

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра физики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ФИЗИКЕ
для бакалавров всех специальностей

Лабораторная работа № 41

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКА

Казань
2014

Составители: В. И. Сундуков

УДК 539.15
ББК 23.343
С47

Методические указания к лабораторным работам по физике для студентов всех направлений подготовки. Лабораторная работа № 41 Температурная зависимость сопротивления полупроводника. Сост.: / В. И. Сундуков – 2-е изд., перераб. и дополн. Казань, 20014 г. 11 с.

В работе рассматриваются общие вопросы зонной теории проводимости полупроводников. Приводится теоретический анализ механизмов собственной проводимости.

Илл. 2. Табл. 1.

Рецензент
доцент кафедры теплоэнергетики
В.Н.Енюшин

УДК 539.15
ББК 23.343

© Казанский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2014 г.

© Сундуков В. И.

Полупроводниками называют группу веществ, электропроводность которых занимает промежуточное положение между металлами и диэлектриками. Их удельное сопротивление лежит в интервале от 10^{-4} до 10^8 Ом·м. Выделение их в отдельную группу, в первую очередь связано не с количественными особенностями их проводимости, а с качественными. Например, сопротивление металлов при повышении температуры растёт, а полупроводников — убывает. К полупроводникам относятся элементы IV, V и VI групп периодической системы элементов Менделеева, например, Si, Ge, As, Se, Te, и их химические соединения, например, оксиды, сульфиды, селениды.

Рассмотрим механизмы проводимости полупроводников сначала на качественном, а затем и на количественном уровне. Типичный полупроводник, например, германий, имеет кристаллическую решётку, в которой каждый атом связан ковалентными связями с четырьмя ближайшими соседями. Упрощенная плоская схема расположения атомов в кристалле Ge дана на рис. 1, где каждая черточка обозначает связь, осуществляемую одним электроном. В принципе в таком кристалле нет свободных зарядов и германий должен быть диэлектриком. Это подтверждается и экспериментом — любой полупроводник при 0 К не проводит электрического тока. Однако при комнатной температуре энергии хаотического движения атома оказывается достаточно, чтобы разорвать некоторые ковалентные связи в результате чего часть электронов отщепляется (они становятся свободными), и они приобретают возможность движения. Полупроводник приобретает способность проводить электрический ток. Однако это только один механизм электропроводности.

Теперь рассмотрим другой механизм. В месте разрыва связи, откуда ушёл электрон образуется «дырка», которую может заполнить какой-то другой электрон, освободившийся из соседней ковалентной связи. Дырка

изображена на рисунке полым кружком, а электрон — заполненным кружком. Этот последний электрон оставит на бывшем своём месте «дырку». В результате «дырка», так же как и освободившийся электрон, будет двигаться по кристаллу. При наложении на кристалл электрического поля электроны и «дырки» меняют своё хаотическое движение на направленное. Электроны имеют отрицательный заряд. Поэтому они движутся противоположно вектору электрической напряжённости. Последовательный перескок электронов из соседней ковалентной связи на место вакансии обеспечивает перемещение этой вакансии или «дырки» в другую сторону, т. е. по направлению напряженности.

Перемещению «дырки» в направлении, противоположном движению электрона, эквивалентно движению некой частицы, имеющей положительный заряд, равный по величине заряду электрона. «Дырка» это некоторая виртуальная частица с положительным зарядом, движение которой описывает последовательный перескок электронов среди совершенно одинаковых атомов. Если вещество полупроводника химически чистое, т.е. состоит из одинаковых атомов, то его проводимость называется собственной. Собственная проводимость — электронно-дырочная. Число электронов и дырок равно.

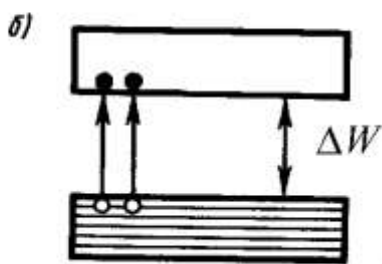
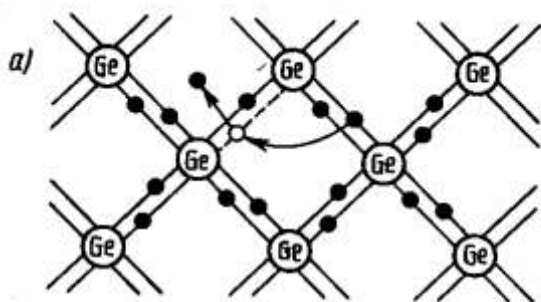


