

The background of the image is a spiral-bound notebook with a light beige, textured cover. The metal spiral binding is visible on the left side. The text is written in a bold, green, serif font with a slight drop shadow.

Физика колебаний и волн. Квантовая физика.

Лекция № 3

- 1. Электромагнитные волны и их характеристики.*
- 2. Энергия, поток энергии в электромагнитной волне.*
- 3. Поляризация. Скорость электромагнитных волн. Дисперсия.*

Электромагнитные волны

Возможность существования электромагнитных волн предсказывал еще Майкл Фарадей в 1832 г., обобщая известные к тому времени данные по изучению электричества и магнетизма.

Теоретически обосновал это предположение Дж. Максвелл. С этим обоснованием мы познакомились в прошлом семестре.



Максвелл Джеймс Клерк
(1831 – 1879) – **английский физик**, член Эдинбургского (1855) и Лондонского (1861) королевских обществ с 1871 г.

Работы посвящены электро-динамике, молекулярной физике, общей статистике, оптике, механике, теории упругости.

Самым большим научным достижением Максвелла является

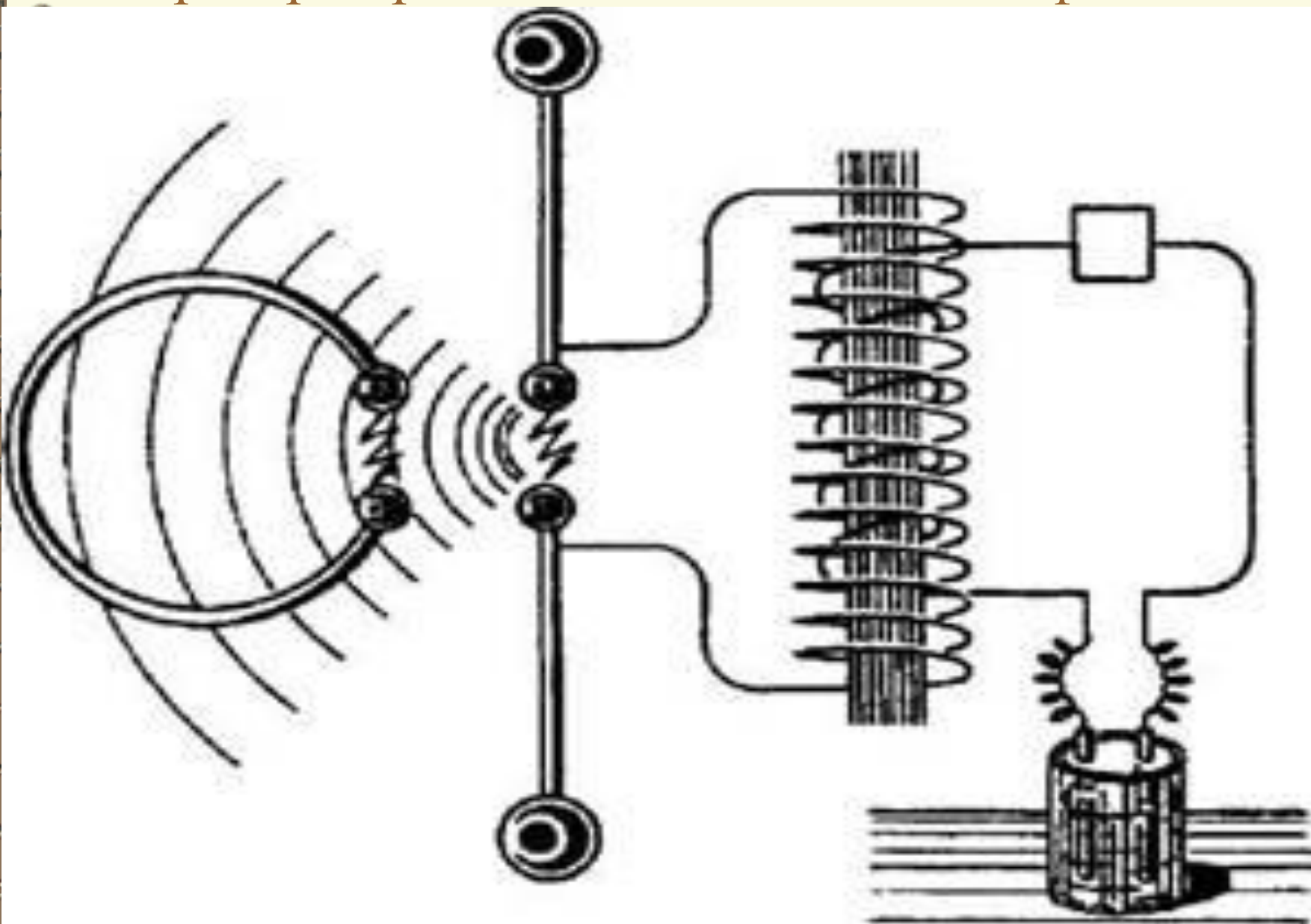
созданная им в 1860 – 1865 **теория электромагнитного поля**, которую он сформулировал в виде системы нескольких уравнений (**уравнения Максвелла**), выражающих все основные закономерности электромагнитных явлений.



Герц Генрих Рудольф (1857 – 1894) – **немецкий физик**. Окончил Берлинский университет (1880 г.) и был ассистентом у Г. Гельмгольца. В 1885 – 89 гг. – профессор Высшей технической школы в Карлсруэ. Основные работы относятся к электродинамике, одним из основоположников которой он является, и механике.

В 1888г. экспериментально **доказал существование электромагнитных волн**, распространяющихся в свободном пространстве, предсказанных теорией Максвелла. Экспериментируя с электромагнитными волнами, наблюдал их отражение, преломление, интерференцию, поляризацию. Установил, что скорость распространения электромагнитных волн равна скорости света. В 1887 наблюдал внешний фотоэффект. Исследования Герца посвящены также катодным лучам, теории удара упругих тел и т. п.

