

Лабораторная работа 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Ц е л ь р а б о т ы: изучить зависимость сопротивления металлического проводника от температуры.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: металлический проводник, нагреватель, цифровой термометр, вольтметр, миллиамперметр, микроамперметр, генератор напряжения, мультиметр ВР-11А.

1.1. Сведения из теории

Электропроводность металлов

Электропроводность чистых металлов обусловлена дрейфом электронов. Поэтому

$$\sigma = e \cdot n \cdot u. \quad (1.1)$$

Электронный газ в металлах находится в вырожденном состоянии (тепловому воздействию подвержены менее 1% электронов), поэтому их концентрация практически не зависит от температуры, а электропроводность чистых металлов полностью определяется температурной зависимостью подвижности электронов вырожденного электронного газа.

В области высоких температур (выше характеристической температуры Дебая) подвижность носителей u обратно пропорциональна температуре ($u \sim T^{-1}$). В данном случае основной механизм сопротивления чистого металла заключается в рассеянии электронов на тепловых колебаниях решетки (фононах). В этой области температур сопротивление большинства проводников практически линейно зависит от температуры:

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (1.2)$$

где α ($^{\circ}\text{C}$) – температурный коэффициент сопротивления (табличная величина), а t – температура проводника, измеренная в градусах Цельсия.

В области низких температур

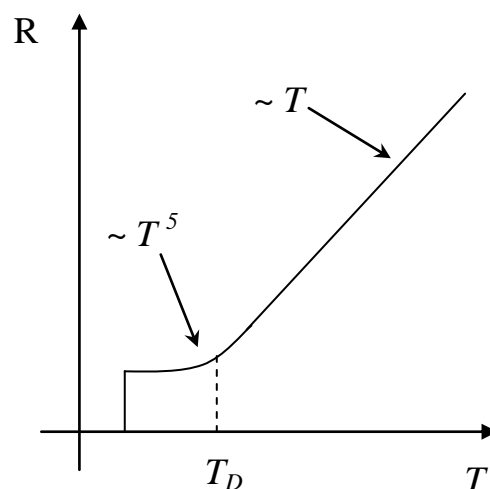


Рис. 1.1. Зависимость сопротивления чистых металлов от температуры.

(ниже характеристической температуры Дебая), энергия тепловых колебаний решетки имеет иную температурную зависимость, поэтому температурная зависимость подвижности $\mu \sim T^{-5}$. С учетом выражения 1.2, зависимость $R = f(T)$ для чистых металлов имеет вид, показанный на рис. 1.1.

В области температур, близких к абсолютному нулю, большинство металлов переходят в сверхпроводящее состояние.

1.2. Описание экспериментальных установок

В данной лабораторной работе используются две экспериментальные установки.

Внешний вид лабораторной установки №1 показан на рис. 1.2. Электрическая цепь содержит генератор напряжения, вольтметр, миллиамперметр, а также измерительный стенд с вмонтированными в него полупроводниковым терморезистором, металлическим проводником, нагревателем и цифровым термометром.

