

Сборник заданий по курсу:
«Физические основы эмиссионной электроники»
для студентов II курса ФФКЭ МФТИ

Задача 1.1. На прямоугольную потенциальную ступеньку бесконечной протяженности и высотой, равной 1 эВ, налетает электрон с энергией 3 эВ. Чему равен коэффициент надбарьерного отражения?

Задача 1.2. На прямоугольную потенциальную яму бесконечной протяженности и глубиной, равной 2 эВ, налетает электрон с энергией 3 эВ. Чему равен коэффициент надбарьерного отражения?

Задача 1.3. В некоторой системе при температуре $T = 1500$ К, в состоянии с энергией 5 эВ среднее число электронов $n = 0.08$. Найти энергию Ферми.

Задача 1.4. Известно, что в системе в состоянии с энергией 6 эВ среднее число электронов $n = 0,2$, а в состоянии с энергией 5 эВ среднее число электронов $n = 0,8$. Найти энергию Ферми и температуру системы.

Задача 1.5. Оцените значение энергии Ферми μ_T для электронов проводимости в металлическом образце при $T \rightarrow 0$ К, если известно, что плотность металла $\rho = 8,2$ г/см³, атомный вес $M = 76$, число свободных электронов на атом $z = 1$, масса электрона проводимости равна массе свободного $9,1 \cdot 10^{-28}$ г.

Задача 1.6. Оценить число электронов в зоне проводимости в металлическом образце, объем которого равен 100 см³, при $T \rightarrow 0$ К, если энергия Ферми $\mu = 5,81$ эВ.

Задача 1.7. Оценить температуру вырождения электронов проводимости в металлическом образце, если при $T \rightarrow 0$ К концентрация электронов равна $6,3 \cdot 10^{22}$ см⁻³.

1.7.1 В двухуровневой системе находится N электронов при температуре T . Энергия нижнего уровня E_1 , энергия верхнего уровня E_2 . Количество состояний на нижнем уровне N_1 , на верхнем уровне $N \cdot g$ ($g > 1$). Сколько электронов находится на нижнем и сколько на верхнем уровне при температуре, стремящейся к нулю, и при температуре, стремящейся к бесконечности? Ответы обосновать.

1.7.2 В двухуровневой системе находится N электронов при температуре T . Энергия нижнего уровня E_1 , энергия верхнего уровня E_2 . Количество состояний на нижнем уровне N_1 , на верхнем уровне $N \cdot g$ ($g < 1$). Сколько электронов находится на нижнем и сколько на верхнем уровне при температуре, стремящейся к нулю, и при температуре, стремящейся к бесконечности? Ответы обосновать.

1.7.3 В двухуровневой системе находится N электронов при температуре T . Энергия нижнего уровня E_1 , энергия верхнего уровня E_2 . Количество состояний на нижнем уровне N_1 , на верхнем уровне $N \cdot g$ ($g > 1$). Найти пределы, к которым стремится уровень Ферми при T , стремящейся к нулю, и при T , стремящейся к бесконечности. Ответы обосновать.

1.7.4 В двухуровневой системе находится N электронов при температуре T . Энергия нижнего уровня E_1 , энергия верхнего уровня E_2 . Количество состояний на нижнем

уровне N , на верхнем уровне $N \cdot g$ ($g < 1$). Найти пределы, к которым стремится уровень Ферми при T , стремящейся к нулю, и при T , стремящейся к бесконечности. Ответы обосновать.

1.8.1 В двухуровневой системе находится N электронов при температуре T . Энергия нижнего уровня E_1 , энергия верхнего уровня E_2 . Количество состояний на нижнем уровне $N \cdot g$ ($g > 1$), на верхнем уровне N . Сколько электронов находится на нижнем и сколько на верхнем уровне при температуре, стремящейся к нулю, и при температуре, стремящейся к бесконечности? Ответы обосновать.

