

ГЛАВА 3

ТЕРМОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

3.1. Физические принципы ТЭЭ

Термоэлектронной эмиссией (ТЭЭ) называется испускание электронов поверхностью нагретых проводящих тел. Впервые явление термоэлектронной эмиссии обнаружил на опыте Т.А. Эдисон (1883 г.).

Простейший прибор для наблюдения ТЭЭ (термоэлектронный диод) состоит из двух металлических электродов, помещённых в объем с низким давлением остаточных газов (рис. 3.1а). Электрод, эмитирующий электроны, обычно называется катодом, хотя в зависимости от вида эмиссии применяются и другие термины (термоэмиттер, фотоэмиттер, автоэмиттер). Получающий электроны электрод обычно называется анодом или коллектором. Независимо от употребляемого названия и знака потенциала, поданного на

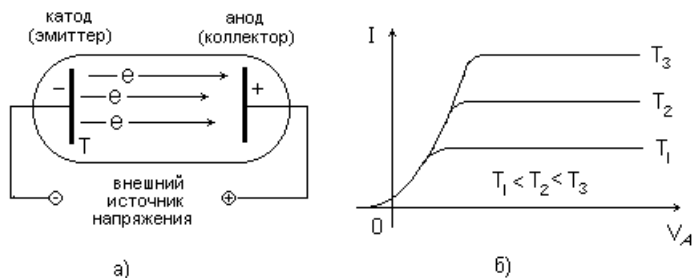


Рис. 3.1

- а) принципиальная схема термоэлектронного диода;
 б) ВАХ идеального диода при условии, что работы выхода электронов для материалов катода и анода равны: участок 1 — область ограничения тока пространственным зарядом, участок 2 — ток насыщения

электроды, работа выхода электронов катода будет обозначаться ϕ_K , а работа выхода электронов анода — ϕ_A .

Прикладывая разность потенциалов V_A между катодом и анодом и измеряя ток I , протекающий между электродами, получим вольтамперную характеристику (ВАХ) диода, т.е. зависимость анодного тока от анодного напряжения (рис. 3.1б).

Для электронов проводимости твердое тело представляется в виде энергетической потенциальной ямы с плоским дном (см. гл. 1), а на границе раздела (твердое тело–вакуум) имеется — потенциальный барьер — ступенька прямоугольной формы (рис. 3.2а). Из рис. 3.2б видно что, при отличной от нуля температуре среди электронов проводимости в твердом теле есть такие, энергия которых выше уровня вакуума. Эти электроны могут попадать в вакуум, двигаясь *над* потенциальным барьером на границе.

Потенциальный барьер характеризуется двумя параметрами:

- 1) расстоянием по оси энергии от уровня Ферми в кристалле до уровня вакуума — эта величина называется *термоэлектронной работой выхода* ϕ ;

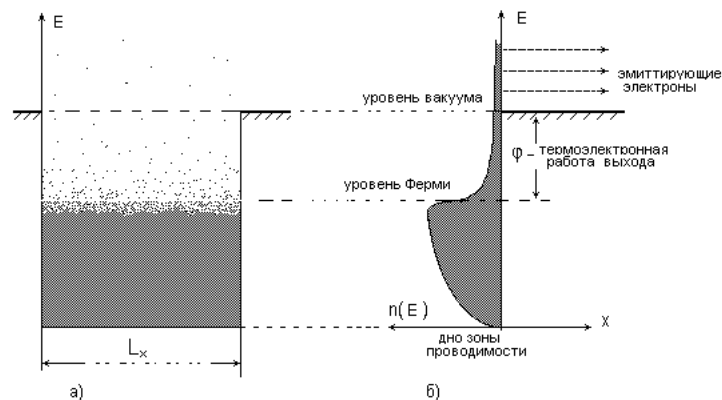


Рис. 3.2

- а) представление твердого тела в виде прямоугольной потенциальной ямы с плоским дном и потенциальными барьерами на границе тела;
 б) плотность распределения электронов по энергии в металле

- 2) средним значением коэффициента надбарьерного отражения \bar{R} для электронов, вылетающих из катода в вакуум (см. главу 1).

3.2. Формула Ричардсона–Дешмана для плотности тока насыщения ТЭЭ

Для прямоугольного потенциального барьера Ричардсон и Дешман (1928 г.) рассчитали максимальную плотность тока (тока насыщения) термоэлектронной эмиссии, которую может обеспечить при температуре T термокатод с работой выхода электронов ϕ (формула Ричардсона–Дешмана):

$$j = A_0 (1 - \bar{R}) T^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right), \quad (3.1)$$

где $A_0 = 4\pi m e k^2 / h^3 = 120,4 \text{ А/см}^2\text{К}^2$ — термоэмиссионная постоянная Зоммерфельда; T — температура катода по абсолютной шкале Кельвина (К); \bar{R} — коэффициент отражения электронов на границе тело–вакуум (обычно не превосходит 0,07 и при оценочных расчетах им можно пренебречь); φ — работа выхода электронов из катода; k — постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} = (11600)^{-1} \text{ эВ/К}$.

Далее везде вместо полного наименования «работа выхода электронов материала катода», будет использоваться более распространенное сокращенное название — работа выхода катода (соответственно — анода).

Для расчетов уравнение (3.1) используется чаще всего в следующем виде:

$$j = 120,4 T^2 \exp\left(-\frac{11600}{T} \varphi\right) \text{ (А/см}^2\text{)}, \quad (3.2)$$

где работа выхода φ выражается в электронвольтах. Сила тока I ТЭЭ определяется выражением: $I = j S$, где S — площадь эмитирующей поверхности катода.

Так как точное значение \bar{R} в общем случае не известно, вместо истинной работы выхода электронов $\varphi_{\text{ист}}$, которая стоит в уравнениях (3.1)–(3.2), вводят эффективную работу выхода $\varphi_{\text{эфф}}$ такую, что

$$A_0 (1 - \bar{R}) T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_{\text{ист}}}{kT}\right) = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_{\text{эфф}}}{kT}\right). \quad (3.3)$$

Это приводит к тому, что эффективная работа выхода $\varphi_{\text{эфф}}$ несколько выше истинной работы выхода $\varphi_{\text{ист}}$, а именно:

$$\varphi_{\text{эфф}} = \varphi_{\text{ист}} - kT \ln(1 - \bar{R}) \quad (3.4)$$

В общем случае работа выхода зависит от температуры, поэтому уравнения (3.1)–(3.4) не описывают в явном виде зависимость плотности тока ТЭЭ от температуры.

Если использовать линейную аппроксимацию функции $\varphi(T)$ около некоторого значения T_0 , то

$$\begin{aligned} \varphi(T) &= \varphi(T_0) + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial T}\right)_{T_0} (T - T_0) = \\ &= \left[\varphi(T_0) - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial T}\right)_{T_0} T_0\right] + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial T}\right)_{T_0} T. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Производная $\partial \varphi / \partial T = \alpha$ носит название температурного коэффициента работы выхода. Выражение в квадратных скобках называется ричардсоновской работой выхода φ_p и не зависит от температуры.

Второе слагаемое в (3.5) после постановки в формулу Ричардсона–Дэшмана приводит к появлению в формуле лишнего предэкспоненциального множителя, тоже не зависящего от температуры. Вся комбинация сомножителей называется ричардсоновской постоянной термоэмиссии:

$$A_p = A_0 (1 - \bar{R}) \exp\left[-\frac{\alpha}{k}\right]. \quad (3.6)$$

Уравнение (3.1) можно записать в виде

$$j = A_p T^2 \exp\left[-\frac{\varphi_p}{kT}\right]. \quad (3.7)$$

Связь между истинной, эффективной и ричардсоновской работами выходов электронов задается выражением

$$\begin{aligned} j &= A_0 (1 - \bar{R}) T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_{\text{ист}}}{kT}\right) = \\ &= A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_{\text{эфф}}}{kT}\right) = A_p T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_p}{kT}\right). \end{aligned} \quad (3.8)$$

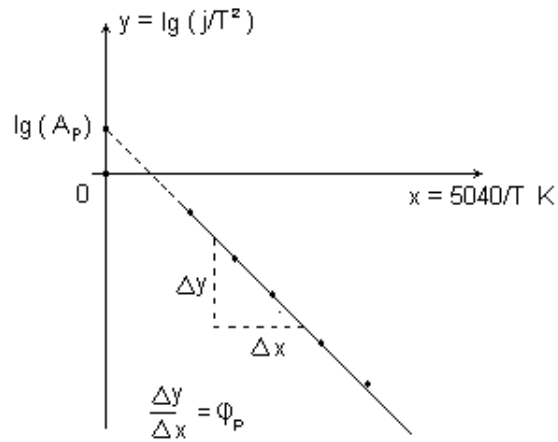


Рис. 3.3. Иллюстрация «метода прямых Ричардсона». Теоретическая прямая и экспериментальные точки зависимости $\lg(j/T^2)$ от $5040/T$

Для определения величин A_p и ϕ из экспериментально измеренных значений тока и температуры применяется так называемый «метод прямых Ричардсона». Зависимость $j(T)$, построенная в координатах $y = \lg(j/T^2)$ и $x = 5040/T$, представляет собой прямую, определяемую выражением

$$\lg\left(\frac{j}{T^2}\right) = \lg(A_p) - \phi_p \frac{5040}{T}, \quad (3.9)$$

которая пересекает ось ординат в точке $\lg A_p$. Коэффициент наклона прямой равен ϕ_p в электронвольтах (рис. 3.3).

Другой способ вычисления работы выхода по экспериментальным результатам («метод полного тока») состоит в вычислении $\phi_{\text{ПТ}}$ из (3.1) для каждого измеренного значения $I_s(T)$:

$$\phi_{\text{ПТ}} = -kT \ln(I_s / SA_0 T^2). \quad (3.10)$$

3.3. Влияние анодного напряжения, эффекта Шоттки и контактной разности потенциалов на вольт-амперную характеристику

Для того чтобы в чистом виде выявить влияние анодного напряжения на ток в цепи, предположим, что контактная разность потенциалов равна нулю (катод и анод сделаны из одного материала), а влияние объемного заряда электронов отсутствует. Он либо нейтрализован в межэлектродном промежутке равным ему по модулю положительным зарядом ионов, либо пренебрежимо мал.

Ток в цепи равен току насыщения термокатода j_H , если все эмитированные электроны достигают анода. Такой режим работы устанавливается, когда в межэлектродном промежутке нет тормозящего электроны электрического поля. Если такое поле есть (анодное напряжение V_A отрицательное), то ток в цепи будет обеспечиваться только теми из эмитированных электронов, которые смогут преодолеть дополнительный потенциальный барьер $-eV_A$. В этом случае плотность тока в цепи будет соответствовать формуле Ричардсона–Дэшмана (3.1), но в показателе экспоненты вместо работы выхода ϕ должно стоять $\phi - eV_A$:

$$\begin{aligned} j(V_A, T) &= j_H(T) \exp\left(\frac{eV_A}{kT}\right) = \\ &= A_0 (1 - \bar{R}) T^2 \exp\left(-\frac{\phi - eV_A}{kT}\right). \end{aligned} \quad (3.11)$$

Вольт-амперная характеристика, соответствующая (3.11), представлена на рисунке 3.4 в координатах $\lg(j)$ от V_A .

Если работы выхода катода ϕ_K и анода ϕ_A не совпадают, то между электродами наряду с приложенным анодным напряжением V_A действует контактная разность потенциалов.