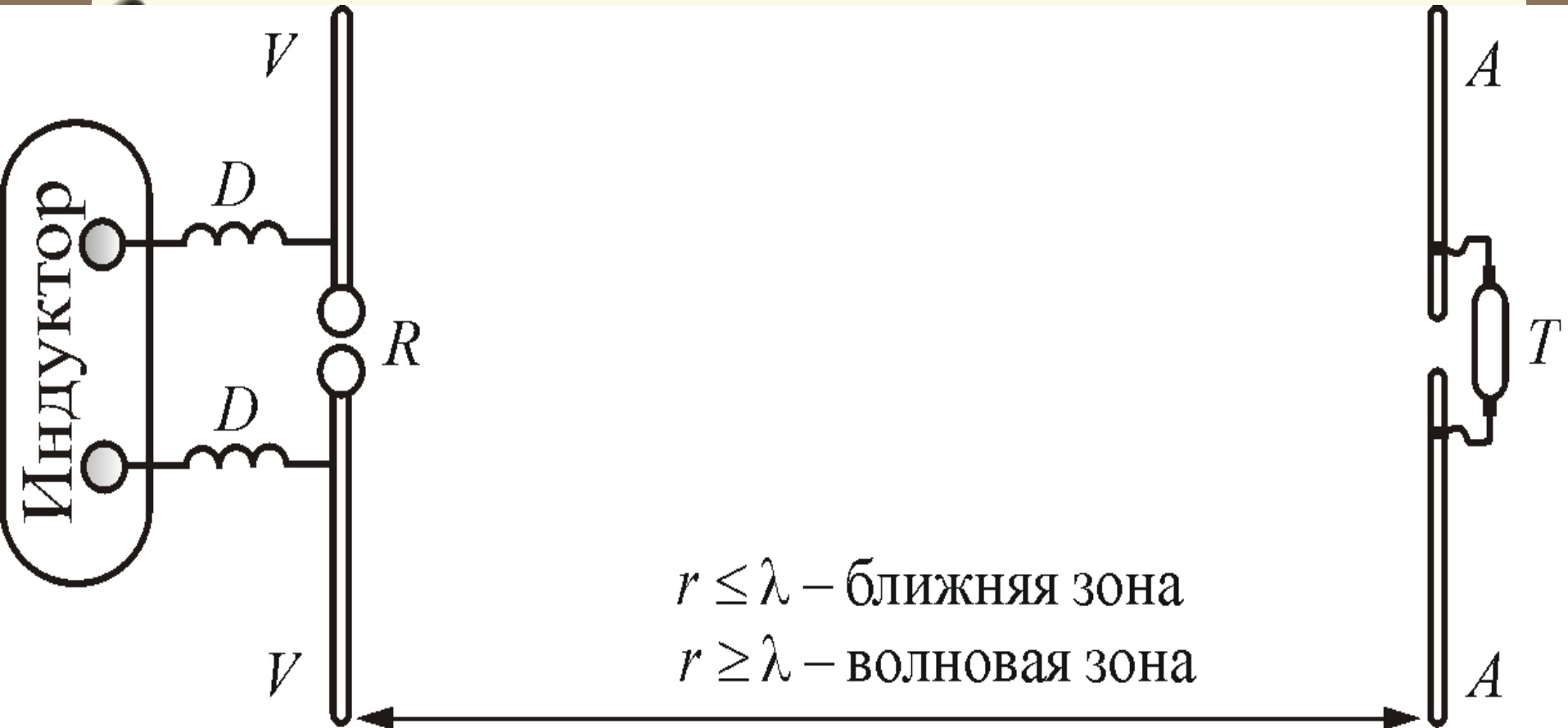
Вибратор Герца имел несколько модификаций.