1.8.2 В двухуровневой системе находится N электронов при температуре T . Энергия нижнего уровня E_1 , энергия верхнего уровня E_2 . Количество состояний на нижнем уровне $N \cdot g$ ($g < 1$), на верхнем уровне N . Сколько электронов находится на нижнем и сколько на верхнем уровне при температуре, стремящейся к нулю, и при температуре, стремящейся к бесконечности? Ответы обосновать.

См. Решение задачи 1.7.1.

1.8.3 В двухуровневой системе находится N электронов при температуре T . Энергия нижнего уровня E_1 , энергия верхнего уровня E_2 . Количество состояний на нижнем уровне $N \cdot g$ ($g > 1$), на верхнем уровне N . Найти пределы, к которым стремится уровень Ферми при T , стремящейся к бесконечности и при T , стремящейся к нулю. Ответы обосновать.

1.8.4 В двухуровневой системе находится N электронов при температуре T . Энергия нижнего уровня E_1 , энергия верхнего уровня E_2 . Количество состояний на нижнем уровне $N \cdot g$ ($g < 1$), на верхнем уровне N . Найти пределы, к которым стремится уровень Ферми при T , стремящейся к бесконечности и при T , стремящейся к нулю. Ответы обосновать.

1.9.1 В двухуровневой системе находится $N \cdot (1 + \delta)$ ($\delta > 0$) электронов при температуре T . Энергия нижнего уровня E_1 , энергия верхнего уровня E_2 . Количество состояний на нижнем уровне N , на верхнем уровне N . Сколько электронов находится на нижнем и сколько на верхнем уровне при температуре, стремящейся к нулю, и при температуре, стремящейся к бесконечности? Ответы обосновать.

1.9.2 В двухуровневой системе находится $N \cdot (1 + \delta)$ ($\delta < 0$) электронов при температуре T . Энергия нижнего уровня E_1 , энергия верхнего уровня E_2 . Количество состояний на нижнем уровне N , на верхнем уровне N . Сколько электронов находится на нижнем и сколько на верхнем уровне при температуре, стремящейся к нулю, и при температуре, стремящейся к бесконечности? Ответы обосновать.

1.9.3 В двухуровневой системе находится $N \cdot (1 + \delta)$ ($\delta > 0$) электронов при температуре T . Энергия нижнего уровня E_1 , энергия верхнего уровня E_2 . Количество состояний на нижнем уровне N , на верхнем уровне N . Найти пределы, к которым стремится уровень Ферми при T , стремящейся к нулю, и при T , стремящейся к бесконечности. Ответы обосновать.

1.9.4 В двухуровневой системе находится $N \cdot (1 + \delta)$ ($\delta < 0$) электронов при температуре T . Энергия нижнего уровня E_1 , энергия верхнего уровня E_2 . Количество состояний на нижнем уровне N , на верхнем уровне N . Найти пределы, к которым стремится уровень Ферми при T , стремящейся к нулю, и при T , стремящейся к бесконечности. Ответы

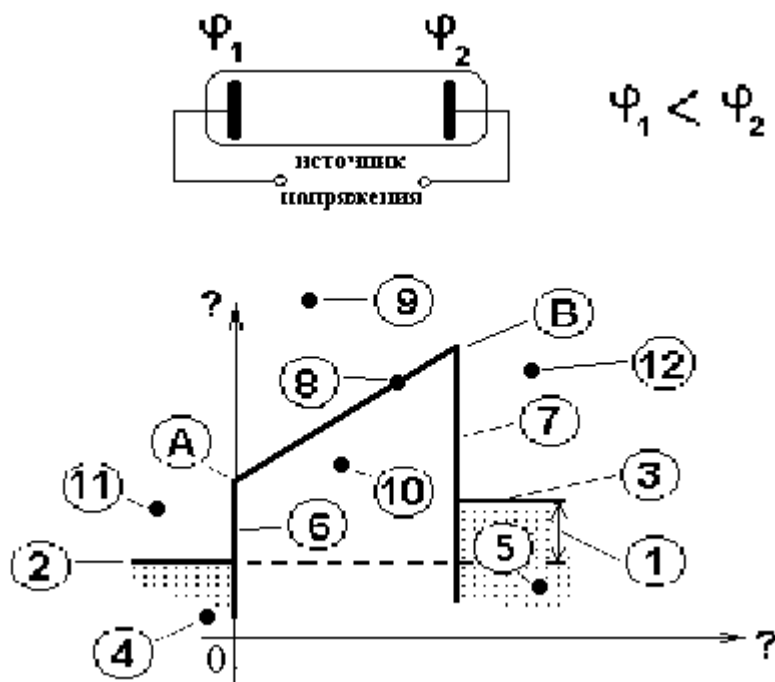
обосновать.

