

Лекция 3.

**Движение электронов в
электрических и магнитных
полях**

Уравнения Максвелла

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}_{\text{полн}} = \sigma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \rho \vec{v}$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho$$

$$\text{div} \vec{B} = 0$$

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$$

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$$

ε, μ, σ – относительная диэлектрическая и магнитная проницаемость среды и ее удельная проводимость. Для вакуума $\varepsilon=\mu=1$, а $\sigma=0$

ρ, \vec{v} – объемная плотность свободных зарядов и их скорость движения

$$\varepsilon_0 = 0,886 \cdot 10^{-11} \frac{A \cdot \text{сек}}{B \cdot m} \quad \mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{B \cdot \text{сек}}{A \cdot m}$$

Уравнение движения заряженных частиц

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F} = q\{\vec{E} + [\vec{v} \cdot \vec{B}]\}$$

$$m_0 \frac{dv}{dt} = q\{\vec{E} + [\vec{v} \cdot \vec{B}]\}$$

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ К – заряд электрона

$m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг – масса покоя электрона

Уравнение непрерывности и скорости электронов в потенциальном электрическом поле

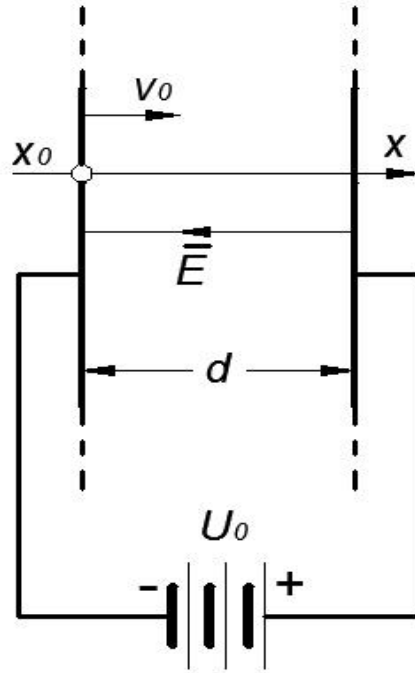
$$\operatorname{div}(\rho \vec{v}) = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m_0} U}$$

