

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ и НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное агентство по образованию

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЭЛЕКТРОНИКИ И МАТЕМАТИКИ
(Технический университет)**

Кафедра физических основ электронной техники

**Методические указания к лабораторной работе по
дисциплине «Вакуумная и плазменная электроника»**

**Исследование вольт-амперной характеристики
вакуумного диода**

Москва – 2006

Составитель канд. техн. наук, доцент А.А.Чернов

Кратко изложены физические принципы работы вакуумного диода. Представлены описание экспериментальной установки и методика выполнения лабораторной работы.

Предназначены для студентов III-го курса специальности 210104 “Микроэлектроника и твердотельная электроника”.

Исследование вольт-амперной характеристики вакуумного диода: Методические указания к лабораторной работе / Московский государственный институт электроники и математики; Составитель А.А.Чернов. М.,2006. 30 с.

Табл. 4, Ил. 10. Библиогр.: 3 назв.

ISBN 5-94506-133-6

Лабораторная работа

Исследование вольт-амперной характеристики вакуумного диода

Цель работы: Экспериментальное исследование и анализ зависимости вида вольт-амперной характеристики вакуумного диода от плотности тока эмиссии катода.

1. Физические принципы работы вакуумного диода

Вакуумный диод – электронная лампа, содержащая два находящихся в вакууме электрода: катод, эмитирующий электроны, и анод.

В вакуумных электронных приборах степень разрежения (уровень вакуума) газа такова, что средняя длина свободного пробега электрона $\bar{\lambda}_e$ намного больше расстояния между электродами. Если в пространстве, в котором создан высокий вакуум, расположить параллельно друг другу два плоских достаточно больших электрода катод - К и анод - А на расстоянии d (рис.1.1а) и создать между ними разность потенциалов U_a , то распределение потенциала в пространстве между электродами будет линейным (рис.1.1б).

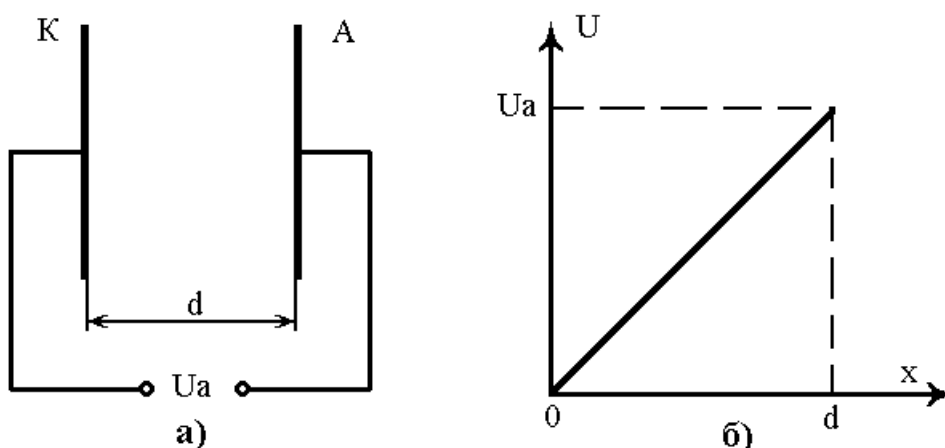


Рис.1.1. Система из двух плоских электродов К и А, между которыми подано напряжение U_a - а) и распределение потенциала между ними - б)

Предположим, что электрод К представляет собой нагретый катод и эмитирует в межэлектродное пространство небольшое количество электронов, существенно не нарушающее линейное распределение потенциала между электродами. В этом случае все покидающие катод электроны будут попадать в ускоряющее электрическое поле, напряженность которого \mathcal{E} , и попадать на второй электрод – анод. При этом значение напряженности электрического поля определяется выражением:

$$\mathcal{E} = \frac{U_a}{d} \quad (1.1)$$

Ток на анод будет равен току эмиссии катода независимо от величины разности потенциалов U_a . Энергия электрона E_e в некоторой точке пространства между электродами с координатой x , отсчитанной в перпендикулярном направлении от поверхности катода, будет определяться (пренебрегая скоростью вылета электрона из катода) пройденной разностью потенциалов $U(x)$:

$$E_e = \frac{m \cdot v_e^2}{2} = q \cdot U(x), \quad (1.2)$$

где m - масса электрона;

v_e - скорость движения электрона в направлении оси x ;

q - заряд электрона.

Потенциал $U(x)$ данной точки является линейной функцией ее координаты:

$$U(x) = \frac{U_a}{d} \cdot x, \quad (1.3)$$

поэтому линейной функцией координаты оказывается и кинетическая энергия электрона:

$$E_e = \frac{m \cdot v_e^2}{2} = q \cdot \frac{U_a}{d} \cdot x. \quad (1.4)$$

Соответственно скорость движения электрона в межэлектродном пространстве определяется выражением:

$$v_e = \sqrt{\frac{2q}{m} \cdot \frac{U_a}{d} \cdot x}. \quad (1.5)$$

Картина будет несколько другой в случае, когда катод эмитирует в межэлектродное пространство большое количество электронов, что соответствует большому току эмиссии. Заполняя пространство между электродами, электроны создают отрицательный объемный заряд, существенно искажающий линейное распределение потенциала в этом пространстве. Это искажение может быть настолько сильным, что при данной разности потенциалов U_a между электродами не все электроны будут достигать анода. Плотность анодного тока j_a будет меньше плотности тока эмиссии катода j_e .

Таким образом, на величину анодного тока диода существенное влияние оказывает электрическое поле в межэлектродном пространстве катод-анод, которое зависит не только от величины приложенного напряжения между анодом и катодом и их геометрических размеров, но и от пространственного заряда, создаваемого летящими от катода к аноду электронами. Поэтому вид вольт-амперной характеристики вакуумного диода зависит от концентрации электронов и их распределения в межэлектродном пространстве.

Рассмотрим сначала случай очень малой концентрации электронов в пространстве между анодом и катодом, который может быть реализован на практике, например, при малой температуре катода, когда плотность тока эмиссии электронов j_e составляет лишь десятки микроампер на квадратный сантиметр. При этом объемным зарядом в пространстве между катодом и анодом, создаваемым летящими электронами, можно пренебречь. Напряженность электрического поля в пространстве между катодом и анодом в случае бесконечно больших плоских электродов описывается выражением (1.1).

В большинстве современных конструкций электровакуумных приборов катод представляет собой никелированную трубку-кern, наружная поверхность которой покрыта слоем спеченных частичек различных окислов (бария, стронция и других) металлов. С поверхности оксидного слоя и происходит эмиссия электронов. Внутри трубки катода находится спираль нагревателя. Анод, представляющий собой цилиндр, установлен коаксиально с катодом и охватывает его (рис.1.2).

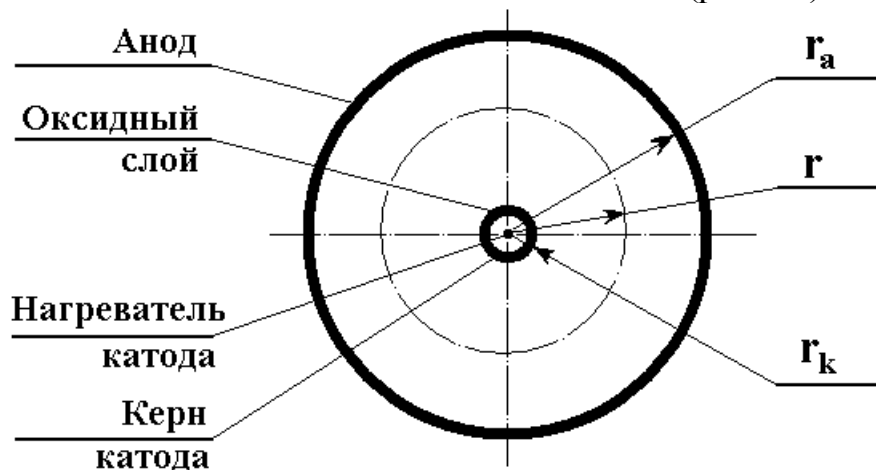


Рис.1.2. Коаксиальная конструкция электродов вакуумного диода с оксидным катодом косвенного нагрева

В этом случае для цилиндрических электродов бесконечно большой длины напряженность электрического поля в пространстве между катодом и анодом определяется выражением:

$$\mathcal{E} = \frac{U_a}{r \cdot \ln(r_a / r_k)}, \quad (1.6)$$

где U_a - разность потенциалов между катодом и анодом;

r_a и r_k - радиусы анода и катода соответственно;

r - текущая координата в направлении, перпендикулярном оси катода и анода.