1.9.5 В двухуровневой системе находится N электронов при температуре T . Энергия нижнего уровня E_1 , энергия верхнего уровня E_2 . Количество состояний на нижнем уровне N_1 , на верхнем уровне N_2 . Чему равна энергия Ферми? Найти пределы, к которым стремится уровень Ферми при $T \rightarrow 0$, и при $T \rightarrow \infty$, стремящейся к бесконечности.

1.9.6 В двухуровневой системе находится N электронов при температуре T . Энергия нижнего уровня E_1 , энергия верхнего уровня E_2 . Количество состояний на нижнем уровне N_1 , на верхнем уровне N_2 . Сколько электронов находится на нижнем и сколько на верхнем уровне при температуре T ? Сколько электронов находится на нижнем и сколько на верхнем уровне при температуре стремящейся к нулю, и при температуре, стремящейся к бесконечности?

Задача 2.1 (вопросы к энергетической диаграмме двухэлектродного прибора).

Предполагается, что $kT \ll \phi_1, \phi_2$:



1. Что отложено по осям?
2. Что обозначают точки А и В?
3. Какой физический смысл имеют отрезки прямых, указанные номерами 1, 2, 3, 6, 7, 8?
4. Может ли электрон находиться в состояниях, указанных точками с номерами 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12? Как называются эти состояния?
5. Какова полярность источника?
6. Является ли общее состояние двухэлектродного прибора:
 - стационарным?
 - термодинамически равновесным?

Задача.2.2. Незаряженный конденсатор емкостью $C = 100$ пФ, металлические обкладки которого имеют работу выхода $\phi_1 = 2$ эВ и $\phi_2 = 3$ эВ, замкнули накоротко

проводником. Найти заряд конденсатора. Нарисовать энергетические диаграммы для электронов до замыкания и после установления равновесия.

Задача. 2.3. Плоский конденсатор (площадь пластин $S = 3$ см, расстояние между пластинами $d = 1$ мм, диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 3$, работа выхода материала обкладок $\phi_1 = 1$ эВ и $\phi_2 = 3$ эВ) подсоединили к источнику напряжения с ЭДС $V = 1,5$ В. Найти заряд конденсатора. Рассмотреть оба варианта подсоединения конденсатора. Нарисовать энергетические диаграммы для электронов до замыкания и после установления равновесия.

Задача. 2.4. Плоский конденсатор (расстояние между пластинами $d = 2$ мм, диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2$, работа выхода материала обкладок $\phi_1 = 2$ эВ и $\phi_2 = 4$ эВ) подсоединили к источнику напряжения с ЭДС $V = 1,5$ В. Найти напряженность поля в диэлектрике. Рассмотреть оба варианта подсоединения конденсатора.

Задача. 2.5. Два шарика, один из металла с работой выхода ϕ_1 , радиусом r_1 , другой - из металла с работой выхода ϕ_2 , радиусом r_2 , соединили проводником. Найти разность потенциалов между шариками и изменение энергии Ферми каждого шарика после того, как установится равновесие.

