ФОТОНИКА

- **B4100, B4101** 12.04.02. - Прикладная оптика
- **B4108** 12.04.02. - Оптико-электронные цифровые системы
- **B4110** 12.04.03. - Компьютерная фотоника
- **B4180** 16.04.01. - Световой дизайн
- **B4190** 12.04.02. - Оптико-цифровые системы и технологии

- Лекции: 16 часов
- Лабораторные работы: 32 часа
- Самостоятельная работа студента: 60 часов
- Форма контроля: экзамен

г.Санкт-Петербург

Основные свойства световых полей

- **Световое поле** – электромагнитное поле в оптическом диапазоне частот $10^{14} - 10^{15}\,Гц$

- Особенности оптического диапазона:
  - в оптическом диапазоне выполняются законы геометрической оптики
  - в оптическом диапазоне свет слабо взаимодействует с веществом

ИЗЛУЧЕНИЕ vs. СВЕТ

ИЗЛУЧЕНИЕ *электромагнитное*, **процесс образования свободного электромагнитного поля**. (*Термин 'И.' применяют также для обозначения самого свободного, т. е. излученного, электромагнитного поля - см. Максвелла уравнения , Электромагнитные волны* .) **Классическая физика рассматривает И. как испускание электромагнитных волн ускоренно движущимися электрическими зарядами** (в частности, переменными токами). Классическая теория объяснила очень многие характерные черты процессов И., однако она не смогла дать удовлетворительного описания ряда явлений, особенно теплового излучения тел и И. микросистем (атомов и молекул). Такое описание оказалось возможным лишь в рамках квантовой теории И., показавшей, что И. представляет собой рождение фотонов при изменении состояния квантовых систем (например, атомов). Квантовая теория, более глубоко проникнув в природу И., одновременно указала и границы применимости классической теории: последняя часто является очень хорошим приближением при описании И., оставаясь, например, теоретической базой радиотехники (см. Излучение и прием радиоволн). **[БСЭ]**

В физической оптике **под излучением понимается оптическое излучение, представляющее собой электромагнитное излучение с длинами волн в пределах примерно от 1 нм до 1 мм**. **[ГОСТ 7601-78. Физическая оптика. Термины, буквенные обозначения и определения основных величин]**

СВЕТ **Светом следует называть только видимое излучение в пределах диапазона длин волн от 380-400 нм до 760-780 нм** **[ГОСТ 7601-78. Физическая оптика. Термины, буквенные обозначения и определения основных величин]**

Параметры уравнений Максвелла

- Вектор электрической напряженности поля:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \qquad [\mathbf{E}] = \textit{вольт}/\textit{м}$$

- Вектор магнитной напряженности поля:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) \qquad [\mathbf{H}] = A/\textit{м}$$

  - где t – время, $\mathbf{r}$ – радиус-вектор

- Электрическая индукция:

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) \qquad [\mathbf{D}] = \textit{кл}/\textit{м}^2$$

- Магнитная индукция:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \qquad [\mathbf{B}] = \textit{вебер}/\textit{м}^2$$

Параметры уравнений Максвелла

- Объемная плотность заряда:

$$\rho = \rho(\mathbf{r}, t) \qquad [\rho] = кл / м^3$$

- Поверхностная плотность тока:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) \qquad [\mathbf{J}] = A / м^2$$

- Электрическая и магнитная проницаемость среды:

$$\varepsilon = \varepsilon(\mathbf{r})$$

$$\mu = \mu(\mathbf{r})$$

Уравнения Максвелла

- Уравнения Максвелла:

$$\boxed{\begin{array}{llll} \nabla\times\mathbf{E}=-\dot{\mathbf{B}} & (1) & & \\ \nabla\times\mathbf{H}=\dot{\mathbf{D}}+\mathbf{J} & (2) & & \\ \nabla\cdot\mathbf{D}=\rho & (3) & \mathbf{D}=\varepsilon\,\mathbf{E} & (5) \\ \nabla\cdot\mathbf{B}=0 & (4) & \mathbf{B}=\mu\,\mathbf{H} & (6) \end{array}}$$

  - уравнения (5-6) – материальные уравнения

Уравнения Максвелла

- Уравнения Максвелла в классических обозначениях:

$$\mathbf{rotE} = -\dot{\mathbf{B}} \qquad (1)$$

$$\mathbf{rotH} = \dot{\mathbf{D}} + \mathbf{J} \qquad (2)$$

$$div\mathbf{D} = \rho \qquad (3)$$

$$div\mathbf{B} = 0 \qquad (4)$$

- Уравнения Максвелла для диэлектрической среды:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\dot{\mathbf{B}} \qquad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \dot{\mathbf{D}} \qquad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \qquad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \qquad (4)$$

