

Содержание

Лекция 1. Поляризация	2
Лекция 2. Дисперсия света	4

Лекция 1. Поляризация

В прошлом семестре мы говорили о плоских бесконечных волнах. В реальности волны не бесконечные – о них говорят, как о импульсе, одиночном, кратковременном возмущении. Свет излучается атомами за конечное время, порядка наносекунд. Получаем конечный световой импульс, длину распространения которого можно посчитать – $l = c \cdot t$, а значит мы можем говорить о световом импульсе, который локализован, как о частице. Здесь появляется понятие кванта: атом не может излучить меньше одного фотона, поэтому фотон – это квант, неделимая часть.

Из прошлого семестра мы знаем, что электрон может преодолеть потенциальный барьер, действуя как волна, из-за своего размера. Следствием этого является ограничение на размер транзистора.

Такой эффект не сходится с представлениями классической физики. В классической физике (в том числе в механике Ньютона) рассматриваются более высокие порядки размеров и на более низких скоростях, чем скорость света. В механике Гамильтона, основывающейся на концепции гамильтониана (оператора полной энергии) отпадает понятие траектории.

Будем говорить, что волна представляет $E(z, t) = (E_0 e^{i(\omega t - kz)})$

Если волна не лежит в системе координат, то добавляют матрицу поворота: $E(z, t) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} E_0 e^{i(\omega t - kz)}$

Свет считается **поляризованным**, если направления колебания светового вектора \vec{E} упорядочены каким-либо образом.

В простом случае поляризация бывает линейной (или плоской) – в этом случае вектор напряженности движется в одной плоскости.

Большинство бытовых источников света излучают неполяризованные волны – в них колебания разных направлений быстро и беспорядочно сменяют друг друга. С помощью устройства с названием **поляризатор** можно получить поляризованный свет, поглощая другие. Поляризатор лишь частично задерживающий колебания, перпендикулярные к его плоскости, называется несовершенным. Качество поляризатора зависит от толщины и материала.

С помощью другого прибора – монохроматора – можно получить монохроматическую волну. Так как свет с разной длиной волны имеет разные коэффициенты преломления, то монохроматор способен пропускать свет с нужной длиной волны.

Если свет поляризован плохо, то его называют **частично поляризованным**.

Если пропустить частично поляризованный свет через поляризатор, прибора вокруг направления луча интенсивность прошедшего света будет изменяться от I_{\min} до I_{\max} . Причем, так как поляризатор симметричен, то угол между I_{\min} и I_{\max} равен $\frac{\pi}{2}$.

Степенью поляризации $P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$ можно выразить, насколько сильно поляризован свет

Однако, так как поляризатор не пропускает лучи в неправильном направлении, то интенсивность света уменьшится. **Закон Малюса** гласит, что доля интенсивность выходящего света от интенсивность входящего равна $\cos^2 \varphi$, где φ – угол между плоскостью поляризатора и плоскостью колебания \vec{E}

$$I = I_0 \cos^2 \varphi$$

Если пропустить естественный свет через поляризатор, то интенсивность выходящего света равна $I = \frac{1}{2} I_0$. Это объясняется тем, что в естественном свете волны направлены во все стороны равновероятно, а среднее значение $\cos^2 \varphi$ равна $\frac{1}{2}$

Существует круговая (или эллиптическая) поляризация, когда вектор \vec{E} вращается в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны

Всего существуют 3 способа поляризации:

1. Поглощение (или дихроизм): свет проходит через вещество с длинными нитевидными молекулами. Проходя вдоль молекулы, свет свободно проходит, а поперек молекул свет не проходит
Большинство таких линейных поляризаторов (или так называемых поляроидов) состоят из полимерной пленки или частиц кристаллов турмалина или герпатита в нитроцеллюлозной пленке
2. Преломление: в призме Николя используется двойное лучепреломления света. В ней используется анизотропный кристалл исландского шпата, в котором
 - лучи, поляризованные горизонтально, имеют показатель преломления $n_o = 1.66$ – их называют обыкновенными
 - лучи, поляризованные вертикально, имеют показатель преломления $n_o = 1.51$ – их называют необыкновенными

