

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Автономное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Институт неразрушающего контроля**

Дисциплина «Материалы электронной техники»

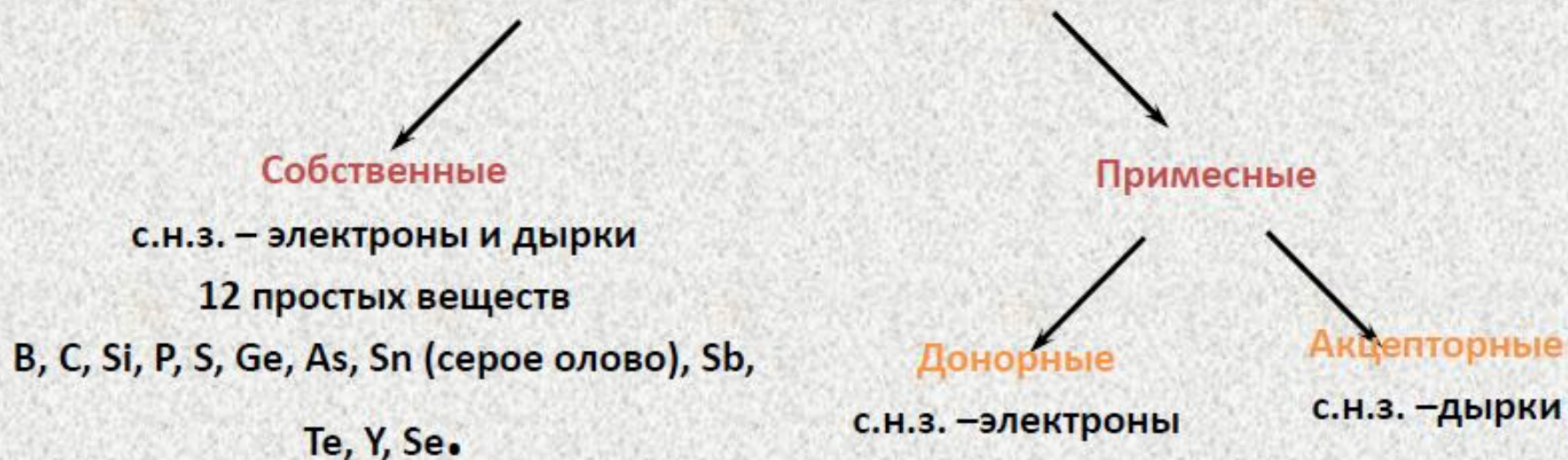
# ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Гормаков А.Н., доц. каф. ТПС  
ИНК НИ ТПУ, 2017 г.

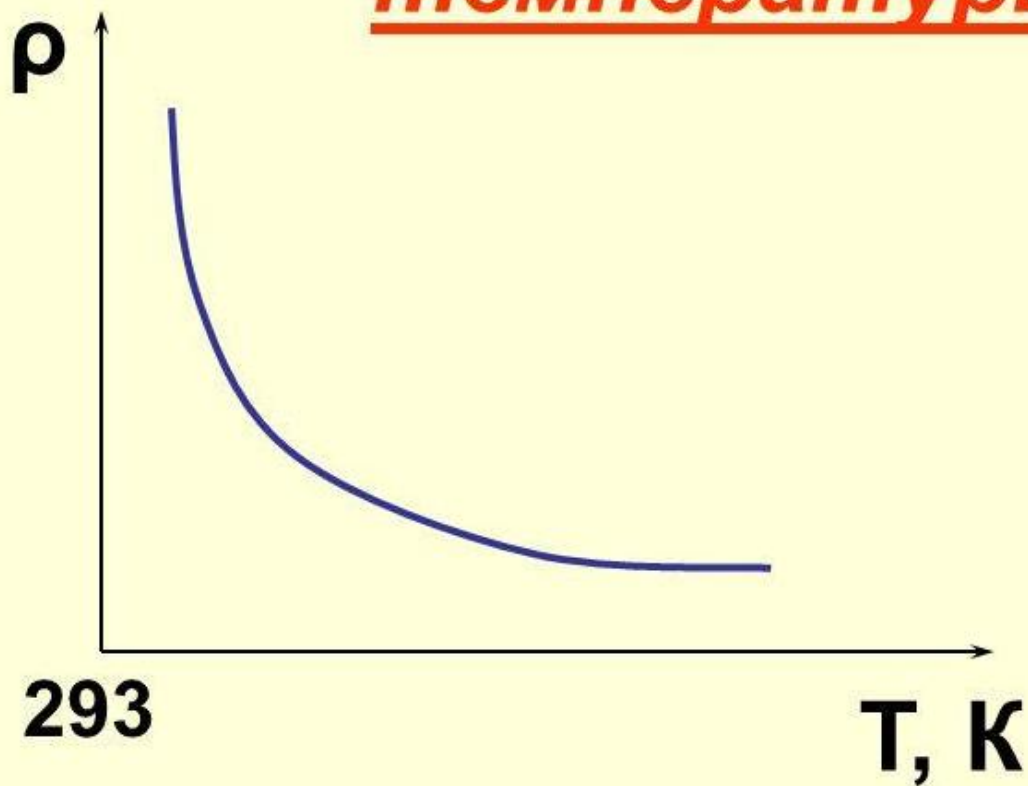
# ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ -

вещества, основным свойством которых является сильная зависимость электропроводности от внешних факторов

## 2.1 Классификация полупроводников по типу электропроводности



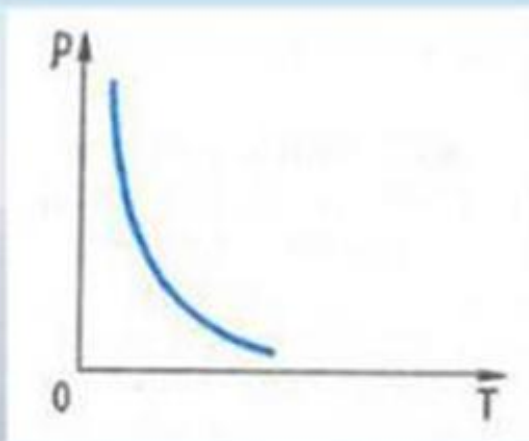
# Зависимость сопротивления полупроводника от температуры



- Кремний
- Германий
- Селен
- PbS
- CdS
- и т. д.

Рис.1

# Полупроводники



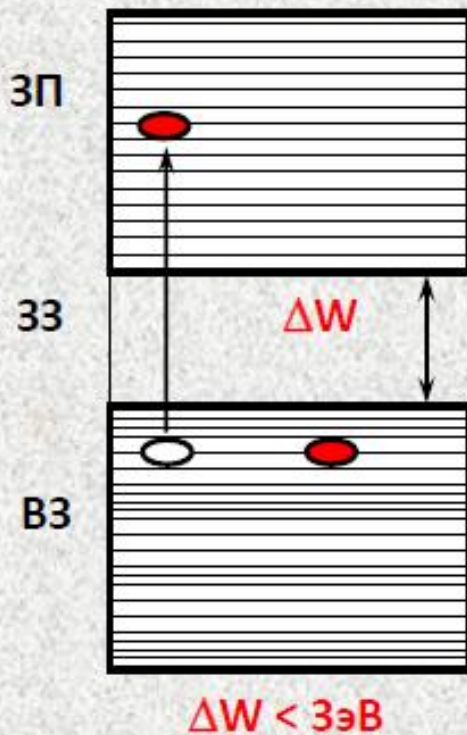
**Полупроводники** – вещества у которых удельное сопротивление с повышением температуры уменьшается

4/5 земной коры: германий, кремний, селен и др., множество минералов, различные оксиды, сульфиды - являются **полупроводниками**

- Собственная проводимость полупроводников
- Примесная проводимость полупроводников

полупроводники

$$\rho_V \sim 10^{-4} \div 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$



$A^I B^{VII}$  (AgCl, CaBr и др.),  
 $A^{II} B^{VI}$  (CdS, CdSe и др.),  
 $A^{III} B^V$  (GaP, GaAs и др.),  
 $A^{IV} B^{IV}$  (PbS, GeO<sub>2</sub> и др.),  
 $A^I B^{VI}$  (CuS и др.)

$A^I B^{VII} C^{VI}$  (CuAlS<sub>2</sub>, CuInS<sub>2</sub> и др.);  $A^I B^V C^{VI}$  (CuSbS<sub>2</sub>,  
CaAsS<sub>2</sub> и др.);  $A^I B^{VIII} C^{VI}$  (CuFeSe<sub>2</sub> и др.);  
 $A^{II} B^{IV} C^V$  (ZnSiAs<sub>2</sub>, ZnGeAs и др.);  $A^{IV} B^V C^{VI}$

Рис. 2

**Энергия активации ( $\Delta W$ )** – минимальная энергия, необходимая для перевода электрона в зону проводимости

Достойного полупроводникового соперника электронной лампе, названного транзистором, создали в 1948 г. американские ученые Браттейн, Бардин и Шокли.



Рис. 3

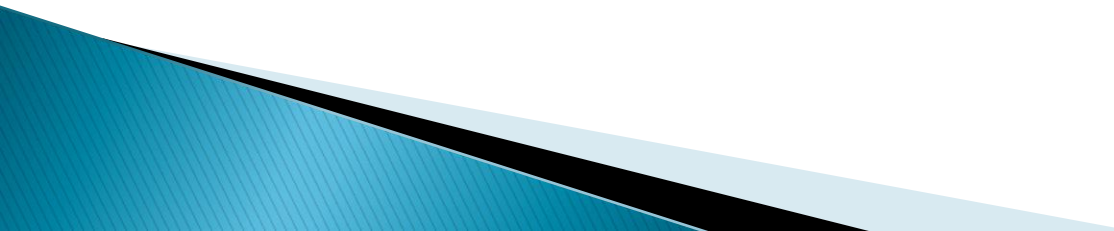


*Рис. 4.  
Современный макет  
транзистора  
Бардина и Браттейна*

В нашей стране большой вклад в разработку полупроводниковых приборов внесли А. Ф. Иоффе, Л. Д. Ландау, Б. И. Давыдова, В.Е. Лошкарев и ряд других ученых и инженеров, многие научные коллективы.

По электрическим свойствам полупроводники занимают среднее место между проводниками и непроводниками тока.

К группе полупроводников относится гораздо больше веществ, чем к группам проводников и непроводников, взятых вместе.







Электропроводность полупроводников сильно зависит от окружающей температуры. При очень низкой температуре, близкой к абсолютному нулю ( $-273\text{ C}$ ), они ведут себя по отношению к электрическому току как изоляторы. Большинство же проводников, наоборот, при такой температуре становятся сверхпроводимыми, т.е. почти не оказывают току никакого сопротивления. С повышением температуры проводников их сопротивление электрическому току увеличивается, а сопротивление полупроводников уменьшается.

Электропроводность проводников не изменяется при действии на них света. Электропроводность же полупроводников под действием света, так называемая **фотопроводность**, повышается. Полупроводники могут преобразовывать энергию света в электрический ток (рис. 5-8).

Проводникам же это совершенно не свойственно.

