

Тема 6. ЭМИССИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ПРОВОДНИКОВ. КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА ГРАНИЦАХ ПРОВОДНИКОВ

6.1. Эмиссия электронов из проводников

6.1.1. Термоэлектронная эмиссия

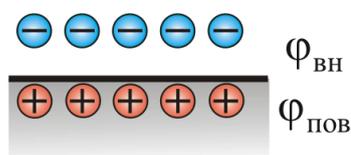
6.1.2. Холодная и взрывная эмиссия

6.1.3. Фотоэлектронная эмиссия

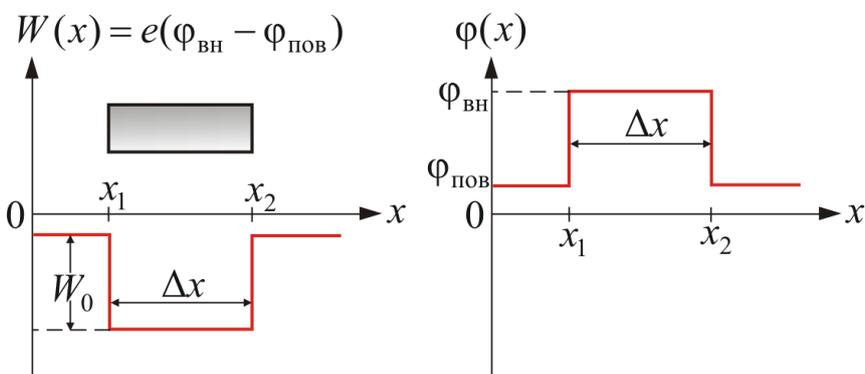
6.2. Контактные явления на границе раздела двух проводников

6.1. Эмиссия электронов из проводников

Уже отмечалось, при переходе границы раздела между проводником и вакуумом скачком изменяются напряженность и индукция электрического поля. С этим связаны специфические явления. Электрон свободен только в границах металла. Как только он пытается перейти границу «металл – вакуум», возникает кулоновская сила притяжения между электроном и образовавшимся на поверхности избыточным положительным зарядом.



Вблизи от поверхности образуется электронное облако, и на границе раздела формируется двойной электрический слой с разностью потенциалов ($\varphi_{\text{вн.}} - \varphi_{\text{пов.}}$). Скачки потенциала на границе металла показаны на рисунке.



В занятом металлом объеме образуется потенциальная энергетическая яма, так как в пределах металла электроны свободны, и их энергия взаимодействия с узлами решетки равна нулю. За пределами металла электрон приобретает энергию W_0 . Это энергия притяжения $W_0 < 0$. Для того, чтобы покинуть металл, электрон должен преодолеть потенциальный барьер и совершить работу

$$A_{\text{вых}} = e(\varphi_{\text{вн}} - \varphi_{\text{пов}}). \quad (1)$$

Эту работу называют *работой выхода электрона из металла*. Для ее совершения электрону необходимо сообщить достаточную энергию $W \geq A_{\text{вых}}$.

6.1.1. Термоэлектронная эмиссия

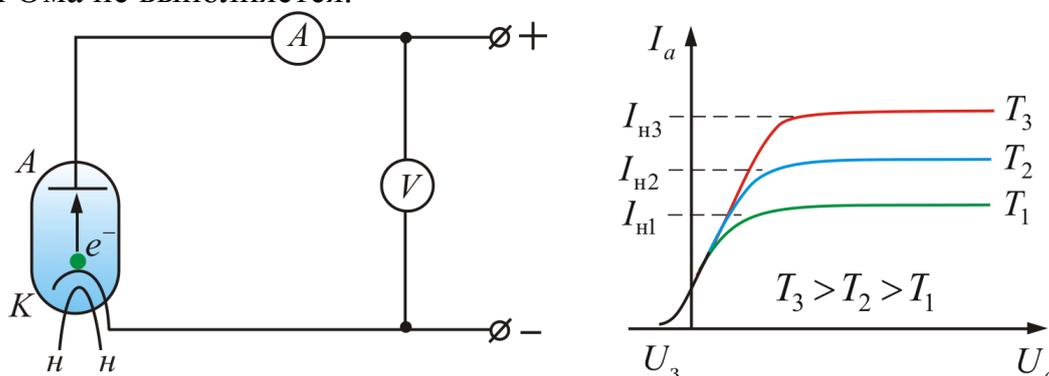
Величина работы выхода зависит от химической природы вещества, от его термодинамического состояния и от состояния поверхности раздела. Если энергия, достаточная для совершения работы выхода, сообщается электронам путем нагревания, то процесс выхода электронов из металла называют *термоэлектронной эмиссией*.

