

Лабораторные работы по квантовой физике

*(электронная версия пособия,
дополнение к методическому пособию по выполнению
лабораторных работ 2010 года издания)*

*Санкт-Петербург
2017*

Лабораторная работа № 6.1

Изучение опыта Франка и Герца

Цель:

- наблюдение на экране осциллографа вольт-амперной характеристики;
- измерение ускоряющего напряжения, приводящего к возбуждению атомов ртути;
- определение длины волны излучения атомов ртути, подтверждение дискретной структуры энергетического спектра атома.

Теория

Неустойчивость планетарной модели атома, закономерность спектров излучения атомов невозможно было объяснить в рамках классической физики. Положения квантовой физики, сформулированные Бором, смогли объяснить модель атома, его состояния. Согласно этим утверждениям, атом длительное время находится в стационарных состояниях, характеризуемых дискретными значениями энергии. В этих состояниях атом не излучает. Переход атома из одного стационарного состояния в другое сопровождается излучением (поглощением) атомом кванта электромагнитного излучения (фотона). Энергия кванта определяется следующим образом

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = E_m - E_n, \quad (1)$$

где E_m, E_n - уровни энергии атома в стационарных состояниях. Основным (невозбужденным) называется состояние атома с наименьшей энергией, все остальные состояния атома, с более высокими энергиями, называют возбужденными. Переход атома в возбужденное состояние возможен не только при поглощении фотона, но также и при столкновении атома с другой частицей, например, с соседним атомом, или пролетающим мимо электроном. В случае упругого столкновения атома с электроном происходит обмен энергией взаимодействующих частиц, так как энергия налетающего на атом электрона недостаточна для перевода его в возбужденное состояние. При неупругом (или частично неупругом) столкновении электрон передает атому часть энергии необходимой для перехода в возбужденное состояние. Время пребывания атома в возбужденном состоянии составляет $\sim 10^{-8}$ с, затем атом переходит в основное состояние, испуская фотон.

При скоростях электронов меньше некоторого критического значения упругие столкновения электронов с атомами происходят по типу

$$A+B \rightarrow A+B, \quad (2)$$

где A и B соответственно состояния атома и электрона до и после столкновения. Импульс и механическая энергия системы не изменяются. Масса электрона значительно меньше массы атома, поэтому электрон при столкновении практически не передает энергию атому, а только меняет направление движения, что можно показать с помощью закона сохранения энергии и импульса

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 v_{11}^2}{2} + \frac{m_2 v_{22}^2}{2} \quad (3)$$

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_{11} + m_2 v_{22} \quad (4)$$

Далее

$$v_{11} = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2 v_2}{m_1 + m_2} \quad (5)$$

где v_1, v_2, v_{11}, v_{22} – скорости частиц до и после столкновения. Учтем, что $m_1 \ll m_2$, то есть масса электрона много меньше массы атома, скорость электрона после столкновения с атомом меняется только по направлению $v_{11} \approx -v_1$.

Если скорость электрона равна критической или превышает ее, происходят неупругие столкновения, когда электрон передает атому энергию, необходимую для перехода атома в возбужденное состояние. Столкновения происходят по схеме



где A, A^* – состояние атома до столкновения и возбужденное состояние, B – состояние электрона. Кинетическая энергия электрона в результате столкновения уменьшается.

Экспериментальным подтверждением существования дискретных состояний атома является опыт Франка и Герца, существенную роль в котором играют процессы упругого и неупругого столкновения частиц. Схема установки представлена на рисунке 1, где изображена трехэлектродная лампа, заполненная парами ртути при давлении порядка 130 Па. K – подогреваемый катод (источник электронов), C – сетка, A – анод. Также для снятия вольт-амперной характеристики (VAX) в схему включены вольтметр и гальванометр. Кривая зависимости анодного тока от ускоряющего напряжения (VAX) опыта Франка – Герца представлена на рисунке 2. Поясним происходящее в электронной лампе. Электроны, испускаемые катодом, движутся в пространстве между катодом и сеткой под действием сил ускоряющего электрического поля. Между сеткой и анодом создается слабое тормозящее поле. Таким образом, до анода долетают электроны, имеющие достаточную кинетическую энергию для преодоления тормозящего поля. Изменяя ускоряющее напряжение между катодом и сеткой, можно наблюдать на VAX рост анодного тока до некоторого максимального значения, при котором энергия электронов приобретает необходимое для возбуждения атомов ртути

значение. В результате неупругих столкновений электронов и атомов ртути, анодный ток начинает уменьшаться до минимума, так как электроны теряют практически всю энергию и не могут преодолеть тормозящее поле между сеткой и анодом. Дальнейший рост ускоряющего напряжения приведет к последующему росту анодного тока. При некотором ускоряющем напряжении, кратном первому максимуму ВАХ, энергия электрона становится достаточной для двух неупругих столкновений с атомами ртути и наблюдается следующий рост и спад анодного тока. Аналогично можно обнаружить третий максимум и минимум ВАХ.

Все значения ускоряющего напряжения ВАХ, соответствующие максимумам анодного тока, имеют одинаковый интервал, который соответствует энергии возбуждения атомов ртути. При неупругом столкновении электрона и атома ртути закон сохранения энергии можно представить в виде

$$\frac{mv^2}{2} = e\Delta U = \varepsilon \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda} \quad (8)$$

где ΔU – это разность значений напряжения между двумя соседними максимумами, ε – энергия кванта, испускаемого атомом ртути при переходе из возбужденного состояния в основное, λ – длина волны излучения.

Все значения напряжения, соответствующие максимумам ВАХ, кратны и соотносятся с энергией, необходимой для излучения атома ртути при переходе с возбужденного в основное состояние. Энергия испускаемых квантов одинакова и соответствует разности значений энергий основного и возбужденного состояния атома ртути, что свидетельствует о дискретности внутренней энергии частицы.

Замечание. Катод и анод лампы изготавливают из разных металлов, что приводит к возникновению контактной разности потенциалов. При снятии ВАХ наличие контактной разности потенциалов приводит к тому, что кривая зависимости анодного тока от ускоряющего напряжения смещается вправо или влево. Относительное расположение максимумов зависит от рода газа, заполняющего электронную лампу. Если при измерениях энергии возбуждения атомов брать расстояние между соседними максимумами, то можно исключить влияние контактной разности потенциалов.

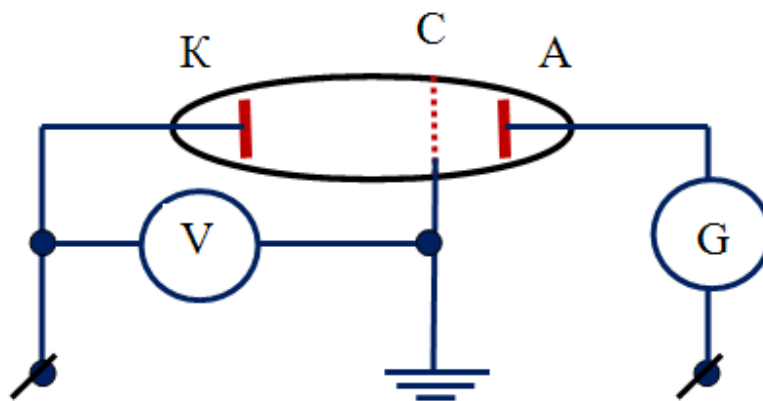


Рис. 1. Схема установки для опыта Франка-Герца



Рис. 2. Вольт-амперная характеристика в опыте Франка-Герца

Методика измерений

Вид лабораторной установки изображен на рисунке 3, где 1- трубка Франка-Герца в термостате, 2 - блок питания, 3 – осциллограф для визуализации вольт-амперной характеристики (рис.4). Температура в лабораторной работе фиксируется с помощью электронного термометра, который соединяется с никель-хром-никелевым погружным датчиком температуры, пределы измерения которого от 65 до 550 °С.