Время и угол пролета электронов

$$\tau = d \sqrt{\frac{2m}{eU_0}}$$

$$\tau = \frac{d}{v_0}$$

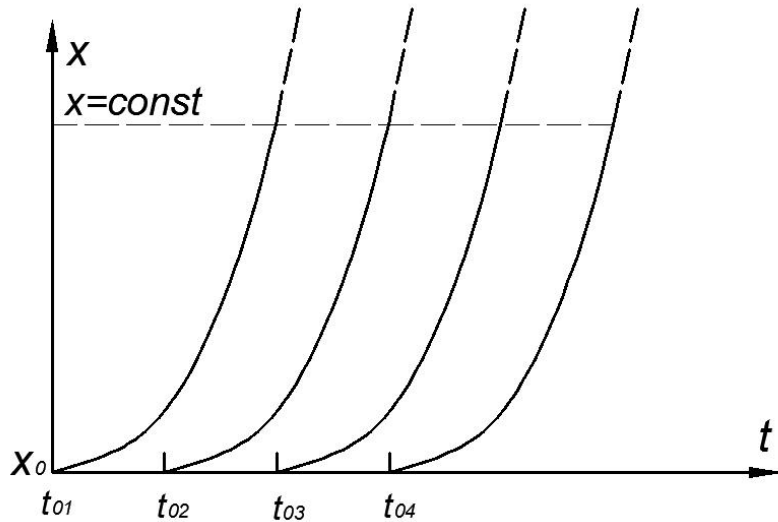


$$\Theta = \omega d \sqrt{\frac{2m}{eU_0}}$$

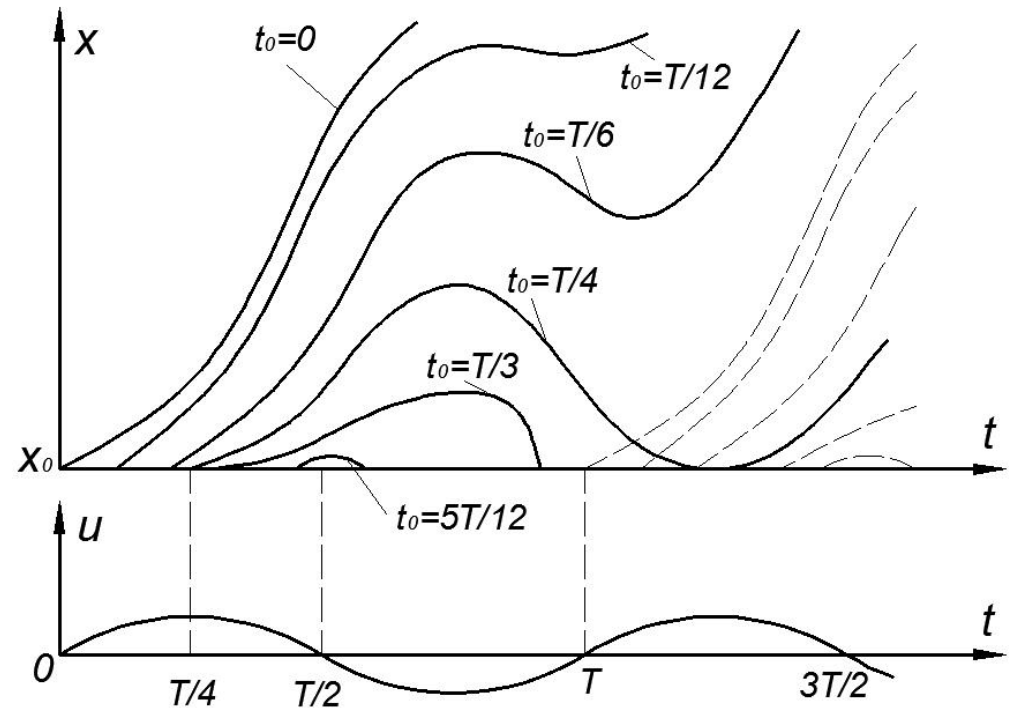
$$\Theta = \frac{\omega d}{v_0}$$

$$x = x_0 + \frac{eU_m}{\omega^2 m d [(\omega t_0 - \omega t) \cos \omega t_0 - \sin \omega t + \sin [\omega t_0]]}$$

Пространственно-временные диаграммы



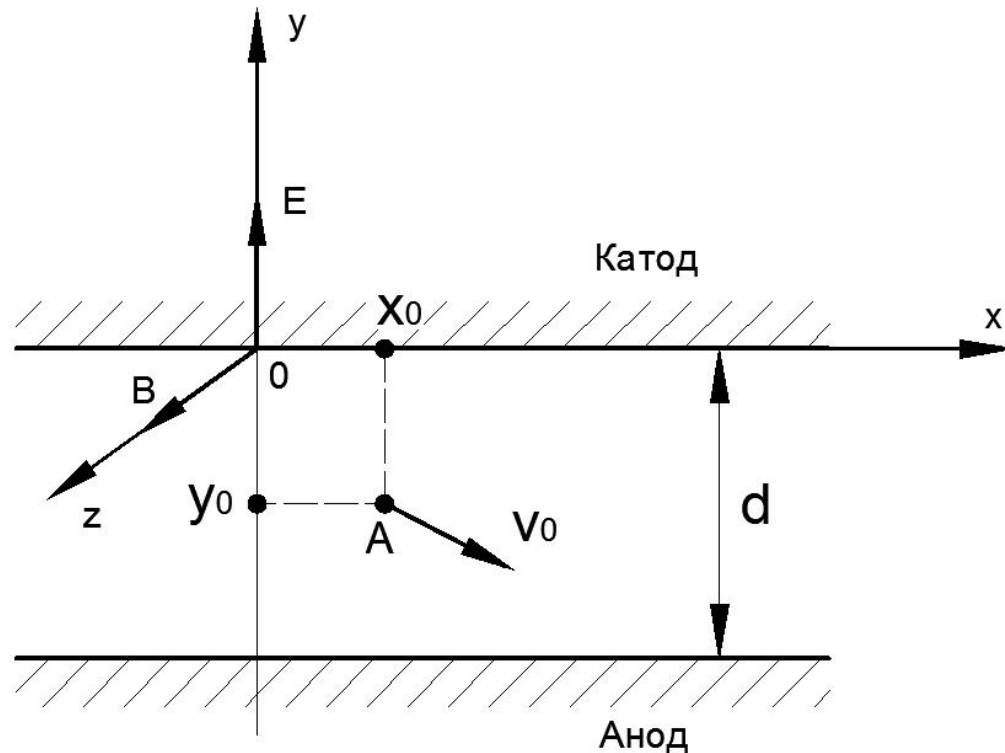
Пространственно-временная диаграмма движения электронов в плоском диоде в отсутствие переменного напряжения на аноде



Пространственно-временная диаграмма движения электронов в плоском насыщенном диоде под действием переменного напряжения.