Плотность тока эмиссии, которая определяется числом электронов, ежесекундно покидающих поверхность катода, можно рассчитать по формуле Ричардсона-Дэшмана:

$$j_e = A \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{\chi_o}{kT}\right), \quad (1.7)$$

где T - температура катода в К;

χ_o - термодинамическая работа выхода (эффективная работа выхода);

k - постоянная Больцмана;

A - постоянная Ричардсона.

$$A = \frac{4\pi m k^2 q}{h^3} = 1,21 \cdot 10^6 \left[\frac{A}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^2} \right]. \quad (1.8)$$

Если потенциал анода выше потенциала катода ($U_a > 0$), то электрическое поле ускоряет покинувшие катод электроны в направлении анода. Поэтому любой электрон, эмитированный катодом, попадает на анод. Анодный ток в данном случае определяется количеством электронов, ежесекундно покидающих катод, а его плотность j_e можно определить, воспользовавшись формулой (1.7).

Ток эмиссии зависит не только от температуры катода, но и от величины анодного напряжения. Дело в том, что с увеличением анодного напряжения снижается потенциальный барьер для электронов на границе раздела катод-вакуум, уменьшается термодинамическая работа выхода χ_o , и следовательно, растет плотность тока эмиссии j_e . Увеличение тока эмиссии под действием внешнего ускоряющего электрического поля называется эффектом Шоттки.

Совсем другой вид имеет вольтамперная характеристика диода, когда потенциал анода ниже потенциала катода ($U_a < 0$). В этом случае эмитированные катодом электроны оказываются в тормозящем

электрическом поле и долететь до анода могут лишь те из них, которые обладают достаточной для этого кинетической энергией.

Получим уравнение вольт-амперной характеристики диода при условии $U_a < 0$. Будем считать, что ось x направлена перпендикулярно поверхности катода. Электрон, покинувший катод, попадает на анод, находящийся под напряжением U_a , лишь при условии:

$$\frac{m \cdot v_x^2}{2} > |q \cdot U_a|, \quad (1.9)$$

где v_x - компонента скорости электрона вне катода, направленная вдоль оси x .

После преобразования уравнения (1.9) можно получить:

$$v_x > \sqrt{\frac{2 \cdot |q \cdot U_a|}{m}}. \quad (1.10)$$

Чем больше по модулю анодное напряжение, тем меньше эмитированных электронов имеют скорость, значение которой удовлетворяет условию (1.10), и следовательно, меньше становится анодный ток.

Воспользуемся функцией распределения эмитированных электронов по компонентам скорости. Вне катода они образуют невырожденный электронный газ, подчиняющийся статистике Максвелла-Больцмана. Проведя несложные преобразования, можно получить уравнение для числа электронов $N(v_x) \cdot dv_x$, составляющая скорости v_x которых находится в интервале значений от v_x до $v_x + dv_x$:

$$N(v_x) \cdot dv_x = \frac{4\pi m^2 kT}{h^3} \cdot e^{-\frac{\chi_o}{kT}} \cdot e^{-\frac{mv_x^2}{2kT}} \cdot dv_x. \quad (1.11)$$

Вклад этой группы электронов в анодный ток составляет

$$j(v_x) = q \cdot v_x \cdot N(v_x) \cdot dv_x. \quad (1.12)$$

Анодный ток создают электроны, составляющая скорости v_x которых удовлетворяет условию (1.10). Поэтому уравнение вольт-амперной характеристики получим, проинтегрировав уравнение (1.12) по dv_x в

пределах от $a = \left(\frac{2 \cdot |qU_a|}{m} \right)^{\frac{1}{2}}$ до бесконечности:

$$j = \int_a^{\infty} q \cdot v_x \cdot \frac{4\pi m^2 kT}{h^3} \cdot e^{-\frac{\chi_o}{kT}} \cdot e^{-\frac{mv_x^2}{2kT}} \cdot dv_x =$$

$$= \frac{4\pi mk^2 q}{h^3} \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{\chi_o}{kT}} \cdot e^{-\frac{|qU_a|}{kT}} . \quad (1.13)$$

С учетом выражения (1.7) уравнение (1.13) можно представить в виде

$$j = j_e \cdot e^{-\frac{|qU_a|}{kT}} . \quad (1.14)$$

Таким образом, как следует из уравнения (1.14), если потенциал анода меньше потенциала катода, то анодный ток падает с ростом анодного напряжения по экспоненциальному закону.

Вольтамперная характеристика диода для случая малой плотности тока эмиссии электронов представлена на рис.1.3. На ней можно выделить два характерных участка. Экспоненциальный участок левее точки А соответствует случаю тормозящего электрического поля (потенциал катода выше потенциала анода). Участок характеристики со слабо возрастающим током анода правее точки А – область ускоряющего электрического поля, когда ток эмиссии катода увеличивается вследствие эффекта Шоттки. Точка А не совпадает с началом координат (точкой $U_a = 0$) вследствие наличия контактной разности потенциалов между катодом и анодом $U_{крп}$.

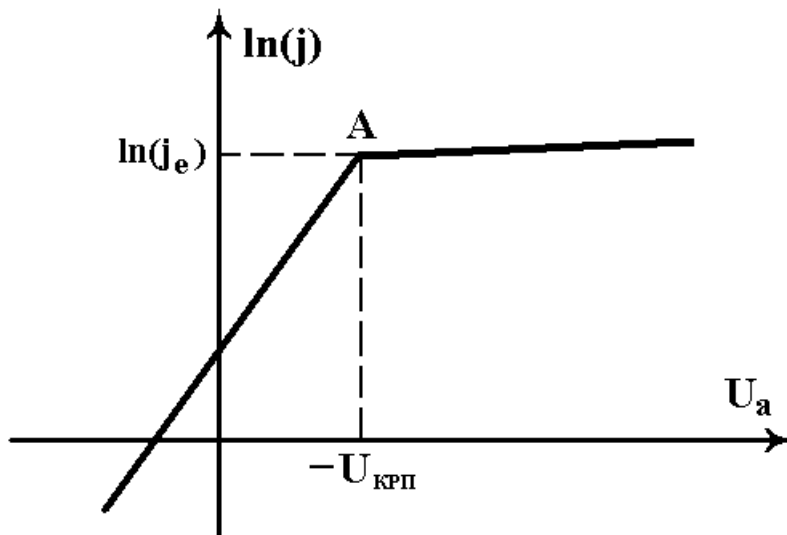


Рис.1.3. Вольтамперная характеристика диода при малой плотности тока эмиссии катода $j = f(U_a)$

Влияние контактной разности потенциалов можно объяснить следующим образом. Рассмотрим диод, включенный во внешнюю цепь

(рис.1.4), содержащую источник анодного напряжения U_a и внешнее сопротивление R_H .

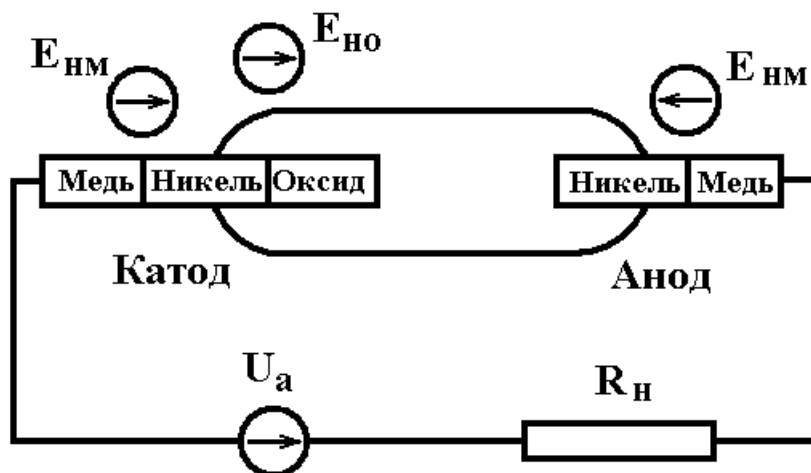


Рис.1.4. Схема диода, включенного во внешнюю цепь, с учетом контактных разностей потенциалов

Для простоты предположим, что конструктивно анод, основание катода и подводящие электроды к ним выполнены из одного материала – никеля, а проводники внешней цепи выполнены из меди. Катод покрыт оксидным слоем для увеличения тока эмиссии, представляющим собой по свойствам полупроводник. Как известно, в местах контакта разнородных проводников всегда возникает контактная разность потенциалов. Обозначим разность потенциалов в контакте никель-оксид через E_{HO} , а разность потенциалов в контакте никель-медь через E_{HM} . Поскольку анодный ток мал, то можно пренебречь величиной падения напряжения на внешнем сопротивлении R_H . Истинная разность потенциалов между анодом и катодом U_{ak} равна алгебраической сумме падений напряжений на всех элементах цепи:

$$U_{ak} = U_a + E_{HM} - E_{HO} - E_{HM} = U_a - E_{HO}. \quad (1.15)$$

Из уравнения (1.15) следует, что когда прикладывается к аноду внешняя разность потенциалов $U_a = 0$, между анодом и катодом на самом деле действует тормозящая разность потенциалов - E_{HO} , которая обозначается еще как $U_{крп}$. Для того чтобы тормозящее поле между

анодом и катодом исчезло, к аноду необходимо приложить напряжение, численно равное величине контактной разности потенциалов. В этом и состоит причина сдвига точки перегиба А (рис.1.3.) вольт-амперной характеристики вакуумного диода в область положительных анодных

напряжений. По положению точки перегиба вольт-амперной характеристики вакуумного диода можно определить истинную разность потенциалов между анодом и катодом при отсутствии внешнего поля.