Призма Николя представляет собой две одинаковые треугольные в сечении призмы. Обыкновенный луч испытывает полное внутреннее отражение от склеивающего слоя с $n = 1.55$ и поглощается, а необыкновенный свободно проходит через него и вторую призму, так как показатели преломления приблизительно равны

3. Отражение: Столетов предложил сделать поляризатор из стекла. При определенном угле падения $\alpha = \arctg n$ (известном как угол Брюстера) отраженный свет получается поляризованным. Для стекла этот угол равен примерно 59° , однако отраженный свет получается с интенсивностью 4% от интенсивности входящего света.

Столетов предложил использовать несколько стеклянных пластин, чтобы увеличить

интенсивность – данное устройство, состоящее из стопки стекла, получило название стопа Столетова

Угол Брюстера применяется в изготовлении лазеров для получения поляризованных волн

Лекция 2. Дисперсия света

Дисперсией света называется зависимость показателя преломления от частоты волны света. Данный эффект был обнаружен Исааком Ньютоном при разложении света в спектр. Тогда Ньютон обнаружил, что для разных частот света (а следовательно для разных волн) показатель преломления разный, поэтому в стекле лучи разных частот двигаются с разной скоростью, на выходе призмы получается радужный спектр.

Благодаря дисперсии существует радуга: лучи Солнца, проходя под определенным углом (42 градуса над горизонтом) через капельки воды в воздухе, раскладываются в спектр и попадают на сетчатку глаза.

На сайте <https://refractiveindex.info> можно узнать показатель преломления. Например, металл германий, использующийся в тепловизорах, имеет показатель преломления 3.5-4 в инфракрасном спектре волн, что улучшает разрешение тепловизора при ограниченном объеме устройства.

Подобные призмы используются в спектрометрах – приборах, позволяющих разложить свет в спектр и узнать, какие длины волн присутствуют в спектре.

Разные газы в газоразрядной лампе излучают свет разного цвета (то есть спектр из разных длин волн). Поэтому с помощью спектрометра можно обнаружить, из чего состоит источник света (например, Солнца): зная спектр горения водорода и гелия, можно предположить концентрацию горящего вещества на поверхности Солнца.

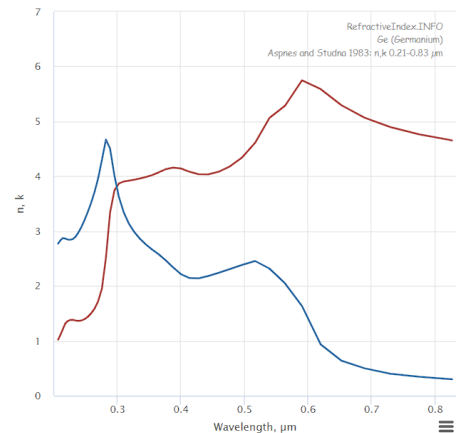
Более продвинутый прибор – масс-спектрометр – используется для изучения состава вещества: вещество нагревают, излученный свет попадает на масс-спектрометр, который определяет интенсивность для разных волн света.

Дисперсия возникает как следствие уравнения Максвелла. Допустим для слабопроводящей среды $\sigma, \epsilon, \mu = \text{const}$ ($\sigma = \frac{1}{\rho}$ – удельная проводимость в сименсах)

По закону индукции Фарадея $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = -\mu\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{H})$$

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E})$$



$$\nabla^2 \times \vec{E} = -\mu\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H})$$

По теореме о циркуляции магнитного поля $\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

Получаем $\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = v^2 \Delta \vec{E}$ – волновое уравнение, где $v^2 = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}$

Из этого волнового уравнения для волны, направленной в сторону оси Ox , получаем $\frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} = v^2 \Delta E_y - \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} \frac{\partial E_y}{\partial t}$