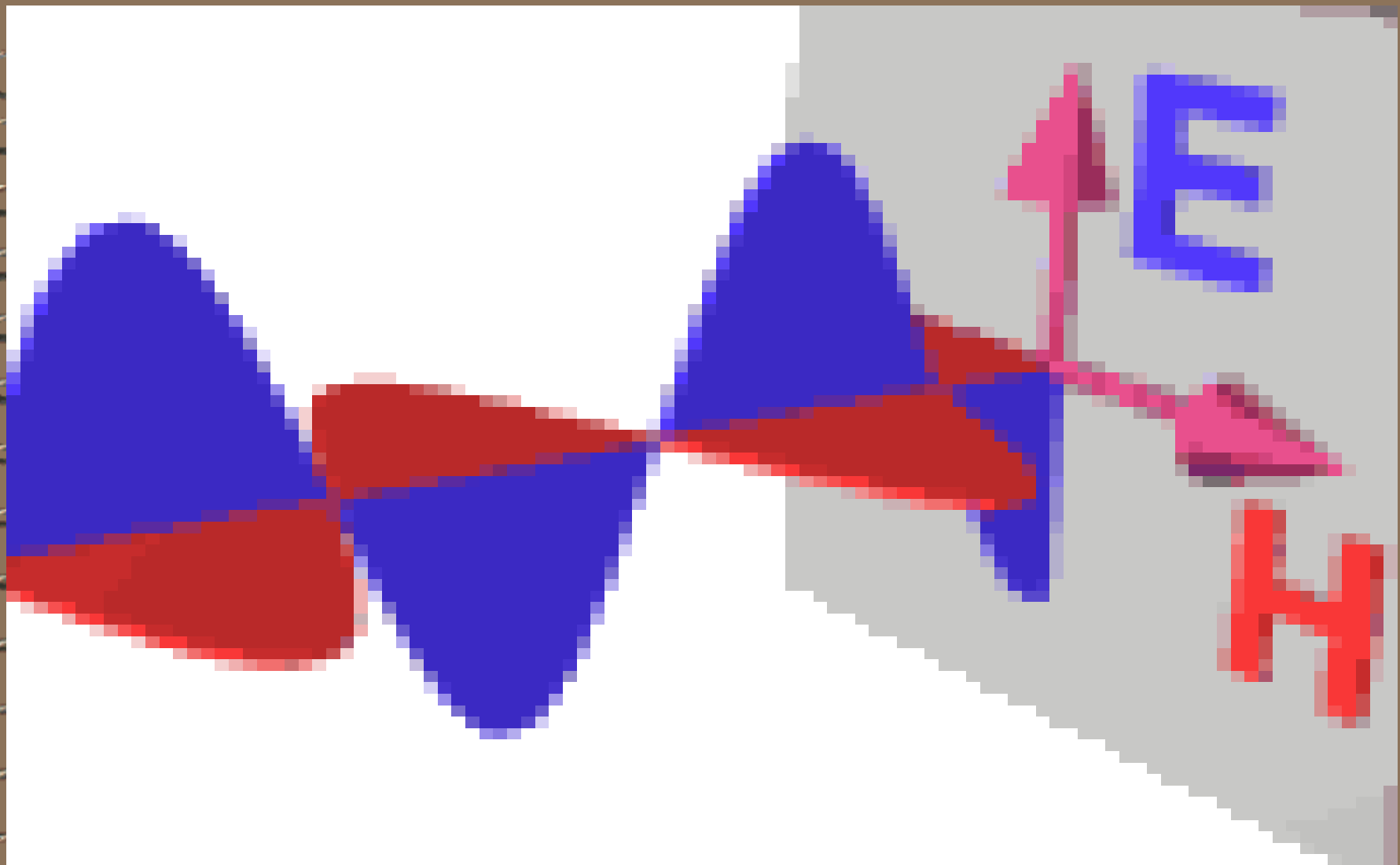
Вибратор Герца

и приемник.



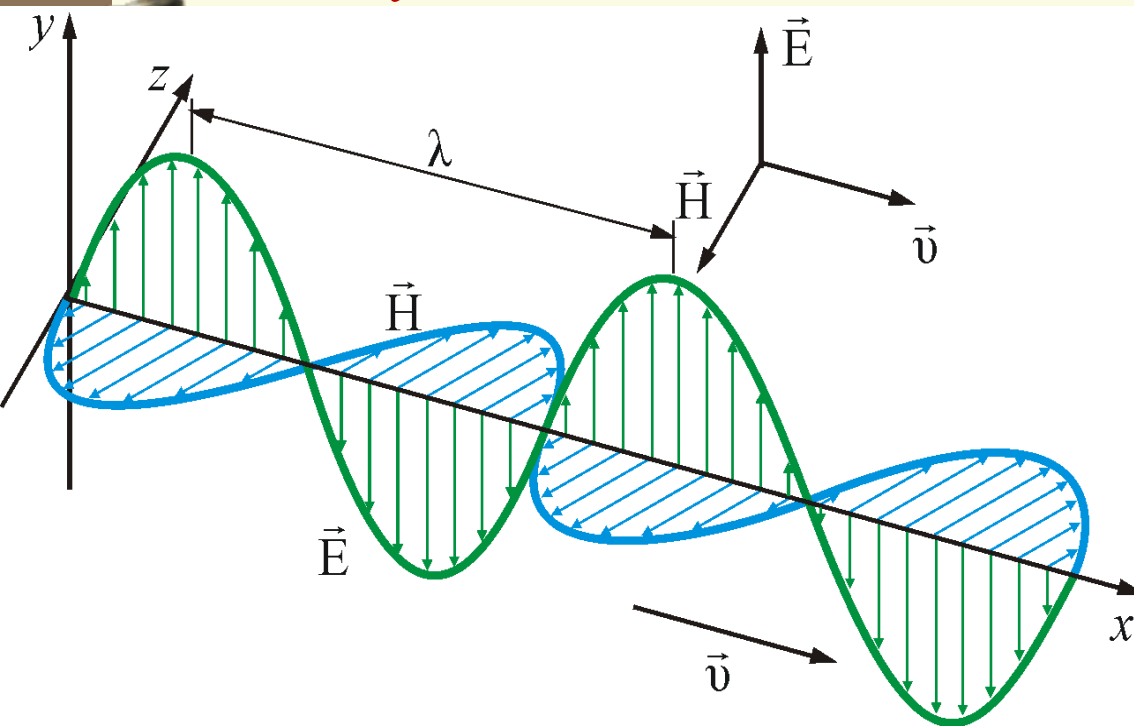
Вибратор

Резонатор



Электромагнитные волны распространяются в пространстве, удаляясь от вибратора во все стороны.

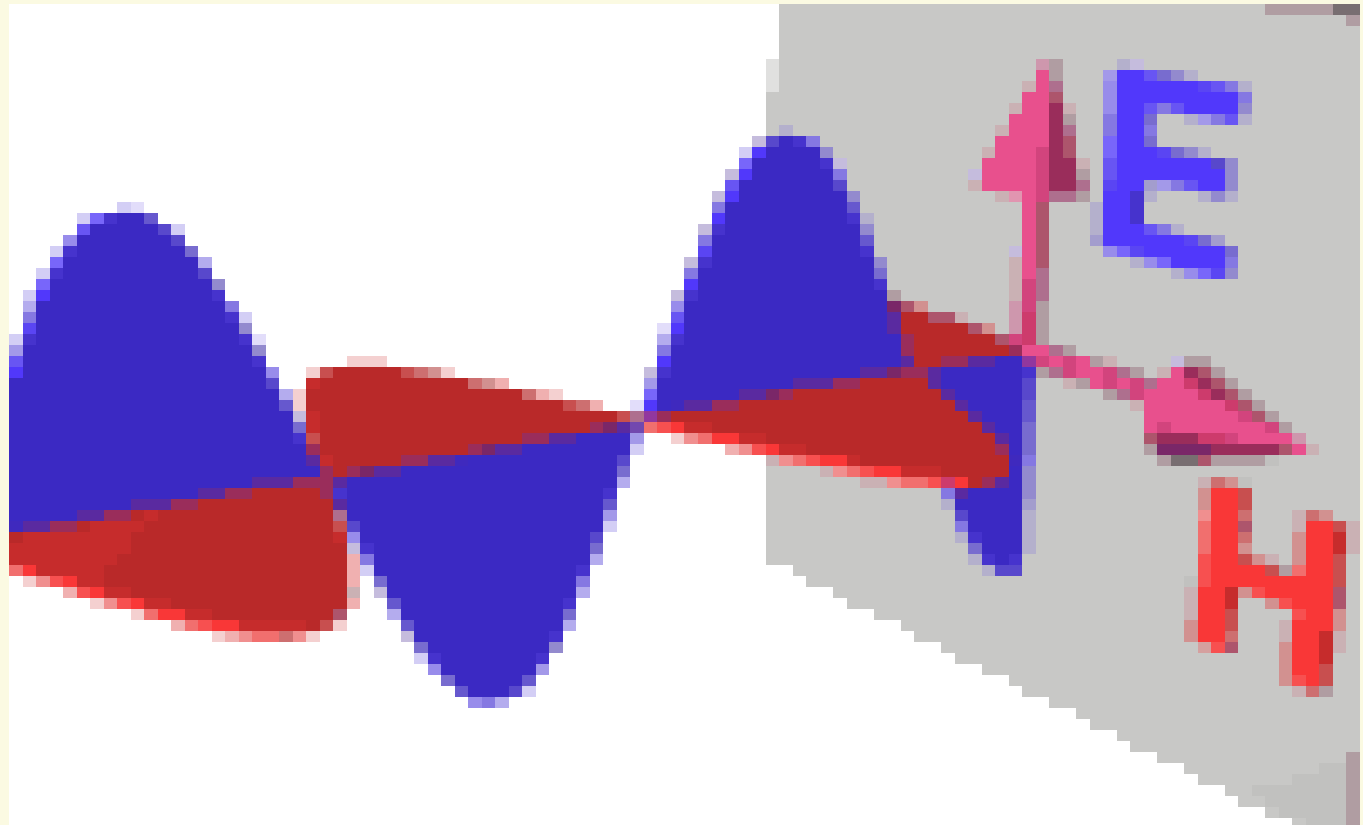
1. В любой точке **векторы напряженности электрического и магнитного полей взаимно перпендикулярны и перпендикулярны направлению распространения \vec{v}** , т.е. образуют **правовинтовую систему**: $\vec{E} \rightarrow \vec{H} \rightarrow \vec{v}$