 = DC 12 ВОЛЬТ  
 ~ AC 220 ВОЛЬТ

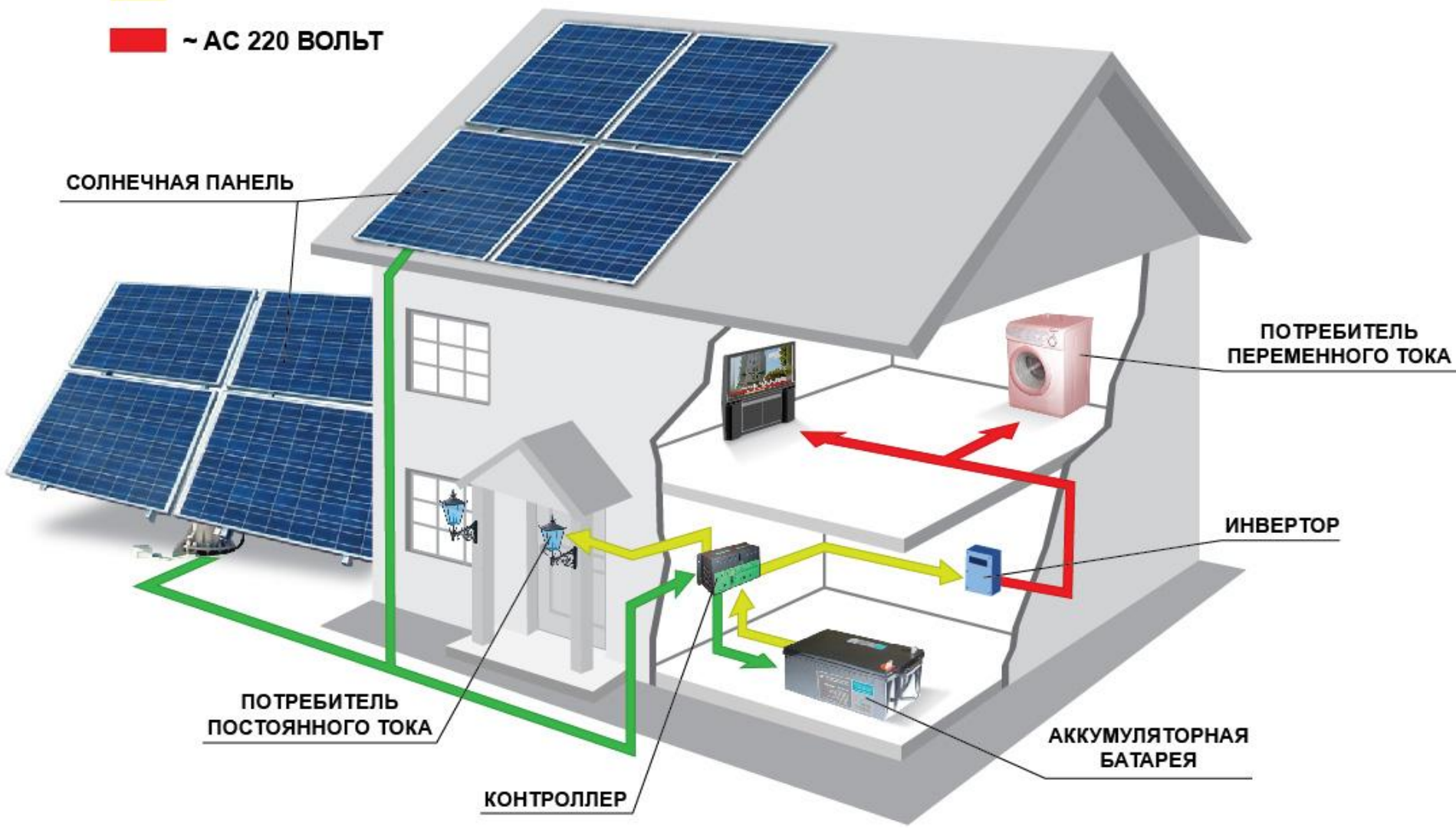


Рис.5



Рис.6



Рис.7

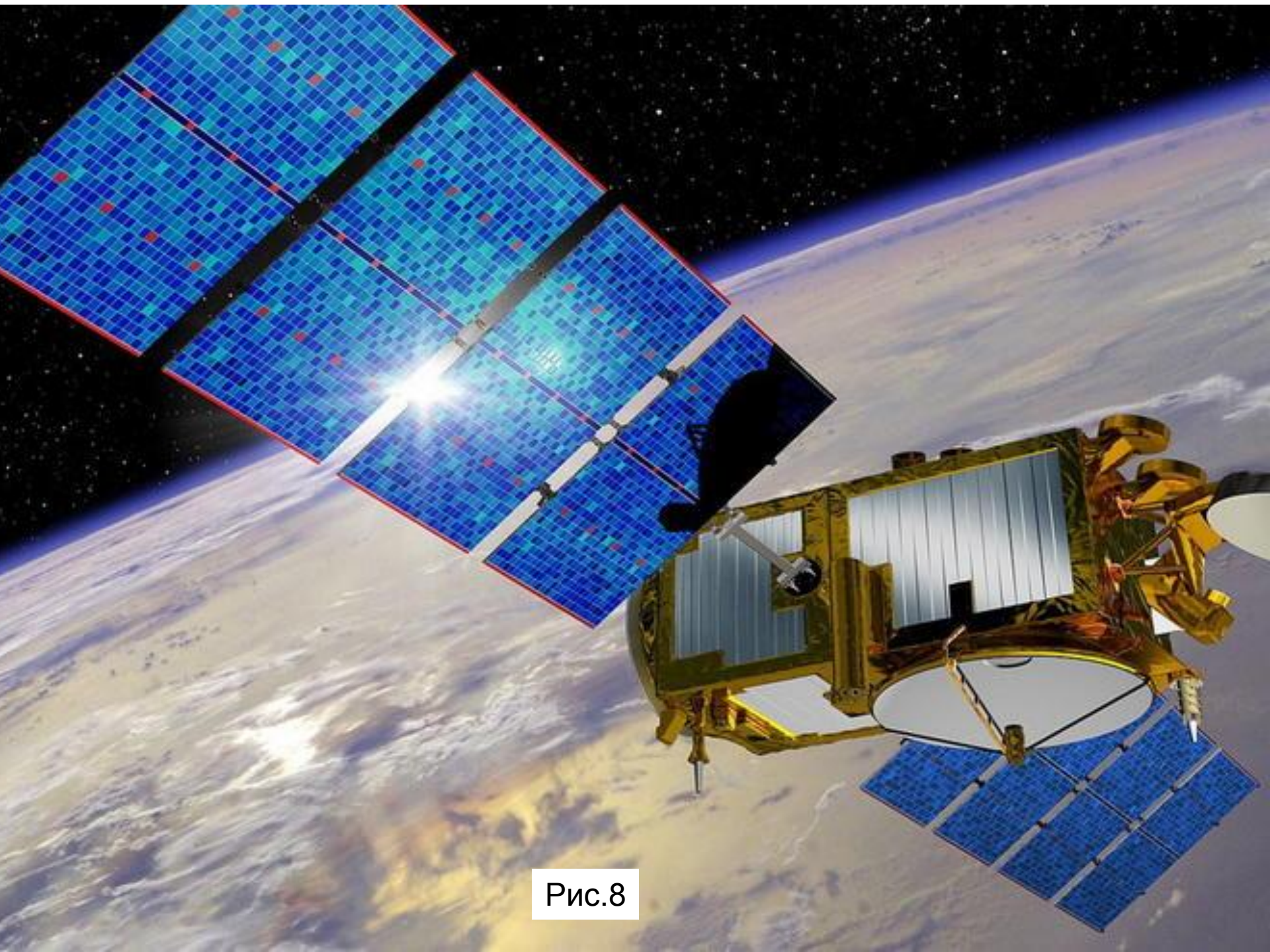


Рис.8

Электропроводность полупроводников резко увеличивается при введении в них атомов некоторых других элементов. Электропроводность же проводников при введении в них примесей понижается. Эти и некоторые другие свойства полупроводников были известны сравнительно давно, однако широко использовать их стали сравнительно недавно.

Германий и кремний, являющиеся исходными материалами многих современных полупроводниковых приборов, имеют во внешних слоях своих оболочек по четыре валентных электрона. Всего же в атоме германия 32 электрона, а в атоме кремния 14. Но 28 электронов атома германия и 10 электронов атома кремния, находящиеся во внутренних слоях их оболочек, прочно удерживаются ядрами и ни при каких обстоятельствах не отрываются от них.



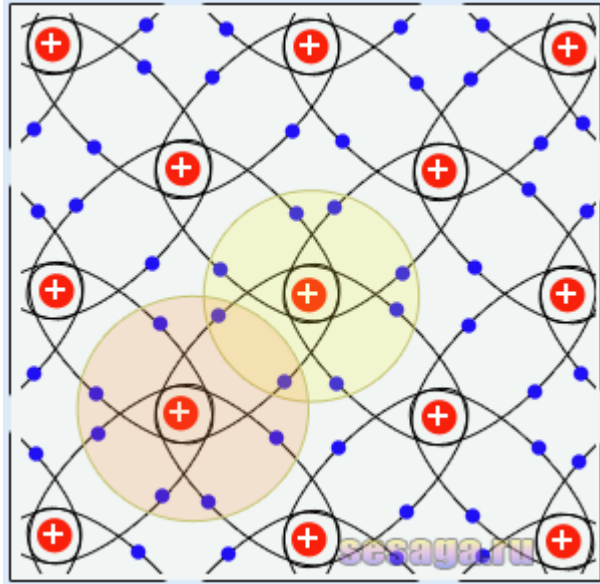


Рис.9

Только четыре валентных электрона атомов этих полупроводников могут, да и то не всегда, стать свободными.

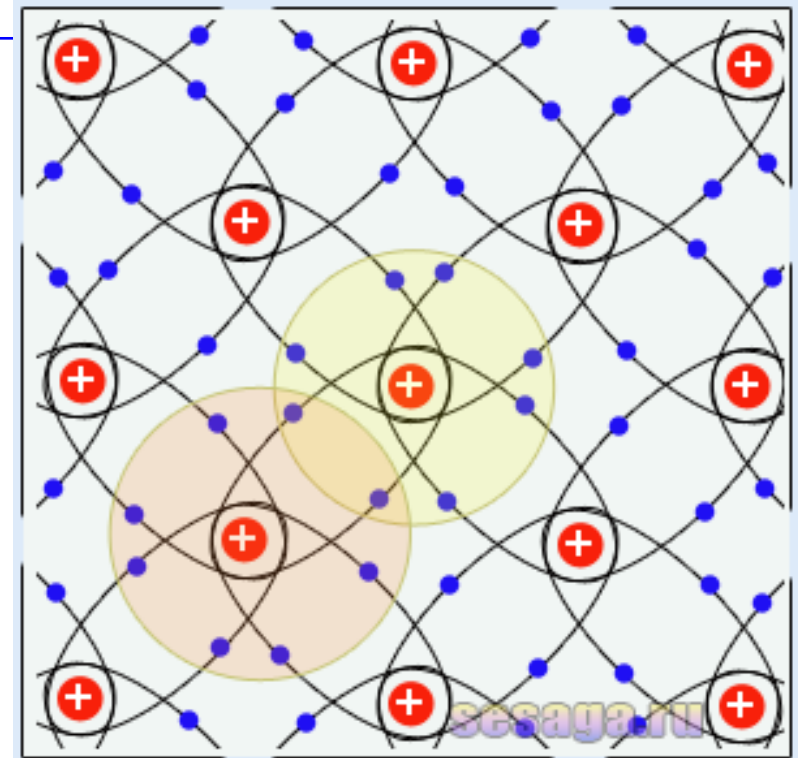
Атом же полупроводника, потерявший хотя бы один электрон, становится положительным ионом.

В полупроводнике атомы расположены в строгом порядке: каждый атом окружен четырьмя такими же атомами. Они к тому же расположены настолько близко друг к другу, что их валентные электроны образуют единые орбиты, проходящие вокруг всех соседних атомов, связывая их в единое вещество.

Такую взаимосвязь атомов в кристалле полупроводника можно представить себе в виде плоской схемы, как показано на рис. 9. Здесь большие шарики со знаком « + » условно изображают ядра атомов с внутренними слоями электронной оболочки (положительные ионы), а маленькие шарики - валентные электроны.

Каждый атом, как видите, окружен четырьмя точно такими же атомами. Любой из атомов связан с каждым соседним двумя валентными электронами, один из которых «свой», а второй заимствован у «соседа». Это **двухэлектронная, или валентная, связь**. Самая прочная связь!

Рис. 9. Схема взаимосвязи атомов в кристалле полупроводника



В свою очередь, внешний слой электронной оболочки каждого атома содержит восемь электронов: четыре своих и по одному от четырех соседних атомов. Здесь уже невозможно различить, какой из валентных электронов в атоме «свой», а какой «чужой», поскольку они сделались общими. При такой связи атомов во всей массе кристалла германия или кремния можно считать, что кристалл полупроводника представляет собой одну большую молекулу.

Схему взаимосвязи атомов в полупроводнике можно для наглядности упростить, изобразив ее так, как это сделано на рис.10. Здесь ядра атомов с внутренними электронными оболочками показаны в виде кружков со знаком плюс, а межатомные связи - двумя линиями, символизирующими **валентные электроны**.

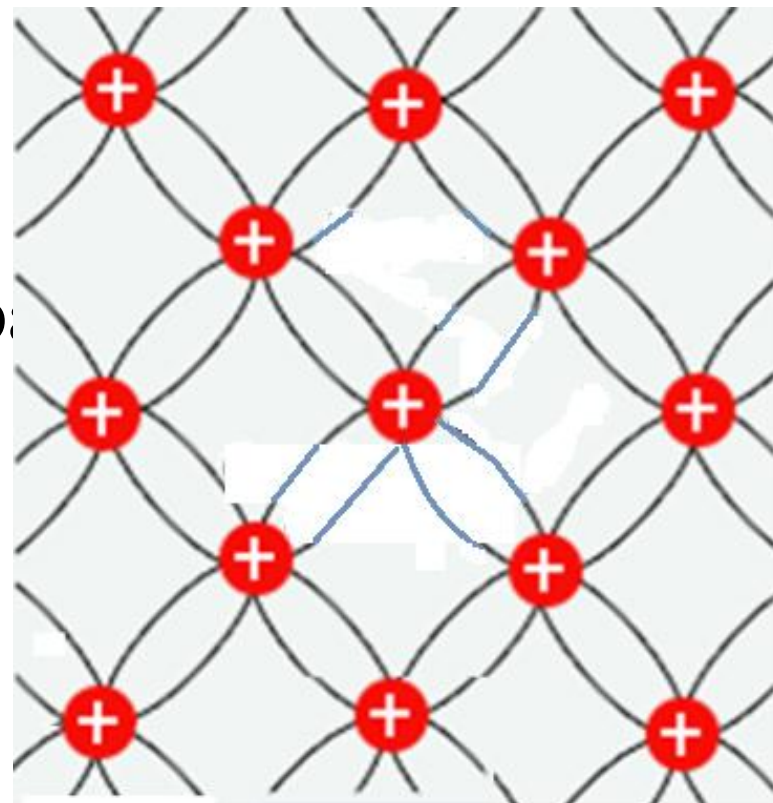
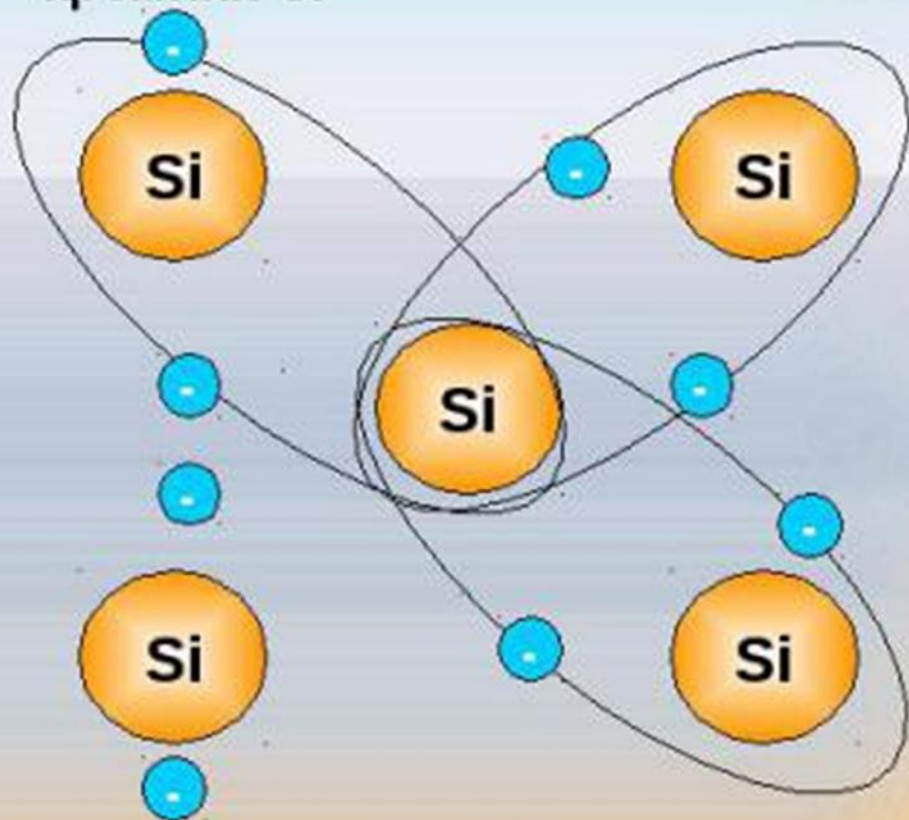