Скорость света в среде

- Для вакуума из уравнений Максвелла можно получить:

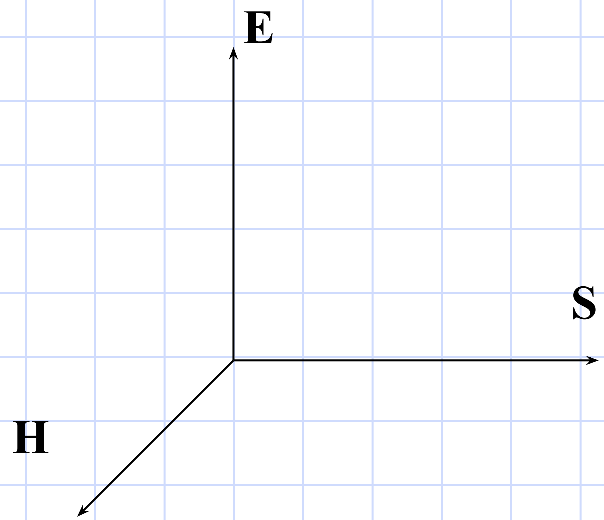
$$\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = \frac{1}{c}$$

  - где $c = 3 \cdot 10^8 \, км/с$ – скорость распространения электромагнитного излучения в вакууме, ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные в вакууме

- Для линейных сред электрическая и магнитная постоянные не зависят от интенсивности света

Взаимное расположение векторов

- Вектор электрической напряженности (**E**) перпендикулярен вектору магнитной напряженности (**H**), и оба они перпендикулярны направлению распространения света (**S**)



Вывод волнового уравнения

- Уравнение для ротора электрического поля:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\dot{\mathbf{B}} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\frac{\mu\, \partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

- Векторно домножим это уравнение на ∇:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu\left(\nabla \times \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}\right) = -\mu\left(\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \mathbf{H})\right) = -\mu\left(\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}\right)\right) =$$

$$= -\mu\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2}(\varepsilon\, \mathbf{E})\right) = -\varepsilon\,\mu\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

- Воспользовавшись математическими тождествами, получим:

$$\nabla \cdot (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2\, \mathbf{E} = -\varepsilon\,\mu\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

Волновое уравнение для электрической составляющей поля

- Электрическое поле в диэлектрической среде:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$$

- Электрическое поле в однородной среде:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

- Волновое уравнение для электрической составляющей поля:

$$\boxed{\nabla^2 \mathbf{E} = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}}$$

или

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

Волновое уравнение для электрической составляющей поля

- Векторное уравнение распадается на три скалярных:

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \qquad \begin{cases} \nabla^2 E_x = \varepsilon\mu \dfrac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} \\ \nabla^2 E_y = \varepsilon\mu \dfrac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \\ \nabla^2 E_z = \varepsilon\mu \dfrac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} \end{cases}$$

Волновое уравнение для магнитной составляющей поля

- Волновое уравнение для магнитной составляющей поля:

$$\boxed{\nabla^2 \mathbf{H} = \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2}}$$

- Векторное уравнение распадается на три скалярных:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} \qquad \begin{cases} \nabla^2 H_x = \varepsilon\mu \dfrac{\partial^2 H_x}{\partial t^2} \\ \nabla^2 H_y = \varepsilon\mu \dfrac{\partial^2 H_y}{\partial t^2} \\ \nabla^2 H_z = \varepsilon\mu \dfrac{\partial^2 H_z}{\partial t^2} \end{cases}$$

Волновое уравнение в общем виде

- Волновое уравнение в общем виде:

$$\boxed{\nabla^2 V = \varepsilon\mu \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}}$$

  - где $V(x, y, z, t)$ – любая из составляющих электрического вектора (возмущение поля в точке пространства в какой-то момент времени),
  - $\nabla^2 V$ – вторая производная возмущения по пространственным координатам,
  - $\dfrac{\partial^2 V}{\partial t^2}$ – вторая производная возмущения по времени

