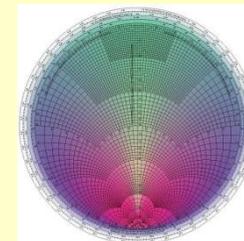




СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Кафедра радиотехнической электроники



«Микроволновая Электроника»

доцент

Иванов Вячеслав Александрович

me2014iva@ya.ru

План лекции №2

Часть 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРОВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

*Взаимодействие потоков заряженных частиц с переменным
электромагнитным полем*

*1.1. Макроскопические уравнения микроволновой
электроники*

1.2. Уравнения движения в вакууме и твердом теле.

1.3. Мощность взаимодействия:

классический подход,

*квантовый подход: Индивидуальное и коллективное
излучение заряженных частиц*

1.4. Законы сохранения числа частиц, импульса и энергии.

1.1. Макроскопические уравнения микроволновой электроники

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J}; \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho; \quad (4)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6)$$

*Уравнения
Максвелла*

1.2 Уравнения движения в вакууме и твердом теле.

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad - \text{вакуум (уравнение Ньютона)}$$

(Для одиночного заряда или ансамбля зарядов с одинаковой скоростью \mathbf{v})

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} f + \mathbf{F} \cdot \nabla_{\mathbf{p}} f = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_c, \quad - \text{твердое тело (вакуум)}$$

- кинетическое уравнение
Больцмана (Власова)

(Для ансамбля зарядов с распределением по скоростям импульсам $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$)

$$\int_P f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) dP = n(\mathbf{r}, t).$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = \frac{q}{m} \int_P \mathbf{p} f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) dP.$$

$$f(v) = n \left(\frac{m}{2\pi k T_e} \right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{kT_e}},$$

Распределение Максвелла

При субатомных размерах...

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} + \frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi - U(\mathbf{r}, t) \Psi = 0,$$

*- уравнение
Шредингера*

$U(\mathbf{r}, t)$ -- внешняя по отношению к частице потенциальная энергия поля в точке \mathbf{r} .

*Вычислив дивергенцию левой и правой части уравнения (1) и подставив в результат уравнение (3), получим **уравнение непрерывности***

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \quad (7)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_d + \mathbf{J} = \mathbf{J}_{tot},$$

Закон полного тока

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_{tot} = 0.$$

Мощность взаимодействия

: (классический гидродинамический подход):

$$dA = \mathbf{F} d\mathbf{l} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{v} dt = q\mathbf{E} \cdot \mathbf{v} dt.$$

Магнитное поле не производит работы

$$P = dA / dt = q\mathbf{E} \cdot \mathbf{v}$$

$$\Delta P = \rho \Delta V \mathbf{E} \cdot \mathbf{v}. \quad \longrightarrow \quad p_{\text{вз}} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E}.$$

$$P_{\text{эл}} = \int_V \mathbf{J} \mathbf{E} dV$$

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} \cdot \mathbf{v} = q\mathbf{E} \cdot \mathbf{v} + q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{v}. \quad \longrightarrow \quad \frac{d}{dt} (W_k + W_p) = 0,$$

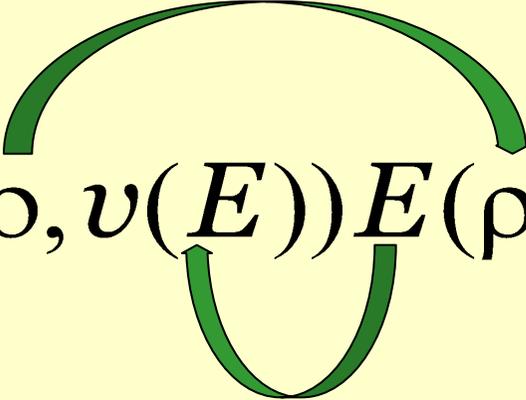
Формальное введение понятия «наведенный ток»

$$P_{\text{эл}}(t) = \int_0^d Aj(x,t) \frac{u(t)}{d} dx = \frac{1}{d} \left(\int_0^d Aj(x,t) dx \right) u(t)$$