Рис.10

## Собственная проводимость полупроводников

- Рассмотрим проводимость полупроводников на основе кремния Si



Кремний – 4 валентный химический элемент. Каждый атом имеет во внешнем электронном слое по 4 электрона, которые используются для образования парноэлектронных (ковалентных) связей с 4 соседними атомами

При обычных условиях (невысоких температурах) в полупроводниках отсутствуют свободные заряженные частицы, поэтому полупроводник не проводит электрический ток



# ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКА

При температуре, близкой к абсолютному нулю, полупроводник ведет себя как абсолютный непроводник, потому что в нем нет свободных электронов.

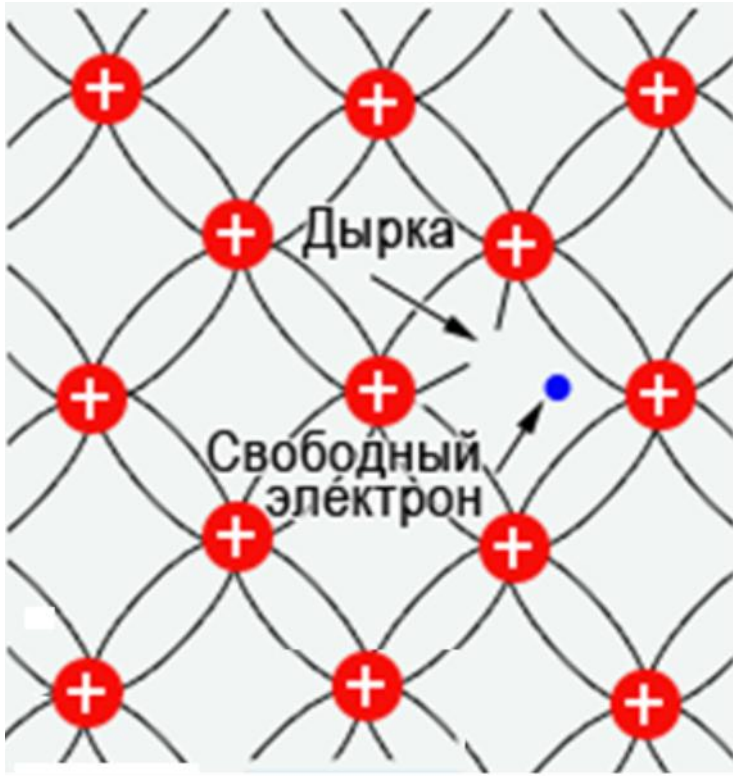
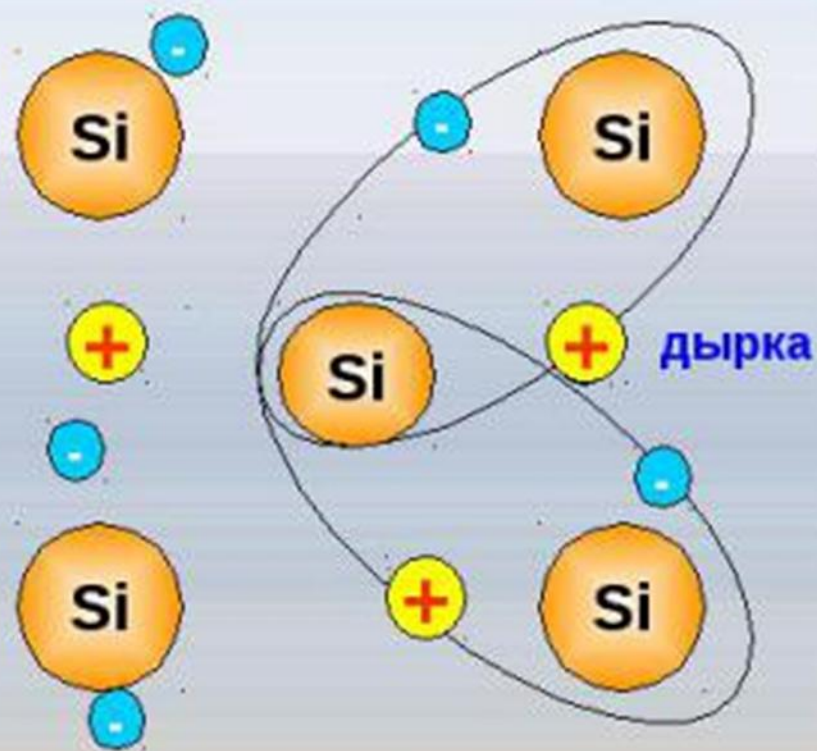


Рис.11

Но при повышении температуры связь валентных электронов с атомными ядрами ослабевает и некоторые из них вследствие теплового движения могут покинуть свои атомы. Вырвавшийся из межатомной связи электрон (рис.11) становится свободным, а там, где он был до этого, образуется **пустое место**. Это пустое место в межатомной связи полупроводника условно называют **дыркой** (разорвавшаяся линия электрона).



Рассмотрим изменения в полупроводнике при увеличении температуры

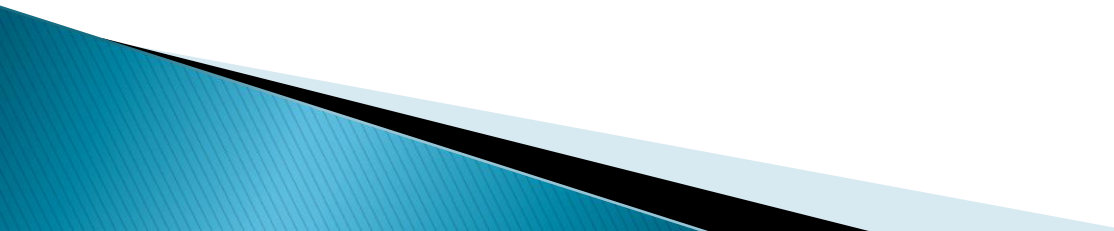


свободный  
электрон

При увеличении температуры энергия электронов увеличивается и некоторые из них покидают связи, становясь **свободными электронами**. На их месте остаются некомпенсированные электрические заряды (виртуальные заряженные частицы), называемые **дырками**.



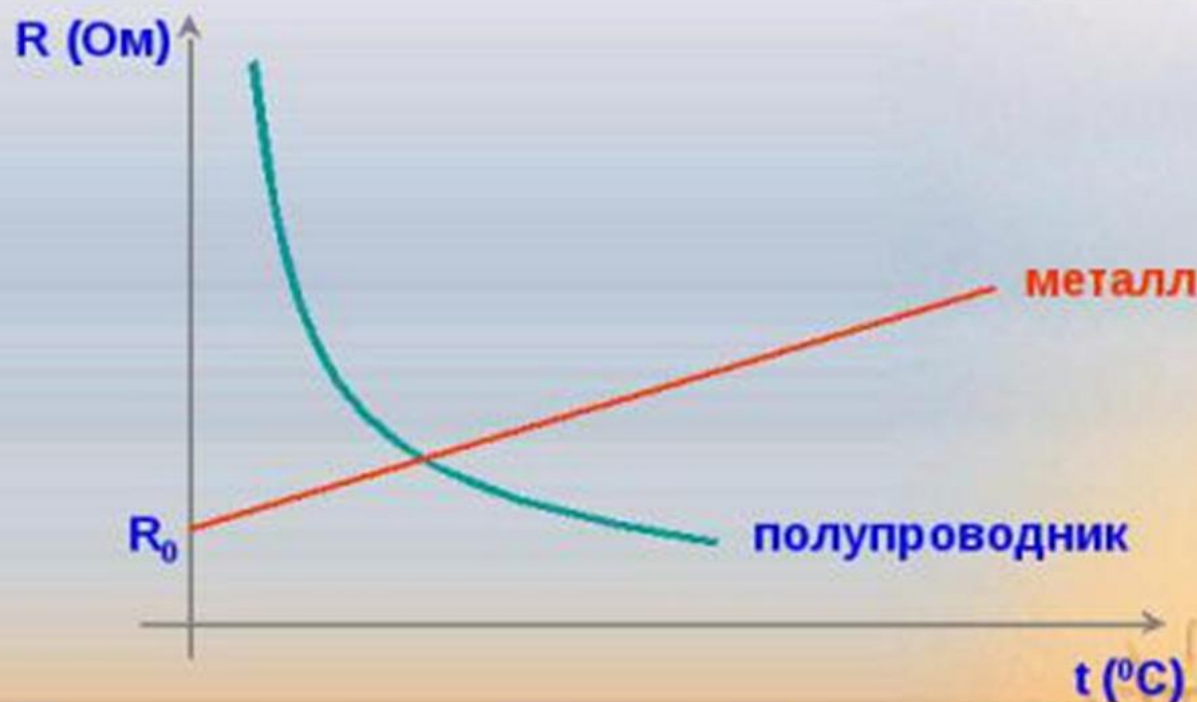
Чем выше температура полупроводника, тем больше в нем появляется свободных электронов и дырок. Таким образом, образование в массе полупроводника дырки связано с уходом из оболочки атома валентного электрона, а возникновение дырки соответствует появлению положительного электрического заряда, равного отрицательному заряду электрона.



# Электрический ток в полупроводниках

Таким образом, электрический ток в полупроводниках представляет собой упорядоченное движение свободных электронов и положительных виртуальных частиц - дырок

Зависимость сопротивления от температуры



При увеличении температуры растет число свободных носителей заряда, проводимость полупроводников растет, сопротивление уменьшается.



На нем схематично изображено явление возникновения тока в полупроводнике. Причиной возникновения тока служит напряжение, приложенное к полупроводнику (на рис. 9) источник напряжения символизируют знаки « + » и « — »). Вследствие тепловых явлений во всей массе полупроводника высвобождается из межатомных связей некоторое количество электронов (на рис. они обозначены точками со стрелками).

