



Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Физический факультет

Кафедра общей физики

Булкин П.С., Васильева О.Н., Киров С.А., Малова Т.И.

Лабораторный практикум по молекулярной физике

Измерение температуры полупроводниковыми термометрами

Задача №224

©Москва 2013

Лабораторный практикум по молекулярной физике

Булкин П.С., Васильева О.Н., Киров С.А., Малова Т.И.

Измерение температуры полупроводниковыми термометрами

Учебное пособие – М.: ООП Физ. фак-та МГУ, 2012, 17 с.

Данное учебное пособие является расширенным и переработанным описанием задачи

П.С. Булкин, О.Н. Васильева, Т.И. Малова. «Градуировка полупроводниковых термометров», М.: ООП Физ. фак-та МГУ, 2009 г.

В соответствии с пожеланиями преподавателей практикума и студентов, выполнявших эту задачу, добавлена краткая элементарная теория свойств полупроводников, существенная для понимания физики работы датчиков температуры на их основе. Исправлены замеченные неточности и опечатки.

Пособие предназначено для студентов физического факультета МГУ и для преподавателей, ведущих занятия в практикуме.

Оглавление

Теоретическое введение	3
Методы и средства измерения температуры	3
Температурные шкалы.....	5
Использование полупроводниковых приборов для измерения температуры	6
Зонная структура полупроводников.....	6
Проводимость полупроводников.....	7
Электронно-дырочный переход (<i>p-n</i> -переход)	9
Методы измерения температуры с помощью диодных датчиков	12
Измерение температуры полупроводниковыми резистивными датчиками	13
Экспериментальная часть	14
Экспериментальная установка.....	14
Упражнение 1. Измерение температуры по вольтамперной характеристике диода	15
Упражнение 2. Градуировка полупроводниковых термометров	15
Упражнение 3. Измерение конечной температуры по вольтамперной характеристике диода	16
Контрольные вопросы.....	17
Литература.....	17

Теоретическое введение

В молекулярно-кинетической теории под температурой понимают меру средней кинетической энергии хаотического движения молекул при равновесном состоянии системы. Понятие температуры применимо, таким образом, только к массиву молекул, поэтому температура является *макроскопическим параметром состояния вещества*.

Методы и средства измерения температуры

Температура не является непосредственно измеряемой величиной; её значение определяют по температурному изменению какого-либо удобного для измерения *физического параметра термометрического вещества (термометрического тела)*. Выбранный *термометрический параметр* должен существенно, непрерывно, однозначно и, желательно, линейно, зависеть от температуры; измерения величины параметра не должно вносить значительных изменений в температурный режим измеряемой среды.

Современная термометрия располагает разнообразными методами измерений, каждый из которых специфичен и не универсален. Методы измерений температуры подразделяют на *контактные* (средство измерения непосредственно соприкасается с контролируемым объектом) и *бесконтактные* (удобные для измерения высоких температур). Наиболее доступны, точны и надежны контактные методы, реализуемые с помощью *термометров*.

Наиболее употребляемыми *термометрическими параметрами* являются:

Объём тела. Зависимость объема от температуры используется в жидкостных и газовых термометрах. В качестве термометрического вещества в газовых термометрах применяют разреженный газ, близкий по своим свойствам к идеальному, а в жидкостных – такие жидкости, как ртуть, подкрашенный спирт, толуол;

Электрическое сопротивление; используется в термометрах сопротивления, термометрическим телом являются проводники – терморезисторы и полупроводники – термисторы;

ТермоЭДС. Термометрическим телом при этом являются термопара – два различных проводника с большой разницей в работе выхода электронов, соединенные сваркой или пайкой;

Линейные размеры тел. Пример – биметаллический термометр. Термометрическим телом являются две пластинки из металлов с разными коэффициентами теплового линейного расширения, наложенные друг на друга и скрепленные вместе. При изменении температуры биметаллические пластинки изгибаются или закручиваются, при этом величина деформации зависит от температуры;

Спектр излучения (энергетическая светимость, спектральный состав) – это используется в радиационном, яркостном и цветовом пирометрах.

Применяются также и другие параметры, которые используются в манометрических, магнитных, пьезокварцевых и прочих термометрах.

Термометрическое тело и среда в процессе измерения должны прийти к состоянию теплового равновесия, поэтому очень важно, чтобы тепловая «инерционность» измерительного прибора была незначительной, а собственная теплоёмкость – минимальной, чтобы он не внес искажений в состояние среды.

Каждый из видов термометров *может применяться в определенном температурном диапазоне* и имеет свои *преимущества и недостатки*.

Газовые термометры используют наличие прямой пропорциональной зависимости между давлением идеального газа и его абсолютной температурой при постоянном объеме (закон Шарля). Их применяют при небольших давлениях и достаточно высоких температурах как эталонные, по ним градуируют и проверяют другие термометры. Недостаток газовых термометров – они громоздки и неудобны в применении.

Жидкостные термометры удобны в обращении, но диапазон их работы ограничен температурами кристаллизации и кипения жидкости. К их недостаткам можно отнести нелинейность температурной зависимости объемов, что делает необходимым калибровать их по газовым термометрам. Они отличаются также инерционностью, большой собственной теплоёмкостью и большими размерами рабочей части.

Термопары обладают большим диапазоном измеряемых температур – от сверхнизких до точки плавления металлов, из которых они сделаны. С их помощью можно измерять температуру в интервале от -269°C до почти 2300°C , используя различные комбинации металлов. К достоинствам термопар относятся малые размеры термометрического тела, малая инерционность и теплоемкость, возможность дистанционных измерений. Их недостатки – нелинейность зависимости термоЭДС от температуры, относительно низкая стабильность и небольшая чувствительность.

