Экзамен. Расширенное понятие интерференции, механизм поглощения света, механизм уменьшения фазовой скорости света.

При сложении световых волн одинаковой частоты на некотором экране интенсивность света в каких-то точках экрана становится больше суммы интенсивностей, а в других — меньше. При этом происходит перераспределение энергии света по направлениям. Общая энергия света на экране рана сумме энергий складываемых световых волн. Это явление называют интерференцией света.

Нам будет удобно понимать под интерференцией более широкий круг явлений. Под интерференцией мы будем понимать любое явление, когда интенсивность суммарной волны отличается от суммы интенсивностей суммируемых световых волн. При этом мы откажемся от требования, чтобы общая энергия света на всем экране не изменялась при сложении волн.

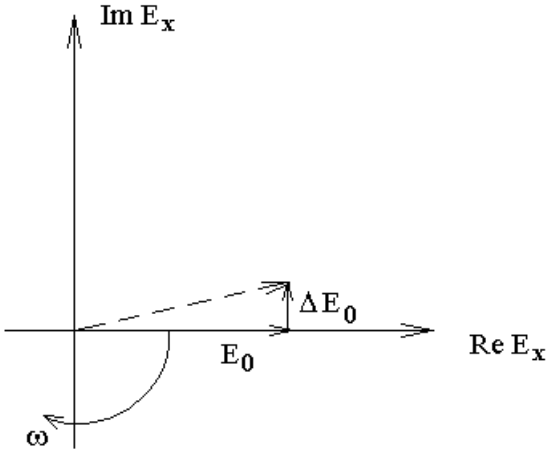
Рассмотрим поглощение света средой.

Свет проходит через среду и раскачивает электрические диполи в каждом атоме. Рассмотрим тонкий слой диполей, слой параллельный фронту световой волны. Тонкий слой диполей излучает свет в направлении проходящей световой волны и в зависимости от фазы излучения слоя диполей изменяется амплитуда и фаза проходящей световой волны.

Поглощение света — это результат интерференции света, проходящего мимо поглощающих атомов, и света, излученного диполями атомов. Если в результате интерференции получается излучение с меньшей амплитудой, то это и есть поглощение света.

Показатель преломления или замедление света в среде — это тоже результат интерференции света, проходящего мимо атомов, и света, излученного диполями атомов. Если в результате интерференции получается волна с отстающей фазой относительно волны проходящей мимо атомов, то свет распространяется с фазовой скоростью, которая меньше скорости света в вакууме.

На комплексной плоскости напряженности светового поля это выглядит следующим образом.



Здесь $\vec{E}_0$ — комплексная амплитуда падающей световой волны, $\Delta\vec{E}_0$ — амплитуда излучения слоя диполей. Пунктирный вектор — это комплексная амплитуда света после прохождения тонкого слоя среды. Комплексная амплитуда повернулась против вращения во времени комплексной напряженности светового поля. Это означает отставание по фазе световой волны после прохождения тонкого слоя среды от световой волны, которая распространялась бы в вакууме.

Такое описание поглощения света позволяет объяснить результат следующего эксперимента. С помощью ячейки Керра можно быстро переключить фазу светового поля на π. Рассмотрим свет, который проходит через ячейку с поглощающей свет средой, и на выходе из ячейки ослабляется в 4 раза. При этом амплитуда света уменьшается наполовину. Если на входе в ячейку быстро изменить фазу света на π, то на выходе из ячейки наблюдается короткий световой импульс увеличения интенсивности до 2.25 от падающей на ячейку интенсивности света. При этом амплитуда света увеличивается на ту же половину.

Импульс предвестник — поглощение света средой включается не сразу. При очень быстром включении света его передний фронт не поглощается, проходит среду без поглощения.

Факультативная вставка.

Рассмотрим некоторую картину взаимодействия света с веществом или, как говорят, формализм описания взаимодействия света с веществом, который будет простым, но не слишком верным. Это формализм скоростных или балансных уравнений.

Свет поглощается порциями по $h\nu$. Летят фотоны, и случайным образом некоторые атомы поглощают эти фотоны. Прошедшего света становится меньше, это и есть поглощение света. Переходов с нижнего уровня энергии атома на возбужденный уровень энергии столько же, сколько и поглощенных фотонов. Или, как говорят, скорость поглощения фотонов равна скорости переходов с нижнего уровня энергии на верхний уровень. Этот баланс энергий можно записать в виде соответствующих балансных или скоростных уравнений.

Если же среда прозрачна, то атом поглощает фотон и через некоторое время снова его излучает. В результате свет в прозрачной среде распространяется медленнее, чем в вакууме.