$$i_{\text{нав}}(t) = \frac{1}{d} \int_0^d Aj(x,t) dx$$

$$P_{\text{эл}}(t) = i_{\text{нав}}(t) * u(t)$$

*Самосогласованная задача
«Электронная нагрузка»*

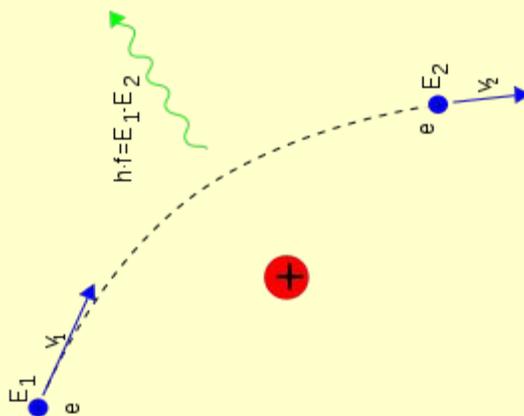
$$P = \int_V \mathbf{J}(\rho, \nu(E)) \cdot \mathbf{E}(\rho) dV$$


*Пространство взаимодействия
(Электродинамическая система)*

Квантовый подход.

1.3 Индивидуальное и коллективное излучение заряженных частиц

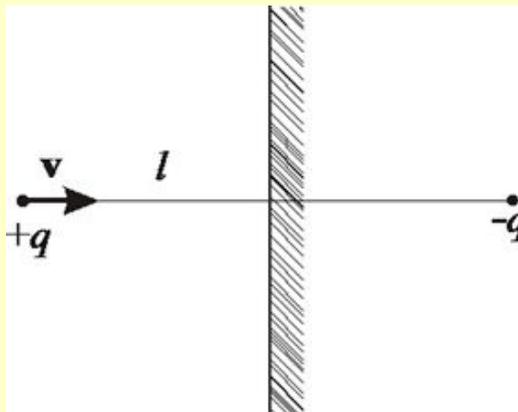
Тормозное излучение — излучение ЗЧ, движущейся с замедлением в электрическом поле (излучение квантов — фотонов) $P = 2q^2 a^2 / 3c^3 \epsilon_0$,
 a - замедление. Спектр тормозного излучения непрерывен и ограничен максимально возможной энергией фотонов тормозного излучения, равной начальной энергии электрона.



- *Переходное излучение* - короткий импульс, возникающий в момент удара электрона о металлическую поверхность ("схлопывания" диполя, образованного ЗЧ и наведенным).

$$P = \frac{32e^2v^2}{3\epsilon_0c^3}\delta(t_0),$$

электромагнитное излучение, наблюдающееся при пересечении заряженной частицей границы раздела двух сред с отличающимися показателями преломления.

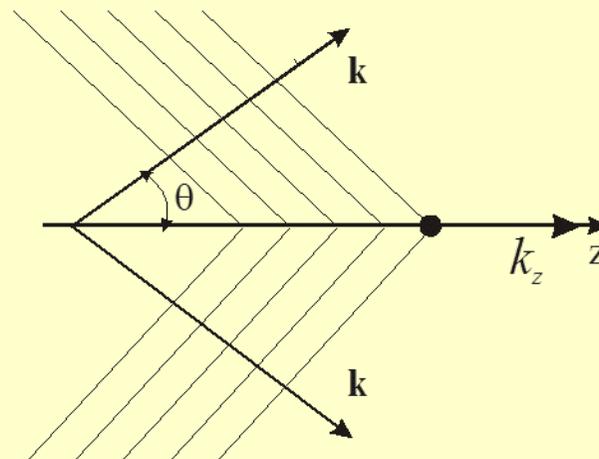


- *Излучение Вавилова-Черенкова* - возникает и при равномерном движении ЗЧ со скоростью, превышающей скорость света в данной среде: $W = \int_V dV \int_{t_1}^{t_2} j_z E_z dt$

$$\Delta W = \frac{q^2}{4\pi\epsilon c^2} \left(1 - \frac{u^2}{v^2}\right) \omega \Delta\omega.$$