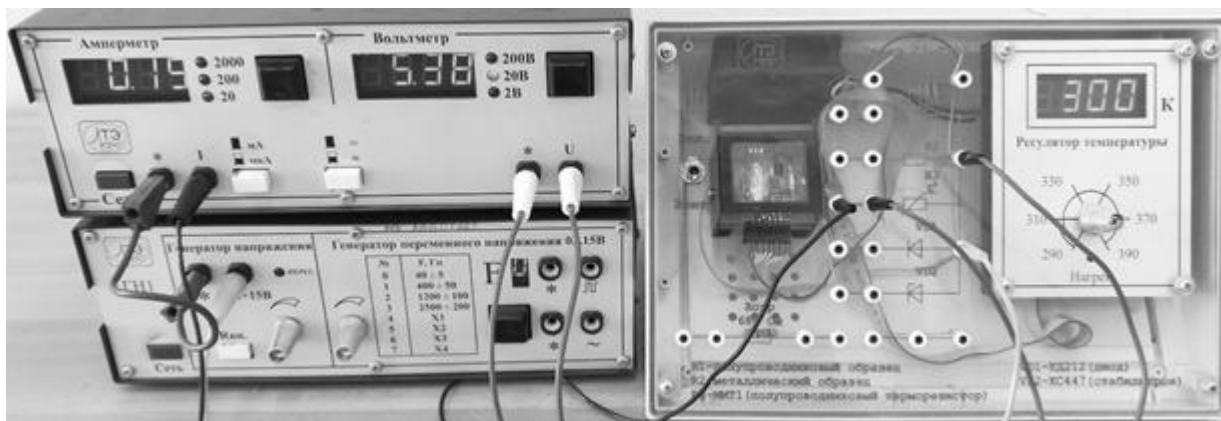


Рис. 1.2. Внешний вид лабораторной установки №1.

Внешний вид лабораторной установки №2 показан на рис. 4.5. Электрическая цепь содержит генератор напряжения, микроамперметр, омметр, измерительный стенд с вмонтированными в него полупроводниковым терморезистором, металлическим проводником и нагревателем. Температура полупроводникового терморезистора и металлического проводника определяется по показаниям микроамперметра, с помощью графика, представленного на рис. 1.4.

Максимальная температура при использовании лабораторной установки №1 не должна превышать 360 K!

Максимальная сила тока нагрева при использовании лабораторной установки №2 не должна превышать 650 мкА!



Рис. 1.3. Внешний вид лабораторной установки №2.

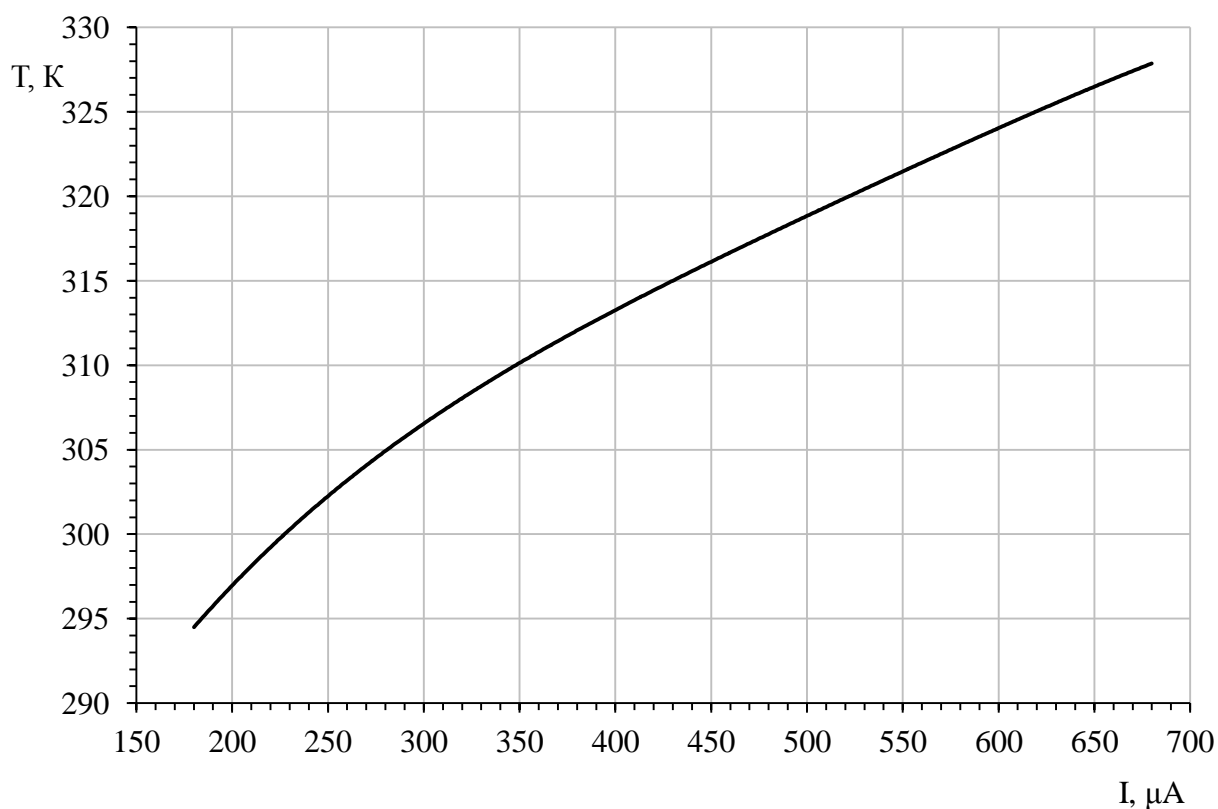


Рис. 1.4. График зависимости температуры в термостате от величины тока микроамперметра. Аналитическое выражение

$$T = -6 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 0,115 \cdot I + 277,07$$

