

Тема 3. Электромагнитные волны в веществе.

П.1. ЭМВ в веществе

П.2. Дисперсия.

П.3. ЭМВ в проводящем веществе

П.4. Дисперсия и затухание ЭМВ в диэлектрике

П.5. Поляризация

П.1. ЭМВ в веществе

Проблема: Возможна ли ЭМВ в веществе?

Знаем: В веществе есть атомы, молекулы, ионы, электроны, протоны и т.д. Многие из них имеют электрический заряд. Заряды в веществе могут быть свободными (как электроны проводимости в металле) и связанными (электроны в атомах).

Если есть электромагнитное поле, на заряд действует сила Лоренца

$$\vec{F} = q(\vec{E} + [\vec{V}, \vec{B}]).$$

Свойства вещества, взаимодействующего с электрическим полем, характеризуются диэлектрической проницаемостью ϵ , а с магнитным полем - магнитной проницаемостью μ .

Уравнения Максвелла учитывают эти характеристики.

Законы индукции $\mathcal{E}_{0E} = - \frac{d}{dt} \Phi_B, \quad \mathcal{C}_{0B} = \mu_0 \epsilon_0 \mu \epsilon \frac{d}{dt} \Phi_E.$

Закон Гаусса для электрического поля $\Phi_{0E} = \frac{q_{\text{сум}}}{\epsilon_0} = \frac{q_{\text{стор}}}{\epsilon \epsilon_0}.$

Закон Гаусса для МП всегда одинаков: $\Phi_{0B} = 0.$

Решим представленную выше систему уравнений Максвелла в веществе так же, как мы решали ее в свободном пространстве.

Результат: в веществе может распространяться ЭМВ со скоростью

$$V_B = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \mu \epsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\mu \epsilon}}.$$

Вводим новую характеристику вещества $\sqrt{\mu \epsilon} \equiv n$, которую будем называть *коэффициент (показатель) преломления вещества*.

Тогда $V_B = \frac{c}{n}$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ: *показатель преломления* n есть характеристика вещества, показывающая во сколько раз скорость ЭМВ в веществе меньше, чем скорость ЭМВ в вакууме (чем скорость света).

Волна поперечна $\vec{E} \perp \vec{V}$, $\vec{B} \perp \vec{V}$, $\vec{E} \perp \vec{B}$.

Волна не затухает, если проводимость вещества равна 0.

Распространение энергии в волне описывается специальной характеристикой - вектором плотности потока энергии, который называется вектором Умова-Пойнтинга: $\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}]$.

Еще одна важная характеристика - объемная плотность энергии электромагнитного поля:

$$w = \frac{\vec{E}\vec{D}}{2} + \frac{\vec{H}\vec{B}}{2}.$$

П.2. Дисперсия.

Проблема: Как взаимодействуют с ЭМВ связанные заряды вещества?

Решение: взаимодействие зависит от частоты ЭМВ, что проявляется в зависимости μ и ϵ от частоты.

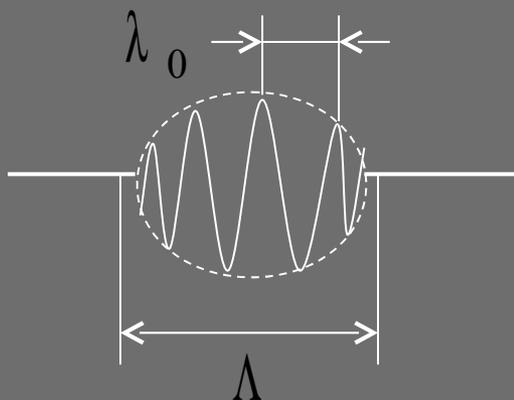
Но они же определяют и скорость волны в веществе.

Дисперсия это явление, связанное с разной скоростью распространения волн, имеющих разные частоты (длины волн).

ЗАМЕЧАНИЕ: Для одной гармонической волны бессмысленно говорить о дисперсии.