В этой физической картине мира все ясно и понятно, но есть явления, которые плохо с ней согласуются. В частности — это импульс предвестник и временное усиление света средой при быстром изменении фазы падающей световой волны на π.

Наше более точное описание взаимодействия света с веществом, в частности поглощения света, как результат интерференции, обычно называется полуклассическим приближением или полуклассическим формализмом. Среда при этом описывается с квантовых позиций (уравнениями квантовой механики), а световое поле описывается классически.

И, наконец, самое сложное, но и самое правильное описание взаимодействия света со средой подразумевает так называемое вторичное квантование — квантовое описание светового поля. В частности в этом случае оказывается, что амплитуда поля (или число фотонов в световом поле) и фаза светового поля удовлетворяют некоторым соотношениям неопределенности. Если точно известно число фотонов, то фаза поля абсолютно неопределенна, и наоборот. Оказывается можно сделать так, чтобы одна из двух неопределенностей была мала. Это так называемое сжатое состояние света.

Конец факультативной вставки.

Экзамен. Пленочный поляризатор или поляроид.

Типичные параметры поляроидной пленки: толщина меньше миллиметра, поглощение одной линейной поляризации 99.9% по энергии, поглощение второй линейной поляризации около 30%.

Осью поляроида называют направление вектора $\vec{E}$ прошедшей волны.

Изготовление поляроида:

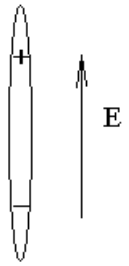
В прозрачный полимерный материал (целлулоид) добавляют вещество с оптическим дихроизмом (герапатит).

Дихроизм — различное поглощение света для двух ортогональных поляризаций.

Двулучепреломление — различные показатели преломления для двух ортогональных поляризаций.

Кристаллы герапатита имеют форму пластинок. Пластинки выстраивают в жидком целлулоиде внешним постоянным электрическим полем.

Применяются также иодно-поливиниловые плёнки. Полимерные молекулы выстраивают, вытягивая пленку в одном направлении.



Пусть на пленку падает линейно поляризованный свет, в котором вектор $\vec{E}$ направлен вдоль молекул полимера. Под действием электрического поля световой волны заряды внутри молекулы заметно смещаются вдоль вытянутой молекулы. Если же поляризация света перпендикулярна молекулам полимера, то заряды мало смещаются внутри каждой молекулы.

Когда свет сильно смещает заряды, в молекуле возникает большой наведенный светом осциллирующий на частоте света электрический дипольный момент.

Этот дипольный момент излучает, его излучение интерферирует с проходящим мимо светом. В результате интерференции уменьшается амплитуда прошедшего света. Это и есть поглощение света.

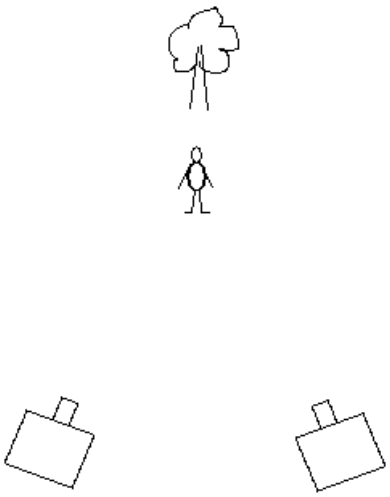
Если вектор E светового поля направлен вдоль вытянутых молекул полимера, то в среде раскачиваются диполи с большой амплитудой. Диполи излучают свет с большой амплитудой. В результате интерференции с проходящим светом излучаемый диполями свет сильно изменяет амплитуду волны. Свет сильно поглощается. Свет ортогональной поляризации поглощается слабо.

Ось поляроида — это направление вектора $\vec{E}$ прошедшего света. Ось поляроида направлена перпендикулярно направлению вытягивания полимерной пленки.

Экзамен. Поляроидные очки для стереокино.

Пусть мы собираемся фотографировать человека, стоящего перед деревом.

Сделаем снимок двумя фотоаппаратами одновременно из двух точек, разнесенных по горизонтали.



На снимке левого фотоаппарата человек будет справа, а дерево — слева. На втором снимке — наоборот.

Положим два снимка рядом и будем смотреть на них так, чтобы левым глазом видеть только снимок, снятый левым фотоаппаратом, а правым глазом — снимок снятый правым фотоаппаратом. Тогда, чтобы увидеть двумя глазами человека, глаза нужно будет свести ближе к переносице, а чтобы увидеть дерево, глаза нужно будет развести дальше от переносицы.