Термометры сопротивления из металлов могут измерять температуру в широком диапазоне, например, проволочная спираль из платины позволяет проводить измерения от -258°C до 900°C . Их достоинствами являются миниатюрность, хорошая линейность характеристик, высокая стабильность. К недостаткам следует отнести низкую чувствительность (сопротивление металлов растёт с повышением температуры со скоростью 0.4-0.6 % /К) и относительно большую инерционность.

Полупроводниковые термометры сопротивления обладают высокой чувствительностью (в 8 - 10 раз большей, чем у металлических термометров сопротивления), малой инерционностью, малыми размерами и высокой стабильностью. Их недостатком по сравнению с термометрами сопротивления из металлов является нелинейность температурной зависимости сопротивления и более узкий рабочий диапазон.

Температурные шкалы

Выбрав термометрическое вещество и параметр, необходимо задать начальную точку отсчёта и единицу измерения температуры. Хотя температура по физическому смыслу является мерой энергии, исторически она измеряется в более удобных безразмерных единицах – градусах¹. В температурной шкале обычно фиксируют две основные температуры (*реперные точки*), расстояние между которыми называется *основным температурным интервалом шкалы*. В качестве реперных точек часто используют температуры кипения и плавления химически чистых веществ. Размер единичного интервала (единицы температуры) устанавливают как определённую долю основного интервала.

В настоящее время применяются несколько температурных шкал, отличающихся выбором реперных точек. В шкале Цельсия (°C) интервал между точкой плавления льда (принимаемый за температурный нуль) и точкой кипения воды при нормальном давлении делится на сто равных долей – градусов Цельсия (°C). В шкале Фаренгейта (°F) исторически нуль определялся по точке замерзания смеси воды, льда и нашатыря (1:1:1), а за 96 °F была принята нормальная температура человеческого тела. Сейчас точка таяния льда принята точно за +32°F, а точка кипения воды – за +212 °F (при нормальном атмосферном давлении). Один градус Фаренгейта равен 1/180 разности этих температур.

В физике наиболее употребляемой является термодинамическая (абсолютная) шкала температур (шкала Кельвина), базирующаяся на втором начале термодинамики [1:§31, 2:§5.1, 3:§11]. Она имеет одну реперную точку – тройную точку воды², которой присвоено значение $T_{тр} = 273,16$ К. Температуры по шкале Кельвина отсчитываются от абсолютного нуля температур, при котором отсутствует любое тепловое движение молекул. Шкала Кельвина стала основой для международного стандарта современной термометрии. Достоинства шкалы – независимость от свойств термометрического вещества и высокая точность воспроизведения тройной точки $T_{тр}$. Соотношения между температурами, выраженными по шкале Цельсия и по абсолютной термодинамической шкале:

$$T = t^{\circ}\text{C} + 273,15 \text{ К},$$

при этом 1°C равен 1 К.

В настоящей лабораторной работе изучаются физические основы измерения температуры с помощью полупроводниковых термометров: полупроводникового диода и терморезистора.

¹ В физике используется также измерение температуры в энергетических единицах – электрон-вольтах (эВ).

² Точка, в которой вещество может равновесно находиться сразу в трех агрегатных состояниях – кристаллическом, жидком и газообразном.

Использование полупроводниковых приборов для измерения температуры

Зонная структура полупроводников

Для использования полупроводников в качестве термометрического тела в термометрах важно знать зависимость их сопротивления от температуры. Полупроводники – это вещества, удельное электрическое сопротивление которых при комнатной температуре имеет промежуточное значение между его величиной в металлах ($10^{-8} \dots 10^{-6}$ Ом·м) и в хороших диэлектриках ($10^8 \dots 10^{15}$ Ом·м), и уменьшается при повышении температуры. Наиболее существенная особенность полупроводников – способность изменять свои свойства в широких пределах под влиянием различных воздействий (температуры, электрического поля, освещения и пр.).

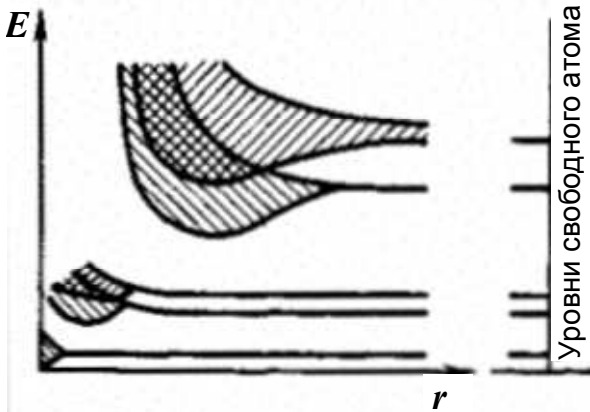


Рис.1. Схема образования энергетических зон. r - расстояние между атомами

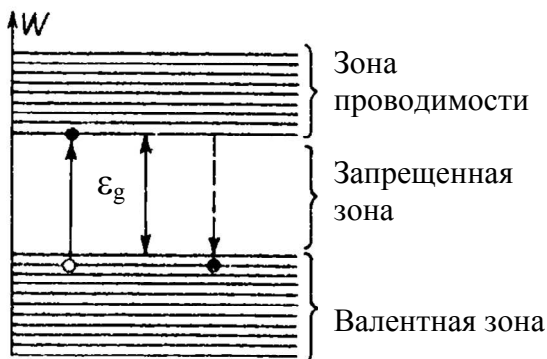


Рис.2 Зонная структура полупроводников и диэлектриков

- – электрон проводимости
- – дырка

Физические свойства полупроводников получили свое объяснение на основе зонной теории твердых тел.