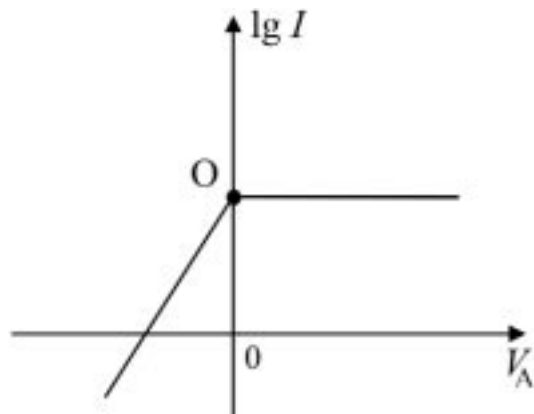


Рис. 3.4. Общий вид влияния анодного напряжения на ток диода с термокатодом. Объемный заряд не учитывается. Точкой O обозначен переходный случай, когда вылетевший из катода электрон попадает в поле нулевой напряженности

В результате точка нулевой напряженности поля и ВАХ термоэмиссионного диода в целом смещаются по оси анодных напряжений. Если $\varphi_K < \varphi_A$, то ВАХ смещается вправо на величину $(\varphi_A - \varphi_K)/e$, и наоборот, при $\varphi_K > \varphi_A$ ВАХ смещается влево на величину $(\varphi_K - \varphi_A)/e$, как это показано на рис. 3.5.

На рис 3.4 и 3.5 изображены ВАХ при малых значениях анодного напряжения. При больших напряжениях проявляется рассмотренный в главе 1 эффект Шоттки — понижение потенциального барьера на границе тело–вакуум при приложении вытягивающего электроны электрического поля напряженностью ε . Снижение работы выхода электронов определяется следующей формулой:

$$\Delta\varphi = e\sqrt{e\varepsilon} \text{ (СГСЭ)} = 3,8 \cdot 10^{-4} \sqrt{\varepsilon} \text{ (эВ)}, \quad (3.12)$$

где напряженность поля ε измеряется в В/см.

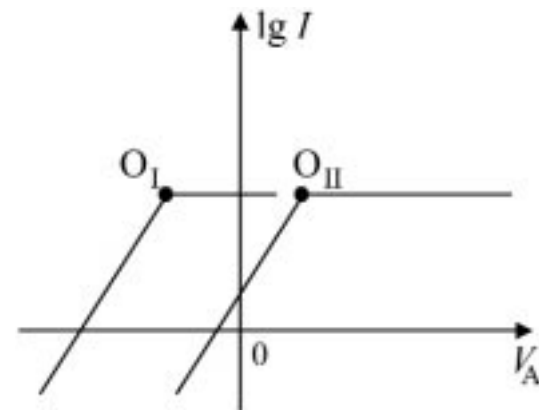


Рис. 3.5. Общий вид влияния анодного напряжения и контактной разности потенциалов на ток диода с термокатодом. Объемный заряд не учитывается. Точками O_I и O_{II} обозначены случаи, когда напряженность суммарного поля нулевая

В формуле Ричардсона–Дэшмана учет эффекта Шоттки приводит лишь к умножению тока насыщения на $\exp(\Delta\varphi / kT)$. Учитывая (3.12), выражение (3.1) для плотности тока ТЭЭ принимает вид

$$j = A_0 T^2 (1 - \bar{R}) \exp\left(-\frac{\varphi - e\sqrt{e\varepsilon}}{kT}\right). \quad (3.13)$$

Из (3.13) следует, что эффект Шоттки приводит к появлению зависимости плотности тока насыщения ТЭЭ от приложенной внешней разности потенциалов анод–катод.

3.4. Влияние объемного заряда на вольт-амперную характеристику

Если нагретое металлическое тело изолировано и находится в вакууме, то эмитированный электрон сразу начинает тормозиться, так как попадает в поле электростатических сил, создаваемых как отрицательным объемным зарядом других эмитированных электронов, так и положительным зарядом нагретого тела. В результате в вакууме вблизи поверхности изолированного нагретого тела образуется «электронное облако».

Влияние этого отрицательного объемного заряда на вольт-амперные характеристики легче понять, если предположить, что оба электрода (анод и катод) имеют одинаковую работу выхода. Электроны в межэлектродном промежутке создают отрицательный объемный заряд, который изменяет распределение потенциала, как это изображено на рис. 3.6.

Как видно из рис. 3.6, дополнительный потенциальный барьер ограничивает ток диода как при положительных (кривая V_{A2}), так и отрицательных (кривая V_{A3}) значениях анодного напряжения. При достаточно больших положительных значениях анодного напряжения (кривая V_{A1}) этот барьер исчезает, и ток диода становится равным току насыщения.

При достаточно больших по модулю отрицательных напряжениях (кривая V_{A4} на рис. 3.6) на пути электрона к аноду действует лишь тормозящее поле, и потенциальная энергия электрона только возрастает. Ток в диоде ограничивается именно отрицательным потенциалом анода, а не объемным зарядом. В результате получается ВАХ, изображенная на рис. 3.7. За счет влияния дополнительного потенциального барьера, создаваемого объемным зарядом, ток при малом (по модулю) напряжении уменьшается.

Отрезок прямой правее точки O_2 (рис. 3.7) соответствует случаю, когда в любой области между электродами электрическое поле, создаваемое приложенным напряжением,

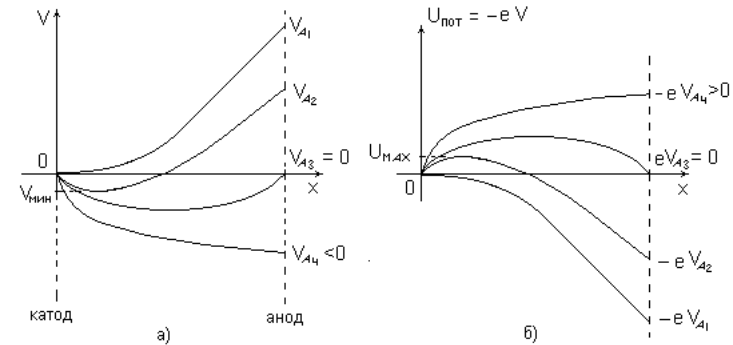


Рис. 3.6. Распределение потенциала (а) и потенциальной энергии (б) электрона в промежутке между анодом и катодом для плоскопараллельной конструкции диода

превышает поле отрицательного объемного заряда. Ток диода становится равным току насыщения. Этому случаю соответствует кривая V_{A1} на рис. 3.6. Отрезок прямой левее точки O_1 (рис. 3.7) соответствует случаю, когда объемный заряд на ток не влияет (кривая V_{A4} на рис. 3.6).

В области промежуточных значений приложенного напряжения задача о том, как на величину тока влияет объемный заряд, созданный этим же током, решается довольно сложным образом численными методами.

Приближенное же аналитическое решение задается формулой Чайльда–Ленгмюра (закон «трех вторых»):

$$I = g V^{\frac{3}{2}}. \quad (3.14)$$

Коэффициент g называется первансом и для диода с плоскопараллельными электродами определяется выражением

$$g = \frac{1}{9\pi} \left(\frac{2e}{m} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{S}{d^2} = 2,33 \frac{S}{d^2} \text{ (мкА/В}^{1,5}\text{)} \quad (3.15)$$

где S — площадь катода, d — расстояние между электродами.

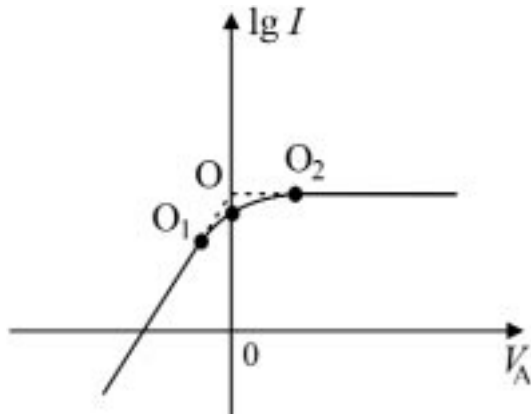


Рис. 3.7. Общий вид зависимости тока диода с термокатодом от анодного напряжения при учете объемного заряда

В режиме ограничения тока объемным зарядом распределение потенциала в межэлектродном пространстве задается формулой

$$V(x) = V_A \left(\frac{x}{d} \right)^{\frac{4}{3}}. \quad (3.16)$$

При выводе этих формул упрощенно предполагалось, что электроны покидают катод с нулевой скоростью. На самом деле, вылетевшие из эмиттера термоэлектроны имеют максвелловское распределение по скоростям и среднюю кинетическую энергию $2kT$. Средняя энергия, затрачиваемая на эмиссию одного электрона, составляет

$$E = \varphi + 2kT. \quad (3.17)$$

3.5. Термоэмиссионное преобразование тепловой энергии в электрическую

Термоэмиссионное преобразование тепловой энергии в электрическую происходит напрямую. В электрической цепи, содержащей вакуумный диод с термокатодом, электрический ток, равный току насыщения, может течь даже в том случае, если источник внешнего напряжения включен тормозящим электроны образом.

Это, как следует из энергетической диаграммы на рис. 3.8, возможно, если работа выхода электронов из термокатаода φ_K больше, чем работа выхода электрона из материала коллектора φ_A , а запирающее напряжение по абсолютной величине не превосходит разности $(\varphi_K - \varphi_A)/e$. На рис. 3.9 изображена вольт-амперная характеристика такого диода.

При рассмотрении идеализированного ТЭПЭ принимаются следующие предположения.

1) Плотность электронного потока насыщения j_s электрода при значении его температуры T подчиняется уравнению Ричардсона–Дэшмана (3.1).

2) Отрицательный электронный объемный заряд между электродами полностью скомпенсирован положительным объемным зарядом ионов цезия. Ионы цезия образуются из нейтральных атомов цезия на поверхности нагретых электродов за счет положительной поверхностной ионизации. Атомы в необходимом количестве поступают в межэлектродный промежуток из подсоединенного к ТЭПЭ источника атомов цезия. Таким образом осуществляется режим токопрохождения без объемного заряда.

Из условия равенства объемных плотностей отрицательных и положительных зарядов $\rho_- = \rho_+$ плотность ионного тока j_+ , необходимая для компенсации отрицательного электронного пространственного заряда, связана с плотностью электронного

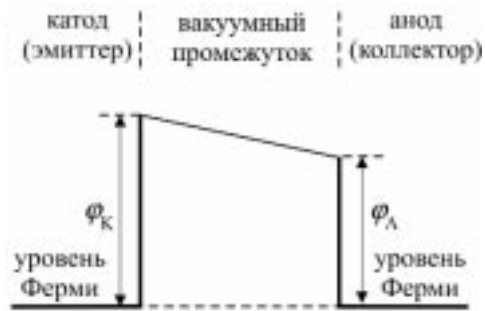


Рис. 3.8. Энергетическая диаграмма, соответствующая току короткого замыкания на ВАХ термоэмиссионного преобразователя (ТЭПЭ)

тока j_- , протекающего между электродами следующим соотношением:

$$j_+ = j_- \frac{x_+}{x_-} = j_- \sqrt{\frac{m}{M_{Cs}}} \approx \frac{1}{500} j_-, \quad (3.18)$$

где v_{\pm} — среднеарифметические значения скоростей ионов и электронов; m , M_{Cs} — массы электрона и иона цезия. Плотность тока j_+ , образующегося за счет поверхностной ионизации, прямо пропорциональна заряду иона e , потоку частиц на поверхность μ_{Cs} и коэффициенту ионизации β .