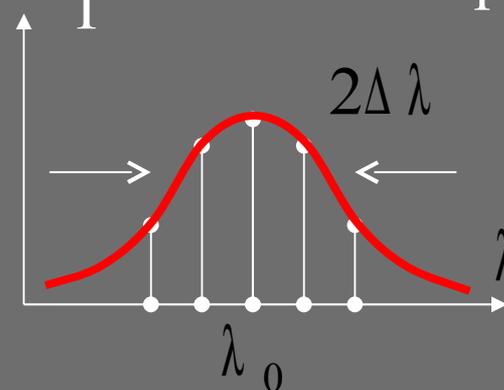
Совокупность гармонических волн с близкими длинами называется группой волн или волновым пакетом.

При сложении они дают импульс. Реальная волна – всегда импульс.



импульс, волновой пакет,
группа волн

спектральная
характеристика

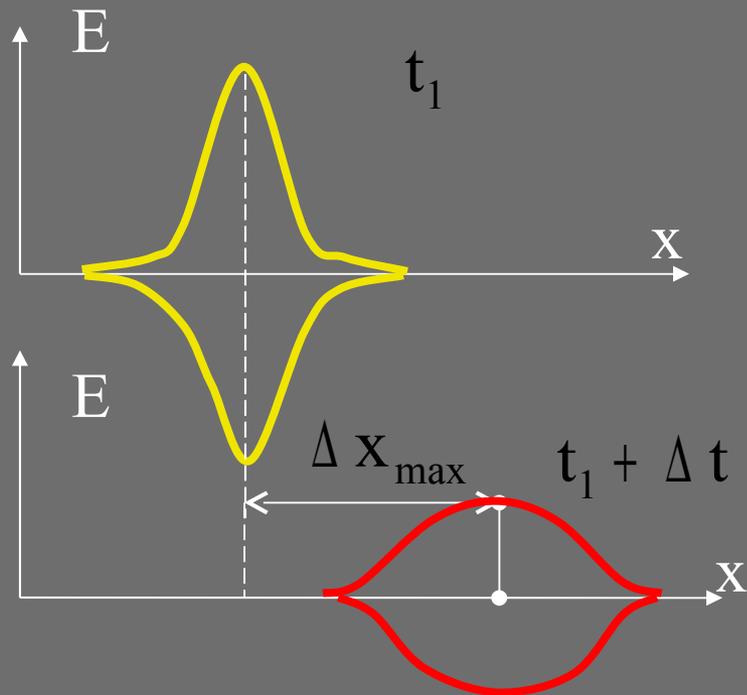


Здесь I – интенсивность
гармоники с данной λ .

$$\Delta\lambda = \frac{\text{const}}{\Lambda}$$

Ширина спектральной характеристики обратно пропорциональна длине пакета в пространстве.

При распространении волны в веществе форма огибающей импульса меняется: как правило импульс «расплывается».



$$V_{\text{гр}} = \frac{\Delta x_{\max}}{\Delta t}$$

Групповая скорость есть скорость перемещения энергии волны, а также характерной точки (например, максимума) на огибающей волнового пакета.

$$V_{\text{гр}} = \frac{d\omega}{dk} = V_{\text{ф}} - \lambda \frac{dV_{\text{ф}}}{d\lambda}.$$

Она отличается от фазовой!

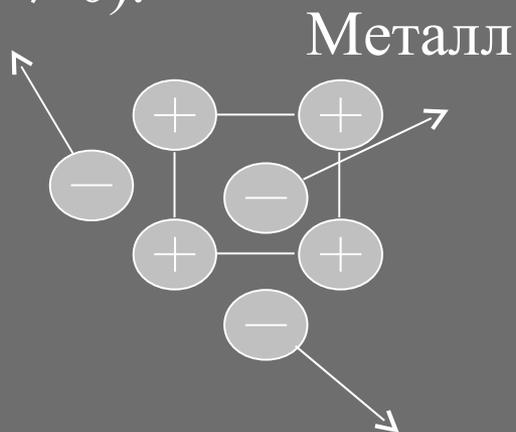
Дисперсия для группы волн проявляется в изменении формы огибающей, т.е. формы импульса.