Согласно квантовой механике электроны в изолированном атоме имеют определённые дискретные значения энергии (энергетические уровни). В кристаллической решетке твёрдого тела взаимодействие между атомами приводит к расщеплению энергетических уровней внешних валентных электронов до практически непрерывных дискретных наборов – разрешенных энергетических зон. Уровни же внутренних электронов остаются почти неизменными (Рис.1).

Каждая разрешенная зона «вмещает» в себя столько близлежащих дискретных уровней, сколько атомов содержит кристалл: чем больше в кристалле атомов, тем теснее расположены уровни в зоне. Расстояние между соседними энергетическими уровнями в зоне составляет приблизительно 10^{-22} эВ. Так как оно очень мало, зоны можно считать практически непрерывными, однако факт конечного числа уровней в зоне играет важную роль для распределения электронов по энергетическим состояниям.

Разрешенные энергетические зоны разделены зонами запрещенных значений энергии, которыми не может обладать электрон в идеальном (бездефектном) кристалле. Они

называются запрещенными энергетическими зонами (рис.2).

Число мест в каждой разрешенной зоне ограничено. В силу принципа Паули каждое из квантовых состояний может быть заполнено только одним электроном. При температуре $T = 0$ К электроны заполняют нижние состояния. В зависимости от числа валентных электронов верхняя из заполненных энергетических зон может быть занята полностью или частично. Электроны полностью заполненной зоны не переносят ток, т. к. в такой зоне электрическое поле не может изменить распределение электронов по энергиям. Кристаллы, у которых нижние зоны полностью заполнены, а верхние пустые, при $T = 0$ К являются диэлектриками.

Наивысшая из полностью заполненных при температуре $T = 0$ К зон называется валентной зоной, следующая за ней – зоной проводимости; она либо свободна (у диэлектриков и полупроводников), либо частично заполнена электронами из-за перекрытия с валентной зоной (такие материалы являются металлами). Ширина запрещенной зоны ϵ_g – это разность энергий между дном (нижним уровнем) зоны проводимости и потолком (верхним уровнем) валентной зоны.

При комнатной температуре вещества с широкой запрещенной зоной являются диэлектриками, а с более узкой (обычно меньше 2,5-3 эВ) – полупроводниками (например, при комнатной температуре у германия $\epsilon_g = 0,67$ эВ, у кремния $\epsilon_g = 1,12$ эВ).

Проводимость полупроводников

В полупроводниках появление носителей заряда определяется рядом факторов, важнейшими из которых являются химическая чистота материала и температура. В зависимости от количества примесей полупроводники подразделяют на собственные и примесные.

Собственная проводимость (полупроводник без примесей). При температурах, близких к 0 К, чистые полупроводники ведут себя как диэлектрики, поскольку в зоне проводимости электронов нет.

Так как в полупроводниках запрещенная зона не очень широкая, то при температурах, отличных от абсолютного нуля, некоторые из электронов за счет тепловых флуктуаций преодолевают запрещенную зону и оказываются в зоне проводимости. При наложении электрического поля электроны, находящиеся в зоне проводимости, перемещаются и создают электрический ток. Проводимость, обусловленная электронами в зоне проводимости, называется электронной или проводимостью n-типа.

В собственном полупроводнике каждый переход электрона в зону проводимости сопровождается образованием вакантного места (дырки) в валентной зоне (рис.2, 3а). Во внешнем электрическом поле на освободившееся от электрона место – дырку – может переместиться валентный электрон с соседнего атома, а дырка появится в том месте, откуда ушел электрон, и т. д. Такой коллективный процесс заполнения дырки валентными электронами равносителен перемещению дырки в направлении, противоположном движению электрона, так, как если бы дырка обладала положи-

тельным зарядом, равным по величине заряду электрона. Проводимость, обусловленная дырками, называется *дырочной* или *проводимостью p-типа*.

В отличие от металлов, в которых для описания распределения электронов по энергиям практически всегда нужно пользоваться распределением Ферми-Дирака, в полупроводниках при комнатной температуре во многих случаях применимо распределение Больцмана, но отсчет энергии надо вести от уровня Ферми, который в собственных полупроводниках лежит посередине запрещенной зоны ($E_F = \varepsilon_g/2$). В этом приближении концентрация n свободных электронов, перешедших в зону проводимости, а следовательно, и равная ей концентрация образовавшихся дырок p , имеет вид:

$$n = p = A \exp\left(-\frac{\varepsilon_g}{2kT}\right),$$

где A – константа, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура³.

Ток собственной проводимости складывается из тока электронов проводимости и тока дырок. С ростом температуры концентрации свободных электронов и дырок увеличивается. Поэтому собственная проводимость увеличивается, т.е. удельное сопротивление падает.

Примесная проводимость. В реальных полупроводниковых приборах используют полупроводники, легированные специальными примесями. Атомы примеси, которые делятся на *донорные* и *акцепторные*, являются дополнительными источниками свободных носителей заряда. Атомы донорных примесей легко отдают в зону проводимости электроны, создавая электронную проводимость (n -типа), а сами при этом становятся положительными ионами (рис.3б). Акцепторные атомы легко захватывают валентные электроны собственных атомов полупроводника, в результате