На лицевой панели термостата есть клеммы подключения лампы и блока питания. К и А – клеммы для подключения ускоряющего напряжения, М и А – клеммы для подключения тормозного напряжения. На блоке питания установлены ручки регулировки накала катода, ускоряющего и тормозного напряжения. Пределы регулировки напряжения составляют: накала катода (heater) 4-6 В, ускоряющего напряжения (acceleration) 0-80 В, тормозного напряжения (reverse bias) 1,2-10В.

В цепь анода лампы включен резистор, напряжение на котором пропорционально силе анодного тока, после усиления это напряжение через разъем «FH Signal y-out» поступает на вход Y – осциллографа. Напряжение, равное 0,1 ускоряющего с разъема «U_B/10x-out» блока питания подается на вход X – осциллографа. Таким образом, значение напряжения, измеренного по оси X шкалы экрана осциллографа, следует умножить на коэффициент равный 10. Наблюдения и измерения в лабораторной установке осуществляются непосредственно с помощью осциллографа.

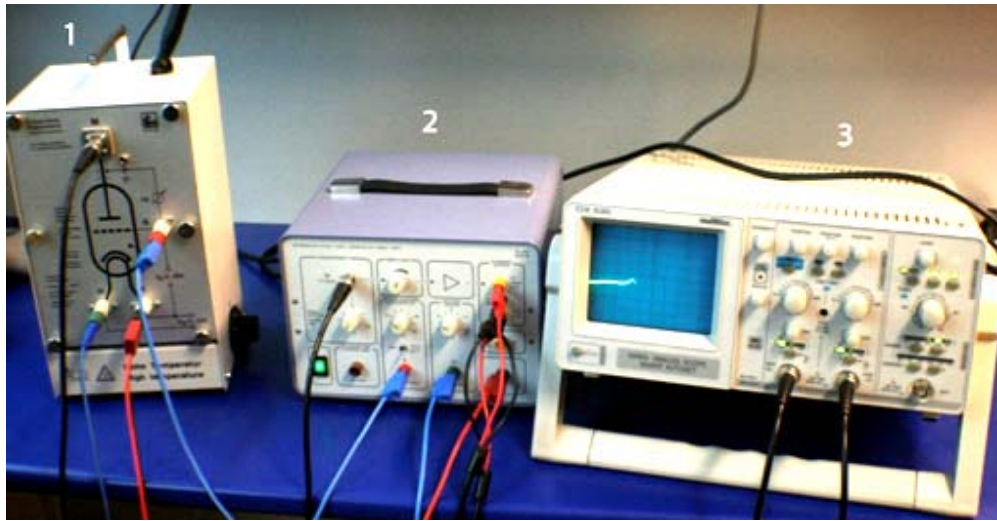


Рис. 3. Лабораторная установка



Рис. 4. Вид вольт-амперной характеристика на экране осциллографа

Порядок выполнения работы

Вариант А.

1. Проверить соединение блоков установки согласно рисунку 3. Ручки регулировок блока питания повернуть против часовой стрелки до упора, тумблер блока питания в положение «Рагр».
2. Включить блок питания и установить ручками регулировки напряжение накала катоды в пределах 5-6 В, ускоряющее напряжение 25-30 В.
3. Включить питание осциллографа, установить переключатели усиления каналов по X – 0,5 В/дел, по Y – 1 В/дел. Наблюдать на экране осциллографа монотонную кривую, соответствующую не нагретой электронной лампе.
4. Включить нагреватель термостата, установив ручку регулировки температуры в положение 150 делений. Подключить электронный термометр. Подождать пока лампа нагреется до соответствующей температуры. Наблюдать на экране осциллографа изменение вольт-амперной характеристики.

Замечание. При достижении температуры 150°C нагреватель можно отключить, при охлаждении установки до 90-100°C нагреватель включить. Поддерживать, таким образом, рабочую температуру камеры до момента снятия ВАХ, затем нагреватель выключить.

5. Незначительно изменяя ускоряющее напряжение, получить на экране осциллографа ВАХ (рис.4). Зафиксировать осциллограмму.
6. Установить переключатель коэффициента усиления осциллографа по X в положение 0,2 В/дел, при этом учесть, что на осциллограф подается 0,1 ускоряющего напряжения, то есть цена деления горизонтальной шкалы 2 В/дел.
7. По горизонтальной шкале осциллографа измерить напряжение между соседними максимумами и минимумами вольт-амперной характеристики (см. рис.2).
8. Рассчитать среднее значение ускоряющего напряжения. Определить энергию возбуждения, длину волны излучения атомов ртути. Оценить погрешность измерения

$$\delta\lambda = \frac{|\lambda_{\text{э}} - \lambda_{\text{т}}|}{\lambda_{\text{т}}} \cdot 100\%,$$

где λ_T – длина волны излучения атомов ртути (паспортные данные установки) указана на рабочем месте.

Данные измерений и вычислений занести в таблицу № 1.

Таблица № 1. Измерения параметров ВАХ и вычисления энергии и длины волны

№	ΔU_{max} , В	ΔU_{min} , В	ε , эВ	λ , мкм
1				
2				

Вариант Б.

1. Проверить соединение блоков установки согласно рисунку 1. Ручки регулировок блока питания повернуть против часовой стрелки до упора, тумблер блока питания в положение «Рапр».

2. Включить блок питания и установить ручками регулировки напряжение накала катоды в пределах 5-6 В, ускоряющее напряжение 25-30 В.

3. Включить питание осциллографа, установить переключатели усиления каналов по X – 0,5 В/дел, по Y – 1 В/дел. Наблюдать на экране осциллографа монотонную кривую, соответствующую не нагретой электронной лампе.

4. Включить нагреватель термостата, установив ручку регулировки температуры в положение 150 делений. Подключить электронный термометр. Подождать пока лампа нагреется до соответствующей температуры. Наблюдать на экране осциллографа изменение вольт-амперной характеристики.

Замечание. При достижении температуры 150°C нагреватель можно отключить, при охлаждении установки до 90-100°C нагреватель включить. Поддерживать, таким образом, рабочую температуру камеры до момента снятия ВАХ, затем нагреватель выключить.

5. Незначительно изменяя ускоряющее напряжение, получить на экране осциллографа ВАХ (рис.4). Зафиксировать осциллограмму.

6. Установить переключатель коэффициента усиления осциллографа по X в положение 0,2 В/дел, при этом учесть, что на осциллограф подается 0,1ускоряющего напряжения, то есть цена деления горизонтальной шкалы 2 В/дел.

По окончании работы установку отключить, вернув ручки регуляторов приборов в исходное положение.