В результате человек будет казаться расположенным ближе, а дерево — дальше.

На этом принципе может быть создано стереоизображение на киноэкране.

Стереофильм (3D) снимают одновременно двумя разнесенными кинокамерами. Чтобы усилить стереоэффект расстояние между кинокамерами намеренно делают больше, чем расстояние между двумя глазами одного человека.

Изображение на экране кинотеатра формируют одновременно двумя проекторами. Свет от каждого проектора пропускают через поляроид. Оси поляроидов направлены ортогонально друг другу.

Зрители смотрят на экран через очки, стекла которых заменены точно такими же скрещенными поляроидами.

В результате каждый глаз видит изображение снятое соответствующей камерой, что и создает стереоэффект.

Экзамен. Циркулярно поляризованный свет или свет круговой поляризации.

Свет поляризован по кругу, если в каждой точке пространства вектор $\vec{E}$ вращается вокруг луча.

Факультативная вставка.

В разных учебниках по оптике один и тот же свет называют то светом левой, то светом правой круговой поляризации. Если для вас важно, какую из двух круговых поляризаций называть левой, то вы должны сами дать определение левой и правой круговой поляризации.

В учебнике Бутикова и в монографии Борна и Вольфа дано следующее определение света левой круговой поляризации. Если вы смотрите навстречу лучу и конец вектора $\vec{E}$ вращается налево, против часовой стрелки, то вы видите свет левой круговой поляризации.

Логика такого определения состоит в том, что если вы смотрите на вращающийся электрический диполь, то диполь, вращающийся налево, излучает в вашем направлении свет левой круговой поляризации.

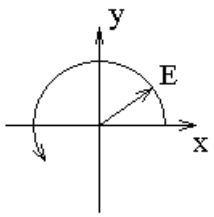
Заметим, что в таком случае направление вращения вектора $\vec{E}$ образует правый винт с направлением света. По этой причине в курсе теоретической физики Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица такой свет называют светом правой круговой поляризации.

Примем определение левой круговой поляризации в соответствии с учебником Бутикова и монографией Борна и Вольфа.

Конец факультативной вставки.

Рассмотрим свет, который распространяется вдоль оси z, тогда $\vec{k} \uparrow\uparrow \vec{e}_z$.

Пусть ось z направлена на нас. Для левой круговой поляризации вектор $\vec{E}$ вращается налево, против часовой стрелки.



Тогда в фиксированной пространственной точке электрическое поле имеет следующий вид:

$$\begin{cases} E_x = E_0 \cdot \cos(\omega t) \\ E_y = E_0 \cdot \sin(\omega t) = E_0 \cdot \cos\left(\omega t - \dfrac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad =>$$

Круговая поляризация — это сумма двух линейных поляризаций со сдвигом фаз $\dfrac{\pi}{2}$.

Тогда в комплексном представлении плоская световая волна левой круговой поляризации имеет вид:

$$\begin{cases} \tilde{E}_x = E_0 \cdot e^{i(kz-\omega t+\varphi_0)} \\ \tilde{E}_y = E_0 \cdot e^{i\left(kz-\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right)+\varphi_0\right)} \end{cases}, \text{ где } kz = \left(\vec{k},\vec{r}\right), \text{ так как } \vec{k} \uparrow\uparrow \vec{e}_z .$$

Объединим две комплексных проекции вектора $\vec{E}$ в один комплексный вектор и получим:

$$\tilde{\vec{E}} = \tilde{E}_x\vec{e}_x + \tilde{E}_y\vec{e}_y = E_0\vec{e}_x e^{i(kz-\omega t+\varphi_0)} + E_0\vec{e}_y e^{i\left(kz-\left(\omega t-\frac{\pi}{2}\right)+\varphi_0\right)} =$$

$$= E_0\vec{e}_x e^{i(kz-\omega t+\varphi_0)} + E_0\vec{e}_y e^{i\frac{\pi}{2}} e^{i(kz-\omega t+\varphi_0)} = E_0\left(\vec{e}_x + i\vec{e}_y\right)\cdot e^{i(kz-\omega t+\varphi_0)}.$$

Здесь удобно ввести единичный вектор круговой поляризации. Вектор $\left(\vec{e}_x + i\vec{e}_y\right)$ не вполне для этого подходит, так как его длина не равна единице.