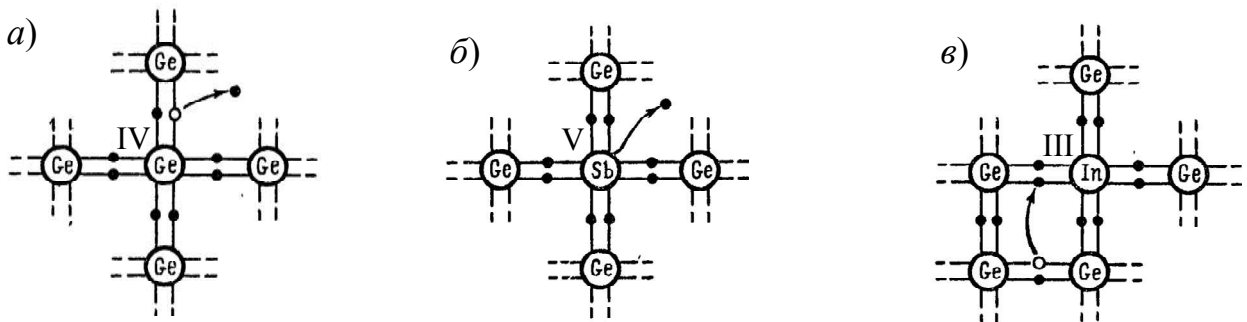


Рис.3 Схема возникновения носителей тока в полупроводниках [6]

(● – электрон проводимости, ○ – дырка, линии – ковалентные связи)

а) Собственный полупроводник: электрон проводимости + дырка

б) Донорный пятивалентный ион (+) Sb: появление электрона проводимости

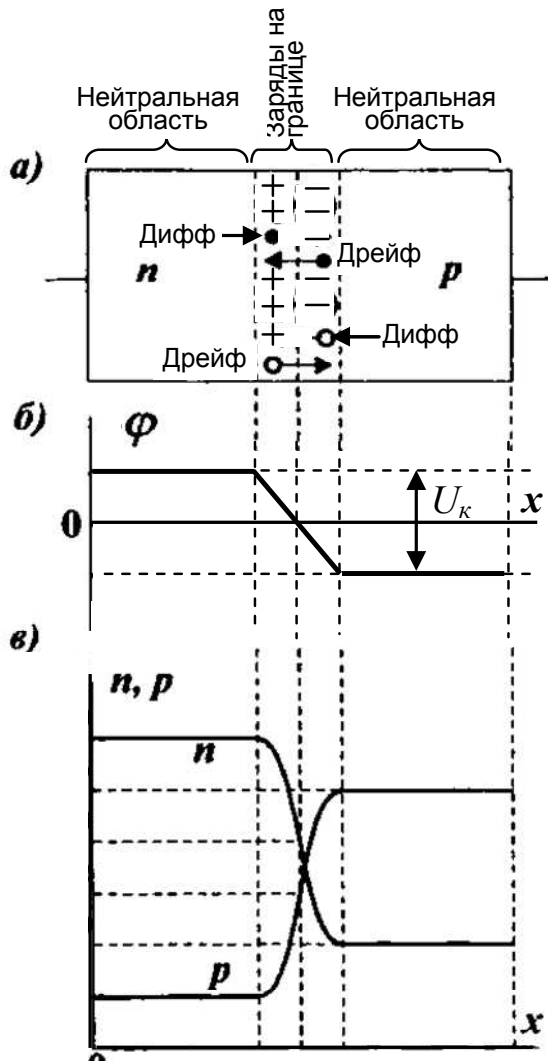
в) Акцепторный трехвалентный ион (-) In: появление дырки

³ Более точные расчеты дают зависимость от температуры $n = p = AT^{3/2} \exp\left(-\frac{\varepsilon_g}{2kT}\right)$ [7-9].

чего образуются дырки и возникает дырочная проводимость (p -типа), а сами атомы становятся отрицательными ионами (рис.3в).

Типичными донорами в полупроводниках IV группы Ge и Si являются атомы элементов V группы (P, As, Sb), а акцепторами – атомы III группы (B, Al, In).

В реальных полупроводниках всегда присутствуют оба типа носителей заряда. Основными называются те, концентрация которых в данном полупроводнике больше, неосновными – концентрация которых меньше.



В полупроводнике n -типа основные носители заряда – электроны, неосновные – дырки, в полупроводнике p -типа – наоборот. Процесс ионизации атомов примесей требует очень малых энергий, и уже при комнатной температуре практически все атомы примеси ионизованы. Обычно концентрация созданных ими основных носителей на много порядков превышает концентрацию неосновных, возникающих путем обычной тепловой генерации электронно-дырочных пар.

Электронно-дырочный переход (p - n -переход)

Граница соприкосновения двух полупроводников, один из которых имеет электронную, а другой – дырочную проводимость, называется p - n -переходом.

Сами p -и n -области электрически нейтральны, поскольку заряд ионов примесей компенсируется противоположным зарядом порожденных ими носителей. Но на границе областей ситуация другая: там имеется большой градиент концентраций, вызывающий диффузию дырок из p -области в n -область и, аналогично, электронов из n -области в p -область. В результате на границе происходит рекомбинация электронов и дырок и создается узкая область с низкой концентрацией носителей, а по обе стороны границы возникают нескомпенсированные объемные заряды, обусловленные ионами различных знаков – отрицательно заряженными акцепторными ионами в p -области и положительно заряженными донорными ионами – в n -области. Между образо-

Рис.4. Электронно-дырочный переход при отсутствии внешнего напряжения [6]

а) -, +: нескомпенсированные заряды ионов примесей на границе; стрелки – диффузионное (дифф) и дрейфовое (дрейф) движение носителей заряда;

● – электроны, ○ – дырки;

б) распределение потенциала;