Рис. 1

Для образования электронно-дырочной пары необходима энергия. Эта энергия обеспечивается за счёт хаотического или теплового движения атомов. Наряду с образованием пар, протекает и обратный процесс их уничтожения или рекомбинации. Интенсивность образования электронно-дырочных пар возрастает с увеличением температуры, интенсивность уничтожения возрастает с увеличением их концентрации. В кристалле устанавливается динамическое равновесие между этими двумя процессами, которой соответствует некоторая концентрация пар. С ростом температуры концентрация электронно-дырочных пар растёт. Этим и объясняется увеличение электропроводности полупроводников с ростом температуры.

Связь удельного сопротивления ρ с концентрацией носителей заряда

n легко найти из сравнения закона Ома в дифференциальной форме

$$j = \frac{E}{\rho} \quad (1)$$

с зависимостью плотности тока от концентрации и упорядоченной скорости движения заряженных частиц

$$j = enV. \quad (2)$$

Здесь E — напряжённость электрического поля, e — заряд электрона по абсолютной величине, V — скорость упорядоченного движения носителей заряда. Приравнивая правые части выражений (1) и (2), получаем

$$\rho = \frac{E}{enV}. \quad (3)$$

Если рассматривать металлы, то в них концентрация носителей заряда от температуры практически не зависит и поэтому температурная зависимость удельного сопротивления определяется зависимостью скорости упорядоченного движения электронов от температуры. Эта зависимость по величине различается для разных металлов. Однако общим является уменьшение этой скорости с ростом температуры. Поэтому удельное сопротивление металлов увеличивается с ростом температуры.

В полупроводниках наоборот — можно пренебречь зависимостью от температуры скорости и нельзя пренебречь зависимостью концентрации носителей заряда от температуры.

Рассмотрим элементы зонной теории твердых тел. Для установления математической зависимости концентрации носителей заряда от температуры, обращаются к зонной теории. От задачи движения многих частиц, которая точно не решается, переходят к задаче о движении одной частицы (электрона) в поле других электронов и ядер. Из атомной физики известно, что электроны имеют дискретный (прерывистый) спектр энергии. Другими словами электроны в атоме принимают только определённые значения энергии, которые для каждого химического элемента свои. Каждое энергетическое состояние атома описывается четырьмя квантовыми числами. В классической механике они получили названия главное, орбитальное, магнитное и спиновое квантовые числа. От каждого из них в большей или меньшей степени зависит спектр энергетических уровней. Когда из многих ядер образуется система, например, кристаллическая решётка, уровни энергии атомов начинают расщепляться. Такую ситуацию объясняет принцип Паули, говорящий о том, что в системе не может быть даже двух электронов, у которых совпадают все 4 квантовых числа. Поэтому на месте одного электронного уровня в отдельном атоме в кристалле возникает целая зона

уровней. Причём очень важным является тот факт, что, не смотря на огромное число энергетических уровней, их число является конечным. Может оказаться, что все уровни энергий в какой-то отдельной зоне заняты. Так как в атомах существует много уровней энергии, отстоящих друг от друга на расстоянии несколько электронвольт (эВ), то и в кристаллах существует много энергетических зон. $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, и эта единица измерений применяется к атомным системам, чтобы не пользоваться десятичными экспонентами. Для рассмотрения электрических свойств полупроводников достаточно двух зон энергий. Самую верхнюю зону, полностью заполненную электронами, называют валентной, а выше неё через промежуток лежит зона, которая называется зоной проводимости. Промежуток между ними иногда называют запрещённой зоной, её ширину обозначим через ΔW .

Зонная теория твёрдых тел позволила с единой точки зрения истолковать свойства металлов, диэлектриков и полупроводников, объясняя различие в их электрических свойствах, во-первых, неодинаковым заполнением электронами разрешённых зон и, во-вторых, шириной запрещённых зон. Степень заполнения электронами энергетических уровней в зоне определяется заполнением соответствующего атомного уровня. Если, например, какой-то уровень атома полностью заполнен электронами в соответствии с принципом Паули, то образующаяся из него зона также полностью заполнена. Из незанятых уровней энергии образуются свободные зоны, из частично заполненных уровней — частично заполненные зоны.