2. **Поля изменяют свое направление в пространстве:** в одних точках вектор \vec{H} направлен к плоскости страницы, в других — от нее; аналогично ведет себя и вектор \vec{E} .

3. **Электрическое и магнитное поля находятся в фазе**, т.е. они достигают максимума и обращаются в нуль в одних и тех же точках.

- Движущийся с ускорением электрический заряд испускает электромагнитные волны.
- ЭМВ представляют собой поперечные волны и аналогичны другим типам волн.
- Однако *в ЭМВ происходят колебания полей, а не вещества*, как в случае волн на воде или в натянутом шнуре.



Волновое уравнение ЭМВ

Векторы напряженности \vec{E} и \vec{H} электромагнитного поля удовлетворяют **векторным волновым уравнениям**:

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{v^2} \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2} = 0$$

Решение уравнений (плоск. волн):

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \frac{1}{v^2} \frac{d^2 \vec{H}}{dt^2} = 0$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

где \vec{E}_0 и \vec{H}_0 - амплитуды; φ_0 - начальная фаза колебаний;
 ω - круговая частота; $k = \frac{\omega}{v}$ - волновое число.

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad - \text{оператор Лапласа}$$

**Фазовая скорость
электромагнитных
волн:**

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

где $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ – **скорость света в вакууме**

$$\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$$

$$\mu_0 = 1,256637061 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$$

находим

$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cong 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

В веществе скорость распространения электромагнитных волн меньше в $n = \sqrt{\epsilon \mu}$ раз, где n – **показатель преломления** среды.

Скорость распространения электромагнитных волн в среде **зависит от ее электрической и магнитной проницаемостей.**

$n = \sqrt{\epsilon\mu}$ - **абсолютный показатель преломления.**

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{c}{n} \quad \text{и} \quad n = \frac{c}{v}$$

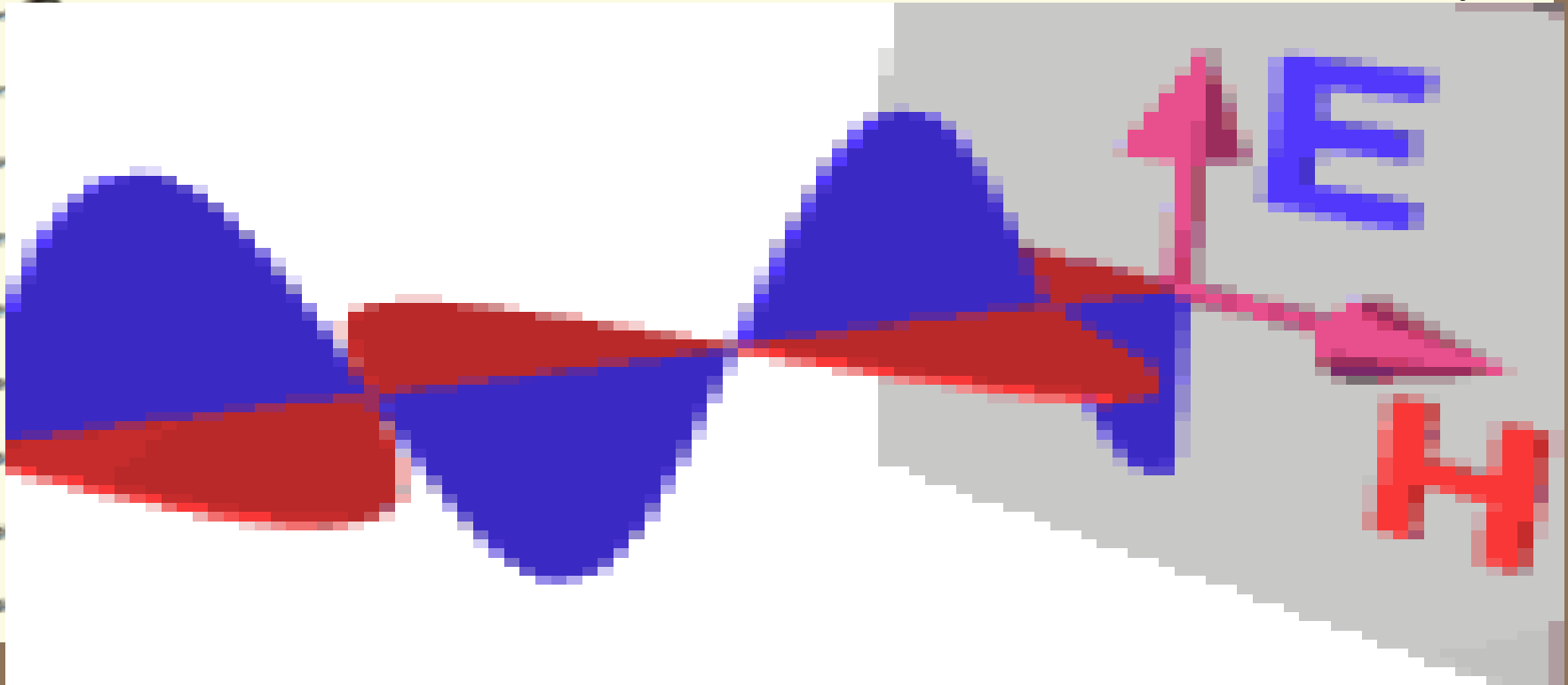
Следовательно, **показатель преломления** есть **физическая величина, равная отношению скорости электромагнитных волн в вакууме к их скорости в среде.**

