

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

И. Н. Фетисов

## ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Методические указания к лабораторной работе Ф-5 по курсу общей физики

Под редакцией Л.К.Мартинсона

МГТУ им.Н.Э.Баумана, 1997

Рассмотрены основные сведения об электропроводности твердых тел, описана лабораторная установка, изложена методика измерений сопротивления и температуры. Для студентов 2-го курса всех специальностей.

### ВВЕДЕНИЕ

В работе приведены некоторые основные сведения об электропроводности твердых тел, дано понятие о зонных диаграммах металлов, диэлектриков и полупроводников, рассмотрены электронная и дырочная проводимость полупроводников, приведена теоретическая зависимость электропроводности полупроводников от температуры.

Цель работы - изучение температурной зависимости сопротивления вольфрама и полупроводникового терморезистора в интервале от 295 до 650 К, сравнение эксперимента с теорией, определение температурных коэффициентов сопротивления и энергии активации проводимости полупроводника.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

#### 1. Электропроводность твердых тел

Способность тела пропускать электрический ток под воздействием электрического поля называется электропроводностью (проводимостью). Зависимость между плотностью тока  $\vec{j} = I/S$ , А/м<sup>2</sup>, и напряженностью поля  $\vec{E}$ , В/м, выражается законом Ома в дифференциальной форме

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности  $\sigma$ , Ом<sup>-1</sup> м<sup>-1</sup>, называется удельной электропроводностью вещества. Обратная величина  $\rho = 1/\sigma$  есть удельное сопротивление.

Отметим некоторые электрические свойства твердых тел.

1. Для различных веществ  $\rho$  изменяется в огромных пределах: хороший проводник в 10<sup>25</sup> раз лучше проводит ток, чем хороший изолятор.
2. В порядке возрастания сопротивления все вещества разделены на три класса: проводники (металлы), полупроводники и диэлектрики (изоляторы).
3. На электропроводность сильно влияет характер упаковки атомов в твердом теле. Например, алмаз - диэлектрик, а графит - проводник, хотя оба они представляют различные кристаллические формы углерода.
4. При добавлении примеси в чистый металл сопротивление образующегося сплава больше сопротивления каждого компонента (рис. 1). Напротив, примесь в чистом полупроводнике резко уменьшает сопротивление; например, добавка 10<sup>-5</sup> % мышьяка в германий снижает его сопротивление в 200 раз.
5. При уменьшении температуры сопротивление чистых металлов и сплавов уменьшается, причем у чистых металлов оно может стать весьма малым (см. рис. 1).
6. Характерной особенностью полупроводников, отличающей их от металлов, является быстрое уменьшение сопротивления при нагревании (рис. 2). Как правило, в широком интервале абсолютных температур  $T$  изменение электропроводности происходит по экспоненциальному закону

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\epsilon_A/(kT)) \quad (2)$$

Здесь  $\epsilon_A$  - энергия активации проводимости,  $k$  - постоянная Больцмана,  $\sigma_0$  - коэффициент (в действительности зависящий от температуры, но существенно слабее, чем экспоненциальный множитель).

Формула (2) означает, что электроны полупроводника связаны с атомами с энергией связи порядка  $\epsilon_A$ . При повышении температуры тепловое движение начинает разрывать связи электронов, и часть их, пропорциональная  $\exp(-\epsilon_A/(kT))$  становится свободными носителя-

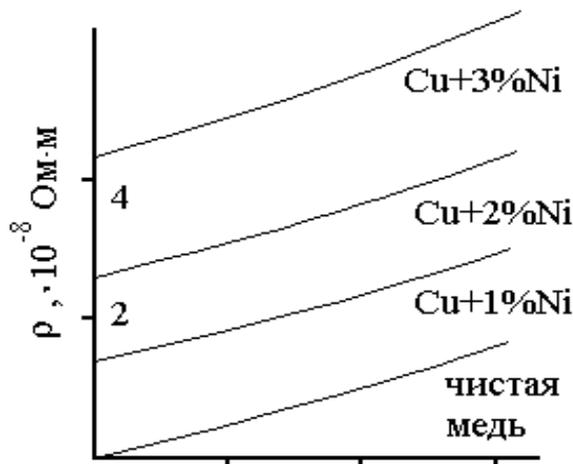


Рис.1

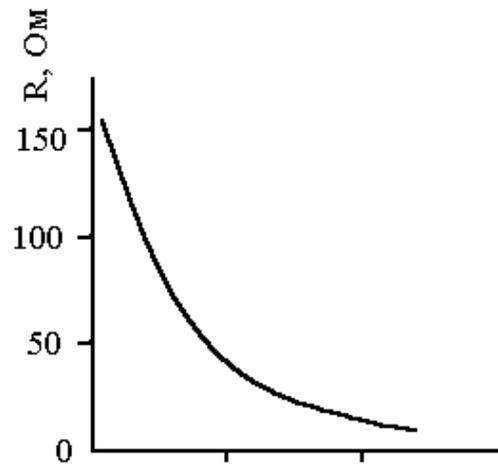


Рис.2

ми заряда.