Различают нормальную дисперсию, когда $V_{\text{ГР}} < V_{\text{Ф}}$ и аномальную дисперсию, когда $V_{\text{ГР}} > V_{\text{Ф}}$.

П.3. ЭМВ в проводящем веществе

Проблема: Как распространяется ЭМВ в проводящем веществе.

В таком веществе есть связанные и свободные заряды ($\rho_{\text{сво}} \neq 0$ и $\sigma \neq 0$).



Ионы неподвижны.

Электроны проводимости свободны.

Электроны проводимости наиболее хорошо взаимодействуют с электрическим и магнитным полями. Причем, наиболее интенсивно – с электрическим.

Вопрос: К чему приводит взаимодействие свободных электронов с ЭМП волны? Решаем эту задачу для одного свободного электрона.

Основной закон - второй закон Ньютона, в который подставляем формулу для электрической силы. Получаем

$$m_{\text{эл}} \vec{a} = q_{\text{эл}} \vec{E}, \quad \text{отсюда} \quad \vec{a} = \frac{q_{\text{эл}}}{m_{\text{эл}}} \vec{E}.$$

В гармонической волне $\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kx)$.

Ускорение $\vec{a}(t) = \frac{q_{\text{эл}}}{m_{\text{эл}}} \vec{E}_0 \cos(\omega t + \varphi_{0a})$

и скорость $\vec{V}(t) = \frac{q_{\text{эл}}}{m_{\text{эл}} \omega} \vec{E}_0 \sin(\omega t + \varphi_{0V})$.

Возникает упорядоченное гармоническое движение электронов, которому соответствует определенная плотность электрического тока:

$$\vec{j} = q_{\text{ЭЛ}} n \vec{V} = \vec{j}_0 \sin(\omega t + \varphi_{0V}).$$

Для амплитуды плотности тока

$$\vec{j}_0 = \frac{q_{\text{ЭЛ}}^2 n}{m_{\text{ЭЛ}} \omega} \vec{E}_0 = \sigma \vec{E}_0.$$

Закон Ома в локальной форме $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ выполняется для амплитуд, но не выполняется для мгновенных значений.

Фаза тока отличается от фазы напряженности поля.

С помощью комплексных чисел мы учитываем разность фаз.

ТЕСТ

Пусть $\hat{\mathbf{E}} = \vec{\mathbf{E}}_0 e^{i(\omega t + \hat{\mathbf{k}}x)}$. Тогда закон Ома $\hat{\mathbf{j}} = \hat{\sigma} \hat{\mathbf{E}}$.

Здесь $\hat{\mathbf{k}} = \beta - i\alpha$ - комплексное волновое число,

α - коэффициент затухания,

β - волновое число, равное $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Характеристика электрических свойств среды (проводимость и диэлектрическая проницаемость) также становятся комплексными.

Формула связи комплексной диэлектрической проницаемости и проводимости выглядит так:

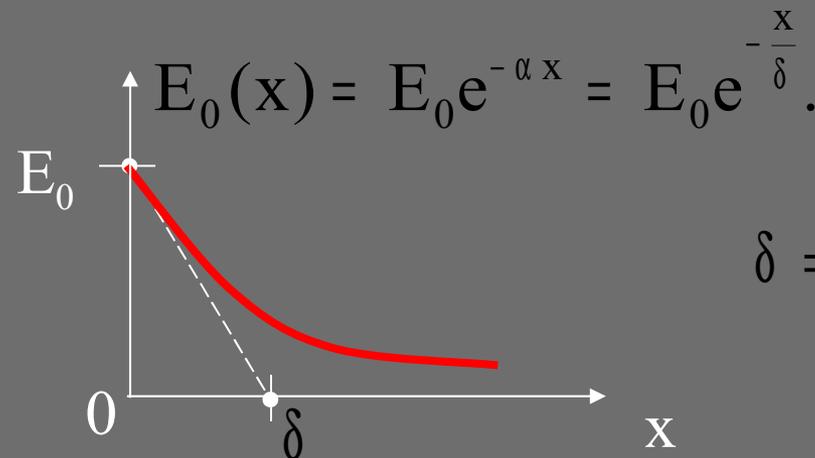
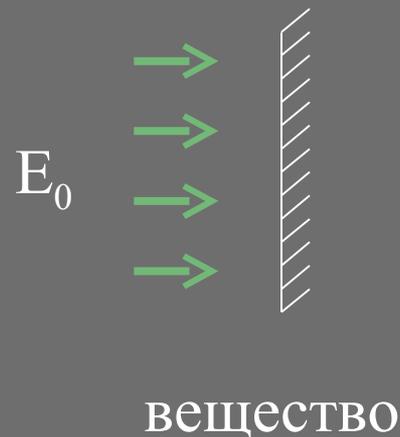
$$\hat{\epsilon} = 1 - i \frac{\hat{\sigma}}{\omega}.$$

