

Лекция 16. Эмиссия электронов из металла.

Работа выхода электрона из металла. Термоэлектронная эмиссия, формула Ричардсона — Дэймана. Эффект Шоттки. Холодная (автоэлектронная) эмиссия.

Электронная эмиссия

Электронная эмиссия - это явление испускания электронов поверхностью твердого тела или жидкости.

Термоэлектронная эмиссия (ТЭ) - электронная эмиссия, возникающая в результате нагрева.

Электростатическая или автоэлектронная эмиссия - эмиссия электронов, вызванная наличием у поверхности тела сильного электрического поля.

Фотоэлектронная эмиссия (ФЭ) или внешний фотоэффект — эмиссия электронов из вещества под действием падающего на его поверхность излучения.

Вторичная электронная эмиссия - испускание электронов поверхностью твердого тела при её бомбардировке электронами.

Ионно-электронная эмиссия - испускание электронов металлом при его бомбардировке ионами.

Криогенная электронная эмиссия - испускание электронов ультрахолодными, охлажденными до криогенных температур поверхностями.

Работа выхода электронов из металла.

Свободные электроны относительно свободно перемещаются в пределах всего объема образца металла. Это вызвано тем, что внутри металла электрическое поле ионов кристаллической решетки является «почти» усредненным, и поэтому суммарная сила, действующая на электроны в глубине металла, т.е. вдали от поверхности образца, «почти» равна нулю. Обозначим потенциал этого усредненного поля как Φ_0 . Тогда внутри металла энергия взаимодействия электрона с ионным полем равна $W_{\text{ВНУТР}_\text{ЭЛ}} = -e \cdot \Phi_0$. Однако, электроны внутри металла движутся. Поэтому полная энергия электрона внутри металла равна сумме кинетической и потенциальной

$$W_{\text{ВНУТР}} = W_{\text{ВНУТР}_\text{ЭЛ}} + W_{\text{ВНУТР}_\text{КИН}} = -e \cdot \Phi_0 + W_{\text{ВНУТР}_\text{КИН}}.$$

Работа, необходимая для выхода электрона из металла

$$A = W_{\text{КОНЕЧ}} - W_{\text{НАЧ}}$$

При удалении электрона от металла на большое расстояние энергия взаимодействия равна нулю $W_\infty = 0$, поэтому для минимальной работы получаем, что $W_{\text{КОНЕЧ}} = 0$. Т.к. $W_{\text{НАЧ}} = W_{\text{ВНУТР}}$. Т.к. работа выхода электрона из металла равна минимальной работе, то

$$A_{\text{MIN}} = e \cdot \Phi_0 - (W_{\text{ВНУТР}_\text{КИН}})_{\text{MAX}}.$$

При $T=0$ максимальная кинетическая энергия электрона равна энергии Ферми

$$(W_{\text{ВНУТР}_\text{КИН}})_{\text{MAX}} = E_F$$

Поэтому при $T=0$ работа выхода равна однозначно определённой величине

$$A_{\text{ВЫХ}_0} = e \cdot \Phi_0 - E_F.$$

При $T>0$ в металле часть электронов приобретают энергию $(W_{\text{ВНУТР}_\text{КИН}})_{\text{MAX}} > E_F$, поэтому, вообще говоря, минимальная работа уже не определяется однозначно, т.к. она зависит от температуры, и с увеличением T уменьшается $A_{\text{MIN}} < A_{\text{ВЫХ}}$.

Величина работы выхода зависит также, например, от состояния поверхности металла. Если, в частности на поверхность металла нанести тонкий слой атомов или молекул другого вещества, то это повлияет на величину работы выхода.

Термоэлектронная эмиссия

При повышении температуры часть электронов приобретает энергию $(W_{\text{ВНУТР}_\text{КИН}})_{\text{MAX}} > E_F$.

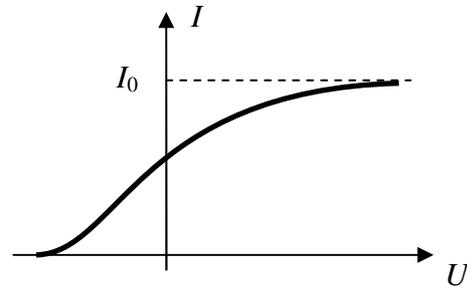
$$A_{MIN} = e \cdot \phi_0 - E_F - \left[(W_{ВНУТР_КИН})_{MAX} - E_F \right] = A_{ВЫЛ} - \left[(W_{ВНУТР_КИН})_{MAX} - E_F \right]$$

Для части электронов при повышении температуры может быть справедливо равенство

$$\left[(W_{ВНУТР_КИН})_{MAX} - E_F \right] > A_{ВЫЛ}.$$

Поэтому эти электроны способны выйти из металла.