7. В полупроводниках связь электронов может быть разорвана не только тепловым движением, но и различными внешними воздействиями: светом, потоком быстрых заряженных частиц и т.д. Поэтому для полупроводников характерна сильная зависимость электропроводности от внешних воздействий.

8. Электропроводность полупроводников сильно зависит от содержания примесей и дефектов в кристаллах, поскольку во многих случаях энергия  $\epsilon_A$  для электронов, локализованных вблизи примесей или дефектов, меньше, чем в идеальном кристалле данного полупроводника. Возможность в широких пределах управлять проводимостью полупроводников при помощи изменения температуры, введения примесей и т.д. является основой их многочисленных и разнообразных применений.

Из сказанного видно, что полупроводники отличаются от металлов качественно иными свойствами, а не только значением электропроводности.

9. У многих химических элементов, соединений и сплавов при охлаждении ниже определенной (характерной для данного материала) критической температуры  $T_C$  наблюдается переход из нормального в сверхпроводящее состояние, в котором их электрическое сопротивление постоянному току полностью отсутствует. Длительное время были известны сверхпроводники, критическая температура которых не превышала 23 К, а в 1986 г. был открыт новый класс высокотемпературных сверхпроводников с критической температурой до 125 К и выше.

## 2. Электропроводность металлов и полупроводников

В металлах и полупроводниках ток переносится электронами, в диэлектриках - электронами и ионами. В отсутствие электрического поля электроны движутся хаотически, причем в некотором направлении движется столько же электронов, сколько и в противоположном направлении. Поэтому хаотическое движение не создает тока. Если приложено электри-

ческое поле, то в направлении против вектора напряженности поля движется больше электронов, чем в противоположном направлении, т.е. появляется электрический ток. В этом случае движение электронов можно представить как сумму хаотического движения и упорядоченного движения против вектора  $\vec{E}$  со сравнительно небольшой средней скоростью, называемой скоростью дрейфа  $v_{др}$ .

В металлах, где ток создают почти свободные электроны, называемые электронами проводимости, плотность тока пропорциональна их концентрации  $n$  и скорости дрейфа.

$$\vec{j} = -en\vec{v}_{др} \quad (3)$$

где  $e$  - модуль заряда электрона.

Двигаясь ускоренно в электрическом поле, электрон приобретает дополнительную скорость вдоль поля, которую теряет в результате очередного столкновения. Среднее значение этой скорости дрейфа пропорционально напряженности поля.

$$v_{др} = \mu_n E \quad (4)$$

Коэффициент пропорциональности  $\mu_n$  называется подвижностью электронов. Его численное значение, равное скорости дрейфа в поле единичной напряженности, зависит от материала и температуры. Подставив (4) в (3), получим закон Ома  $\vec{j} = \sigma\vec{E}$  и выражение для удельной электропроводности металла.

$$\sigma = e n \mu_n \quad (5)$$

Таким образом, проводимость пропорциональна числу электронов проводимости в единице объема и их подвижности.

В полупроводниках ток создают электроны проводимости и дырки. Дырка - это квазичастица с положительным зарядом, равным модулю заряда электрона. Особый вид движения многих электронов, отличающийся от движения свободных электронов, удобно описывать с помощью движения дырки, которая движется в направлении, противоположном движению электронов. В отличие от проводимости металла (5), проводимость полупроводника равна сумме двух типов проводимости - электронной (n-типа) и дырочной (p-типа):

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p) \quad (6)$$

где  $p$  и  $\mu_p$  - концентрация и подвижность дырок.

В кристалле движение электрона, имеющего волновые свойства, не подчиняется законам классической физики. В идеальном кристалле, где отсутствуют дефекты и примеси, а сами атомы слабо колеблются, что имеет место при низкой температуре, электроны имеют большой пробег между столкновениями и, как следствие, большую подвижность. Примеси, дефекты кристалла, колебания решетки и другие факторы, нарушающие периодичность внутреннего электрического поля, уменьшают подвижность.

Большая проводимость металлов объясняется огромной концентрацией электронов проводимости, сравнимой с концентрацией атомов, а уменьшение проводимости при нагревании есть следствие уменьшения подвижности. Примесные атомы в металле, дефекты кристаллической решетки, образовавшиеся в процессе кристаллизации и последующей обработки, уменьшая подвижность электронов, увеличивают сопротивление.

В отличие от металлов в полупроводниках число носителей быстро увеличивается с ростом температуры, приводя к росту проводимости.

Уменьшение подвижности при нагревании, приводя к обратному эффекту, не может сильно повлиять на рост проводимости.

### 3. Зонные диаграммы.

В отдельном атоме энергия электронов может принимать только ряд дискретных значений, в связи с чем говорят о существовании ряда разреженных энергетических уровней, которые на диаграммах изображают горизонтальными линиями (рис. 3, а). В кристалле атомы расположены настолько близко друг к другу, что их взаимное влияние приводит к расщеплению каждого уровня на огромное число тесно расположенных уровней (рис. 3, б). Количество уровней в зоне равно или пропорционально числу атомов в данном теле.