В классической термодинамике металл представляют в виде ионной решетки, заключающей в себе электронный газ. Считают, что сообщество свободных электронов подчиняется законам идеального газа. Следовательно, в соответствии с распределением Максвелла при температуре, отличной от 0 К, в металле есть какое-то количество электронов, тепловая энергия которых больше работы выхода. Эти электроны и покидают металл. Если температуру увеличить, то увеличивается и число таких электронов.

Явление испускания электронов нагретыми телами (эмиттерами) в вакуум или другую среду называется термоэлектронной эмиссией. Нагрев необходим для того, чтобы энергии теплового движения электрона было достаточно для преодоления сил кулоновского притяжения между отрицательно заряженным электроном и индуцируемым им на поверхности металла положительным зарядом при удалении с поверхности. Кроме того, при достаточно высокой температуре над поверхностью металла создается отрицательно заряженное электронное облако, препятствующее выходу электрона с поверхности металла в вакуум. Этими двумя и, возможно, другими причинами определяется величина работы выхода электрона из металла.

Явление термоэлектронной эмиссии открыто в 1883 г. Эдисоном, знаменитым американским изобретателем. Это явление наблюдалось им в вакуумной лампе с двумя электродами – анодом, имеющим положительный потенциал, и катодом с отрицательным потенциалом. Катодом

лампы может служить нить из тугоплавкого металла (вольфрам, молибден, тантал и др.), нагреваемая электрическим током (рисунок 6.3). Такая лампа называется вакуумным диодом. Если катод холодный, то ток в цепи катод – анод практически отсутствует. При повышении температуры катода в цепи катод – анод появляется электрический ток, который тем больше, чем выше температура катода. При постоянной температуре катода ток в цепи катод – анод возрастает с повышением разности потенциалов U между катодом и анодом и выходит к некоторому стационарному значению, называемому **током насыщения** I_n . При этом все термоэлектроны, испускаемые катодом, достигают анода. Величина тока анода не пропорциональна U , и поэтому для вакуумного диода закон Ома не выполняется.



На рисунке показаны схема вакуумного диода и вольт-амперные характеристики (ВАХ) $I_a(U_a)$. Здесь U_3 – задерживающее напряжение при котором $I = 0$.

6.1.2. Холодная и взрывная эмиссия

Электронную эмиссию, вызываемую действием сил электрического поля на свободные электроны в металле, называют **холодной эмиссией** или **автоэлектронной**. Для этого должна быть достаточной напряженность поля и должно выполняться условие

$$A_{\text{вых}} = e(\varphi_{\text{вн}} - \varphi_{\text{пов}}) \leq eEd, \quad (2)$$

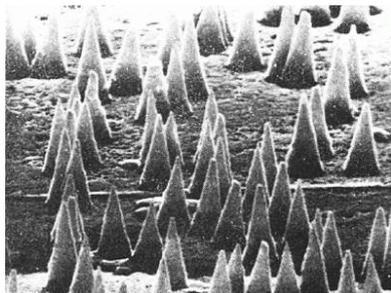
здесь d – толщина двойного электрического слоя на границе раздела сред. Обычно у чистых металлов $d \approx 10^{-10}$ м и $A_{\text{вых}} \approx 10^{-19}$ Дж = 1 эВ. При $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл получим $E = 10^{10}$ В/м. На практике же холодная эмиссия наблюдается при значении напряженности порядка $10^6 - 10^8$ В/м. Такое несоответствие относят на счет несостоятельности классических представлений для описания процессов на микроуровне.