Направление перемещения электронов

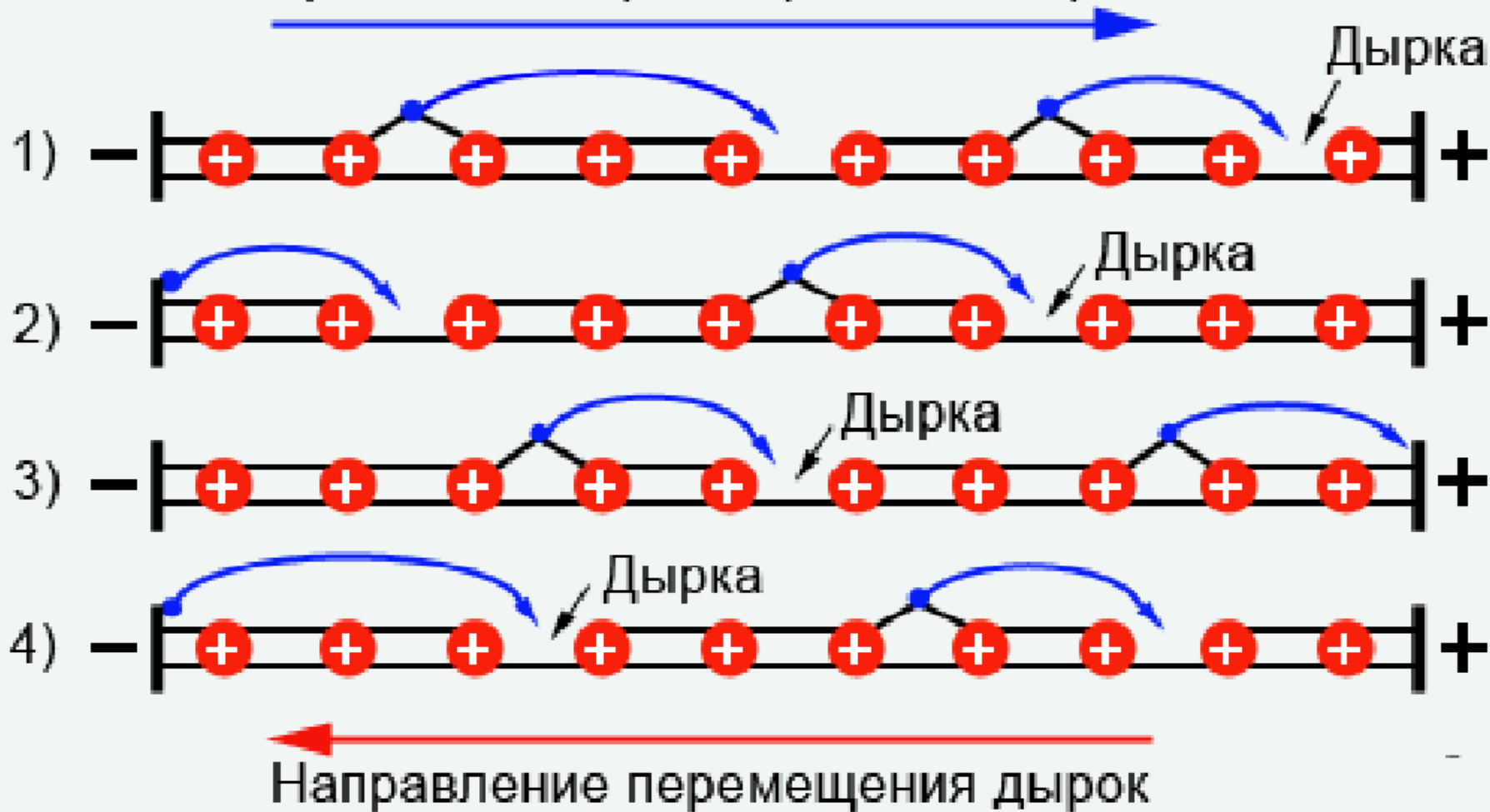


Рис.12. Схема движения электронов и дырок в полупроводнике

Электроны, освобожденные вблизи положительного полюса источника напряжения, притягиваются этим полюсом и уходят из массы полупроводника, оставляя после себя дырки. Электроны, ушедшие из межатомных связей на некотором удалении от положительного полюса, тоже притягиваются им и движутся в его сторону.

Но, встретив на своем пути дырки, электроны как бы «впрыгивают» в них (рис. 12-1), происходит заполнение некоторых межатомных связей. А ближние к отрицательному полюсу дырки заполняются другими электронами, вырвавшимися из атомов, расположенных еще ближе к отрицательному полюсу (рис. 12-2). Пока в полупроводнике действует электрическое поле, этот процесс продолжается: нарушаются одни межатомные связи - из них уходят валентные электроны, возникают дырки - и заполняются другие межатомные связи - в дырки «впрыгивают» электроны, освободившиеся из каких-то других межатомных связей (рис. 12-(3-4)).

# Механизм проводимости полупроводников

**ЭЛЕКТРОННАЯ**

Проводимость п/п,  
обусловленная  
наличием у них  
свободных  
электронов

**ДЫРОЧНАЯ**

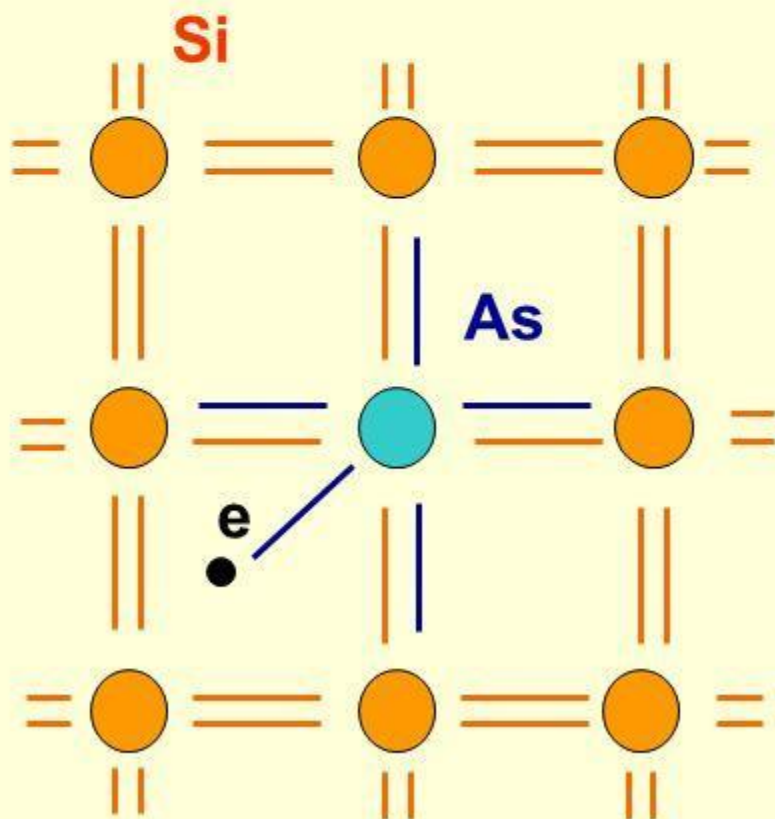
*«дырка» - вакантное  
электронное состояние в  
кристаллической решетке,  
имеющее избыточный  
положительный заряд*

Проводимость п/п ,  
обусловленная  
перемещением «дырок».



Проводимость п/п значительно увеличивается при введении примесей

**Донорная  
n - типа**



примесей

**Акцепторная  
p - типа**

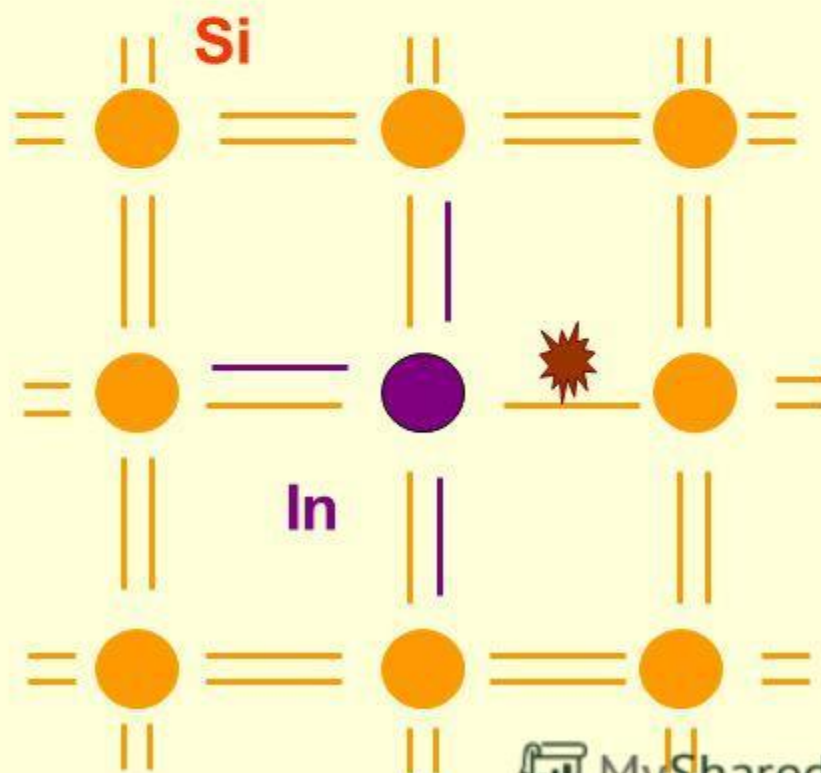


Рис.13

Рассматривая эти схемы, ты, конечно, заметил: электроны движутся в направлении от отрицательного полюса источника напряжения к положительному, а дырки перемещаются от положительного полюса к отрицательному.

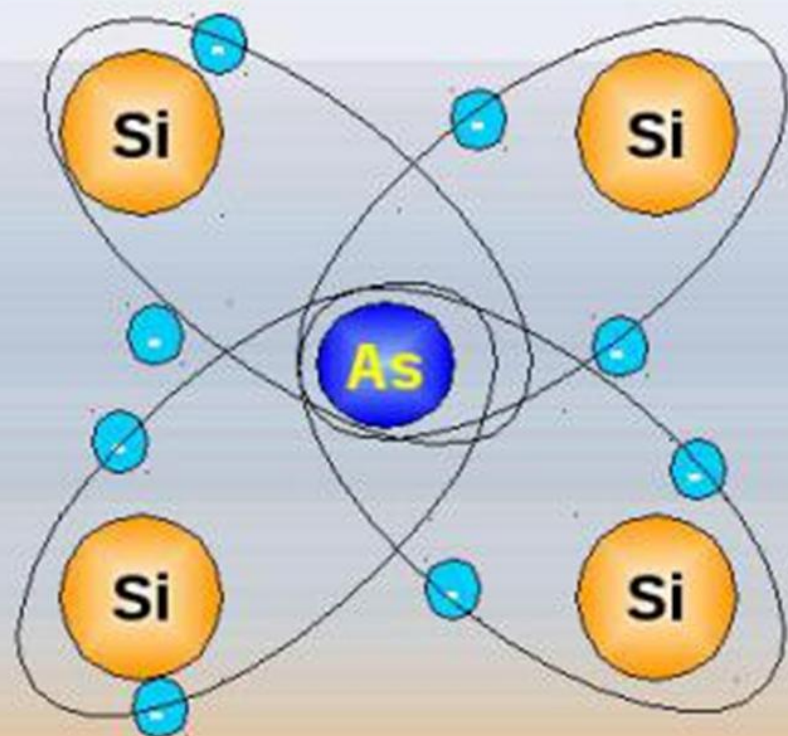
При температуре выше абсолютного нуля в полупроводнике непрерывно возникают и исчезают свободные электроны и дырки даже тогда, когда нет внешних электрических полей. Но электроны и дырки движутся хаотически в разные стороны и не уходят за пределы полупроводника. В чистом полупроводнике число высвободившихся в каждый момент времени электронов равно числу образующихся при этом дырок. Общее же их число при комнатной температуре относительно невелико. Поэтому электропроводность такого полупроводника, называемая собственной, мала.

- ▶ Иными словами, такой полупроводник оказывает электрическому току довольно большое сопротивление. Но если в чистый полупроводник добавить даже ничтожное количество примеси в виде атомов других элементов, электропроводность его резко повысится. При этом в зависимости от структуры атомов примесных элементов электропроводность полупроводника будет электронной или дырочной.
- ▶ Чем различаются эти два вида электропроводности полупроводника?

Если какой-либо атом в кристалле полупроводника заменить атомом сурьмы, имеющим во внешнем слое электронной оболочки пять валентных электронов, этот атом-«пришелец» четырьмя электронами свяжется с четырьмя соседними атомами полупроводника. Пятый же валентный электрон атома сурьмы окажется «лишним» и станет свободным. Чем больше в полупроводник будет введено атомов сурьмы, тем больше в его массе окажется свободных электронов. Следовательно, полупроводник с примесью сурьмы приближается по своим свойствам к металлу: для того чтобы через него проходил электрический ток, в нем не обязательно должны разрушаться межатомные связи.

## Электрический ток в полупроводниках

Собственная проводимость полупроводников явно недостаточна для технического применения полупроводников. Поэтому для увеличения проводимости в чистые полупроводники внедряют примеси (легируют), которые бывают **донорные** и **акцепторные**



### • Донорные примеси

При легировании 4-валентного кремния Si 5-валентным мышьяком As, один из 5 электронов мышьяка становится свободным.

As – положительный ион. Дырки нет!

Такой полупроводник называется полупроводником **n – типа**, основными носителями заряда являются **электроны**, а примесь мышьяка, дающая свободные электроны, называется **донорной**.



Полупроводники, обладающие такими свойствами, называют полупроводниками с электропроводностью типа **n** или, короче, **полупроводниками n типа**.

Здесь латинская буква **n** - начальная буква латинского слова "**negativ**" (негатив), что значит «**отрицательный**». Этот термин в данном случае нужно понимать в том смысле, что в полупроводнике типа **n** основными носителями тока являются отрицательные заряды, т.е. **электроны**.

Совсем иная картина получится, если в полупроводник ввести атомы с тремя валентными электронами, **например атомы индия**. Каждый атом металла **индия** своими тремя электронами заполнит связи только с тремя соседними атомами полупроводника, а для заполнения связи с четвертым атомом у него не хватает одного электрона. **Образуется дырка**. Она, конечно, может заполниться каким-либо электроном, вырвавшимся из валентной связи с другими атомами полупроводника. Однако независимо от того, где будут дырки, в массе полупроводника с примесью индия не будет хватать электронов для их заполнения. И чем больше будет введено в полупроводник примесных атомов индия, тем больше в нем образуется дырок.