Строго *монохроматическая* волна представляет собой бесконечную во времени и пространстве последовательность «горбов» и «впадин» с одной частотой ω .

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

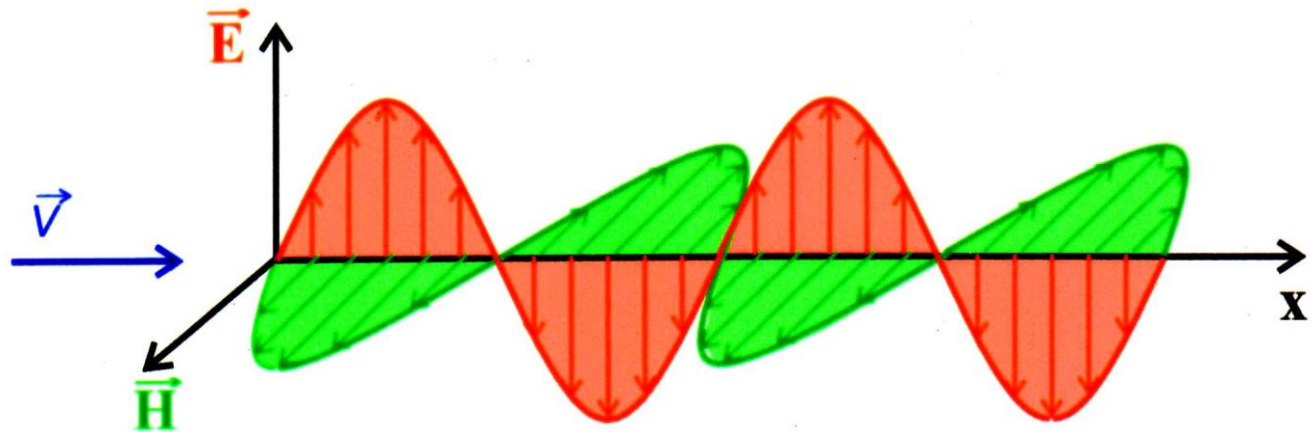
$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

Фазовая скорость этой волны $v = \lambda \nu$ или $v = \frac{\omega}{k}$



Соотношение между E и H в ЭМВ.

"Моментальная фотография" плоской волны



Колебания векторов \vec{E} и \vec{H} происходят с одинаковой фазой, векторы \vec{E} и \vec{H} связаны количественным соотношением

$$\sqrt{\epsilon\epsilon_0}E_y = \sqrt{\mu\mu_0}H_z$$

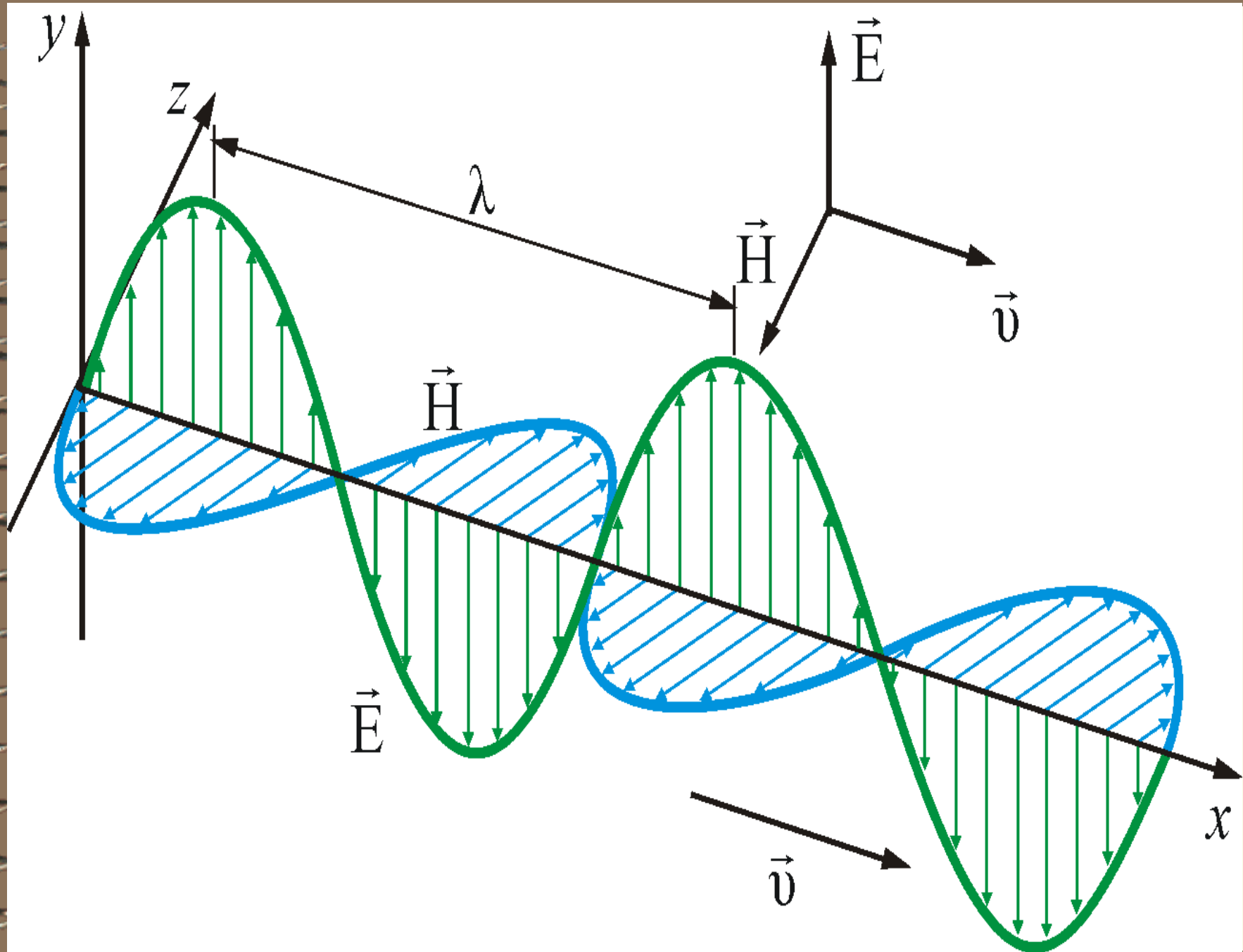
$$\sqrt{\epsilon\epsilon_0}E_0 = \sqrt{\mu\mu_0}H_0.$$