при $v/u > 1$

$$\cos\theta = \frac{\beta_e}{\sqrt{k_p^2 + k_z^2}} = \frac{u}{v}.$$



*Смита-Парсела
или варотронное*

Черенковское излучение используется в приборах типа лампы бегущей волны, а излучение *Смита-Парсела* — в лампах обратной волны

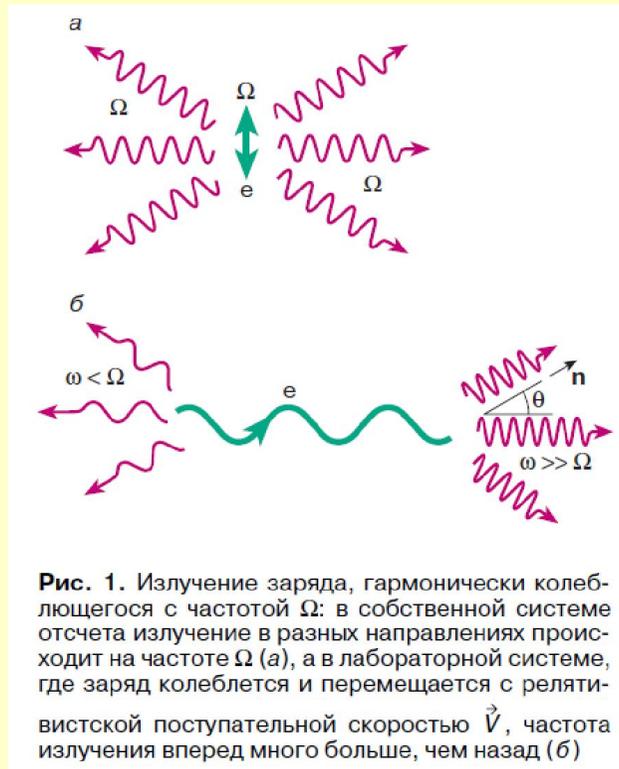
- *Осцилляторное излучение*

$$\omega(\theta) = \frac{\omega_0}{|1 - (v_z / u) \cos \theta|},$$

(эффект Доплера)

Его можно рассматривать как разновидность тормозного излучения, поскольку частица при периодическом движении испытывает ускорения

Эффект Доплера



$$\omega = \frac{\Omega}{1 - \beta \cos \theta}, \quad \beta = \frac{V}{c}. \quad (1)$$