Построив вольтамперную характеристику в полулогарифмических координатах - $\ln(j) = f(U_a)$, можно определить температуру катода.

Действительно, прологарифмировав уравнение (1.14), можно получить

$$\ln(j) = \ln(j_e) - \frac{|q \cdot U_a|}{kT} \quad (1.16)$$

Используя любые два значения плотности тока $\ln(j_1)$ и $\ln(j_2)$, а также соответствующие им значения анодного напряжения U_{a1} и U_{a2} на участке вольт-амперной характеристики левее точки перегиба (то есть в области отрицательных анодных напряжений), подставим эти значения в уравнение (1.16) и взяв разность полученных выражений, получим следующее уравнение:

$$\ln(j_1) - \ln(j_2) = \frac{q}{kT} \cdot (|U_{a2}| - |U_{a1}|). \quad (1.17)$$

Используя уравнение (1.17), можно перейти от значений плотности тока эмиссии к значениям полного анодного тока и получить выражение для температуры катода:

$$T = \frac{q}{k} \cdot \frac{|U_{a2}| - |U_{a1}|}{\ln(I_{a1}) - \ln(I_{a2})}. \quad (1.18)$$

Рассмотрим теперь случай больших значений анодных токов, когда в пространстве между катодом и анодом находится одновременно большое количество летящих электронов.

На рис.1.5 приведены варианты распределения силовых линий электрического поля между плоскими анодом и катодом для разных значений концентрации электронов в межэлектродном пространстве, а также кривые напряженности электрического поля $\mathcal{E}(x)$ и потенциала $U(x)$ в пространстве катод-анод.

Как известно, силовые линии электрического поля начинаются и заканчиваются только на зарядах, а число линий, проходящих через единичную площадку, определяет напряженность электрического поля. На рис.1.5а представлено распределение силовых линий для случая, когда электронов в пространстве между электродами нет. Силовые линии начинаются на аноде и заканчиваются на катоде. Распределение потенциала $U(x)$ между катодом и анодом в этом случае является линейным. Плотность линий, то есть значение напряженности электрического поля \mathcal{E} , во всем межэлектродном пространстве постоянна.

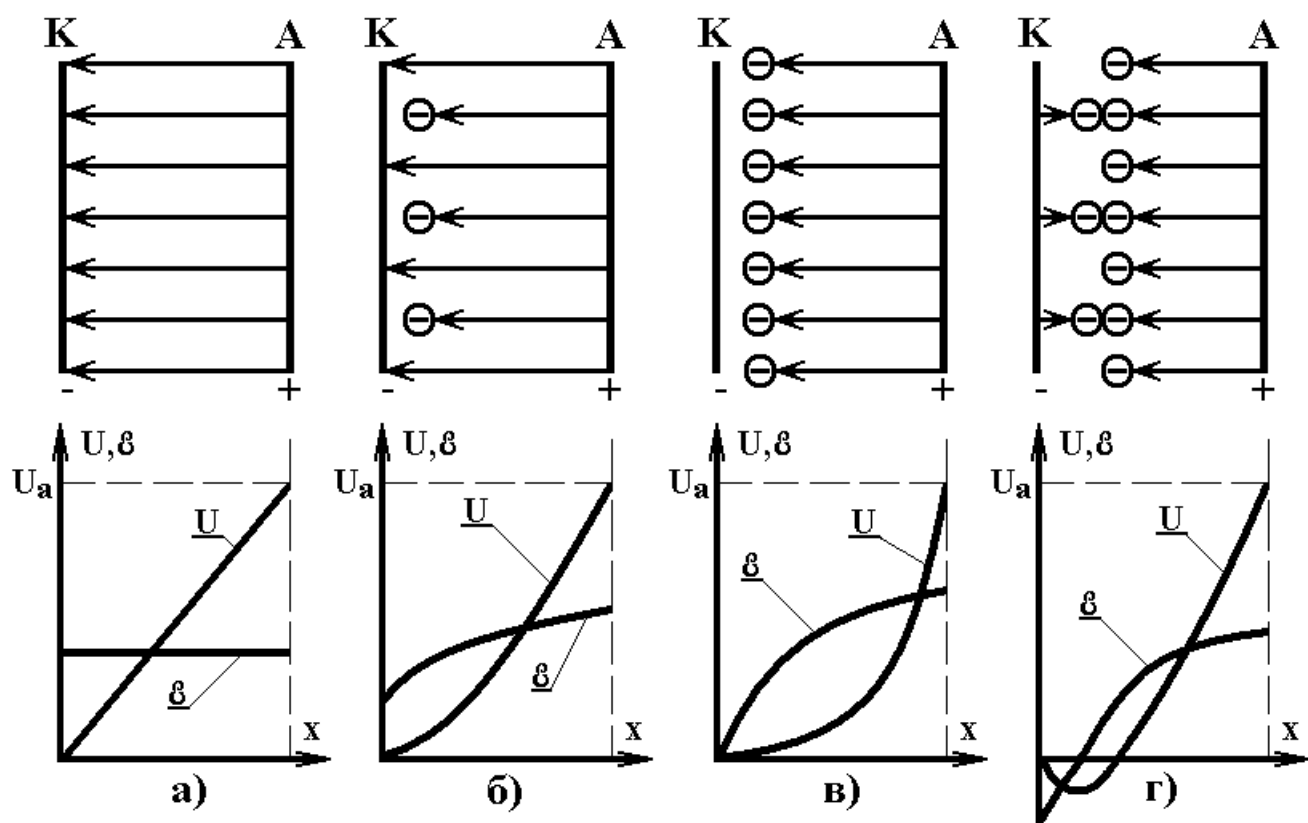


Рис.1.5. Распределение силовых линий электрического поля, кривые напряженности поля и потенциала между плоскими анодом и катодом при разных концентрациях электронов в межэлектродном промежутке

Если концентрация электронов в межэлектродном пространстве увеличится, то значительное число силовых линий будет заканчиваться на них (рис.1.5б). Плотность силовых линий у катода уменьшается, следовательно, и напряженность электрического поля здесь будет меньше, чем у анода. Заряд электронов, находящихся в межэлектродном пространстве – пространственный заряд, экранирует электрическое поле анода. Характер зависимости потенциала в межэлектродном пространстве от координаты $U(x)$ также изменяется.

На рис.1.5в представлено распределение силовых линий для случая, когда пространственный заряд электронов полностью экранирует электрическое поле катода, и напряженность поля у катода $\mathcal{E}(0)$ равна нулю, так как до него не доходит ни одна силовая линия электрического поля.

Если концентрация электронов в межэлектродном пространстве станет очень велика, то между катодом и пространственным зарядом электронов возникнут силовые линии, направленные в противоположном направлении – от катода к пространственному заряду. Это объясняется тем, что потенциал области пространственного заряда станет меньше, чем потенциал катода. Распределение силовых линий для этого случая

представлено на рис.1.5г. В данном случае, несмотря на то, что на анод подается положительное напряжение, электроны, вылетевшие из катода, будут тормозиться полем, созданным пространственным зарядом. Только преодолев область пространственного заряда, электроны смогут попасть в ускоряющее поле анода. Ясно, что не все электроны, вылетевшие из катода, способны на это. Большинство электронов, испытав тормозящее действие поля пространственного заряда, возвращаются обратно на катод. Поэтому величина тока диода определяется в этом случае числом электронов, прошедших через пространственный заряд. Иначе говоря, ток диода ограничен величиной пространственного заряда.

Рассчитать для этого случая вольтамперную характеристику диода можно, используя уравнение Пуассона, которое связывает потенциал поля с плотностью объемного заряда. Для иллюстрации приведем расчет для простейшего случая: бесконечных по размеру и плоских электродов катода и анода (рис.1.1). Из электростатики известно, что потенциал в любой точке пространства связан с плотностью объемного заряда в этой точке уравнением Пуассона:

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -\frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \rho(x), \quad (1.19)$$

где U – потенциал данной точки в пространстве катод-анод;

$\rho(x)$ - плотность объемного заряда;

x - координата, отсчитанная от поверхности катода в направлении, перпендикулярном плоскости электродов.