Дисперсия – это зависимость фазовой скорости в среде от частоты.

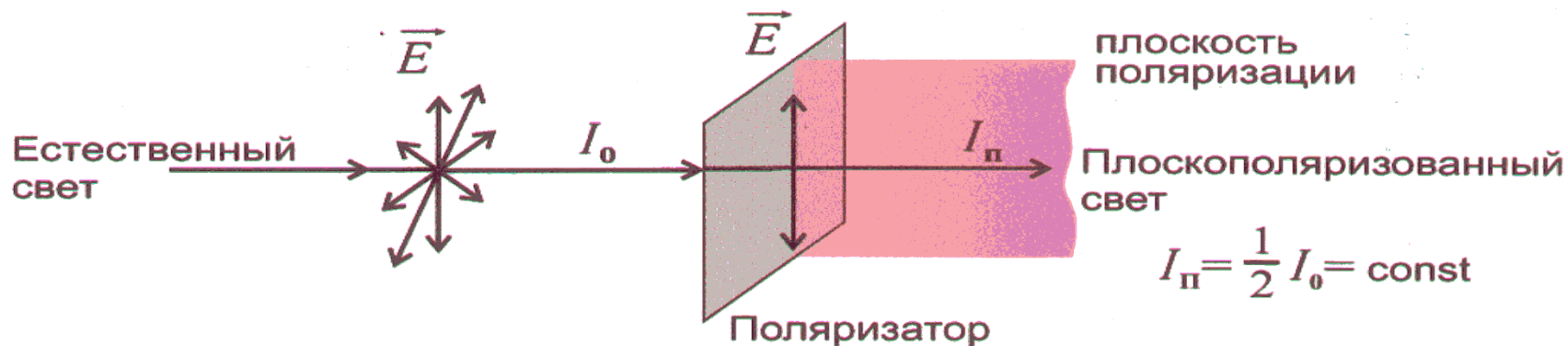
В **недиспергирующей среде** все плоские волны, образующие волновой пакет (суперпозиция волн, мало отличающихся друг от друга по частоте, называется **волновым пакетом** или группой волн), распространяются с **одинаковой фазовой скоростью v** . Скорость перемещения пакета U совпадает со скоростью v : $U = v$

Скорость, с которой перемещается центр пакета (точка с максимальным значением A), называется **групповой скоростью U** .