Стремление к наименьшей энергии и принцип Паули, ограничивающий число электронов на одном уровне, приводят к тому, что электроны заполняют нижние зоны, а верхние остаются пустыми. Характер заполнения зон зависит от температуры.

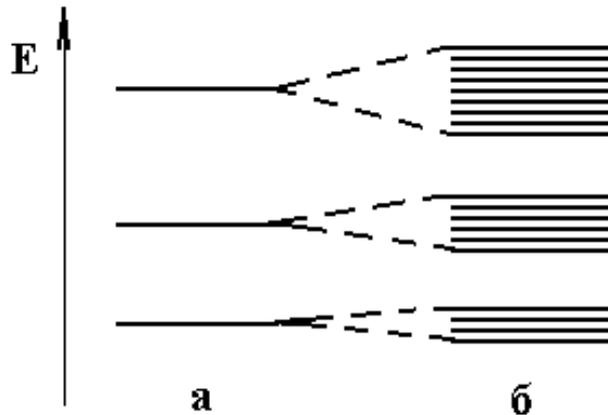


Рис.3

У беспримесных полупроводников и диэлектриков при  $T = 0$  имеется высшая целиком заполненная зона, называемая валентной, а следующая за ней зона, пустая, называется зоной проводимости (рис. 4а). Они разделены энергетическим зазором ширины  $-E_g$ , называемой запрещенной зоной. Заполненные уровни отмечены на рис. 4 точками.

При низкой температуре полупроводники и диэлектрики плохо проводят ток, поскольку в зоне проводимости нет электронов, а в валентной зоне нет свободных уровней. Последнее требует пояснения. Электроны валентной зоны слабо связаны с атомами и могут перемещаться по кристаллу. Но если все уровни заполнены, то движение может быть только хаотическим. Чтобы возник ток, должен быть дрейф электронов, т.е. импульсное распределение электронов должно измениться. А оно измениться не может, так как все разрешенные значения энергии и импульса заняты. Этот квантовый эффект играет существенную роль в электропроводности твердых тел.



Рис.4

При нагревании полупроводника тепловые колебания кристаллической решетки сообщают некоторой части электронов энергию, достаточную для их перехода из валентной зоны в зону проводимости (рис. 4б). Одновременно в валентной зоне освобождается соответствующее количество уровней, называемых дырками. В кристалле дырка - это атом с положительным зарядом, который лишился электрона. Освободившееся место может занять электрон с какого-либо соседнего атома, создав, таким образом, дырку в другом месте. Так происходит пе-

ремещение дырки - положительно заряженной вакансии. В отсутствие электрического поля дырки движутся хаотически, а при наличии поля появляется также дрейф дырок вдоль поля.

Наряду с процессом образования пар «электрон - дырка» идет обратный процесс - рекомбинация, состоящий в самопроизвольном обратном переходе электронов из зоны проводимости на свободные уровни в валентной зоне. При этом в кристалле один из электронов проводимости занимает вакансию. Вероятность генерации пар растет с температурой, а вероятность рекомбинации растет с увеличением концентрации пар. Поэтому данной температуре соответствует статистически определенная равновесная концентрация электронов и дырок.

Теоретически установлено, что в чистом полупроводнике концентрация электронов проводимости и такая же концентрация дырок равны

$$n = A T^{3/2} \exp(-E_d / 2kT) \quad (7)$$

где  $A$  - постоянная (например, для кремния  $A = 4 \cdot 10^{22} \text{ К}^{-3/2} \text{ м}^{-3}$ ) После подстановки (7) в (6) имеем

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_d / 2kT) \quad (8)$$

где  $\sigma_0 = e(\mu_n + \mu_p) A T^{3/2}$ . Величина  $\sigma_0$  слабо зависит от  $T$  по сравнению с экспоненциальным множителем, ее можно считать примерно постоянной. Таким образом, мы приходим к формуле (2), если принять для беспримесных полупроводников энергию активации, равной половине ширины запрещенной зоны  $E_A = E_d / 2$

Электроны могут быть переведены из валентной зоны в зону проводимости под действием света, если энергия фотонов превышает ширину запрещенной зоны:  $h\nu > E_d$ . Возникающая при этом добавочная проводимость полупроводника называется фотопроводимостью (внутренним фотоэффектом).

Зонная диаграмма, изображенная на рис. 4, свойственна полупроводникам и диэлектрикам, причем разделение веществ на эти два класса условно и опирается лишь на количественные различия в значениях  $E_d$ . К полупроводникам обычно относят вещества, у которых  $E_d < 2...3 \text{ эВ}$ , у диэлектриков  $E_d$  больше. Для диэлектриков показатель экспоненты в формуле (8) - большое число, поэтому проводимость мала при любых разумных температурах.

Высокая проводимость металлов связана с особенностью их электронного спектра, в котором непосредственно над заполненными уровнями находятся свободные уровни (рис. 5). Такой спектр может возникнуть, например, при частичном перекрытии заполненной валентной зоны и пустой зоны проводимости.

