

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

И. Н. Фетисов

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

*Методические указания к выполнению лабораторной работе Ф-61 по курсу
общей физики*

Под редакцией *Л.К.Мартинсона*

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008

Цель работы – ознакомление с электрическими свойствами твердых тел и зонной теорией; исследование температурной зависимости сопротивления металла и полупроводника; определение температурного коэффициента сопротивления вольфрама и полупроводника, а также энергии активации проводимости полупроводника.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Электропроводность твердых тел

Электрическим током называют направленное движение электрических зарядов. Сила тока $I = \Delta q / \Delta t$, А = Кл/с, где Δq – заряд, проходящий через сечение проводника S за время Δt . Плотность тока $j = I / S$, А/м². Способность тела пропускать электрический ток под воздействием электрического поля называется электропроводностью (проводимостью). Зависимость между плотностью тока 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, а обратная величина $\rho = 1/\sigma$ есть удельное сопротивление.

Отметим некоторые электрические свойства твердых тел.

1. Для различных веществ ρ изменяется в 10^{25} раз.
2. В порядке возрастания удельного сопротивления все вещества разделены на три класса: проводники (металлы), полупроводники и диэлектрики (изоляторы).
3. Электропроводность кристаллов может сильно зависеть от вида кристаллической решетки. Например,

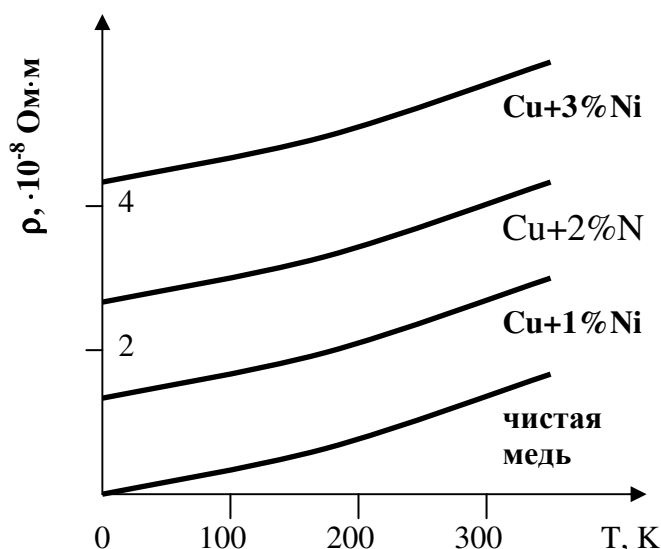


Рис. 1. Температурная зависимость удельного сопротивления меди и сплавов меди с никелем

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 (см. 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 охлаждении сопро-

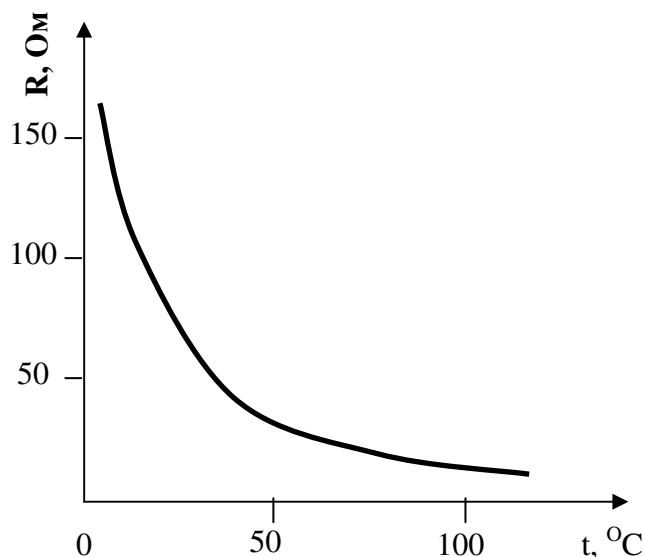


Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления полупроводника

тивление металлов и сплавов уменьшается, причем у чистых металлов оно может стать весьма малым (см. рис. 1).

Для полупроводников, наоборот, сопротивление при охлаждении быстро возрастает (см. рис. 2).