Вопросы для допуска к лабораторной работе

- 1. Объясните суть опыта Франка и Герца на основе лабораторной установки.*
- 2. Что представляет собой вольт-амперная характеристика (ВАХ) электронной лампы?*
- 3. Какие точки на графике ВАХ необходимо зафиксировать?*
- 4. Как построить график ВАХ с помощью ПО?*
- 5. Как определить энергию возбуждения, длину волны излучения атомов ртути?*

Вопросы для защиты лабораторной работы

- 1. При каких условиях атом излучает (поглощает) квант электромагнитного излучения? Какова энергия кванта?*
- 2. Что представляет собой энергетический спектр атома?*
- 3. Объясните положение первого максимума на вольт-амперной характеристике электронной лампы.*
- 4. Какова длина волны излучения атомов ртути, какому диапазону шкалы электромагнитного излучения она принадлежит?*

Рекомендации для работы с графиками

Для построения графика необходимо использовать ПО типа Maxima, gnuplot, QtiPlot, Wolfram Mathematica, Mathcad. Применение таких систем дает возможность

- правильного и рационального выбора масштаба;
- представления экспериментальных результатов с учетом погрешностей измерений;
- определить координаты любых точек графика в трассировке;
- при необходимости кратковременно произвести изменения в графике.

На рисунке 5 продемонстрировано построение графика ВАХ с помощью Mathcad.



Рис. 5. Построение графика с помощью ПО

Лабораторная работа № 6.5

Измерение высоких температур с помощью оптического пирометра с исчезающей нитью

Цель:

- наблюдение изменения излучения лампы накаливания при изменении подводимой мощности;
- измерение яркостной и истинной температуры вольфрамовой спирали лампы накаливания;
- ознакомление с законами излучения реальных тел.

Теория

Электромагнитное излучение, возникающее за счет внутренней энергии тела, называют тепловым излучением. Оно определяется оптическими свойствами тела и его температурой.

Характеристики теплового излучения:

- энергетическая светимость – количество энергии, излучаемой с единицы площади поверхности по всем направлениям в единицу времени во всем диапазоне длин волн

$$\int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda = R_T \quad (1)$$

- спектральная плотность энергетической светимости (испускательная способность) - количество энергии, излучаемой с единицы площади поверхности по всем направлениям в единицу времени в единичном диапазоне длин волн

$$\frac{dR_T}{d\lambda} = r_{\lambda,T} \quad (2)$$

- спектральная поглощательная способность (поглощательная способность) – величина, показывающая какая доля энергии, приносимой излучением на единицу площади поверхности за единицу времени в интервале длин волн от λ до $\lambda+d\lambda$ поглощается телом

$$\frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}} = a_{\lambda,T} \quad (3)$$

Тело, которое поглощает все падающее на него излучение при любой температуре и во всем диапазоне длин волн называют абсолютно черным телом (АЧТ). Для АЧТ $a_{\lambda,T} = 1$. Моделью АЧТ является замкнутая полость (например, сфера) с небольшим отверстием. Излучение, попадающее в такую полость, испытывает многократные отражения от стенок полости, а также

поглощение энергии. Спектральный коэффициент поглощения такой модели равен 1.

Используя представление об АЧТ, сформулируем закономерности теплового излучения для такого тела, что одновременно поможет понять закономерности тепловое излучение тел, отличающихся от АЧТ.

Закон Кирхгофа: в состоянии теплового равновесия отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральному коэффициенту поглощения не зависит от природы тела и является одной и той же универсальной функцией, равной спектральной плотности энергетической светимости АЧТ.

$$\left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}}\right)_2 = r_{\lambda,T}^* \quad (4)$$

Следствия из закона Кирхгофа:

- при одной и той же температуре и длине волны тела и АЧТ, наибольшая спектральная плотность энергетической светимости у АЧТ;
- тело поглощает излучение тех длин волн, которое излучает при данной температуре.

Закон Стефана-Больцмана: энергетическая светимость АЧТ пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры.

$$R^* = \sigma T^4 \quad (5)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ - постоянная Стефана-Больцмана.

Закон Вина: длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости АЧТ, обратно пропорциональна абсолютной температуре.

$$\lambda = \frac{b}{T} \quad (6)$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}\cdot\text{К}$.

Для объяснения теплового излучения нечерных тел вводят понятие серого тела. Тела, у которых коэффициент поглощения одинаков для всех длин волн и зависит от температуры тела - a_T , при этом $a_T < a_{\lambda,T} = 1$. Закон Стефана-Больцмана можно применить для теплового излучения серых тел в виде

$$R = a_T \sigma T^4 \quad (7)$$

Закон Вина справедлив также для серых тел, причем его вид одинаков для АЧТ и серого тела.

Теоретическое обоснование закономерностей излучения АЧТ было дано Планком.

Гипотеза Планка: атомные осцилляторы излучают энергию определенными порциями – квантами, энергия которых пропорциональна частоте колебания

$$\varepsilon = h\nu \quad (8)$$

где $h=6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Благодаря гипотезе, сформулированной Планком, был установлен вид универсальной функции в законе Кирхгофа (спектральной плотности энергетической светимости АЧТ).

$$r_{\lambda,T}^* = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (9)$$

Из формулы Планка можно установить вид зависимости в законе Стефана-Больцмана и Вина, а также рассчитать постоянные.

Методика измерений

Энергетическая светимость АЧТ согласно закону Стефана-Больцмана

$$R^* = \sigma T^4, \quad (10)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана. Энергетическая светимость нечерного тела всегда меньше энергетической светимости АЧТ и может быть определена по формуле

$$R = \beta T^n, \quad (12)$$

где β и n – не являются постоянными, а принимают разные значения в разных интервалах температур, но всегда выполняется равенство

$$\beta T^n < \sigma T^4. \quad (13)$$

Если считать, что при высоких температурах мощность, потребляемая телом, расходуется на излучение, то

$$P = R = \beta T^n, \quad (14)$$

где P – мощность единицы площади поверхности излучающего тела. При логарифмировании выражения (14), получим

$$\ln P = \ln \beta + n \ln T. \quad (15)$$

Если построить график зависимости $\ln P(\ln T_u)$, то по тангенсу угла наклона графика можно вычислить коэффициент n

$$n = \operatorname{tg} \alpha = (\ln P_2 - \ln P_1) / (\ln T_2 - \ln T_1) \quad (16)$$

Описание установки

Измерение высоких температур производят без непосредственного контакта с телом. Основой такого измерения может стать процесс исследования излучения, испускаемого нагретым телом. В данной работе для измерения температуры нагретой лампы используют оптический пирометр с исчезающей нитью «Проминь». При фиксировании температуры производится сравнение яркостей свечения (пропорциональных испускательной способности) двух нагретых тел – эталонного и исследуемого. В качестве исследуемого тела используется – спираль (вольфрамовая) лампы накаливания, в качестве эталонного – нить лампы накаливания, находящейся в пирометре. Шкала

прибора проградуирована по температуре АЧТ. Это значит, что нить пирометра имеет такую же яркость как и АЧТ при данной температуре. При этом яркость исследуемого тела и нити пирометра совпадает, прибор фиксирует яркостную температуру, но истинная температура исследуемого тела выше яркостной. Покажем это, установив соотношение между этими величинами.