Введем два допущения, упрощающие математическое решение задачи:

- 1) – напряженность электрического поля у катода $\mathcal{E}(0)$ равна нулю, как изображено на рис.1.5в;
- 2) – начальная скорость движения электронов у катода U_x равна нулю.

Это эквивалентно предположению, что концентрация электронов у поверхности катода бесконечно велика, то есть катод является неограниченным источником электронов.

Пусть потенциал катода равен нулю, потенциал анода равен U_a , а расстояние между катодом и анодом равно x_a , тогда можно записать:

$$U(0) = 0; U(x_a) = U_a. \quad (1.20)$$

Плотность заряда ρ и плотность тока j связаны с концентрацией электронов n и их скоростью движения U_x в направлении оси x следующим образом:

$$\rho = -q \cdot n; j = q \cdot n \cdot v_x. \quad (1.21)$$

Нас интересует зависимость плотности тока в диоде от разности потенциалов между электродами, поэтому выразим плотность объемного заряда ρ через плотность тока j и скорость движения электронов v_x :

$$\rho = -\frac{j}{v_x}. \quad (1.22)$$

Теперь уравнение Пуассона (1.19) можно записать в виде:

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = \frac{j}{\epsilon_o \cdot v_x}. \quad (1.23)$$

Входящая в уравнение (1.23) величина j не зависит от x , так как в установившемся режиме ток в любом сечении межэлектродного промежутка должен быть одинаковым.

Для решения этого уравнения необходимо выразить скорость электронов через потенциал точки, в которой они находятся. С учетом введенного нами выше допущения о том, что начальная скорость вылета электронов из катода $v_x(0) = 0$, скорость электрона v_x , прошедшего расстояние от катода в точку с координатой x и потенциалом U , в соответствии с уравнением (1.2) составит:

$$v_x = \sqrt{\frac{2 \cdot |q \cdot U|}{m}}. \quad (1.24)$$

Такое пренебрежение начальными скоростями электронов, на первый взгляд, вполне возможно, так как значения $q \cdot U_a$, определяющие энергию, приобретаемую электронами на пути от катода к аноду, много больше средней энергии покидающих катод электронов.

Подставив выражение (1.24) в уравнение Пуассона (1.23), получим:

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = \frac{j}{\epsilon_o \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U}{m}}}. \quad (1.25)$$

Установим граничные условия для этого дифференциального уравнения. При отсчете значений координаты x и потенциала U от катода, как уже было указано выше в соответствии с условиями (1.20), имеем при $x=0$ $U=0$, при $x=x_a$ $U=U_a$. Кроме того, для режима пространственного заряда, то есть такого режима, когда не все

эмитированные катодом электроны достигают анода, и анодный ток зависит от потенциала анода, можно сформулировать еще одно условие:

$$\text{при } x=0 \text{ градиент потенциала } \left. \frac{dU}{dx} \right|_{x=0} = 0.$$

Это условие непосредственно вытекает из допущения нулевых начальных скоростей электронов, эмитированных из катода. Действительно, если предположить, что градиент потенциала у катода $\left. \frac{dU}{dx} \right|_{x=0} < 0$, то ни один электрон с $v_x(0) = 0$ не попадет на анод. Если

же предположить, что градиент потенциала у катода $\left. \frac{dU}{dx} \right|_{x=0} > 0$, то все электроны попадут на анод, анодный ток независимо от величины U_a будет равен току эмиссии катода, то есть установится режим насыщения.

Использование условия $v_x(0) = 0$, строго говоря, возможно только в предположении, что плотность объемного заряда у катода бесконечно велика. Лишь в этом случае плотность тока у катода, а следовательно, и в любой другой точке может иметь конечное значение:

$$j_{(x=0)} = \rho_{(x=0)} \cdot v_{x(x=0)}.$$

Умножив обе части уравнения (1.25) на $2 \frac{dU}{dx} \cdot dx$, получим:

$$d \left(\frac{dU}{dx} \right)^2 = \frac{2}{\varepsilon_0} \cdot j \cdot \sqrt{\frac{2m}{q}} \cdot \frac{1}{2} \cdot U^{-\frac{1}{2}} \cdot dU. \quad (1.26)$$

После интегрирования и извлечения квадратного корня получим:

$$\frac{dU}{dx} = \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_0} \cdot j \cdot 4 \sqrt{\frac{2m}{q}} \cdot U} + C_1. \quad (1.27)$$

Константа интегрирования C_1 оказывается равной нулю из граничных условий: при $x=0$ градиент потенциала $\left. \frac{dU}{dx} \right|_{x=0} = 0$.

Разделяя переменные в уравнении (1.27), можно получить:

$$U^{-\frac{1}{4}} \cdot dU = \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_0} \cdot j \cdot 4 \sqrt{\frac{2m}{q}}} \cdot dx. \quad (1.28)$$

Проинтегрировав это выражение, получим:

$$U^{\frac{3}{4}} = \frac{3}{4} \cdot \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_0}} \cdot j \cdot 4 \sqrt{\frac{2m}{q}} \cdot x + C_2. \quad (1.29)$$

Решая уравнение (1.29) относительно U , получим:

$$U = \sqrt[3]{\frac{81 \cdot m}{32 \cdot q}} \cdot \left(\frac{j}{\varepsilon_0}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot x^{\frac{4}{3}}. \quad (1.30)$$

Константа интегрирования C_2 также оказывается равной нулю из граничных условий: при $x=0$ потенциал $U=0$.

Решив уравнение (1.30) относительно плотности тока j , получим:

$$j = \frac{4\varepsilon_0}{9} \cdot \sqrt{\frac{2q}{m}} \cdot \frac{1}{x^2} \cdot U^{\frac{3}{2}}. \quad (1.31)$$

Воспользовавшись установленным граничным условием при $x=x_a$ $U=U_a$, из уравнения (1.31) находим искомую зависимость плотности тока на аноде от значений приложенной разности потенциалов U_a и расстояния между электродами x_a :

$$j_a = \frac{4\varepsilon_0}{9} \cdot \sqrt{\frac{2q}{m}} \cdot \frac{1}{x_a^2} \cdot U_a^{\frac{3}{2}} = \alpha \cdot U_a^{\frac{3}{2}}, \quad (1.32)$$

где $\alpha = \frac{4\varepsilon_0}{9} \cdot \sqrt{\frac{2q}{m}} \cdot \frac{1}{x_a^2}$.

Полученное уравнение вольт-амперной характеристики вакуумного диода с накаливаемым катодом (1.32) называется «законом степени 3/2». Таким образом, когда ток в электронной лампе ограничен пространственным зарядом, вольтамперная характеристика представляет собой степенную зависимость, с показателем степени равным 3/2.

После подстановки в уравнение (1.32) значений констант оно может быть записано в виде:

$$j_a \left[\frac{A}{M^2} \right] = 2.33 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{U_a^{\frac{3}{2}} [B]}{x_a^2 [M]}. \quad (1.33)$$

Если катод и анод представляют собой коаксиальные цилиндры, то вольтамперная характеристика, рассчитанная по уравнению Пуассона при

тех же допущениях, также является степенной зависимостью с показателем, равным 3/2:

$$j_a = \beta \cdot U_a^{\frac{3}{2}}, \quad (1.34)$$

где β - коэффициент, определяемый геометрией электродов лампы.

Как было уже показано выше, пренебрежение начальными скоростями вылета электронов из катода логически приводит к граничному условию: при $x=0$ градиент потенциала $\left. \frac{dU}{dx} \right|_{x=0} = 0$, а это условие справедливо только при $\rho_{(x=0)} = \infty$, то есть при бесконечно большой

эмиссии электронов из катода. В действительности эмиссия катодов всегда ограничена, поэтому возможность пренебрежения начальными скоростями электронов является сомнительной.

В связи с этим рассмотрим теперь влияние на распределение потенциала в межэлектродном промежутке и вольтамперную характеристику диода начальных скоростей электронов, эмитируемых катодом.

Если анод лампы изолирован, то электроны, долетая до него, заряжают его отрицательно. При этом ток анода непрерывно уменьшается, так как до него могут долететь только электроны со все большим значением начальной скорости (см. условие (1.10)). Наконец, ток электронов, достигающих анода, становится настолько малым, что сравнивается с током эмиссии анода (такой ток существует, так как эмиссия происходит в принципе при любой отличной от нуля температуре). Состоянию равновесия электронных потоков соответствует определенный потенциал анода - U_0 , называемый «потенциалом плавающего электрода».