Во всех случаях принимается, что плотность электронного тока насыщения с анода, имеющего работу выхода электронов φ_A и работающего при температуре T_A , много меньше электронного тока насыщения с катода, имеющего температуру T_K и работу выхода электронов φ_K . Это условие, пренебрегая степенной зависимостью тока от температуры, можно записать следующим образом:

$$\frac{\varphi_K}{T_K} \ll \frac{\varphi_A}{T_A}. \quad (3.19)$$

Соотношение (3.19) накладывает ограничения на возмож-

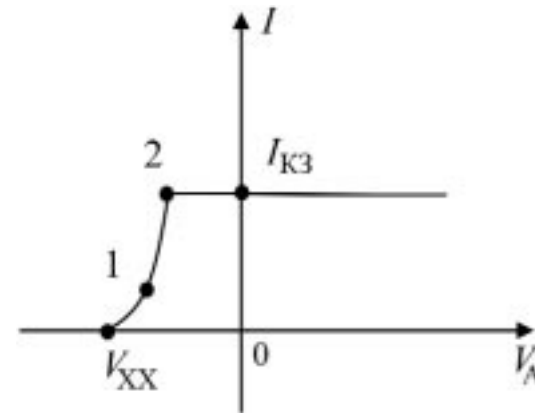


Рис. 3.9. Вольт-амперная характеристика ТЭПЭ

ные значения φ_K , φ_A и T_A , если некоторые из этих величин не заданы.

На вольт-амперной характеристике ТЭПЭ (рис. 3.9) можно выделить два участка.

1) Область тока насыщения. Электрическое поле между электродами является ускоряющим для электронов, идущих с катода на анод. Электронный ток не зависит от напряжения внешнего источника при $V_A > (\varphi_A - \varphi_K) / e$ и равен плотности тока насыщения Ричардсона–Дэшмана, умноженной на площадь поверхности катода S :

$$I_H = A_0 S T_K^2 \exp\left(-\frac{\varphi_K}{kT_K}\right). \quad (3.20)$$

2) Область начального тока. Электрическое поле между электродами является тормозящим для электронов, идущих с катода на анод. Электронный ток зависит от напряжения внешнего источника и при $V_A < (\varphi_A - \varphi_K) / e$ уменьшен по сравнению с током насыщения на больмановский фактор.

$$\begin{aligned}
I &= A_0 S T_K^2 \exp\left(-\frac{\varphi_K}{kT_K}\right) \exp\left(\frac{(\varphi_K - \varphi_A) + eV_A}{kT_K}\right) = \\
&= A_0 S T_K^2 \exp\left(-\frac{\varphi_A - eV_A}{kT_K}\right)
\end{aligned} \quad (3.21)$$

или в численном виде:

$$I = 120,4 S T_K^2 \exp\left[-\frac{11\,600}{T_K}(\varphi_A - eV_A)\right], \quad (3.22)$$

где ток I измеряется в амперах, температура катода T_K — К, площадь S — см², φ_A и eV_A — эВ.

Область начального тока ограничена слева точкой холостого хода, соответствующей такому напряжению V_{xx} внешнего источника, при котором ток в цепи ТЭПЭ равен нулю. Иными словами, обратным током с анода на термокатод уже нельзя пренебрегать, и при этом напряжении он становится в точности равным току с термокатода на анод $j_K = j_A$, тогда

$$T_K^2 \exp\left(-\frac{\varphi_A - eV_{xx}}{kT_K}\right) = T_A^2 \exp\left(-\frac{\varphi_A}{kT_A}\right). \quad (3.23)$$

После логарифмирования (3.23) получаем

$$|V_{xx}| = \left(\frac{T_K}{T_A} - 1\right) \frac{\varphi_A}{e} + \frac{2kT_K}{e} \ln \frac{T_K}{T_A}. \quad (3.24)$$

Приближенно, с точностью до нескольких процентов, можно считать, что напряжение холостого хода определяется только первым слагаемым формулы (3.24).

Вольт-амперная характеристика позволяет вычислить:

а) удельную максимальную мощность ТЭПЭ:

$$P_{\max} = j_H \left| \frac{\varphi_K - \varphi_A}{e} \right|; \quad (3.25)$$

б) нагрузочное сопротивление при заданном режиме работы:

$$R = |V_A|/I. \quad (3.26)$$

Для создания стационарных условий работы подводимая к катоду мощность P_H должна быть в точности равна мощности, теряемой катодом на эмиссию электронов P_E , на излучение P_R и теплопроводность от катода P_C :

$$P_H = P_E + P_R + P_C. \quad (3.27)$$

Для P_E с учетом (3.17) получим

$$P_E = j_H S (\varphi_K + 2kT_K)/e. \quad (3.28)$$

Потери на излучение определяются выражением

$$P_R = S \xi \sigma T_K^4, \quad (3.29)$$

где ξ — эффективный интегральный коэффициент излучения вещества, S — площадь эмитирующей поверхности катода, а σ — постоянная Стефана–Больцмана:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 e^2} = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/см}^2 \text{К}^4. \quad (3.30)$$

Большая часть мощности накала P_H расходуется именно на тепловое излучение P_R .

Значения удельных мощностей, подводимых к ТЭПЭ и получаемых от него, позволяет определить коэффициент полезного действия в различных приближениях.

а) Реальный КПД идеализированного ТЭПЭ

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\max}}{P_{\text{вх}}} = \frac{j_H S \left(\frac{\varphi_K - \varphi_A}{e} \right)}{\frac{j_H S (\varphi_A + 2kT_K)}{e} + P_R + P_C}. \quad (3.31)$$

б) «Электронный» КПД идеализированного ТЭПЭ

$$\eta_{\max}^* = \frac{j_H (\varphi_K - \varphi_A)}{j_H (\varphi_K + 2kT_K)} = \frac{\varphi_K - \varphi_A}{\varphi_K + 2kT_K}. \quad (3.32)$$

с) Термодинамический КПД ТЭПЭ

$$\eta_T = \frac{T_K - T_A}{T_K} = 1 - \frac{T_A}{T_K}. \quad (3.33)$$

3.6. Параметры термоэлектронных катодов

Применяемые на практике термоэлектронные эмиттеры характеризуются эффективностью. Эффективность катода H определяется отношением плотности тока насыщения к той удельной мощности накала p_H , которую необходимо подводить к катоду для поддержания стационарных условий работы. Другими словами эффективность — это электронный ток, получаемый на единицу мощности накала P_H :

$$H = I / P_H = j / p_H. \quad (3.34)$$

Подставляя формулу Ричардсона-Дэшмана в (3.34) и пренебрегая степенной зависимостью H от T , получим

$$H \approx C_1 \exp(-\varphi / kT). \quad (3.35)$$

Срок службы катода τ определяется в основном скоростью испарения рабочего вещества катода:

$$\tau \approx C_2 \exp(-q / kT), \quad (3.36)$$

где q — теплота испарения.

С повышением температуры эмиссионная способность и эффективность термоэлектрода экспоненциально растут, а срок службы экспоненциально уменьшается. Обычно термокатоды имеют эффективность от 5 до 100 мА/Вт, а срок службы — от 5 до 100 тысяч часов. Критерием пригодности вещества для при-

менения в качестве термоэлектрода является условие: $\varphi / q < 0,5$.

Наиболее употребительными термоэлектродами являются вольфрамовый, вольфрамовый с адсорбированными моноатомными пленками тория, бария или цезия, смесь окислов щелочноземельных металлов, окисел тория, гексаборид лантана, окисел иттрия, сплав платины с барием и др. Помимо рабочей температуры, плотности тока эмиссии, эффективности и срока службы, катоды различаются стойкостью к «отравлению» остаточными газами и ионной бомбардировке.

ЗАДАЧИ

Задача 3.1.

Оценить высоту потенциального барьера, создаваемого объемным электронным зарядом вблизи поверхности катода, если известно, что эффективная работа выхода электронов из катода $\varphi_{\text{эфф}} = 3,3$ эВ при $T = 2000$ К, а плотность анодного тока $j_A = 10^{-3}$ А/см².

Решение задачи 3.1.

$$j = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_{\text{эфф}} + \varphi_6}{kT}\right),$$

$$\varphi_6 = kT \ln \frac{A_0 T^2}{j} - \varphi_{\text{эфф}} = \frac{2000}{11600} \ln \frac{120,4 \cdot 4 \cdot 10^6}{10^{-3}} - 3,3 = 1,34 \text{ эВ.}$$

Ответ: 1,34 эВ.

Задача 3.2.

Найти эффективную работу выхода электронов при температуре 2000 К в условиях насыщения, и среднюю по поверхности работу выхода электронов пятнистой поверхности, у которой 0,1 площади поверхности занята участками с работой выхода электронов 3,3 эВ, а 0,9 площади поверхности занята участками с работой выхода электронами 4,6 эВ.

Решение задачи 3.2.

$$j_1 = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_1}{kT}\right) = 2,346 \text{ А/см}^2,$$

$$j_2 = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_2}{kT}\right) = 1,246 \text{ мА/см}^2,$$

$$j_1 f_1 = 0,2346 \text{ А/см}^2, \quad j_2 f_2 = 1,12 \text{ мА/см}^2,$$

$$j = j_1 f_1 + j_2 f_2 = 0,236 \text{ А/см}^2,$$

$$\varphi_{\text{эфф}} = kT \ln \frac{A_0 T^2}{j} = 3,696 \text{ эВ,}$$

$$\varphi_{\text{пов}} = 3,3 \cdot 0,1 + 4,6 \cdot 0,9 = 4,47 \text{ эВ.}$$

Ответ: 3,696 эВ, 4,47 эВ.

Задача 3.3.

За счет эффекта Шоттки работа выхода электронов уменьшилась на 0,1 эВ. Чему равно ускоряющее электрическое поле у поверхности катода?

Решение задачи 3.3.

$$\Delta\varphi = 3,8 \cdot 10^{-4} \sqrt{\varepsilon},$$

$$\varepsilon = \frac{(\Delta\varphi)^2}{14,44} \cdot 10^8 = 6,93 \cdot 10^4 \text{ В/см.}$$

Ответ: $\varepsilon = 6,93 \cdot 10^4$ В/см.

Задача 3.4.

Оксидный катод площадью $S = 1$ см² при температуре $T_1 = 800$ К дает ток эмиссии $I_1 = 0,088$ А, а при температуре $T_2 = 1000$ К — $I_2 = 3,34$ А. Методом полного тока найти работу выхода электронов и ее температурный коэффициент.

Решение задачи 3.4.

Из уравнения (3.2) найдем работу выхода катода

$$\varphi = kT \ln \left(\frac{S A_0 T^2}{I} \right),$$

$$\varphi_1 = 1,42 \text{ эВ}, \quad \varphi_2 = 1,50 \text{ эВ.}$$

Общее выражение для работы выхода электронов будет $\varphi = 1,1 + 4 \cdot 10^{-4} T$.

Ответ: 1,1 эВ, $4 \cdot 10^{-4}$ эВ/град.

Задача 3.5.

Вычислить удельную мощность, которую необходимо подводить к катоду для создания термоэлектронного потока плотностью 10^{-1} А/см² из катода при температуре 2200 К в условиях полного отбора тока эмиссии.

Решение задачи 3.5.

$$P = (\varphi_{\text{эфф}} + 2kT) \frac{j}{e} = \left[kT \ln \left(\frac{A_0 T^2}{j} \right) + 2kT \right] \frac{j}{e} =$$

$$= \left[\frac{22}{116} \ln \left(\frac{120,4 \cdot 4,84 \cdot 10^6}{0,1} \right) + 2 \cdot \frac{22}{116} \right] \cdot 0,1 = 1,464 \text{ Вт/см}^2.$$

Ответ: 1,464 Вт/см².

Задача 3.6.

