

Российская академия наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт электрофизики
Уральского отделения Российской академии наук
(ИЭФ УрО РАН)

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ВАКУУМНАЯ И ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»

Б1.В.ДВ.1-3

Специальность 03.06.01 – «Физика и астрономия»

Физика электронных и ионных процессов

Материалы разработал:

к.ф.-м.н., доцент

Уйманов И.В.

Методические указания к лекционному курсу

1. Введение

Пособие знакомит читателя с некоторыми проблемами эмиссионной электроники, которые изложены в виде задач. Здесь отражены такие разделы, как электронное строение металла, формирование потенциального барьера на границе металл-вакуум в присутствии внешнего электрического поля, автоэлектронная, термоэлектронная и фотоэлектронная эмиссии. Особое внимание уделено выявлению качественной стороны эффектов и явлений.

В сборнике задач даны примеры решения задач и приведены примеры выводов ряда формул, знание которых требуется в процессе решения. Решение задач дает представление о порядках величин параметров, встречающихся в различных приборах и устройствах.

2. Задачи по эмиссионной электронике

Часть 1. Электронная теория металлов. Потенциальный барьер. Автоэлектронная эмиссия.

1. Вычислить энергию Ферми в металлическом калии при температуре абсолютного нуля. Плотность калия $\rho = 0,86 \text{ г/см}^3$. Учтеть, что калий одновалентен, и его атомная масса $A = 39,1$ (пример решения задачи см. ниже).
2. Оценить, при каких температурах электронный газ в металле может быть невырожденным при концентрациях свободных электронов $10^{22} \text{ — } 10^{23} \text{ см}^{-3}$?
3. Определить среднюю энергию свободных электронов в металле при температуре абсолютного нуля.
4. В некоторой системе при температуре $T = 1500 \text{ К}$, в состоянии с энергией 5 эВ среднее число электронов $n = 0,08$. Найти энергию Ферми.

5. 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.
6. Оцените значение энергии Ферми 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.
7. Оценить число электронов в зоне проводимости в металлическом образце, объем которого равен 100 см³, при $T \rightarrow 0$ К, если энергия Ферми $\epsilon_F = 5,81$ эВ.
8. Оценить температуру вырождения электронов проводимости в металлическом образце, если при $T \rightarrow 0$ К концентрация электронов равна $6,3 \cdot 10^{22}$ см⁻³.
9. 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.
10. 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.
11. Оценить напряженность электрического поля, при которой имеет место автоэлектронная эмиссия с плоской поверхности вольфрама, считая, что эта эмиссия будет заметной, если ширина потенциального барьера L соизмерима с дебройлевской длиной волны электронов λ_e ($L \approx 3\lambda_e$). Плотность вольфрама $\rho = 19,1$ г/см³. Атомная масса $A = 184$. Работа выхода электронов $\phi = 4,52$ эВ.
12. 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 $\theta(y) = 1,0$.

13. 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.

14. 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.

15. 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 $\theta(y) = 1$.

Часть 2. Термо-, фото- и другие виды электронной эмиссии.

1. Рассчитать плотность тока с поверхности вольфрамового катода при $T = 2500$ К. Работа выхода электронов из вольфрама $\phi = 4,52$ эВ.

2. Во сколько раз изменится плотность тока термоэлектронной эмиссии, найденная по формуле Ричардсона — Шоттки, если учесть зависимость работы выхода ϕ от температуры T ? Оценку провести для вольфрамового катода при $T = 2500$ К, считая $\phi(T) = \phi_0 + \chi T$, где $\chi = 8 \cdot 10^{-5}$ эВ/К.

3. Работа выхода электронов из молибденового катода $\Phi = 4,17$ эВ. На сколько изменится работа выхода электронов с катода, если в отсутствие пространственного заряда вблизи его поверхности создается электрическое поле напряженностью $E = 10^4$ В/см?

4. Во сколько раз изменится ток насыщения термоэлектронной эмиссии с катода, если вблизи его поверхности создать электрическое поле напряженностью $E = 3 \cdot 10^4$ В/см? Температура катода $T = 2500$ К.