6. Для полупроводников в широком интервале абсолютных температур T изменение электропроводности при изменении температуры происходит, как правило, по экспоненциальному закону

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

Здесь ϵ_A - энергия активации проводимости, k - постоянная Больцмана

на, 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. Для стержня длиной l и сечением S сопротивление

$$R = \rho l / S = l / (\sigma S).$$

Для полупроводника (см. (2)) получаем типичную зависимость сопротивления от температуры

$$R = ((l / (\sigma_0 S)) \exp(\epsilon_A / (kT)) \quad (3)$$

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

9. Сильная зависимость электропроводности полупроводников от содержания примесей и дефектов в кристаллах объясняется тем, что во многих случаях энергия ϵ_A для электронов, локализованных вблизи примесей или дефектов, меньше, чем в идеальном кристалле данного полупроводника.

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

11. Возможность в широких пределах управлять проводимостью полупроводников при помощи изменения температуры, освещения, введения примесей и т.д. является основой их многочисленных и разнообразных применений.

12. 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 переноса заряда (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, 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 $v_{др}$

$$\vec{j} = -en\vec{v}_{др} \quad (4)$$

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

$$v_{др} = \mu_n E \quad (5)$$

Коэффициент пропорциональности μ_n , $\text{м}^2/(\text{с В})$, называется *подвижностью* электронов. Его численное значение, равное скорости дрейфа в поле единичной напряженности, зависит от материала и температуры. Подставив (5) в (4), получим закон Ома $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ и выражение для удельной электропроводности металла

$$\sigma = e n \mu_n \quad (6)$$

Таким образом, проводимость металла 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. Дырка - место в кристаллической решетке, из которого удален электрон. Когда это место занимает один из ближайших электронов, дырка исчезает в этом месте, но появляется в другом, соседнем месте. Такое движение многих электронов, отличающееся от движения свободных электронов, удобно описывать с помощью движения дырки, которая движется в направлении, противоположном движению электронов.

В отличие от проводимости металла (6), проводимость полупроводника равна сумме двух типов проводимости - электронной (n -типа) и дырочной (p -типа):

$$\sigma = e (n \mu_n + p \mu_p) \quad (7)$$

где p – концентрация и μ_p - подвижность дырок.

В кристалле движение электрона, имеющего волновые свойства (волны де Бройля), не подчиняется законам классической физики. В идеальном кристалле, где отсутствуют дефекты и примеси, а сами атомы слабо колеблются, что имеет место при низкой температуре, распространение волны де Бройля происходит со слабым рассеянием. Как следствие, электроны имеют большой пробег между столкновениями с атомами и большую подвижность. Примеси, дефекты кристалла, колебания решетки и другие факторы, нарушающие периодичность внутреннего электрического поля, увеличивают рассеяние волн и уменьшают подвижность. Поэтому сопротивление металлов при нагревании возрастает, а сопротивление сплавов – больше, чем чистых металлов (см. рис. 1).

Большая проводимость металлов при различной температуре объясняется большой концентрацией электронов проводимости, сравнимой с концентрацией атомов, и не зависящей от температуры.

В отличие от металлов, в полупроводниках концентрация носителей при нагревании быстро увеличивается, приводя к сильному росту проводимости. При этом небольшое уменьшение подвижности, приводя к обратному эффекту, не может помешать росту проводимости при нагревании.

3. Зонные диаграммы.

В отдельном атоме энергия электронов E может принимать только ряд дискретных значений, в связи с чем говорят о существовании ряда разрешенных энергетических уровней, которые на диаграммах изображают горизонтальными

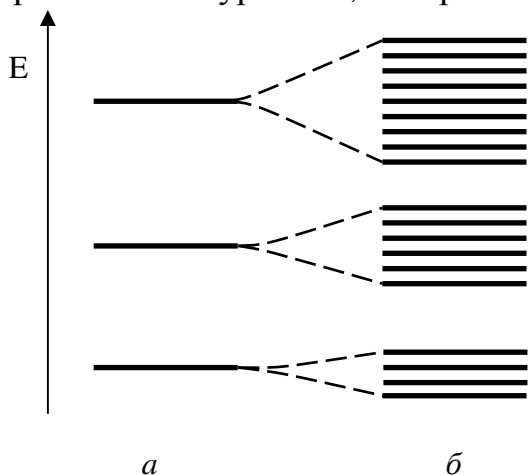


Рис. 3. Энергетические уровни электронов в изолированном атоме (а) и в кристалле (б)

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, образующих энергетические зоны (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.