Скорость света в среде

- Скорость распространения волны для диэлектриков связана с электрической и магнитной постоянной:

$$\varepsilon\mu = \frac{1}{\upsilon^2}$$

- или:

$$\upsilon = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

- Отношение скорости света в вакууме к скорости света в среде называется **показателем преломления данной среды по отношению к вакууму**:

$$\boxed{n = \frac{c}{\upsilon} = \frac{\sqrt{\varepsilon\mu}}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}}$$

Волновое уравнение для одной оси координат

- Общий вид волнового уравнения:

$$\nabla^2 V = \frac{1}{\upsilon^2} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}$$

- **Волновое уравнение для одной оси координат:**

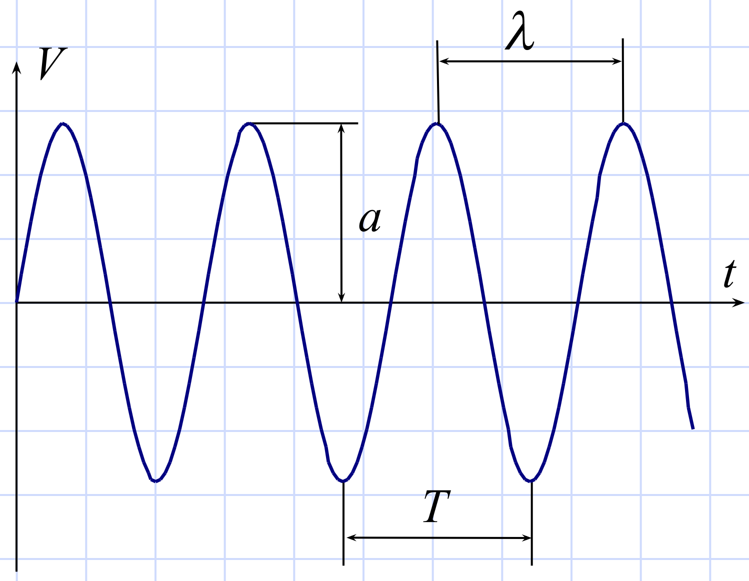
$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{1}{\upsilon^2} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}$$

Монохроматическое поле

- **Монохроматическое поле** – это поле, зависящее от времени по гармоническому закону:

$$\boxed{V(\mathbf{r},t) = a(\mathbf{r})\cos(\omega\, t - \varphi_0(\mathbf{r}))}$$

  - где $a(\mathbf{r})$ – амплитуда возмущения (функция пространственных координат), ω – циклическая частота изменения поля во времени, $\varphi_0(\mathbf{r})$ – фаза поля (функция пространственных координат)



Монохроматическое поле

- Характеристики монохроматического поля:
  - период колебаний $T \quad [c]$
  - частота:

$$\nu = \frac{1}{T} \qquad \left[c^{-1}\right] = [\textit{Гц}]$$

  - циклическая частота:

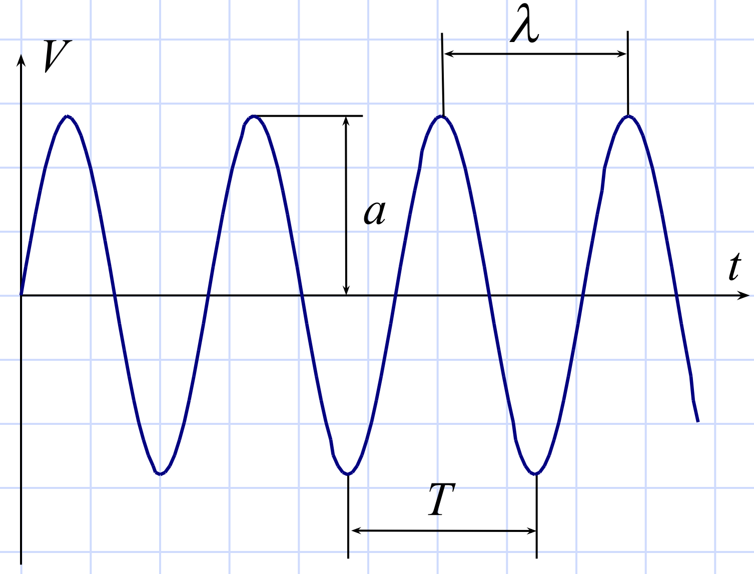
$$\omega = 2\pi\nu \qquad \left[{}^{\textit{рад}}\!/\!{}_{c}\right]$$

  - длина волны (пространственный период):

