

Ст. преподаватель Кирильчук О.В., Ст. преподаватель Виноглядков В.Н.

## Лабораторная работа № 5-9(н): Изучение полупроводникового диода

Студент: \_\_\_\_\_ группа: \_\_\_\_\_

Допуск \_\_\_\_\_ Выполнение \_\_\_\_\_ Защита \_\_\_\_\_

**Цель работы:** изучение принципа действия полупроводникового диода, снятие вольт – амперной характеристики диода при разных температурах, определение контактной разности потенциалов  $\phi_k$ .

**Приборы и материалы:** установка для изучения полупроводникового диода.

### Внешний вид установки



### Порядок выполнения работы

#### Упражнение 1. Снятие вольтамперной характеристики полупроводникового прибора

1. Ознакомьтесь с установкой. Кнопка включения установки находится на задней панели прибора.
2. Установите переключатель ВАХ-ВФХ в положение ВАХ.
3. Установите переключатель «Прямая-обратная» в положение «Прямая».
4. Кнопкой «+» задавая необходимое значение напряжения на индикаторе напряжения от 0.3 В до 0.7 В через 0,05 В, снимите соответствующие показания с индикатора силы тока (с учетом указателя единиц измерения мА или мкА) и результаты измерений запишите в таблицу 1.
5. Нажмите кнопку «Сброс». Установите переключатель «Прямая-обратная» в положение «Обратная».
6. Проведите измерения в интервале от 0,1 В до 10 В через 1 В. Результаты измерений запишите в таблицу 1.
7. По полученным данным постройте график ВАХ полупроводникового диода.

*Таблица 1*

Прямой ток		Обратный ток	
$U, В$	$I, мА$	$U, В$	$I, мкА$
0.30		0.1	
0.35		0.3	
0.40		0.5	
0.45		0.8	
0.50		1.0	
0.55		2.0	
0.60		3.0	
0.65		4.0	
0.70		5.0	
		6.0	
		7.0	
		8.0	
		9.0	
		10.0	

### Упражнение 2. Определение контактной разности потенциалов

Исходя из графика, представленного на рис.7., ВАХ диода на промежутке  $U > \varphi_k$  имеет практически линейный вид. Прямая, являющаяся продолжением почти линейного участка ВАХ, пересекает ось напряжений в точке  $U = \varphi_k$ . Для проверки совпадения экспериментальной зависимости  $I = f(U)$  при  $eU \geq kT$  с теоретической зависимостью данного полупроводникового диода используется метод наименьших квадратов.

1. Заполните таблицу 2, используя результаты предыдущего упражнения для прямого тока (возьмите последние 5 значений).
2. В данном случае зависимость  $I = f(U)$  определяется линейной функцией вида  $y = Ax + B$ , где  $x=U$ ;  $y=I$ .

Таблица 2

№	U, В	I, А	$x_i$	$y_i$	$x_i^2$	$x_i y_i$	$y_i - \langle y \rangle$	$(y_i - (Ax_i + B))^2$
1								
2								
3								
4								
5								
$\Sigma$								

$$A = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

Определив значения параметров  $A$  и  $B$ , запишите уравнение прямой. Постройте прямую на графике зависимости силы тока от напряжения (ВАХ).

3. По формулам  $S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - Ax_i - B)^2}{n - 2}$  и  $S_{on}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \langle y \rangle)^2}{n - 1}$  определите дисперсию адекватности и дисперсию опыта, где  $n$  – число измерений.

4. По полученным данным найдите критерий Фишера  $F = \frac{S_{ad}^2}{S_{on}^2}$  и проверьте двухстороннее неравенство:

$$\frac{1}{F_{табл}} \leq F \leq F_{табл}, \quad \text{где } F_{табл} = 6.59.$$

Если неравенство выполняется, то с вероятностью  $p = 0,95$  можно утверждать о линейной зависимости силы тока  $I$  от напряжения  $U$  в Вашем эксперименте.

5. Сделайте вывод о соответствии зависимости  $y = Ax + B$  полученным экспериментальным данным и определите по графику значение контактной разности потенциалов  $\varphi_k$  (это точка пересечения полученной прямой с осью OX).
6. Запишите ответ.