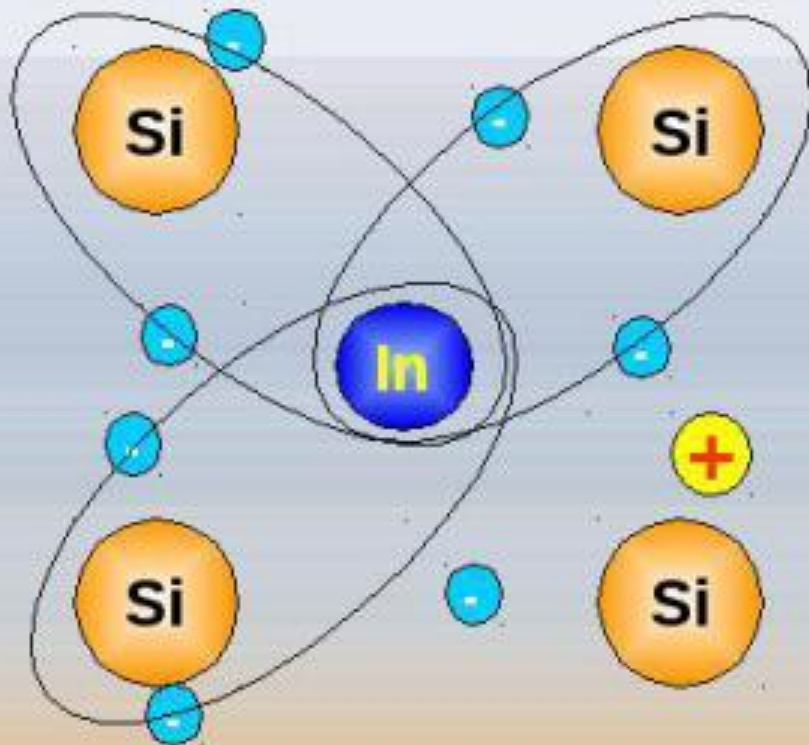
Чтобы в таком полупроводнике электроны могли перемещаться, совершенно обязательно должны разрушаться валентные связи между атомами.

Вырвавшиеся из них электроны или же электроны, поступившие в полупроводник извне, движутся от дырки к дырке. А во всей массе полупроводника в любой момент времени число дырок будет больше общего числа свободных электронов.

Полупроводники, обладающие таким свойством, называют **полупроводниками с дырочной электропроводностью** или полупроводниками типа **p**.

## Акцепторные примеси

Если кремний легировать трехвалентным индием, то для образования связей с кремнием у индия не хватает одного электрона, т.е. образуется дырка



Основа дает электроны и дырки в равном количестве. Примесь – только дырки.

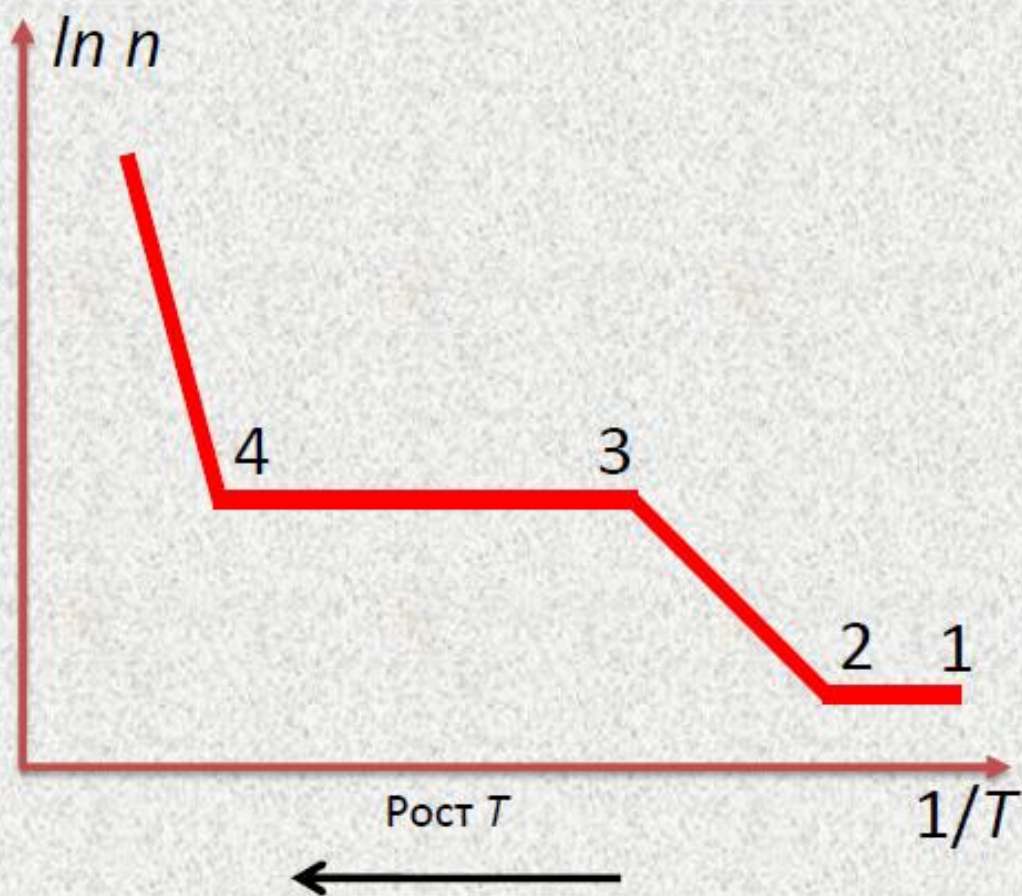
Такой полупроводник называется полупроводником **p-типа**, основными носителями заряда являются **дырки**, а примесь индия, дающая дырки, называется **акцепторной**



- ▶ Латинская буква **p** - первая буква латинского слова "**positiv**" (позитив), что значит «положительный». Этот термин в данном случае нужно понимать в том смысле, что явление электрического тока в массе полупроводника типа **p** сопровождается непрерывным возникновением и исчезновением положительных зарядов - дырок. Перемещаясь в массе полупроводника, дырки как бы являются носителями тока.
- ▶ Полупроводники типа **p**, так же как и полупроводники типа **n**, обладают во много раз лучшей электропроводностью по сравнению с чистыми полупроводниками.

Надо сказать, что практически не существует как совершенно чистых полупроводников, так и полупроводников с абсолютной электропроводностью типов **n** и **p**. В полупроводнике с примесью индия обязательно есть небольшое количество атомов некоторых других элементов, придающих ему электронную проводимость, а в полупроводнике с примесью сурьмы есть атомы элементов, создающих в нем дырочную электропроводность.

# Температурная зависимость концентрации $n$ с.н.з. в примесном полупроводнике

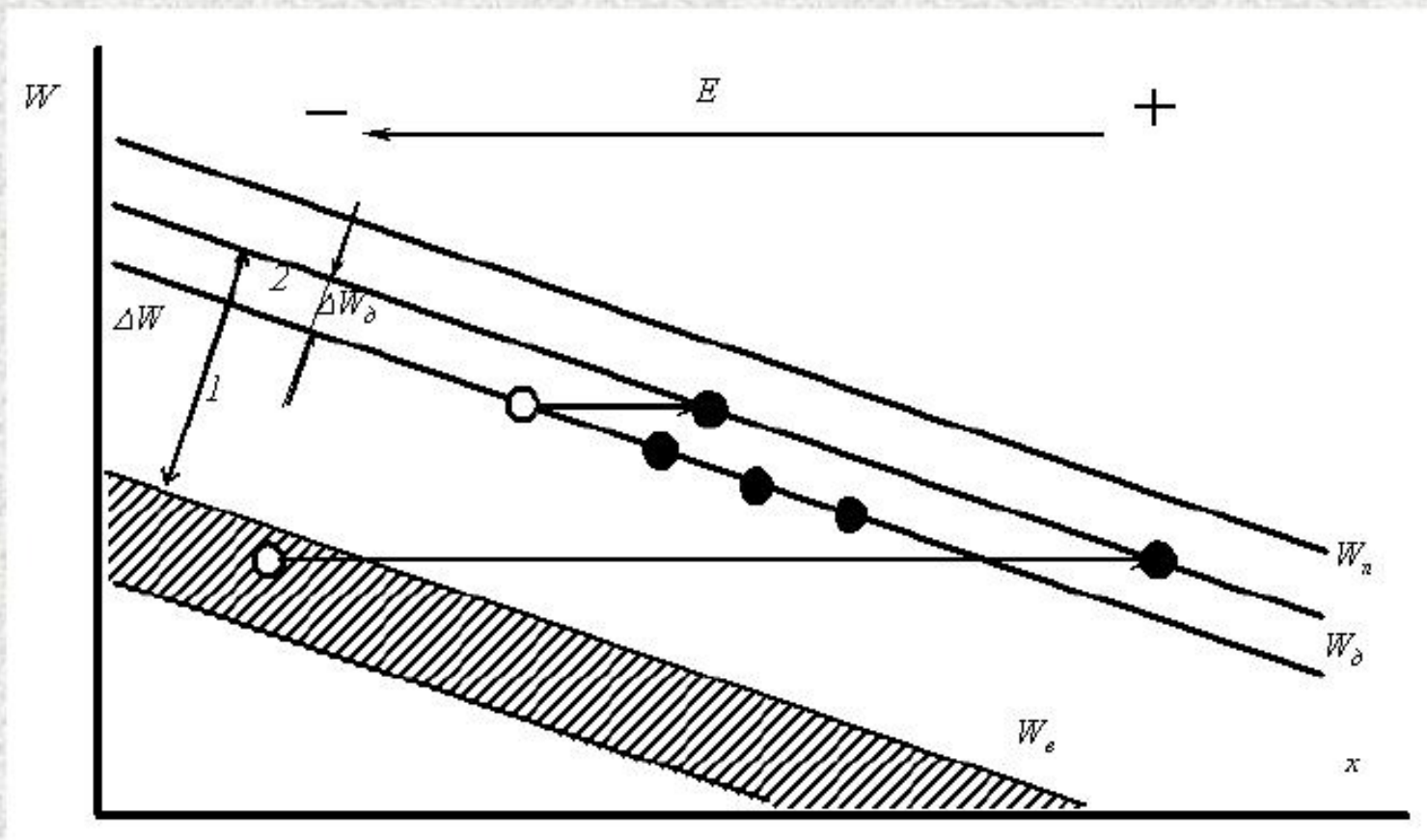


**ТЕРМОРЕЗИСТОР** – полупроводниковый прибор,  
действие которого основано на зависимости  
электрического сопротивления от температуры

**ТЕРМОРЕЗИСТОРЫ:**

1. Кобальто-марганцевые
2. Медно-марганцевые
3. Медно-кобальто-марганцевые

# ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



**ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ИОНИЗАЦИЯ**

Полупроводниковый прибор, действие которого основано на использовании зависимости электропроводности (сопротивления)  $n/n$  от напряженности электрического поля называется

## **ВАРИСТОРОМ**

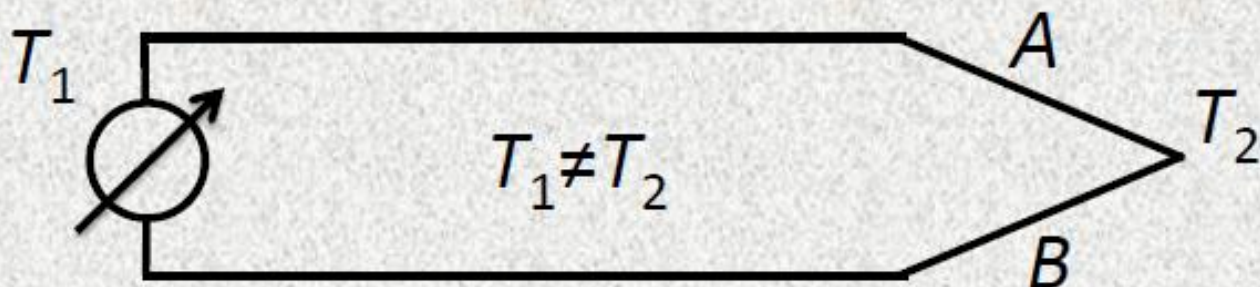
В качестве материалов для изготовления варисторов используют:

- а) карбид кремния (СН1)
- б) селен (СН2)