Яркостная температура – это температура АЧТ, при которой для определенной длины волны испускательная способность исследуемого тела равна испускательной способности АЧТ.

$$r_{\lambda,T} = r_{\lambda,T_{я}}^* \quad (17)$$

Согласно закону Кирхгофа

$$\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = r_{\lambda,T}^* \quad (18)$$

Учитывая (17) и (18), получим

$$a_{\lambda,T} = \frac{r_{\lambda,T_{я}}^*}{r_{\lambda,T}^*} \quad (20)$$

С учетом формулы (9) поглощательная способность исследуемого тела определяется выражением

$$a_{\lambda,T} = \frac{\frac{hc}{e^{\lambda kT} - 1}}{\frac{hc}{e^{\lambda kT_{я}} - 1}} \quad (21)$$

В выражении (21) $\frac{hc}{\lambda kT} \gg 1$, поэтому единицей можно пренебречь. В результате преобразований получим следующее

$$a_{\lambda,T} = \frac{e^{\lambda kT}}{\frac{hc}{e^{\lambda kT_{я}}}} \quad (22)$$

В результате вычислений для истинной температуры получим

$$T = T_{я} - \frac{\ln a_{\lambda,T}}{C} T_{я}^2, \quad (23)$$

где учтено $\frac{hc}{\lambda k} = C$, кроме того разница между яркостной и истинной температурой невелика, поэтому можно считать, что $T \cdot T_{я} \approx T_{я}^2$. Наблюдение объектов ведется в монохроматическом свете с длиной волны 0,66 мкм, а поглощательную способность для вольфрамовой спирали можно принять $a_{\lambda,T} = 0,45$. С учетом предыдущего, формула (23) для истинной температуры принимает вид

$$T = T_{\text{я}} + 3,66 \cdot 10^{-5} T_{\text{я}}^2 \quad (24)$$

$$\frac{\ln a_{\lambda, T}}{C} = -3,66 \cdot 10^{-5}, \text{K}^{-1} .$$

Таким образом, выражение для вычисления истинной температуры показывает, что она выше яркостной температуры.

Блок-схема лабораторной установки продемонстрирована на рисунке 1, где 1- источник питания с амперметром и вольтметром; 2 – исследуемое тело (лампа накаливания со спиралью из вольфрама); 3- объектив, 4 - окуляр пирометра (формируют изображение объектов наблюдения); 5 – красный светофильтр (выделяет узкий спектральный интервал для сравнения яркости исследуемых объектов); 6 – нить пирометра с источником питания – 7 и реостатом - 8 для изменения тока и температуры нити пирометра соответственно; 9 – вид спирали лампы и нити пирометра в момент совпадения яркости и измерения температуры (нить пирометра должна исчезнуть на фоне спирали).

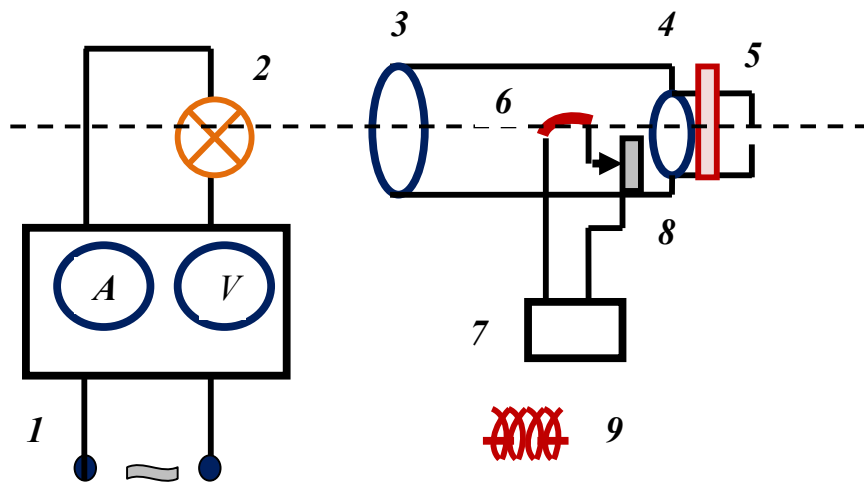


Рис. 1. Блок-схема лабораторной установки

Порядок выполнения работы

1. Включить лампу накаливания, установив соответствующие значения тока и напряжения.
2. Включить пирометр «Проминь». Ввести светофильтр 2 и нажать кнопку 4 пирометра для наблюдения нити, предварительно установив переключатель температур 3 в положение (II) -1200 °С. Настроить объектив 1 и окуляр 2 для наилучшего наблюдения нити пирометра и спирали лампы накаливания (рис.2).

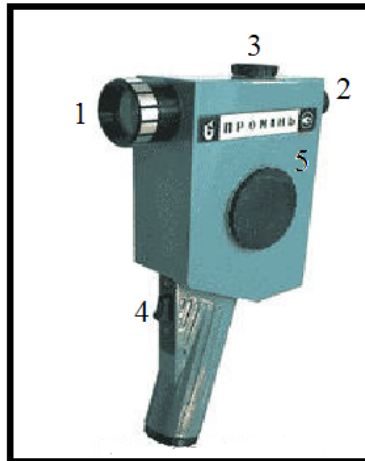


Рис. 2. Вид сбоку пирометра «Проминь»

3. Добиться одинаковой яркости спирали лампы и нити пирометра, то есть исчезновение нити на фоне спирали, вращая ручку 5 на боковой панели пирометра (изменяя, таким образом, сопротивление реостата и соответственно ток через нить пирометра). Зафиксировать соответствующую яркостную температуру по пирометру. Уравнивание яркостей следует производить следующим образом, сначала добиваются того, чтобы нить пирометра была ярче спирали, затем наоборот – спираль лампы должна быть ярче нити пирометра, уменьшая угол поворота ручки пирометра, приходят к среднему положению, при котором яркость нити-спирали неотличимы.

4. Зафиксировать мощность лампы, записать показания амперметра и вольтметра.

5. Установить следующее значение тока и напряжения на лампе накаливания и повторить измерения (снять не менее 8-9 точек). Данные измерений занести в таблицу № 1.

6. Построить график $T(T_я)$ согласно формуле (24). По графику определить истинную температуру, занести результаты измерений в таблицу № 2.

7. Вычислить мощность (P), потребляемую лампой, далее соответственно $\ln P$ и $\ln T_u$. Результаты занести в таблицу № 3.

8. Построить график зависимости $\ln P(\ln T)$, по тангенсу угла наклона прямой определить коэффициент n .

$$n = \operatorname{tg} \alpha = (\ln P_2 - \ln P_1) / (\ln T_2 - \ln T_1)$$

9. Сравнить полученный результат с показателем степени в законе Стефана-Больцмана, сделать вывод о характере излучения тела (спирали лампы накаливания).

