

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана
И. Н. Фетисов
ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ
СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Методические указания к лабораторной работе Ф-5А по курсу общей физики
Под редакцией Л.К.Мартинсона
МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2010

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 $j = I/S$, А/м², и напряженностью поля E , В/м, выражается законом Ома в дифференциальной форме

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

Коэффициент пропорциональности σ , Ом⁻¹ м⁻¹, называется удельной электропроводностью вещества. Обратная величина $\rho = 1/\sigma$ есть удельное сопротивление.

Отметим некоторые электрические свойства твердых тел.

1. Для различных веществ ρ изменяется в огромных пределах: хороший проводник в 10^{25} 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^{-5} % 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

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\mathcal{E}_A/(kT)) \quad (2)$$

Здесь \mathcal{E}_A - энергия активации проводимости, k - постоянная Больцмана, σ_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 ϵ_A . При повышении температуры тепловое движение начинает разрывать связи электронов, и часть их, пропорциональная $\exp(-\epsilon_A/kT)$ становится свободными носителями 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

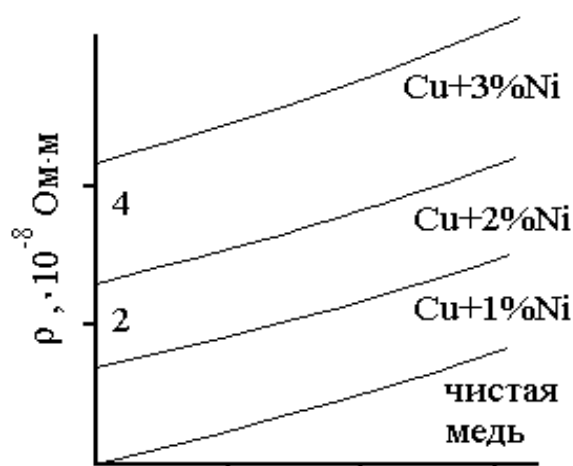


Рис.1

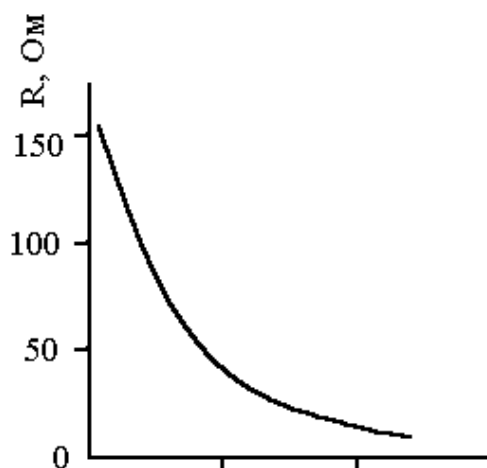


Рис.2

сти от внешних воздействий.

8. Электропроводность полупроводников сильно зависит от содержания примесей и дефектов в кристаллах, поскольку во многих случаях энергия ϵ_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 электрическое 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, на-

зываемой скоростью дрейфа v_{dp} .

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

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

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.

$$v_{dp} = \mu_n E \quad (4)$$

Коэффициент пропорциональности μ_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 $j = \sigma E$ 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 μ_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.

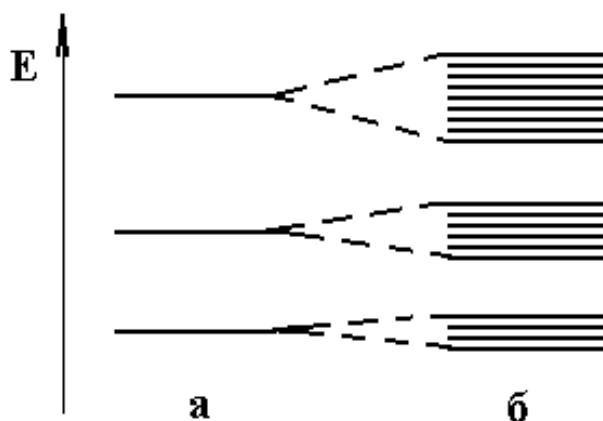


Рис.3

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 - $E_{\text{п}}$, 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 перемещение 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 σ_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.