Электроны, вылетающие из катода, но не способные долететь до анода, создают в межэлектродном пространстве отрицательный объемный заряд, который и определяет зависимость потенциала от координаты (кривая 0 на рис.1.6). Если на анод подать небольшое положительное напряжение U_1 , то зависимость потенциала между анодом и катодом примет вид, изображенной кривой 1. Отрицательный минимум обусловлен объемным зарядом электронов, которые за счет начальной скорости вылета из катода смогли отойти на некоторое расстояние от него. При увеличении анодного напряжения до значения - U_2 (кривая 2) минимум потенциала уменьшается и приближается к катоду. До сих пор ток диода ограничивает пространственный заряд. При достаточно большом напряжении - U_3 (кривая 3) минимум потенциала сравнивается с катодом и напряженность

электрического поля у поверхности катода становится равной нулю. Но ток будет определяться не пространственным зарядом, а числом электронов, покидающих катод каждую секунду, то есть током эмиссии. При больших анодных напряжениях - U_4 (кривая 4) пространственный заряд почти полностью рассасывается, так как электроны пролетают от катода к аноду с очень большой скоростью. Анодный ток растет вследствие эффекта Шоттки.

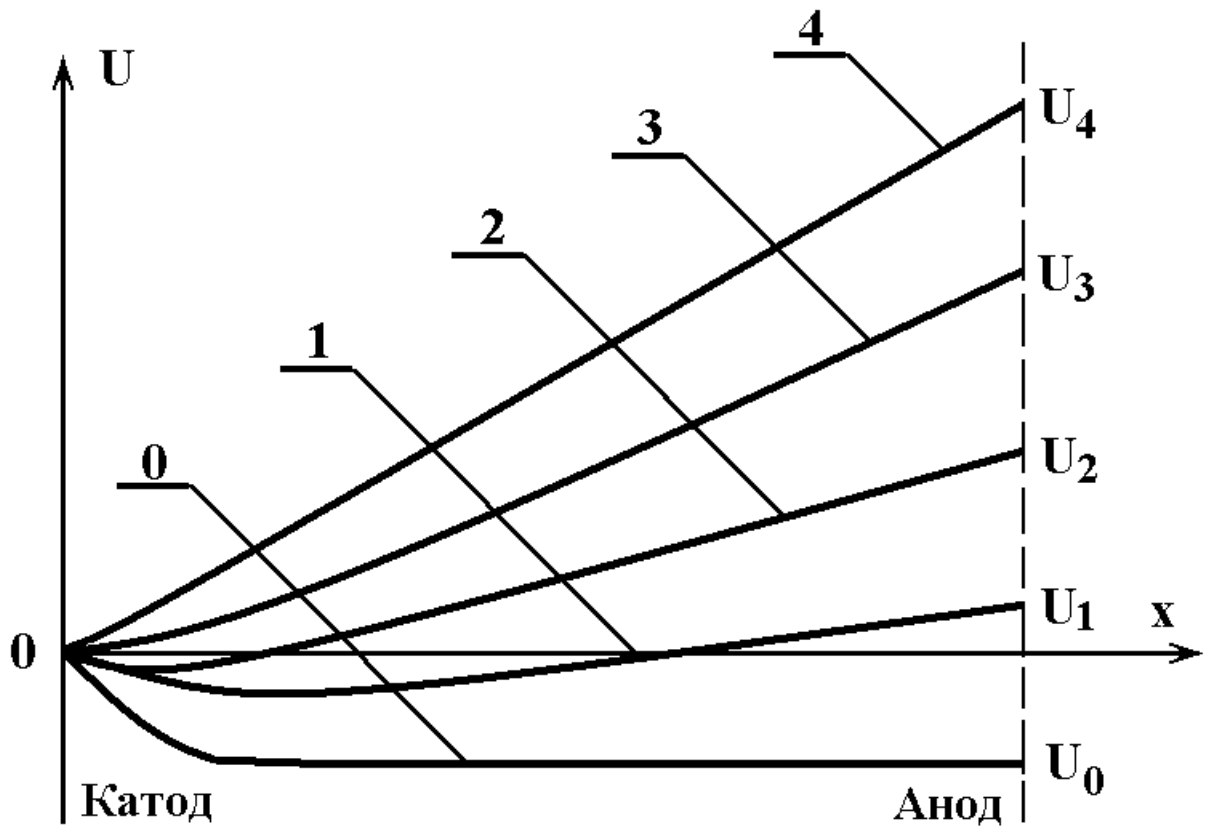


Рис.1.6. Распределение потенциала между плоскими анодом и катодом при постоянной эмиссии из катода и разных напряжениях на аноде

Таким образом, распределение потенциала в случае, когда ток ограничен пространственным зарядом, заметно отличается от распределения в идеализированной модели, положенной в основу вывода «закона степени $3/2$ ».

Электроны, покидающие катод при термоэлектронной эмиссии, в большинстве случаев имеют распределение скоростей, описываемое статистикой Максвелла-Больцмана. Это значит, что все электроны имеют различные составляющие скорости в направлении оси X , то есть от катода к аноду. Если бы распределение потенциала имело вид, соответствующий кривой на рис.1.5в, и описывалось выражением (1.30), то при любом анодном напряжении все электроны достигали бы анода, то есть имел бы место режим насыщения. Очевидно, что в действительности отрицательный объемный заряд, образованный покидающими катод электронами, создает

около катода электрическое поле, тормозящее электроны и возвращающее часть электронов к катоду. Следовательно, от катода к аноду потенциал сначала убывает, а затем возрастает. Распределение потенциала между катодом и анодом для такого случая представлено на рис.1.7.

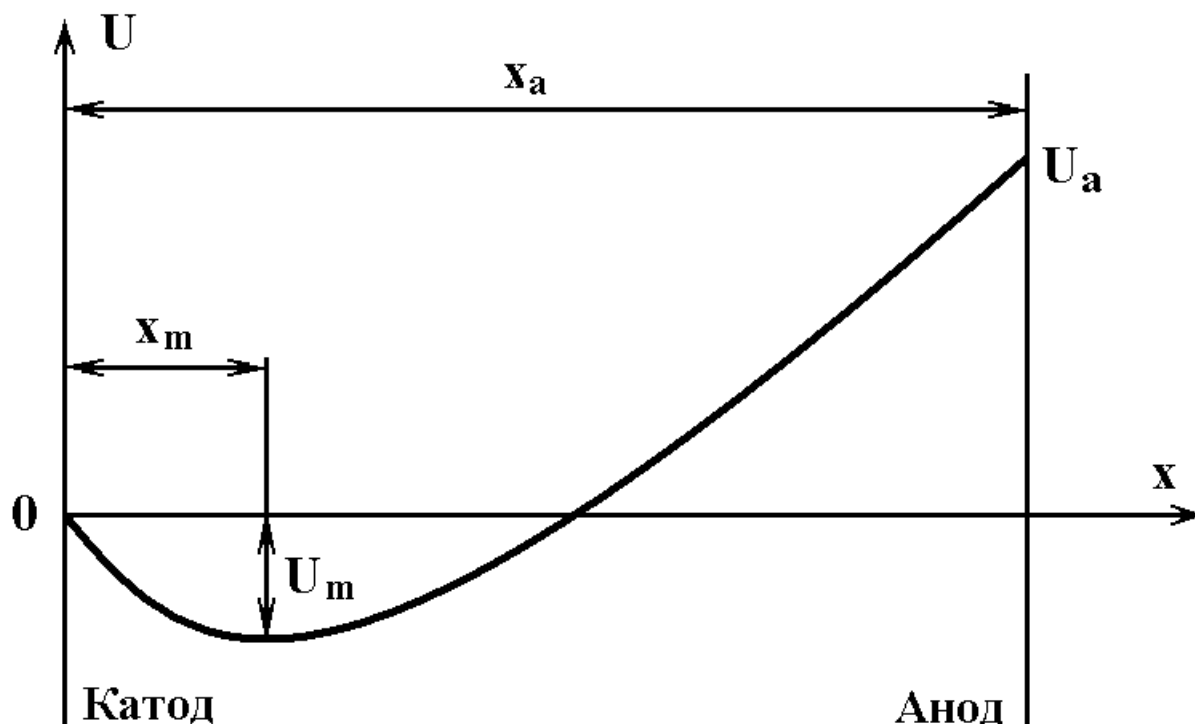


Рис.1.7. Распределение потенциала между плоскими анодом и катодом с учетом начальных скоростей вылета электронов из катода

На некотором расстоянии от катода x_m имеется поверхность с минимальным значением потенциала U_m . Через эту поверхность проходят к аноду только те электроны, у которых составляющая начальной скорости в направлении оси x удовлетворяет соотношению:

$$\frac{m \cdot v_{x0}^2}{2} \geq q \cdot U_m. \quad (1.35)$$

Образование минимума потенциала U_m приводит как бы к образованию на расстоянии x_m от реального катода - катода виртуального, эмиссия которого определяется не только током эмиссии реального катода, но и кинетической энергией покидающих катод электронов и глубиной потенциального минимума. Характерно, что для поверхности $x = x_m$

виртуального катода выполняется граничное условие $\frac{dU}{dx} = 0$, установленное в предыдущем выводе значения плотности тока j .