Таблица № 1. Измерения параметров лампы накаливания

№	I, A	U, B	$t_{я}, ^\circ C$	$T_{я}, K$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				

Таблица № 2. Зависимость истинной температуры от яркостной

$T_{я}, K$											
$T_{и}, K$											

Таблица № 3. Вычисление параметров для построения графика $\ln P(\ln T_{и})$

№	$P, Вт$	T, K	$\ln P$	$\ln T$	Координаты точек на графике, $\ln P(\ln T)$	
					$\ln P_{12}$	$\ln T_{12}$

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Перечислить характеристики теплового излучения.
2. Сформулировать законы теплового излучения
3. Объяснить методику измерений, схему установки и принцип ее работы

Вопросы для защиты лабораторной работы

1. По результатам построения графиков прокомментировать
 - масштаб осей;
 - вид графиков (прямая, кривая);
 - зависимость истинной температуры и яркостной.
2. Объяснить по результатам измерений закономерности излучения нечерного тела.

Рекомендации для работы с графиками

Для построения графиков необходимо использовать ПО типа Maxima, gnuplot, QtiPlot, Wolfram Mathematica, Mathcad.

Лабораторная работа № 6.7

Исследование закономерностей излучения абсолютно черного тела (АЧТ)

Цель:

- исследование зависимостей испускательной способности (r) и энергетической светимости (R) АЧТ от температуры;
- построение графиков зависимостей $r(\lambda, T)$, $R(T^4)$ для АЧТ, используя ПО;
- определение постоянной Стефана-Больцмана.

Теория

Электромагнитное излучение, возникающее за счет внутренней энергии тела, называют тепловым излучением. Оно определяется оптическими свойствами тела и его температурой.

Характеристики теплового излучения:

- энергетическая светимость – количество энергии, излучаемой с единицы площади поверхности по всем направлениям в единицу времени во всем диапазоне длин волн

$$\int_0^{\infty} r_{\lambda, T} d\lambda = R_T \quad (1)$$

- спектральная плотность энергетической светимости (испускательная способность) - количество энергии, излучаемой с единицы площади поверхности по всем направлениям в единицу времени в единичном диапазоне длин волн

$$\frac{dR_T}{d\lambda} = r_{\lambda, T} \quad (2)$$

- спектральная поглощательная способность (поглощательная способность) – величина, показывающая какая доля энергии, приносимой излучением на единицу площади поверхности за единицу времени в интервале длин волн от λ до $\lambda+d\lambda$ поглощается телом

$$\frac{dW_{\text{погл}}}{dW_{\text{пад}}} = a_{\lambda, T} \quad (3)$$

Тело, которое поглощает все падающее на него излучение при любой температуре и во всем диапазоне длин волн называют абсолютно черным телом (АЧТ). Для АЧТ $a_{\lambda, T} = 1$. Моделью АЧТ является замкнутая полость (например, сфера) с небольшим отверстием. Излучение, попадающее в такую полость, испытывает многократные отражения от стенок полости, а также поглощение энергии. Спектральный коэффициент поглощения такой модели равен 1.

Используя представление об АЧТ, сформулируем закономерности теплового излучения для такого тела, что одновременно поможет понять закономерности теплового излучения тел, отличающихся от АЧТ.

Закон Кирхгофа: в состоянии теплового равновесия отношение спектральной плотности энергетической светимости к спектральному коэффициенту поглощения не зависит от природы тела и является одной и той же универсальной функцией, равной спектральной плотности энергетической светимости АЧТ.

$$\left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}}\right)_1 = \left(\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}}\right)_2 = r_{\lambda,T}^* \quad (4)$$

Следствия из закона Кирхгофа:

- при одной и той же температуре и длине волны тела и АЧТ, наибольшая спектральная плотность энергетической светимости у АЧТ;
- тело поглощает излучение тех длин волн, которое излучает при данной температуре.

Закон Стефана-Больцмана: энергетическая светимость АЧТ пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры.

$$R^* = \sigma T^4 \quad (5)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ - постоянная Стефана-Больцмана.

Закон Вина: длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости АЧТ, обратно пропорциональна абсолютной температуре.

$$\lambda = \frac{b}{T} \quad (6)$$

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$.

Для объяснения теплового излучения нечерных тел вводят понятие серого тела. Тела, у которых коэффициент поглощения одинаков для всех длин волн и зависит от температуры тела - a_T , при этом $a_T < a_{\lambda,T} = 1$. Закон Стефана-Больцмана можно применить для теплового излучения серых тел в виде

$$R = a_T \sigma T^4 \quad (7)$$

Закон Вина справедлив также для серых тел, причем его вид одинаков для АЧТ и серого тела.

Теоретическое обоснование закономерностей излучения АЧТ было дано Планком.

Гипотеза Планка: атомные осцилляторы излучают энергию определенными порциями – квантами, энергия которых пропорциональна частоте колебания

$$\varepsilon = h\nu \quad (8)$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – постоянная Планка.

Благодаря гипотезе, сформулированной Планком, был установлен вид универсальной функции в законе Кирхгофа (спектральной плотности энергетической светимости АЧТ).

$$r_{\lambda,T}^* = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (9)$$

Из формулы Планка можно установить вид зависимости в законе Стефана-Больцмана и Вина, а также рассчитать постоянные.

Методика измерений

1. По зависимости $r(\lambda)$ для разных значений температуры нагрева АЧТ построить график

$$r(\lambda) = (C(\exp(\alpha/\lambda) - 1)^{-1})/\lambda^5, \quad (10)$$

где α, C – константы, указанные в таблице № 1.

Таблица № 1. Константы в зависимости $r(\lambda)$

№	$C, \text{Вт}\cdot\text{м}^2$	$\alpha, \text{м}$
1	$37 \cdot 10^{-17}$	$12 \cdot 10^{-6}$
2		$10 \cdot 10^{-6}$
3		$7 \cdot 10^{-6}$
4		$6 \cdot 10^{-6}$
5		$5 \cdot 10^{-6}$

2. По графику $r(\lambda)$ определить длину волны, соответствующую максимальному значению испускательной способности.

3. Используя закон Вина, вычислить температуру излучения тела

$$T = b/\lambda. \quad (11)$$

4. Площадь под графиком $r(\lambda)$ соответствует энергетической светимости (R) для АЧТ. Зная энергетическую светимость и температуру нагрева тела, построить график $R(T^4)$.

5. Определить постоянную Стефана-Больцмана по тангенсу угла наклона графика $R(T^4)$

$$\sigma = (R_2 - R_1)/(T_2^4 - T_1^4). \quad (12)$$

Порядок выполнения работы

1. Построить график зависимости $r(\lambda)$ для 5 значений температуры.

2. Определить площадь одной клетки под графика $r(\lambda)$.
3. Умножив площадь одной клетки на количество клеток, вычислить площадь ($R=S$) под графиком $r(\lambda)$.
4. Используя режим трассировки, определить длину волны, на которую приходится максимальное значение испускающей способности (r). Рассчитать температуру излучения каждого эксперимента.
5. Вычислить с помощью графика $r(\lambda)$ энергетическую светимость (R_1) для каждой температуры в области видимой части спектра (диапазон длин волн - $\lambda=0,4-0,76$ мкм). Определить какая доля энергии излучения приходится на видимую часть спектра.
6. Построить график зависимости $R(T^4)$. В режиме трассировки на графике $R(T^4)$ установить координаты наиболее удаленных точек.
7. Вычислить постоянную Стефана-Больцмана.
8. Оценить погрешность измерений по формуле

$$\delta\sigma = \frac{|\sigma_{\text{э}} - \sigma_{\text{т}}|}{\sigma_{\text{т}}} \cdot 100\%$$

Данные измерений и вычислений занести в таблицу № 2.