### Контрольные вопросы

1. Расскажите об электрических свойствах твёрдых тел. Что представляют собой проводники, полупроводники и диэлектрики? В чём их основные отличия?
2. Сформулируйте основные положения зонной теории твёрдого тела.
3. Что такое собственная проводимость полупроводников?
4. Что такое примесная проводимость полупроводников? Опишите механизм образования полупроводников  $p$  и  $n$  типа.
5. Объясните образование  $p$  -  $n$  перехода и принцип его работы.
6. Нарисуйте и объясните характер поведения вольтамперной характеристики  $p$  -  $n$  перехода.

### Краткие теоретические сведения

Существуют вещества, которые по проводимости электрического тока занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Такие вещества называют **полупроводниками**. К ним относится целый ряд химически чистых элементов (германий, кремний, селен и др.), а также некоторые химические соединения (минералы, сульфиды, оксиды).

#### Основные отличия в электрических свойствах проводников, полупроводников и диэлектриков

##### 1. различная величина удельного сопротивления $\rho$ :

- **проводники** (вещества, которые хорошо проводят электрический ток, например, металлы, электролиты).

Хорошая проводимость тока объясняется наличием у них большого количества свободных носителей тока.

В проводниках – свободных электронов, в электролитах - положительных и отрицательных ионов,

в ионизированных газах - положительных и отрицательных ионов и свободных электронов.

$$\text{У проводников} \quad \rho_{np} = (10^{-8} \div 10^{-6}) \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

- **полупроводники** (вещества, которые занимают промежуточное положение по проводимости электрического тока между проводниками и диэлектриками, например, кремний, германий, индий и др.)

Плохая проводимость тока объясняется наличием у них небольшого по сравнению с проводниками количества свободных носителей тока. В полупроводниках носителями тока являются электроны проводимости и дырки.

$$\text{У полупроводников} \quad \rho_{np} = (10^{-5} \div 10^7) \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

- **диэлектрики** (вещества, которые не проводят электрический ток, например, стекло, керамика, полимеры и др)

Отсутствие проводимости тока объясняется отсутствием у них свободных носителей тока.

$$\text{У диэлектриков} \quad \rho_d = (10^8 \div 10^{13}) \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

##### 2. различная зависимость удельного сопротивления от температуры:

- у проводников с повышением температуры удельное сопротивление увеличивается,

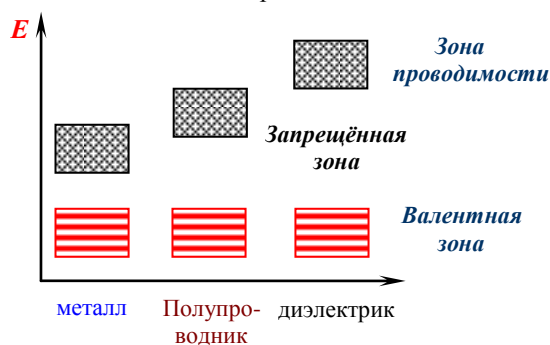
- у полупроводников и диэлектриков с повышением температуры удельное сопротивление уменьшается.

##### 3. различная зависимость силы тока, текущего через вещество, от напряжения:

- у проводников зависимость линейная (выполняется закон Ома),

- у полупроводников и диэлектриков зависимость нелинейная (не выполняется закон Ома).

Классическая теория электропроводности не смогла объяснить существование в природе полупроводников и диэлектриков. Это удалось объяснить в рамках, так называемой, **зонной теории твёрдого тела** (квантовой теории, согласно которой, энергетический спектр электронов в кристалле вещества представляет собой ряд чередующихся между собой зон разрешённых и запрещённых энергий электронов). По этой теории различие в электрических свойствах веществ объясняется различным заполнением электронами зон разрешённых энергетических уровней.



Образование зон при объединении одиночных атомов в кристалл связано с особыми квантовыми свойствами электронов, которые выражаются **принципом Паули**:

**в квантовомеханической системе не может быть электронов в совершенно одинаковом квантовом состоянии (то есть с одинаковым набором квантовых чисел).**

Благодаря этим свойствам при образовании кристалла происходит расщепление энергетических уровней изолированного атома на множество близкорасположенных, но несовпадающих друг с другом подуровней, число которых пропорционально количеству атомов в кристалле. Например, в металле в  $1 \text{ м}^3$  содержится  $10^{28}$  атомов. При ширине зоны порядка 1 эВ расстояния между подуровнями оказываются

приблизительно  $10^{-28}$  эВ ( $1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ).