Собственная проводимость полупроводников. У беспримесных полупроводников и диэлектриков при $T = 0$ имеется высшая, целиком заполненная зона, называемая *валентной*, а следующая за ней зона, пустая, называется *зоной прово-*

димости (рис. 4, а). Они разделены энергетическим зазором ширины E_g , называемым *запрещенной зоной*.

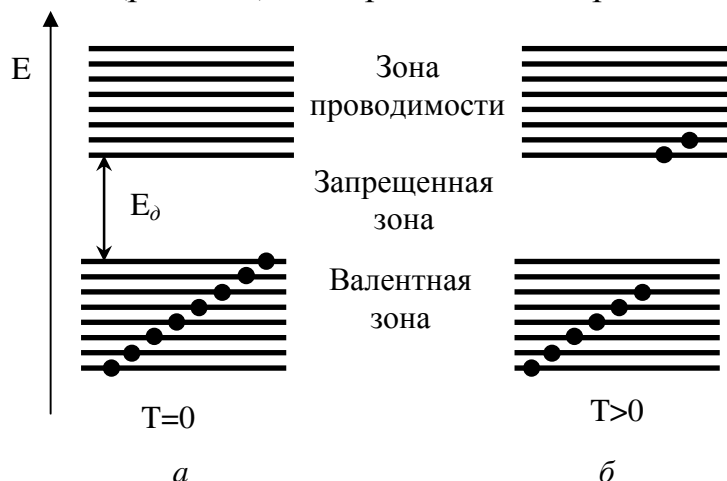


Рис. 4. Энергетические зоны полупроводника:

а – при очень низкой температуре; б – при комнатной температуре; точками отмечены уровни, занятые электроном

ским. 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.

При нагревании полупроводника тепловые колебания кристаллической решетки сообщают некоторой части электронов энергию, достаточную для их перехода из валентной зоны в зону проводимости (рис. 4, б). 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

$$n = p = A T^{3/2} \exp(-E_g / (2kT)) \quad (8)$$

где A – постоянная (например, для кремния $A = 4 \cdot 10^{22} \text{ К}^{-3/2} \text{ м}^{-3}$). Подставляя (8) в (7), получаем

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_g / (2kT)) \quad (9)$$

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 об-

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 валентной зоны заполнены, то движение может быть только хаотиче-

разом, мы приходим к формуле (2), если принять для беспримесных полупроводников энергию активации, равной половине ширины запрещенной зоны

$$\epsilon_A = E_g / 2.$$

Электроны могут быть переведены из валентной зоны в зону проводимости под действием света частоты ν , если энергия фотонов превышает ширину запрещенной зоны: $h\nu > E_g$, где h – постоянная Планка. 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_g . К полупроводникам обычно

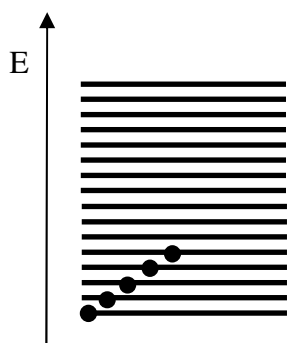


Рис. 5. Зонная диаграмма металла

относят вещества, для которых $E_g < 2...3$ эВ; тогда для диэлектриков $E_g \geq 2...3$ эВ. Для диэлектриков показатель экспоненты в формуле (9) – большое число, поэтому проводимость мала не только при низких 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. У металлов большая концентрация электронов проводимости при лю-

бой температуре.