Таблица № 2. Измерения и вычисления

№	r_{max} Вт/м ³	λ_{max} мкм	T, K	Количество клеток под графиком $r(\lambda)$ и площадь одной клетки	R=S, Вт/м ²	R ₁ , Вт/м ²	R ₁ /R	Координаты точек на графике R(T ⁴)	
								R	T ⁴

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Перечислить характеристики теплового излучения.
2. Сформулировать законы теплового излучения
3. Объяснить методику измерений.

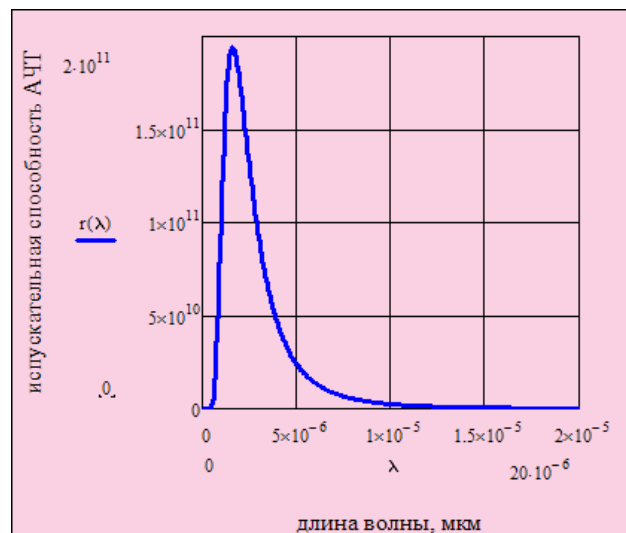
Вопросы для защиты лабораторной работы

1. По результатам построения графиков прокомментировать
 - масштаб осей;
 - вид графиков (прямая, кривая), их изменения при изменении параметров излучающей системы;
 - доля излучения, приходящаяся на видимую часть спектра.
2. Объяснить закономерности излучения АЧТ на основе построенных графиков.

Рекомендации для работы с графиками

Для построения графиков необходимо использовать ПО типа *Maxima*, *gnuplot*, *QtiPlot*, *Wolfram Mathematica*, *Mathcad*.

Пример построения графика с помощью *Mathcad*.



Лабораторная работа № 6.8

Исследование полупроводникового диода

Цель:

- исследование зависимости вольт-амперной характеристики (ВАХ) при прямом и обратном включении диода;
- построение графиков зависимостей $I_{пр}(U)$ и $i_{обр}(u)$, используя ПО;
- определение коэффициента выпрямления диода, контактной разности потенциалов.

Теория

Полупроводники по электропроводности занимают промежуточное положение между диэлектриками и проводниками. Характерной особенностью полупроводников является то, что их электрические свойства зависят от

- температуры;
- освещения;
- примесей.

Электропроводность полупроводников объясняется с точки зрения зонной теории твердого тела. Согласно этой теории при образовании кристалла взаимодействие между атомами приводит к тому, что энергетические уровни атомов смещаются, расщепляются и расширяются в зоны, образуя зонный энергетический спектр. Число уровней в зонах соответствует числу атомов в кристалле, расстояние между уровнями приблизительно 10^{-22} эВ. В виду малости расстояния между уровнями, энергетический спектр в пределах зоны можно считать квазинепрерывным.

Различают разрешенные зоны (электроны могут находиться на энергетических уровнях зоны), запрещенные – электронов нет. На каждом энергетическом уровне может быть не более двух электронов (согласно принципу Паули в каждом квантовом состоянии может быть не более одного электрона), отличающихся хотя бы одним из 4 квантовых чисел, характеризующих состояние электрона. Наивысшая из заполненных зон при $T=0$ К называется валентной зоной, за ней следует зона проводимости. Между валентной зоной и зоной проводимости располагается запрещенная зона, ширина которой представляет собой разность энергий дна зоны проводимости и потолка валентной зоны (рис.1). Вещества с широкой запрещенной зоной – диэлектрики (более 3 эВ), с более узкой – полупроводники (менее 3 эВ).



Рис. 1. Зонная структура полупроводников

Собственная проводимость полупроводников, при температурах отличных от абсолютного нуля, осуществляется электронами и дырками - вакантное место в валентной зоне, образующееся после перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости (рис. 2а). Наличие электрического поля обеспечивает направленное движение электронов и дырок, образующих ток.

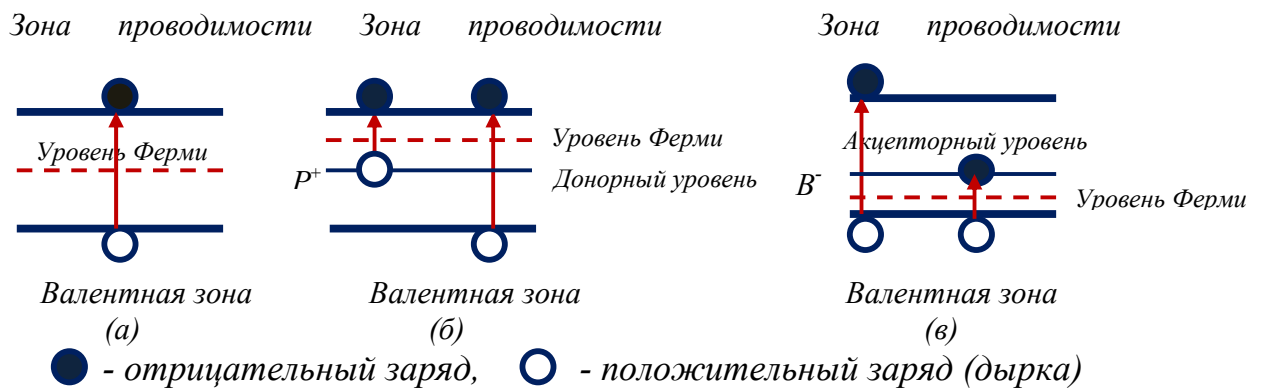


Рис.2. Зонная (энергетическая) диаграмма

При внесении примесей в полупроводники наряду с собственной проводимостью наблюдается еще и примесная проводимость. Например, если в четырехвалентный кремний добавить пентавалентный фосфор, один электрон атома фосфора не будет участвовать в образовании ковалентной связи. При повышении температуры такой электрон может перейти в зону проводимости (рис.2б), атом фосфора становится положительным ионом. Таким образом, за счет атомов фосфора растет число электронов (избыток) в кристалле. Полупроводники, у которых электропроводность обеспечена избыточными электронами, называют полупроводниками n-типа. Примесные атомы (фосфора), у которых валентность выше валентности атомов кристалла (кремния), называют донорными.

Если в четырехвалентный кремний добавить трехвалентный бор, атому для образования ковалентной связи не будет хватать одного электрона, который будет заимствован у четырехвалентного атома кремния (рис.2в). В результате атом бора становится отрицательным ионом, а у атома кремния

увеличивается число вакантных мест – положительных зарядов (дырок). Полупроводники с дырочной проводимостью называют полупроводниками *p*-типа. Примесные атомы (бора), у которых валентность ниже валентности атомов кристалла (кремния), называют акцепторными.