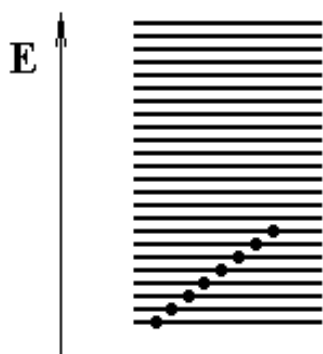


Рис.5

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).

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 создают 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 электрон из валентной зоны, создавая в последней дырку. Такие уровни и примеси называются акцепторными (в кремнии - трехвалентные атомы). Они создают только дырки, и проводи-

мость становится преимущественно дырочной (р-типа). Для перехода электрона с верхнего уровня валентной зоны на акцепторный уровень ему необходимо сообщить небольшую энергию $E_{и.а.}$

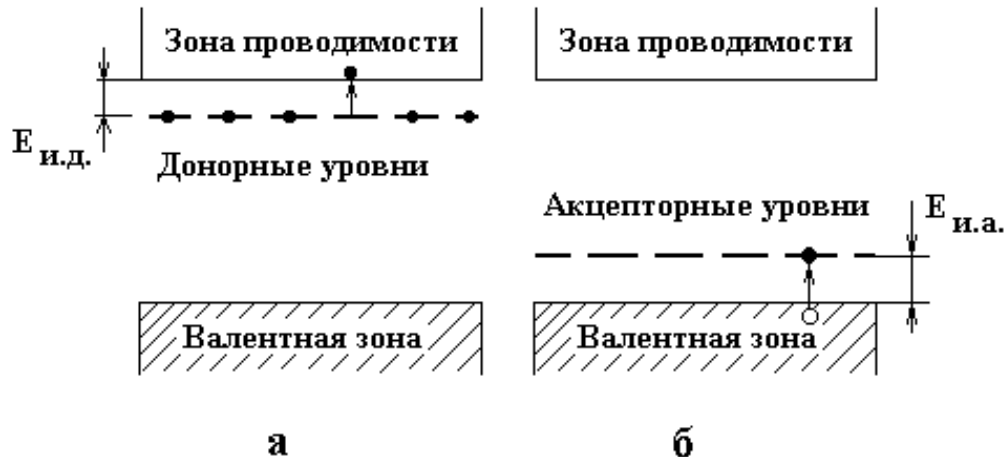


Рис.6

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 , ΔR – приращение сопротивления при небольшом приращении температуры ΔT .

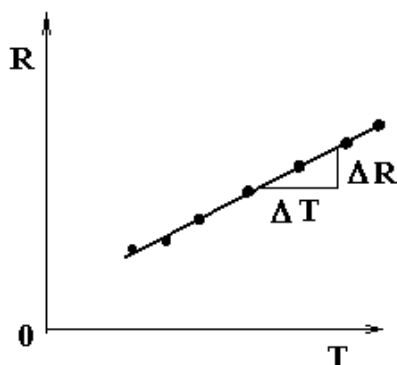


Рис.7

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 α можно вычислить по формуле (9), предварительно определив отношение $\Delta R/\Delta T$ из графика, как показано на рис. 7 (можно взять $\Delta T = 50 \dots 100$ K).

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 σ от T описывается формулой (2), тогда

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

При комнатной температуре T_0 сопротивление соответственно равно

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

Разделив почленно два последних соотношения и прологарифмировав, получим

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

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 экспери-

ментальные точки, отсекает от оси ординат отрезок, равный $E_A / (kT)$. как следует из (11) при $1/T = 0$:

$$|\ln(R/R_0)| = \mathcal{E}_A / (k T_0) \quad (12)$$

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

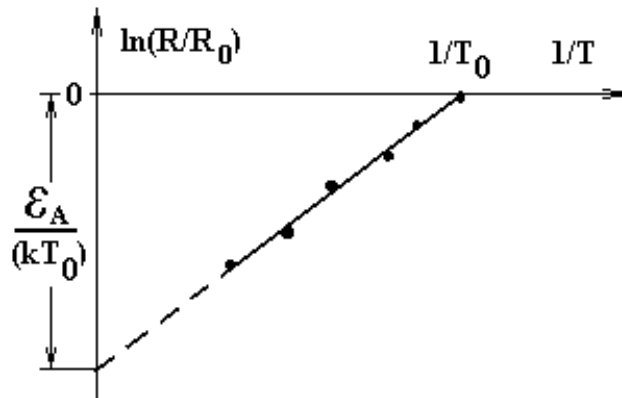


Рис.8

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

$$\alpha = - \mathcal{E}_A / (k T^2) \quad (13)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. Содержание работы и исследуемые образцы

В экспериментальной части работы:

* изучить зависимость сопротивления вольфрама и полупроводника от температуры в интервале от комнатной до примерно $350...400^0$ С;

* определить температурные коэффициенты сопротивления (ТКС) обоих материалов и энергию \mathcal{E}_A активации проводимости полупроводника (см. (2)).

Полупроводниковым образцом служит *терморезистор*. Он представляет собой крупинку из поликристаллического примесного полупроводника, к которой присоединены металлические проводники; полупроводник защищен тонким слоем стекла. Сопротивление терморезисторов сильно зависит от температуры. Поэтому терморезисторы часто применяют в качестве электрического термометра.

Металлическим образцом служит вольфрамовая нить сверхминиатюрной лампы накаливания. Получаемая для вольфрама зависимость R от T характерна и для других чистых металлов.

Оба образца, а также нагреватель и термопара, имеют очень малую тепловую инерцию – они быстро нагреваются и охлаждаются.

2. Ознакомиться с установкой

Установка (рис. 9) содержит:

- нагревательную спираль 2, внутри которой находятся исследуемые образцы и электрический датчик температуры (термопара);
- прибор 4 для измерения сопротивления образцов (омметр);
- прибор 6 (вольтметр РВ7–22А) для измерения напряжения термопары;
- источник питания нагревателя (1);
- терморезистор и лампа для демонстрации внешнего вида (5);

- тумблер 3 «ПОЛУПРОВОДНИК/ВОЛЬФРАМ» для подключения к измерительному прибору полупроводника или вольфрама.

Через нагревательную спираль пропускают ток от источника напряжения, которое можно изменять от 0 до 15 В и измерять встроенным вольтметром. В зависимости от напряжения

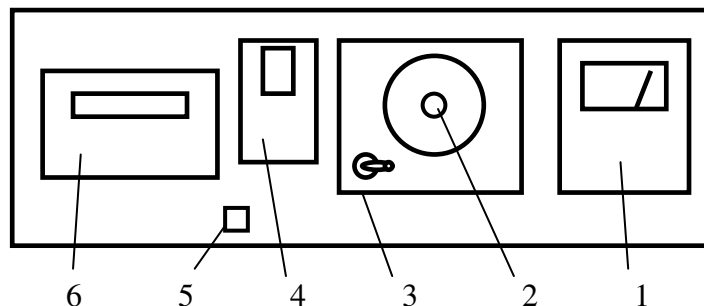


Рис. 9

устанавливается различная температура внутри спирали. Во избежание ожогов нагреватель закрыт колпаком с прорезями для вентиляции.

Термопара состоит из двух различных проводников, сваренных между собой. Для изготовления термопары используют специальные сплавы, в данной установке - хромель и конпель. Сваренные концы находятся внутри нагревательной спирали и имеют измеряемую температуру T , а свободные концы присоединены к вольтметру и находятся при комнатной температуре T_0 .

Принцип действия термопары основан на явлении Зеебека: в цепи, состоящей из разнородных проводников, соединенных последовательно и имеющих различные температуры спаев, возникает небольшая термоЭДС U , зависящая от разности температур спаев $T - T_0$ и материалов проводников. Измерив напряжение термопары, вычисляют температуру нагретых образцов по формулам (см. таблицу 1).