Задача. 2.6. Катод и анод вакуумного диода замкнули накоротко внешним проводником. С какой минимальной начальной скоростью должен выходить электрон из катода, чтобы достичь анода, если катод и анод имеют работу выхода, соответственно 1,5 и 2,5 эВ? Нарисовать энергетические диаграммы для электрона до замыкания и после установления равновесия.

Задача. 2.7. Катод и анод вакуумного диода подсоединены к внешнему источнику напряжения. Подаваемое на анод диода напряжение (относительно катода) равно: -1 В. С какой минимальной начальной скоростью должен выходить электрон из катода, чтобы достичь анода, если катод и анод имеют работу выхода, соответственно 1,5 и 2 эВ? Нарисовать энергетические диаграммы для электрона.

Задача. 3.1. Найти работу выхода электронов из катода при $T = 1500$ К, если плотность анодного тока $j_a = 2 \cdot 10^{-6}$ А/см². $A_0 = 120,4 \frac{A}{cm^2 K^2}$.

Задача. 3.2 Ток насыщения катода с работой выхода 3 эВ, работающего при температуре 2000 К равен 50 мА. Чему равен ток насыщения вольфрамового катода (4,5 эВ) таких же размеров и разогретого до той же температуры?

Задача. 3.3. Найти значения ричардсоновских постоянных ϕ_r и A_r , если известно, что эффективная работа выхода электронов из катода $\phi_{эфф.} = 3,5$ эВ при $T = 1800$ К, температурный коэффициент работы выхода $\partial\phi/\partial T = 2 \cdot 10^{-4}$ эВ/К. Коэффициент отражения $R = 0$. *Решение:*

Задача. 3.4. Найти постоянные Ричардсона для катода, для которого $\phi = 2,12 + 4,8 \cdot 10^{-4} T$ эВ.

Задача. 3.5. Найти плотность тока эмиссии в диоде с одинаковыми анодом и катодом ($\phi = 4,3$ эВ) при анодном напряжении $V_a = -1,5$ В. Катод диода нагрет до $T = 2500$ К. Объемным зарядом пренебречь. Нарисовать ВАХ и энергетическую диаграмму диода. Указать на ВАХ рабочую точку диода.

Задача.3.6. Оценить плотность тока эмиссии в диоде с молибденовым анодом ($\phi_{\text{Mo}} = 4,3$ эВ) при анодном напряжении $V_a = -1,5$ В. Катод ($\phi_{\text{W}} = 4,5$ эВ) диода работает при $T = 2500$ К. Объемным зарядом пренебречь. Нарисовать ВАХ и энергетическую диаграмму диода. Указать на ВАХ рабочую точку диода.

Задача.3.7. Термоэмиссионный диод работает в режиме ТОПЗ (тока, ограниченного пространственным зарядом). Оценить значение анодного тока в диоде при двух значениях анодного напряжения $V_{A1} = 2$ и $V_{A2} = 20$ В, с одинаковыми катодом и анодом, если первичный коэффициент усиления диода $C = 2 \cdot 10^{-4} [A]/[V]^{1,5}$.

Задача.3.8. Катод и анод имеют одинаковую работу выхода $\phi = 2$ эВ. Температура катода 1400 К. Межэлектродное расстояние равно 3 мм. С учетом объемного заряда найти плотность тока диода при анодном напряжении 100 В. В каком режиме работает диод при таком напряжении? Эффект Шоттки не учитывать. Нарисовать ВАХ и указать на ней рабочую точку диода. Нарисовать энергетическую диаграмму для электронов, соответствующую условию задачи.

Задача.3.9. Катод и анод имеют одинаковую работу выхода $\phi = 3,5$ эВ. Межэлектродное расстояние равно 5 мм. Температура катода 2500 К. При каком минимальном приложенном напряжении достигается ток насыщения? Нарисовать ВАХ и указать на ней рабочую точку диода, соответствующую найденному напряжению. Нарисовать энергетическую диаграмму для электронов.