Если образец металла поместить во внешнее электрическое поле, то вышедшие электроны смогут создать электрический ток, который называется *термоэлектронным током*.



Вольтамперная характеристика

Термоэлектронную эмиссию можно наблюдать, например, в устройстве, которое называется *вакуумный диод*, основным элементом которой является катод, выполненный из проволоки из тугоплавкого металла и анод, выполненный в виде цилиндра, коаксиального с проволокой. Катод и анод находятся в колбе, из которой откачан воздух.

Вакуумный диод включается в электрическую цепь. При этом напряжение между катодом и анодом можно изменять. Если электроны, вылетающие с катода при его нагреве, достигают анода, то в цепи протекает электрический ток.

Плотность термоэлектронного тока насыщения определяется формулой Ричардсона-Дэшмана

$$j_s = A \cdot T^2 e^{-\frac{A_B}{kT}}$$

где $A = 1,20 \cdot 10^6 \text{ A}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^2)$ – универсальная константа.

Как следует из этой формулы плотность тока насыщения сильно зависит как от температуры металла, так и от работы выхода. Поэтому при изготовлении электронных ламп проводят специальную обработку катода для снижения работы выхода.

Формула Ленгмюллера.

Найдём зависимость плотности тока насыщения от напряжения между катодом и анодом. Для этого рассмотрим распределение потенциала электрического поля между катодом и анодом, вызванное наличием эмиссионных электронов. Если предположить, что распределение зарядов в среднем «постоянное» во времени, то соответствующую задачу можно рассматривать как электростатическую. Поэтому следует рассмотреть уравнение Пуассона для потенциала

$$\Delta \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}.$$

Для простоты, предположим, что задача одномерная, т.е. все параметры зависят только от одной координаты «x». Тогда уравнение Пуассона примет вид

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}.$$

Если напряжение между катодом и анодом равно U , то граничные условия примут вид: потенциал на катоде равен нулю $\phi(x=0) = 0$, а на аноде – величине напряжения $\phi(x=l) = U$.

Плотность эмиссионного тока равна $j = env$ (n – концентрация электронов, e – величина элементарного заряда, v – средняя скорость упорядоченного движения), объемная плотность заряда $\rho = -en$ (заряд электронов - отрицательный), поэтому $\rho = -\frac{j}{v}$.

Изменение кинетической энергии электронов равно работе кулоновской силы $\frac{mv^2}{2} = e\varphi$,

где $\varphi - 0 = \varphi$ - разность потенциалов между катодом и данной точкой поля. Поэтому $v = \sqrt{\frac{2e\varphi}{m}}$

В итоге, получаем уравнение для потенциала $\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{j}{\sqrt{\frac{2e\varphi}{m}}}$. Считая плотность тока постоянной величиной, ищем решение этого уравнения в виде $\varphi = cx^w$. Тогда первое граничное условие будет удовлетворено «автоматически».

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{j}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{m}{2e}} \frac{1}{\sqrt{\varphi}}, \quad cx^{w-2} w(w-1) = \frac{j}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{m}{2e}} \frac{1}{\sqrt{c}} x^{-\frac{w}{2}}, \quad \text{откуда } w = \frac{4}{3}.$$

Подставляя второе граничное условие, находим $c = \frac{U}{l^3}$. Тогда из $\frac{U}{l^3} \frac{4}{3} \left(\frac{4}{3} - 1 \right) = \frac{j}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{m}{2e}} \frac{1}{\sqrt{\frac{U}{l^3}}}$ на-

ходим связь плотности тока и напряжения между катодом и анодом $j = \frac{4}{9} \frac{\epsilon_0}{l^2} \sqrt{\frac{2e}{m}} \cdot U^{3/2}$, т.е.

$$j = a \cdot U^{3/2}.$$

Это выражение носит название закон «трёх вторых» или закон Ленгмюллера (Чайльда-Ленгмюллера-Богуславского).

