

*Раздел 7. Электростатическое поле и
вещество. Постоянный ток.*

Тема 1. Электростатическое поле в проводниках.

Тема 2. Электрические цепи.

Тема 3. Диэлектрики и электрическое поле.

Для работы с тестами скорректируйте Word:
Сервис→Макрос→Безопасность→Низкая

Тема 1. Электростатическое поле в проводниках.

П.1.Свободные заряженные частицы в электростатическом поле.

П.2. Электроны в металле и электростатическое поле.

П.3.Величина тока. Плотность тока.

П.4.Закон Ома в локальной (дифференциальной) форме.

П.5. Закон Джоуля-Ленца в локальной (дифференциальной) форме.

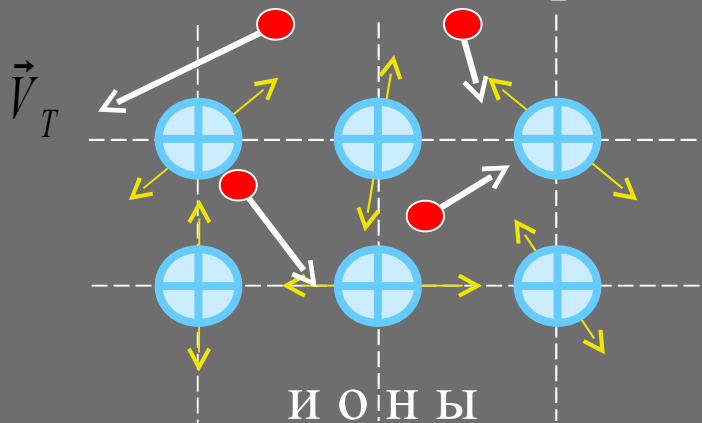
П.1.Свободные заряженные частицы в электростатическом поле.

Свободными зарядами называются заряженные частицы, способные перемещаться в объеме всего тела от одной границы до другой.

Тело, имеющее свободные заряды называется проводником.

Структура металла

свободные электроны

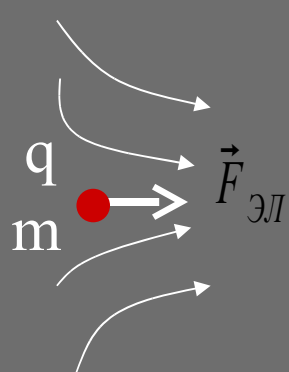


Свободные электроны металла находятся в постоянном хаотическом движении, которое называется тепловым.

При этом они часто сталкиваются с ионами кристаллической решетки.

ПРОБЛЕМА: Как будут вести себя свободные заряженные частицы, при наличии электрического поля в окружающем их пространстве?

На каждую заряженную частицу, находящуюся в электрическом поле, будет действовать электрическая сила.



$\vec{F}_{эл} = q\vec{E}$. Второй закон Ньютона $m\vec{a} = \vec{F}_{сум}$.

Опуская индекс, получим $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$.

Отсюда скорость $\vec{v}(t') = \vec{v}_0 + \int_0^{t'} \frac{\vec{F}}{m} dt''$ и

закон движения $\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \int_0^t \left(\int_0^{t'} \frac{\vec{F}}{m} dt'' \right) dt'$.

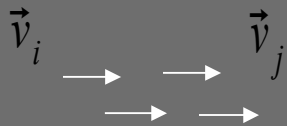
Для электрической силы:
$$\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{v}_0(t) + \int_0^t \left(\int_0^{t'} \frac{q}{m} \vec{E} dt'' \right) dt'.$$

Рассмотрим частный случай однородного поля:
$$\vec{E}(\vec{r}) = \overrightarrow{const}$$

Тогда для скорости
$$\vec{v}_i(t) = \frac{q}{m} \vec{E} t.$$

Пусть все частицы одинаковы, т.е.
$$q_i = q_j = q$$
$$m_i = m_j = m$$

и не имеют начальной скорости. Тогда возникает коллективное движение частиц с одной и той же скоростью (ток) вдоль направления поля:
$$\vec{v}_i = \vec{v}_j = \vec{v}.$$



Электрический ток есть направленное движение заряженных частиц.

Такое возможно в электроннолучевой трубке, а коллективно движущиеся электроны образуют электронный луч (пучок).

Пучком называется совокупность частиц, движущихся с одной и той же скоростью. Тонкий пучок называют лучом.

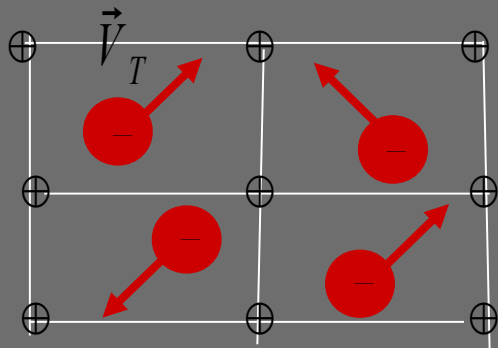
Замечание: Полученная формула для скорости заряда в однородном поле не учитывает эффектов теории относительности (формула нерелятивистская).