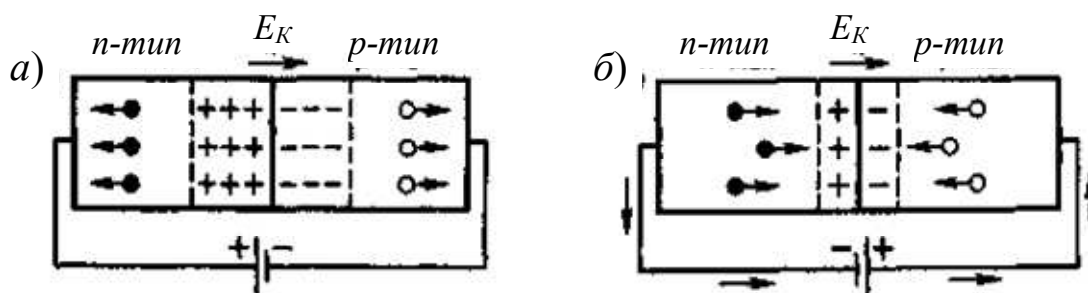
в) распределение концентрации носителей

вавшимися объемными зарядами возникают электрическое поле и *контактная разность потенциалов* U_K , которая зависит от концентраций электронов и дырок в граничащих p - и n -областях. Например, для p - n -переходов на основе Ge при комнатной температуре типичное значение U_K составляет 0,35-0,6 В, для кремния – 0,8-1,2 В. Это контактное поле является запирающим для основных носителей, останавливая их диффузию (см. *рис. 4*), а для неосновных носителей оно является ускоряющим, вызывая их дрейф через переход. При равновесии диффузионный ток основных носителей и дрейфовый ток (неосновных) очень малы и взаимно компенсируются, так что полный ток через p - n -переход равен нулю.

Таким образом, по обе стороны границы раздела полупроводников образуется тонкий *запирающий слой* с пониженной концентрацией основных носителей зарядов, т.е. с высоким сопротивлением. Толщина его обычно 10^{-6} - 10^{-4} см.

Если к p - n -переходу приложить внешнее напряжение V плюсом к p -области а минусом к n -области (*прямое напряжение*), то вызываемое им перемещение основных носителей к границе вызывает уменьшение зарядов на ней, снижая высоту потенциального барьера (*рис. 5б*). Поэтому появляется диффузионный ток основных носителей через переход, который с ростом напряжения экспоненциально возрастает. Направленный обратно дрейфовый ток неосновных носителей при этом почти не изменяется, так как их концентрация постоянна.

При подключении *обратного напряжения* внешнее поле, наоборот, оттягивает основные носители зарядов от p - n -перехода, ширина запирающего слоя и величина зарядов на нем увеличиваются, вызывая рост потенциального барьера и прекращение диффузионного тока основных носителей через переход (*рис. 5а*). Перемещаться через p - n -переход будут только неосновные носители, создавая очень небольшой обратный дрейфовый ток.



*Рис. 5. а) обратное включение p - n -перехода;
 б) прямое включение p - n -перехода
 ● – электроны, ○ – дырки*

Таким образом, при прямом включении ток обусловлен, в основном, основными носителями, а при обратном – неосновными. Так как концентрация основных носителей обычно на много порядков больше, чем неосновных, то p - n -переход пропускает ток в одном направлении – прямом, и практически не пропускает ток в другом направлении – обратном.

Зависимость тока через переход от напряжения на нем $I(V)$ называется вольтамперной характеристикой (ВАХ). В первом приближении эту зависимость можно получить следующим образом.

Рассмотри отдельно ток электронов проводимости. При отсутствии внешнего напряжения на границе имеется скачок потенциала U_K , являющийся запирающим для диффузионного перехода электронов из n -области в p -область. Количество электронов, которые имеют энергию, достаточную для преодоления этого энергетического барьера, равно $\Delta E = eU_K$, дается распределением Больцмана, и они создают диффузионный ток, пропорциональный их количеству

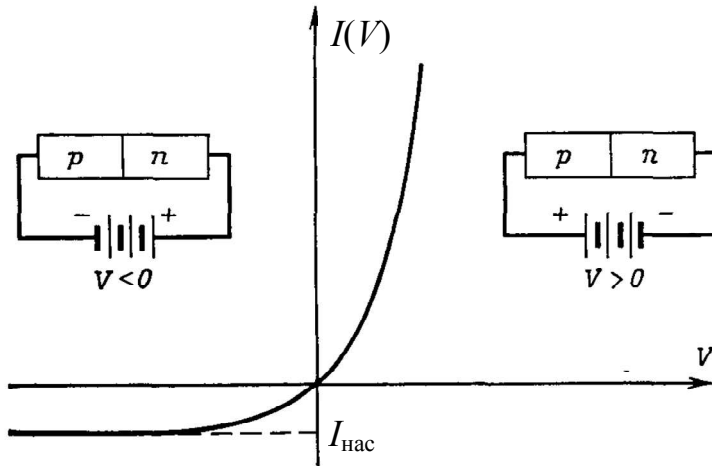


Рис.6. Теоретическая вольтамперная характеристика p - n -перехода [2]

где A – константа, e – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

$$I_{\text{диф}} = A \exp\left(-\frac{eU_K}{kT}\right),$$

В обратном направлении течет малый дрейфовый ток I_T электронов из p -области, где они являются неосновными носителями и возникают за счет тепловой генерации, в n -область; для них поле перехода является ускоряющим, и подвывая к нему, они все его пересекают. Поскольку полный ток должен равняться нулю, то

Поскольку полный ток должен равняться нулю, то

$$I_{\text{др}} = -I_{\text{диф}} = -A \exp\left(-\frac{eU_K}{kT}\right). \quad (1)$$