## 2.3 ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

### Эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона.



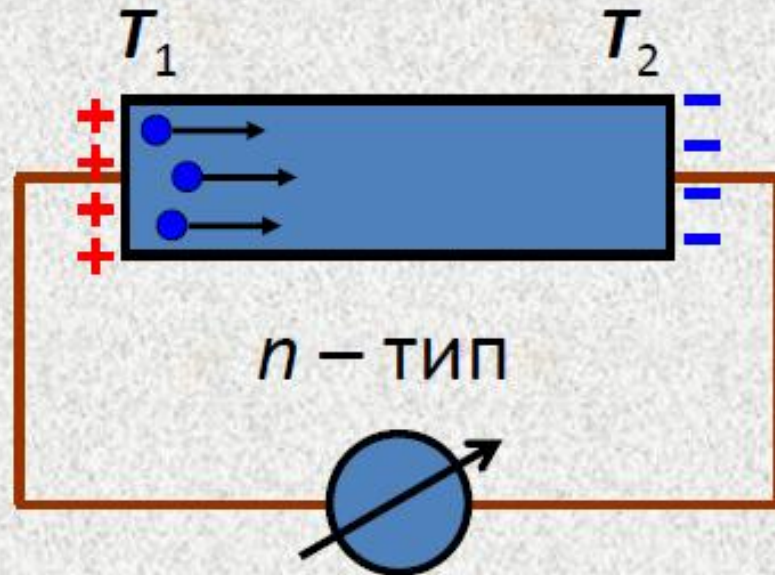
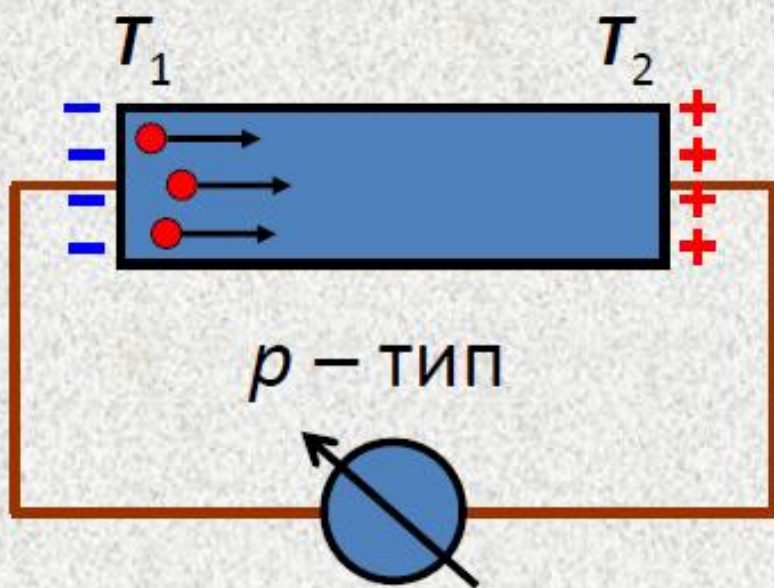
Эффект Зеебека: если в замкнутой электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных полупроводников, на спаях создана разность температур  $\Delta T \neq 0$ , то в цепи возникает термоЭДС:

$$U_T = \alpha \cdot \Delta T$$

$\alpha$  – коэффициент термоЭДС, который зависит от материалов термопары и интервала температур

# Определение типа с.н.з. с помощью эффекта Зеебека

$$T_1 > T_2$$



Эффект Пельтье: при прохождении тока через контакт двух последовательно соединенных разнородных полупроводников, место соединения нагревается или охлаждается в зависимости от направления тока.

Количество теплоты:  $Q_{\text{п}} = \pm \Pi \cdot I \cdot t$

$\Pi$  – коэффициент Пельтье

$I$  – величина тока, протекающего через контакт

$t$  – время прохождения тока

Томсон установил связь:  $\alpha = \Pi / T$

Эффект Томсона: при прохождении тока через полупроводник, вдоль которого есть градиент температуры, в дополнении к теплоте Джоуля, в зависимости от направления тока, выделяется или поглощается некоторое количество тепла.

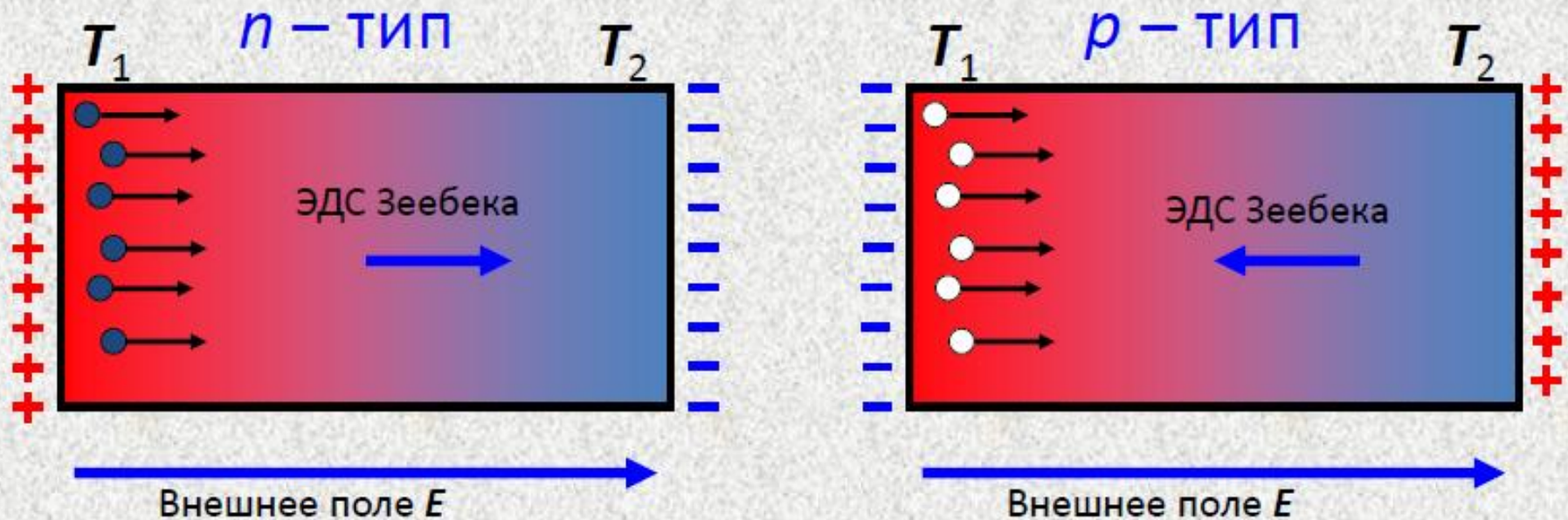
Теплота Томсона:  $Q_T = \tau \cdot \Delta T \cdot I \cdot t$

$\tau$  – коэффициент Томсона

Между всеми термоэлектрическими явлениями существует связь.

$$\alpha = d\Pi/dT + (\tau_1 - \tau_2)$$

# Механизм возникновения эффекта Томсона. $T_1 > T_2$



## Гальваномагнитный эффект Холла

Если пластину полупроводника, вдоль которой течёт электрический ток  $I$ , поместить в магнитное поле  $B$ , направленное перпендикулярно направлению тока, то в полупроводнике возникнет поперечное электрическое поле  $E$ , направленное перпендикулярно току и магнитному полю.

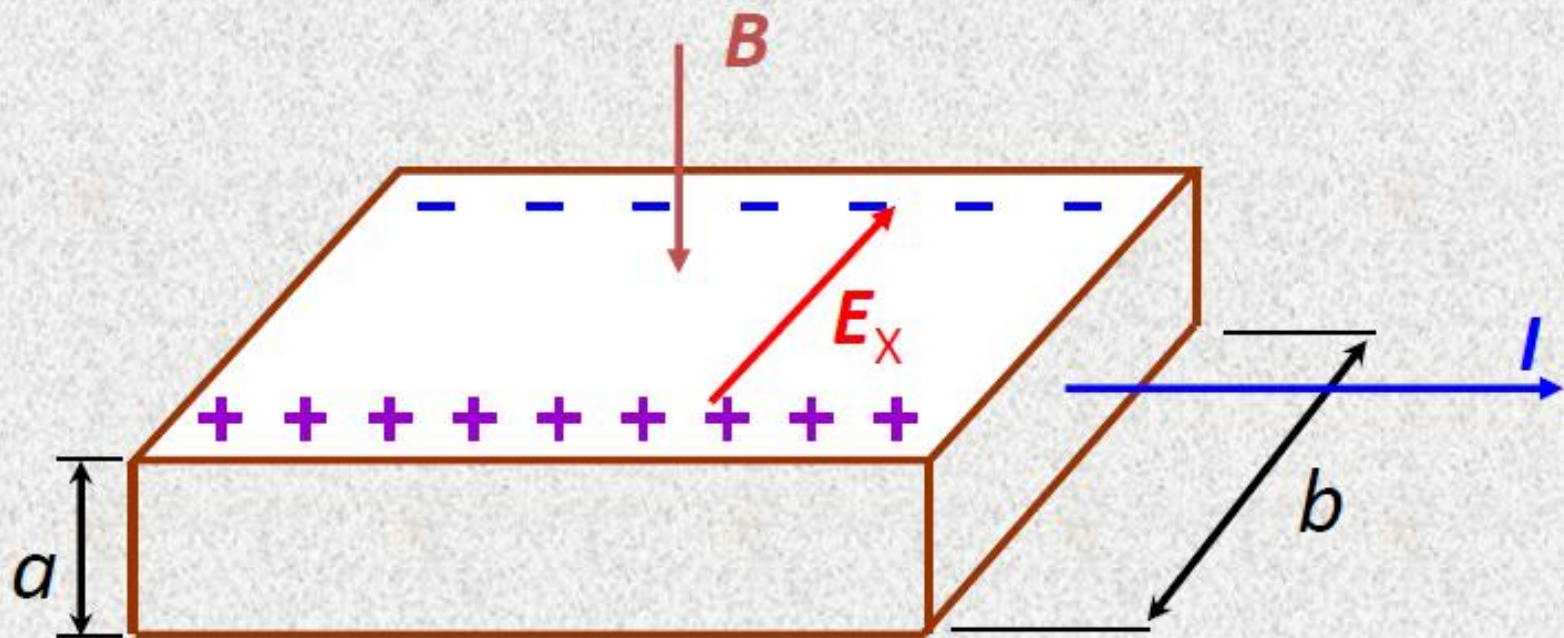


Схема возникновения ЭДС Холла  $U_x$

$$U_x = R_x \frac{I \cdot H}{a} [B]$$

Для полупроводника  $n$ -типа:  $R_X = \frac{-1}{en}$

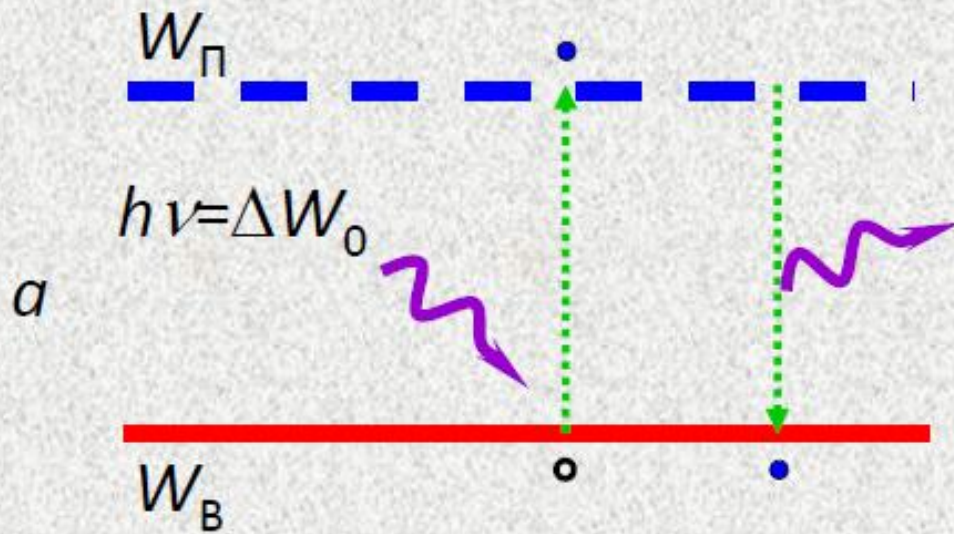
Для полупроводника  $p$ -типа:  $R_X = \frac{1}{ep}$

Для собственного  
полупроводника:

$$R_X = \frac{1}{en} \cdot \frac{\mu_p - \mu_n}{\mu_p + \mu_n}$$



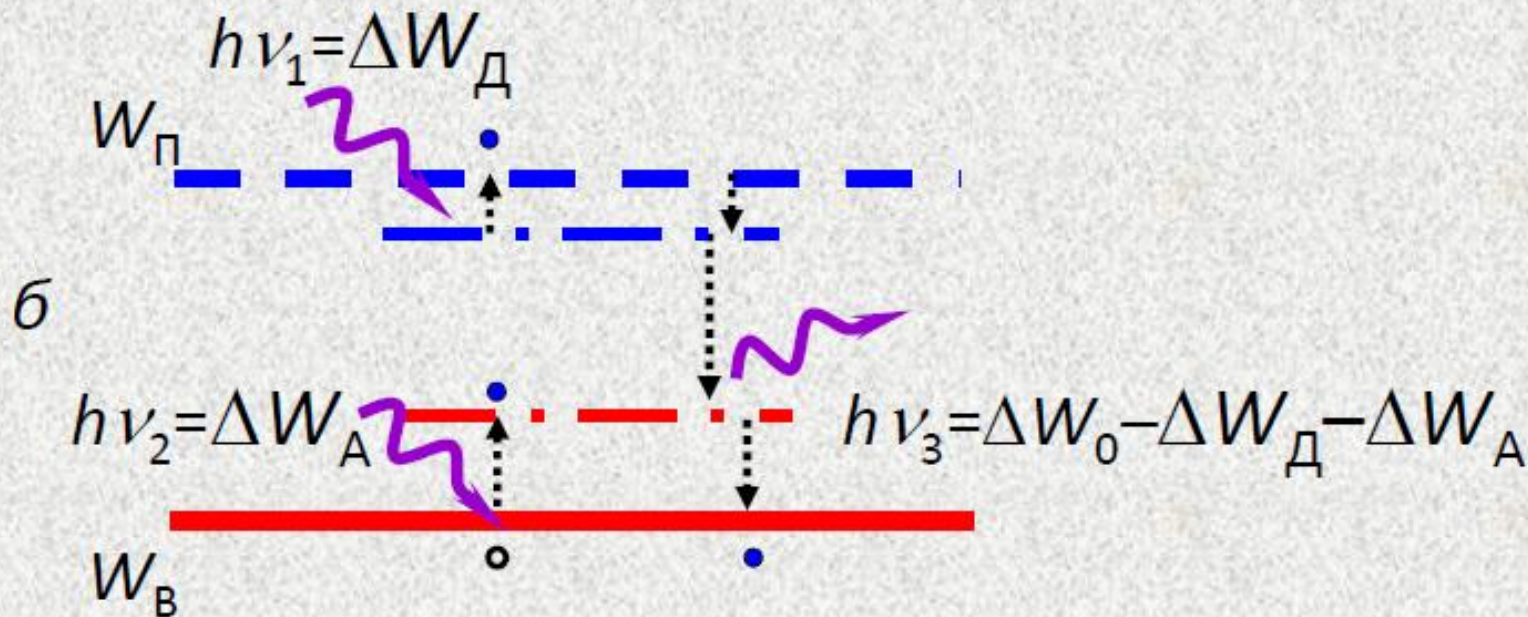
# Оптические и фотоэлектрические явления в полупроводниках



Оптика:

преломление, отражение, рассеяние.