Под диаграммой приведен график междуэлектродного напряжения.

Движение электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях



Электрон в плоском магнетроне

Составляющие электрического и магнитного полей:

$$E_x=E_z=0, \quad E_y=E=U/d, \quad B_x=B_y=0, \quad B_z=B$$

Дифференциальные уравнения движения электрона в скрещенных электрическом и магнитном полях

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{eB}{m} \frac{dy}{dt}$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{eE}{m} + \frac{eB}{m} \frac{dx}{dt}$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = 0$$

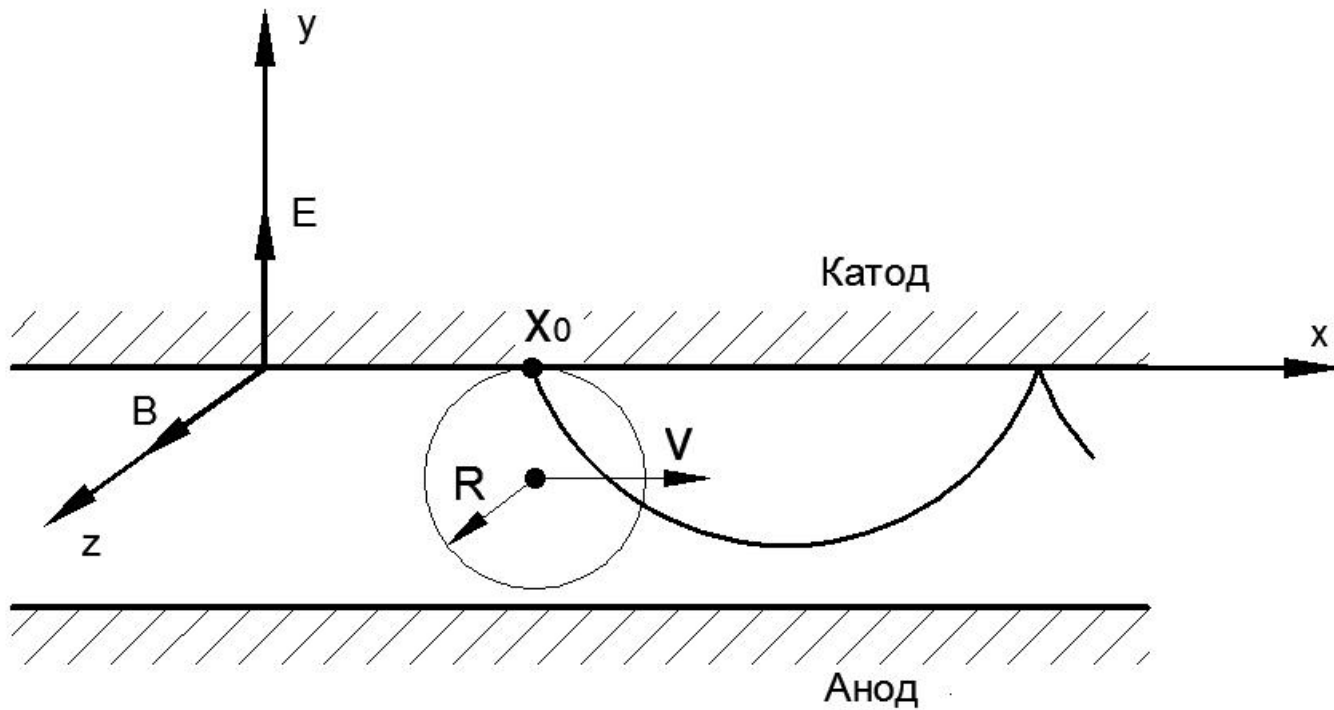
Уравнения движения электрона в пространстве между катодом и анодом в плоском магнетроне при $y_0=0$:

$$x = x_0 + \frac{E}{B} t - \frac{mE}{eB^2} \sin \omega_{\text{ц}} t$$

$$y = -\frac{mE}{eB^2} (1 - \cos \omega_{\text{ц}} t)$$

$$z = z_0$$

где $\omega_{\text{ц}} = \frac{eB}{m}$ - циклотронная частота



Циклоидальное движение электрона в плоском магнетроне в
отсутствии высокочастотных колебаний

$$R = \frac{mE}{eB^2} \qquad v_{\text{ц}} = \frac{E}{B} \qquad \tau = \frac{2\pi}{\omega_{\text{ц}}} = \frac{2\pi m}{eB}$$