1.3. Порядок выполнения работы на лабораторной установке №1

1.3.1. Определить сопротивление металлического проводника при комнатной температуре по показаниям вольтметра и миллиамперметра.

1.3.2. Подключить металлический проводник. Плавно поворачивая по часовой стрелке регулятор температуры зафиксировать момент загорания индикатора нагрева. Подождать некоторое время (1-3 мин) пока индикатор погаснет, снять показания с миллиамперметра, вольтметра, цифрового термометра и занести их в табл. 1.1. Повторять данную процедуру измерения пока температура не достигнет 350-355 К.

Т а б л и ц а 1.1

№ п/п	I, мА	U, В	R, Ом	T, К
1				
2				
...				
12				

1.4. Порядок выполнения работы на лабораторной установке №2

1.4.1. Определить сопротивление металлического проводника при комнатной температуре по показаниям омметра.

1.4.2. Перевести тумблер в положение «Проводник» и включить «Нагрев 50%». После этого проводник начнет нагреваться, сила тока начнет расти. Через интервал, заданный преподавателем, фиксируйте силу тока и сопротивление образца, до тех пор, пока сила тока не достигнет значения, примерно 650 мкА. Все показания заносятся в табл. 1.2. Температура образца при этом определяется по графику приведенному на рис.4.7. или с помощью аналитического выражения.

Т а б л и ц а 1.2

№ п/п	I, мкА	T, К	R, Ом
1			
2			
...			
12			

1.5. Обработка экспериментальных результатов

1.5.1. Заполнить соответствующие столбцы в таблицах.

1.5.2. По данным таблиц построить график зависимости сопротивления металлического проводника от температуры $R = f(T)$.

1.5.3. Используя выражение 1.2 вычислить температурный коэффициент сопротивления металлического проводника и сравнить его значение с табличным.

1.5.4. Написать вывод по лабораторной работе.

Доп. задание: рассчитайте погрешность температурного коэффициента сопротивления металлического проводника.

Лабораторная работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Ц е л ь р а б о т ы: изучить зависимость сопротивления полупроводникового терморезистора от температуры.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: полупроводниковый терморезистор типа ММТ-1, нагреватель, цифровой термометр, вольтметр, миллиамперметр, микроамперметр, генератор напряжения, мультиметр ВР-11А.

2.1. Сведения из теории

Электропроводность полупроводников

По мере сближения атомов до расстояний порядка постоянной кристаллической решетки взаимодействие между атомами приводит к тому, что энергетические уровни электронов смещаются и расщепляются, образуя энергетический спектр кристалла, в котором можно выделить определенные зоны (рис. 2.1). Образование энергетического спектра – квантово-механический эффект. Валентная зона отделена от вышележащей зоны проводимости запрещенной зоной, которая не содержит разрешенных энергетических уровней. На каждом энергетическом уровне, в соответствии с принципом Паули, может разместиться не более двух электронов с антипараллельными спинами.

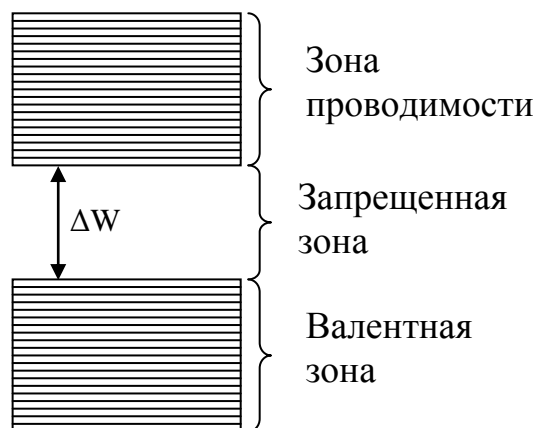


Рис. 2.1

По характеру заполнения зон при $T = 0$ К все кристаллы можно разделить на две большие группы.