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

Примесная проводимость полупроводников. Примеси, а также дефекты в структуре кристалла, существенно изменяют проводимость полупроводников. Введение атомов других веществ приводит к появлению дополнительных энерге-

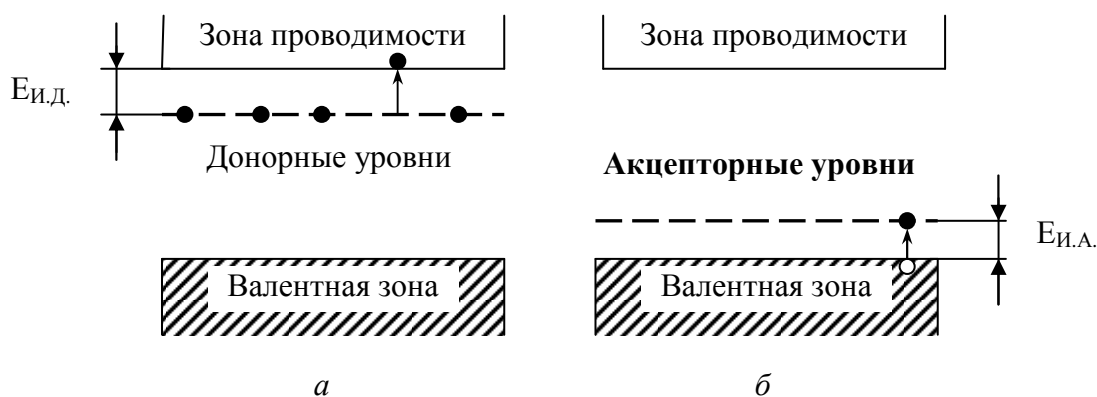


Рис. 6. Зонные диаграммы примесных полупроводников: *а* – с донорными атомами, тип проводимости – электронный; *б* – с акцепторными атомами, тип проводимости – дырочный

тических уровней, которые могут располагаться внутри запрещенной зоны ос-

новного полупроводника (рис. 6).

Если такой примесный уровень располагается вблизи зоны проводимости (см. рис. 6, *а*) и занят электроном при низкой температуре, то для перехода этого электрона в зону проводимости требуется небольшая энергия; ее называют энергией ионизации донора $E_{ид}$.

Такие примеси и создаваемые ими уровни называются *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 располагается вблизи дна запрещенной зоны (см. рис. 6, *б*) и свободен при низкой температуре, 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 проводимость становится преимущественно дырочной (*p*-типа). Для перехода электрона с верхнего уровня валентной зоны на акцепторный уровень ему необходимо сообщить небольшую энергию, называемую энергией ионизации акцептора $E_{иа}$.

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 340^0 C ;
- определить температурные коэффициенты сопротивления (ТКС) обоих материалов и энергию ϵ_A активации проводимости полупроводника.

Полупроводниковым образцом служит *терморезистор* – полупроводниковое изделие, сопротивление которого сильно зависит от температуры. Поэтому терморезистор часто применяют в качестве электрического термометра. В установке используют терморезистор в виде крупинки из поликристаллического примесного полупроводника, к которому присоединены металлические проводники; полупроводник защищен тонким слоем стекла. Такой терморезистор имеет очень малую тепловую инерцию – он быстро нагревается и охлаждается.

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

2. Лабораторная установка

Установка (рис. 7) содержит:

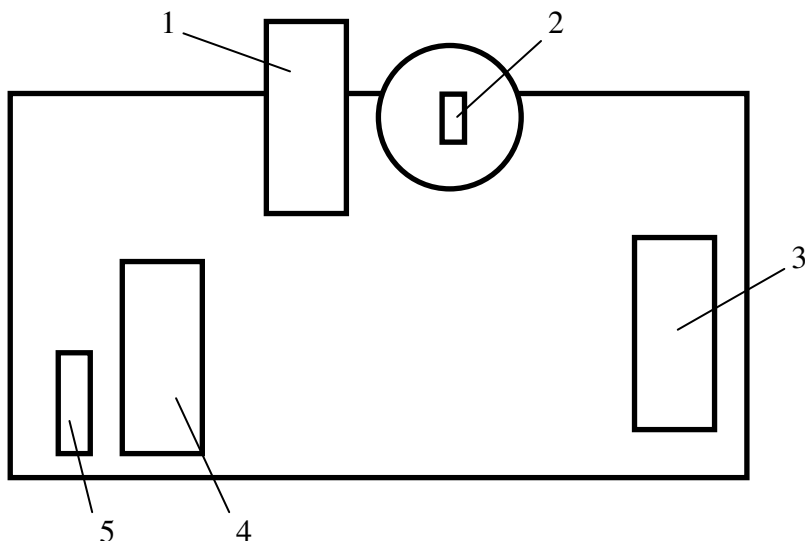


Рис. 7. Лабораторная установка: 1- показывающий прибор электрического термометра; 2 – нагреватель, внутри которого находятся изучаемые образцы и термопара; 3 – источник питания нагревателя; 4 – прибор для измерения сопротивления; 5 – пульт с кнопкой включения питания измерительных приборов и тумблером переключения образцов (вольфрам / полупроводник)