Пример расчета пространственно-временной диаграммы движения электронов в диоде

$$x0 := 0$$

$$Um := 100$$

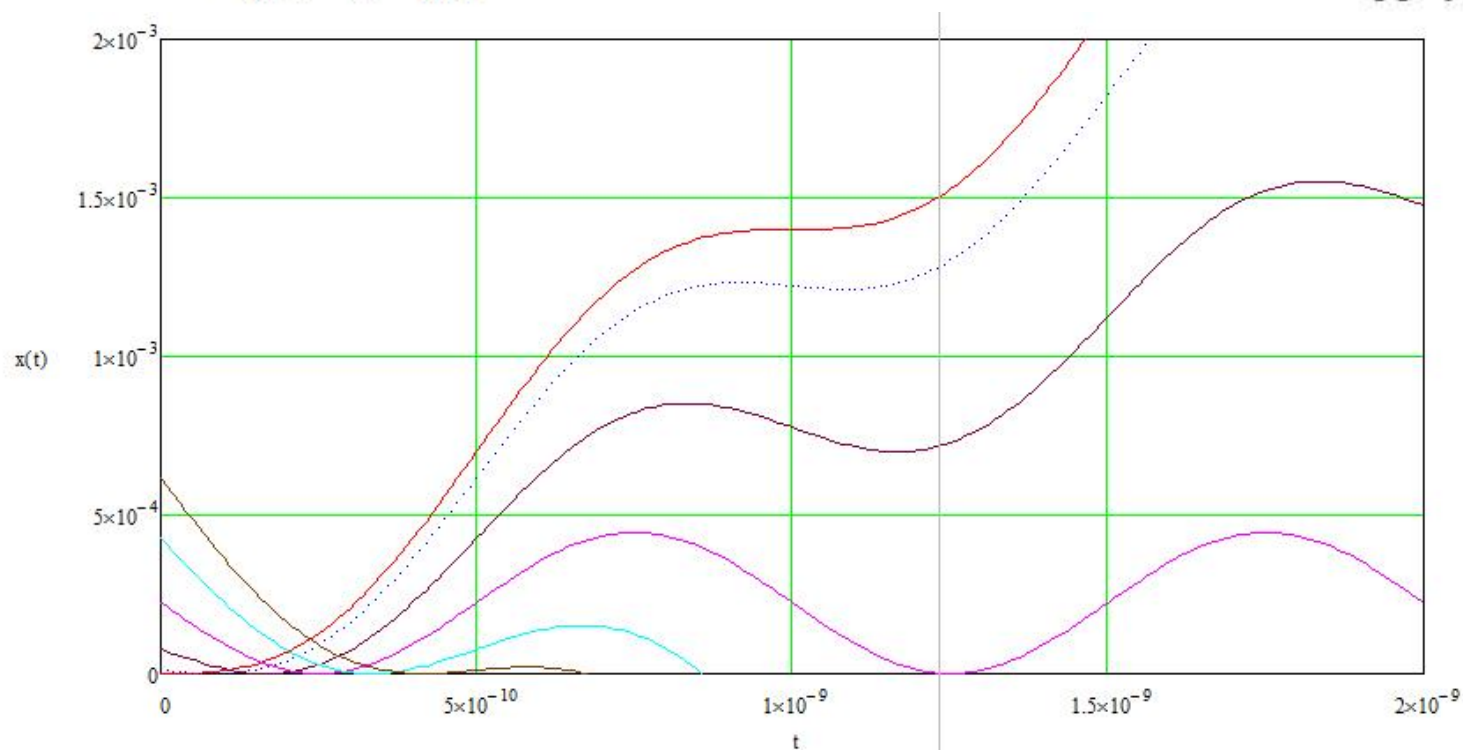
$$f := 1 \cdot 10^9$$

$$d := 2 \cdot 10^{-3}$$

$$e := 1.602 \cdot 10^{-19}$$

$$m := 9.108 \cdot 10^{-31}$$

$$t0 :=$$



$$\begin{pmatrix} 0 \\ \frac{T}{12} \\ \frac{T}{6} \\ \frac{T}{4} \\ \frac{T}{3} \\ \frac{5 \cdot T}{12} \end{pmatrix}$$