Переходя к отсчету координаты от поверхности $x = x_m$ виртуального катода и к отсчету потенциала от минимума потенциала U_m , можно было бы выполнить и остальные граничные условия. Однако более тщательный анализ показывает, что простая подстановка в закон степени $3/2$ (уравнение (1.32)) значений потенциала $(U_a - U_m)$ и расстояния $(x_a - x_m)$ была бы неправильной по двум причинам. Во-первых, электроны, проходящие минимум потенциала (виртуальный катод), хотя и теряют часть кинетической энергии в тормозящем поле у катода, все же имеют в точке $x = x_m$ начальные скорости, не равные нулю. Во-вторых, сама координата x_m потенциального минимума и его глубина U_m не постоянны, а зависят от энергии и числа покидающих катод электронов и от отбираемой на анод плотности тока j_a .

Решение задачи о вольт-амперной характеристике диода для плоских электродов с учетом распределения скоростей покидающих катод электронов, по Максвеллу, было дано Ленгмюром в виде уравнения:

$$j_a = \frac{4\epsilon_0}{9} \cdot \sqrt{\frac{2q}{m}} \cdot \frac{(U_a - U_m)^{\frac{3}{2}}}{(x_a - x_m)^2} \cdot \left\{ 1 + 2.658 \cdot \left[\frac{q}{kT_k} \cdot (U_a - U_m) \right]^{-\frac{1}{2}} \right\}. \quad (1.36)$$

Однако в это уравнение входят величины x_m и U_m , зависящие в свою очередь от температуры катода T_k , плотности тока эмиссии катода j_e и плотности тока анода j_a .

Сложность расчета значений x_m и U_m , их зависимость от значения j_a не позволяют непосредственно использовать уравнение (1.36) для нахождения j_a по заданной разности потенциалов U_a между катодом и анодом. Ценность полученного Ленгмюром уравнения состоит в том, что оно позволяет рассчитать ошибку, возникающую при использовании более простого уравнения (1.32), выведенного без учета начальных скоростей вылета электронов из катода.

На простом числовом примере рассмотрим, каковы эти ошибки при различных режимах работы диода. Вольфрамовый катод, расположенный на расстоянии 0.5 см от катода, дает при $T=2400\text{K}$ плотность тока эмиссии $j_e = 1.6 \cdot 10^3 \text{ (A/м}^2\text{)}$. В столбце 1 табл. 1.1 представлены значения плотности тока на аноде j_a , для которых приведены результаты расчетов значений U_m (столбец 3), значений x_m (столбец 4) и значений U_a

(столбец 5). В столбце 2 даны эти же плотности тока j_a в долях от j_e . Если полученные в столбце 5 значения U_a подставить в уравнение (1.33), то можно рассчитать приближенные значения плотности анодного тока j'_a . В столбце 6 приведено отношение j_a / j'_a , характеризующее погрешности при использовании приближенной формулы (1.33).

Таблица 1.1

j_a (A/m ²)	j_a / j_e	U_m (В)	x_m (мм)	U_a (В)	j_a / j'_a
1	2	3	4	5	6
$1.6 \cdot 10^3$	1	0	0	645	1.045
$1.6 \cdot 10^2$	0.1	-0.48	0.042	132	1.134
$1.6 \cdot 10^1$	0.01	-0.95	0.22	24	1.434
1.6	0.001	-1.43	0.67	2.5	4.220

Таким образом, учет начальных скоростей электронов особенно важен в области малых токов, когда анодный ток j_a не превышает 10% от значения тока j_e . В области средних и больших токов, приближающихся к току эмиссии катода j_e , уравнение (1.33) вполне применимо.

Рассмотрим случай, когда катод К представляет собой цилиндр с радиусом r_k , окруженный коаксиальным анодом А с радиусом r_a (рис.1.2). Для этого случая запишем оператор Лапласа в уравнении Пуассона в полярных координатах:

$$\frac{d^2U}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dU}{dr} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}. \quad (1.37)$$

Если при плоских электродах плотность тока постоянна, не зависит от координаты, то при цилиндрических электродах постоянным будет полный ток $i = i_a$, протекающий через цилиндрическую поверхность с радиусом r и длиной (вдоль оси катода) 1 метр:

$$i = i_a = -2\pi r \cdot 1 \cdot \rho \cdot \nu. \quad (1.38)$$

Подставляя значение ρ из выражения (1.38) в уравнение (1.37), можно получить:

$$\frac{d^2U}{dx^2} + \frac{1}{r} \frac{dU}{dr} = -\frac{i_a}{2\pi\epsilon_0 \cdot r \cdot \nu}. \quad (1.39)$$

Выполнив необходимые преобразования полученного уравнения (1.39), можно получить уравнение вольт-амперной характеристики диода с цилиндрическими электродами, выведенное без учета начальных скоростей электронов, эмитированных катодом:

$$i_a = \frac{8\pi\epsilon_0}{9} \cdot \sqrt{\frac{2q}{m} \cdot \frac{U_a^2}{r_a}}. \quad (1.40)$$

После подстановки значений констант это уравнение принимает вид:

$$i_a = 14.65 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{U_a^2}{r_a}. \quad (1.41)$$

Если ток i_a на погонный метр анода заменить плотностью тока j_a на аноде, разделив обе части выражения (1.41) на $2 \cdot \pi \cdot r_a$, то получим:

$$j_a = 2.33 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{U_a^2}{r_a^2}. \quad (1.42)$$

Следует заметить, что полученное решение (1.42) является лишь частным, так как удовлетворяет необходимым граничным условиям на катоде: при $r = r_k$ должно быть $U = 0$ и $\frac{dU}{dr} = 0$ только при $r_k = 0$.

Для того чтобы уравнение (1.40) было справедливо при любых радиусах r_k катода, Ленгмюр ввел поправочный коэффициент β^2 , являющийся функцией отношения $\frac{r_a}{r_k}$.

При этом уравнение (1.40) принимает вид:

$$i_a = \frac{8\pi\epsilon_0}{9} \cdot \sqrt{\frac{2q}{m} \cdot \frac{U_a^2}{\beta^2 \cdot r_a}}. \quad (1.43)$$

Уравнение для плотности анодного тока (1.42) соответственно определяется выражением:

$$j_a = 2.33 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{U_a^2}{\beta^2 \cdot r_a^2}. \quad (1.44)$$

Ленгмюр вычислил для разных значений отношения $\frac{r_a}{r_k}$ значения β^2 , при которых на катоде при $r = r_k$ выполняются граничные условия. Зависимость $\beta = f\left(\frac{r_a}{r_k}\right)$ представляет собой сходящийся ряд. Ленгмюр и Блоджет вычислили значения коэффициентов 14-ти членов ряда и рассчитали таблицу значений $\beta^2 = f\left(\frac{r_a}{r_k}\right)$, данные которой представлены на рис.1.8.