Автоэлектронную эмиссию можно наблюдать в хорошо откачанной вакуумной трубке, катодом которой служит острие, а анодом – обычный электрод с плоской или мало изогнутой поверхностью. Напряженность электрического поля на поверхности острия с радиусом кривизны r и потенциалом U относительно анода равна

$$E = \frac{U}{r}.$$

При $r \sim 10^{-2}$ мм и $U \sim 10^3$ В, $E \sim 10^6$ В/см, что приведет к появлению слабого тока, обусловленного автоэлектронной эмиссией с поверхности катода. Сила эмиссионного тока быстро нарастает с повышением разности потенциалов U . При этом катод специально не разогревается, поэтому эмиссия и называется холодной.

С помощью автоэлектронной эмиссии принципиально возможно получение плотности тока $10^6 \div 10^8$ А/см², но для этого нужны эмиттеры в виде совокупности большого числа острий, идентичных по форме (рисунок 6.4), что практически невозможно, и, кроме того, увеличение тока до 10^8 А/см² приводит к взрывообразному разрушению острий и всего эмиттера.



Плотность тока АЭЭ в условиях влияния объемного заряда равна (закон Чайльда-Ленгмюра)

$$j = A E^{3/2} \leq 10^8 \text{ А/см}^{-2},$$

где $A = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \left(\frac{2e}{m} \right) E^{3/2} r^{-1/2}$ – коэффициент пропорциональности, определяемый геометрией и материалом катода.

Проще говоря, закон Чайльда-Ленгмюра показывает, что плотность тока пропорциональна $E^{3/2}$ (закон трех вторых).

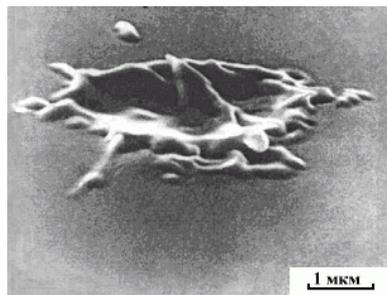
Током автоэлектронной эмиссии при концентрации энергии в микрообъемах катода до 10^4 Дж·м⁻¹ и более (при общей энергии 10^{-8} Дж) может инициироваться качественно иной вид эмиссии, обусловленный **взрывом микроострий на катоде**. При этом появляется ток электронов, который на порядки превосходит начальный ток – **наблюдается**

взрывная электронная эмиссия (ВЭЭ). ВЭЭ была открыта и изучена в Томском политехническом институте в 1966 г. коллективом сотрудников под руководством Г.А. Месяца.

Помимо автоэлектронной эмиссии существует и много других способов концентрации энергии в микрообъемах катода, приводящих к микровзрывам – обтекание микронеоднородностей плазмой, микропробой диэлектрических пленок, лазерный разогрев микроучастков катода, удар микрочастиц. ВЭЭ – это единственный вид электронной эмиссии, позволяющий получить потоки электронов мощностью до 10^{13} Вт с плотностью тока до 10^9 А/см².

Ток ВЭЭ необычен по структуре. Он состоит из отдельных порций электронов $10^{11} \div 10^{12}$ штук, имеющих характер электронных лавин, 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. Прекращение эмиссии электронов в эктоне обусловлено охлаждением зоны эмиссии за счет теплопроводности, уменьшения плотности тока, испарения атомов.