Оценить эффективную работу выхода электронов из пленки Ва на W (система Ва-W) при $T = 1300$ К, если значения ричардсоновских постоянных известны $\varphi_p = 1,56$ эВ, $A_p = 1,5$ А/см²К².

Решение задачи 3.6.

$$A_0 T^2 \exp \left(-\frac{\varphi_{\text{эфф}}}{kT} \right) = A_p T^2 \exp \left(-\frac{\varphi_p}{kT} \right),$$

$$\varphi_{\text{эфф}} = \varphi_p + kT \ln \frac{A_0}{A_p} = 1,56 + \frac{13}{116} \ln \frac{120,4}{1,5} = 2,052 \text{ эВ}.$$

Ответ: $\varphi = 2,052$ эВ.

Задача 3.7.

Оценить плотность тока в диоде с молибденовым анодом ($\varphi_A = 4,3$ эВ) при задерживающем анодном напряжении $V_A = -1$ В, если вольфрамовый катод ($\varphi_K = 4,5$ эВ) диода работает при $T = 2500$ К.

Решение задачи 3.7.

Так как $\varphi_K < \varphi_A + eV_A$, то

$$j = A_0 T^2 \exp \left(-\frac{\varphi_A + eV_A}{kT} \right),$$

$$j = 120,4 \cdot 6,25 \cdot 10^6 \exp \left(-\frac{5,3 \cdot 11600}{2500} \right) = 15,7 \text{ мА/см}^2.$$

Ответ: $j = 15,7$ мА/см².

Задача 3.8.

Диод работает в недокальном режиме, так что влиянием объемного заряда можно пренебречь. Анодный ток при трех значениях анодного напряжения: 0 В, +1 В и +2 В равен $I = 10^{-9}$ А, $I = 10^{-4}$ А, $I = 10^{-2}$ А. Найти температуру катода, работу выхода электронов катода и анода.

Решение задачи 3.8.

Сильная зависимость тока от напряжения указывает на то, что по крайней мере первая точка лежит в области задержки тока.

$$\frac{j_2}{j_1} = 10^5 = \frac{\exp \left(-\frac{11600(\varphi_A + 1)}{T} \right)}{\exp \left(-\frac{11600\varphi_A}{T} \right)} = \exp \left(-\frac{11600}{T} \right).$$

Отсюда температура катода $T = 992$ К.

Отношение третьего и второго тока не удовлетворяет этому уравнению, поэтому третья точка лежит в режиме насыщения, т.е. ток эмиссии равен 0,01 А. Из формулы ТЭЭ

$$j_3 = A_0 T^2 \exp \left(-\frac{\varphi_K}{kT} \right),$$

$$\varphi_K = \frac{992}{11\,600} \ln(1,18 \cdot 10^{10}) = 1,98 \text{ эВ.}$$

Из формулы ТЭЭ для первой точки

$$j_1 = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_A}{kT}\right),$$

$$\varphi_A = \frac{992}{11\,600} \ln(1,18 \cdot 10^{17}) = 3,36 \text{ эВ.}$$

Ответ: $T = 992 \text{ К}$, $\varphi_K = 1,98 \text{ эВ}$, $\varphi_A = 3,36 \text{ эВ}$.

Задача 3.9.

Найти величины плотности тока электронной эмиссии в диоде с вольфрамовыми катодом и анодом (работа выхода $\varphi = 4,5 \text{ эВ}$); расстояние между электродами равно $0,1 \text{ см}$ при анодном напряжении 200 В ; 20 В ; -2 В . Температура катода 2500 К .

Решение задачи 3.9.

Ток насыщения без учета эффекта Шоттки

$$j_H = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\varphi}{kT}\right) =$$

$$= 120,4 \cdot 6,25 \cdot 10^6 \exp\left(-\frac{116}{25} 4,5\right) = 643 \text{ мА/см}^2.$$

В соответствие с (3.14) и (3.15) ток, ограниченный объемным зарядом:

$$j_{O3}(20) = 2,33 \cdot 89,4 \cdot 10^{-4} = 20,8 \text{ мА/см}^2;$$

$$j_{O3}(200) = 2,33 \cdot 2828 \cdot 10^{-4} = 659 \text{ мА/см}^2;$$

$$j_{O3}(197) = 2,33 \cdot 2764 \cdot 10^{-4} = 643 \text{ мА/см}^2.$$

При запирающем напряжении

$$j(-2) = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\varphi + 2}{kT}\right) =$$

$$= 120,4 \cdot 6,25 \cdot 10^6 \exp\left(-\frac{116 \cdot 6,5}{25}\right) = 6 \cdot 10^{-5} \text{ А/см}^2.$$

При $V = 197 \text{ В}$ ток, ограниченный объемным зарядом, совпадает с током насыщения. Для области плотности тока насыщения $j_A = j_H = 643 \text{ мА/см}^2$.

Ответ: 643 мА/см^2 ; $20,8 \text{ мА/см}^2$; $6 \cdot 10^{-5} \text{ А/см}^2$;

Задача 3.10.

Вольфрамовый катод ($\varphi = 4,5 \text{ эВ}$) в виде тонкой нити имеет площадь $S = 0,1 \text{ см}^2$, температуру $T = 2500 \text{ К}$ и интегральную излучательную способность $\xi = 0,32$. Найти ток эмиссии I , мощность накала P_H и эффективность катода H .

Решение задачи 3.10.

В соответствие с (3.2) ток эмиссии $I = 64 \text{ мА}$.

Мощность накала складывается из мощности теплового излучения и мощности, связанной с эмиссией электронов:

$$P_H = S\xi\sigma T^4 + I/e(\varphi + 2kT) = 7,4 \text{ Вт.}$$

Эффективность катода равна $H = I/P_H = 8,65 \text{ мА/Вт}$.

Ответ: $I = 64 \text{ мА}$; $P_H = 7,4 \text{ Вт}$; $H = 8,65 \text{ мА/Вт}$.

Задача 3.11.

Срок службы термокатода был повышен в 25 раз путем снижения рабочей температуры. Во сколько раз понизилась при этом эффективность катода, если $\varphi = 3 \text{ эВ}$, а $q = 6 \text{ эВ}$?

Решение задачи 3.11.

Исключая kT из выражений (9) и (10), получим $\tau^{\varphi/qH} = \text{const}$.

$$\tau = C_2 \exp\left(\frac{q}{kT}\right), \quad H = C_1 \exp\left(-\frac{\varphi}{kT}\right),$$

$$\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^\varphi = \exp\left[\frac{\varphi q}{k}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right] = \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^q,$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^{\frac{\varphi}{q}} = \left(\frac{1}{25}\right)^{\frac{3}{6}} = \frac{1}{5}.$$

Ответ: Эффективность H уменьшится в 5 раз.

Задача 3.12.

Термоэлектронный преобразователь энергии имеет $\varphi_K = 3$ эВ, $\varphi_A = 2$ эВ, $T_K = 2000$ К, $S = 10$ см². Найти максимальную мощность и соответствующее сопротивление нагрузки.

Решение задачи 3.12.

ТЭПЭ имеет левостороннюю характеристику, с изломом при $V^* = -1$ В. Изменяя сопротивление нагрузки R , найдем максимум $IV^* = 134$ Вт при $R = 0,0075$ Ом.

Ответ: $R = 0,0075$ Ом.

Задача 3.13.

Вычислить, при каком запирающем напряжении ток в цепи прекращается, если температура термокатода 2000 К, температура анода 300 К, работа выхода анода $\varphi_A = 2$ эВ.

Решение к задаче 3.13.

В соответствии с формулой (3.24)

$$V_{xx} = \left(\frac{T_K}{T_A} - 1\right) \frac{\varphi_A}{e} + \frac{2kT_K}{e} \ln \frac{T_K}{T_A} = 12 \text{ В.}$$

Ответ: $V_{xx} = 12$ В.

Задача 3.14.

Оцените значения термодинамического и максимального электронного КПД для ТЭПЭ при отсутствии отрицательного объемного заряда, если известны значения температуры термо-

катода $T_K = 2500$ К и $T_A = 1000$ К, а электронная плотность тока насыщения с них при этом равна $j_K = 1$ А/см² и $j_A = 10^{-6}$ А/см², соответственно.

Решение задачи 3.14.

$$\eta_T = \frac{T_K - T_A}{T_K} = 1 - \frac{T_A}{T_K} = 1 - \frac{1000}{2500} = 0,6 = 60 \%,$$

$$j_K = AT_K^2 \exp\left(-\frac{\varphi_K}{kT_K}\right),$$

$$\varphi_K = 4,405 \text{ эВ,}$$

$$j_A = AT_A^2 \exp\left(-\frac{\varphi_A}{kT_A}\right),$$

$$\varphi_A = 2,79 \text{ эВ.}$$

Средняя кинетическая энергия электрона в потоке

$$2kT_K = 0,431 \text{ эВ.}$$

В соответствии с формулой (3.32)

$$\eta_{\max}^* = \frac{4,405 - 2,79}{4,405 + 0,431} = 0,33 = 33,3 \%.$$

Ответ: $\eta_T = 60 \%$, $\eta_{\max}^* = 33,3 \%$.

Задача 3.15.

Оцените значение максимальной удельной мощности ТЭПЭ, катод которого изготовлен из вольфрама ($\varphi_K = 4,5$ эВ), а анод из цезированного молибдена ($\varphi_A = 1,8$ эВ), температура катода $T_K = 2300$ К, а температура анода $T_A = 500$ К при отсутствии отрицательного объемного заряда.

Решение задачи 3.15.

$$P_{\max} = j_K \frac{(\varphi_K - \varphi_A)}{e} = A_0 T_K^2 \frac{\varphi_K - \varphi_A}{e} \exp\left(-\frac{\varphi_K}{kT_K}\right) =$$

$$= 120,4 T_K^2 \left(\frac{\varphi_K - \varphi_A}{e} \right) \exp \left(- \frac{11600 \varphi_K}{T_K} \right) =$$

$$= 0,089 (4,5 - 1,8) = 0,24 \text{ Вт/см}^2.$$

Ответ: 0,24 Вт/см².

Задача 3.16.

Оцените значение нагрузочного сопротивления R в цепи ТЭПЭ с плоским катодом из вольфрама ($\varphi_K = 4,5$ эВ) и плоским коллектором из цезированного молибдена ($\varphi_A = 1,8$ эВ), если известно, что площадь каждого из электродов равна 10 см^2 , температура катода $T_K = 2500$ К, а падение напряжения на нагрузке $V = 3,5$ В. Укажем также, что отрицательный объемный заряд скомпенсирован, а температура коллектора настолько мала, что плотность тока насыщения с коллектора много меньше, чем с термокатода ($T_A = 300$ К).

Решение задачи 3.16.

Напряжение на нагрузке ($V = 3,5$ В) больше, чем контактная разность потенциалов $(\varphi_A - \varphi_K)/e = 2,7$ В, следовательно ТЭПЭ работает в режиме начальных токов:

$$j = AT_K^2 \exp \left(- \frac{\varphi_K}{kT_K} \right) \exp \left(\frac{-eV - \varphi_K + \varphi_A}{kT_1} \right) =$$

$$= AT_K^2 \exp \left(- \frac{eV + \varphi_A}{kT_K} \right) = 120,4 T_K^2 \exp \left(- \frac{11600 (eV + \varphi_A)}{T_K} \right) =$$

$$= 120,4 \cdot 6,25 \cdot 10^6 \exp \left(- \frac{116 \cdot 5,3}{25} \right) = 1,57 \cdot 10^{-2} \text{ А/см}^2,$$

$$I = 0,157 \text{ А}, \quad R = \frac{V}{I} = \frac{3,5}{0,157} = 22,3 \text{ Ом}.$$

Ответ: 22,3 Ом.