Таким образом, каждому энергетическому уровню изолированного атома в кристалле соответствует **зона разрешённых энергий электронов**, которые разделены между собой **зонами запрещённых энергий электронов** (то есть, электронов с такими энергиями в кристалле нет). На каждом подуровне любой энергетической зоны может находиться не более двух электронов с противоположными спинами (это связано с особенностями свойств электронов).

**Зоной проводимости** называется следующая за валентной разрешённая энергетическая зона.

(при  $T = 0 \text{ К}$  она может быть либо полностью свободной, либо частично заполненной)

**Валентной зоной** называется самая верхняя разрешённая энергетическая зона, полностью заполненная валентными электронами при температуре  $T = 0 \text{ К}$ .

Наиболее характерным свойством полупроводников является то обстоятельство, что их удельное сопротивление может значительно изменяться под влиянием внешних воздействий. При определённых условиях (например, увеличении температуры, освещенности, в сильных электрических полях и т.д.) эти электроны могут приобрести энергию, достаточную для того, чтобы оторваться от атома и стать свободными электронами проводимости (на рис. 1 электроны обозначены тёмными кружочками). Энергию, необходимую для образования свободного электрона, называется *энергией активации*. На месте ушедшего электрона в валентной зоне образуется вакантное место, которое называют «дыркой» (на рис. 1 «дырка» обозначена светлым кружочком). Благодаря образованию «дырок» электроны валентной зоны, которые связаны с атомами кристаллической решётки, получают возможность наряду со свободными электронами так же участвовать в токе проводимости, если в кристалле создать электрическое поле. Это объясняется следующим образом: под



Четырёх  
валентный  
германий *Ge*

рис. 1

действием сил со стороны электрического поля, один из валентных электронов какого-либо атома может перейти на вакантное место соседнего атома. В результате такого перехода в первом атоме образуется вакансия, то есть «дырка», а во втором атоме вакансия исчезает. «Дырки» в кристалле перемещаются по направлению внешнего электрического поля, то есть ведут себя как положительно заряженные частицы. Таким образом, движение «дырок» не является перемещением какой-то реальной положительной частицы. На самом деле по кристаллу движутся валентные электроны, переходя от одного атома на свободное вакантное место соседнего атома, и далее по кристаллу, образуя электрический ток (при этом эти электроны остаются связанными с атомами кристалла). Можно считать, что «дырки», как и электроны, перемещаются по полупроводнику и являются носителями электрического тока.

Если полупроводник химически чистый, то концентрации свободных электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне оказываются одинаковыми. Такие полупроводники называются **собственными**, а их механизм проводимости электрического тока называют **собственным**.

Собственная проводимость очень маленькая и обычно не представляет практического интереса. Для увеличения электрической проводимости полупроводников применяют примеси.

### Примесные полупроводники

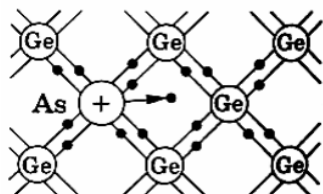
**Примесными** называются полупроводники, электрическая проводимость которых обусловлена наличием в собственном полупроводнике примесей.

(например, при введении в кремний всего лишь 0.001% примеси бора увеличивает его проводимость в миллион раз)

Различают два типа примесных полупроводников:

- ***n*** - типа (основными носителями тока являются свободные электроны в зоне проводимости),
- ***p*** - типа (основными носителями тока являются дырки в валентной зоне).