Найдем длину вектора $\left(\vec{e}_x + i\vec{e}_y\right)$. Квадрат длины вектора равен скалярному произведению вектора самого на себя. Скалярное произведение двух произвольных комплексных векторов $\vec{A}$ и $\vec{B}$ выражается через комплексные проекции этих векторов следующим образом:

$$\left(\vec{A},\vec{B}\right) = A_x B_x^* + A_y B_y^* + A_z B_z^* .$$

Пусть в этом равенстве векторы $\vec{A}$ и $\vec{B}$ равны друг другу $\vec{A} = \vec{B} = \vec{e}_x + i\vec{e}_y$, тогда

$$\left|\vec{A}\right|^2 = \left(\vec{A},\vec{A}\right) = \left(\vec{e}_x + i\vec{e}_y,\ \vec{e}_x + i\vec{e}_y\right) = 1\cdot 1^* + i\cdot(i)^* = 1\cdot 1 + i\cdot(-i) = 2 .$$

Следовательно, длина вектора $\left(\vec{e}_x + i\vec{e}_y\right)$ равна $\sqrt{2}$. Разделим вектор на его длину и получим единичный вектор.

$$\begin{cases} \vec{e}_+ \equiv \dfrac{\vec{e}_x + i\vec{e}_y}{\sqrt{2}} \\ \vec{e}_- \equiv \dfrac{\vec{e}_x - i\vec{e}_y}{\sqrt{2}} \end{cases}$$ — единичные векторы левой и правой круговых поляризаций света, распространяющегося вдоль оси z.

Вернемся к рассмотрению плоской световой волны левой круговой поляризации:

$\tilde{\vec{E}} = E_0\left(\vec{e}_x + i\vec{e}_y\right)\cdot e^{i\left(kz-\omega t+\varphi_0\right)} = \sqrt{2}\cdot E_0\cdot\vec{e}_+\cdot e^{i\left(kz-\omega t+\varphi_0\right)}$, где E_0 — вещественная амплитуда каждой линейной поляризации.

Будем называть величину $\sqrt{2}E_0$ вещественной амплитудой волны круговой поляризации.

Переобозначим $\sqrt{2}E_0$ за новое E_0, тогда в новых обозначениях:

$\tilde{\vec{E}} = E_0\vec{e}_+ e^{i\left(kz-\omega t+\varphi_0\right)}$, где $\dfrac{E_0}{\sqrt{2}}$ — длина вращающегося вектора электрического поля и вещественная амплитуда каждой линейной поляризации, E_0 — вещественная амплитуда круговой поляризации.

Новые обозначения удобны тем, что выражение для интенсивности света $I = \dfrac{cn}{4\pi\mu}\left\langle E^2\right\rangle_t = \dfrac{cn}{8\pi\mu}E_0^2$ оказывается справедливым и для линейной и для круговой поляризации света.

<u>Экзамен. Эллиптическая поляризация света.</u>

Направим ось z вдоль луча, тогда $\vec{k}\uparrow\uparrow\vec{e}_z$.

Сложим две волны, линейно поляризованные вдоль осей x и y. Пусть разность фаз этих волн произвольна. Суммарную волну можно записать в виде:

$\tilde{\vec{E}} = E_0\vec{e}_p e^{i\left(kz-\omega\cdot t+\varphi_0\right)}$, где

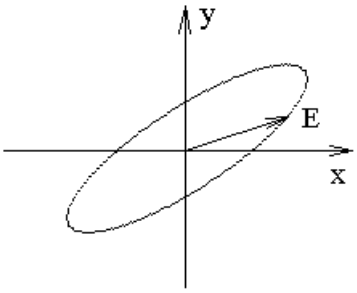
$\vec{e}_p$ — единичный комплексный вектор эллиптической поляризации.

$\vec{e}_p \perp \vec{k}\uparrow\uparrow\vec{e}_z$ <=> $\left(\vec{e}_p,\vec{e}_z\right)=0$

$\vec{e}_p = \dfrac{\tilde{a}\vec{e}_x + \tilde{b}\vec{e}_y}{\sqrt{\left|\tilde{a}\right|^2 + \left|\tilde{b}\right|^2}}$, где $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ — произвольные комплексные числа для произвольной эллиптической поляризации.

$\vec{e}_p$ — единичный вектор, что следует из равенства $\left(\vec{e}_p,\vec{e}_p\right)=1$, которое легко проверить, расписав скалярное произведение в декартовых координатах.

В эллиптически поляризованной волне конец вектора $\vec{E}$ двигается по эллипсу в плоскости перпендикулярной лучу.



