

## ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

**Цель работы:** знакомство с квантовой теорией электропроводности полупроводников, экспериментальное определение вольтамперных характеристик диодов.

**Оборудование:** вольтметр, миллиамперметр, микроамперметр, реостаты, диоды, переключатели.

### КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Электропроводность полупроводников нашла объяснение только в квантовой теории. В соответствии с этой теорией в свободных атомах электроны могут находиться только на дискретных энергетических уровнях, т.е. могут иметь определенные, дискретные значения энергии. Заполнение уровней электронами происходит по определенным правилам. Каждый из уровней, в зависимости от своих свойств, может принимать некоторое число электронов. При этом сначала происходит заполнение электронами наиболее низких уровней. Электроны, полностью заполняющие низкие уровни, называются внутренними. А электроны, находящиеся на не полностью заполненном уровне, являющемся следующим после заполненных уровней, называются валентными. Сам же уровень называется нормальным или основным. Все уровни, лежащие выше нормального, могут занимать валентными электронами только при возбуждении атома.

При образовании кристалла атомы располагаются настолько близко, что начинают оказывать сильное взаимодействие друг на друга. При этом нормальный уровень расщепляется на большое число близко расположенных подуровней, образующих энергетическую зону, как это показано на рис.1. Эта зона получила название валентной. Первый из возбужденных уровней расщепляется в энергетическую зону, получившую название зоны проводимости. **Внутренние энергетические уровни, полностью заполненные электронами, не расщепляются.** А возбужденные уровни,



рис.1

соответствующие возбужденным состояниям, теоретически также расщепляются в энергетические зоны при образовании кристалла. Однако практически для перевода электронов в эти зоны требуется столь большая энергия, что при этом кристаллы распадаются на отдельные атомы, и, следовательно, энергетические зоны перейдут в энергетические уровни свободных атомов.

Промежутки между энергетическими зонами, в которых нет разрешенных значений энергии, называются запрещенными зонами. Ширина разрешенных и запрещенных зон не зависит от размеров кристалла. Поэтому чем больше атомов содержит кристалл, тем теснее располагаются уровни в зоне. Ширина разрешенных зон по порядку величины составляет несколько электрон-вольт. Следовательно, если кристалл содержит  $10^{23}$  атомов, то расстояние между соседними подуровнями зоны будет составлять примерно  $10^{-23}$  электрон-вольт. Поэтому если электрону, находящемуся на энергетическом подуровне, выше которого находятся свободные подуровни, сообщить энергию порядка  $10^{-23}$  эВ, то этого будет достаточно для перевода электрона в более высокое энергетическое состояние. Переход электрона с одного энергетического уровня на другой означает изменение его полной энергии, а следовательно, и его кинетической энергии. Но при этом будет изменяться скорость электрона, с которой он движется в кристалле. Таким образом, **нахождение электронов на разных энергетических уровнях соответствует разным скоростям их движения в кристалле.**

Распределение электронов по энергетическим подуровням, как показывают выводы

квантовой механики, происходит в соответствии с принципом Паули, который для нашего случая утверждает, что на одном энергетическом подуровне не может быть более двух электронов. При этом эти электроны должны отличаться друг от друга направлением своих собственных механических моментов, т.е. спинами.

Рассмотренные квантово-механические закономерности позволяют в основных чертах объяснить явление электропроводности. При отсутствии внешнего электрического поля электроны определенным образом заполняют энергетические уровни, что соответствует определенному набору скоростей электронов. Направление скоростей распределено симметрично, что соответствует их беспорядочному движению и, следовательно, отсутствию в кристалле направленного перемещения заряженных частиц, т.е. электрического тока. При наличии электрического поля возможны три случая в зависимости от расщепления электронов по зонам и строения зон.