Задача 3.17.

Оцените значение нагрузочного сопротивления R в режиме максимальной мощности ТЭПЭ с вольфрамовым катодом ($\varphi_K = 4,5$ эВ) и цезированным коллектором ($\varphi_A = 1,8$ эВ), если известно, что площадь каждого из электродов равна $S = 10 \text{ см}^2$, а температура катода $T_K = 2500$ К. Предполагается, что объемного заряда между электродами нет, а температура анода настолько мала, что ток насыщения с анода много меньше, чем с катода ($T_A = 500$ К).

Решение задачи 3.17.

$$I = j_K S = AT_K^2 S \exp \left(- \frac{\varphi_K}{kT_K} \right) = 6,43 \text{ А},$$

$$P_{\max} = I \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{e} = 6,43 \cdot 2,7 = 17,36 \text{ Вт},$$

$$R = \frac{\varphi_K - \varphi_A}{eI} = \frac{2,7}{6,43} = 0,42 \text{ Ом}.$$

Ответ: $R = 0,42$ Ом.

Задача 3.18.

Оцените значение ЭДС холостого хода для ТЭПЭ при отсутствии объемного заряда и плоскопараллельной геометрии электродов, значение температуры катода которого $T_K = 2500$ К, а анода $T_A = 1000$ К, если известно, что плотность тока насыщения из анода составляет $j_A = 0,1 \text{ А/см}^2$, а из катода — много больше этой величины.

Решение задачи 3.18.

Напряжение холостого хода находится из условия:

$$j_K = j_A,$$

$$A_0 T_K^2 \exp \left(- \frac{eV_{\text{хх}} + \varphi_A}{kT_K} \right) = 10^{-1},$$

$$eV_{xx} + \varphi_A = 4,9 \text{ эВ},$$

$$j_A = 10^{-1} = A_0 T_2^2 \exp\left(-\frac{\varphi_A}{kT_A}\right),$$

$$\varphi_A = 1,8 \text{ эВ},$$

$$V_{xx} = 4,9 - 1,8 = 3,1 \text{ В}.$$

Ответ: $V_{xx} = 3,1 \text{ В}$.

Задача 3.19.

Оцените значение работы выхода электронов из анода ТЭПЭ с плоскими электродами в отсутствии объемного заряда, если известно, что при температуре катода $T_K = 2500 \text{ К}$, плотность термоэлектронного тока насыщения из катода составляет $j_K = 4 \text{ А/см}^2$, плотность термоэлектронного тока насыщения из анода равна $j_A = 0,5 \text{ А/см}^2$, а максимальная удельная мощность при этих условиях составляет $8,75 \text{ Вт/см}^2$.

Решение задачи 3.19.

$$4 = 120,4 \cdot 6,25 \cdot 10^6 \exp\left(-\frac{116}{25} \varphi_K\right),$$

$$\varphi_K = 4,105 \text{ эВ},$$

$$P_{\max} = \frac{(j_K - j_A)(\varphi_K - \varphi_A)}{e} = 8,75 \text{ Вт/см}^2,$$

$$\varphi_K - \varphi_A = \frac{8,75}{3,5} = 2,5 \text{ эВ},$$

$$\varphi_A = 1,605 \text{ эВ}.$$

Ответ: $\varphi_A = 1,605 \text{ эВ}$.

Задача 3.20.

Вычислить максимальный КПД термоэмиссионного преобразователя энергии при температуре катода и анода равных

2000 К и 300 К, соответственно, если потери удельной мощности катода на излучение и теплопроводность составляют $p = 30 \text{ Вт/см}^2$, работа выхода анода составляет $\varphi_A = 1,81 \text{ эВ}$. Каково должно быть при этом значение работы выхода электронов катода? При расчетах влиянием объемного заряда на токообразование пренебречь.

Решение задачи 3.20.

Наибольшая мощность снимается с ТЭПЭ тогда, когда напряжение на нагрузке равно КРП $(\varphi_K - \varphi_A)/e$.

При температуре анода $T_A = 300 \text{ К}$ ток насыщения с него очень мал $j_A = 4 \cdot 10^{-24} \text{ А/см}^2$, им можно пренебречь.

$$\eta_T = 1 - \frac{T_A}{T_K} = 1 - 0,15 = 0,85 = 85 \%.$$

Формулу (3.31) можно свести к виду

$$\eta_{\max} = \frac{j_H (\varphi_K - \varphi_A)}{j_H (\varphi_K + 2kT_K) + ep}.$$

При неизменных температурах катода и анода, потерях энергии и работе выхода анода КПД достигает максимума при определенной работе выхода катода. Проще всего ее найти численными методами, подбором:

$$\varphi_K^* \approx 2,74 \text{ эВ},$$

$$j_K = 60,4 \text{ А/см}^2, \quad \eta_{\max} = 0,26,$$

$$\text{т.е. } \eta_{\max} = 26\% < \eta_T = 85 \%.$$

Ответ: $\varphi_K^* \approx 2,74 \text{ эВ}; \quad \eta = 26 \%$.

Задача 3.21.

Оцените значение удельной мощности накала оксидного катода и его экономичность, если известно, что при $T = 1000 \text{ К}$ плотность тока термоэлектронной эмиссии $j = 0,1 \text{ А/см}^2$, а коэффициент лучеиспускания катода $\xi = 0,3$.

Решение задачи 3.21.

Для того, чтобы электроны постоянно эмитировались катодом, необходим подвод удельной мощности — q_E . Ее можно оценить из энергии, затраченной электроном на преодоление потенциального барьера, который в общем случае равен суммарному барьеру работы выхода и объемного заряда ($\varphi + e \Delta V$); и средней кинетической энергии электрона в потоке с максвелловским распределением по скоростям, равной $2kT$. Влиянием объемного заряда пренебрежем $\Delta V = 0$, тогда суммарный расход энергии на эмиссию одного электрона

$$E = \varphi + 2kT, \\ q_E = j(\varphi + 2kT)/e.$$

Зная плотность тока эмиссии $j = 0,1 \text{ А/см}^2$, можно разрешить уравнение (3.2) и определить работу выхода катода $\varphi = kT \ln(AT^2 / j) = 1,8 \text{ эВ}$. Для удельной мощности, затрачиваемой на эмиссию, получим $q_E = 0,197 \text{ Вт/см}^2$.

Мощность $q_R = \xi \sigma T^4$ тратится на тепловое излучение раскаленного термокатада. Потерей тепла за счет контактов можно пренебречь. Полная мощность накала

$$q_H = q_E + q_R, \\ q_H = \frac{j}{e} \left(kT \ln \frac{AT^2}{j} + 2kT \right) + \xi \sigma T^4 =$$

$$= 0,197 + 0,3 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{12} = 1,9 \text{ Вт/см}^2.$$

Эффективность $H = j / q_H = 52,6 \text{ мА/Вт}$.

Ответ: $q_H = 1,9 \text{ Вт/см}^2$; $H = 52,6 \text{ мА/Вт}$.

Задача 3.22.

На сколько должна изменяться работа выхода материала катода для того, чтобы плотность тока термоэлектронной эмиссии уменьшился на 1 %? Температура катода равна $T = 2500 \text{ К}$.

Решение задачи 3.22.

$$\frac{j_2}{j_1} = \frac{\exp\left(-\frac{11\,600\varphi_2}{T}\right)}{\exp\left(-\frac{11\,600\varphi_1}{T}\right)} = \exp\left(\frac{11\,600(\varphi_1 - \varphi_2)}{T}\right),$$

$$\ln(0,99) = \frac{11\,600}{2500}(\varphi_1 - \varphi_2),$$

$$\Delta\varphi = 0,0022 \text{ эВ}.$$

Ответ: $\Delta\varphi = 0,0022 \text{ эВ}$.

Задача 3.23.

Ток эмиссии карбидированного катода, работающего при температуре 2000 К равен 100 А . Чему равен ток эмиссии вольфрамового катода таких же размеров и разогретого до той же температуры? Работа выхода материалов катодов равны соответственно: $3,25 \text{ эВ}$ и $4,5 \text{ эВ}$.

Решение задачи 3.23.

$$\frac{I_2}{I_1} = \exp\left(\frac{11\,600(\varphi_1 - \varphi_2)}{T}\right) = \exp\left(-\frac{11\,600}{2000}1,25\right) = 0,0007,$$

$$I_2 = 0,07 \text{ А}.$$

Ответ: $I_2 = 0,07 \text{ А}$.

Задача 3.24.

Вольфрамовый, торированный и оксидный катоды нагреты до температуры 2400 К , 1900 К и 1000 К соответственно. Как относятся площади этих катодов, если токи эмиссии катодов одинаковы? Работы выхода материалов катодов равны соответственно $4,5 \text{ эВ}$, $2,6 \text{ эВ}$, $1,0 \text{ эВ}$.

Решение задачи 3.24.

$$j_1 S_1 = j_2 S_2 = j_3 S_3,$$

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{j_2}{j_1}, \quad \frac{S_1}{S_3} = \frac{j_3}{j_1},$$

$$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2 \exp\left(11600\left(\frac{\varphi_1}{T_1} - \frac{\varphi_2}{T_2}\right)\right) =$$

$$= \left(\frac{19}{24}\right)^2 \exp\left(116\left(\frac{4,5}{24} - \frac{2,6}{19}\right)\right) = 0,627 \cdot 356,5 = 223,$$

$$\frac{S_1}{S_3} = \left(\frac{T_3}{T_1}\right)^2 \exp\left(11600\left(\frac{\varphi_1}{T_1} - \frac{\varphi_3}{T_3}\right)\right) =$$

$$= \left(\frac{10}{24}\right)^2 \exp\left(116\left(\frac{4,5}{24} - \frac{1}{10}\right)\right) = 0,174 \cdot 25591 = 4453.$$

Ответ: $S_1/S_2 = 223$; $S_1/S_3 = 4453$.

Задача 3.25.

Вычислить удельную мощность, необходимую для обеспечения непрерывной эмиссии электронов из вольфрамового эмиттера при температуре 2500 К в условиях отбора всего тока насыщения.

Решение задачи 3.25.

В соответствии с формулой (3.2)

$$j = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\varphi}{kT}\right) = 0,643 \text{ А/см}^2,$$

$$P = (\varphi_{\text{эфф}} + 2kT) \frac{j}{e} = (4,5 + 2 \cdot 0,2155) 0,643 = 3,17 \text{ Вт/см}^2.$$

Ответ: $P = 3,17 \text{ Вт/см}^2$.

Задача 3.26.

Вычислить удельную мощность, подвод которой к катоду необходим для термоэлектронного тока плотностью 0,1 А/см² при температуре 2500 К в условиях отбора всего тока эмиссии.

Решение задачи 3.26.

$$P = (\varphi_{\text{эфф}} + 2kT) \frac{j}{e} = \left[kT \ln\left(\frac{A_0 T^2}{j}\right) + 2kT \right] \frac{j}{e} =$$

$$= \left[\frac{2500}{11600} \ln\left(\frac{120,4 \cdot 6,25 \cdot 10^6}{0,1}\right) + 2 \frac{2500}{11600} \right] 0,1 =$$

$$= (4,9011 + 2 \cdot 0,2155) 0,1 = 0,533 \text{ Вт/см}^2.$$

Ответ: $P = 0,533 \text{ Вт/см}^2$.

Задача 3.27.

Вычислите удельную мощность, подвод которой требуется для создания электронного потока плотностью 0,1 А/см² при температуре 2200 К в условиях отбора всего тока эмиссии.

