

Министерство образования Российской Федерации
Томский политехнический университет
Кафедра теоретической и экспериментальной физики

ИЗУЧЕНИЕ ВАКУУМНОГО ДИОДА

Методические указания к выполнению
виртуальной лабораторной работы № КомпЭ–04
по курсу физики
для студентов всех специальностей

Составитель: Макиенко А.В.

Томск 2002

УДК 535

Изучение вакуумного диода. Методические указания к выполнению виртуальной лабораторной работы № КомпЭ–04 по курсу физики для студентов всех специальностей.

Составитель доцент, к.ф.м.н. Макиенко А.В.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы методическим семинаром кафедры теоретической и экспериментальной физики _____ 2002г.

Зав. кафедрой

проф. Ю.Л. Пивоваров

Цель работы: знакомство с явлением термоэлектронной эмиссии и исследование вольт -амперной характеристики лампового диода.

Теоретические сведения.

Работа выхода из металла.

Металлы состоят из ионов, занимающих узлы кристаллической решётки, и бывших валентных электронов, которые при образовании металла отрываются от своих атомов и образуют так называемый электронный газ (или газ свободных электронов). Система электронов в металле даже при температурах в тысячи градусов вырождена, то есть поведение этих электронов не подчиняется законам классической ньютоновской механики, а подчиняется законам квантовой механики. Однако для объяснения (по крайней мере, качественного) некоторых свойств очень и очень грубые здесь классические законы всё же могут быть применены.

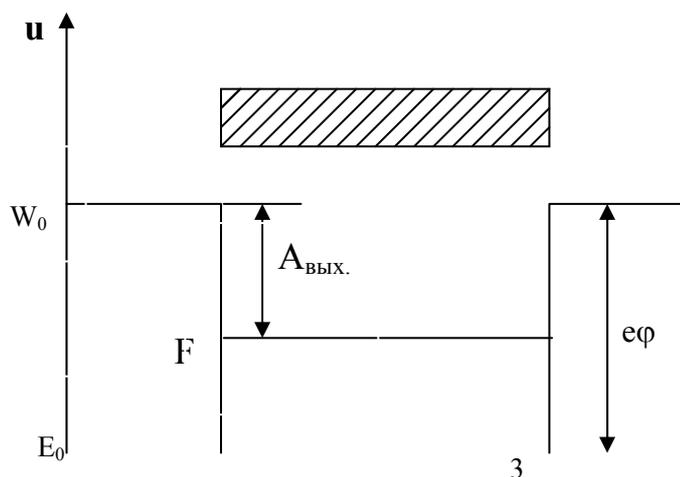
Электроны сравнительно свободно могут двигаться внутри металла с большими скоростями, однако свободно покинуть металл они не могут : этому мешают в основном две причины.

Во первых, весь металл электронейтрален, и если вдруг какой-то отрицательно заряженный электрон покидает его, то металл заряжается положительным зарядом и притягивает к себе покинувший его электрон, заставляя его возвращаться назад. С макроскопической точки зрения это выглядит так, как будто электрон индуцирует на поверхности металла заряд протоположного знака ; возникающие при этом силы , препятствующие вылету электрона, называют силами электрического изображения.

Во вторых, электроны гораздо легче и подвижнее ионов решетки, и поэтому при своём движении внутри металла они немного вылетают за пределы его границы . При этом образуется так называемый двойной электрический слой - что-то вроде конденсатора, положительную обкладку которого образуют ионы, а отрицательную - вылетевшие за их пределы электроны. Этот двойной слой тормозит движение следующих электронов и препятствует их вылету. Обе эти причины по степени своего проявления примерно равноправны.

В результате взаимодействия между электронами и положительными ионами решетки в поверхностном слое металлов появляется электрическое поле. Распределение потенциальной энергии электрона имеет вид потенциальной ямы. Таким образом, покинуть пределы металла удастся только тем электронам, энергия которых оказывается достаточной для преодоления потенциального барьера, имеющегося на поверхности.

Распределение потенциальной энергии электрона в ограниченном металле:



W_0 – уровень энергии покоящегося электрона вне металла,

E_0 – наименьшая энергия электронов проводимости (дно зоны проводимости),

$e\varphi = W_0 - E_0$ – высота потенциального барьера.

F – уровень Ферми.

Рис.1 -----

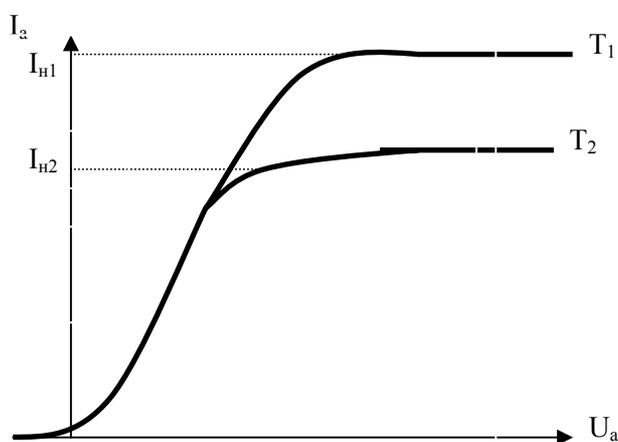
Наименьшая энергия, которую необходимо сообщить электрону, чтобы удалить его из металла в вакуум, называется **работой выхода**. Она зависит от вида металла : сравнительно мала для щелочных металлов и достаточно велика для тугоплавких металлов типа вольфрама или молибдена. Работа выхода по порядку величины составляет несколько электрон - вольт.