П П ***n*** - типа



Пяти  
валентный  
мышьяк *As*

### Получение полупроводников ***n*** – типа

В кристаллическую решётку чистого полупроводника вводят примесь валентностью на единицу больше (например, в чистый четырёхвалентный германий *Ge* (или кремний *Si*) вводят примесь пятивалентного мышьяка *As*). В этом случае четыре валентных электрона мышьяка образуют четыре ковалентные связи с четырьмя валентными электронами соседних атомов германия, а пятый электрон мышьяка оказывается лишним, слабосвязанным с ядром, который может довольно легко при тепловых колебаниях атома мышьяка оторваться от него и стать свободным электроном проводимости. При этом атом мышьяка превращается в положительно заряженный ион, который свободно перемещаться по кристаллу не может. Примеси, поставляющие полупроводникам свободные электроны, называются **донорными**.

Введение примеси в основную решётку искажает внутреннее электрическое поле кристалла, что приводит к возникновению в запрещённой зоне, так называемого, **донорного энергетического уровня *D*** вблизи дна зоны проводимости (см. рис 2).

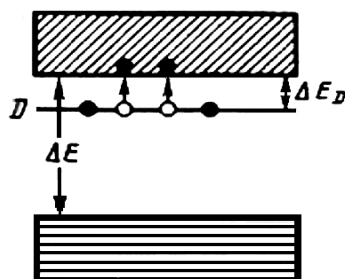
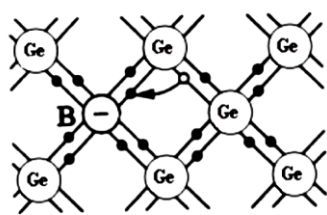


рис. 2

Так как расстояние от донорного энергетического уровня  $\Delta E_D$  до потолка зоны проводимости много меньше ширины запрещённой зоны  $\Delta E$  (то есть  $\Delta E_D \ll \Delta E$ ), то уже при комнатных температурах энергии теплового движения оказывается достаточно, чтобы перебросить электроны с примесного уровня в зону проводимости.

П П *p* - типа

Получение полупроводников *p* – типа



Трёх валентный бор B

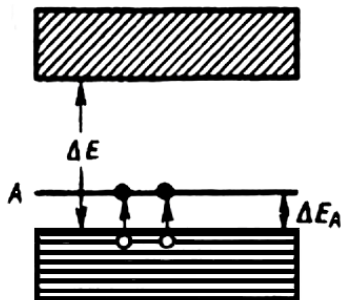


рис. 3

В кристаллическую решётку чистого полупроводника вводят примесь валентностью на единицу меньше (например, в чистый четырёхвалентный германий *Ge* (или кремний *Si*) вводят трёхвалентную примесь бора *B*). В этом случае валентные электроны примеси бора образуют три ковалентные связи с тремя валентными электронами соседних атомов германия. Образование четвёртой ковалентной связи осуществляется путём захвата атомом бора одного электрона у атома кремния из соседней кристаллической ячейки (это оказывается возможным из-за того, что атом бора по размерам меньше атома германия, в результате чего его валентные электроны оказываются ближе к ядру и сильнее притягиваются к нему, чем валентные электроны атома германия). При этом атом бора превращается в отрицательно заряженный ион, который свободно перемещаться по кристаллу не может, и образуется вакансия электрона (то есть «дырка») у «обварованного» атома германия.

Примеси, поставляющие полупроводникам дырки в валентной зоне, называются **акцепторными**.

Введение примеси бора в основную решётку искажает внутреннее электрическое поле кристалла атомов кремния, что приводит к возникновению в запрещённой зоне, так называемого, **акцепторного энергетического уровня A** вблизи потолка валентной зоны (см. рис. 3).

Так как расстояние от акцепторного энергетического уровня до потолка валентной зоны  $\Delta E_A$  много меньше ширины запрещённой зоны  $\Delta E$  (то есть  $\Delta E_A \ll \Delta E$ ), то уже при комнатных температурах энергии теплового движения оказывается достаточно, чтобы перебросить электроны с валентной зоны на примесные уровни, в результате чего в валентной зоне образуются электронные вакансии, то есть «дырки», которые могут

участвовать в токе проводимости.

**Зонная структура металлов, полупроводников и диэлектриков**

**Валентной зоной** называется самая верхняя разрешённая энергетическая зона, полностью заполненная валентными электронами.