Решение задачи 3.27.

$$E = \varphi_K + e\Delta V_K + 2kT_K,$$

$$q_{\text{исп}} = \frac{j}{e} (\varphi_K + e\Delta V_K + 2kT_K),$$

$$j = A_0 T_K^2 \exp\left(-\frac{\varphi_K}{kT_K}\right) = 0,1 \text{ А/см}^2,$$

$$\Delta V_K = 0,$$

$$q_{\text{исп}} = \frac{j}{e} (\varphi_K + 2kT_K) = \frac{j}{e} \left(kT_K \ln \frac{A_0 T_K^2}{j} + 2kT_K \right),$$

$$q_{\text{изл}} = \xi \sigma (T_K^4 - T_A^4),$$

Если $\xi = 1$ и $T_A \ll T_K$, то $q_{\text{изл}} = \xi \sigma T_K^4 = 132,8 \text{ Вт/см}^2$,

$$q_H = \frac{j}{e} \left(kT_K \ln \frac{AT_K^2}{j} + 2kT_K \right) + \xi \sigma T_K^4 =$$

$$= 0,1 (4,25 + 0,379) + 132,8 = 133,3 \text{ Вт/см}^2,$$

$$H = \frac{j}{q_H} = \frac{100}{133,3} = 0,75 \text{ мА/Вт.}$$

Ответ: $H = 0,75 \text{ мА/Вт.}$

Задача 3.28.

Катод и анод имеют работу выхода $\varphi = 1,8 \text{ эВ}$. Температура катода 1100 К . Какова будет плотность тока диода, если при напряжении в 100 В межэлектродное расстояние 2 мм ?

Решение задачи 3.28.

$$\varepsilon = \frac{V}{d} = 500 \text{ В/см,}$$

$$\Delta\varphi = 3,8 \cdot 10^{-4} \sqrt{\varepsilon} = 8,5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ,}$$

$$j_H = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\varphi - \Delta\varphi}{kT}\right) = 0,909 \text{ А/см}^2,$$

$$j_{O3} = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{V^{1,5}}{d^2} = 3 \cdot 2,33 \cdot 10^{-6} \cdot 25 \cdot 10^3 = 0,175 \text{ А/см}^2.$$

Ответ: $j = j_{O3} = 0,175 \text{ А/см}^2$.

Задача 3.29.

Чему равен анодный ток плоскопараллельного диода, если температура катода 1100 К , работа выхода электронов из катода $2,1 \text{ эВ}$; анодное напряжение 100 В , расстояние анод-катод $0,5 \text{ см}$; площадь катода 3 см^2 .

Решение задачи 3.29.

$$\varepsilon = \frac{V}{d} = 200 \text{ В/см,}$$

$$\Delta\varphi = 3,8 \cdot 10^{-4} \sqrt{\varepsilon} = 5,37 \cdot 10^{-3} \text{ эВ,}$$

$$I_H = SA_0 T^2 \exp\left(-\frac{\varphi - \Delta\varphi}{kT}\right) = 0,111 \text{ А,}$$

$$I_{O3} = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{SV^{1,5}}{d^2} = 0,028 \text{ А.}$$

Ответ: так как ток ограничен объемным зарядом, то $I = I_{O3} = 0,028 \text{ А.}$

Задача 3.30.

Плоский диод имеет электроды площадью 1 см^2 . Каким должно быть межэлектродное расстояние, чтобы при токе 100 мА разность потенциалов составила 100 вольт .

Решение задачи 3.30.

Если ток ограничен объемным зарядом, то

$$j = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{V^{1,5}}{d^2},$$

$$d = \sqrt{\frac{2,33 \cdot 10^{-3}}{0,1}} = 0,153 \text{ см.}$$

При этом температура катода и работа выхода должны быть таковы, чтобы ток насыщения был больше 100 мА .

Ответ: $d = 0,153 \text{ см.}$

Задача 3.31.

Катод плоского диода изготовлен из вольфрама ($\varphi_K = 4,5 \text{ эВ}$), анод изготовлен из платины ($\varphi_A = 5,32 \text{ эВ}$), межэ-

лектродное расстояние равно 1 см. Температура катода 2500 К. Рассчитать, при каком минимальном приложенном напряжении достигается ток насыщения.

Решение задачи 3.31.

$$2,33 \cdot 10^{-6} \frac{1}{d^2} \left(V + \frac{(\varphi_K - \varphi_A)}{e} \right)^{1,5} = A_0 T^2 \exp \left(- \frac{11\,600 \varphi_K}{2500} \right)$$

$$(V - 0,82)^{1,5} = 2,76 \cdot 10^5, \quad V = 4241 \text{ В.}$$

Ответ: $V = 4241 \text{ В.}$

Задача 3.32.

Катод плоского диода изготовлен из вольфрама ($\varphi = 4,5 \text{ эВ}$), анод изготовлен из тория ($\varphi = 3,5 \text{ эВ}$), межэлектродное расстояние равно 1 см. Температура катода 2500 К. Рассчитать, при каком минимальном приложенном напряжении достигается ток насыщения.

Решение задачи 3.32.

$$2,33 \cdot 10^{-6} \frac{1}{d^2} \left(V + \frac{(\varphi_K - \varphi_A)}{e} \right)^{1,5} = A_0 T^2 \exp \left(- \frac{11\,600 \varphi_K}{2500} \right)$$

$$(V + 1,2)^{1,5} = 2,76 \cdot 10^5, \quad V = 4239 \text{ В.}$$

Ответ: $V = 4239 \text{ В.}$

Задача 3.33.

Оцените значение анодного тока в диоде с оксидным катодом ($\varphi_K = 2,0 \text{ эВ}$) и молибденовым анодом ($\varphi_A = 4,3 \text{ эВ}$) в режиме объемного электронного заряда при двух значениях анодного напряжения $V_{A1} = 3 \text{ В}$ и $V_{A2} = 10 \text{ В}$, если известно, что первеанс диода $g = 10^{-4} \text{ А/В}^{1,5}$. При оценках не учитывать влияние потенциального барьера вблизи катода.

Решение задачи 3.33.

$$I = g \left(V + \frac{(\varphi_K - \varphi_A)}{e} \right)^{1,5},$$

$$I_1 = 5,9 \cdot 10^{-5} \text{ А}, \quad I_2 = 2,13 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

Ответ: $I_1 = 5,9 \cdot 10^{-5} \text{ А}; I_2 = 2,13 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$

Задача 3.34.

Оцените значение мощности, рассеиваемой на никелевом аноде ($\varphi_A = 4,5 \text{ эВ}$) диода с оксидным катодом ($\varphi_K = 2,0 \text{ эВ}$) в режиме объемного заряда при анодном напряжении $V_A = 10 \text{ В}$, если известно, что первеанс диода $g = 10^{-2} \text{ А/В}^{1,5}$. При оценках не учитывать влияние потенциального барьера вблизи катода.

Решение задачи 3.34.

$$P = IV_A,$$

$$I = g \left(V_A + \frac{(\varphi_K - \varphi_A)}{e} \right)^{1,5},$$

$$P = 10 \cdot 10^{-2} (10 - 4,5 + 2)^{1,5} = 2,05 \text{ Вт.}$$

Ответ: $2,05 \text{ Вт.}$

Задача 3.35.

Во сколько раз изменится значение анодного тока I_A при постоянном анодном напряжении $V_A = 10 \text{ В}$ в диоде с оксидным катодом ($\varphi_K = 2,0 \text{ эВ}$), работающем в режиме объемного электронного заряда, в результате напыления пленки бария из катода на никелевый анод, если известно, что $\varphi_{\text{Ni}} = 4,4 \text{ эВ}$, $\varphi_{\text{Ni+Ba}} = 2,6 \text{ эВ}$. При оценках не учитывать влияние потенциального барьера вблизи катода.

Решение задачи 3.35.

$$I_A = g \left(V_A + \frac{(\varphi_K - \varphi_A)}{e} \right)^{1,5},$$

$$I_{Ni+Ba} = g \left(V_A + \frac{(\varphi_K - \varphi_{Ni+Ba})}{e} \right)^{1,5}$$

$$I_{Ni} = g \left(V_A + \frac{(\varphi_K - \varphi_{Ni})}{e} \right)^{1,5},$$

$$\frac{I_{Ni+Ba}}{I_{Ni}} = \left(\frac{eV_A + \varphi_K - \varphi_{Ni+Ba}}{eV_A + \varphi_K - \varphi_{Ni}} \right)^{1,5} = 1,4.$$

Ответ: увеличится в 1,4 раза.

Задача 3.36.

Найдите напряженность электрического поля у анода плоскопараллельного диода, работающего в режиме ограничения тока пространственным зарядом, если анодное напряжение равно 300 В, а расстояние катод-анод равно 1 см.

Решение задачи 3.36.

Если в диоде режим ограничения тока объемным зарядом, то напряженность электрического поля у анода в 4/3 раза больше той, что была бы в отсутствии тока (при холодном катоде).

Ответ: $E = 400$ В/см.

Задача 3.37.

Вычислить высоту потенциального барьера, создаваемого объемным электронным зарядом вблизи поверхности катода, если эффективная работа выхода электронов из катода $\varphi = 3,3$ эВ при $T = 2000$ К, а плотность анодного тока $j = 0,05$ А/см².

Решение задачи 3.37.

$$j = A_0 T^2 \exp \left(- \frac{\varphi_{эфф} + \varphi_6}{kT} \right),$$

$$\begin{aligned} \varphi_6 &= kT \ln \frac{A_0 T^2}{j} - \varphi_{эфф} = \frac{20}{116} \ln \frac{1,204 \cdot 4 \cdot 10^8}{0,05} - 3,3 = \\ &= 3,96 - 3,3 = 0,66 \text{ эВ.} \end{aligned}$$

Ответ: $\varphi_6 = 0,66$ эВ.

Задача 3.38.

Плоскопараллельный диод имеет катод площадью 10 см² с работой выхода 4 эВ, температурой 2000 К и расстоянием до анода 1 см. Найти анодный ток при анодном напряжении $V = 465$ В.

Решение задачи 3.38.

$$\begin{aligned} I_H &= S A_0 T^2 \exp \left(- \frac{\varphi_K}{kT} \right) = 10 \cdot 120,4 \cdot 4 \cdot 10^6 \exp \left(- \frac{4 \cdot 116}{20} \right) = \\ &= 7,525 \cdot 10^8 \exp(-20,88) = 0,405 \text{ А,} \end{aligned}$$

$$I_{O3} = S \cdot 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{V^{1,5}}{d^2} = 2,33 \cdot 10^{-5} \frac{10027}{1} = 0,234 \text{ А.}$$

Ответ: диод работает в режиме тока, ограниченного пространственным зарядом; анодный ток равен 234 мА.

Задача 3.39.

Какова плотность тока в диоде с анодом, чья работа выхода $\varphi_A = 2,5$ эВ, при задерживающих напряжениях $V_1 = 1$ В и $V_2 = 3$ В, если катод с работой выхода $\varphi_K = 4,5$ эВ; температура катода $T = 2500$ К. Нарисовать энергетическую диаграмму диода.

Решение задачи 3.39.

При задерживающем напряжении V_1 выполнено условие $\varphi_K > \varphi_A + eV_1$, поэтому имеет место режим тока насыщения.

$$j_1 = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_K}{kT}\right) = 643 \text{ mA/cm}^2.$$

При задерживающем напряжении V_2 выполнено условие $\varphi_K < \varphi_A + eV_2$, поэтому ток ограничен потенциальным барьером $\varphi_A + eV_2 = 5,5 \text{ эВ}$.

$$j_2 = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_A + eV_2}{kT}\right) = 6,21 \text{ mA/cm}^2.$$

Ответ: $j_1 = 643 \text{ mA/cm}^2, j_2 = 6,21 \text{ mA/cm}^2$.