В металлах, являющихся проводниками, зона проводимости заполнена электронами частично, т. е. в ней имеются вакантные уровни. Электрон, получив сколь угодно малую энергетическую «добавку» за счёт электрического поля, сможет перейти на более высокий энергетический уровень той же зоны и участвовать в проводимости электрического тока.

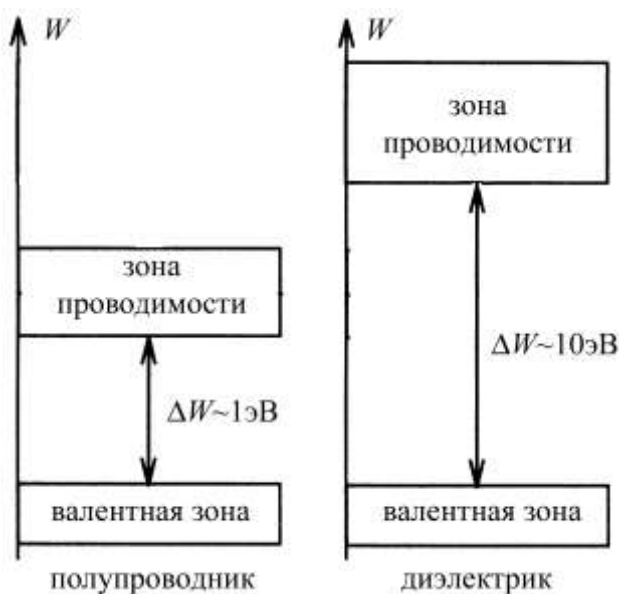


Рис. 2

Твёрдые тела, у которых энергетический спектр электронных состояний состоит из валентной зоны, полностью заполненной электронами, и пустой зоны проводимости, являются диэлектриками или полупроводниками в зависимости от ширины запрещённой зоны (рис. 2). В этом случае электрическое поле не вызывает движения электронов поскольку в результате движения должна возрасти энергия электронов, и

они должны перейти на уровень выше. А это запрещено, так как в пределах зоны выше нет свободных уровней. Различие же между диэлектриками и полупроводниками определяется шириной запрещённых зон: для диэлектриков она довольно широка (например, для NaCl $\Delta W = 6$ эВ), для полупроводников — достаточно узка и соизмерима с энергией kT теплового движения (например, для германия $\Delta W = 0,72$ эВ). При температурах, близких к 0 К, полупроводники ведут себя как диэлектрики, а при комнатной температуре они способны проводить электрический ток. Это происходит за счёт того, что если запрещённая зона достаточно узка, то переход некоторой части электронов из валентной зоны в зону проводимости происходит за счёт теплового возбуждения. Если ширина запрещённой зоны кристалла велика, то тепловое движение не может сообщить достаточной энергии, чтобы электроны из валентной зоны перешли в зону проводимости. Поэтому кристалл является диэлектриком при всех реальных температурах.

С точки зрения зонной теории разрыв валентной связи и образование электронно-дырочной пары соответствует переходу электрона из валентной зоны в зону проводимости (рис. 1, б). Для этого необходимо затратить энергию активации, равную ширине запрещённой зоны ΔW . Поскольку в результате активации образуется 2 носителя заряда — электрон и дырка, то эта энергия будет делиться между ними пополам.

Концентрация электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне будет равным

$$n_e = n_p = A \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right). \quad (4)$$

Здесь $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К является постоянной Больцмана, а T — абсолютной температурой. Появившийся свободный электрон соответствует занятому электронному уровню в зоне проводимости, а появившийся «дырке» — вакантный уровень в валентной зоне. Движение «дырки» противоположно движению электрона. В зоне проводимости электроны будут переходить на более высокие уровни, а в валентной зоне «дырки» (вакантные электронные уровни) будут опускаться.

Найдём зависимость удельного сопротивления полупроводников от температуры. Если подставить в формулу (3) выражение для концентрации (4), то получим температурную зависимость удельного сопротивления полупроводника

$$\rho = \rho_0 \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{2kT}\right), \quad (5)$$

где $\rho_0 = \frac{E}{AeV}$ — некоторая константа, имеющая единицу удельного сопротивления.