Существование эктона проявляется в образовании кратера на поверхности катода. 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 исполь-

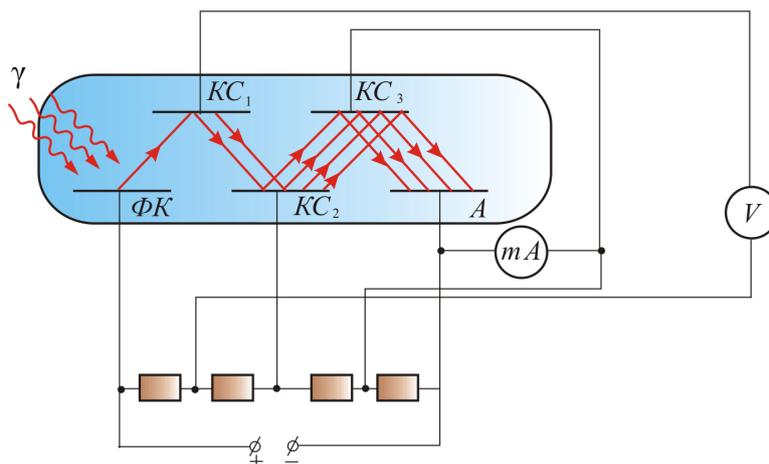
зуются для исследований в физике плазмы, радиационной физике и химии, для накачки газовых лазеров и пр.

6.1.3. Фотоэлектронная эмиссия

Фотоэлектронная эмиссия (фотоэффект) заключается в «выбивании» электронов из металла при действии на него электромагнитного излучения.

Закономерности фотоэффекта еще в большей степени не согласуются с классической теорией, чем в случае холодной эмиссии. По этой причине мы рассмотрим теорию фотоэффекта при обсуждении квантовых представлений в оптике. *Схема установки для исследования фотоэффекта и ВАХ аналогичны изображенным на рисунке 6.3.* Здесь, вместо разогрева катода, на него направляют поток фотонов или γ – квантов.

В физических приборах, регистрирующих γ – излучение, используют *фотоэлектронные умножители (ФЭУ)*. Схема прибора приведена на рисунке.

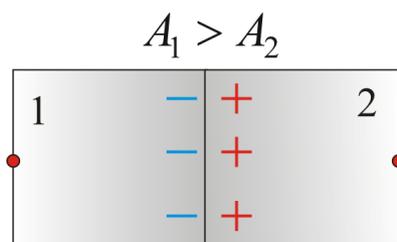


В нем используют два эмиссионных эффекта: *фотоэффект* и *вторичную электронную эмиссию*, которая заключается в выбивании электронов из металла при бомбардировке последнего другими электронами. Электроны выбиваются светом из фотокатода (ФК). Ускоряясь между ФК и первым эмиттером (КС₁), они приобретают энергию, достаточную, чтобы выбить большее число электронов из следующего эмиттера. Таким образом, умножение электронов происходит за счет увеличения их числа при последовательном прохождении разности потенциалов между соседними эмиттерами. Последний электрод называют коллектором. Регистрируют ток между последним эмиттером и коллектором. Таким образом, ФЭУ служит усилителем тока, а последний про-

порционален излучению, попадающему на фотокатод, что и используют для оценки радиоактивности.

6.2. Контактные явления на границе раздела двух проводников

Как показывает опыт, на контакте двух различных металлов образуется двойной электрический слой и соответствующая разность потенциалов.



Появление двойного электрического слоя обусловлено различием работ выхода электронов из металлов. Чем она больше, тем меньше вероятность перехода электронами границы раздела. Поэтому со стороны металла с большей работой выхода накапливается отрицательный заряд, а с противоположной – положительный. Это явление наблюдалось итальянским физиком Александро Вольта (1745 – 1827), который сформулировал два экспериментальных закона, известных как законы Вольта.

1. На контакте двух разных металлов возникает разность потенциалов, которая зависит от химической природы и от температуры спаяв.