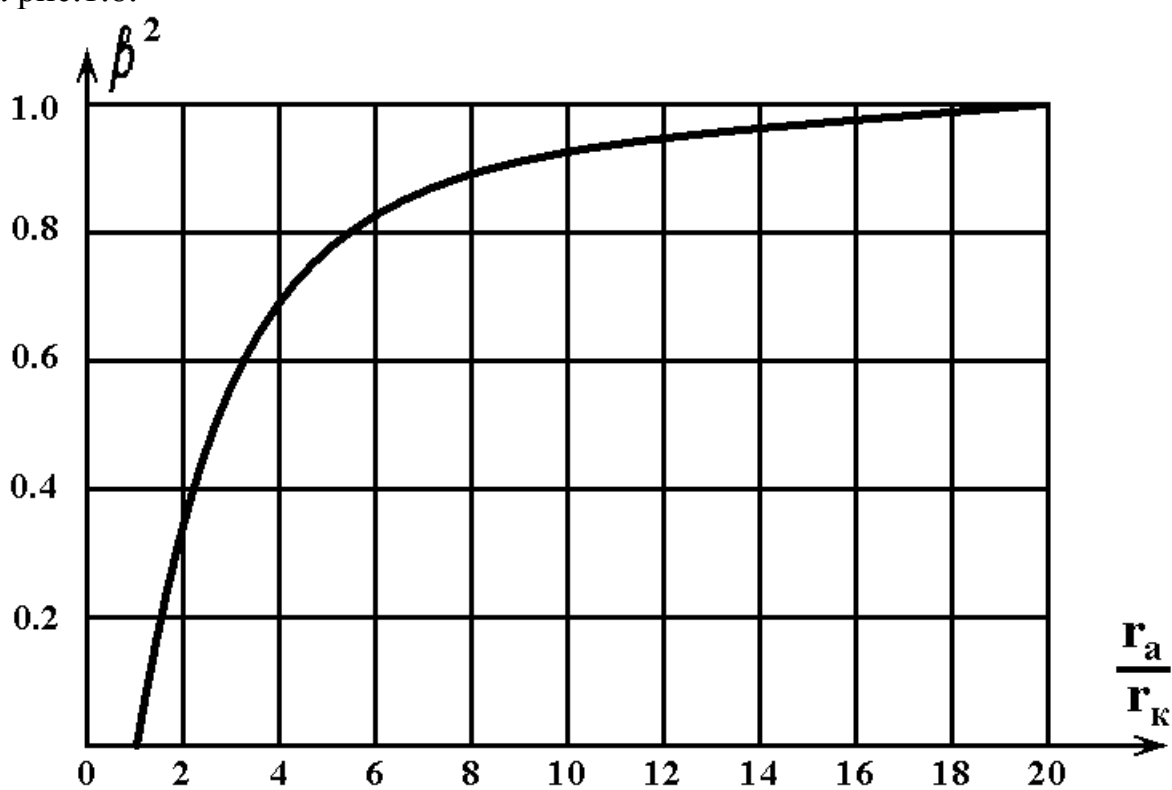


Рис.1.8. График зависимости поправочного коэффициента от отношения радиуса анода к радиусу катода

Из рисунка видно, что при отношении $\frac{r_a}{r_k}$, равном 10 и более, величина β^2 становится близкой к единице и, таким образом, можно использовать формулу (1.40). На практике в большинстве случаев радиус анода действительно в десять и более раз больше радиуса катода.

Следует заметить, что уравнения (1.43) и (1.44), полученные Ленгмюром, не учитывают начальные скорости эмитированных катодом

электронов и дают поэтому несколько заниженные значения i_a даже при подстановке истинного значения β^2 , не равного единице.

Уточненный расчет, учитывающий начальные скорости электронов, для случая распределения потенциала, показанного на рис.1.7, и цилиндрических электродов дает следующую зависимость:

$$I_a = C(x_m) \cdot (U_a - U_m)^{\frac{3}{2}}. \quad (1.45)$$

Это уравнение справедливо при небольших изменениях анодного напряжения U_a , так как значения x_m и U_m , смысл которых объясняется на рис.1.7, зависят от величины U_a . Значение C зависит от x_m и определяется соотношением величин радиусов анода и катода.

На рис.1.9 представлена типичная вольтамперная характеристика диода при больших плотностях тока эмиссии. Левее точки перегиба, в области I, ток ограничен пространственным зарядом, рост тока правее этой точки, в области II, обусловлен эффектом Шоттки.

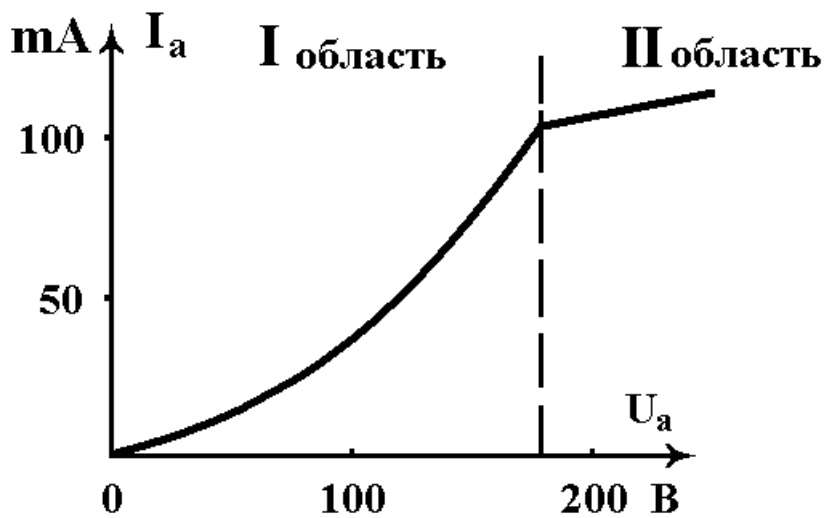


Рис.1.9. Типичная вольтамперная характеристика диода при больших плотностях тока эмиссии катода

2. Схема установки для экспериментальных исследований

Схема установки для экспериментального исследования вольт-амперной характеристики вакуумного диода представлена на рис.1.10. В качестве объекта исследования используется высоковольтный выпрямительный диод 6Ц10П с оксидным катодом. В анодную цепь включены источник анодного напряжения - стабилизированный источник постоянного напряжения АТН-2031, многопредельный микроамперметр А₂

(ЦУИП В7-40) для измерения анодного тока и вольтметр V_2 (В7-27) для измерения анодного напряжения.

Цепь накала катода питается от сети через регулятор напряжения накала катода РН. Прибор A_1 (В7-27) служит для измерения тока накала катода, вольтметр V_1 (В7-27) для измерения напряжения накала катода.

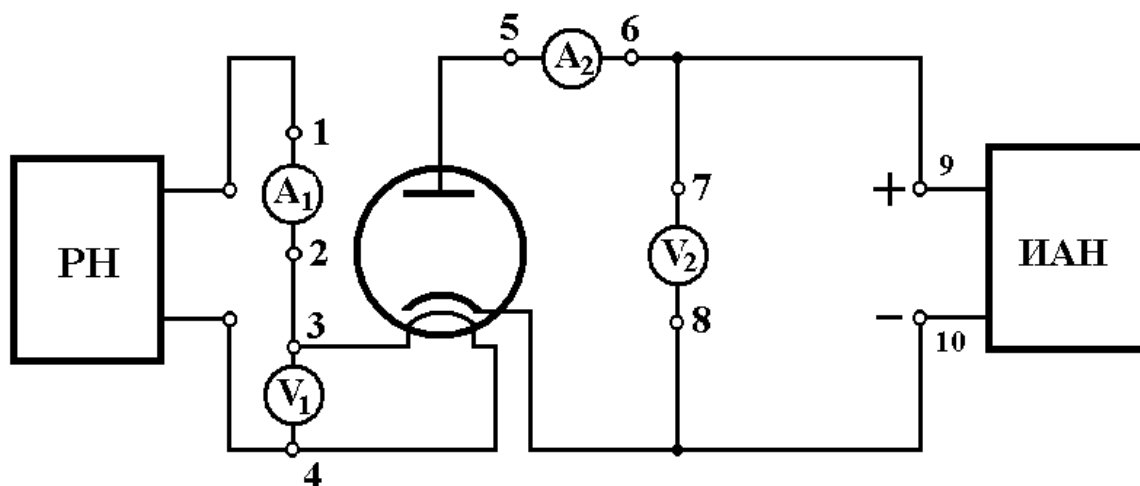


Рис.1.10. Схема измерительной установки для исследования вольтамперной характеристики вакуумного диода с оксидным катодом

3. Порядок и методика выполнения лабораторной работы

1. Изучить физические основы процесса термоэлектронной эмиссии металлов.
2. Изучить движение электронов в вакууме при плоских электродах.
3. Теоретическая вольтамперная характеристика диода без учета начальных скоростей вылета электронов из катода при плоских электродах.
4. Теоретическая вольтамперная характеристика диода с учетом начальных скоростей вылета электронов из катода при плоских электродах.
5. Теоретическая вольтамперная характеристика диода при цилиндрических электродах.
6. Изучить схему установки для проведения экспериментальных исследований вольтамперных характеристик вакуумного диода.
7. Подготовить необходимые таблицы для записи результатов экспериментальных исследований в соответствии с Приложением.
8. Провести экспериментальные исследования в соответствии со следующими указаниями.

В работе необходимо снять две вольтамперные характеристики диода: при нормальном токе накала I_n , равном 1А, и при уменьшенном токе накала, равном 300мА.

Для снятия ВАХ диода необходимо включить цепь накала диода и регулятором РН установить необходимое значение тока накала. Поскольку при изменении тока накала изменяется температура и сопротивление нити накала катода, что в свою очередь ведет к изменению тока накала, то регулировку необходимо вести методом последовательных приближений. После окончания регулировки необходимо выждать не менее 5 минут, чтобы ток накала и температура катода стабилизировались. После этого необходимо включить в цепь анода источник постоянного напряжения и, изменяя напряжение на аноде, снять по точкам вольт-амперную характеристику диода. Измерения производить:

1) при снятии характеристики, соответствующей малому току накала катода $I_H=300\text{mA}$, в диапазоне напряжений от 0 до 1В – через каждые 0,05В, в диапазоне напряжений от 1 до 2В – через каждые 0,2В;

2) при снятии характеристики, соответствующей номинальному току накала $I_H=1\text{A}$ катода, в диапазоне напряжений от 0 до 2В – через каждые 0,2В, в диапазоне напряжений от 2 до 5В – через каждые 0,5В, в диапазоне напряжений от 5 до 25В – через каждые 1В.