Если привести в контакт два полупроводника с различными типами электропроводности, то на границе возникает область, называемая электронно-дырочным (*p-n*) переходом.

Рассмотрим не подключенный в цепь *p-n*-переход. Так как заряженные частицы участвуют в тепловом движении, происходит их перемещение из области, где их концентрация выше, в область, где она ниже. Таким образом, электроны из *n*-области перемещаются в *p*-область, в обратном направлении перемещаются дырки. Проникая в *p* и *n*-область электроны и дырки соответственно рекомбинируют с основными носителями заряда области. Происходит обеднение *p-n*-перехода основными носителями заряда (*n*-области – электронами, *p*-области – дырками). В результате, *n*-область перехода несет положительный заряд, *p*-область – отрицательный. Между контактными областями возникает электрическое поле, направленное от *n* к *p*-области и контактная разность потенциалов (U_k). Величина контактной разности потенциалов определяется разностью уровней Ферми (максимальная энергия свободных электронов в металле при $T=0$ К), контактирующих полупроводников, что продемонстрировано на рисунке 3 с помощью графика $\varphi(x)$ зависимости потенциала от расстояния.

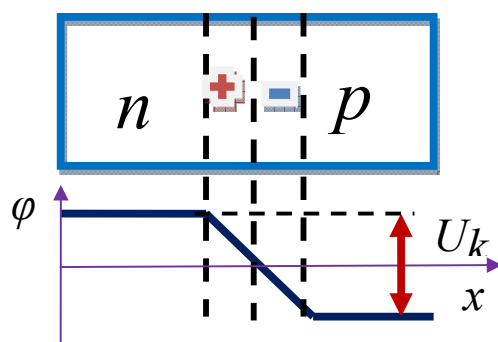


Рис. 3. Не подключенный в цепь *p-n*-переход

В случае не подключенного в цепь *p-n*-перехода ток основных (диффузионный) и неосновных носителей (дрейфовый) равны и определяются выражением

$$I_{неосн} = I_{осн} = C e^{-\frac{eU_k}{kT}} \quad (1)$$

где C – некоторая константа, U_k – контактная разность потенциалов, T – температура по абсолютной шкале температур, e и k – элементарный заряд и постоянная Больцмана соответственно. Таким образом, полный ток через *p-n*-переход равен нулю.

При включении p - n -перехода в цепь в пропускном (прямом) направлении, внешнее электрическое поле направлено навстречу контактному полю. Ширина p - n перехода и сопротивление уменьшаются (рис.4).

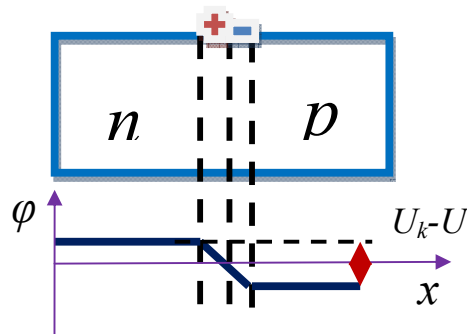


Рис. 4 Прямое включение p - n -перехода в цепь

Ток основных носителей увеличивается с ростом внешнего напряжения, ток неосновных носителей остается неизменным ($I_{неосч}$), результирующий ток через p - n -переход

$$I = I_{осч} - I_{неосч} = C e^{-\frac{eU_k - eU}{kT}} - C e^{-\frac{eU_k}{kT}} = C e^{-\frac{eU_k}{kT}} \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) = I_{неосч} \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) \quad (2)$$

где U - внешнее напряжение.

При включении p - n -перехода в цепь в запиорном (обратном) направлении, внешнее электрическое поле направлено также как и контактное. Ширина p - n перехода и сопротивление увеличиваются (рис.5).

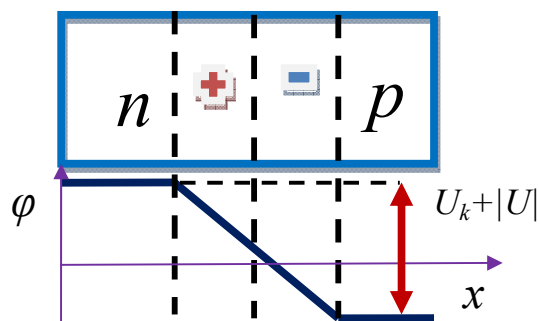


Рис. 5. Обратное включение p - n -перехода в цепь

Ток основных носителей быстро убывает с ростом внешнего напряжения, результирующий ток отрицательный и приближается к току неосновных носителей.

$$I = I_{\text{неосн}} < 0$$

Учитывая рассмотренные режимы р-п-перехода, вольт-амперная характеристика имеет вид

$$I = I_{\text{неосн}} \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right). \quad (3)$$

Описанные явления лежат в основе работы полупроводниковых диодов, которые используются в качестве выпрямителей тока в технике СВЧ, импульсной технике и имеют различное устройство и параметры в зависимости от своего назначения.

Методика измерений

1. По зависимости $I_{\text{пр}}(U)$ и $i_{\text{обр}}(u)$ построить ВАХ для прямого и обратного включения диода

$$I(U) = I_0 (\exp(CU) - 1), \quad (4)$$

где I_0, C – константы, указанные в таблице № 1.

Таблица № 1. Константы в зависимости $I_{\text{пр}}(U)$ и $i_{\text{обр}}(u)$

I_0, A	C, B^{-1}
10^{-6}	38

2. По мере увеличения прямого напряжения потенциальный барьер р-п-перехода исчезает, зависимость $I_{\text{пр}}(U)$ от экспоненциальной приближается к линейной. Построить график соответствующей зависимости. Пересечение графика $I_{\text{пр}}(U)$ с осью напряжения дает значение контактной разности потенциалов.

3. Выпрямляющие свойства диода характеризуются коэффициентом выпрямления, который можно определить по формуле

$$\eta = I_{\text{пр}} / i_{\text{обр}} \quad (6)$$

где значение прямого и обратного тока берется для одного и того же по величине напряжения.

Порядок выполнения работы

1. Построить графики зависимости $I(U)$ для прямого и обратного $i_{обр}(u)$ включения диода.
2. В области прямого включения диода в режиме трассировки определить по графику координаты (6-7 точек). При этом значения напряжения и тока фиксировать в области линейного роста графика.
3. Построить график зависимости $I_{np}(U)$ для точек, зафиксированных в области линейного роста ВАХ. В режиме трассировки на графике определить контактную разность потенциалов.
4. Для заданных значений напряжения (табл.№3) определить соответствующие значения прямого и обратного тока. При необходимости изменить диапазон значений напряжения.
5. Вычислить коэффициент выпрямления. Сделать вывод о выпрямляющих свойствах диода при разных значениях напряжения.
Данные измерений и вычислений занести в таблицу № 2 и 3.

Таблица № 2. Измерение контактной разности потенциалов

№	$U, В$	$I, А$	$U_k, В$

Таблица № 3. Измерение коэффициента выпрямления

№	$U, В$	$I_{np}, А$	$i_{обр}, А$	η
	$\pm 0,05$			
	$\pm 0,1$			
	$\pm 0,15$			

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Охарактеризовать электропроводность полупроводников, используя зонную (энергетическую) диаграмму.
2. Объяснить методику измерения контактной разности потенциалов.