ЗАМЕЧАНИЕ:

1. Магнитная проницаемость как правило $\mu \approx 1$.
2. Действительная часть диэлектрической проницаемости определяется мнимой частью проводимости:

$$\operatorname{Re}(\hat{\epsilon}) = 1 - \frac{1}{\omega} \operatorname{Im}(\hat{\sigma}).$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ: *Скин-слой это область на границе проводника, внутри которой амплитуда ЭМВ убывает в e раз.*



$$\delta = \frac{1}{\alpha}.$$

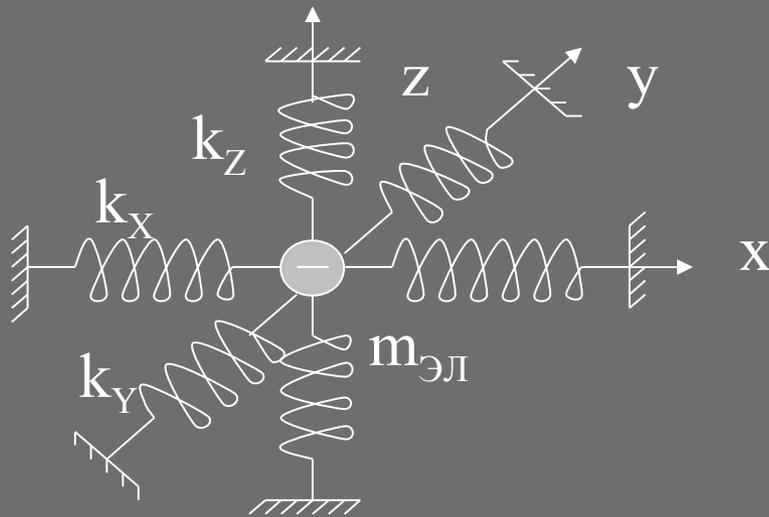
Электрическое поле волны, распространяющейся внутри проводящего вещества

$$\hat{\vec{E}}_{\text{внутри}} = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - \hat{k}x)},$$

затухает в e раз на длине δ .

П.4. Дисперсия и затухание ЭМВ в диэлектрике

В диэлектрике с электрическим полем волны взаимодействуют связанные электроны.



Трехмерный
гармонический
осциллятор

В общем случае $k_x \neq k_y \neq k_z$.

В изотропной среде

$$k_x = k_y = k_z = k.$$

Частота собственных колебаний осциллятора $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$.

В среде, где много таких осцилляторов (в диэлектрике), распространение волны также будет описываться комплексным волновым вектором $\hat{k} = \beta - i\alpha$.

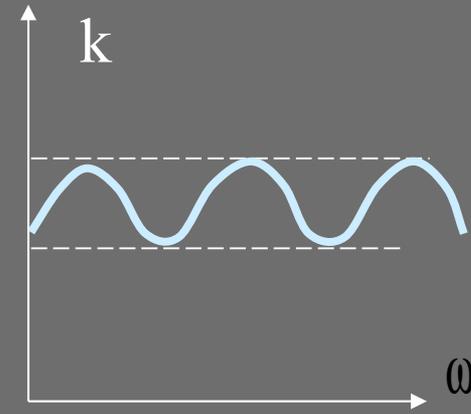
Электрическое поле ЭМВ внутри вещества

$$\hat{E}(x, t) = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - \hat{k}x)} = \vec{E}_0 e^{-\alpha x} e^{i(\omega t - \beta x)}.$$

В диэлектрике коэффициент затухания α как правило, очень мал, и первую экспоненту можно считать $= 1$, а $k = \beta$.