Использование релятивистской динамики приводит к тому, что скорость частицы не может возрасти до бесконечности, но ограничена предельной скоростью - скоростью света.

П.2. Электроны в металле и электростатическое поле.

Проблема: как протекает ток в проводниках?

Наиболее характерными проводниками являются металлы.



В узлах кристаллической решетки расположены положительно заряженные ионы.

Ион – это атом, у которого отделен один электрон.

Свободные электроны в металле называются электронами проводимости.

Они участвуют в хаотическом движении, которое называется тепловым.

Средняя скорость теплового движения $\langle V_T \rangle$ (средняя тепловая скорость) имеет в металле значение порядка 10^5 м/с.

Электроны могут сталкиваться с ионами.

Согласно простейшей модели они сталкиваются, как абсолютно упругие шарики.

После столкновения величина скорости меняется мало, а направление меняется хаотически.

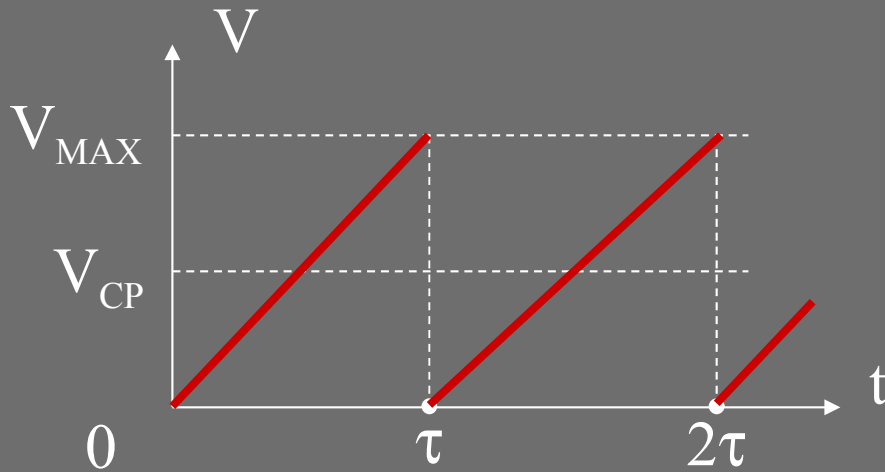
В однородном электрическом поле, созданном в металле каким-либо источником, на каждый свободный электрон действует постоянная электрическая сила и возникнет ускорение

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{q}{m} \vec{E} = \overrightarrow{const}.$$

Скорость изначально покоящегося электрона линейно растёт:

$$\vec{V} = \vec{a} \cdot t = \frac{q}{m} \vec{E} \cdot t.$$

τ – время свободного пробега, есть время движения электрона между двумя последовательными столкновениями.



Максимальная скорость направленного движения электрона (при $t = \tau$):

$$\vec{V}_{MAX} = \frac{q}{m} \vec{E} \tau.$$

Средняя скорость направленного движения $\vec{V}_{CP} = \frac{\vec{V}_{MAX}}{2} = \frac{q\tau}{2m} \vec{E}.$

Коэффициент пропорциональности между средней скоростью направленного движения и напряженностью электрического поля называется подвижностью:

$$\vec{V}_{CP} = \mu \vec{E}.$$

ТЕСТ

$$\mu \equiv \frac{q\tau}{2m}.$$

Обозначим λ среднюю длину свободного пробега электрона.

Это есть расстояние, пролетаемое электроном между двумя последовательными столкновениями.

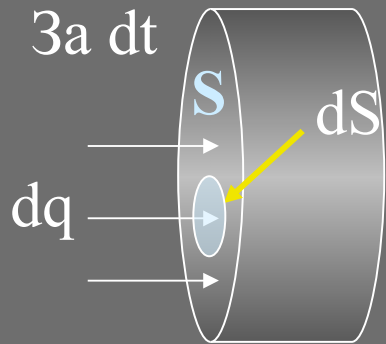
Расчет показывает, что средняя скорость направленного движения много меньше средней тепловой: $V_{CP} \lll V_T$.

Поэтому $\tau = \frac{\lambda}{V_T}$ и $\mu = \frac{q\lambda}{2mV_T}$.

ВЫВОД: С ростом температуры тепловая скорость растет, а подвижность уменьшается.

П.3. Величина тока. Плотность тока.

ПРОБЛЕМА: Каковы характеристики тока и как они связаны с напряженностью электрического поля?



dq - элементарный заряд, перенесенный через элементарную площадку dS за время dt .

$dI = \frac{dq}{dt}$ - величина (сила) элементарного тока.

$I = \frac{dQ}{dt}$ - величина тока через все сечение проводника S , где dQ - заряд, переносимый через S за dt .