Задача 3.40.

Плоский диод имеет электроды площадью 1 см^2 . Каким должно быть межэлектродное расстояние, чтобы при токе 100 mA разность потенциалов составила 100 В . Катод и анод из одного материала с работой выхода $\varphi = 1,8 \text{ эВ}$. Температура катода 1100 К . Каким будет ток диода, если при напряжении в 100 В межэлектродное расстояние уменьшить в 2 раза?

Решение задачи 3.40.

$$j_1 = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{V^{3/2}}{d_1^2},$$

$$d_1 = 0,1526 \text{ см}, \quad d_2 = 0,0763 \text{ см},$$

$$I_2 = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{SV^{3/2}}{d_2^2} = 0,4 \text{ A}.$$

Ответ: в обоих случаях ток ограничен объемным зарядом, следовательно, $d_1 = 0,1526 \text{ см}, I_2 = 0,4 \text{ A}$.

Задача 3.41.

Как изменится работа выхода электронов из катода, если на анод подать ускоряющее напряжение $10\,000 \text{ В}$? Расстояние между катодом и анодом равно 2 мм .

Решение задачи 3.41.

$$\Delta\varphi = 3,8 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{V}{d}} = 3,8 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{10\,000}{0,2}} = 8,5 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}.$$

Ответ: уменьшится на $0,085 \text{ эВ}$.

Задача 3.42.

Температура катода плоскопараллельного термоэмиссионного диода равна 2000 К . Во сколько раз изменится ток насыщения термоэлектронной эмиссии, если вблизи поверхности катода приложить ускоряющее электрическое поле напряженностью 2000 В/см ?

Решение задачи 3.42.

$$\frac{j_2}{j_1} = \frac{\exp\left(-\frac{11\,600\varphi_2}{T}\right)}{\exp\left(-\frac{11\,600\varphi_1}{T}\right)} = \exp\left(\frac{11\,600(\varphi_1 - \varphi_2)}{T}\right),$$

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 3,8 \cdot 10^{-4} \sqrt{\varepsilon} = 3,8 \cdot 10^{-4} \cdot 44,7 = 0,017 \text{ эВ},$$

$$\frac{j_2}{j_1} = \exp\left(\frac{11\,600(\varphi_1 - \varphi_2)}{T}\right) = \exp\left(\frac{116 \cdot 0,017}{20}\right) = 1,1.$$

Ответ: увеличится в $1,1$ раза.

Задача 3.43.

Из-за эффекта Шоттки анодный ток диода превысил ток насыщения в $1,4$ раза. Определить температуру катода, если напряженность электрического поля у катода равна $4 \cdot 10^4 \text{ В/см}$.

Решение задачи 3.43.

$$\frac{j_2}{j_1} = \frac{\exp\left(-\frac{11\,600\varphi_2}{T}\right)}{\exp\left(-\frac{11\,600\varphi_1}{T}\right)} = \exp\left(\frac{11\,600(\varphi_1 - \varphi_2)}{T}\right),$$

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 3,8 \cdot 10^{-4} \sqrt{\varepsilon},$$

$$T = 11\,600 \frac{\Delta\varphi}{\ln(j_2/j_1)} = 11\,600 \frac{3,8 \cdot 10^{-4} \cdot 200}{\ln 1,4} = 2620 \text{ К.}$$

Ответ: $T = 2620 \text{ К.}$

Задача 3.44.

Во сколько раз увеличится ток насыщения вакуумного термоэлектронного диода, если катод с работой выхода $\varphi = 5 \text{ эВ}$ заменить на катод с работой выхода $\varphi = 1,8 \text{ эВ}$, а температуру катода уменьшить с 3100 К до 1400 К ?

Решение задачи 3.44.

$$\frac{j_2}{j_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2 \frac{\exp\left(-\frac{11\,600\varphi_2}{T_2}\right)}{\exp\left(-\frac{11\,600\varphi_1}{T_1}\right)} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2 \exp\left(11\,600\left(\frac{\varphi_1}{T_1} - \frac{\varphi_2}{T_2}\right)\right),$$

$$\left(\frac{14}{31}\right)^2 \exp\left(116\left(\frac{5}{31} - \frac{1,8}{14}\right)\right) = 0,204 \exp(3,795) = 9,08.$$

Ответ: Увеличится в 9,08 раза.

Задача 3.45.

Вследствие эффекта Шоттки анодный ток диода в два раза превысил ток насыщения. Определите температуру катода, если напряженность электрического поля у катода равна 10^5 В/см .

Решение задачи 3.45.

$$\frac{j_2}{j_1} = \frac{\exp\left(-\frac{11\,600\varphi_2}{T}\right)}{\exp\left(-\frac{11\,600\varphi_1}{T}\right)} = \exp\left(\frac{11\,600(\varphi_1 - \varphi_2)}{T}\right),$$

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 3,8 \cdot 10^{-4} \sqrt{\varepsilon},$$

$$T = 11600 \frac{\Delta\varphi}{\ln(j_2/j_1)} = 11\,600 \frac{3,8 \cdot 10^{-4} \sqrt{10^5}}{\ln 2} = 2011 \text{ К.}$$

Ответ: $T = 2011 \text{ К.}$

Задача 3.46.

Ток эмиссии катода, работающего при температуре $T = 2100 \text{ К}$ в течение некоторого интервала времени снижается на 5 %. С каким изменением работы выхода электронов связано это снижение? До какой величины необходимо повысить напряженность электрического поля для восстановления исходного уровня эмиссии, если в нормальных рабочих условиях напряженность поля у катода равна 10^4 В/см ?

Решение задачи 3.46.

Измерение работы выхода, вызвавшее снижение тока,

$$\Delta\varphi_t = \varphi_t - \varphi_0 = -kT \ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right) = -\frac{2100 \ln(0,95)}{11\,600} = 9,29 \cdot 10^{-3} \text{ эВ.}$$

Эффективная работа выхода с учетом эффекта Шоттки

$$\varphi_1 = \varphi_t - 3,8 \cdot 10^{-4} \sqrt{\varepsilon_1}.$$

Для того, чтобы скомпенсировать уменьшение эмиссионного тока необходимо увеличить напряженность поля до значения ε_2 , удовлетворяющего условию

$$\varphi_1 - \Delta\varphi_t = \varphi_t - 3,8 \cdot 10^{-4} \sqrt{\varepsilon_2},$$

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{\Delta\varphi_t}{3,8 \cdot 10^{-4}} + \sqrt{\varepsilon_1} \right)^2 = \left(\frac{9,29 \cdot 10^{-3}}{3,8 \cdot 10^{-4}} + \sqrt{10^4} \right)^2 = 1,55 \cdot 10^4 \text{ В/см.}$$

Ответ: $\Delta\varphi = 0,00929 \text{ эВ}$; $\varepsilon_2 = 1,55 \cdot 10^4 \text{ В/см.}$

Задача 3.47.

Катод плоскопараллельного диода изготовлен из вольфрама. Как изменится работа выхода электронов из катода, если на анод подать ускоряющее напряжение 1000 В? Расстояние между катодом и анодом равно 2 мм.

Решение задачи 3.47.

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = \frac{3,8 \cdot 10^{-4}}{4,5} \sqrt{\varepsilon} = 8,4 \cdot 10^{-5} \sqrt{5000} = 0,0059.$$

Ответ: уменьшится на 0,6 %.

Задача 3.48.

Вычислить во сколько раз увеличится электронный ток насыщения цезиевого эмиттера при температуре 500 К при увеличении напряженности электрического поля от нуля до 10^5 В/см . Найти абсолютные величины плотности тока насыщения цезиевого эмиттера в этих условиях. Работа выхода электронов из цезия $\varphi = 1,81 \text{ эВ}$.

Решение задачи 3.48.

$$j_1 = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\varphi}{kT}\right) = 1,74 \cdot 10^{-11} \text{ А/см}^2,$$

$$\Delta\varphi = 3,8 \cdot 10^{-4} \sqrt{\varepsilon} = 3,8 \cdot 10^{-4} \cdot 316,23 = 0,12 \text{ эВ},$$

$$j_2 = A_0 T^2 \exp\left(-\frac{\varphi - \Delta\varphi}{kT}\right) = 2,8 \cdot 10^{-10} \text{ А/см}^2,$$

$$j_2/j_1 = 16,25.$$

Ответ: увеличится в 16 раз.

Задача 3.49.

Вычислите относительное уменьшение работы выхода электронов из вольфрама ($\varphi = 4,5 \text{ эВ}$) при наличии у его поверхности ускоряющего электрического поля напряженностью 10^6 В/см .

Решение задачи 3.49.

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = \frac{3,8 \cdot 10^{-4}}{4,5} \sqrt{\varepsilon} = 8,4 \cdot 10^{-5} \cdot 10^3 = 0,084.$$

Ответ: уменьшится на 8,4 %.

Задача 3.50.

Оцените при температуре $T = 1500 \text{ К}$ значения плотности тока термоэлектронной эмиссии и температурного коэффициента работы выхода электронов $d\varphi/dT$ для системы W-J (пленка иттрия на вольфраме), если значения ричардсоновских постоянных известны и равны: $\varphi_p = 2,7 \text{ эВ}$, $A_p = 7,0 \text{ А/см}^2\text{К}^2$. Коэффициент отражения от барьера $R = 0$.

Решение задачи 3.50.

$$A_p = A_0 \exp\left(-\frac{1}{k} \frac{d\varphi}{dT}\right),$$

$$\frac{d\varphi}{dT} = k \ln \frac{A_0}{A_p} = \frac{1}{11600} \ln(120,4/7) = 2,45 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К.}$$

$$\text{Ответ: } j = 13,5 \text{ мА/см}^2; \quad \frac{d\varphi}{dT} = 2,45 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К.}$$

Задача 3.51.

Определите значения ричардсоновских постоянных φ_p и A_p для системы W-Th, если известно, что эффективная работа выхода электронов $\varphi_{\text{эфф}} = 3,4 \text{ эВ}$ при $T = 1800 \text{ К}$, температурный коэффициент работы выхода $d\varphi/dT = 10^{-4} \text{ эВ/К}$, коэффициент отражения $R = 0$.

Решение задачи 3.51.

$$\varphi_p = \varphi_{эфф} - \frac{\partial \varphi}{\partial t} T = 3,4 - 10^{-4} \cdot 1800 = 3,4 - 0,18 = 3,22 \text{ эВ},$$

$$A_p = A_0 \exp\left(-\frac{1}{k} \frac{\partial \varphi}{\partial t}\right) = 120,4 \exp(-11600 \cdot 10^{-4}) \approx 37,7 \text{ А/см}^2 \text{ К}^2.$$

Ответ: $\varphi_p = 3,22 \text{ эВ}$; $A_p = 37,7 \text{ А/см}^2 \text{ К}^2$.

Задача 3.52.

Определите значения ричардсоновских постоянных φ_p и A_p для импрегнированного катода, если известно, что плотность тока термоэлектронной эмиссии $j_1 = 1,0 \text{ А/см}^2$ при $T_1 = 1500 \text{ К}$, а при $T_2 = 1600 \text{ К}$ — $j_2 = 3 \text{ А/см}^2$. Коэффициент отражения $R = 0$.