5. Какая напряженность электрического поля должна быть создана вблизи поверхности танталового катода, нагретого до $T = 2000$ К, чтобы увеличить ток термоэлектронной эмиссии с его поверхности в 2,3 раза?
6. Найти значения ричардсоновских постоянных φ_R и A_R , если известно, что эффективная работа выхода электронов из катода $\varphi_{\text{эфф.}} = 3,5$ эВ при $T = 1800$ К, температурный коэффициент работы выхода $\partial\varphi/\partial T = 2 \cdot 10^{-4}$ эВ/К. Коэффициент отражения $R = 0$.
7. Найти постоянные Ричардсона для катода, для которого $\varphi = 2,12 + 4,8 \cdot 10^{-4} T$ эВ.
8. Найти плотность тока эмиссии в диоде с одинаковыми анодом и катодом ($\varphi = 4,3$ эВ) при анодном напряжении $V_a = -1,5$ В. Катод диода нагрет до $T = 2500$ К. Объемным зарядом пренебречь.
9. Оценить плотность тока эмиссии в диоде с молибденовым анодом ($\varphi_{\text{Mo}} = 4,3$ эВ) при анодном напряжении $V_a = -1,5$ В. Катод ($\varphi_{\text{W}} = 4,5$ эВ) диода работает при $T = 2500$ К. Объемным зарядом пренебречь.
10. На сколько изменится работа выхода электронов из катода плоскопараллельного диода, если на анод подать ускоряющее напряжение 700 В? Расстояние между катодом и анодом равно 0,5 мм.
11. 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.
12. Вычислить относительное уменьшение работы выхода электронов из вольфрама ($\varphi = 4,5$ эВ) при наличии у его поверхности ускоряющего электрического поля напряженностью $1,5 \cdot 10^6$ В/см.
13. Вычислить мощность, необходимую для обеспечения непрерывной эмиссии электронов из вольфрамового катода ($\varphi_{\text{W}} = 4,5$ эВ) при температуре 2500 К, и при работе катода в режиме тока насыщения. Площадь эмитирующей поверхности равна $0,5$ см².

14. Найти энергию, необходимую в среднем для эмиссии одного электрона из катода с работой выхода 1.8 эВ при $T = 2500$ К.

15. Найти смещение красной границы фотоэффекта в диоде с плоскопараллельными электродами, если между электродами приложить напряжение $U = 2,5 \cdot 10^5$ В. Катод покрыт толстой пленкой бария. Работа выхода бария $\varphi = 2,52$ эВ. Расстояние между электродами $L = 1$ см.

3. Примеры решения задач

Часть 1. Задача 1.

Функция распределения электронов по энергиям в металле имеет вид

$$dn(\varepsilon) = \frac{4\pi(2m_e)^2}{h^3} \varepsilon^{\frac{1}{2}} \frac{d\varepsilon}{1 + \exp\left(\frac{\varepsilon - \mu}{kT}\right)} = \frac{4\pi(2m_e)^2}{h^3} \varepsilon^{\frac{1}{2}} f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (1)$$

Здесь μ - химический потенциал, а

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\varepsilon - \mu}{kT}\right)} \quad (2)$$

функция распределения электронов по энергиям Ферми-Дирака.

Из выражения (2) следует, что при температуре $T = 0$ К

$$f(\varepsilon) = \begin{cases} 1 & \text{при } \varepsilon < \mu_0 \\ 0 & \text{при } \varepsilon > \mu_0 \end{cases} \quad (3)$$

где $\mu_0 = \mu(T = 0)$ — химический потенциал при $T = 0$ К.

Таким образом, при температуре абсолютного нуля электроны металла могут занимать энергетические уровни лишь до энергии $\varepsilon = \mu_0$, поскольку вероятность заполнения этих уровней равна единице. Они не могут занимать уровни с более высокими значениями энергии, так как вероятность их заполнения равна нулю. Следовательно, энергия $\varepsilon = \mu_0$ будет максимальной энергией электронов в металле при температуре

абсолютного нуля. Эта энергия называется энергией Ферми (ε_F). Выражение для этой энергии получается из условия нормировки, которое при $T = 0$ К принимает вид

$$n = \frac{4\pi(2m_e)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \int_0^{\varepsilon_F} \varepsilon^{\frac{1}{2}} d\varepsilon = \frac{4\pi(2m_e)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \frac{2}{3} (\varepsilon_F)^{\frac{3}{2}}, \quad (4)$$

откуда

$$\varepsilon_F = \left(\frac{3n}{8\pi} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{h^2}{2m_e} = \left(\frac{3\rho}{8\pi m_A} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{h^2}{2m_e}. \quad (5)$$

Для металлического калия на основании (5) получим, что $\varepsilon_F = 2$ эВ.