Характеристика – коэффициент преломления  $n$ .



## 2.4 Фотоэлектрические явления в полупроводниках:

- эмиссия электронов с поверхности,
- генерация свободных электронов и дырок,
- фотолюминесценция,
- нагревание,
- образование экситонов, то есть связанных электрически нейтральных пар электрон-дырка

Фотоэлектрические явления происходят в результате поглощения энергии фотонов полупроводником.

## Механизмы поглощения света:

- *собственное поглощение*: переходы из валентной зоны в зону проводимости;
- *экситонное поглощение*: переходы с участием экситонных состояний;
- *поглощение свободными носителями заряда*: переходы электронов и дырок внутри разрешённых зон;
- *примесное поглощение*: переходы с участием примесных состояний;
- *решёточное и фононное поглощение*: поглощение энергии фотонов колебаниями кристаллической решётки.

В разных интервалах спектра преобладают различные

# Фотопроводимость

*удельная фотопроводимость  $\gamma_{\Phi}$ :*

$$\gamma_{\Phi} = \gamma - \gamma_0 = e(\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p)$$

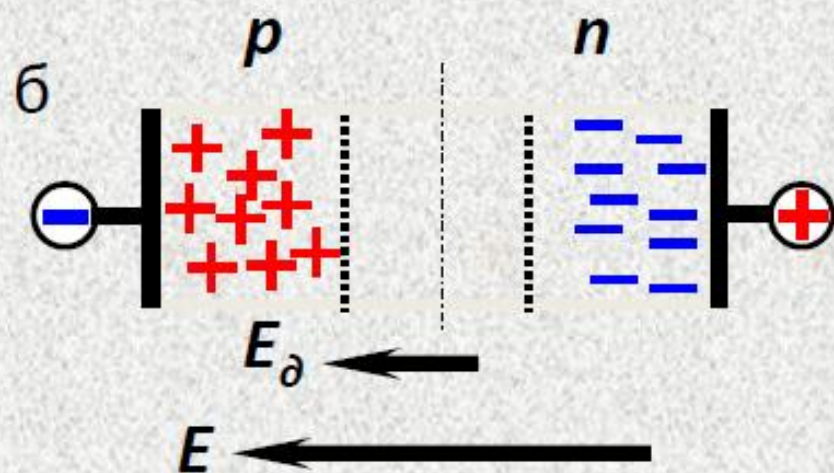
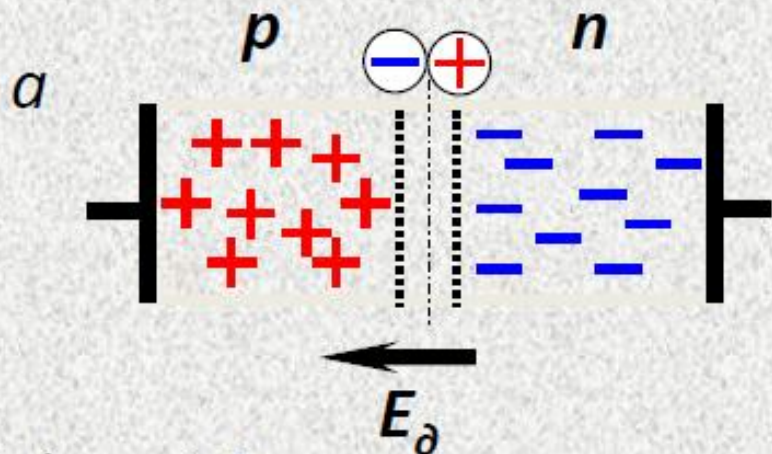
$\gamma_0$  – удельная проводимость полупроводника в отсутствие освещения;

$\gamma$  – удельная проводимость освещенного полупроводника;

$\Delta n$  и  $\Delta p$  – концентрация неравновесных с.н.з., возбужденных светом

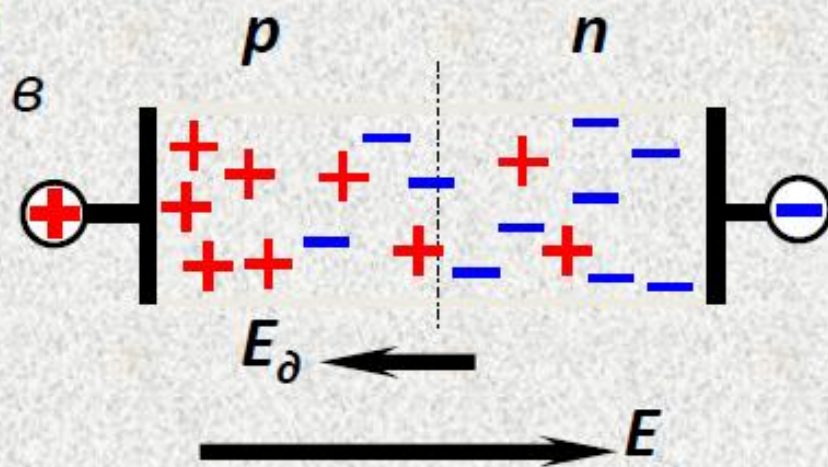
## 2.5 p-n переход

Электронно-дырочные переходы получают вводя в полупроводник донорные и акцепторные примеси так, чтобы одна часть полупроводника обладала электронной, а другая дырочной электропроводностью.



(а) Диффузионное поле  $E_{\delta}$  возникает из-за диффузии с.н.з. Образуется запирающий слой толщиной  $d \sim 10^{-5}$  см.

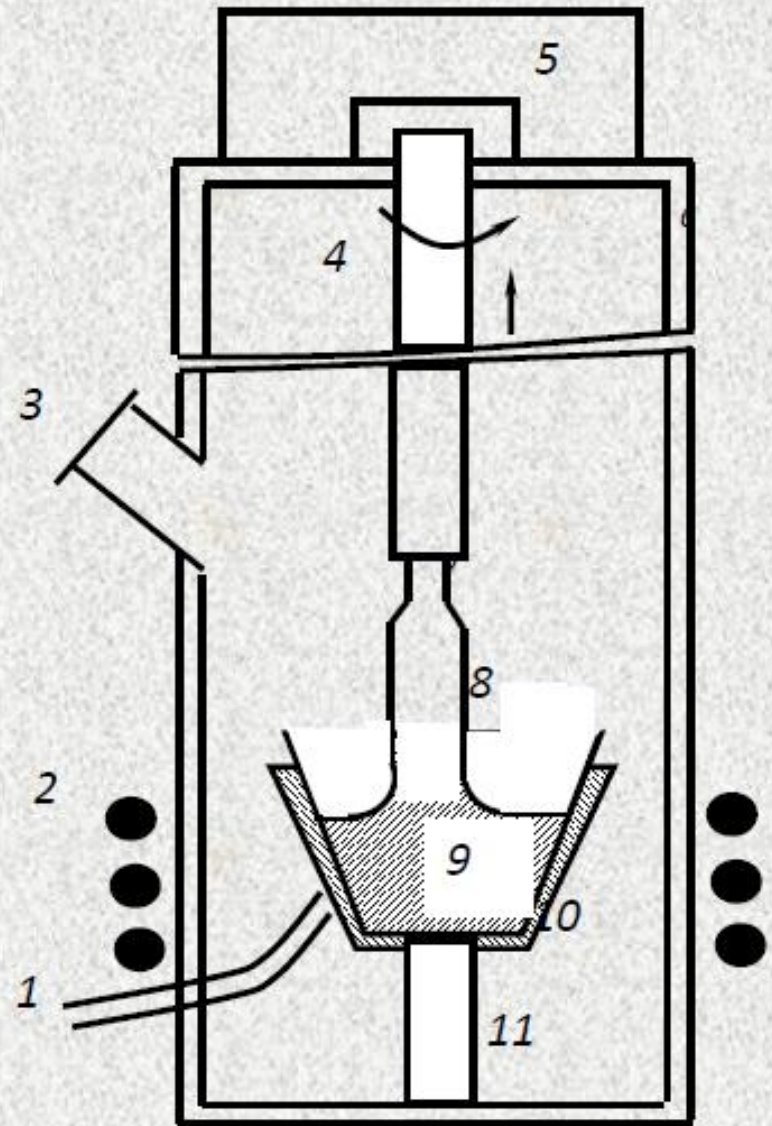
(б) Направление  $E$  совпадает с  $E_{\delta}$  и переход «заперт».



(в)  $E$  направлено против  $E_{\delta}$ , запирающий слой насыщается с.н.з., и переход «открыт».

Схема установки для  
выращивания монокристаллов  
по методу Чохральского:

- 1 – термopаpa;
- 2 – индукционная печь;
- 3 – окно для визуального  
контроля;
- 4 – ось вращения;
- 5 – устройство для вращения;
- 6 – водяная рубашка;
- 7 – монокристаллическая  
затравка;
- 8 – выращиваемый кристалл;
- 9 – расплав;
- 10 – графитовый нагреватель;
- 11 – теплоизоляционная  
подложка.



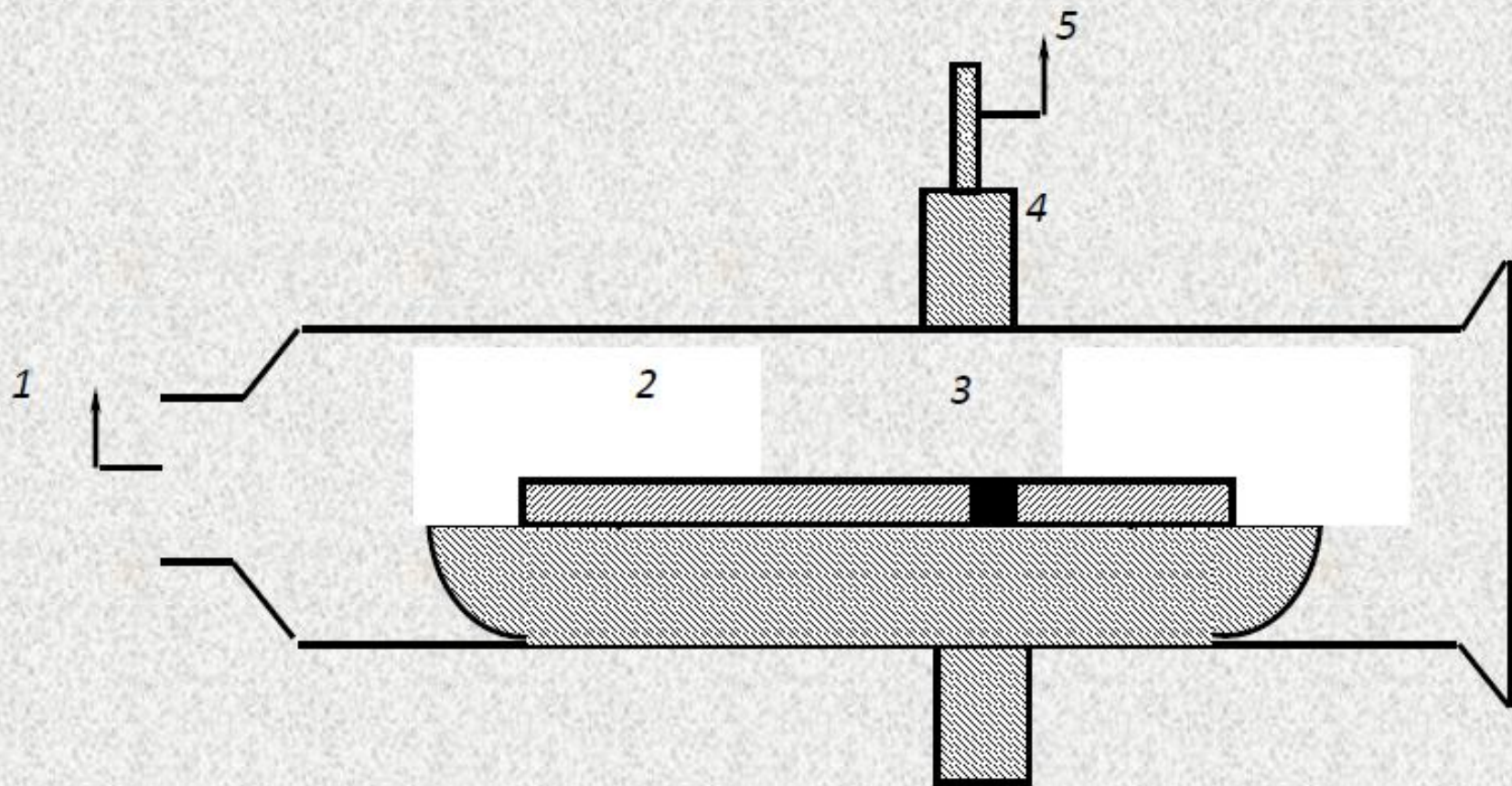
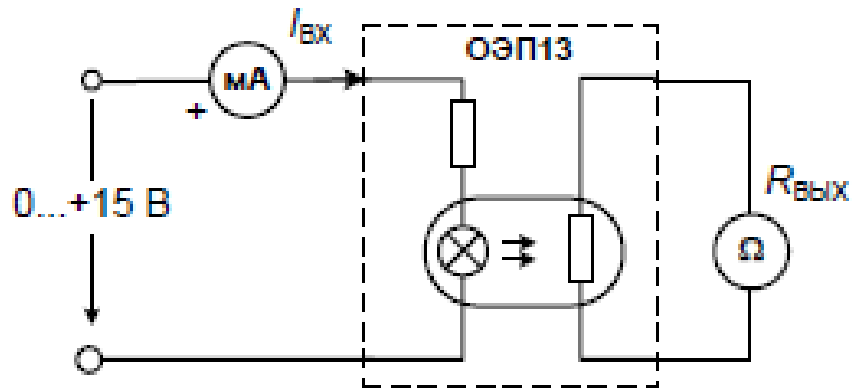


Схема установки для проведения зонной перекристаллизации: 1 – откачка на вакуум; 2 – образец в тигле; 3 – расплавленная зона; 4 – перемещаемый нагреватель; 5 – к устройству, перемещающему зону.