ВЛ Братман Общий принцип генерации
Соровский образовательный журнал
№9 1999

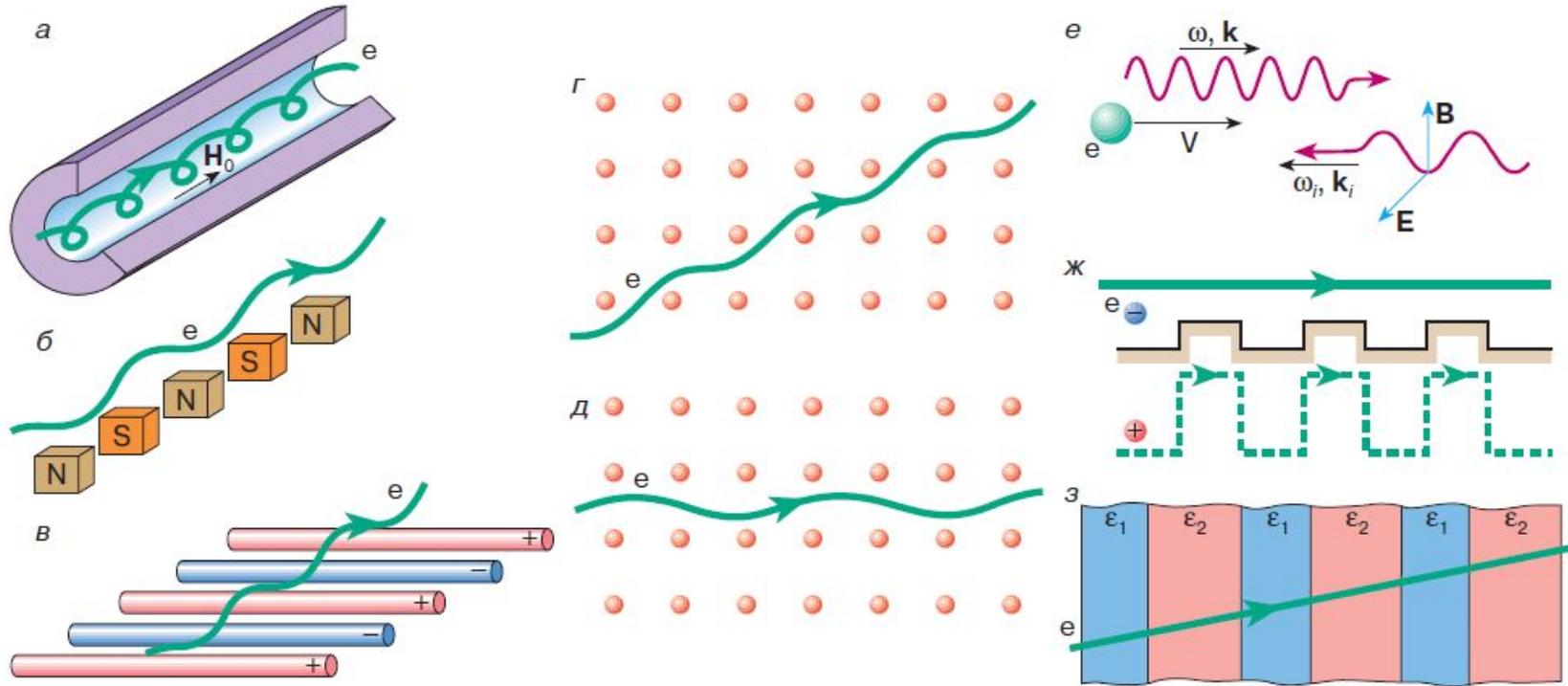


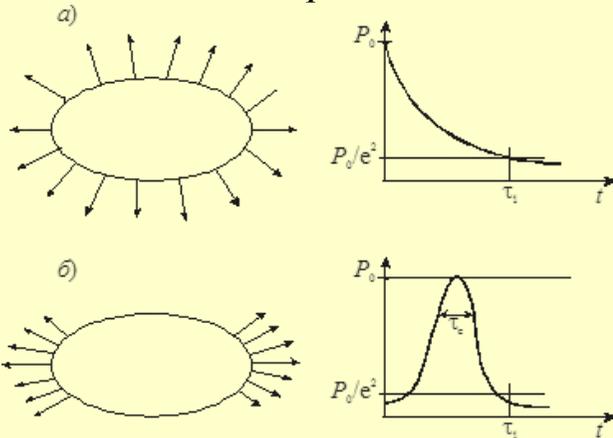
Рис. 2. Методы раскочки колебаний быстрых частиц: *а* – в однородном магнитном поле, *б* – в магнитостатическом ондуляторе, *в* – в искусственном и *г* – естественном электростатических ондуляторах (красные кружки изображают атомы), *д* – при каналировании в кристаллах, *е* – в поле волны накачки, *ж* – возбуждение и раскочка зарядов-изображений в периодических поверхностных и *з* – плоскостойных структурах

ВЛ Братман Общий принцип генерации
Соровский образовательный журнал
 №9 1999

Коллективное излучение

ансамбль частиц, имеющих два энергетических уровня — верхний и нижний. При переходе с верхнего уровня на нижний частица излучает квант излучения, при обратном переходе — поглощает его. Обозначим время жизни частицы на верхнем уровне τ_1 .

$$P = N\hbar\omega_0/\tau_1$$



По мере увеличения концентрации частиц между излучателями возникает самопроизвольная корреляция за счет обмена квантами. Если время установления корреляции $\tau_c < \tau_1$, ансамбль может перейти на нижний уровень за время $\tau_c \propto N^{-1}$. В результате мощность излучения

$$P = N\hbar\omega_0/\tau_c$$

сверхизлучением Дике.

Индукцированное излучение характеризуется тем, что под действием внешнего излучения осцилляторы излучают в одинаковых фазах (происходит фазировка осцилляторов)

Различные типы приборов отличаются типами индивидуального излучения частиц и используемыми механизмами фазировки и группировки

Hard work, big results



"Think big, act big, believe big and the results will be big".