К первой группе относятся кристаллы, у которых над целиком заполненными зонами располагается частично заполненная валентная зона. Такая зона

возникает в том случае, когда энергетический уровень, из которого она образуется, заполнен в атоме не полностью. Частично заполненная зона может образовываться также и вследствие наложения заполненных зон на пустые или частично заполненные зоны. Кристаллы первой группы являются проводниками.

Ко второй группе относятся кристаллы, у которых над полностью заполненной валентной зоной располагается пустая зона проводимости, отделенная от валентной зоны запрещенной зоной ширины ΔW . Типичным примером таких кристаллов являются химические элементы IV группы таблицы Менделеева.

По ширине запрещенной зоны ΔW кристаллы второй группы условно делят на диэлектрики и полупроводники.

К диэлектрикам относятся кристаллы, имеющие относительно широкую запрещенную зону. У типичных диэлектриков $\Delta W > 3$ эВ. Так, у нитрида бора $\Delta W = 4,6$ эВ; у алмаза $\Delta W = 5,2$ эВ; у Al_2O_3 $\Delta W = 7$ эВ и т.д.

К полупроводникам относятся кристаллы, имеющие сравнительно узкую запрещенную зону. У типичных полупроводников $\Delta W \leq 1$ эВ. Так, у германия $\Delta W = 0,66$ эВ; у кремния $\Delta W = 1,08$ эВ и т.д.

Общим свойством всех полупроводников является сильная зависимость их проводимости от внешних воздействий: нагревания, облучения светом, бомбардировки различными частицами и т. д.

В результате внешнего воздействия часть электронов из валентной зоны переходит в зону проводимости. В покинутом электроном месте возникает дырка (оборванная связь, вакантное место, заряженное положительно), заполнить которую могут только электроны с ближайшего энергетического уровня. В результате электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне могут перемещаться по кристаллу. Движение электронов и дырок в отсутствии внешнего электрического поля является хаотическим. Если же кристалл поместить во внешнее электрическое поле, то электроны начнут двигаться против поля, а дырки – по полю. Такое движение приводит к возникновению собственной проводимости, обусловленной как электронами, так и дырками (электронно-дырочная проводимость). Следует также заметить, что такое движение связано с туннельным переходом электронов и дырок от атома к атому.

Удельное сопротивление ρ полупроводника – величина обратная его удельной электропроводности или проводимости σ :

$$\rho = \frac{1}{\sigma}. \quad (2.1)$$

Различают собственную и примесную электропроводность полупроводника.

В собственном полупроводнике носителями тока являются электроны и дырки, поэтому выражение для удельной электропроводности собственного полупроводника можно представить в виде двух слагаемых:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = e \cdot n \cdot u_n + e \cdot p \cdot u_p, \quad (2.2)$$

где n , p – концентрация электронов и дырок, соответственно; e – элементарный заряд; u_n , u_p – подвижность электронов и дырок, представляющая собой отношение скорости дрейфа упорядоченного движения носителей тока к напряженности электрического поля, вызвавшего это движение. В области высоких температур (выше характеристической температуры Дебая)

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right), \quad (2.3)$$

где ΔW – энергия активации (ширина запрещенной зоны) собственного полупроводника, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

С учетом того, что сопротивление полупроводника $R \sim \rho$ выражение 2.1 с учетом 2.3 примет вид:

$$R = R_0 \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{2kT}\right). \quad (2.4)$$

Если прологарифмировать полученное выражение, то получим:

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta W}{2k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (2.5)$$

На рис. 2.2 показаны качественные графические зависимости $R = f(T)$ и $\ln R = f(1/T)$ для полупроводника.

Сравнивая выражение 2.5 с уравнением прямой вида

$$y = b + \operatorname{tg} \alpha \cdot x, \quad (2.6)$$

где $y = \ln R$; $x = 1/T$ можно по графику изображенному на рис. 2.2 определить тангенс угла наклона прямой и по нему энергию активации собственного полупроводника ΔW .