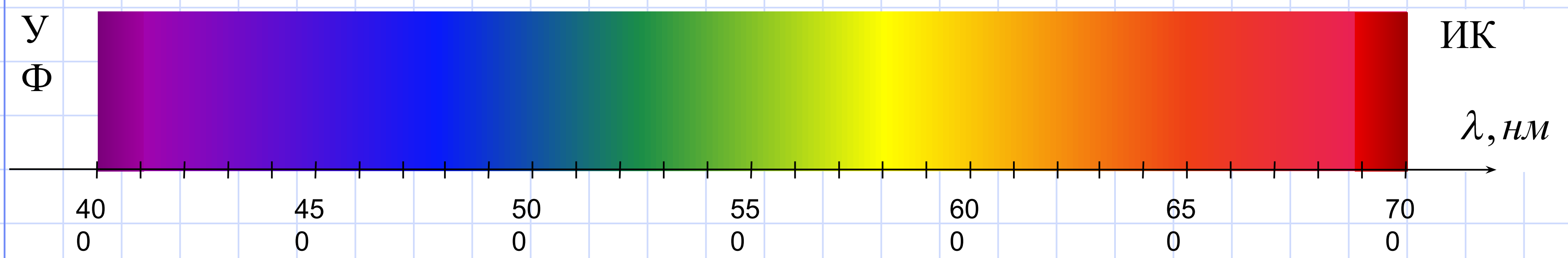
$$\lambda = \upsilon \cdot T = \frac{\upsilon}{\nu} = \frac{\upsilon}{\omega} \cdot 2\pi \qquad [\textit{мм}],\ [\textit{мкм}],\ [\textit{нм}]$$

  - волновое число:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{\upsilon}$$



Спектр видимого излучения



Монохроматическое поле

- Постоянные характеристики:
  - частота
  - циклическая частота
  - период колебаний

- Переменные характеристики:
  - дисперсия показателя преломления

- Длина волны и волновое число в некоторой среде:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \qquad k = k_0\, n$$

  - где λ_0 – длина волны в вакууме, $k_0 = \dfrac{\omega}{c}$ – волновое число в вакууме

Монохроматическое поле

- Волновое возмущение:

$$\boxed{V(\mathbf{r},t) = a(\mathbf{r})\cos k_0\left[ct - E(\mathbf{r})\right]}$$

- где $E(\mathbf{r})$ – это эйконал поля:

$$\boxed{E = \frac{\varphi_0}{k_0} = \frac{\varphi_0}{2\pi}\lambda_0} \quad [нм]$$

Монохроматическое поле

- **Оптическая длина луча *nl* – это произведение показателя преломления *n* на геометрическую длину пути *l***

- Приращение эйконала равно оптической длине луча:

$$\boxed{\Delta E = nl}$$

  - если фаза изменяется на 2π, то эйконал изменяется на λ_0:

$$\Delta\varphi = 2\pi \Rightarrow \Delta E = \lambda_0$$

  - если фаза изменяется на π, то эйконал изменяется на $\frac{\lambda_0}{2}$:

$$\Delta\varphi = \pi \Rightarrow \Delta E = \frac{\lambda_0}{2}$$

  - если фаза изменяется на $\frac{\pi}{2}$, то эйконал изменяется на $\frac{\lambda_0}{4}$:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \Delta E = \frac{\lambda_0}{4}$$

Комплексная амплитуда

- Экспоненциальное представление комплексных чисел:

  $$e^{i\varphi} = \cos\varphi + i\sin\varphi$$

  - где $\cos\varphi$ – действительная часть, $\sin\varphi$ – мнимая часть

- **Монохроматическое поле** – это действительная часть от функции:

  $$V(\mathbf{r},t) = \mathrm{Re}\left\{a(\mathbf{r}) \cdot e^{-k_0[ct - E(\mathbf{r})]}\right\} = \mathrm{Re}\left\{a(\mathbf{r}) \cdot e^{ik_0 E(\mathbf{r})} \cdot e^{-ik_0 ct}\right\}$$

  - где $a(\mathbf{r}) \cdot e^{ik_0 E(\mathbf{r})}$ зависит только от пространственных координат, $e^{-ik_0 ct}$ зависит только от времени

Комплексная амплитуда

- Комплексная амплитуда поля:

$$\boxed{U(\mathbf{r}) = a(\mathbf{r}) \cdot e^{ik_0 E(\mathbf{r})}}$$

  - где $a(\mathbf{r}) = |U(\mathbf{r})|$ – вещественная амплитуда

- **Однородная волна** – волна, у которой вещественная амплитуда не зависит от пространственных координат