Дополнительную энергию для вылета электронов из металла можно сообщать различными способами. В этом случае часть электронов металла получает возможность покинуть металл и наблюдается **явление электронной эмиссии** (явление испускания электронов). В зависимости от того, каким способом сообщена энергия электронам, различают разные виды электронной эмиссии: термоэлектронная эмиссия, фотоэмиссия, вторичная электронная эмиссия.

Термоэлектронная эмиссия.

Свободные электроны внутри металла при обычных температурах обладают тепловыми скоростями, при которых средняя кинетическая энергия недостаточна для того, чтобы электрон мог выйти за пределы металла. По мере повышения температуры появляется все большее и большее число электронов, кинетическая энергия которых становится больше работы выхода электронов из металла, вследствие чего часть электронов выходит из металла. Это явление называют термоэлектронной эмиссией.

Явление термоэлектронной эмиссии используется в электронных лампах. Лампа с двумя электродами (анодом и катодом) называется диодом. Если катод лампы нагревать, пропуская ток через нить накала, и постепенно увеличивать напряжение между анодом и катодом лампы, то анодный ток будет увеличиваться, пока не достигнет насыщения.



Кривая изменения анодного тока I_a от анодного напряжения U_a называется **вольт-амперной характеристикой** лампы. На рис.2 изображены две характеристики, полученные при температурах T_1 и T_2 ($T_1 > T_2$)

Рис.2

Когда потенциал анода равен нулю, сила тока через диод мала. При увеличении положительного потенциала анода сила тока возрастает. При дальнейшем возрастании анодного напряжения сила тока достигает некоторого максимального значения I_n , называемого **током насыщения** диода, и почти перестает зависеть от анодного напряжения. При разных температурах значения тока насыщения оказываются различными и быстро увеличиваются при возрастании температуры катода. При этом увеличивается и то анодное напряжение, при котором устанавливается ток насыщения.

Как видно из графиков, вольт-амперная характеристика вакуумного диода оказывается нелинейной, а, следовательно, вакуумный диод представляет собой пример проводника, не подчиняющегося закону Ома. Объясняется это возникновением

пространственного заряда в пространстве между катодом и анодом при наличии термоэлектронной эмиссии. Этот пространственный заряд изменяет распределение потенциала в диоде. Если катод и анод представляют собой плоские пластины, параллельные друг другу (рис.3), то в отсутствие пространственного заряда (при холодном катоде) распределение потенциала между катодом и анодом, образующими плоский конденсатор, изображается прямой линией 1. При наличии же термоэлектронного тока (накаливание катода) между катодом и анодом возникает пространственный заряд и распределение потенциала изменяется (кривая 2)

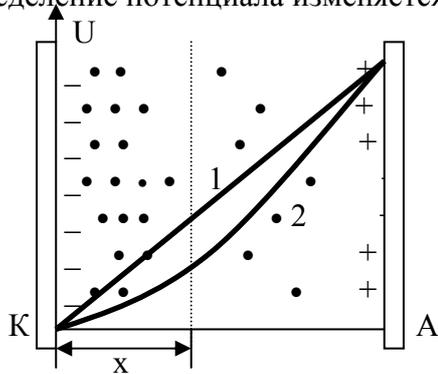


Рис.3

При этом значение потенциала в любой плоскости x оказывается меньше, чем в отсутствие пространственного заряда, а, следовательно, и скорости движения при наличии пространственного заряда уменьшаются. С увеличением анодного напряжения концентрация электронов в облаке пространственного заряда уменьшается. Поэтому и тормозящее действие пространственного заряда делается меньше, и анодный ток увеличивается.

Следует отметить, что распределение потенциала, изображенное кривой 2, получается в том случае, когда начальные скорости вылета электронов из катода достаточно малы и ими можно пренебречь. В противном случае распределение потенциала имеет более сложный вид.

Закон Богуславского –Ленгмюра.

При возрастании анодного напряжения ток диода возрастает. Зависимость тока диода от потенциала анода имеет вид:

$$I = CU^{3/2} \quad (1)$$

где C зависит от формы и размеров электродов. Для плоского катода $C = \frac{4}{9} \epsilon_0 \frac{S}{d^2} \sqrt{\frac{2e}{m}}$

где e/m –удельный заряд электрона, d – расстояние между катодом и анодом, S – поверхность катода (равная поверхности анода), ϵ_0 –электрическая постоянная.