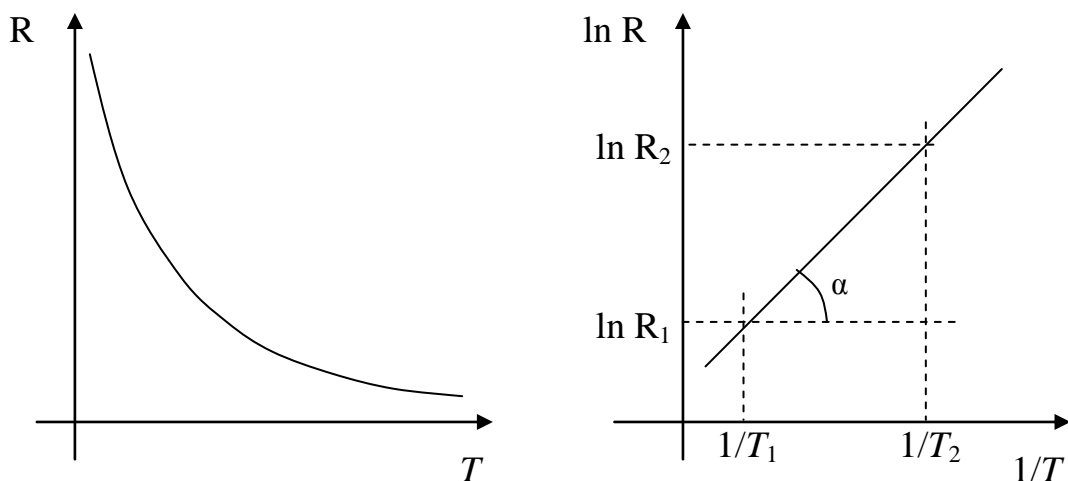


Рис. 2.2. Зависимость сопротивления собственных полупроводников от температуры.

2.2. Описание экспериментальных установок

Для выполнения лабораторной работы могут быть использованы две лабораторные установки, которые подробно описаны в пункте 1.2 лабораторной работы 1.

2.3. Порядок выполнения работы на лабораторной установке №1

2.3.1. Определить сопротивление полупроводникового терморезистора при комнатной температуре по показаниям вольтметра и миллиамперметра.

2.3.2. Подключить полупроводниковый терморезистор. Плавное поворачивая по часовой стрелке регулятор температуры зафиксировать момент загорания индикатора нагрева. Подождать некоторое время (1-3 мин) пока индикатор погаснет, снять показания с миллиамперметра, вольтметра, цифрового термометра и занести их в табл. 2.1. Повторять данную процедуру измерения пока температура не достигнет 350-355 К.

Т а б л и ц а 2.1

№ п/п	I, мА	U, В	R, Ом	ln R	T, К	$\frac{1}{T} \cdot 10^3, \text{K}^{-1}$
1						
2						
3						
...						
12						

2.4. Порядок выполнения работы на лабораторной установке №2

2.4.1. Определить сопротивление полупроводникового терморезистора при комнатной температуре по показаниям омметра.

2.4.2. Перевести тумблер в положение «Полупроводник» и включить «Нагрев 50%». После этого полупроводниковый терморезистор начнет нагреваться, сила тока начнет расти. Через интервал, заданный преподавателем, фиксируйте силу тока и сопротивление образца, до тех пор, пока сила тока не достигнет значения, примерно 650 мкА. Все показания заносятся в табл. 2.1. Температура образца при этом определяется по графику приведенному на рис.1.4. или с помощью аналитического выражения $T = -6 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 0,115 \cdot I + 277,07$.

Т а б л и ц а 2.2

№ п/п	I, мкА	T, К	$\frac{1}{T} \cdot 10^3, \text{K}^{-1}$	R, Ом	ln R
1					
2					
3					
...					
12					

2.5. Обработка экспериментальных результатов

2.5.1. Заполнить соответствующие столбцы в таблицах.

2.5.2. По данным таблицы 2.1 или 2.2 построить график $\ln R = f(1/T)$ для полупроводникового терморезистора и определить тангенс угла $\text{tg } \alpha$ наклона прямой к оси абсцисс.