**Зоной проводимости** называется следующая разрешённая энергетическая зона, лежащая выше валентной.

(при  $T = 0$  К она может быть либо полностью свободной от электронов, либо частично заполненной)

В зависимости от степени заполнения электронами зон проводимости и ширины запрещённой зоны, вещества ведут себя как проводники, полупроводники или диэлектрики. Возможны четыре различных случая, представленных на рис. 4. Для этого рассмотрим вещество при температуре  $T = 0$  К.

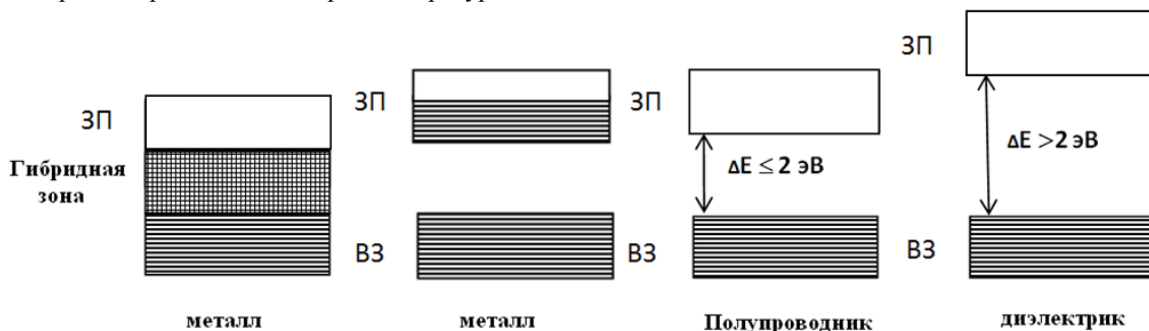


рис. 4 возможные случаи заполнения энергетических зон

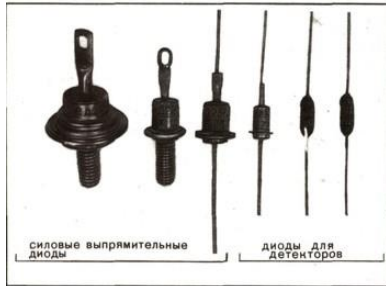
1. Если полностью заполненная валентная зона ВЗ перекрывается с вышерасположенной свободной зоной проводимости ЗП, с образованием, так называемой, **гибридной зоны**, то такое вещество будет вести себя как **проводник**.
2. Если над полностью заполненной валентной зоной ВЗ находится частично заполненная зона проводимости ЗП, то такое вещество будет вести себя тоже как **проводник**.
3. Если над полностью заполненной валентной зоной ВЗ находится свободная от электронов зона проводимости ЗП и ширина запрещённой зоны окажется меньше или равно 2 эВ (то есть  $\Delta E \leq 2$  эВ), то такое вещество будет вести себя как **полупроводник** (надо отметить, что при температуре  $T = 0$  К полупроводники ведут себя как диэлектрики).
4. Если над полностью заполненной валентной зоной ВЗ находится свободная от электронов зона проводимости ЗП и ширина запрещённой зоны окажется больше 2 эВ (то есть  $\Delta E > 2$  эВ), то такое вещество будет вести себя как **диэлектрик**.

### Полупроводниковый диод

**Полупроводниковым диодом** называется устройство, представляющее собой двухслойный полупроводниковый кристалл с разными типами электрической проводимости (полупроводниковый диод служит в основном для преобразования переменного тока в постоянный ток).

Один слой полупроводникового диода содержит акцепторную примесь и обладает проводимостью  $p$ -типа, а другой – донорную примесь и обладает проводимостью  $n$ -типа.

При совмещении полупроводников  $p$ -типа и  $n$ -типа возникает пограничная область, называемая  **$p$ - $n$  переходом** (или электронно – дырочным переходом), основным свойством которого является способность проводить ток преимущественно в одном направлении.