При приложении внешнего напряжения V в прямом направлении скачок потенциала на границе уменьшается и становится $U_K - V$. Ток неосновных носителей I_T при этом почти не изменится, так как для него поле перехода остается ускоряющим. Диффузионный же ток I_D ввиду уменьшения барьера увеличится и станет

$$I_{\text{диф}} = A \exp\left(-\frac{e(U_K - V)}{kT}\right). \quad (2)$$

Полный электронный ток найдем, складывая диффузионный (1) и дрейфовый (2) токи:

$$I(V) = I_{\text{диф}} + I_{\text{др}} = A \exp\left(-\frac{eU_K}{kT}\right) \left(\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right).$$

То же справедливо и для токов дырок. Поэтому зависимость полного тока от напряжения будет иметь аналогичный вид

$$I = I_{\text{нас}} \left(\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right), \quad (3)$$

где множитель $I_{нас}$ не зависит от V . График зависимости (3) приведен на *рис.6*. Из рисунка видно, что $I_{нас}$ – это ток насыщения при больших обратных напряжениях, обусловленный только неосновными носителями, возникающими за счет тепловой генерации.

Формула (3) подтверждается и более строгими расчетами для резкого $p-n$ -перехода при малых токах [7, 8, 9], которые дают также и выражение для тока насыщения $I_{нас}$:

$$I_{нас} = I_0 \exp\left(-\frac{\varepsilon_g}{kT}\right), \quad (4)$$

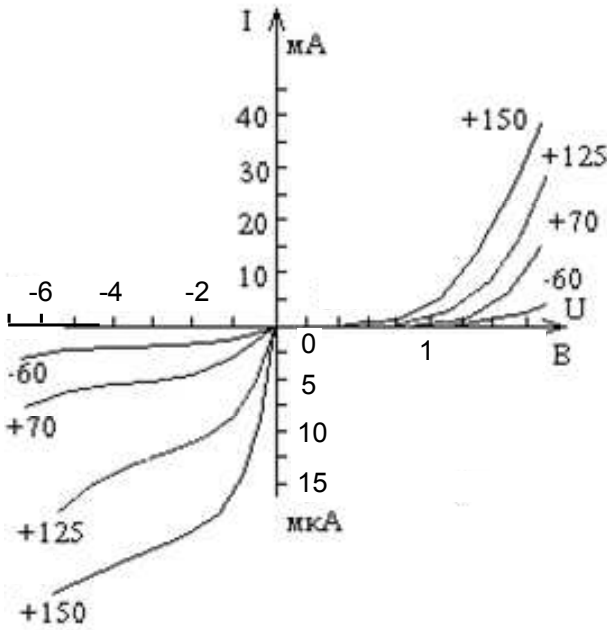


Рис.7. Вольтамперная характеристика реального $p-n$ -перехода (кремниевого диода) при температурах -60 , $+70$, $+125$ и $+150$ °C. Прямая и обратная ветви ВАХ изображены в разных масштабах.

где ε_g – ширина запрещенной зоны, множитель I_0 с размерностью силы тока определяется параметрами полупроводника. Температура оказывает значительное влияние на ток через $p-n$ -переход (*рис.7*). При повышении температуры усиливается генерация пар носителей зарядов, их концентрация увеличивается и собственная проводимость растет, что вызывает рост прямого и обратного тока. Для $p-n$ -переходов на основе Ge обратный ток возрастает примерно в 2 раза при повышении температуры на каждые 10°C ; для Si – примерно в 2,5 раза. Прямой ток при нагреве растет не так заметно, как обратный. Это объясняется тем, что прямой ток возникает главным образом за счет примесной проводимости, а концентрация примесей не зависит от температуры.

Методы измерения температуры с помощью диодных датчиков

Метод 1. Рассмотренная связь V и I позволяет непосредственно определить абсолютную температуру T , измерив вольтамперную характеристику полупроводникового диода. Из соотношений (3), (4) следует:

$$I - I_{нас} = I_0 \exp\left(-\frac{\varepsilon_g}{kT} + \frac{eV}{kT}\right). \quad (5)$$

Обычно в $p-n$ -переходах прямой ток может быть на много порядков больше тока насыщения $I_{нас}$ (например, в маломощных кремниевых диодах $I_{нас} \sim 10^{-9}\text{A}$, $I \sim 10^{-1}\text{A}$). В таком случае в левой части соотношения (3) можно пренебречь $I_{нас}$. Тогда $\ln I$ будет линейной функцией напряжения V :

$$\ln I = \ln I_0 - \frac{\varepsilon_g}{kT} + \frac{e}{kT}V. \quad (6)$$

Построив экспериментальный график зависимости $\ln I = f(V)$ для прямого тока, можно найти угловой коэффициент наклона графика

$$M = \frac{d \ln I}{dV} = \frac{e}{kT}, \quad (7)$$

откуда определяется температура T :

$$T = \frac{e}{kM}. \quad (8)$$

Данный метод является одним из немногих, позволяющих измерить абсолютную температуру без предварительной градуировки термометра, однако практически он не применяется ввиду его трудоемкости.

Метод 2 измерения температуры может быть реализован при использовании $p-n$ -перехода в режиме постоянного тока при прямом включении. Из формулы (5) в том же приближении $I \gg I_{\text{нас}}$ следует, что при $I = \text{const}$ напряжение на диоде V является линейной функцией температуры T и может быть удобным термометрическим параметром:

$$V = \frac{kT}{e} \ln \frac{I}{I_0} + \frac{\varepsilon_g}{e} = AT + B, \quad (9)$$

где константы A и B не зависят от температуры. Константа A отрицательна, так как сопротивление полупроводника уменьшается с ростом температуры и, следовательно, при постоянном токе напряжение на образце тоже уменьшается. Поскольку значение I_0 и ε_g заранее не известны, то коэффициенты A и B должны определяться эмпирически при градуировке датчика и затем могут быть использованы для измерения температуры. Константа B позволяет также найти ε_g – ширину запрещенной зоны полупроводника.