Задача.3.10. На сколько изменится работа выхода электронов из катода, если на анод подать ускоряющее напряжение 700 В? Расстояние между катодом и анодом равно $0,5$ мм.

Задача. 3.11. Температура катода плоскопараллельного термоэмиссионного диода равна 2500 К. Во сколько раз изменится ток насыщения термоэлектронной эмиссии, если вблизи поверхности катода приложить ускоряющее электрическое поле напряженностью 2500 В/см?

Задача. 3.12. Из-за эффекта Шоттки анодный ток диода превысил ток насыщения в $2,7$ раза. Определить температуру катода, если напряженность электрического поля у катода равна $4 \cdot 10^4$ В/см.

Задача.3.13. Вычислить относительное уменьшение работы выхода электронов из вольфрама ($\phi = 4,5$ эВ) при наличии у его поверхности ускоряющего электрического поля напряженностью $1,5 \cdot 10^6$ В/см.

Задача.3.14. Вычислить мощность, необходимую для обеспечения непрерывной эмиссии электронов из вольфрамового катода ($\phi_{\text{W}} = 4,5$ эВ) при температуре 2500 К, и при работе катода в режиме тока насыщения. Площадь эмиттирующей поверхности равна $0,5$ см².

Задача.3.15. Найти энергию, необходимую в среднем для эмиссии одного электрона из катода с работой выхода $1,8$ эВ при $T = 2500$ К.

Задача.3.16. Вычислить значение эффективной (средней по току) работы выхода при $T = 1160$ К для сложного катода с двумя сортами пятен, если $f_1 = 0,8$ – доля поверхности, занятая пятнами с $\phi_1 = 4,6$ эВ, а $f_2 = 0,2$ – доля поверхности, занятая пятнами с $\phi_2 = 1$ эВ.

Задача. 3.17. Термоэлектронный преобразователь энергии, имеющий плоскопараллельную конструкцию, работает при температуре катода $T_K = 2200$ К. Значения работы выхода катода и анода равны, соответственно, $\phi_K = 3.3$ эВ, $\phi_A = 2$ эВ. Объемный заряд полностью скомпенсирован. Площадь поверхности катода $S = 10$ см². Найти координаты точки излома (I_i, V_i) в левой части ВАХ. Найти мощность, которую развивает ТЭПЭ, если нагрузочная прямая проходит через точку излома в левой части ВАХ. Найти сопротивление нагрузки для этого режима.

Задача. 4.1. Вычислить период T электромагнитных колебаний, частоту f , энергию E , импульс p и массу m фотона желтого света с длиной волны $\lambda = 5900$ Å. Чему равна скорость электрона с тем же значением кинетической энергии?

Задача. 4.2. Чувствительность фотокатода на длине волны $0,43$ мкм составляет $2 \cdot 10^{-6}$ А/Вт. Определить квантовый выход фотокатода на этой длине волны.

Задача. 4.3. На фотоэлемент падает световой поток с длиной волны 550 нм и мощностью 10 мВт. Чему равен квантовый выход фотокатода на данной длине волны, если фототок равен 35 мкА?

Задача. 4.4. Вычислить максимальную скорость электронов, выбиваемых фотонами желтого света с длиной волны $\lambda = 5900$ Å с поверхности фотокатода, имеющего работу выхода $1,8$ эВ.

Задача. 4.5. Вычислить длину волны монохроматического света, падающего на кислородно-цезиевый фотокатод ($\phi = 1,0$ эВ), если максимальная скорость электронов, выбиваемых с поверхности катода $v_{\max} = 500$ км/сек.

Задача. 4.6. Катод фотоэлемента ($\phi = 2,8$ эВ) соединен непосредственно с его анодом ($\phi = 5,3$ эВ). Какова минимальная длина волны излучения, при которой еще отсутствует ток во внешней цепи фотоэлемента. Нарисовать энергетическую диаграмму для электронов.