- Эйконал поля:

$$\boxed{E(\mathbf{r}) = \frac{1}{k_0} \arg[U(\mathbf{r})]}$$

  - где $\arg[U(\mathbf{r})] = \varphi_0(\mathbf{r})$ – фаза поля

Комплексная амплитуда

- При сложении полей их комплексные амплитуды складываются, а временной экспоненциальный множитель можно вынести за скобки и не учитывать :

$$U_{\Sigma} = U_1 + U_2$$

  - где $V_1(\mathbf{r},t) = U_1(\mathbf{r}) \cdot e^{-ik_0ct}$ – поле 1, $V_2(\mathbf{r},t) = U_2(\mathbf{r}) \cdot e^{-ik_0ct}$ – поле 2

Уравнение Гельмгольца

- Уравнение Гельмгольца:

$$\boxed{\left(\nabla^2 + k^2\right)\cdot U = 0}$$

или

$$\boxed{\nabla^2 U + n^2 k_0^2 U = 0}$$

Интенсивность поля

- Поле меняется во времени с частотой:

  $\nu \approx 10^{15}\, сек^{-1} \quad T = 10^{-15}\, сек$

- Время инерции приемника излучения:

  $\Delta\tau >> 10^{-15}\, сек$

- **Регистрируется усредненная во времени величина – интенсивность поля**

- Интенсивность равна квадрату модуля комплексной амплитуды:

$$\boxed{I = |U|^2 = UU^*}$$

Наблюдаемые величины при сложении полей

- Суммарная интенсивность при сложении двух полей:

$$I = |U_\Sigma|^2 = U_\Sigma U_\Sigma^* = (U_1 + U_2)(U_1^* + U_2^*) = U_1U_1^* + U_2U_2^* + U_1U_2^* + U_2U_1^* =$$

$$= a_1^2 + a_2^2 + a_1a_2e^{i(\varphi_1-\varphi_2)} + a_1a_2e^{-i(\varphi_1-\varphi_2)} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cdot\cos(\Delta\varphi) = I_\Sigma$$

  - где $U_1 = a_1e^{i\varphi_1}$ – поле 1, $U_2 = a_2e^{i\varphi_2}$ – поле 2

- **Уравнение интерферограммы**:

$$\boxed{I_\Sigma = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cdot\cos(\Delta\varphi)}$$

  - где $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \dfrac{2\pi\Delta E}{\lambda_0}$ – разность фаз поля

  - **интерференция** – явление, возникающее при сложении двух полей
  - **интерферограмма** – картина, наблюдаемая при интерференции

Сложение когерентных полей

- **Разность фаз (эйконалов) двух когерентных полей остается постоянной за время инерции приемника**
  - суммарная интенсивность определяется уравнением интерферограммы
  - картина распределения интенсивности представляет собой чередование темных и светлых полос

- Регистрируемая картина взаимодействия двух полей, одно из которых референтное, называется **голограммой**
  - **голограмма** – это запись полной информации о поле, то есть его комплексной амплитуды
  - референтное (эталонное) поле – имеет известную картину фаз

Сложение некогерентных полей

- **Некогерентные поля** – разность фаз меняется случайным образом много раз за время регистрации

- При регистрации суммарной интенсивности ее значения по времени усредняются:

$$\overline{I_\Sigma} = \overline{I_1} + \overline{I_2} + 2\sqrt{\overline{I_1 I_2}} \cdot \overline{\cos(\Delta\varphi)}$$

  - I_1, I_2 постоянны, $\overline{\cos(\Delta\varphi)} = 0$

- Сложение двух некогерентных полей:

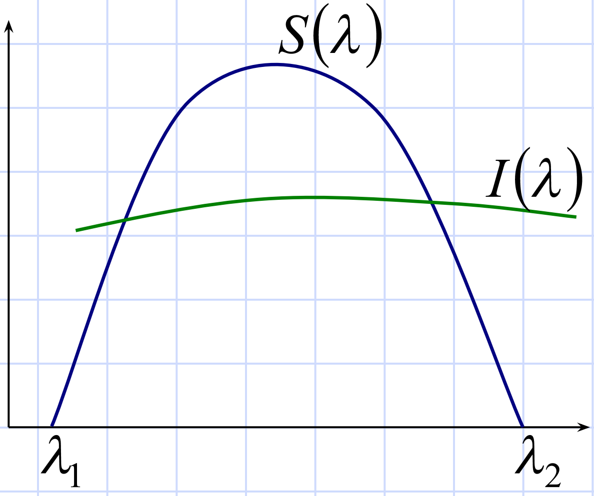
$$\boxed{I_\Sigma = I_1 + I_2}$$

Квазимонохроматическое и полихроматическое поле

- **Квазимонохроматическое поле** – поле, близкое к полной монохроматичности
- **Полихроматическое поле** $U(\mathbf{r},t)$ – сумма (суперпозиция) монохроматических составляющих
- Интенсивность полихроматического поля:

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda)\cdot S(\lambda)\cdot d\lambda$$

  - где $I(\lambda)$ – распределение интенсивности монохроматической составляющей по длинам волн, $S(\lambda)$ – весовая спектральная функция, λ_1, λ_2 – реальные границы диапазона излучения

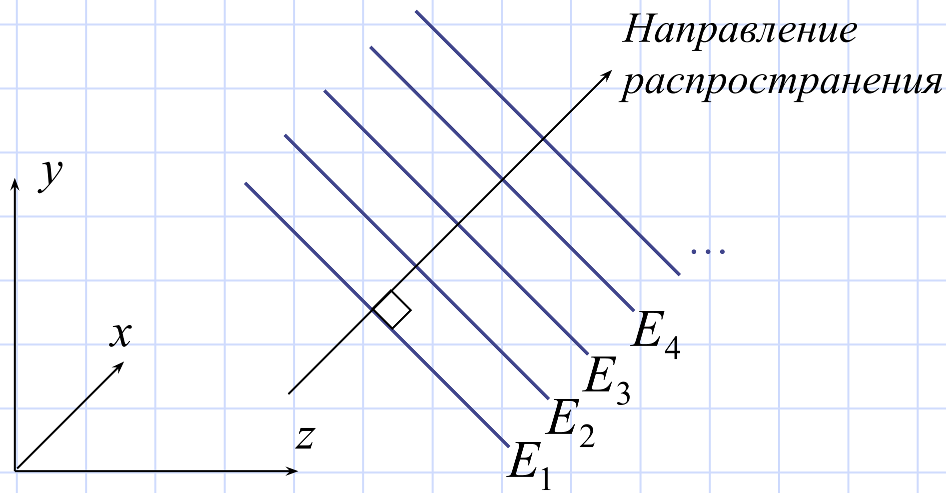


Плоские волны

- **Плоские волны** имеют плоские волновые фронты
- **Волновой фронт** – это поверхность в пространстве, на которой эйконал поля (или фаза) имеет одинаковые значения:

$$\boxed{E(\mathbf{r}) = const}$$

  - направление распространения света перпендикулярно волновым фронтам



Направление волнового фронта

- Векторы, показывающие направление волнового фронта:
  - $\mathbf{S}$ – единичный вектор направления (орт) $|\mathbf{S}| = 1$
  - $\mathbf{k}$ – волновой вектор

$$|\mathbf{k}| = k = \frac{2\pi}{\lambda} = \left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)\cdot n$$

    - где k – волновое число
  - $\mathbf{q}$ – оптический лучевой вектор $|\mathbf{q}| = n$

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n\cos\alpha_x \\ n\cos\alpha_y \\ n\cos\alpha_z \end{pmatrix}$$

    - где X, Y, Z – направляющие косинусы,

q_x q_y – пространственные частоты плоской волны

Плоские волны

- **Уравнение плоской волны:**

$$\boxed{U(\mathbf{r}) = U_0 \cdot e^{ik_0 E(\mathbf{r})}}$$

- **Эйконал плоской волны:**

$$\boxed{E(\mathbf{r}) = (\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}) = xX + yY + zZ}$$

  - при таком описании эйконала волновой фронт плоский и перпендикулярен оптическому лучевому вектору

Сферические волны

- **Сферические волны** имеют волновой фронт в виде концентрических сфер
- **Уравнение сферической волны:**

$$\boxed{U(\mathbf{r}) = \frac{U_0}{\|\mathbf{r}\|} \cdot e^{ik_0 E(\mathbf{r})}}$$

- **Уравнение эйконала сферической волны:**

$$\boxed{E(\mathbf{r}) = n \cdot \|\mathbf{r}\|}$$

  - где $\|\mathbf{r}\| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ – длина радиус-вектора точки в пространстве