2.5.3. Оценить ширину запрещенной зоны ΔW (в эВ) полупроводникового терморезистора, по двум произвольно выбранным точкам исходя из формулы:

$$\text{tg } \alpha = \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} = \frac{\Delta W}{2k}.$$

2.5.4. По полученному значению ΔW определить тип полупроводника.

2.5.5. Написать вывод по всей лабораторной работе.

Доп. задание: рассчитайте погрешность ширины запрещенной зоны полупроводникового терморезистора.

Лабораторная работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКА ОТ ОСВЕЩЕННОСТИ

Ц е л ь р а б о т ы: изучить зависимость сопротивления полупроводника от освещенности.

П р и б о р ы и п р и н а д л е ж н о с т и: фотосопротивление типа ФСК, источник света, оптическая скамья, осветитель, источник постоянного напряжения, микроамперметр, вольтметр.

3.1. Сведения из теории

Общим свойством всех полупроводников является сильная зависимость их проводимости от внешних воздействий: нагревания, облучения, бомбардировки частицами и т.д.

Возникновение в полупроводнике свободных носителей заряда под действием электромагнитного излучения называется внутренним фотоэффектом.

Добавочная проводимость, вызванная действием электромагнитного излучения, называется фотопроводимостью.

Различают собственную и примесную фотопроводимости.

Собственная проводимость возникает вследствие возбуждения валентных электронов полупроводника и перехода их в зону проводимости (рис. 3.1 а). В зоне проводимости появляется электрон, а в валентной зоне – подвижная дырка.

Примесная фотопроводимость обусловлена переходом электронов с донорного уровня в зону проводимости (рис. 3.1 б) или из валентной зоны на акцепторный уровень (рис. 3.1 в).

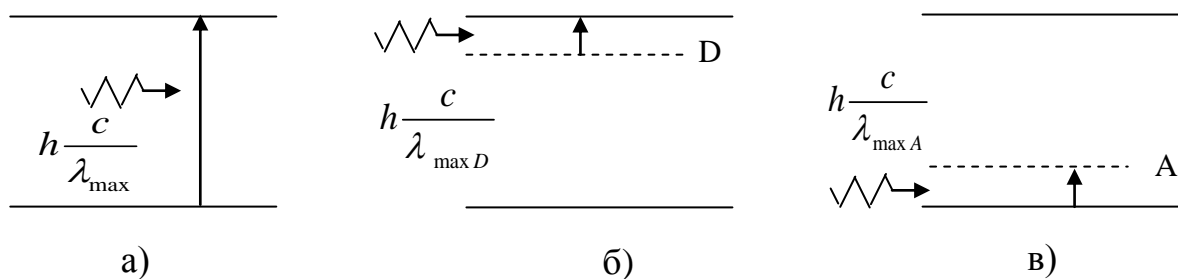


Рис. 3.1

Фотопроводимость может возникать только при возбуждении электромагнитным излучением, энергия фотонов которого превышает либо ширину запрещенной зоны ΔW (для собственного полупроводника), либо величину энер-

гии активации ΔW_D или ΔW_A (для примесных полупроводников). Поэтому существует такая максимальная длина волны, при которой свет является фотоэлектрически активным. Она называется красной границей фотопроводимости λ_{\max} и определяется из соотношений:

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{\Delta W} - \text{для собственных полупроводников};$$

$$\lambda_{\max D} = \frac{hc}{\Delta W_D} \text{ или } \lambda_{\max A} = \frac{hc}{\Delta W_A} - \text{для примесных полупроводников.}$$

Для собственных полупроводников λ_{\max} приходится на видимую часть спектра, а для примесных – на инфракрасную.

На явлении фотопроводимости основано действие полупроводниковых приборов, называемых фотосопротивлениями. Большинство фотосопротивлений состоит из изолирующей подложки 1 (рис. 3.2), на которую в вакууме наносится тонкий слой полупроводника 2. По краям этого слоя также в вакууме наносятся металлические электроды 3. Схема включения фотосопротивления в цепь показана на рис. 3.3.