Итак, огромное различие в электропроводности различных тел объясняется характером электронного спектра.

Примесная проводимость. Примеси, а также дефекты в структуре кристалла существенно изменяют проводимость полупроводников. Введение атомов других веществ приводит к появлению дополнительных энергетических уровней, которые могут располагаться внутри запрещенной зоны основного полупроводника (рис. 6).

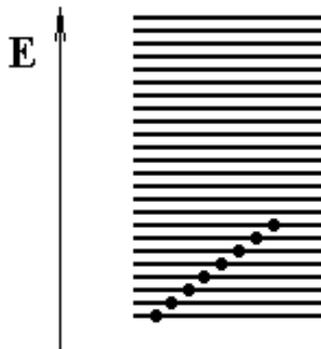


Рис.5

Если такой примесный уровень занят электроном (при низкой температуре), но располагается вблизи зоны проводимости (см. рис. 6а), для перехода этого электрона в зону проводимости требуется небольшая энергия ионизации донора  $E_d$ . Такие примеси и создаваемые ими уровни называется донорными. Например, в четырехвалентном кремнии донорами служат пятивалентные атомы. В отличие от собственных атомов полупроводника донорные атомы поставляют электроны проводимости, но не создает дырок, поэтому в таком полупроводнике при достаточном количестве примеси проводимость преимущественно электронного типа (n-типа).

Если примесный уровень свободен (при низкой температуре) и располагается вблизи дна запрещенной зоны (см. рис. 6 б), то при комнатной температуре на него легко переходит элек-

трон из валентной зоны, создавая в последней дырку. Такие уровни и примеси называются акцепторными (в кремнии - трехвалентные атомы). Они создают только дырки, и проводимость становится преимущественно дырочной (р-типа). Для перехода электрона с верхнего уровня валентной зоны на акцепторный уровень ему необходимо сообщить небольшую энергию  $E_{и.а.}$

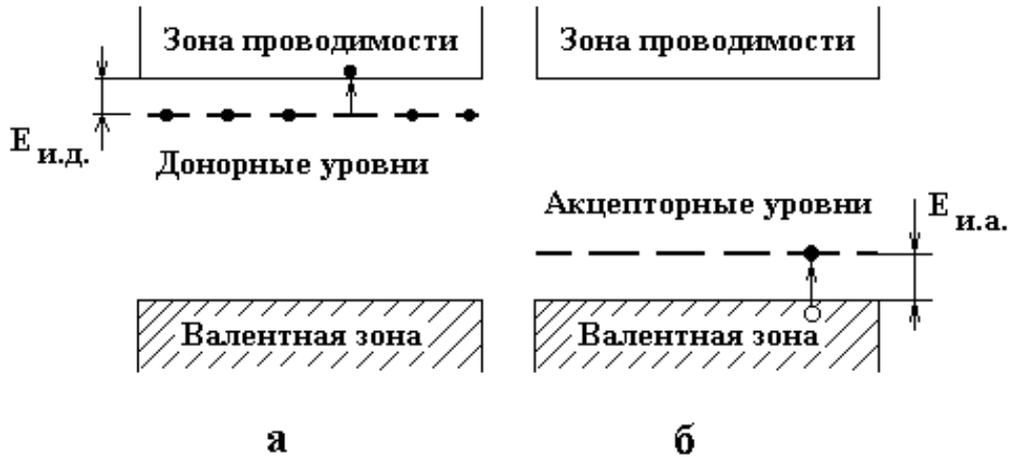


Рис.6

#### 4. Температурный коэффициент сопротивления

Температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) называется величина

$$\alpha = (1/R)(\Delta R/\Delta T) \quad (9)$$

где  $R$  – сопротивление при температуре  $T$ ,  $\Delta R$  - приращение сопротивления при небольшом приращении температуры  $\Delta T$ .

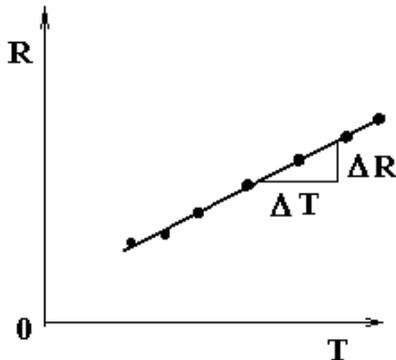


Рис.7

Ниже даны рекомендации по обработке экспериментальных данных.

Для металла полученную зависимость  $R$  от  $T$  надо представить в виде графика, примерный вид которого показан на рис. 7. Значение  $\alpha$  можно вычислить по формуле (9), предварительно определив отношение  $\Delta R/\Delta T$  из графика, как показано на рис. 7 (можно взять  $\Delta T = 50 \dots 100$  К).