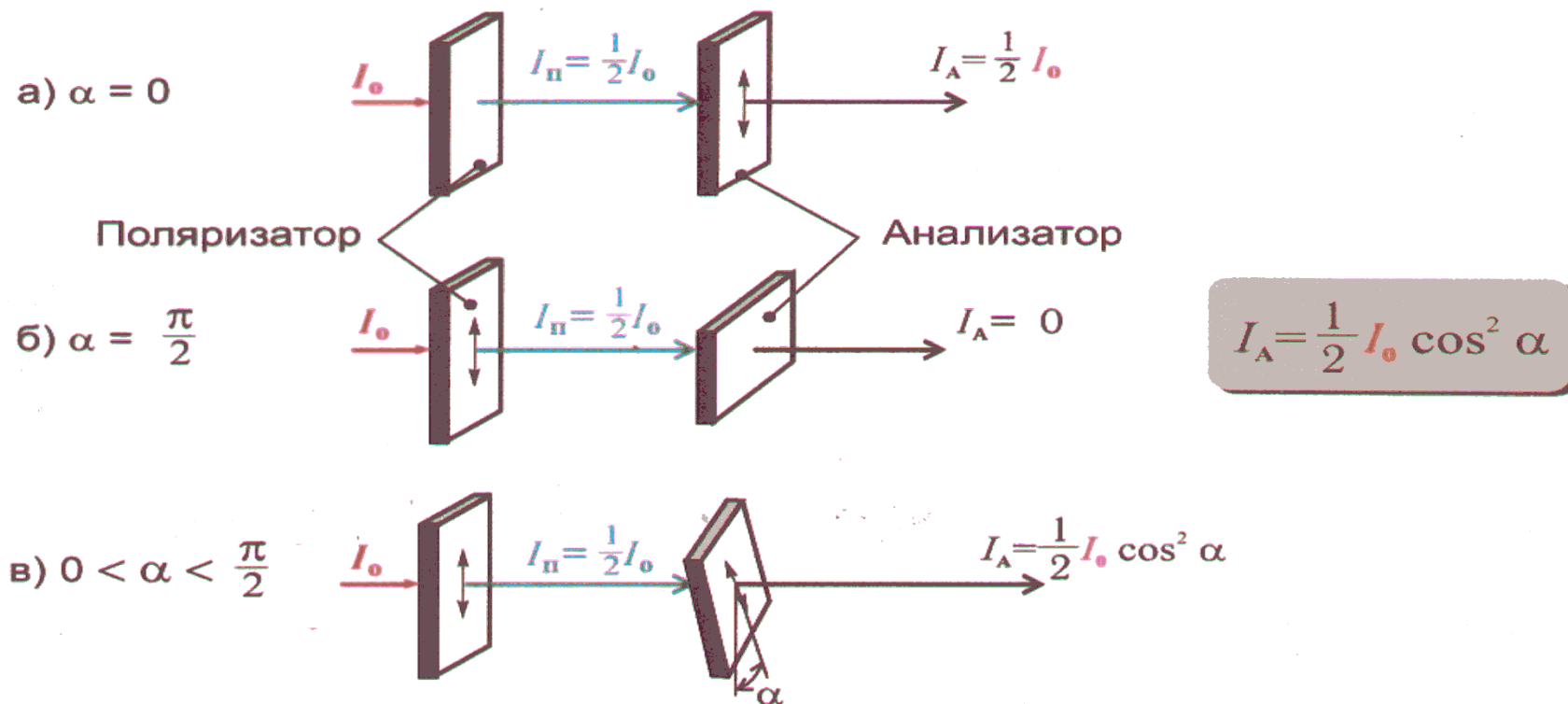
В диспергирующей среде $U \neq v$



ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА



ЗАКОН МАЛЮСА

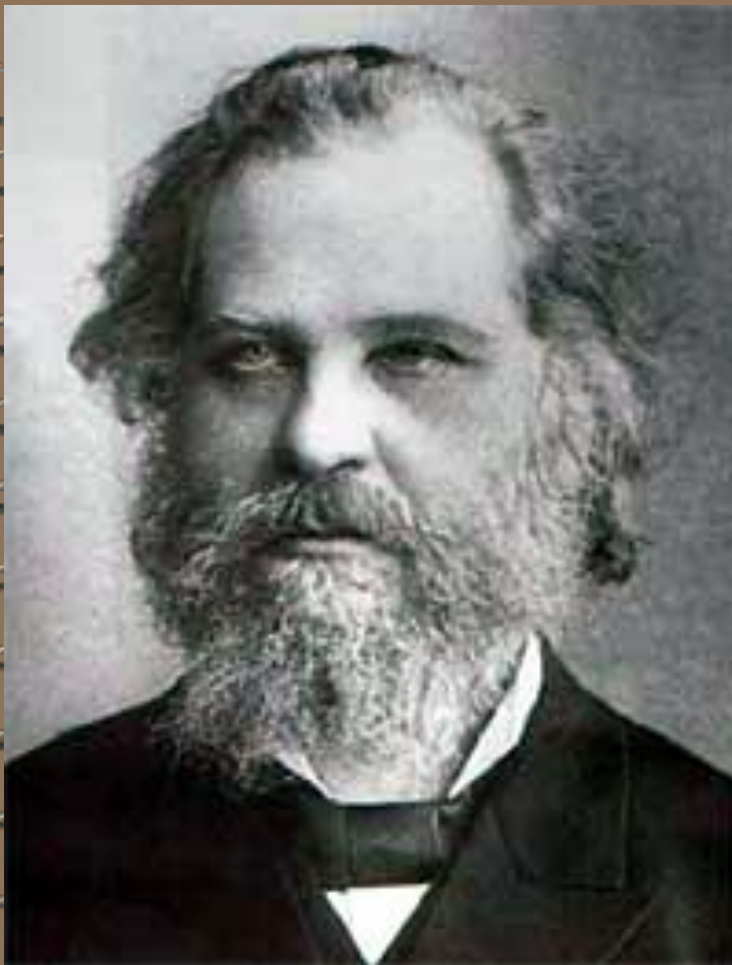


Заключение:

- векторы \vec{E} \vec{H} \vec{v} взаимно перпендикулярны, т. к. \vec{k} и \vec{v} направлены одинаково;
- электромагнитная волна является поперечной;
- электрическая и магнитная составляющие распространяются в одном направлении;
- векторы \vec{E} и \vec{H} колеблются в одинаковых фазах;
- в ЭМВ происходят колебания полей, а не вещества.

Энергетические характеристики волн

Распространение электромагнитных волн связано с переносом энергии (подобно тому, как распространение упругих волн в веществе связано с переносом механической энергии). Сама возможность обнаружения электромагнитных волн указывает на то, что они *переносят энергию*.



Для характеристики переносимой волной энергии русским ученым **Н.А Умовым** были введены понятия о скорости и направлении движения энергии, о потоке энергии. Спустя десять лет после этого, в 1884 г. английский ученый **Джон Пойнтинг** *описал* процесс переноса энергии с *помощью вектора плотности потока энергии.*

**Объемная плотность энергии в электро-
магнитной волны**

$$w = w_{\text{э}} + w_{\text{м}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E_0^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H_0^2}{2}$$

**Поток энергии через единичную площадку,
перпендикулярную направлению распростране-
ния волны в единицу времени:**

$$P = wv = EH$$

**Вектор плотности потока
электромагнитной энергии называется
вектором Умова – Пойнтинга или чаще
вектором Пойнтинга:**

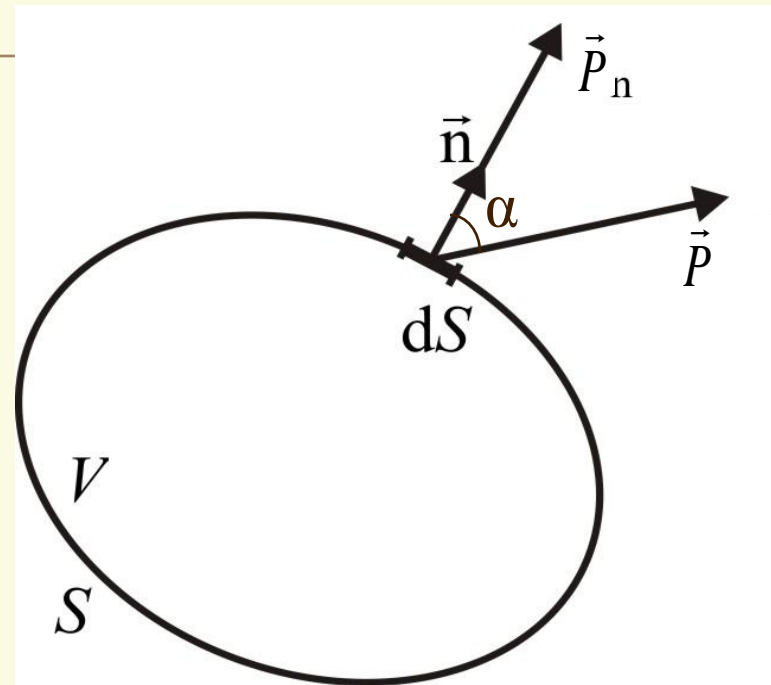
$$\vec{P} = [\vec{E} \times \vec{H}]$$

Поток энергии через площадку dS :