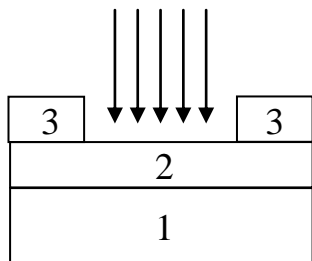


Рис. 3.2

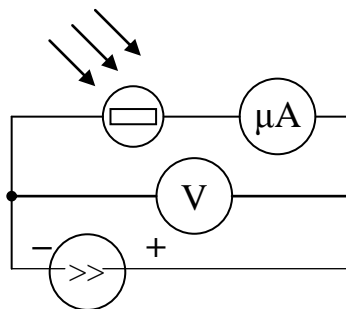


Рис. 3.3

Если к фотосопротивлению подключить источник постоянного напряжения, то в темноте через него пойдет темновой ток $I_{\text{тем}}$, а при освещении – световой ток $I_{\text{св}}$. Разность между световым и темновым токами называется фототоком $I_{\text{ф}}$:

$$I_{\text{ф}} = I_{\text{св}} - I_{\text{тем}}. \quad (3.1)$$

Как правило, темновой ток пренебрежимо мал по сравнению со световым током.

Интегральная чувствительность фотоэлемента K характеризует величину фототока, возникающего под действием единичного светового потока. Чувствительность называют интегральной потому, что измеряют ее при освещении светом сложного спектрального состава.

3.2. Описание экспериментальных установок

В данной лабораторной работе используются две экспериментальные установки.

Фотография экспериментальной установки №1 показана на рис. 3.4. Установка состоит из источника постоянного напряжения В-24, фотосопротивления, которое может свободно перемещаться по металлической скамье и на которое подается свет от источника света (лампа накаливания), микроамперметра и вольтметра. Измерение напряжения на фотосопротивлении лучше производить по вольтметру с более высоким классом точности. Мощность лампы накаливания P составляет 100 Вт.

Будьте осторожны! Корпус, в котором находится лампа накаливания нагревается до высокой температуры и соприкосновение с ним может вызвать ожог!

Фотография экспериментальной установки №2 показана на рис. 3.5. Установка состоит из блока питания, фотосопротивления, которое может перемещаться внутри металлической трубы с прорезью и на которое подается свет от светодиода, микроамперметра и вольтметра.

Сила света светодиода $I_{\text{сд}}$ указана на установке и составляет 7,5 Кд. Обратите внимание, что предельное напряжение, измеряемое вольтметром, составляет 10 В.

3.3. Порядок выполнения работы

3.3.1. Совместно с преподавателем включить и настроить соответствующую лабораторную установку.

3.3.2. По согласованию с преподавателем на лабораторной установке №1 установить на фотосопротивлении значение напряжения U и, закрыв фотосопротивление рукой, измерить темновой ток $I_{\text{тем}}$ (предел шкалы микроамперметра при этом установить 10 мкА).

3.3.3. Перемещая фотосопротивление вдоль всей оптической скамьи, измерить величину светового тока $I_{\text{св}}$ при различных расстояниях r между источником света и фотосопротивлением, то есть при разных значениях освещенности E фотосопротивления. Расстояние r и соответствующее ему значение светового тока $I_{\text{св}}$ занести в таблицу 3.1. Расстояние от источника света до фотосопротивления менять с шагом указанным преподавателем.