Для каждой эллиптической поляризации $\vec{e}_{p1}$ существует ортогональная к ней поляризация $\vec{e}_{p2}$:

$$\left(\vec{e}_{p1},\vec{e}_{p2}\right)=0.$$

Любую монохроматическую волну, направленную вдоль оси z, можно представить, как суперпозицию двух линейных поляризаций $\vec{e}_x$ и $\vec{e}_y$, как суперпозицию двух круговых поляризаций $\vec{e}_+$ и $\vec{e}_-$ или двух эллиптических поляризаций $\vec{e}_{p1}$ и $\vec{e}_{p2}$.

Для света эллиптической поляризации выполняется тоже соотношение между интенсивностью света и амплитудой волны $I=\frac{cn}{4\pi\mu}\left\langle E^2\right\rangle_t=\frac{cn}{8\pi\mu}E_0^2$, что и для света линейной и круговой поляризации.

Неполяризованный или как говорят естественный свет — это обязательно не совсем монохроматический свет. Неполяризованный свет — это свет эллиптически поляризованный, но параметры эллипса случайным образом медленно изменяются во времени. Характерное время изменения параметров эллипса поляризации равно $\frac{1}{\Delta\omega}$, где $\Delta\omega$ — ширина спектра источника света. Пример неполяризованного света — солнечный свет. Для солнечного света $\Delta\omega\approx\omega$.

<u>Экзамен. Стоячие световые волны.</u>

При нормальном падении света на зеркало свет отражается обратно.

Две встречные волны одинаковой амплитуды образуют стоячую волну.

Рассмотрим встречные волны, направленные вдоль оси z. Пусть волны линейно поляризованы вдоль оси x. Запишем встречные волны в вещественном представлении:

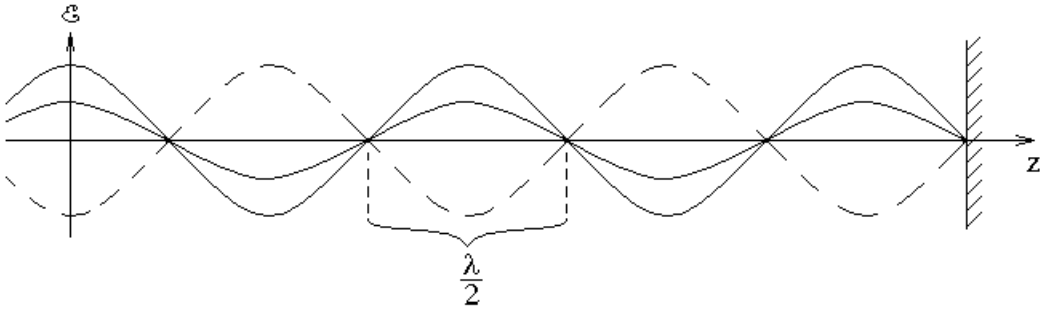
$$E_x(t,z)=E_0\cos(kz-\omega t)+E_0\cos(-kz-\omega t).$$

Второе слагаемое описывает встречную волну, так как в нем z заменено на (-z). Следовательно, если первая волна распространяется вдоль оси z, то вторая волна — вдоль оси (-z).

Преобразуем сумму косинусов в произведение согласно формуле $\cos(\alpha)+\cos(\beta)=2\cdot\cos\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right)\cdot\cos\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right)$ и получим

$$E_x(t,z)=E_0\cos(kz-\omega t)+E_0\cos(-kz-\omega t)=2E_0\cos(kz)\cdot\cos(\omega t)$$

Построив эту функцию от z в разные моменты времени t, мы увидим, что в некоторых точках $\cos(kz)=0$ суммарная волна остается равной нулю в любой момент времени. Эти точки называются узлами стоячей волны. Они расположены на расстоянии $\frac{\lambda}{2}$ друг от друга.



Посередине между узлами стоячей волны колебания суммарной волны максимальны. Эти точки называются пучностями стоячей волны.

Оказывается, что в узлах поля $\vec{E}$ находятся пучности поля $\vec{B}$ и наоборот. Дело в том, что если в некоторой точке электрические поля встречных волн синфазны и усиливают друг друга, то магнитные поля противофазны. И действительно. Векторы $\vec{E},\vec{B},\vec{k}$ образуют правую тройку взаимно ортогональных векторов. Если один из тройки векторов $\vec{E}$ направления не меняет, а второй $\vec{k}$ — меняет на противоположное (для встречной волны), то третий вектор $\vec{B}$ тоже обязан изменить знак для правой тройки векторов. Значит, если в некоторой точке в некоторый момент времени векторы $\vec{E}$ встречных волн синфазны и образуют пучность поля $\vec{E}$, то в этой точке в этот же момент векторы $\vec{B}$ противофазны и образуют узел поля $\vec{B}$.