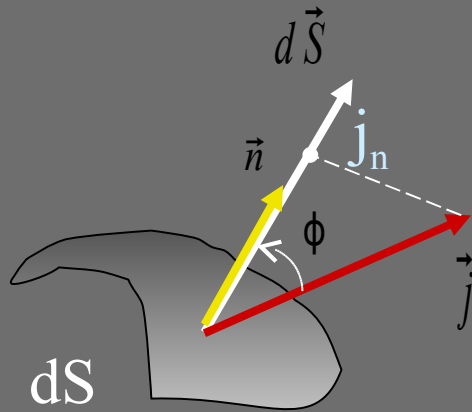
Заряд q , переносимый через элементарную площадку dS провода за время t :

$$q(t) = \int_0^t dI \cdot \dot{} dt'$$

Локальная характеристика тока $|j| = \frac{dI}{dS}$, называется «плотностью тока».

Плотность тока j – есть локальная (в точке) характеристика электрического тока, численно равная отношению элементарного тока dI , к элементарной площадке dS , через которую этот ток протекает,

Вектор $d\vec{S}$ считается направленным по нормали к поперечному сечению.



Связь элементарного тока с плотностью тока такова:

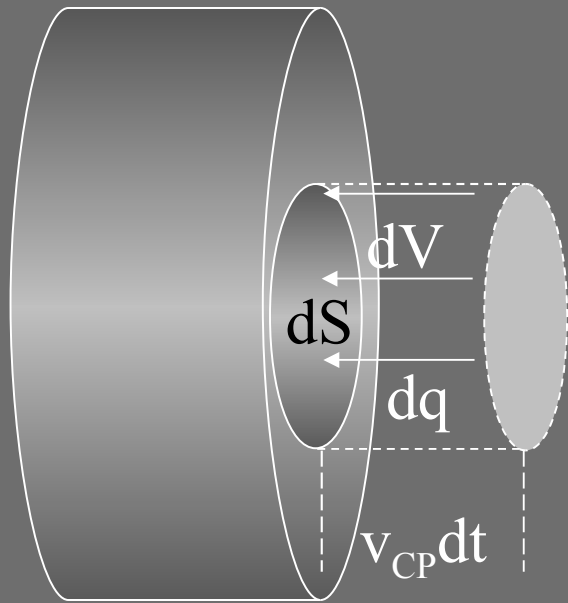
$$dI = \vec{j} d\vec{S} = j_n \cdot dS = j dS \cos \phi .$$

Для суммарного тока

$$I(S) = \int_S dI = \int_S \vec{j} d\vec{S} .$$

П.4.Закон Ома в локальной (дифференциальной) форме.

ЗАДАЧА 1: Установить связь характеристик тока с характеристиками движения заряженных частиц.



Пунктирный цилиндр объемом dV это область, в которой расположены заряженные частицы, попадающие на площадку dS за время dt .

Элементарный заряд dq в объеме dV равен $dq = qN = qn dV = qn dS v_{cp} dt$.

Тогда $dI = qn v_{cp} dS$ и $\frac{dI}{dS} = qn v_{cp}$.

Используя определение плотности тока, получим: $\vec{j} = qn \vec{v}_{cp}$.

ЗАДАЧА 2: Установить связь плотности тока с напряженностью электрического поля.

В предыдущую формулу, подставим выражение для средней скорости: $\vec{j} = qn\mu\vec{E}$.

Назовем «проводимостью» $\sigma = qn\mu = \frac{q^2 n \lambda}{2m \langle v_T \rangle}$.

Закон Ома в локальной (дифференциальной) форме: $\vec{j} = \sigma \vec{E}$.

Плотность тока в веществе пропорциональна напряженности электрического поля.

Проводимость σ есть характеристика электрических свойств вещества являющаяся коэффициентом пропорциональности между напряженностью поля и плотностью тока.

ТЕСТ

ТЕСТ

П.5. Закон Джоуля-Ленца в локальной (дифференциальной) форме.

ПРОБЛЕМА: Какая энергия выделяется в проводящем веществе при протекании по нему электрического тока?

Используем модель абсолютно упругого столкновения электрона с ионом, расположенным в узле кристаллической решетки.

Объемная плотность тепловой мощности есть отношение

$$w_T = \frac{dE_T}{dt \cdot dV},$$

где dE_T - тепловая энергия, выделившаяся в объеме dV за время dt .

При одном столкновении кинетическая энергия направленного движения частицы полностью переходит в тепловую.

Тогда в объеме dV , где находятся dN частиц, каждая из которых сталкивается N_{CT} раз за время dt , выделится тепловая энергия, равная

$$dE_T = E_{KI} N_{CT} dN.$$

$$E_{KI} = \frac{mV_{max}^2}{2}$$

— это максимальная кинетическая энергия направленного движения одной частицы перед столкновением.

Она полностью переходит в тепловую.

Из определения частоты столкновений ν_{CT} получим $N_{CT} = \nu_{CT} \cdot dt$.

Из определения концентрации $dN = n \cdot dV$.

Из уравнения для средней скорости $V_{CP} = \mu E$ получим выражение для максимальной скорости $V_{MAX} = 2\mu E$.

СРС ¼ стр. Используйте все полученные уравнения связи и получите

$w_T = \sigma E^2$ - закон Джоуля-Ленца в локальной форме.

Используя закон Ома в локальной форме можно получить, еще одно уравнение для w_T : $w_T = \vec{j} \cdot \vec{E}$.

ТЕСТ