1. Пусть в кристалле валентная зона и зона проводимости разделены широкой запрещенной зоной и подуровни валентной зоны заполнены полностью. В этом случае для изменения энергии электронов под действием внешнего электрического поля, т.е. для возникновения электрического тока, необходимо перебросить часть электронов через запрещенную зону в зону проводимости, а для этого требуются большие энергии, которые могут создаваться электрическими полями с очень большой напряженностью. Поэтому при обычных условиях через такие кристаллы электрический ток не проходит, и данные вещества относятся к группе диэлектриков.

2. Пусть в кристалле валентная зона заполнена не полностью или она перекрывается зоной проводимости. В этом случае имеются свободные энергетические подуровни и для перехода на них электронов, требуются очень небольшие порции энергии, которые могут быть обеспечены даже слабыми внешними электрическими полями.

Таким образом, под действием внешнего электрического поля электроны могут приобрести добавочную скорость против направления поля, что приводит к возникновению электрического тока в кристалле. Кристаллы такого типа представляют собой металлы.

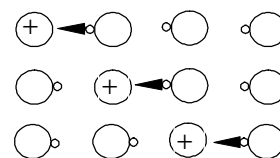


рис.2

3. Третий случай относится к полупроводникам (рис.2). Эти вещества характеризуются тем, что у них валентная зона, как и у диэлектриков, заполнена полностью, но запрещенная зона является узкой. Переход электронов из валентной зоны в зону проводимости возможен под действием сообщения кристаллу сравнительно небольших энергий, в частности под влиянием теплового движения частиц в самом кристалле. Электроны, перешедшие в зону проводимости под действием внешних электрических полей будут создавать электропроводность обычного типа, т.е. такую же, как и в металлах. Переход электронов из валентной зоны в зону проводимости создает в валентной зоне свободные места, получившие название «дырок». Это позволяет электронам валентной зоны также принимать участие в электропроводности. Под влиянием внешнего электрического поля на место образовавшейся дырки переходит электрон с более низкого уровня, а на его месте образуется новая дырка, затем сюда переходит следующий электрон и процесс повторяется. Таким образом, дырка перемещается в направлении противоположном перемещению электронов. Перемещение такой дырки эквивалентно перемещению положительного заряда. Практически перемещение дырки объясняется последовательными переходами электронов от одного положительного иона к другому, как это показано на рис.3. В результате таких процессов электропроводность в полупроводниках носит смешанный электронный и дырочный характер.

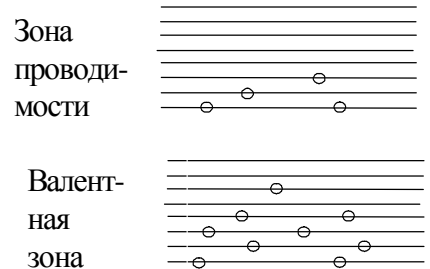


рис.3

Особую роль в проводимости проводников играют небольшие примеси в материалах полупроводников, которые приводят к образованию **дополнительных уровней**,

расположенных в пространстве запрещенной зоны чистого полупроводника. При этом возможны два типа примесей. Элементы примеси **первого типа имеют свой основной уровень вблизи зоны проводимости** полупроводника и могут довольно легко отдавать часть своих электронов, которые под действием теплового движения попадают в зону проводимости и образуют электронную электропроводность. В этом случае дырки не образуются. Энергетические уровни валентной зоны остаются заполненными полностью. Атомы примеси продолжительное время остаются в виде положительных ионов. **Примеси, отдающие свои электроны, называются донорными**, а полупроводники с донорными примесями и электронной проводимостью обозначаются буквой n (эн) и называются n-полупроводниками или n- кристаллами. По отношению к полупроводникам из германия и кремния донорными примесями являются пятивалентные элементы мышьяк и сурьма. К другому типу примесей относятся **вещества, нормальный энергетический уровень которых лежит вблизи валентной зоны полупроводника** и которые легко присоединяют электроны из этой зоны, образуя отрицательные ионы. При этом присоединенные электроны в проводимости не участвуют, в зоне проводимости электроны не появляются, а проводимость обеспечивается дырками, образованными в валентной зоне. **Вещества примесей, способные поглощать электроны полупроводника, называются акцепторными**, а полупроводники, обладающие дырочной проводимостью, обозначаются буквой p (пэ) и называются p- полупроводниками или p- кристаллами. По отношению к германию и кремнию акцепторными примесями являются атомы трехвалентных элементов индия и галлия.