Результаты измерений представить в виде графика в координатах $\ln I_a(U_a)$, где I_a – анодный ток, U_a – напряжение на аноде. Значения U_a для кривых, соответствующих разным токам накала, можно брать в разных масштабах.

По кривой $\ln I_a(U_a)$, соответствующей току накала $I_H=300\text{mA}$, определить контактную разность потенциалов и температуру катода.

Определить показатель степени в уравнении зависимости тока от анодного напряжения по вольт-амперной характеристике, снятой при токе накала $I_H=1\text{A}$.

В данных экспериментальных исследованиях диапазон изменения U_a невелик, поэтому величины x_m , $C(x_m)$ и U_m можно принять постоянными. При $U_a > 20\text{ В}$ величиной U_m в формуле (1.45) можно пренебречь:

$$I_a = C(x_m) \cdot U_a^{\frac{3}{2}}. \quad (1.46)$$

По формуле (1.46) определить значение C при напряжениях на аноде 20, 23, 25В и вычислить среднее арифметическое \overline{C} . Подставив полученное значение в формулу (1.45), определить значение U_m для напряжений на аноде 6, 10, 12В и вычислить среднее арифметическое значение $\overline{U_m}$.

Пользуясь полученным значением, построить график зависимости $\ln(I_a)$ от $\ln(U_a - \overline{U_m})$. Определить по тангенсу угла наклона этого

графика значение показателя степени зависимости $I_a(U_a - \overline{U_m})$. Значение показателя степени должно быть близко к 1,5.

9. Оформить отчет по результатам исследований в виде таблиц и графиков.

10. Провести анализ полученных результатов и сделать выводы.

4. Используемые измерительные приборы и образцы

1. Высоковольтный выпрямительный диод 6Ц10П.
2. Вольтметр цифровой В7-40
3. Вольтметр цифровой В7-27
4. Стабилизированный источник постоянного напряжения АТН-2031.
5. Источник накала катода.

5. Требования к отчету по лабораторной работе

1. Написать название и цель проведения лабораторной работы. Записать в тетрадь краткие сведения о физических основах процесса термоэлектронной эмиссии металлов и вольт-амперной характеристике вакуумного диода.
2. Записать основные технические данные диода 6Ц10П.
3. Зарисовать схему установки для проведения экспериментальных исследований вольтамперных характеристик вакуумного диода.
4. Представить результаты проведения экспериментальных исследований вольтамперных характеристик вакуумного диода в виде таблиц в соответствии с Приложением.
5. Представить расчетные значения параметров, а также графики полученных вольтамперных характеристик вакуумного диода.
6. Представить в отчете выводы по полученным экспериментальным и расчетным данным.

6. Контрольные вопросы

1. Вольтамперная характеристика вакуумного диода.
2. Влияние контактной разности потенциалов на вольтамперную характеристику вакуумного диода.
3. Распределение потенциала и напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке при различных режимах работы вакуумного диода.
4. Вывод уравнения вольт-амперной характеристики вакуумного диода с плоскими электродами без учета начальной скорости электронов – закон степени $3/2$.

5. Вывод уравнения вольт-амперной характеристики вакуумного диода с плоскими электродами с учетом скорости электронов, эмитированных катодом.
6. Схема экспериментальной установки для исследования вольт-амперной характеристики вакуумного диода.
7. Методика и порядок выполнения лабораторной работы.

7. Указания по технике безопасности

1. Соблюдать правила ТБ при работе на электрооборудовании.
2. Перед началом работы проверить наличие, исправность и прочность крепления заземляющих проводов.
3. Не приступать к выполнению работы без вводного инструктажа по ТБ преподавателем, ведущим занятие.
4. Строго соблюдать все указания преподавателя.

8. Литература

1. Фридрихов С.А., Мовнин С.М. Физические основы электронной техники. - М.: Высшая школа, 1982.- 608 с.
2. Клейнер Э.Ю. Основы теории электронных ламп. - М.: Высшая школа, 1974. - 368 с.
3. Протасов Ю.С., Чувашев С.Н. Твердотельная электроника: Учеб. пособие. – Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2003. – 480 с.

Методические указания рассмотрены на заседании кафедры Физических основ электронной техники (21.12.2005 г. Протокол № 7) и рекомендованы к использованию в учебном процессе.

Заведующий кафедрой ФОЭТ
профессор, д. т. н.

Быков Д.В.

Приложение

Таблица 1

Результаты экспериментального исследования зависимости анодного тока I_A от анодного напряжения U_A при различных значениях тока накала катода I_H

№ 1.1	$I_H = 300 \text{ mA}$													
U_a (В)	0	.05	.10	.15	.20	.25	.30	.35	.40	.45	.50	.55	.60	.65
I_a (А)														
$\ln(U_a)$														
$\ln(I_a)$														
№ 1.2	$I_H = 300 \text{ mA}$													
U_a (В)	.70	.75	.80	.85	.90	.95	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0		
I_a (А)														
$\ln(U_a)$														
$\ln(I_a)$														
Результат	Температура катода $T_k =$ К							Контактная разность потенциалов $U_{кпр} =$ В						
№ 2.1	$I_H = 1.0 \text{ A}$													
U_a (В)	0	.20	.40	.60	.80	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	3.5
I_a (А)														
$\ln(U_a)$														
$\ln(I_a)$														
№ 2.2	$I_H = 1.0 \text{ A}$													
U_a (В)	4.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0
I_a (А)														
$\ln(U_a)$														
$\ln(I_a)$														
№ 2.3	$I_H = 1.0 \text{ A}$													
U_a (В)	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0	25.0					
I_a (А)														
$\ln(U_a)$														
$\ln(I_a)$														
Результат	Показатель степени $n =$													

Таблица 2

Результаты расчетов значений $C(x_m)$ и U_m при различных значениях напряжения на аноде U_a

№ 2	$I_H = 1.0 \text{ A}$		
$U_a \text{ (В)}$	20.0	23.0	25.0
$C(x_m)$			
Результат	Среднее значение $\overline{C(x_m)} =$		
$U_a \text{ (В)}$	6.0	10.0	12.0
$U_m \text{ (В)}$			
Результат	Среднее значение $\overline{U_m} =$ В		

Таблица 3

Результаты расчета зависимости $\ln(I_a)$ от $\ln(U_a - \overline{U_m})$ при значении тока накала катода $I_H = 1.0 \text{ A}$
Среднее значение $\overline{U_m} =$ В

№ 2.1	$I_H = 1.0 \text{ A}$													
$U_a \text{ (В)}$	0	.20	.40	.60	.80	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	3.5
$\ln(U_a - U_m)$														
$\ln(I_a)$														
№ 2.2	$I_H = 1.0 \text{ A}$													
$U_a \text{ (В)}$	4.0	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0
$\ln(U_a - U_m)$														
$\ln(I_a)$														
№ 2.3	$I_H = 1.0 \text{ A}$													
$U_a \text{ (В)}$	17.0	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0	25.0					
$\ln(U_a - U_m)$														
$\ln(I_a)$														
Результат	Показатель степени зависимости $\ln(I_a) = f(\ln(U_a - \overline{U_m}))$ n =													

Содержание

Исследование вольт-амперной характеристики вакуумного диода	. 3
1. Физические принципы работы вакуумного диода 3
2. Схема установки для экспериментальных исследований23
3. Порядок и методика выполнения лабораторной работы24
4. Используемые измерительные приборы и образцы26
5. Требования к отчету по лабораторной работе26
6. Контрольные вопросы по лабораторной работе26
7. Указания по технике безопасности27
8. Литература27
9. Приложение28

Учебное издание

Исследование вольт-амперной характеристики вакуумного диода

Составитель

ЧЕРНОВ Аркадий Алексеевич

Редактор С.П.Клышинская

Технический редактор О.Г.Завьялова

*Подписано в печать 27.02.06. Формат 60x84/16. Бумага типографская.
Печать-ризография. Усл. печ.л. 1,87. Уч.-изд.л. 1,69. Изд. № 25. Тираж
100 экз.*

Заказ

Московский государственный институт электроники и математики.

109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер. 1-3/12, стр.8.

*Отдел оперативной полиграфии Московского государственного
института электроники и математики.*

113053, Москва, ул. М. Пионерская, 12.