Задача. 4.7. Между фотоэмиттером ($\phi = 3$ эВ) и коллектором ($\phi = 4,5$ эВ) включена батарея, создающая ускоряющую разность потенциалов $U = 2.5$ В. Вычислить минимальную длину волны света, при которой еще отсутствует ток во внешней цепи фотоэлемента. Нарисовать энергетическую диаграмму фотоэлемента.

Задача. 4.8. Изолированный фотокатод изготовленный из цезия ($\phi_K = 1,8$ эВ) облучается светом с длиной волны $0,38$ мкм. До какого потенциала зарядится фотокатод?

Задача. 4.9. Фотоэмиттер и коллектор вакуумного фотоэлемента изготовлены из одного и того же материала. При освещении фотоэмиттера монохроматическим излучением с длиной волны $0,2$ мкм запирающее напряжение V_1 на коллекторе оказалось равным $-5,68$ В, а при длине волны $0,4$ мкм - $V_2 = -2,64$ В. Найти по этим данным численное значение постоянной Планка.

Задача. 5.1. При напряженности поля 10^8 В/см, приложенного к поверхности автокатода из вольфрама ($\phi = 4,5$ эВ) найти ширину потенциального треугольного барьера для электрона, находящегося на уровне Ферми. Найти понижение высоты потенциального барьера, вызванное силами зеркального изображения.

Задача.5.2. Для автокатода из вольфрама ($\phi = 4,5$ эВ) оценить напряженность электрического поля, при которой прозрачность треугольного потенциального барьера для электронов, находящихся на уровне Ферми достигает значения 10^{-12} . Найти понижение потенциального барьера из-за его закругления силами зеркального изображения.

Задача. 5.3. Оценить величину плотности тока автоэлектронной эмиссии из вольфрамового ($\phi = 4,5$ эВ) острия в виде параболоида вращения при анодном напряжении $U = 3 \cdot 10^3$ В. Радиус закругления острия $r = 10^{-5}$ см, расстояние катод – анод $R = 8$ см, функцию Нордгейма считать постоянной и равной $\theta(y) = 1,0$.

Задача. 5.4. Оценить величину плотности тока автоэлектронной эмиссии из пленочного вольфрамового ($\phi = 4,5$ эВ) автокатода при анодном напряжении $U = 3 \cdot 10^3$ В. Толщина пленки $r = 10^{-5}$ см, расстояние катод – анод $R = 8$ см, функцию Нордгейма считать постоянной и равной $\theta(y) = 1,0$.

Задача.5.5. Будет ли наблюдаться автоэлектронная эмиссия из катода в виде вольфрамовой проволоки диаметром $d = 5 \cdot 10^{-4}$ см, находящейся внутри цилиндрического анода диаметром $D = 2R = 2$ см при анодном напряжении $V = 10^4$ В.

Задача.5.6. Оценить величину механического напряжения, которое испытывает игольчатый автоэлектронный эмиттер в виде параболоида вращения, если анодное напряжение $U = 8 \cdot 10^3$ В, расстояние катод – анод $R = 15$ см, радиус закругления острия $r = 5 \cdot 10^{-6}$ см.

Задача.5.7. Механическая прочность вольфрама ($\phi = 4,5$ эВ) на растяжение составляет 10^3 кгс/мм². Исходя из этой величины, оценить максимальную напряженность электрического поля, допустимую для автокатода из вольфрама. Существует ли еще при такой напряженности тянущего поля потенциальный барьер для электронов, находящихся на уровне Ферми?

Задача. 5.8. В автоэлектронном проекторе расстояние между плоским экраном (анодом) и вольфрамовым эмиттером ($\phi = 4,5$ эВ) в виде параболоида вращения составляет $R = 15$ см, разность потенциалов между ними $U = 3 \cdot 10^3$ В. Оценить величину радиуса закругления r эмиттера, если увеличение прибора $M = 3,3 \cdot 10^5$ крат. Найти плотность автоэмиссионного тока с острия проектора. Функция Нордгейма $\theta(y) = 1$.