$$d\Phi = P_n \cdot dS, \text{ где } P_n = P \cdot \cos \alpha$$

**Теорема Умова -
Пойнтинга:**

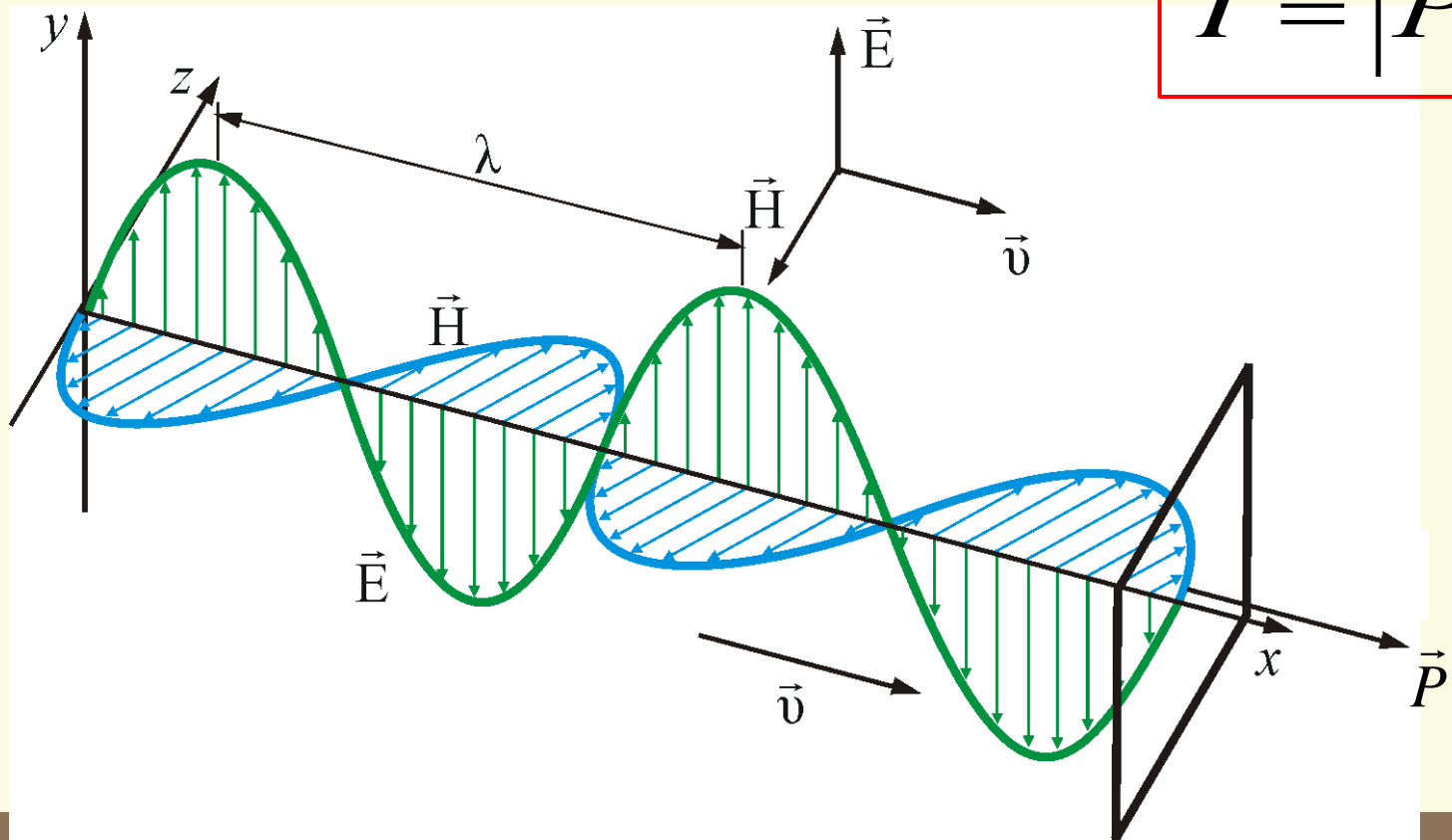
$$-\frac{\partial W}{\partial t} = \oint_S P_n dS$$



- уменьшение полной энергии внутри объема V за единицу времени должно быть равно энергии, выходящей через поверхность S за единицу времени наружу – **закон сохранения э/м энергии.**

Вектор \vec{P} направлен в сторону распространения электромагнитной волны, а его модуль равен энергии, переносимой электромагнитной волной за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны и определяет интенсивность электромагнитной волны I .

$$I = |\vec{P}|$$



Интенсивность электромагнитной волны **I** :

$$I = |\overline{P}| = \frac{1}{T} \left| \int_0^T P dt \right|$$

Для **плоской монохроматической** электромагнитной волны **интенсивность** равна:

$$I = |\overline{P}| = c\varepsilon_0 |\overline{E}|^2 = \frac{1}{T} \int_0^T P dt = \frac{c\varepsilon_0 E_o^2}{2}$$

т.к. $E = E_o \cos(\omega t - kx + \varphi_o)$ и

$$\frac{1}{T} \int_0^T \cos^2(\omega t - kx + \varphi_o) dt = \frac{1}{2}$$



ЛЕКЦІЯ ЗАКОНЧЕНА!