Если соединить n- и p-кристаллы, то на границе раздела некоторое количество электронов n- кристалла перейдет в p- кристалл и прорекомбинирует там с дырками. В свою очередь часть дырок перейдет из p- кристалла в n- кристалл и прорекомбинирует там с электронами. В результате этих процессов в n- кристалле происходит уменьшение отрицательно заряженных частиц, а число положительно заряженных ионов донорной примеси остается неизменным и n- кристалл становится заряженным положительно. В свою очередь в p- кристалле происходит уменьшение положительных зарядов, а число отрицательных ионов акцепторной примеси останется неизменным и p- кристалл становится заряженным отрицательно. Эти **объемные заряды**

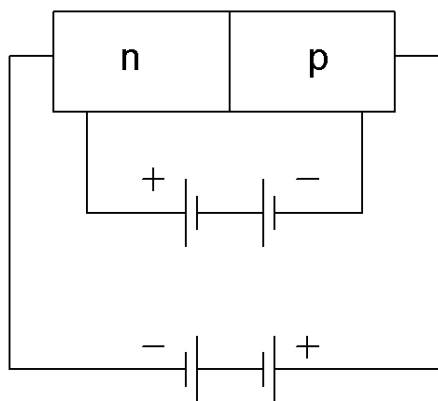


Рис.4

**создадут на границе раздела кристаллов электрическое поле, препятствующее дальнейшему перемещению электронов и дырок из одного кристалла в другой.** Условно этот скачок потенциалов можно изобразить электрической батареей, присоединенной как показано на рис.4.

Если теперь присоединить к кристаллам источник внешней ЭДС таким образом, что к p- кристаллу будет присоединен плюс, а к n- кристаллу - минус, то внешнее поле будет направлено против внутреннего. Поэтому оно будет уменьшать, а при достаточной величине и полностью компенсировать действие внутреннего поля, что облегчит передвижение свободных носителей электрических зарядов в пограничной области. Сопротивление этой области будет небольшим и ток через кристаллы может быть значительным.

Если изменить полярность внешнего источника ЭДС, то в этом случае внешнее поле в области контакта будет иметь то же направление, что и внутреннее поле и действует также, как и внутреннее, т.е. обедняет границу раздела кристаллов подвижными носителями зарядов. Сопротивление этой области сильно возрастает, ток проводимости резко уменьшается и будет осуществляться практически не основными, а сопутствующими носителями зарядов: электронами в p- кристалле и дырками в n- кристалле. Таким образом,

пограничный слой между p-р кристаллами представляет собой диод, т.е. прибор с односторонней проводимостью электрического тока.

При замене внешнего источника постоянной ЭДС источником переменного тока в течение того полупериода тока, когда к p- кристаллу подается положительная полярность, а к n-кристаллу- отрицательная, в цепи будет идти ток при малом сопротивлении на границе полупроводников, а в следующем полупериоде при изменении полярности сопротивление пограничного слоя резко возрастет и ток практически проходить не будет. Это свойство пограничного слоя между p и r- кристаллами используется для выпрямления переменного тока.