Расчеты показывают, что волновое число k и, следовательно, длина волны λ будут сильно зависеть от частоты ЭМВ (ω).

В диэлектрике также будет наблюдаться дисперсия ЭМВ.



СРС: Законспектировать – 1 стр. Законы преломления для взаимодействия ЭМВ с границей диэлектрика (известные из элементарной физики), а также *явление полного внутреннего отражения*.

ТЕСТ

П.5. Поляризация

Молекулы некоторых веществ имеют такую структуру, что они реагируют на расположение вектора напряженности электрического поля ЭМВ.

Задача: Необходимо учесть положение вектора волны с помощью некоторой физической характеристики.

Поляризацией называется характеристика электромагнитной волны, указывающая положение плоскости, в которой расположены вектор напряженности электрического поля и направление распространения волны.

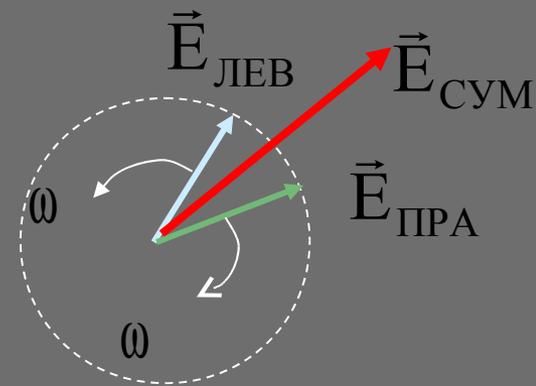
ТЕСТ

Плоскость, в которой расположены вектор напряженности электрического поля волны и направление распространения, называется плоскостью поляризации.

Плоскополяризованной называется волна, у которой плоскость поляризации неподвижна.

Циркулярно поляризованной называется волна, у которой плоскость поляризации вращается с постоянной угловой скоростью.

ТЕОРЕМА: Любую плоскополяризованную волну можно представить в виде суперпозиции двух когерентных циркулярно поляризованных волн, в которых плоскости поляризации вращаются в разные стороны, но с одной и той же угловой скоростью, равной циклической частоте волны.