Для полупроводника полученную зависимость  $R$  от  $T$  следует проанализировать иначе. Пусть образец имеет вид стержня длиной  $l$  и сечением  $S$ , тогда его сопротивление  $R = \rho l/S = l/(\sigma S)$ . Предположим, что зависимость  $\sigma$  от  $T$  описывается формулой (2), тогда

$$R = l/(\sigma_0 S) \exp(\epsilon_A / kT) \quad (10)$$

При комнатной температуре  $T_0$  сопротивление соответственно равно

$$R_0 = l/(\sigma_0 S) \exp(\epsilon_A / kT_0)$$

Разделив почленно два последних соотношения и прологарифмировав, получим

$$\ln(R/R_0) = (\epsilon_A / k) (1/T - 1/T_0) \quad (11)$$

Пусть по результатам измерений сопротивления полупроводника при различной температуре построена графическая зависимость  $\ln(R/R_0)$  от  $1/T$ , примерный вид которой показан на рис. 8, где точками представлены экспериментальные данные. Если точки хорошо ложатся на прямую, то опыт согласуется с формулами (11) и (2). Прямая, проведенная через экспериментальные точки, отсекает от оси ординат отрезок, равный  $\epsilon_A / (kT)$ , как следует из (11) при  $1/T = 0$ :

$$|\ln(R/R_0)| = \epsilon_A / (k T_0) \quad (12)$$

Из графика и формулы (12) можно определить энергию активации проводимости  $\epsilon_A$  в джоулях (постоянная  $k=1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К)

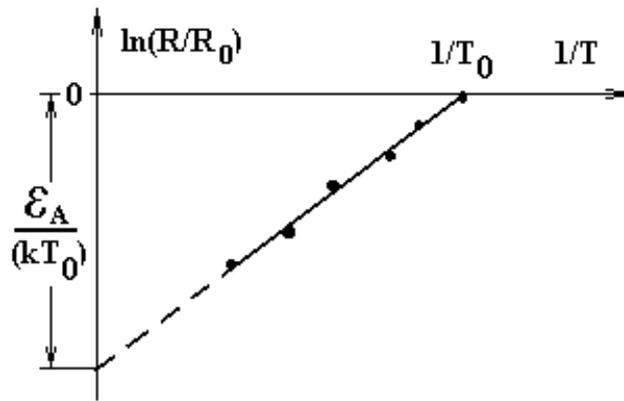


Рис.8

Зная величину  $\epsilon_A$ , можно вычислить ТКС полупроводника. Необходимую для этого формулу получим, подставив в (9) выражение (10) и результат его дифференцирования по переменной  $T$ :

$$\alpha = - \epsilon_A / (k T^2) \quad (13)$$

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 1. Содержание работы и исследуемые образцы

Экспериментальное задание включает:

- а) исследование зависимости сопротивления вольфрама и примесного полупроводника от температуры в интервале от комнатной до 650...700 К;
- б) определение температурного коэффициента сопротивления (ТКС) обоих материалов и энергии активации проводимости  $\epsilon_A$  полупроводника.

В качестве полупроводника используется терморезистор - простейший полупроводниковый прибор, сопротивление которого сильно зависит от температуры. Он представляет собой стержень, шайбу или шарик из полупроводникового материала, к которым подсоединены металлические электроды. Для изготовления терморезисторов обычно используют поликристаллические материалы из окислов некоторых металлов (марганца, кобальта и др.). Терморезисторы применяют для измерения и регулирования температуры и т.д. Используемые в данной работе терморезисторы представляют собой полупроводниковый шарик размером с маковое зерно, защищенный слоем стекла.

В качестве металлического образца взята вольфрамовая нить миниатюрной лампочки накаливания. Получаемая для вольфрама зависимость  $R$  от  $T$  характерна и для других чистых металлов. Для изучения некоторых методических вопросов используются вакуумированная и газонаполненные лампы.

### 2. Лабораторная установка и методика измерений

Электрическая схема установки показана на рис. 9. Установка включает в себя нагреватель с источником питания, термопару с электроизмерительным прибором для определения температуры внутри нагревателя, цифровой прибор для измерения сопротивления и изучаемые образцы.

Нагреватель представляет собой плотно намотанную нихромовую спираль длиной 8 см и диаметром 0,5 см, через которую пропускают регулируемый ток от источника питания ИПС-1 (его направление можно изменять от 0 до 15 В). В средней части спирали, где температура однородна, расположены один из спаев термопары и изучаемые образцы: полупроводниковый (терморезистор) и вольфрамовый (газонаполненная лампочка). Изменяя напря-