В качестве датчика температуры в полупроводниковых термометрах обычно используются кремниевые или германиевые диоды.

Измерение температуры полупроводниковыми резистивными датчиками

Другими датчиками температуры могут служить специальные полупроводниковые сопротивления – **терморезисторы**, или термисторы. Они обычно изготавливаются из полупроводниковых окислов TiO_2 , MgO и ряда других веществ (например, BaTiO_3) с сильной зависимостью сопротивления от температуры. Терморезисторы имеют большой температурный коэффициент сопротивления:

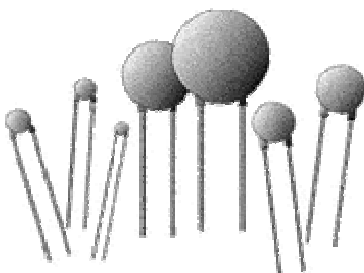


Рис. 7. Пример дисковых термисторов

$$\alpha = -\frac{1}{R} \frac{dR}{dT},$$

где R – сопротивление резистора. Коэффициент α может достигать величин порядка $0,05-0,1 \text{ K}^{-1}$ (что в десятки раз больше этого коэффициента у металлов). Преимуществом термисторов являются простота устройства, разнообразие

форм и миниатюрность, способность работать при значительных механических нагрузках, стабильность характеристик во времени. Терморезисторы изготавливаются в виде стержней, трубок, дисков, шайб, бусинок и тонких пластинок преимущественно методами порошковой металлургии. Их размеры могут варьироваться в пределах от 1–10 мкм до 1–2 см (рис. 7).

Недостатком таких термометров является нелинейная зависимость их сопротивления от температуры, которая приближенно описывается соотношением:

$$R = R_0 \exp\left(C\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right), \quad (10)$$

где C – константа, T и T_0 – температуры в градусах Кельвина, R и R_0 – сопротивления термистора при температурах T и T_0 соответственно.

Терморезисторные термометры требуют предварительной градуировки.

Полупроводниковые термометры нашли широкое применение благодаря их высокой точности, компактности, малой тепловой инертности, удобству применения в схемах.

Экспериментальная часть

Оборудование: полупроводниковый диод, терморезистор, амперметр, цифровой вольтметр, источник постоянного регулируемого напряжения, омметр, нагреватель со своим источником питания, жидкостный термометр.

В работе используются два вида полупроводниковых датчиков температуры: диод с p - n -переходом и терморезистор.

Экспериментальная установка

Блок-схема установки приведена на рис. 9. Изучаемые термодатчики (Д – кремниевый диод Д-814 и Т – терморезистор типа Т8Р) помещены в латунную капсулу С, заполненную глицерином, который увеличивает теплообмен со стенками капсулы. На капсулу намотан спиральный нагреватель Н, подключенный к независимому источнику напряжения ИПН. Одновременно в капсулу с глицерином помещен жидкостный термометр ЖТ, по показаниям которого можно независимо определять температуру в капсуле при градуировке изучаемых термометров.

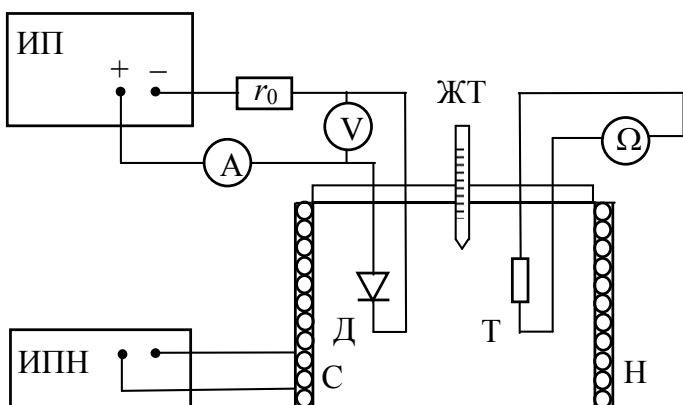


Рис. 9. Схема измерительной установки

Напряжение с источника питания ИП через ограничивающее сопротивление r_0 подается на диод Д в прямой полярности и измеряется вольтметром V. Сила тока в цепи диода определяется амперметром А. Сопротивление r_0 ограничивает максимальный ток через

диод Д. Терморезистор Т подключен к омметру Ω. Жидкостный термометр ЖТ используется для измерения температуры в капсуле.

диод, не допуская его перегрева и выхода из строя.

Сопротивление термистора T измеряется подключенным к нему омметром Ω .

Упражнение 1. Измерение температуры по вольтамперной характеристике диода

Для снятия вольтамперной характеристики диода включить источник питания ИП, цифровой вольтметр V и амперметр A . Шкалы приборов должны соответствовать рекомендованным для данной установки. Вольтметр должен быть переведен на шкалу, позволяющую измерять напряжение с точностью 0,001 В.

Постепенно увеличивая ток через диод (поворачивая ручку на панели источника питания ИП), снять вольтамперную характеристику диода, изменяя силу тока в указанном для данной установки диапазоне. Шаг при снятии зависимости $V(I)$ определить самостоятельно таким образом, чтобы было измерено не менее 15 точек во всем диапазоне возможных значений силы тока. Показания вольтметра V и амперметра A занести в таблицу.