Решение его является функция $E_y = E_0 e^{i(\omega t - kx)}$, то есть $\omega^2 = v^2 k^2 - \frac{i\omega\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0}$, где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число

Уравнение

$$k^2 = \frac{\omega^2}{v^2} - \frac{i\omega\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0 v^2}$$

называют дисперсионным (то есть зависимость $k(\omega)$). Из него $k = \pm \frac{\omega}{v} \sqrt{1 - \frac{i\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0 \omega}}$

Для $\frac{\omega}{\varepsilon\varepsilon_0 \omega} \ll 1$ можем аппроксимировать корень, получаем $k \approx \frac{\omega}{v} (1 - i \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0 \omega}) = k' - ik''$

В ходе вычисления получаем комплексное k : вещественная часть волнового числа k' определяет длину волны, мнимая часть k'' = показывается коэффициент затухания волн, то есть поглощение, получаем $E_y = E_0 e^{i(\omega t - k'x) - k''x}$

Зависимость фазовой скорости волны (то скорость волны с одной длиной) от частоты в среде $v_{\text{фаз}}(\omega) = \frac{\omega}{k'(\omega)}$ называют дисперсией

Для световых волн дисперсия – $n(\omega) = \frac{c}{v_{\text{фаз}}(\omega)}$ или $n(\lambda_0) = \frac{c}{v_{\text{фаз}}(\lambda_0)}$

Если $\sigma = 0$, то $v_{\text{фаз}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0}}$

Получаем дисперсию световых волн: $n(\omega) = \frac{c}{v_{\text{фаз}}(\omega)}$ или $n(\lambda_0) = \frac{c}{v_{\text{фаз}}(\lambda_0)}$

Из этого выходит закон Бугера: пусть свет интенсивности I_0 падает на вещество толщины L , тогда интенсивность света уменьшается по экспоненциальному закону: $I = I_0 e^{-kL}$

При сложении волн из квазимонохроматического спектра получаем ограниченную в пространстве волну – так называемый волновой пакет. Длительность волнового пакета τ пропорциональна обратной разности частот $\frac{1}{\Delta \nu}$

В среде волны с разными длинами двигаются с разной скоростью, поэтому пакет будет деформироваться из-за дисперсии. Из-за этого пакет получает приращение $\Delta t = \frac{L}{v_{\text{идеи}}} - \frac{L}{v_{\text{идеи}}} = \frac{L}{c} \Delta n$

При увеличении пропускной способности оптоволокна нужно уменьшить длительности импульса τ . Из этого получаем, что разность частот увеличивается

Если импульс занимает весь видимый диапазон, то $\Delta n \approx 0.03$. При прохождении 1 метра волокна получаем $\Delta t = \frac{1}{3 \cdot 10^8} \cdot 0.03 = 10^{-10}$ с. Если длительность пакета меньше Δt , то импульсы

сливаются во время прохождения и на приемнике их становится невозможно различить

Групповая скорость $v_{\text{гр}} = \frac{d\omega}{dk}$ - это скорость движения волнового пакета. Если среда дисперсионная, то $v_{\text{гр}} \neq v_{\text{фаз}}$

Заметим, что $v_{\text{фаз}} = \frac{\omega}{k}$, тогда $v_{\text{гр}} = \frac{d\omega}{dk} = v_{\text{фаз}} + k \frac{dv_{\text{фаз}}}{dk} = v_{\text{фаз}} + k \frac{dv_{\text{фаз}}}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dk}$

Так как $\frac{dk}{d\lambda} = -\frac{2\pi}{\lambda^2}$, то $v_{\text{гр}} = v_{\text{фаз}} - \lambda \frac{dv_{\text{фаз}}}{d\lambda}$

То есть $v_{\text{фаз}} - v_{\text{гр}} = \lambda \frac{dv_{\text{фаз}}}{d\lambda}$

Если дисперсии нет, то $k_1 - k_2 = \frac{\omega_1}{c} - \frac{\omega_2}{c}$, и тогда $v_{\text{гр}} = c$