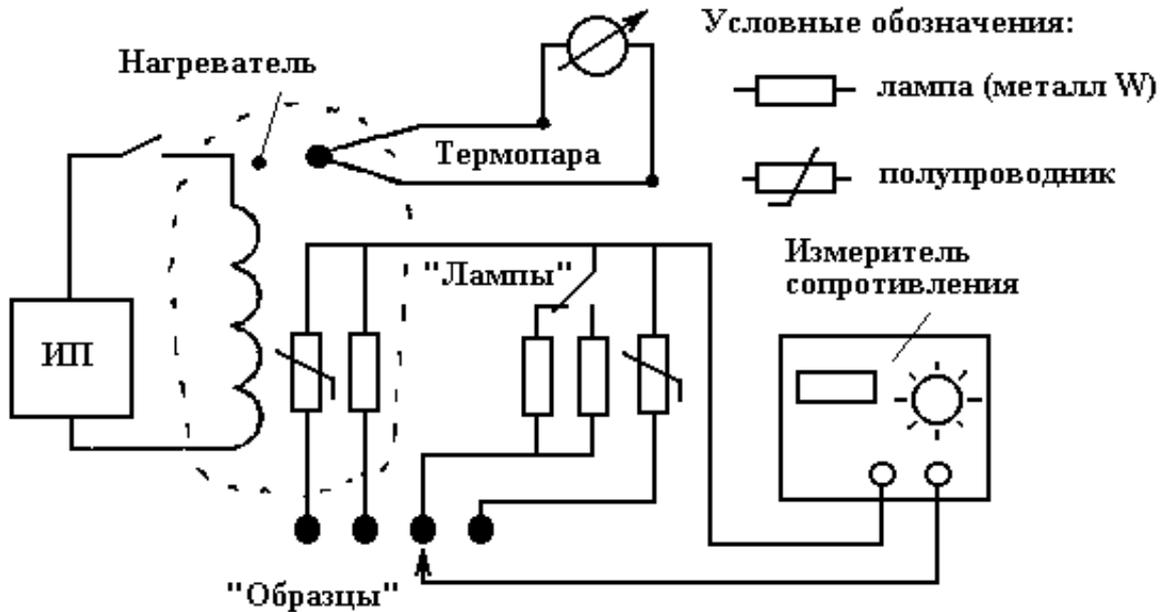


Рис.9

жение источника питания, температуру нагревателя можно изменять от комнатной, когда источник выключен, до примерно 650...700 К при напряжении 15 В.

Дополнительно три образца - терморезистор, и две лампы (газонаполненная и вакуумированная) расположены снаружи, на корпусе прибора и предназначены для некоторых методических и демонстрационных опытов. Каждый образец может быть подключен к прибору для измерения его сопротивления с помощью переключателя «Образцы» и тумблера «Лампы» (рис. 9, 10).

Измерение температуры. Термопара (термоэлемент) - это датчик температуры, принцип действия которого основан на явлении Зеебека: в цепи, состоящей из разнородных про-

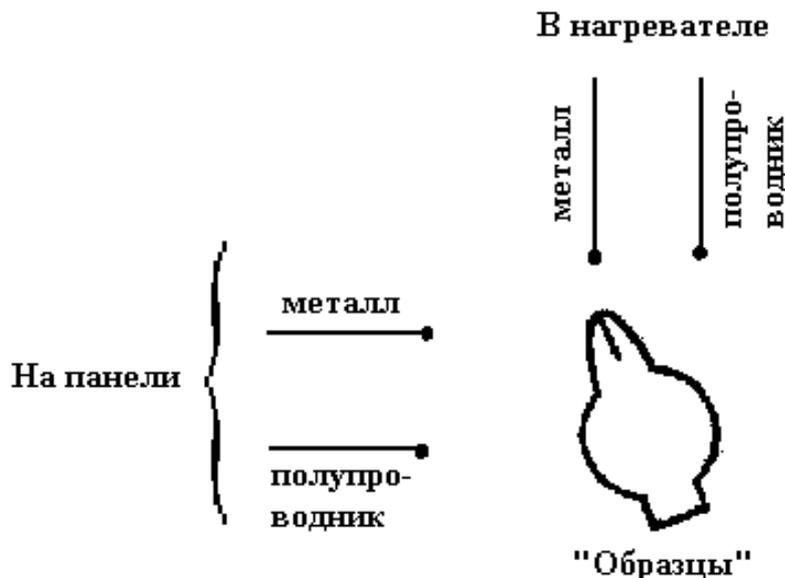


Рис. 10

водников, соединенных последовательно и имеющих различную температуру спаев, возникает небольшая ЭДС. При небольшой разности температур ЭДС пропорциональна ей. В нашем случае термопара изготовлена из хромеля и копеля (специальных сплавов) и медных подводящих проводов (см. рис. 9). Спай проводов из хромеля и копеля находится внутри на-

гревателя и имеет измеряемую температуру  $T$ . Спаи этих проводников с медной проволокой находятся вне нагревателя при комнатной температуре  $T_0 \approx 295$  К. ТермоЭДС, возрастающая с увеличением температуры  $T$  нагревателя, для удобства измеряется просто в числе делений  $N$  прибора. Пересчет от  $N$  к  $T$  производят по формулам, приведенным на установке.

Зависимость сопротивления от температуры снимают в следующем порядке. Устанавливают некоторое напряжение на спирали нагревателя (оно измеряется вольтметром источника питания) и через 3...5 минут, когда рост температуры станет медленным, можно произвести отсчеты сопротивления образцов и показания термометрического прибора. Затем напряжение увеличивают и цикл измерений повторяют при более высокой температуре и т.д. Измерение сопротивления. Сопротивление измеряют электронным прибором с цифровой индикацией. В приборе имеется источник стабильного тока, пропускаемого через измеряемое сопротивление. Прибор фактически измеряет напряжение на образце, зависящее от его сопротивления, и выдает на индикатор величину сопротивления. Проходящий через образец ток нагревает его, и в некоторых случаях, рассматриваемых ниже, этот нагрев может быть большим и недопустимо исказит результаты измерений.