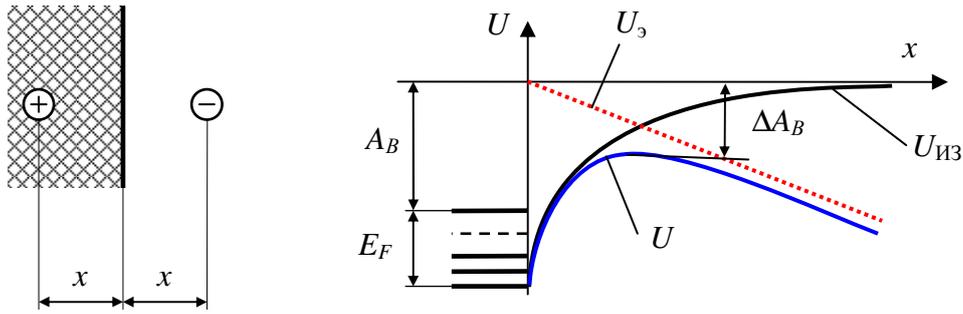
Эффект Шоттки

При выходе электронов из металла, последний приобретает положительный заряд, что приводит к появлению электрических сил, препятствующих выходу электронов. При этом между катодом и анодом устанавливается устойчивое пространственное распределение отрицательного заряда, также препятствующего выходу электронов. Как говорят, на границе металла появляется потенциальный барьер, препятствующий эмиссии электронов. Величину этого барьера можно уменьшить, и тем самым усилить эмиссию электронов, если приложить внешнее электрическое поле. Это явление называется *эффектом Шоттки*.

Вальтер Шоттки (Walter Schottky) - немецкий физик. Внёс фундаментальный вклад в физические основы эмиссионной электроники (изобрёл триод, установил зависимость для эмиссионного тока - Шоттки эффект, предложил супергетеродинный принцип усиления) и физики полупроводников (предложил механизм проводимости, исследовал барьер металл - полупроводник и создал теорию полупроводникового диода - диода Шоттки).

Силу взаимодействия вышедшего электрона с металлом можно найти, используя метод

электрических изображений $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e \cdot e}{(2x)^2}$, тогда энергия взаимодействия $U_{из} = -\frac{1}{16\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{x}$.



Пусть вблизи поверхности металла есть электрическое поле, вектор напряжённость которого \vec{E}_B направлен к поверхности металла. Тогда на вышедшие электроны будет действовать сила $\vec{F} = -e\vec{E}_B$, вектор которой направлен от металла. Энергия для этой силы имеет вид $U_3 = -eE_B x$. Тогда суммарная энергия электрона, вышедшего из металла равна

$$U = U_0 + U_{ИЗ} + U_3 = U_0 - \frac{1}{16\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{x} - eE_B x.$$

где $U_0 = E_F + A_B$ - энергия электрона внутри металла.

Найдем максимум этого выражения $U = \left(U_0 - \frac{1}{16\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{x} - eE_B x \right)' = \frac{1}{16\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{x^2} - eE_B = 0,$

$$x = \sqrt{\frac{1}{16\pi\epsilon_0} \frac{e}{E_B}}, \quad U_{MAX} = U_0 - 2 \frac{e^2 \sqrt{E_B}}{\sqrt{16\pi\epsilon_0}}.$$

Поэтому работа выхода уменьшится на величину $\Delta A_B = U_0 - U_{MAX} = 2 \frac{e^2 \sqrt{E_B}}{\sqrt{16\pi\epsilon_0}}.$

Следовательно, плотность термоэмиссионного тока

$$j_S = A \cdot T^2 e^{-\frac{A_B - \Delta A_B}{kT}} = A \cdot T^2 e^{\frac{\Delta A_B}{kT}} e^{-\frac{A_B}{kT}} = A \cdot T^2 e^{\frac{2e^2 \sqrt{E_B}}{kT \sqrt{16\pi\epsilon_0}}} e^{-\frac{A_B}{kT}}$$

увеличится.

Т.к. при отсутствии внешнего электрического поля плотность термоэмиссионного тока равна

$$j_S = A \cdot T^2 e^{-\frac{A_B}{kT}},$$

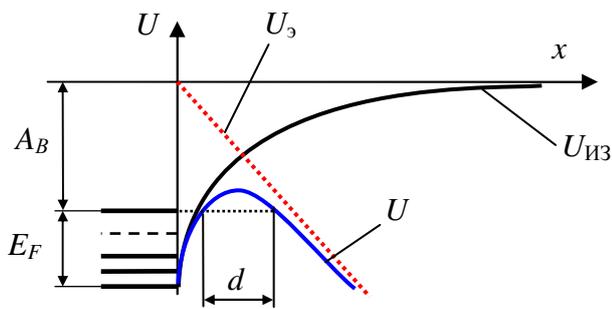
то изменение плотности тока при наличии внешнего электрического поля с величиной напряжённости E_B равно

$$j_{S_{-E_B}} = j_S e^{\frac{2e^2 \sqrt{E_B}}{kT \sqrt{16\pi\epsilon_0}}} = j_S e^{0,44 \frac{\sqrt{E_B}}{T}}.$$

Данная формула хорошо согласуется с экспериментальными данными лишь при небольших значениях напряжённости. При увеличении напряжённости внешнего электрического поля всё большую роль начинает играть холодная эмиссия..

Холодная (автоэлектронная) эмиссия.

Приложенное внешнее электрическое поле может привести к уменьшению ширины потенциального барьера вблизи поверхности металла, что приведёт выходу электрона из металла за счёт туннельного эффекта. Это явление называется холодной (автоэлектронной) эмиссией.