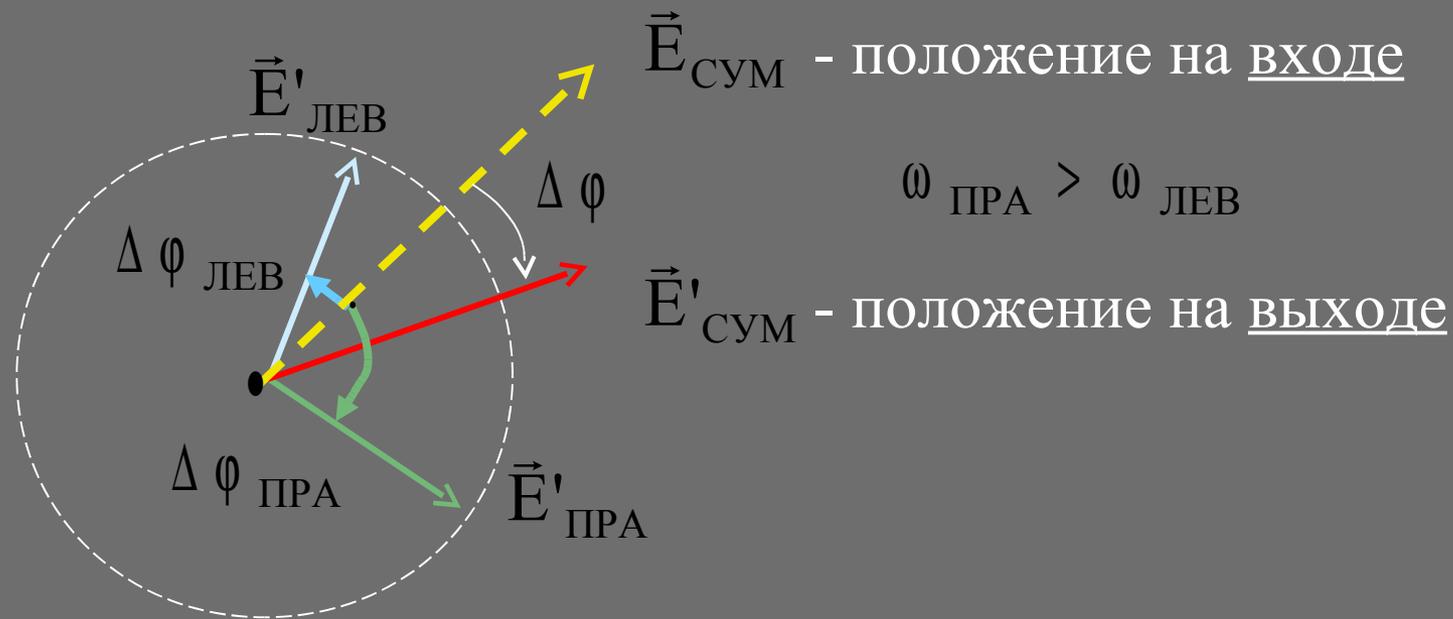


Оптически активными называются вещества, в которых происходит поворот плоскости поляризации ЭМВ, распространяющейся в них .

Молекулы оптически активного вещества (ОАВ) имеют большую длину и свернуты в спираль.

Электроны такой молекулы могут двигаться вдоль спирали и их взаимодействие с электрическим полем волны будет зависеть от направления вращения плоскости поляризации циркулярно поляризованной волны.

Скорости распространения левополяризованной $V_{\text{ЛЕВ}}$ и правополяризованной $V_{\text{ПРА}}$ волн будут разными. Изменение фазы у каждой волны будет свое.



Вектор напряженности суммарного поля повернулся по часовой стрелке на угол $\Delta\varphi$, пропорциональный длине пути L , который волна проходит в веществе.

Точная формула $\Delta\varphi = CL$, где *коэффициент пропорциональности* C называется постоянной вращения плоскости поляризации.

Естественное вращение плоскости поляризации наблюдается в растворах некоторых веществ, например, сахара.

Для раствора характеристикой является концентрация n , равная отношению массы вещества m_v к массе (или объему) растворителя m_r . В этом случае закон поворота ПП будет выглядеть так $\Delta\varphi = cnL$.

Новая константа «с» называется удельным вращением плоскости поляризации.

ТЕСТ

Магнитное вращение плоскости поляризации.

Похожее явление наблюдается и для оптически неактивных веществ, если их поместить во внешнее магнитное поле с индукцией B , направленной вдоль направления распространения волны.

Также появляется разность скоростей распространения лево- и право- поляризованных волн и поворот плоскости поляризации суммарной волны на выходе из вещества. Выполняется и похожий закон поворота (магнитного) ПП:

$$\Delta\varphi = VLB.$$

Константа V получила название постоянной Верде.

ТЕСТ

Замечание 1. Естественный свет, который нас окружает, является неполяризованным, т.к. у естественного света плоскость поляризации хаотически меняет свое положение.

Замечание 2. Поляризатором называется образец вещества, при прохождении через который естественный свет становится плоскополяризованным.

(СРС 1/2 стр. Описание физических процессов, приводящих к подобному эффекту. Определение угла Брюстера).

ТЕСТ

Замечание 3. Если плоскополяризованную волну пропустить через поляризатор, то интенсивность I волны на выходе из него будет зависеть от угла γ между плоскостями волны и поляризатора:

$$I = k_e I_0 \cos^2(\gamma) \quad \text{— закон Малюса.}$$

(k_e — коэффициент прозрачности поляризатора,
 I_0 — интенсивность волны на входе в
поляризатор) .