Терморезисторы. В различных радиотехнических устройствах находят широкое применение полупроводниковые терморезисторы, назначение которых состоит в изменении сопротивления цепи при изменении их температуры. Например, в генераторах гармонических колебаний они используются для поддержания неизменной амплитуды выходного сигнала, в электронных термометрах — в качестве датчиков температуры. Поскольку терморезисторы являются полупроводниками и их геометрические размеры от температуры не зависят, то их сопротивление в соответствии с уравнением (5) будет подчиняться следующей формуле:

$$R = R_0 \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{2kT}\right). \quad (6)$$

ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Целью данной работы является получение температурной зависимости сопротивления терморезистора и определение ширины запрещённой зоны полупроводника.

Установка состоит из плитки-нагревателя, колбы с диэлектрической жидкостью, в которой находятся термометр и исследуемый полупроводниковый терморезистор, и цифрового универсального прибора, используемого в данной работе для измерения сопротивления терморезистора.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучите данное методическое пособие и спланируйте эксперимент.
2. Подключите измерительный прибор к сети, и включите его сетевой тумблер.
2. Измерьте температуру терморезистора и его начальное сопротивление при не нагретой колбе.
3. Подключите плитку-нагреватель к сети и приготовьтесь к замерам температуры и сопротивления.
4. Измерения значений температур и сопротивлений проводите примерно через 5 °С. Максимальный нагрев до 50 — 60 °С. Число точек измерения не менее 5 — 6. Занесите результаты в таблицу 1. ($T \text{ К} = t \text{ °С} + 273$).
5. Подсчитайте значения измеренных обратных температур $1/T$.
6. Занесите результаты измерений и вычисленные значения в таблицу 1.
7. Отключите приборы от сети и перейдите к обработке эксперимента.

Таблица 1

$R, \text{ Ом}$						
$t, \text{ }^\circ\text{C}$						
$\ln R$						
$1/T$						

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Определение ширины запрещенной зоны проводится с помощью уравнения (6). Логарифмируя его, получаем: $\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta W}{2kT}$. Это уравнение

прямой $y = a + bx$, где $y = \ln R$, $a = \ln R_0$, $b = \frac{\Delta W}{2k}$, $x = \frac{1}{T}$. Найдите ширину

запретной зоны полупроводника ΔW . Для этого нанесите на график точки зависимости сопротивления от температуры в координатах: ось ординат – $\ln R$ и ось абсцисс – $1/T$, используя данные из таблицы. В данных координатах зависимость, согласно теории, должна быть линейной. Проведите на графике прямую линию таким образом, чтобы некоторые экспериментальные точки точно попали на неё, а остальные были бы наиболее к ней близки. Из графика по тангенсу угла наклона прямой к оси абсцисс найдите угловой коэффициент $b = \frac{\Delta W}{2k}$. Для этого нужно произвольным образом вы-

брать на прямой 2 точки и найти отношение $\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$, т. е. фактически —

$\frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}$). Ширина запрещённой зоны будет равна

$\Delta W = 2bk = 2b \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж. Выразите ширину запрещённой зоны в электронвольтах, для этого предыдущее число разделите на $1,6 \cdot 10^{-19}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие вещества относятся к полупроводникам?
2. Что называется дырками, и каким образом они движутся?
3. Что представляет собой зонная теория?
4. Что называется зоной проводимости, валентной, запрещённой зонами?
5. Чем с точки зрения зонной теории отличаются друг от друга проводники, полупроводники и диэлектрики?
6. Что называется собственной проводимостью полупроводников, и какого она типа?
7. Какова зависимость концентрации электронно-дырочных пар в чистом полупроводнике?
8. Выведите формулу зависимости удельного сопротивления полупроводника от температуры.
9. Какова зависимость сопротивления терморезистора от температуры?
10. Почему температурная зависимость терморезистора представляется в координатах: $\ln R, 1/T$, а не просто R, T ?

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКА

Методические указания к лабораторным работам по физике для бакалавров всех специальностей.

Составитель: Сундуков Виктор Иванович

Корректурa авторов

Редакционно-издательский отдел
Казанского государственного архитектурно-строительного университета

Подписано в печать:		Формат 60x84/16
Заказ	Печать RISO	Усл. печ. л. 0.75
Бумага тип № 2	Тираж 100 экз.	Уч.-изд. л. 0.75

Печатно-множительный отдел КазГАСУ
420043, Казань, ул. Зеленая, 1