Если напряжённость внешнего поля достаточно высокая, то это приводит к сужению потенциального барьера для электронов с энергией, порядка энергии Ферми. Поэтому уже при низких температурах возможен туннельный выход электронов. Поэтому это явление и получило название холодная эмиссия.

Для оценки плотности тока можно пренебречь полем, возникающим из-за выхода электрона из металла, а рассматривать только

внешнее электрическое поле.

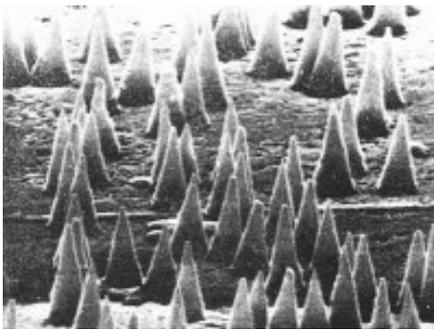
Коэффициент прозрачности барьера для частиц с энергией E

$$D \approx \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_0^d \sqrt{2m(U_0 - eE_B x - E)} dx\right) = \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m}}{3\hbar e E_B} (U_0 - E)^{3/2}\right)$$

где ширина барьера d определяется равенством $U_0 - eE_B d = E$.

Т.к. коэффициент прозрачности $D \sim \exp\left(-\frac{1}{E_B}\right)$, то для плотности тока можно написать соот-

ношение $j = j_0 \exp\left(-\frac{\bar{E}_0}{E_B}\right)$, где $\bar{E}_0 \approx 10^8 \dots 10^9$ В/м. Поэтому значительная плотность тока холодной эмиссии достигается при таких же значениях напряжённости внешнего электрического поля.



С помощью автоэлектронной эмиссии принципиально возможно получение плотности тока $10^6 \div 10^8$ А/см², но для этого нужны эмиттеры со специальной поверхностью в виде совокупности большого числа острий, получение которой в промышленных масштабах является весьма трудоёмкой задачей. Кроме того, увеличение плотности тока до 10^8 А/см² приводит к взрывообразному разрушению острий и всего эмиттера.

Оказывается, что существует возможность получения плотности тока до 10^9 А/см² при так называемой *взрывной электронной эмиссии*, обусловленной взрывами микроострий на катоде. Ток взрывной электронной эмиссии необычен по структуре. Он состоит из отдельных порций электронов $10^{11} \div 10^{12}$ штук, имеющих вид электронных лавин и получивших название *эктонов* (начальные буквы «*explosive centre*»). Время образования лавин $10^{-9} \div 10^{-8}$ с.

Появление электронов в эктоне вызвано быстрым перегревом микроучастков катода и является, по существу, разновидностью термоэлектронной эмиссии. Существование эктона проявляется в образовании кратера на поверхности катода. Прекращение эмиссии электронов в эктоне обусловлено охлаждением зоны эмиссии за счет теплопроводности, уменьшения плотности тока, испарения атомов.

Взрывная эмиссия электронов и эктоны играют фундаментальную роль в вакуумных искрах и дугах, в разрядах низкого давления, в сжатых и высокопрочных газах, в микропромежутках, т.е. там, где в наличии есть электрическое поле высокой напряженности на поверхности катода.

Явление взрывной электронной эмиссии послужило основой для создания импульсных электрофизических установок, таких как сильноточные ускорители электронов, мощные импульсные и рентгеновские устройства, мощные релятивистские сверхвысокочастотные генераторы. Например, импульсные ускорители электронов имеют мощность 10^{13} Вт и более при длительности импульсов $10^{-10} \div 10^{-6}$ с, токе электронов 10^6 А и энергии электронов $10^4 \div 10^7$ эВ. Такие

пучки широко используются для исследований в физике плазмы, радиационной физике и химии, для накачки газовых лазеров и пр.

Заключение. При небольших величинах напряжения между катодом и анодом плотность тока (насыщения) зависит от приложенного напряжения по закону «трех вторых». В этом случае между катодом и анодом устанавливается устойчивое во времени пространственное распределение отрицательного заряда, мешающее свободному выходу электронов из катода.

При увеличении напряжения (и напряженности) электронное облако смещается от катода, что позволяет электронам свободнее выходить из катода. Это соответствует эффекту Шоттки.

При ещё большем увеличении напряжённости электрического поля начинают проявляться квантово-механические явления, выражающиеся в туннелировании электронов из металла в окружающее пространство, что вызывает увеличение плотности тока насыщения.

Существует некоторое предельное значение плотности тока насыщения, при котором характер эмиссии электронов меняется на взрывной с образованием *эктонов* – сгустков или лавин электронов, и сопровождающийся плавлением материала катода.