В лабораторной работе мы используем прибор типа В7-27. Это универсальный прибор для измерения напряжения, силы тока и сопротивления. С помощью переключателя можно установить требуемый режим измерения, например измерение сопротивления, а также предел измерения. Сопротивление можно измерить на одном из шести пределов, указанных в табл. 1. На приборе используется международное обозначение ома - знак  $\Omega$ . В зависимости от предела измерений на индикаторе высвечивается величина сопротивления в омах, килоомах ( $1 \text{ кОм} = 10^3 \text{ Ом}$ ) и мегаомах ( $1 \text{ МОм} = 10^6 \text{ Ом}$ ). Следует обращать внимание только на десятичную приставку, никаких умножений результата не требуется. Пределы 10 Ом и 1 Ом, имеющиеся в приборе, не могут быть использованы в данной работе, так как для этого требуется специальное подключение образцов.

Как видно из табл. 1, на разных пределах измерения ток через образец различен, но максимальное напряжение на образце, равное 2 В, везде одинаково. Одно и то же сопротивление можно измерить на различных пределах, но с разным числом значащих цифр (четыре и меньше). В четвертом столбце таблицы даны результаты подобных измерений для сопротивления большого геометрического размера, которое хорошо рассеивает выделяющиеся в нем джоулево тепло и очень слабо нагревается. В пределах погрешности прибора, не меньшей, чем несколько единиц в младшем разряде, все результаты одинаковы. Естественно, что более точный результат содержится в первой строке.

Таблица 1

Предел на переключателе	Максимальные измеряемые значения сопротивления	Ток через образец $I$	Пределы измерения сопротивления		
			Массивный резистор	Лампа газонаполненная	Лампа вакуумированная
100 Ом	200,0 Ом	10 мА	168,7 Ом	29,3 Ом	50,4 Ом
1 кОм	2,000 кОм	1 мА	0,167 кОм	0,027 кОм	0,018 кОм
10 кОм	20,00 кОм	0,1 мА	0,15 кОм		
100 кОм	200,0 кОм	10 мкА			
1 МОм	2,000 МОм	1 мкА			
10 МОм	20,00 МОм	0,1 мкА			

Рассмотрим подробнее влияние нагрева измерительным током на результат измерения сопротивления миниатюрной лампочки. Во время измерения температура нити повышается на величину  $\Delta T = R I^2 / H$ , где  $I$  - ток,  $R$  - сопротивление,  $H$  - коэффициент рассеяния тепла лампой, Вт/К. который увеличивается с увеличением поверхности образца и улучшением условий теплообмена. Посмотрим в табл. 1 на результаты измерений для газонаполненной лампы. На двух пределах измерения они практически одинаковы, хотя ток отличается в 10 раз, а

модность джоулева тепла - в 100 раз. Поскольку при этом сопротивление не изменилось, значит большого нагрева не было, и полученные данные отражают сопротивление лампы при комнатной температуре.

Совершенно иная картина получается для вакуумированной лампы: при большем токе ее сопротивление увеличивается примерно в 3 раза, что является следствием большого нагрева. Для некоторых образцов вакуумированных ламп можно наблюдать даже свечение нити при измерении ее сопротивления, разумеется, что при таких измерениях говорить о температуре образца не представляется возможным. Рассмотренный пример показывает, как важно внимательно анализировать условия опыта для получения достоверных результатов.

Таким образом, чтобы убедиться в пригодности прибора для измерения сопротивления данного образца, необходимо сравнить результаты измерений на двух пределах, т.е. при различных токах. Если они одинаковы в пределах инструментальной погрешности, то прибор пригоден. Рассматриваемый эффект может возникнуть скорее для образцов с малым сопротивлением, чем большим; объясните эту закономерность.

### 3. Выполнение эксперимента

Из трех предлагаемых заданий первые два - ознакомительные, а последнее - основное.

Задание 1. Ознакомление с установкой и методикой измерения сопротивления.

1. Ознакомиться с установкой, органами управления и образцами (см. рис. 9...10 и надписи на установке).
2. Проверить, имеется ли заземление установки и цифрового вольтметра, без чего измерения больших сопротивлений могут быть неправильными. При отсутствии заземления установку не включать и обратиться к учебному мастеру.
3. Убедиться, что источник питания и тумблер «Нагрев» выключены. Проверить, подключены ли подводящие провода к гнездам «U--R» и «O» вольтметра. Включить сетевое питание вольтметра, при этом должно появиться свечение индикатора.
4. Сопротивление полупроводника при комнатной температуре равно примерно 1 МОм, а лампочек - несколько десятков Ом, причем у различных экземпляров - различное. Изучить влияние тока прибора на результат измерения сопротивления. Для этого измерить сопротивление ламп на пределах 100 Ом и 1 кОм, а полупроводника - на пределах 1 МОм и 10 кОм. Результаты записать в табл. 2.