Внешний вид полупроводниковых диодов

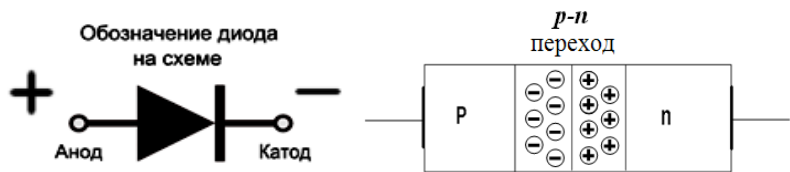
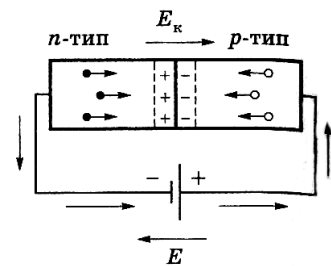


схема образования  $p$ - $n$ -перехода

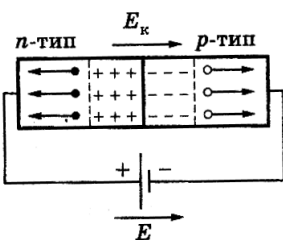
### Причина возникновения $p$ - $n$ -перехода

При контакте двух полупроводников  $p$  и  $n$ -типов начинается процесс диффузии: дырки из  $p$ -области, где их концентрация выше, переходят в  $n$ -область, а электроны, наоборот, из  $n$ -области, где их концентрация выше, переходят в  $p$ -область. В результате этой диффузии в  $n$ -области вблизи зоны контакта в процессе рекомбинации электронов с дырками, возникает объёмный положительный заряд за счёт положительных ионов примеси  $As^+$ . Аналогично в  $p$ -области возникает объёмный отрицательный заряд, но уже за счёт отрицательных ионов примеси  $B^-$ . Таким образом, в результате диффузии и рекомбинации электронов и дырок на границе раздела полупроводников образуются области с противоположными по знаку зарядами, которые образуют своё внутреннее электрическое поле, препятствующее дальнейшему движению электронов и дырок навстречу друг другу. Этот **запирающий слой**, достигает обычно толщины в несколько десятков или сотен межатомных расстояний и создаёт на границе раздела полупроводников **запирающее напряжение**, равное, например, для германиевого  $p$ - $n$ -перехода 0.35 В. Таким образом, между полупроводниками возникает **контактная разность потенциалов**. Образовавшееся электрическое поле вызовет **диффузионный ток**  $I_{диф}$  (движение неосновных носителей тока), направление которого противоположно движению основных носителей (**дрейфовый ток**  $I_{дрейф}$ ). При определенной величине контактной разности потенциалов, оба этих тока уравниваются и результирующий ток через переход становится равным нулю. Такое состояние перехода называется **равновесным**.

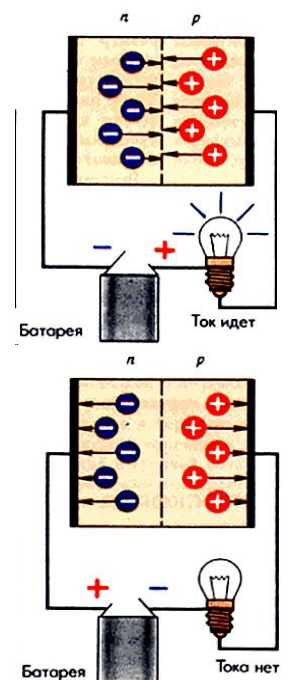
### Принцип работы $p$ - $n$ -перехода



Если к  $p$ - $n$ -переходу подать напряжение такого направления, чтобы плюс был подключен к  $p$ -области, а минус - к  $n$ -области (такое напряжение называют **прямым**), то внешнее электрическое поле источника тока вызовет движение основных носителей тока в направлении  $p$ - $n$ -перехода, где они начнут интенсивно рекомбинировать. В результате этого величина контактной разности потенциалов снижается, толщина и сопротивление  $p$ - $n$ -перехода уменьшаются и ток через переход растет по экспоненте за счет основных носителей тока.



Если к  $p$ - $n$ -переходу подать напряжение такого направления, чтобы плюс был подключен к  $n$ -области, а минус - к  $p$ -области (такое напряжение называют **обратным** или **запирающим**), то внешнее электрическое поле источника тока вызовет движение основных носителей тока в направлении от  $p$ - $n$ -перехода. В результате этого величина контактной разности потенциалов возрастёт, сопротивление  $p$ - $n$ -перехода увеличится



и соответственно уменьшится ток основных носителей. Возникающий при этом обратный ток какое-то время зависит как от основных, так неосновных носителей тока и изменяется по экспоненте, но быстро достигает насыщения. Это объясняется тем, что величина потенциального барьера становится так велика, что дрейфовый ток обращается в ноль. В дальнейшем, при увеличении напряжения, величина обратного тока будет определяться полностью неосновными носителями и изменяться не будет, достигая **тока насыщения**.