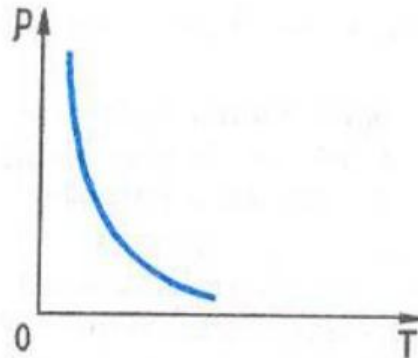
$$K_{з.п.} = C_{ж.ф.} / C_{т.ф.} > 1$$

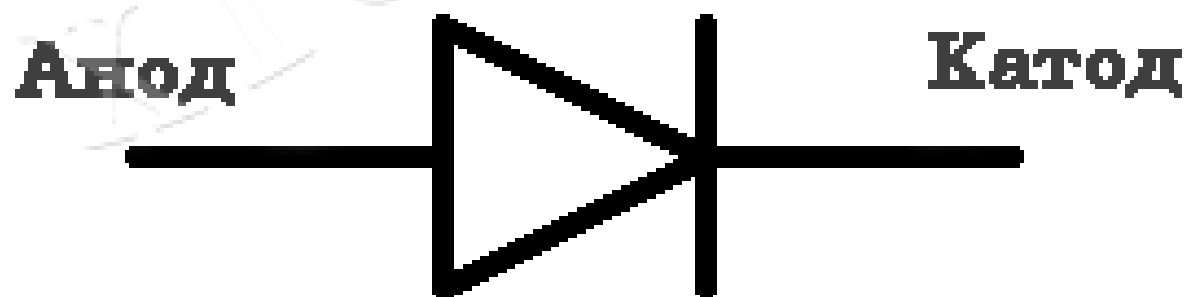
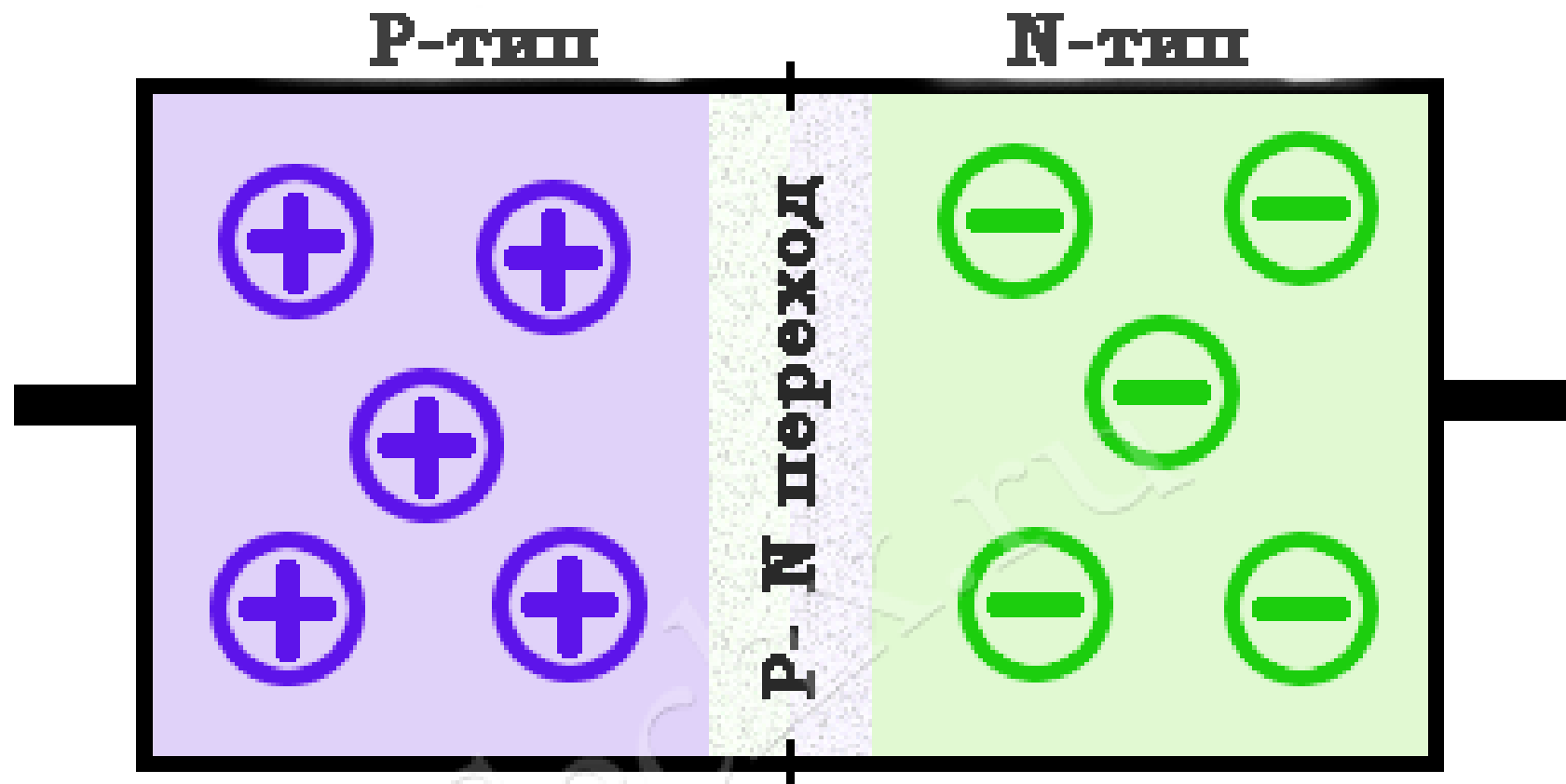


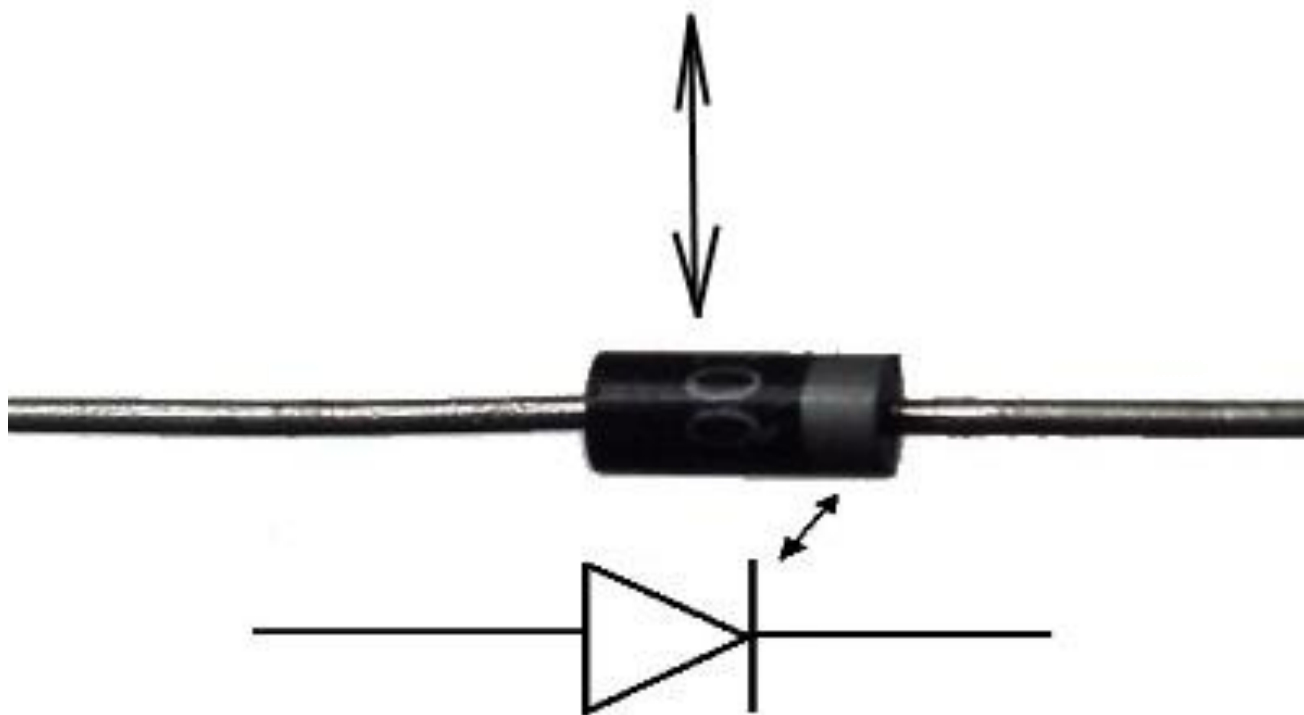
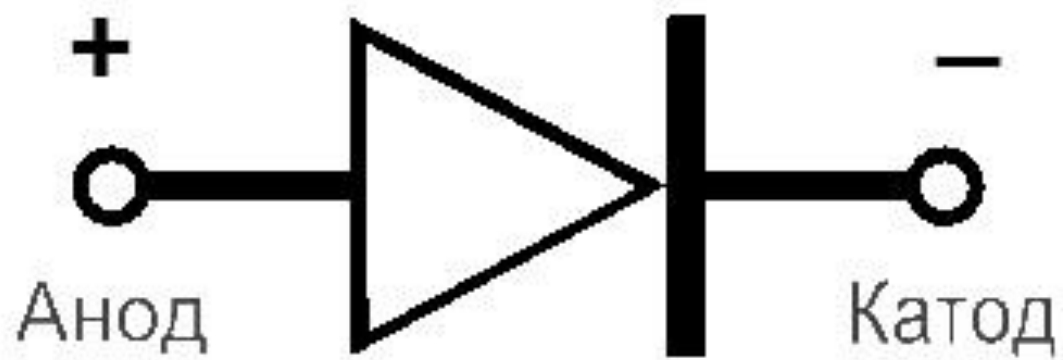
# Оптрон



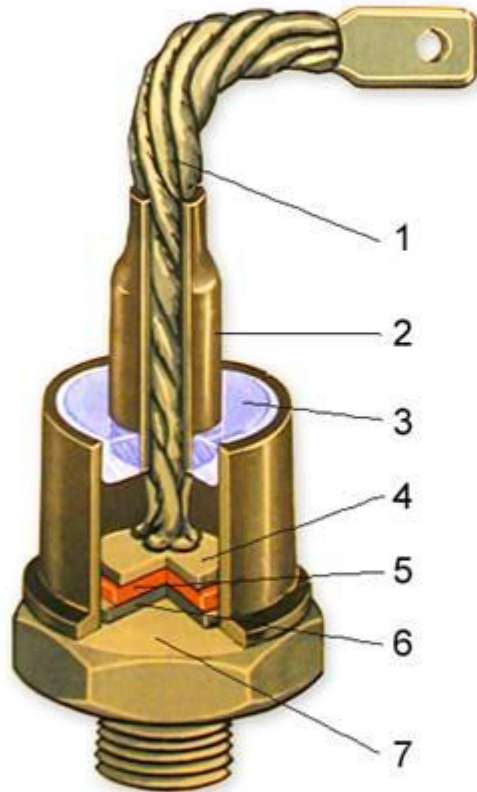
Зависимость уд.  
сопротивления  
полупроводников от  
температуры







# Полупроводниковый диод



**BK2-200**

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

1. Гибкий вывод
2. Корпус
3. Стеклоанный изолятор
4. Контактная пластина
5. Пластина индия
6. Пластина кремния
7. Основание



**D229B**



**D9Г**



[Назад](#)

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

