

Вопросы для повторения

1. Какая сила действует на электрический заряд, движущийся в магнитном поле? Чему она равна и как направлена?
2. Объясните взаимодействие параллельных проводников с токами на основе взаимодействия между движущимися зарядами.
3. В чем состоит явление Холла и как оно объясняется?
4. Как на основе явления Холла определить тип примесной проводимости полупроводника?
5. Опишите экспериментальный метод определения удельного заряда электрона.
6. Каков принцип действия масс-спектрографа и для чего он применяется?
7. Для чего предназначен циклотрон и как он действует?
8. В чем состоит принцип автофазировки? Как он используется в современных ускорителях?

Примеры решения задач

Задача 18.1. Электрон, прошедший в ускоряющем электрическом поле разность потенциалов 10 кВ, движется в однородном магнитном поле с индукцией 0,5 Т, перпендикулярной его скорости. Определить момент импульса электрона.

Дано:

$$\Delta\varphi = 10^4 \text{ В}$$

$$B = 0,5 \text{ Т}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$L = ?$$

Решение. На электрон, движущийся в магнитном поле, действует сила Лоренца $F_L = -e[\mathbf{v}\mathbf{B}]$, где e — абсолютное значение заряда электрона, \mathbf{v} — его скорость, \mathbf{B} — индукция магнитного поля. Если магнитное поле однородное, а векторы \mathbf{v} и \mathbf{B} взаимно перпендикулярны, то $F_L = evB = \text{const}$ и электрон движется по окружности, радиус r которой находим по формуле (18.19):

$$r = \frac{m}{e} \frac{v}{B}.$$

Момент импульса L электрона на круговой орбите численно равен произведению его импульса mv на радиус орбиты r :

$$L = mvr = mv \frac{m}{e} \frac{v}{B} = \frac{2m}{eB} \frac{mv^2}{2}.$$

Кинетическая энергия $mv^2/2$ приобретается электроном в ускоряющем электрическом поле. Поэтому она равна работе, совершаемой силами поля: $(1/2)mv^2 = e\Delta\varphi$. Таким образом,

$$L = \frac{2m\Delta\varphi}{B}.$$

Произведем вычисления в СИ:

$$L = \frac{2m\Delta\varphi}{B} = \frac{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2}{0,5 \text{ с}} = 3,64 \cdot 10^{-26} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}.$$

Задача 18.2. Циклотрон предназначен для ускорения протонов до энергии 5 МэВ. Каков должен быть радиус дуантов циклотрона, если индукция его магнитного поля 1 Т? Какова наименьшая продолжительность одного цикла работы этого ускорителя, если начальная энергия протонов пренебрежимо мала, а амплитуда напряжения между дуантами равна 16 кВ? Влиянием зависимости массы протона от его скорости пренебречь.

Дано:

$$W_{\text{пр}} = 8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$U = 16000 \text{ В}$$

$$B = 1 \text{ Т}$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$R = ?$$

$$t_{\text{мин}} = ?$$

Решение. Протон движется в циклотроне по спиральной орбите, состоящей из полуокружностей с постепенно увеличивающимся радиусом. Радиус полуокружности, описываемой протоном внутри дуанта, по формуле (18.19) равен

$$r = \frac{m}{q} \frac{v}{B} = \frac{\sqrt{2m}}{qB} \sqrt{\frac{mv^2}{2}} = \frac{\sqrt{2m}}{qB} \sqrt{W},$$

где m и q — соответственно масса и заряд протона, B — индукция магнитного поля и W — энергия протона

Радиус R дуантов должен быть больше максимального значения радиуса r орбиты, соответствующего расчетному значению $W_{\text{пр}}$ энергии протона:

$$R > \frac{\sqrt{2m}}{qB} \sqrt{W_{\text{пр}}}$$

Период обращения протона в циклотроне по формуле (18.20) равен $T = \frac{2\pi}{B} \frac{m}{q}$. За это время протон дважды проходит через ускоряющее электрическое поле между дуантами и его энергия возрастает на величину $\Delta W = 2qU$, где U — напряжение между дуантами в момент прохождения протона через их электрическое поле.

Продолжительность одного цикла ускорения протона до энергии $W_{\text{пр}}$ равна

$$t = \frac{W_{\text{пр}}}{\Delta W} T = \frac{W_{\text{пр}}}{2qU} \frac{2\pi m}{qB} = \frac{\pi m W_{\text{пр}}}{q^2 B U}$$

Это время будет минимальным, если U равно амплитудному значению $U_{\text{макс}}$, т. е.

$$t_{\text{мин}} = \frac{\pi m W_{\text{пр}}}{q^2 B U_{\text{макс}}}$$

Произведем вычисления в СИ:

$$R > \frac{\sqrt{2m}}{qB} \sqrt{W_{\text{пр}}} = \frac{\sqrt{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \sqrt{8 \cdot 10^{-19}} \text{ м} = 0,323 \text{ м.}$$

$$t_{\text{мин}} = \frac{\pi m W_{\text{пр}}}{q^2 B U_{\text{макс}}} = \frac{3,14 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 8 \cdot 10^{-19}}{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 16000} \text{ с} = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$