Решение задачи 3.52.

$$1 = A_p \cdot 2,25 \cdot 10^6 \exp\left(-\frac{116 \cdot \varphi_p}{15}\right),$$

$$3 = A_p \cdot 2,56 \cdot 10^6 \exp\left(-\frac{116 \cdot \varphi_p}{16}\right),$$

$$3 = \frac{A_p \cdot 2,56 \cdot 10^6}{A_p \cdot 2,25 \cdot 10^6} \exp\left[-116 \varphi_p \left(\frac{1}{16} - \frac{1}{15}\right)\right] = 1,138 \exp\left(\frac{116 \varphi_p}{240}\right)$$

$$\ln \frac{3}{1,138} = 0,483 \varphi_p, \quad \varphi_p = 2,00 \text{ эВ}.$$

$$1 = A_p \cdot 2,25 \cdot 10^6 \exp\left(-\frac{116 \cdot 2,0}{15}\right),$$

$$A_p = \frac{5,213}{2,25} = 2,317 \text{ А/см}^2 \text{ К}^2.$$

Ответ: $\varphi_p = 2,00 \text{ эВ}$; $A_p = 2,32 \text{ А/см}^2 \text{ К}^2$.

Задача 3.53.

Определите значения ричардсоновских постоянных φ_p и A_p и температурного коэффициента работы выхода $d\varphi/dT$ в диапазоне 1000–1500 К для катода с двумя сортами пятен $\varphi_1 = 2,5 \text{ эВ}$ и $\varphi_2 = 3,0 \text{ эВ}$, если $f_1 = f_2$, где f_1 — доля поверхности, занятая пятнами с φ_1 , а f_2 — доля поверхности, занятая пятнами с φ_2 . Коэффициент отражения от барьера $R = 0$.

Решение задачи 3.53.

$$j = A_0 T^2 \left[f_1 \exp\left(-\frac{\varphi_1}{kT}\right) + f_2 \exp\left(-\frac{\varphi_2}{kT}\right) \right],$$

$$j(1000) = 1,52 \cdot 10^{-5} \text{ А/см}^2, \quad j(1500) = 0,555 \text{ А/см}^2.$$

Воспользуемся уравнением (3.7) и запишем его для температуры $T_1 = 1000 \text{ К}$ и $T_2 = 1500 \text{ К}$. В результате получим систему уравнений с двумя неизвестными, разрешив которую найдем A_p и φ_p :

$$\varphi_p = k \frac{T_2 T_1}{T_2 - T_1} \ln \left[\frac{j_2}{j_1} \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 \right] = 2,50 \text{ эВ},$$

$$A_p = \frac{j_2}{T_2^2} \exp\left(\frac{\varphi_p}{kT_2}\right) = 59,8 \text{ А/(см}^2 \text{ К}^2),$$

Температурный коэффициент работы выхода найдем, воспользовавшись формулой (3.6),

$$\frac{d\varphi}{dT} = k \ln \frac{A_0}{A_p} = 6,03 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}.$$

Ответ: $\varphi_p = 2,5 \text{ эВ}$; $A_p = 59,8 \text{ А/см}^2 \text{ К}^2$;

$$\frac{d\varphi}{dT} = 6,03 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}.$$

Задача 3.54.

Найти постоянные Ричардсона и эффективную работу выхода электронов при плотности тока насыщения величиной 1 A/cm^2 для оксидного катода, для которого $\varphi = 1,12 + 4,4 \cdot 10^{-4} T \text{ эВ}$.

Решение задачи 3.54.

В соответствие с формулами (3.5) и (3.6)

$$\varphi_p = 1,12 \text{ эВ},$$

$$A_p = A_0 \exp\left(-\frac{1}{k} \frac{\partial \varphi}{\partial T}\right) \approx 0,73 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^2.$$

По формуле (3.7) найдем температуру $T = 960 \text{ K}$, при которой плотность тока насыщения достигает значения 1 A/cm^2 .

Из формулы (3.8) следует, что эффективная работа выхода определяется выражением

$$\varphi_{\text{эфф}} = kT \ln\left(\frac{A_0 T^2}{j}\right) = 1,53 \text{ эВ}.$$

Ответ: $\varphi_p = 1,12 \text{ эВ}$, $A_p = 0,73 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^2$, $\varphi_{\text{эфф}} = 1,53 \text{ эВ}$.

Задача 3.55.

Оцените плотность тока термоэлектронной эмиссии системы W-Cs при 800 K , если значения ричардсоновских постоянных известны и равны: $\varphi_p = 1,41 \text{ эВ}$, $A_p = 3,55 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^2$.

Решение задачи 3.55.

$$j = A_p T^2 \exp\left(-\frac{\varphi_p}{kT}\right) = 3,55 \cdot 6,4 \cdot 10^5 \exp\left(-\frac{116 \cdot 1,41}{8}\right) = 3,55 \cdot 6,4 \cdot 10^5 \cdot 1,32 \cdot 10^{-9} \text{ A/cm}^2 = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ A/cm}^2.$$

Ответ: $j = 3 \cdot 10^{-3} \text{ A/cm}^2$.

Задача 3.56.

Вычислите значение «средней по поверхности» работы выхода электронов для некоторого сложного катода с двумя

сортами пятен: $\varphi_1 = 4,6 \text{ эВ}$ и $\varphi_2 = 2,5 \text{ эВ}$, если $f_1 = 0,9$, а $f_2 = 0,1$, где f_1 — доля поверхности, занятая пятнами с φ_1 , f_2 — доля поверхности, занятая пятнами с φ_2 .

Решение задачи 3.56.

$$\varphi_{\text{пов}} = \varphi_1 f_1 + \varphi_2 f_2 = 0,9 \cdot 4,6 + 0,1 \cdot 2,5 = 4,39 \text{ эВ}.$$

Ответ: $\varphi_{\text{пов}} = 4,39 \text{ эВ}$.

Задача 3.57.

Вычислите значение f_2 — доли поверхности, занятой пятнами с работой выхода $\varphi_2 = 2,5 \text{ эВ}$, при котором работа выхода «средняя по поверхности» $\varphi_{\text{пов}} = 4 \text{ эВ}$, если работа выхода пятен с $\varphi_1 = 4,6 \text{ эВ}$.

Решение задачи 3.57.

$$\varphi_{\text{пов}} = f_1 \varphi_1 + f_2 \varphi_2,$$

$$f_1 = 1 - f_2,$$

$$f_2 = \frac{\varphi_{\text{пов}} - \varphi_1}{\varphi_2 - \varphi_1} = \frac{4 - 4,6}{2,5 - 4,6} = \frac{0,6}{1,9} = 0,286.$$

Ответ: $f_2 = 0,286$ от общей площади эмиттера.

Задача 3.58.

Вычислите значение эффективной работы выхода электронов при $T = 1150 \text{ K}$ для некоторого сложного катода с двумя сортами пятен: $\varphi_1 = 4,6 \text{ эВ}$ и $\varphi_2 = 2,5 \text{ эВ}$, если $f_1 = 0,9$, а $f_2 = 0,1$, где f_1 — доля поверхности, занятая пятнами с φ_1 , f_2 — доля поверхности, занятая пятнами с φ_2 .

Решение задачи 3.58.

Плотность эмиссионного тока

$$j = A_0 T^2 \left[f_1 \exp\left(-\frac{\varphi_1}{kT}\right) + f_2 \exp\left(-\frac{\varphi_2}{kT}\right) \right].$$

Из формулы (3.8) следует, что эффективная работа вызода определяется выражением:

$$\begin{aligned}\varphi_{\text{эфф}} &= kT \ln \left(\frac{A_0 T^2}{j} \right) = -kT \ln \left[f_1 \exp \left(-\frac{\varphi_1}{kT} \right) + f_2 \exp \left(-\frac{\varphi_2}{kT} \right) \right] = \\ &= -\frac{1150}{11600} \ln \left[0,9 \cdot \exp \left(-\frac{4,6 \cdot 11,6}{1,15} \right) + 0,1 \cdot \exp \left(-\frac{2,5 \cdot 11,6}{1,15} \right) \right] = \\ &= 2,73 \text{ эВ.}\end{aligned}$$

Ответ: $\varphi_{\text{эфф}} = 2,73 \text{ эВ}$.

Задача 3.59.

Оценить долговечность оксидного катода при температуре 1000 К, полагая ее равной времени потери 2 % запаса активного вещества (нормальный запас составляет $5 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^2$). Скорость испарения окиси бария W в $\text{г/см}^2 \cdot \text{сек}$ определяется соотношением $\lg W = 7,7 - 20\,000/T$.

Решение задачи 3.59.

Определим скорость потери активного вещества при температуре $T = 1000 \text{ К}$.

$$\lg W = 7,7 - \frac{20\,000}{1000}, \quad W = 5 \cdot 10^{-13} \frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}.$$

Долговечность катода определим как время, за которое катод потеряет $\Delta \rho = 0,02 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 10^{-4} \text{ г/см}^2$ активного вещества, тогда

$$t = \frac{\Delta \rho}{W} = \frac{10^{-4}}{5 \cdot 10^{-13}} = 2 \cdot 10^8 \text{ с} \approx 5 \cdot 10^4 \text{ часов.}$$

Ответ: $t \approx 50\,000 \text{ час}$.

Задача 3.60.

Оцените значение удельной мощности накала катода из рения и его экономичность, если известно, что при $T = 2500 \text{ К}$

плотность тока насыщения термоэлектронной эмиссии $j = 0,1 \text{ А/см}^2$, а интегральный коэффициент излучения поверхности $\xi = 0,4$.

Решение задачи 3.60.

Из уравнения (3.2) найдем работу выхода катода

$$\varphi = kT \ln \left(\frac{A_0 T^2}{j} \right) = 4,9 \text{ эВ.}$$

Учитывая, что $2kT = 0,43 \text{ эВ}$, получим

$$p_E = j \frac{(\varphi + 2kT)}{e} = 0,1 \cdot 5,33 = 0,533 \text{ Вт/см}^2,$$

$$p_R = \xi \sigma T^4 = 0,4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-12} \cdot 39 \cdot 10^{12} = 88,5 \text{ Вт/см}^2,$$

$$p_H = p_R + p_E$$

$$H = \frac{J}{p_H} = \frac{100}{89} = 1,12 \text{ мА/Вт.}$$

Ответ: $p_H = 89 \text{ Вт/см}^2$, $H = 1,12 \text{ мА/Вт}$.

Задача 3.61.

Оцените значение энергии, необходимое в среднем для эмиссии одного электрона из катода, который при $T = 2500 \text{ К}$ обеспечивает плотность тока термоэлектронной эмиссии $j = 0,1 \text{ А/см}^2$.

Решение задачи 3.61.

Из уравнения (3.2) найдем работу выхода катода

$$\varphi = kT \ln \left(\frac{A_0 T^2}{j} \right) = 4,9 \text{ эВ.}$$

Далее по формуле (3.17) оценим требуемую энергию

$$E = kT \left[2 + \ln \left(\frac{A_0 T^2}{j} \right) \right] = 0,43 + 4,9 = 5,33 \text{ эВ.}$$

Ответ: $E = 5,33 \text{ эВ}$.

Задача 3.62.

Какова работа выхода катода, если повышение температуры катода от 2000 К до 2001 К увеличивает ток эмиссии на 1 %.

Решение задачи 3.62.

$$\frac{j_1}{j_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2 \frac{\exp\left(-\frac{11\,600\varphi}{T_2}\right)}{\exp\left(-\frac{11\,600\varphi}{T_1}\right)} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2 \exp\left(11\,600\varphi\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right),$$

$$1,01 = 1,001 \exp\left(\frac{11\,600\varphi}{2000 \cdot 2001}\right),$$

$$\varphi = \frac{8,960}{2,899} = 3,091 \text{ эВ.}$$

Ответ: $\varphi = 3,091$ эВ.