Таблица 2

Образцы	Сопротивление на пределах			
	100 Ом	1 кОм	1 МОм	10 МОм
<u>Внутри нагревателя:</u>				
1. Лампа газонаполненная			-	-
2. Полупроводник	-	-		
<u>Вне нагревателя:</u>				
3. Полупроводник	-	-		
4. Лампа газонаполненная			-	-
5. Лампа вакуумированная			-	-

5. Сделать вывод, для каких образцов пригоден прибор для измерения сопротивления.

Задание 2. Проведение демонстрационного опыта.

Первая часть опыта - определение знака и порядка величины ТКС полупроводника и метал-

ла; вторая часть – обнаружение терморезистором теплового излучения руки с расстояния в несколько см. Для опыта используют газонаполненную лампу и полупроводник, находящиеся вне нагревателя. Сопротивления измерять на пределах 100 Ом и 1 МОм для лампы и полупроводника соответственно. Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) можно определить из следующего опыта: если прикоснуться слегка пальцем к образцу, то его температура возрастет примерно до 36° С, т.е. примерно на 10° выше комнатной. Из результатов опыта по формуле (9) вычислить ТКС. Результаты записать в табл. 3.

Таблица 3.

Условия измерений	Сопротивление	
	терморезистора	лампы
Комнатная температура Прикосновение пальца Излучение руки		
	ТКС = ...	ТКС = ...

**Задание 3.** Исследование температурной зависимости сопротивления вольфрама и полупроводника в интервале от 295 до 650...700 К.

1. Измерить сопротивление образцов внутри нагревателя, не включая тока, при комнатной температуре  $T_0 \approx 295$  К; при этом прибор термопары должен показывать отсутствие термоЭДС. Сопротивление металла измерять (здесь и далее) на пределе 100 Ом, сопротивление холодного терморезистора - на пределе 1 МОм. Результаты измерений записать в первую строку табл. 4.

**ВНИМАНИЕ!** В ходе выполнения опыта сопротивление полупроводника уменьшится в тысячи раз, поэтому для сохранения точности измерения сопротивления по мере его уменьшения переключайте прибор на более низкие пределы.

Если сопротивление больше, чем можно измерить на данном пределе, на табло высвечивается сигнал переполнения - мигающая буква П.

Таблица 4

Результаты измерений			Обработка данных		
N, дел	Сопротивление R.		T, К	1/ T, К <sup>-1</sup>	Для полупроводника $\ln(R/R_0)$
	полупроводника	вольфрама			
	R=R <sub>0</sub> =		T <sub>0</sub> =295	3,39·10 <sup>-3</sup>	$\ln 1 = 0$

2. Включить источник питания и по его вольтметру установить напряжение 3 В, включить тумблер «Нагрев». После этого сопротивление полупроводника должно быстро уменьшаться. После включения (или измерения тока) необходимо подождать примерно 5 мин, чтобы тепловой режим стал близкий к стационарному, после чего быстро произвести измерения сопротивления и напряжения термопары в числе делений N шкалы прибора. Результаты записать в табл. 4.

3. Увеличивая напряжение с шагом 3 В (до максимального 15 В), продолжайте измерения, как описано выше.

4. По окончании измерений выключить установку.

#### 4. Обработка и анализ результатов измерений

1. По результатам измерений построить два графика: для вольфрама - зависимость R от T, для полупроводника - зависимость  $\ln(R/R_0)$  от 1/T.
2. Определить ТКС вольфрама при  $T = 300$  К и  $T = 600$  К, используя формулу (9) (см. пояснения в разд. «Температурный коэффициент сопротивления»). Результаты анализа записать в табл. 5.

Таблица 5

Материал	Энергия активации проводимости $\epsilon_A$		ТКС	
	Дж	эВ	При 300 К	При 600 К
Полупроводник Вольфрам				

3. Для полупроводника через экспериментальные точки провести наилучшую «на глаз» прямую линию. Сделать вывод, согласуются ли результаты опыта с экспоненциальной зависимостью (2). По методике, описанной в разд. 4 «Теоретической части», определить  $\epsilon_A$  в Дж и эВ ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ). По формуле (13) вычислить ТКС полупроводника при двух температурах. Результаты записать в табл. 5.

Отчет должен содержать конспект теоретической части, схему установки (рис. 9), экспериментальные данные - табл. 2...5 и два графика.

#### Контрольные вопросы

1. Какие основные электрические свойства полупроводников и металлов вы знаете?
2. Что такое удельная электропроводность и от чего она зависит?
3. В чем состоит физический смысл подвижности носителей заряда? Что и как на нее влияет?
4. Как объяснить с помощью зонных диаграмм проводимость различных классов твердых тел?
5. В чем особенности зонных диаграмм примесных полупроводников? Как объяснить влияние примеси на проводимость?
6. Как объяснить температурную зависимость проводимости полупроводников и металлов?

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3-х т. М.: Наука, 1987. Т.3. 320 с.
2. Левинштейн. М. Е, Симин Г. С. Знакомство с полупроводниками. М.: Наука, 1984. 240 с.