- нагреватель 2, внутри которого находятся исследуемые образцы и электрический датчик температуры (термопара);
- прибор 1, показывающий значение температуры образцов в градусах Цельсия;
- прибор 4 для измерения сопротивления;
- источник питания 3 нагревателя;
- пульт 5 с кнопкой включения питания измерительных приборов и переключателем “вольфрам/полупроводник”.

Нагревателем служит нихромовая спираль длиной несколько сантиметров. Через спираль пропускают ток от источника напряжения, которое можно изменять от 0 до 15 В и измерять встроенным вольтметром. В зависимости от напряжения устанавливается различная температура внутри спирали. Во избежание ожогов нагреватель закрыт стеклом.

Термопара состоит из двух различных проводников, сваренных между собой. Часто для изготовления термопары используют специальные сплавы, например хромель и конпель. Сваренные концы находятся внутри нагревательной спирали и имеют измеряемую температуру t , а свободные концы присоединены к вольтметру в измерительном приборе 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, зависящая от разности температур спаев $t - t_0$ и материалов проводников. В измерительном приборе имеется электрический термометр для измерения комнатной температуры t_0 . С учетом t_0 индикатор прибора показывает температуру нагревателя t в градусах Цельсия.

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. 1).

Таблица 1

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 10² 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 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.

В пульте управления расположены: два гальванических элемента по 9 В для питания измерительных приборов и кнопка включения питания; переключатель “Вольфрам /Полупроводник” для подключения к омметру либо вольфрама, либо полупроводника.

3. Выполнение работы

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

1. Подготовить табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерения температуры и сопротивления

$t, ^\circ\text{C}$	Сопротивление R		T, K	$1/T, \text{K}^{-1}$	$\ln(R/R_0)$
	вольфрама	полупроводника			

Примечание: в табл. 6 строк для записи результатов.

2. Измерить сопротивление вольфрама и полупроводника при комнатной температуре.

Переключатель “Вольфрам/Полупроводник” установить в положение “Вольфрам”. Переключатель омметра установить на предел “200” в секторе Ω . Нажать кнопку на пульте и измерить температуру t и сопротивление R в омах. Результаты записать в табл. 2. *Примечание:* сопротивление вольфрама измерять на пределе “200” и при нагреве.

Переключатель “Вольфрам/Полупроводник” установить в положение “Полупроводник”. Переключатель омметра установить на предел “2М”. Нажать кнопку на пульте и измерить сопротивление R полупроводника в мегаомах (МОм). Результаты записать в табл. 2.

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

Если на индикаторе появляется “1.”, то измеряемая величина превышает данный предел измерения; в этом случае необходимо перейти на более высокий предел.

3. Включить сеть источника питания нагревателя, для этого нажать кнопку “Сеть” на источнике питания.

4. Напряжение источника регулируйте ручками “Грубо” и “Точно” и измеряйте встроенным вольтметром. Установить напряжение 3 В. Подождать примерно 5 мин, чтобы тепловой режим стал близким к стационарному, после чего быстро измерить температуру и сопротивления образцов. Результаты записать в табл. 2.

5. Повторить измерения п. 4, увеличивая напряжение с шагом 3 В до максимального 15 В.

6. По окончании измерений выключить источник питания нагревателя.

4. Обработка и анализ результатов измерений

1. По результатам измерений вычислить температуру T, K и обратную температуру $1/T, \text{K}^{-1}$. Для полупроводника вычислить $\ln(R/R_0)$, где R и R_0 – сопротивления при температуре T и при комнатной температуре T_0 , соответственно. Результаты записать в табл. 2.