Формула (1) носит название закона **Богуславского – Ленгмюра** или «закона 3/2». Когда потенциал анода становится настолько большим, что все электроны, испускаемые катодом за каждую единицу времени, попадают на анод, ток достигает максимального значения и перестает зависеть от анодного напряжения. Плотность тока насыщения, то есть сила тока насыщения на каждую единицу поверхности катода, характеризует эмиссионную способность катода, которая зависит от природы катода и его температуры.

Формула Ричардсона.

Число электронов в металле, способных преодолеть потенциальный барьер на поверхности и выйти в вакуум, быстро увеличивается при повышении температуры. Поэтому и плотность тока насыщения сильно зависит от температуры.

Строгая теория термоэлектронной эмиссии для металлов может быть построена только на основе квантовой механики, но оказывается, что приближённая классическая теория описывает это явление не так уж плохо, если принять, что электроны в металле не взаимодействуют друг с другом и представляют собой идеальный газ. Используя функцию распределения Максвелла по проекции скорости, а именно

$$f(v_x) = (m/2\pi kT)^{1/2} \exp(-mv_x^2/2kT), \quad (2)$$

можно вычислить число электронов, вылетевших за секунду с единичной площадки и имеющих проекцию скорости $v_x \geq v_0 = (2A/m)^{1/2}$.

Это означает, что не все частицы способны покинуть металл, а только те из них, которые имеют кинетическую энергию большую, нежели работа выхода.

В результате вычислений получается

$$v = n (kT/2\pi m)^{1/2} \exp(-A/kT) \quad (3)$$

Здесь n – плотность электронов в металле, m – их масса, T – абсолютная температура, k – постоянная Больцмана, $A = (W_0 - F)$ - термоэлектронная работа выхода данного металла.(см. рис.1)

Плотность тока насыщения равна количеству заряда, вылетевшего с единичной площади катода за одну секунду будет равна $j_{нас.} = ev$ (e – заряд электрона), так как при насыщении все вылетевшие электроны достигнут анода. Таким образом,

$$J_{нас.} = ne (kT/2\pi m)^{1/2} \exp(-A/kT) \quad (4)$$

Эта формула носит название классической (не квантовой) формулы Ричардсона.

Описание работы

В настоящей работе моделируется работа вакуумного диода - лампы, состоящей из двух электродов. Из одного электрода постоянно эмитируются частицы, изображаемые в этой работе кружочками, причём эмитирующая способность катода в полном соответствии с формулой Ричардсона зависит от задаваемой температуры. Внутри диода имеется электрическое поле, причём разность потенциалов между катодом и анодом может быть произвольно задана.

Если поля нет или оно мало, то частицы образуют вблизи катода облако, непрерывно вылетая из катода и влетая снова в него, причём вылет носит случайный характер. Лишь немногие самые быстрые частицы могут долететь до анода, создавая анодный ток. Долетающие до анода частицы регистрируются, сила тока пропорционально их числу.

При повышении напряжения число долетающих до анода частиц увеличивается, электронное облако постепенно рассасывается, а при дальнейшем повышении напряжения наступает насыщение, когда все эмитированные с катода частицы долетают до анода.

В работе нужно построить вольт - амперную характеристику диода, то есть зависимость числа достигающих анода частиц в единицу времени (это число характеризует ток) от напряжения между катодом и анодом. После этого необходимо проверить закон Богуславского - Ленгмюра в области его применимости, то есть при промежуточных значениях напряжения, и, используя формулу (4) найти работу выхода.

плотности тока насыщения из вольт-амперных характеристик, снятых для температур накала T_1 и T_2 для одного и того же напряжения, которое соответствует току насыщения и запишите формулу Ричардсона (4) для этих двух значений токов и температур. Разделите одно равенство на другое, прологарифмируйте и получите формулу для нахождения работы выхода электрона.

Контрольные вопросы.

1. Почему для своего вылета из металла электрон должен совершить работу выхода?
2. Что такое термоэлектронная эмиссия?
3. Как зависит ток насыщения от температуры?
4. Выведете классическую формулу Ричардсона.
5. Почему возле катода образуется электронное облако?
7. При каких напряжениях справедлива формула Богуславского - Ленгмюра?
8. Какую величину можно определить из формулы Богуславского - Ленгмюра?
9. Почему каждое измерение необходимо повторять многократно?
10. Как можно определить удельный заряд частиц по виду вольт - амперной характеристики?

ИЗУЧЕНИЕ ВАКУУМНОГО ДИОДА

Методические указания к выполнению виртуальной лабораторной работы № КопмЭ–04 по физике

Составитель Антонина Васильевна Макиенко

Подписано к печати

Формат 60x84/16. Бумага офсетная

Плоская печать. Усл. печ. л. Уч. изд. л.

Тираж 200 экз. Заказ Цена свободная

Типография ТПУ. 634034, Томск, пр. Ленина, 30