Таблица 1

Температура образцов T в кельвинах, напряжение термопары U в вольтах

$T = 295 + 14285 U$	$U \leq 0,007$
$T = 395 + 13125 U$	$U = 0,007 - 0,015$
$T = 500 + 11706 U$	$U \geq 0,015$

Сопротивление измеряют универсальным электронным прибором (тестером) с цифровой индикацией. Прибор имеет поворотный переключатель, с помощью которого прибор устанавливают в режим измерения одной из следующих величин: напряжения (на переключателе сектор «V»), силы тока (сектор «A»), емкости (сектор «C_x»), сопротивления (сектор «Ω», этой буквой обозначают Ом).

Для измерения сопротивления переключатель должен находиться в секторе «Ω». Прибором можно измерять как малые, так и очень большие сопротивления. Поэтому сектор «Ω» разделен на несколько пределов измеряемой величины (см. табл. 2).

Таблица 2

Пределы измерения омметра

Положение переключателя	Предел измерения	Результат измерения на индикаторе в единицах
200	200 Ом	Ом
2к	2 кОм	Килоом, 1 кОм = 10^3 Ом
20к	20 кОм	-----“-----
200к	200 кОм	-----“-----
2М	2 МОм	Мегаом, 1 МОм = 10^6 Ом
20М	20 МОм	-----“-----

Сопротивление вольфрама, составляющее десятки Ом, следует измерять на пределе «200».

Сопротивление полупроводника при нагревании будет уменьшаться примерно от 1,5 МОм при комнатной температуре до сотен Ом – при высокой температуре. Поэтому начинать измерения необходимо на пределе «2 М» и, по мере уменьшения сопротивления, переходить на более низкие пределы, чтобы сохранить точность измерений.

Общее правило при работе с цифровым прибором: предел измерения должен быть таким, чтобы на индикаторе было максимальное количество *значащих* цифр.

При измерении сопротивления через образец проходит небольшой ток, который нагревает образец. Поэтому его температура выше температуры внутри нагревателя, измеряемой термометром. Однако в условиях данной работы этот эффект незначительный.

3. Выполнение работы

Внимание! Не включать нагреватель, т.к. сначала необходимо выполнить измерения при комнатной температуре.

1. Ознакомиться с рабочими образцами терморезистора и вольфрамовой лампочки, имеющимися на установке.
2. Проверить правильность подключения термопары к вольтметру РВ7–22А (к гнездам «*» и «0-2 V»).
3. Установить режим работы вольтметра: должны быть нажаты кнопки «0,2 » и “ - ”.
4. Включить «СЕТЬ» вольтметра.
5. Сопротивление измеряют, повышая температуру. Начальная температура должна быть комнатной (примерно $T_0 = 295$ К). При этом напряжение термопары не должно превышать нескольких единиц младшего разряда вольтметра.
6. Подготовить табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерения температуры и сопротивления

U , вольты	Сопротивление R вольфрама полупроводника	T , К	$1/T$, K^{-1}	$\ln(R/R_0)$ для полупроводника
~ 0	$R = R_0 = \dots$	295	$3,39 \cdot 10^{-3}$	$\ln 1 = 0$

Примечания: 1) в табл. 6 строк для записи результатов; 2) U – напряжение термопары, измеренное прибором 6 (не путать с напряжением источника питания).

7. Измерить сопротивление вольфрама при комнатной температуре. Для этого переключатель «ВОЛЬФРАМ/ПОЛУПРОВОДНИК» установить в положение «ВОЛЬФРАМ». Переключатель омметра установить на предел «200» в секторе « Ω ». Измерить сопротивление вольфрама, результат измерения записать в первую строку таблицы 3.

Для включения питания омметра нажать и удерживать кнопку, расположенную рядом с омметром.

Примечание: сопротивление вольфрама измерять на пределе «200» и при нагревании.