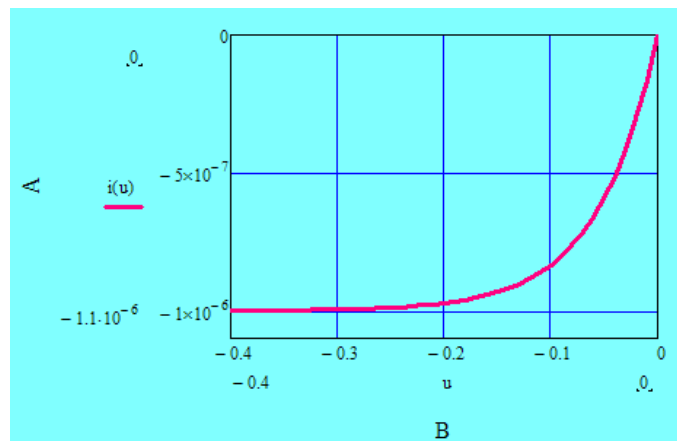
Вопросы для защиты лабораторной работы

1. По результатам измерений и вычислений прокомментировать график ВАХ диода
 - масштаб осей
 - вид графика (прямая, кривая).
2. Соотнести ВАХ и режимы работы p-n –перехода.
3. Проанализировать результаты вычисления коэффициента выпрямления.

Рекомендации для работы с графиками

Для построения графиков необходимо использовать ПО типа Maxima, gnuplot, QtiPlot, Wolfram Mathematica, Mathcad.

Пример построения графика с помощью Mathcad.



Лабораторная работа № 6.9

Исследование закономерностей внешнего фотоэффекта

Цель:

- исследование зависимости тока насыщения от светового потока и задерживающего напряжения от частоты излучения для разных фотоэлементов;
- построение графиков зависимостей $I_{нас}(\Phi)$, $U_3(\nu)$, используя ПО;

Теория

Фотоэффект – испускание электронов вещества под действием света. Экспериментально установлены следующие закономерности фотоэффекта.

1. Фототок насыщения пропорционален падающему световому потоку, при одном и том же спектральном составе света.

$$I_{нас}(\Phi) = \gamma \cdot \Phi, \quad (1)$$

где γ – интегральная чувствительность фотоэлемента – равна току насыщения в расчете на единицу светового потока.

2. Для каждого металла существует максимальная длина волны (или минимальная частота), при которой фотоэффект еще возможен. Наличие такого порога носит название красной границы фотоэффекта.

3. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов зависит от частоты падающего света.

Объяснение закономерностей фотоэффекта возможно на основе гипотезы Эйнштейна: свет представляет собой поток световых квантов – фотонов. Согласно этой гипотезе энергия фотона полностью передается электрону. Таким образом, при фотоэффекте поглощение фотона ведет к появлению свободного электрона. В результате, уравнение фотоэффекта (уравнение Эйнштейна) выглядит следующим образом

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2} \quad (2)$$

где A – работа выхода электрона из металла, $h=6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Согласно закономерностям фотоэффекта, работа выхода электрона из металла может быть определена на основе порога фотоэффекта (красной границы), а именно

$$\frac{hc}{\lambda_k} = A. \quad (3)$$

Максимальную кинетическую энергию электрона можно определить, если учесть, что работа сил электрического поля равна приращению кинетической энергии электрона. При этом кинетическая энергия электрона в

конечном состоянии равна нулю, так как электрическое поле имеет такое направление и величину, что электроны не ускоряются полем, а наоборот тормозятся. Таким образом,

$$eU_3 = \frac{mv^2}{2} \quad (4)$$

U_3 – задерживающее напряжение, e – элементарный электрический заряд.

Методика измерения

1. Построить график зависимости светового потока от расстояния

$$\Phi(r) = \frac{IS}{r^2} \quad (5)$$

где I, S – константы для вакуумного фотоэлемента, указанные в таблице № 1, r – расстояние между лампой накаливания и фотоэлементом.

Таблица № 1. Константы в зависимости $\Phi(r)$

I (сила света лампы накаливания), кд	S (площадь катода фотоэлемента), м^2	γ (чувствительность фотоэлемента), мкА/лм
8	$7 \cdot 10^{-4}$	50

2. По графику $\Phi(r)$ определить поток. Учитывая формулу (1), определить ток насыщения, построить график зависимости $I_{\text{нас}}(\Phi)$.

3. Для разных фотоэлементов по зависимости задерживающего напряжения от частоты излучения $U_3(\nu)$ построить график

$$U_3 = \alpha\nu - \beta \quad (6)$$

где α, β – константы, указанные в таблице №2 .

Таблица № 2. Константы в зависимости $U_3(\nu)$

№	$\alpha \cdot 10^{-15}$, В·с	β , В
1	4,1	1,8
2	4,1	4,3

Таблица № 5. Граница фотоэффекта

<i>№</i>	<i>тип металла</i>	<i>длина волны, нм</i>
<i>1</i>	<i>вольфрам</i>	<i>272</i>
<i>2</i>	<i>цинк</i>	<i>290</i>
<i>3</i>	<i>сурьмяно-цезиевый</i>	<i>670</i>
<i>4</i>	<i>цезий</i>	<i>620</i>
<i>5</i>	<i>литий</i>	<i>500</i>
<i>6</i>	<i>медь</i>	<i>270</i>

Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Сформулировать законы фотоэффекта
2. Объяснить методику измерения тока насыщения и задерживающей разности потенциалов.

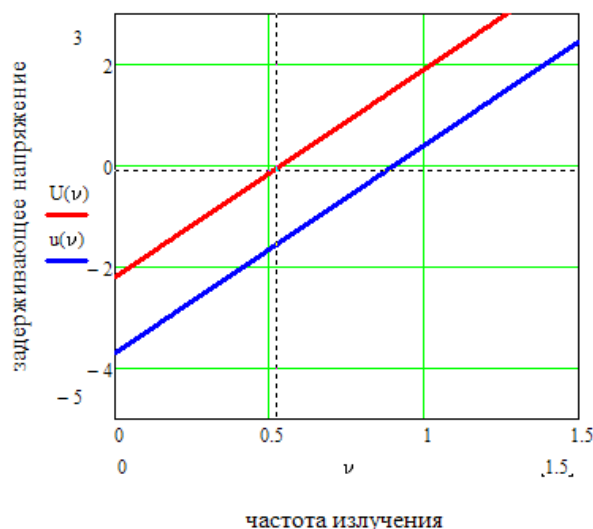
Вопросы для защиты лабораторной работы

1. По результатам измерений и вычислений прокомментировать графики $I_{\text{нас}}(\Phi)$ и $U_3(\nu)$
 - масштаб осей
 - вид графика (прямая, кривая).
2. Объяснить физический смысл одинакового угла наклона графиков $U_3(\nu)$.
3. Проанализировать установление типа фотоэлемента по результатам измерений и вычислений.

Рекомендации для работы с графиками

Для построения графиков необходимо использовать ПО типа *Maxima*, *gnuplot*, *QtiPlot*, *Wolfram Mathematica*, *Mathcad*.

Пример построения графика с помощью *Mathcad*.



Составитель
доцент кафедры физики
М.О. Первушина