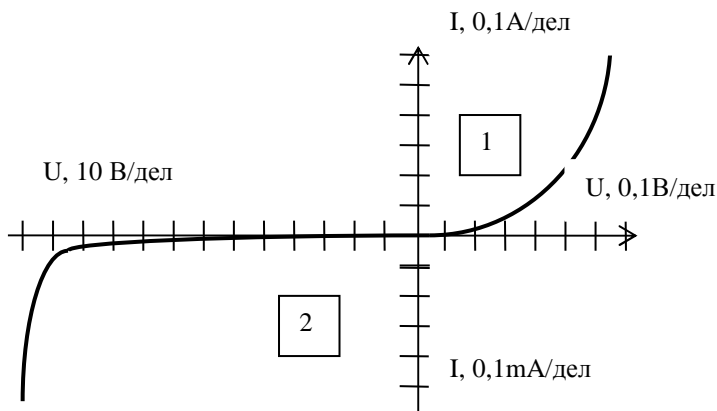


Рис.5. Вольтамперная характеристика полупроводникового диода

На рис.5 приведена типовая вольтамперная характеристика диода. Вольтамперной характеристикой (ВАХ) называется зависимость тока через какое-либо устройство от напряжения на его контактах. Участок кривой (1) в положительной полуплоскости называется **прямой** ветвью ВАХ. Участок кривой (2) в отрицательной полуплоскости называется **обратной** ветвью ВАХ. Особенностью графика является то, что масштаб по осям различный в отрицательной и положительной полуплоскости. Это

связано с тем, что ток через диод при прямом и обратном включении отличается во много раз. Согласно графика на рис.5 при прямом включении диода при токе 0,2 А падение напряжения на диоде составляет 0,5В. Сопротивление диода составит  $R = \frac{U}{I} = \frac{0,5B}{0,2A} = 2,5 \text{ ом}$ .

При обратном напряжении на диоде 100 В ток через диод равен 0,05 мА. Соответственно сопротивление диода будет  $R = \frac{U}{I} = \frac{10^2 B}{5 \cdot 10^{-5} A} = 2 \cdot 10^6 \text{ ом}$ . Сопротивление диода при прямом и обратном включении отличается в  $2 \cdot 10^6 / 2,5 = 0,8 \cdot 10^6$  раз. Этим определяется выпрямляющее действие диода.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема для измерения вольтамперных характеристик диода изображена на рис.6. Схема состоит из регулируемого источника напряжения ИП, амперметра, вольтметра и исследуемого диода D. При изменении напряжения, прикладываемому к диоду, ток через него меняется. Величины тока протекающего через диод измеряются амперметром. Напряжение между анодом и катодом диода измеряются вольтметром. Практически установка состоит из кассеты с встроенным регулируемым источником напряжения и отдельных многопредельных вольтметра и мллиамперметра

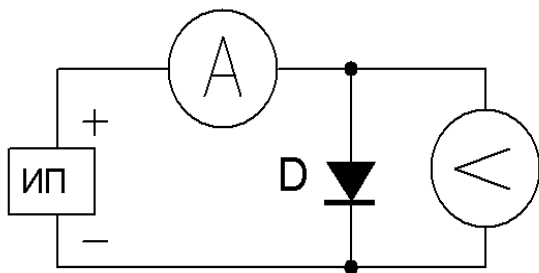


Рис.6

На рис.7 изображена монтажная схема установкм. Сплошными линиями изображены

проводники, соединяющие клеммы разъемов кассеты. Пунктирные линии - это проводники, соединяющие кассету с вольтметром и амперметром. Исследуемый диод устанавливается в разъем P8. Регулировка напряжения осуществляется вращением рукоятки «Reg.U».