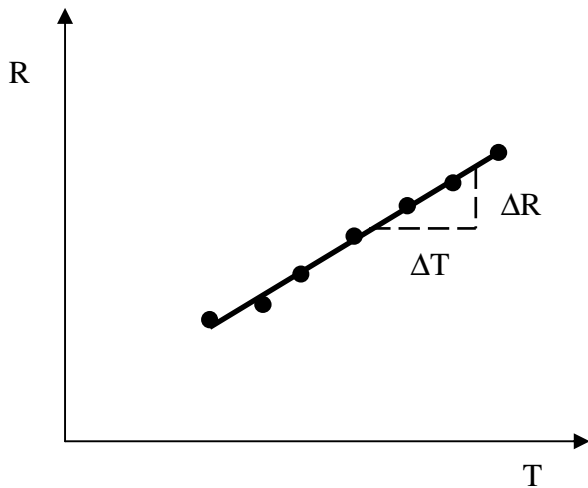


Рис. 8. Графический способ расчета температурного коэффициента сопротивления металла

2. Температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) α , K^{-1} при температуре T называется величина

$$\alpha = (\Delta R / \Delta T) / R \quad (10)$$

где R – сопротивление при температуре T , ΔR – приращение сопротивления при небольшом приращении температуры ΔT .

3. По результатам измерений для вольфрама построить на миллиметровой бумаге графическую зависимость R от T (см. рис. 8).

4. Используя построенный график, определить для вольфрама температурный коэффициент сопротивления α при $T = 300 \text{ K}$ и $T = 600 \text{ K}$ (см. (10)). При расчете рекомендуем взять $\Delta T = 50 \dots 100 \text{ K}$. Результаты записать в табл. 3.

5. Для полупроводника необходимо проанализировать, согласуется ли полученная в опыте зависимость R от T с теоретической формулой (3)

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

Запишем эту формулу для наиболее низкой в опыте комнатной температуры T_0

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

Разделив почленно два последних соотношения и прологарифмировав, получим

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

6. Как видно из (11), для полупроводника по результатам измерений необходимо построить графическую зависимость $\ln (R/R_0)$ от $1/T$ (см. рис. 9).

7. Если экспериментальные точки на графике (см. рис. 9) хорошо ложатся на прямую, то опыт согласуется с (11) и (2).

8. Из (11) и графика на рис. 9 можно определить энергию активации проводимости ϵ_A . Для этого прямую на рис. 9 продолжить до пересечения с осью ординат. Прямая пересекает ось ординат в точке, для которой

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

9. Вычислить ϵ_A (см. (12)) (постоянная Больцмана $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$). Результат вычисления ϵ_A , Дж, эВ, представить в табл. 3. (Примечание: $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$).

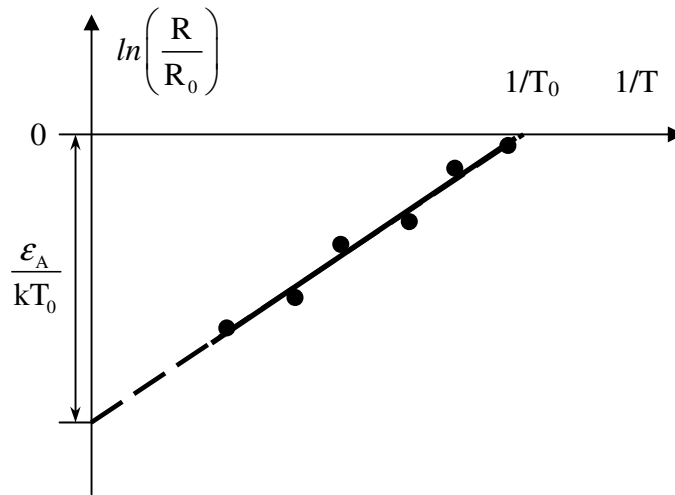


Рис. 9. Графическое представление результатов измерения для полупроводника: T_0 – наиболее низкая в опыте температура (комнатная)

10. Для полупроводника ТКС α следует находить иначе, чем для металла. Из (10) и (3) следует

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

11. Используя полученное значение ε_A , Дж, вычислить α (см. (13)) для температур 300 К, 600 К. Результаты расчета представить в табл. 3.

Таблица 3

Результаты

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

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 растёт, а полупроводников - уменьшается?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Винтайкин Б.Е. Физика твёрдого 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.