### Вольтамперная характеристика (ВАХ) полупроводникового диода

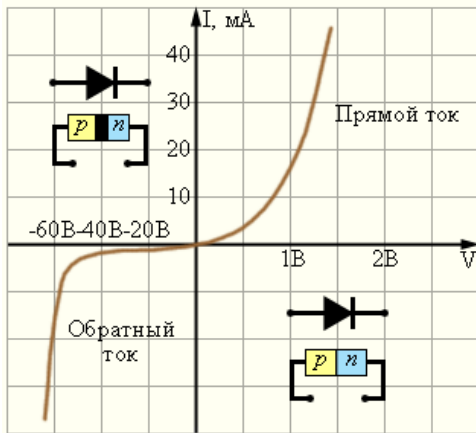


рис.6. ВАХ полупроводникового диода

Так как электрический ток в полупроводниках создается основными и неосновными носителями электрического тока, то имеются различия в зависимости  $I = f(U)$  для прямого и обратного тока (см. рис 6 и 7). Ток, текущий через p – n – переход, состоит из двух составляющих:

$$I = I_{\text{диф}} + I_{\text{дрейф}} = I_{\text{нтт}} + I_{\text{онт}}$$

где  $I_{\text{диф}}$  – диффузная,  $I_{\text{дрейф}}$  – дрейфовая составляющие электрического тока.  $I_{\text{нтт}}$  – ток неосновных,  $I_{\text{онт}}$  – ток основных носителей.

При прямом включении полупроводника ( $U > 0$ ), величина потенциального барьера уменьшается, и прямой ток, обусловленный в основном за счёт основных носителей тока, экспоненциально растёт по закону

$$I_{\text{прямой}} = I_0 \left( e^{\frac{|e|U}{kT}} - 1 \right).$$

При обратном включении полупроводника ( $U < 0$ ), величина потенциального барьера уменьшается, и обратный ток, обусловленный неосновными носителями тока, сначала экспоненциально растёт по закону  $I_{\text{обратный}} = I_0 \left( e^{-\frac{|e|U}{kT}} - 1 \right)$ . Затем при некотором напряжении  $U$ , когда  $e^{-\frac{|e|U}{kT}} \ll 1$ , ток достигает предельного значения  $I_{\text{обратный}} = -I_0$ , которое называется **током насыщения**.

При дальнейшем увеличении обратного напряжения может наступить **электрический пробой** p – n – перехода (это резкое возрастание обратного тока, обусловленное эффектом ударной ионизации атомов кристаллической решетки электронами, приобретающими высокие скорости под действием приложенного напряжения). Это может привести к разрушению p – n – перехода и выхода из строя полупроводникового диода.

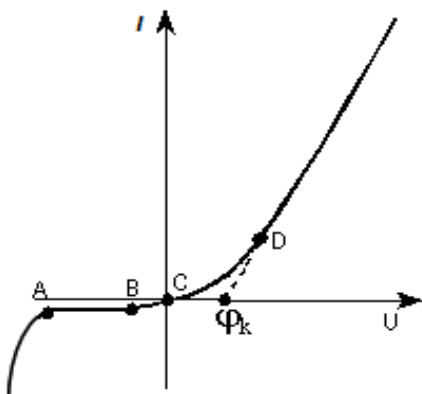


рис.7. ВАХ полупроводникового диода

Если внешнее напряжение достигает значения контактной разности потенциалов  $\varphi_k$ , то потенциальный барьер полностью исчезает, и с этого момента сила тока зависит от напряжения линейно (см. рис. 7), т.е. полупроводниковый диод при  $U \geq \varphi_k$  представляет собой обычное омическое сопротивление. Следовательно, если экстраполировать прямолинейный участок зависимости  $I = f(U)$  до пересечения с осью напряжений, можно определить значение контактной разности потенциалов  $\varphi_k$ .