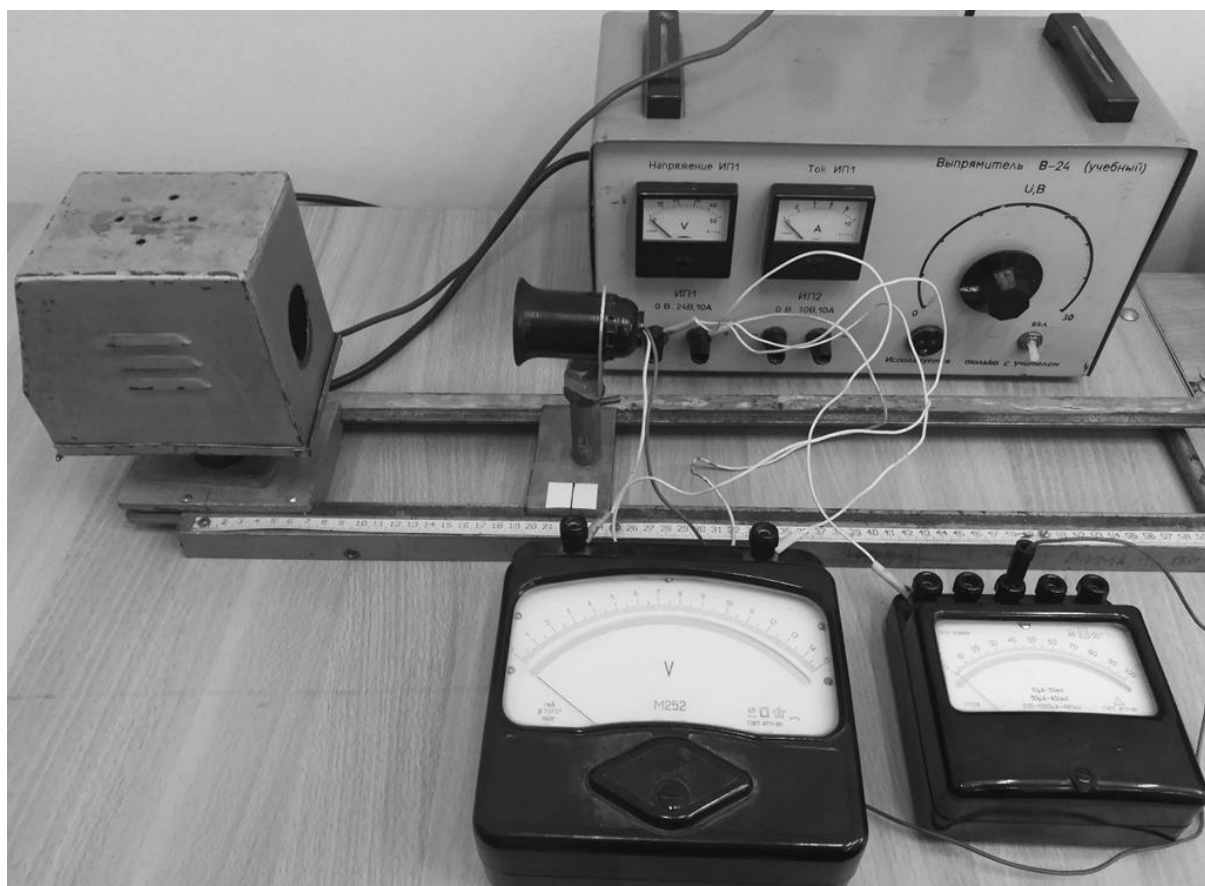


Рис. 3.4. Внешний вид лабораторной установки №1.



Рис. 3.5. Внешний вид лабораторной установки №2.

3.3.4. Рассчитать освещенность E фотоэлемента по формуле:
для экспериментальной установки №1

$$E = \frac{I}{r^2}, \quad (3.2)$$

где I – сила света источника, которую можно считать численно равной мощности лампы накаливания P ;

для экспериментальной установки №2

$$E = \frac{I_{CD}}{r^2}, \quad (3.3)$$

где I_{CD} – сила света светодиода; r – расстояние от источника света до фотосопротивления.

3.3.5. Рассчитать сопротивление полупроводника, используя закон Ома и полученные значения занести в табл. 3.1.

Т а б л и ц а 3.1

№ п/п	Напряжение на зажимах фотоэлемента $U =$		Мощность лампы накаливания $P =$ Сила света светодиода $I_{CD} =$	
	Расстояние r , см	Световой ток I_{CB} , мкА	Освещенность E , лк	Сопротивление R , Ом
1				
2				
3				
...				
12				

3.3.6. По полученным результатам построить и проанализировать график $R = f(E)$.

3.3.7. Рассчитать интегральную чувствительность фотоэлемента K для трех значений сопротивления R из таблицы 3.1. (наибольшее, наименьшее и среднее) по формуле:

$$K = \frac{I_{cs}}{\Phi} = \frac{U}{RES} = \frac{U}{S} \cdot \frac{1}{RE},$$

где S – площадь фотосопротивления, указанная на лабораторной установке.

3.3.8. Написать вывод по всей лабораторной работе.

Доп. задание: рассчитайте погрешность интегральной чувствительности фотоэлемента K .