8. Измерить сопротивление полупроводника при комнатной температуре. Переключатель «ВОЛЬФРАМ/ПОЛУПРОВОДНИК» установить в положение «ПОЛУПРОВОДНИК». Переключатель омметра установить на предел «2М». Нажать кнопку питания омметра и измерить сопротивление полупроводника в мегаомах (МОм). Результат измерения R_0 записать в первую строку таблицы 3.

ВНИМАНИЕ! В ходе выполнения опыта сопротивление полупроводника уменьшится в тысячи раз, поэтому для сохранения точности измерений переключайте омметр на более низкие пределы.

Если на индикаторе омметра появляется знак «1.» , то измеряемая величина превышает данный предел измерения; в этом случае необходимо перейти на более высокий предел.

9. Включить нагреватель. Для этого нажать кнопку «СЕТЬ» на источнике питания. Напряжение источника регулируют ручками «ГРУБО» и «ТОЧНО» и измеряют встроенным вольтметром.

10. Установить напряжение 3 В. Подождать примерно 5 мин, чтобы тепловой режим стал близким к стационарному, после чего измерить напряжение термопары и сопротивления образцов. Результаты записать в табл. 3.

11. Повторить измерения п. 10, увеличивая напряжение с шагом 3 В до максимального 15 В, которому соответствует максимальная температура.

12. **ВНИМАНИЕ!** По окончании измерений выключить «СЕТЬ» источника питания нагревателя для полного охлаждения установки.

4. Обработка и анализ результатов измерений

1. По результатам измерения напряжения термопары вычислить по табл. 1 температуру T , К и обратную температуру $1/T$, K^{-1} . Результаты записать в табл. 3.

2. Для полупроводника вычислить $\ln(R/R_0)$, где R и R_0 – сопротивления при температуре T и при комнатной температуре T_0 , соответственно ($T_0 = 295$ К). Результаты записать в табл. 3.

3. По результатам измерений для вольфрама построить на миллиметровой бумаге графическую зависимость R от T (см. рис. 7).

4. Используя построенный график, определить для вольфрама температурный коэффициент сопротивления α (см. (9)) при $T = 300$ К и $T = 600$ К. При расчете рекомендуем взять $\Delta T = 50 \dots 100$ К. Результаты записать в табл. 4.

Таблица 4

ТКС и энергия активации проводимости

Материал	Энергия активации ϵ_A		ТКС α , K^{-1}	
	Дж	эВ	при 300 К	при 600 К
Полупроводник				
Вольфрам	_____	_____		

5. Для полупроводника по результатам измерений построить графическую зависимость $\ln(R/R_0)$ от $1/T$ (см. рис. 8). Нанести на график экспериментальные точки и провести через них наилучшую на глаз прямую. Продолжить прямую до пересечения с осью ординат.

6. Сделать вывод, согласуется ли полученная в опыте зависимость R от T для полупроводника с теоретической формулой (11) ?

7. Определить энергию активации проводимости ϵ_A .

Прямая на полученном графике (см. пояснение на рис. 8) пересекает ось ординат в точке, для которой (см.(12)) модуль логарифма равен

$$\ln(R/R_0) = \epsilon_A / (k T_0),$$

где k постоянная Больцмана ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К)

Вычислить ϵ_A по формуле (12). Результат вычисления ϵ_A , в Дж и в эВ, представить в табл. 4. (Примечание: $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж).

8. Для полупроводника температурный коэффициент сопротивления (ТКС) α вычислить по формуле (13), используя полученное значение ϵ_A , Дж. Результаты расчета для температур 300 К и 600 К представить в табл. 4.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные электрические свойства полупроводников и металлов.
2. Что такое удельная электропроводность и от чего она зависит для металлов и полупроводников?
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. Почему при нагревании сопротивление металлов растет, а полупроводников - уменьшается?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Винтайкин Б.Е. Физика твердого тела. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 360 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. В 3-х т. М.: Наука, 1987. Т.3. 320 с.
3. Иродов И.Е. Физика макросистем. – М.: БИНОМ. 2004 – 207 с.
4. Левинштейн. М. Е, Симин Г. С. Знакомство с полупроводниками. М.: Наука, 1984. 240 с.