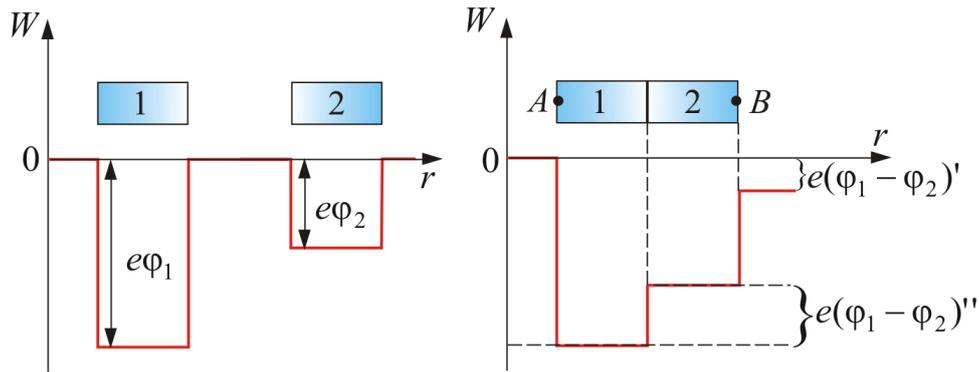
2. Разность потенциалов на концах последовательно соединенных проводников не зависит от промежуточных проводников и равна разности потенциалов, возникающей при соединении крайних проводников при той же температуре.

Результаты эксперимента можно объяснить с позиции классической электронной теории. Если принять, что потенциал за пределами металла равен нулю, то энергия электрона внутри металла с потенциалом φ_i определится выражением

$$W_i = e\varphi_i. \quad (3)$$

При соединении двух разных металлов с работами выхода

$$A_1 = e\varphi_1 \text{ и } A_2 = e\varphi_2,$$



возникает избыточный переход электронов из второго металла в первый, так как $A_2 < A_1$. В результате концентрация электронов n_1 в металле 1 увеличивается, по сравнению с n_2 , что порождает обратный избыточный поток электронного газа за счет диффузии, противоположный потоку, обусловленному разностью работ выхода.

Установившаяся разность потенциалов в равновесном состоянии определяется как:

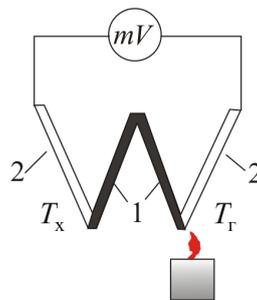
$$(\varphi_1 - \varphi_2) = (\varphi_1 - \varphi_2)' + (\varphi_1 - \varphi_2)''$$

где $(\varphi_1 - \varphi_2)'$ – разность потенциалов, обусловленная разными работами выхода электронов из металлов, а $(\varphi_1 - \varphi_2)''$ – разность потенциалов, возникающая на границе раздела за счет неодинаковой концентрации электронов в электронном газе.

Установившуюся разность потенциалов можно найти из выражения:

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$$

Явление возникновения контактной разности потенциалов и ее зависимость от температуры называют **термоэлектрическим эффектом** или **эффектом Зеебека**. Эффект Зеебека (**прямой термоэлектрический эффект**) заключается в появлении разности потенциалов в термопарах. Схема термопары состоящей из спая двух разных металлов 1 и 2, показана на рисунке.



На концах термопары возникает термоЭДС термопары E :

$$\varepsilon = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_x - T_r) = \alpha (T_r - T_x), \quad (4)$$

где T_r – температура горячего спая и T_x – температура холодного спая.

Таким образом $\varepsilon = \alpha (T_r - T_x)$ – термоЭДС термопары, где $\alpha = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$

– *постоянная термопары.*

Термопары применяют для измерения температуры. Батареи термопар используют как источники ЭДС для питания физических приборов.

Эффектом Пельтье называют **обратный термоэлектрический эффект**. Он заключается в том, что при пропускании тока через термопару, ее спай поглощает или выделяет тепло в зависимости от направления тока. Количество поглощенного тепла пропорционально плотности тока.

$$Q_{\Pi} = \Pi_{12} j, \quad (5)$$

где Π_{12} – **коэффициент Пельтье**, зависящий от материала контактирующих металлов. Эффект используют при изготовлении холодильников. Этот термоэлектрический эффект проявляется более эффективно, если используются полупроводники.