаны возможные взаимные расположения этих векторов.

С одной стороны в каждой точке частота колебаний одинакова. Но при переходе от точки к точке изменяется фаза колебаний, изменяется на ***kΔx***. Таким образом, для этих колебаний в разных точках слагаемое ***-kx*** имеет смысл начальной фазы. Но при распространении света в веществе при переходе от точки к точке мы “подключаем” все новые и новые слои вещества, которые добавляют к начальной фазе колебаний плюс или минус ***δ***. Иначе говоря, при одной и той же частоте в веществе при переходе от точки к точке фаза колебаний изменяется либо больше, чем на ***-kx,*** либо меньше чем в вакууме. Говоря иначе, волновое число ***k*** в веществе другое, не такое, как в вакууме. Поэтому и наблюдаемая фазовая скорость в веществе ***v = ω/k*** другая, отличная от скорости в вакууме ***c***.

Вспомним еще раз, что мы говорим о частотах, достаточно сильно отличающихся от резонансной, и при этом в зависимости от знака разности ***ω0-ω*** фаза колебаний электронов по отношению к фазе электрического поля принимает либо значение ***0***, либо - ***π***. Поэтому, в зависимости от ***ω0-ω*** фазовая скорость либо меньше, либо больше ***c***.

**4.7.4. Групповая и фазовая скорости света в веществе**

Человека, хоть немного сведущего в физике, сильно шокирует утверждение, что скорость света в веществе может быть больше скорости света в вакууме ***c***. Такой человек обычно знает, что согласно теории относительности Эйнштейна скорость ***c*** - это максимальная скорость движения физического объекта. Но фазовую скорость нельзя связать с движением какого-нибудь объекта, это лишь скорость движения точки с постоянной фазой колебаний:

.

Иное дело групповая скорость ***v = dω/dk*** - она не может быть больше ***c***.

Обратимся к зависимости фазовой скорости световой волны от частоты:

; 

и рассмотрим в качестве примера распространение рентгеновских лучей. Для них характерна очень большая частота колебаний, так что в выписанном выражении можно пренебречь частотой ***ω0***, величина ***ε < 1.*** В этом случае

; .

Запишем выражение для квадрата волнового числа:



и возьмем дифференциал от обеих частей полученного выражения:

.

Таково соотношение между скоростью света в вакууме, фазовой и групповой скоростями. При этом

; .

Таким образом, хотя фазовая скорость электромагнитной волны в рентгеновском диапазоне больше ***c***, групповая скорость оказывается меньше этой величины.

**4.7.5. Аномальная дисперсия**

Присмотримся внимательнее к выражению для скорости света в веществе:

.

Слагаемые под знаком суммирования велики при частотах ***ω~ω0.*** При резонансной частоте такое слагаемое меняет знак, причем при меньшей по отношению к резонансной частоте фазовая скорость больше скорости света в вакууме, а при большей ***v < c***. Такую зависимость фазовой скорости от частоты называют *аномальной* дисперсией.

*Нормальная* дисперсия наблюдается в промежутке между соседними резонансными частотами ***ω0k*** и ***ω0k+1.*** Аномальная дисперсия наблюдается в узком диапазоне частот, это объясняет тот факт, что, как правило, прозрачные вещества обладают нормальной дисперсией.

Для наблюдения дисперсии может быть использована призма, при прохождении которой лучи света отклоняются к ее основанию. При нормальной дисперсии в видимой области показатель скорость распространения красного цвета больше, а показатель преломления больш меньше, чем фиолетового. Поэтому красный и фиолетовый цвета будут наблюдаться в разных точках экрана, как это показано на рисунке.

 ***Кр***

 ***Ф***

 ***1 2 Y***

 ***Кр***

 ***Y=Y(n1)***

 ***X=X(n2) Ф***

 ***0***

 ***X***

Для наблюдения аномальной дисперсии можно воспользоваться методом скрещенных призм. В этом случае отклонение по вертикали определяется дисперсией одной призмы, а по горизонтали - другой. Выбрав одну из призм такой, что дисперсия ее материала нормальная, мы сможем наблюдать на экране зависимость показателя преломления материала другой призмы от частоты.

Ниже на рисунках показаны получающиеся при этом картинки. И более узкой области аномальной дисперсии происходит сильное поглощение света, что и определяет разрыв наблюдаемой кривой.

***Кр ф Кр Ф***

Как мы видели, ничего ненормального в аномальной дисперсии нет. Просто в некоторых диапазонах частот показатель преломления увеличивается, а в некоторых - уменьшается. Теперь мы понимаем, почему это так происходит.