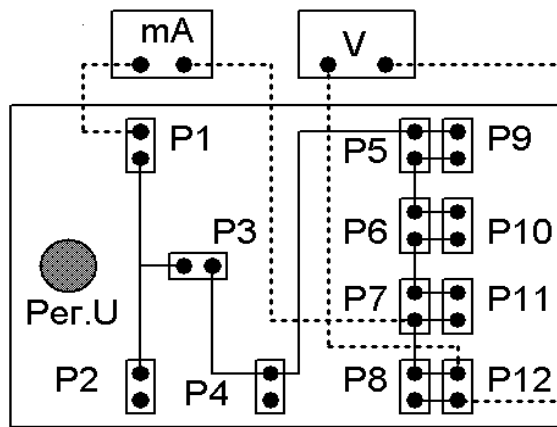


Рис.7

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теорию работы, установку и порядок выполнения работы и получить у преподавателя допуск к выполнению экспериментов.
2. Регулятор напряжения «Reg.U» повернуть против часовой стрелки.
3. Установить германиевый диод Д7Ж. в разъем P8
4. С разрешения преподавателя или инженера включить установку.
5. Увеличивая напряжение на диоде поворотом «Reg.U» по часовой стрелке, записывают в таблицу 1 значения токов и соответствующих напряжений.
6. Все значения токов и напряжений занести в **таблицу 1** и построить график зависимости  $I = f(U)$ . тока через диод от напряжения.

Таблица 1

Германиевый диод	U, В	$U_1=0$	$U_2=$	...	$U_{10}=$
	I, mA	...	...	...	...
кремниевый диод	U, В	...	...	...	...
	I, mA	...	...	...	...

7. Повторить измерения для диода Д226 (кремниевый) и **построить график. (ВАХ для обоих диодов построить на одном графике. По оси абсцисс откладываются напряжение на диоде, по оси ординат – токи, протекающие через диод)**
8. Выбрать на кривых  $I = f(U)$  для прямого включения диодов такие области, где кривые меняются меньше всего. Взять в этих областях значения тока и напряжения и определить величину внутреннего сопротивления диода.

$$R_i = \frac{U}{I}.$$

Ошибка вычисления сопротивления определяется по закону определения ошибок косвенных измерений:

$$\Delta R = \left| \frac{\partial R}{\partial I} \Delta I \right| + \left| \frac{\partial R}{\partial U} \Delta U \right|$$

$\Delta U$  определяется из класса точности вольтметра.

$\Delta I$  определяется из графиков зависимости  $I = f(U)$ . Для этой цели нужно измерить отклонение каждой экспериментальной точки от линии графика по направлению параллельному оси определяемой величины (силы тока)  $\Delta I_i$  и найти среднее значение этого отклонения. Эта величина и будет соответствовать ошибке измерения  $\Delta I$ .

Результаты записываются в виде:

$$R_{\text{прямое}} = R_1 \pm \Delta R \text{ и } \varepsilon_p = \frac{\Delta R}{R_p} \cdot 100\% = \dots$$

$$R_{\text{обратн}} = R_2 \pm \Delta R \text{ и } \varepsilon_{\%p} = \frac{\Delta R}{R_{\%p}} \cdot 100\% = \dots$$

При построении графика плавную кривую необходимо проводить так, чтобы как можно большее число экспериментальных точек легло на эту кривую, а те точки, которые не ложатся на кривую, должны располагаться по обе стороны кривой примерно на одинаковых расстояниях.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие энергетические уровни существуют в атоме?
2. Что происходит с этими уровнями при объединении атомов в кристалл?
3. Как ширина запрещенной зоны определяет проводимость?
4. Чем определяется величина прямого тока при полной компенсации потенциального барьера?
5. Чем объясняется очень малое сопротивление диода, включенного в прямом направлении?

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Савельев И.В. Курс общей физики Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. -М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.
2. Тамм И.Е. Основы теории электричества. - М.: Наука, 1976
3. Иродов И. Е. Электромагнетизм. -М.: Лаборатория базовых знаний, 2002.
4. Калашников Э.Г. Электричество. – М.:Наука, 1977.
5. Трапицын Н.Ф. Краткий курс общей физики. Ч.3. Электричество и магнетизм. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 1996
6. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. Т.2. Электричество и магнетизм. – М.: Наука, 1974.
7. Физический практикум. Ч.2./ Под ред. В.И. Ивероновой. -М.: «Наука». -1968.