Сопротивление диода много меньше ограничивающего сопротивления r_0 , а при увеличении тока через диод оно еще уменьшается. Поэтому напряжение на диоде, измеряемое вольтметром, значительно меньше, чем напряжение, создаваемое источником питания ИП.

Обработка результатов

Построить график зависимости $\ln I$ от V . Выделить область графика с линейной зависимостью (при малых напряжениях график нелинеен, так как в этой области взятое выше приближение $I_{\text{нас}} \ll I$ не выполняется). Методом МНК найти угловой коэффициент наклона линейного участка графика $M = \frac{d \ln I}{dV}$. По формуле (8) рассчитать температуру диода T . Оценить погрешность T .

Упражнение 2. Градуировка полупроводниковых термометров

В данном упражнении производится градуировка двух полупроводниковых термометров – **диода**, работающего в режиме постоянного тока, и **терморезистора**. Чтобы сила тока в цепи диода оставалась неизменной в процессе измерений, его сопротивление должно быть много меньше ограничительного сопротивления r_0 . Тогда ток через диод останется практически постоянным, несмотря на изменение температуры и сопротивления диода в процессе градуировки.

Установить силу тока через диод, указанную на установке. В дальнейшем при градуировке напряжение источника питания ИП не изменять. Измерение напряжения на диоде ведется с помощью цифрового вольтметра V . Погрешность измерений не должна превышать 0,001 В.

Измерение сопротивления терморезистора ведется омметром Ω .

Температура в капсуле с полупроводниковыми термометрами измеряется в процессе градуировки жидкостным термометром.

Записать показания вольтметра и омметра при комнатной температуре. Затем включить нагреватель, поставив ключ на панели с исследуемыми термометрами в положение «Вкл». Градуировка обоих датчиков ведется параллельно в режиме непрерывного нагрева. Мощность нагревателя рассчитана таким образом, чтобы нагрев происходил с небольшой скоростью, достаточной для установления одинаковых температур датчиков и термометра. Через каждые 2 К необходимо записывать показания вольтметра V и омметра в таблицу. Нагрев ведется до 50°C.

Обработка результатов

Построить графики зависимостей напряжения на диоде от температуры $V(T)$ и сопротивления терморезистора от температуры $R(T)$.

Для диода рассчитать константы A и B , соответствующие формуле (7) для линейной части графика. Определить чувствительность диодного термометра по напряжению

$$S_V = -\frac{\Delta V}{\Delta T} = -A \text{ (В/К)}.$$

Из параметра B рассчитать ε_g – ширину запрещенной зоны полупроводника в электрон-вольтах (эВ).

Для терморезистора в случае линейной зависимости его сопротивления от температуры $R(T)$ рассчитать его чувствительность по сопротивлению $S_R = -\frac{\Delta R}{\Delta T}$ в Ом/К.

В случае нелинейной зависимости $R(T)$ рассчитать чувствительность S_R для разных температур (не менее 5 значений) и построить график чувствительности по сопротивлению от температуры $S_R(T)$.

Сравнить по чувствительности диодный термометр и терморезистор в диапазоне температур 35-40°C, рассчитав «относительную» чувствительность данных приборов

$$S_{V_{\text{отн}}} = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T} \text{ и } S_{R_{\text{отн}}} = -\frac{1}{R_{\text{ср}}} \frac{\Delta R}{\Delta T}, \text{ где } R_{\text{ср}} \text{ – среднее значение сопротивления в}$$

диапазоне температур 35-40°C.

Упражнение 3. Измерение конечной температуры по вольтамперной характеристике диода

После достижения температуры порядка 50°C, не выключая нагреватель, ещё раз снять вольтамперную характеристику диода, аналогично тому, как это делалось в первом упражнении. Данные занести в таблицу. Должно быть измерено не менее 15 точек во всем диапазоне доступных значений силы тока через диод.

Аналогично упражнению 1 рассчитать температуру диода T , оценить её погрешность. Сравнить полученное значение с температурой, которая была получена в первом упражнении, и с показанием жидкостного термометра.

Контрольные вопросы

1. Что такое температура? Методы измерения температуры?
2. Какие материалы называются полупроводниками? Чем они отличаются от металлов и диэлектриков?
3. Какое свойство полупроводников используется для измерения температуры?
4. Как ведет себя сопротивление полупроводников с изменением температуры? Почему?
5. Распределение Больцмана и зависимость прямого тока p - n -перехода от напряжения.
6. P - n -переход и зависимость его прямого и обратного тока от температуры (качественно).
7. В чём преимущества и недостатки полупроводниковых термометров по сравнению с термопарными, жидкостными и термометрами сопротивления из металлов?
8. Что такое чувствительность полупроводникового термометра? Почему она зависит от температуры?
9. Объяснить физические основы формулы (10).
10. При каких температурах оптимально применение полупроводниковых термометров? Почему?

Литература

Обязательная

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Физматлит, 2011. §1-6, 31,62.
2. Н.Рейф. Берклевский курс физики, т.5. Статистическая физика. М.: Наука, 1986. § 4.1, 4.3
3. Матвеев А. Н. Молекулярная физика. М.: Бином, 2010, §11.
4. Калашиников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2003, § 151-154, 159, 198, 203-204.
5. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. М.: Физматлит, 2006, §100, 108.

Дополнительная

6. Жеребцов И.П. Основы электроники. Л.: Энергоиздат, 1985. §1.3.4; 1.3.5
7. Ашкрофт, Н., Мермин Н. Физика твердого тела. М.: Мир, 1975. т.2, гл.29, с.230.
8. Бонч-Бруевич В.Л. Калашиников С.Г. Физика полупроводников. М: Наука, 1977. Гл.VIII, §1.
9. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. Гл.11, с.407-411.