

**Зависимость
сопротивления
проводников и
полупроводников от
температуры**

Цель: способствовать формированию понятий: температурный коэффициент сопротивления, удельное сопротивление проводника; опытным путем установить, как зависит сопротивление проводника от температуры.

- **Задачи:**

- *Образовательные:*

- Продолжить изучение понятия сопротивление проводника, удельное сопротивление;
- Сформулировать утверждение о том, как зависит сопротивление проводника от температуры;
- Научить применять полученные знания на практике.

- *Развивающие:*

- Развивать интеллектуальные способности обучающихся;
- Развивать умения и навыки решения.

- *Воспитательные:*

- Воспитывать внимательность, познавательный интерес к предмету;
- Расширять кругозор, развивать умение строить логическую цепочку рассуждений.

Актуализация знаний

- 1. Дайте определение понятию «Удельное сопротивление проводника».
- 2. От каких величин зависит сопротивление прямолинейного проводника?
- 3. Какие частицы являются носителями свободных зарядов в металлах.

Создание проблемной ситуации

Существуют термометры сопротивления, которые позволяют измерять очень низкие и очень высокие температуры, когда обычные жидкостные термометры непригодны. На чем основан принцип действия данных приборов?



Зависимость R от T.

Если при температуре сопротивление проводника равно R_0 , а при температуре t оно равно R , то относительное изменение сопротивления прямо пропорционально изменению температуры t .

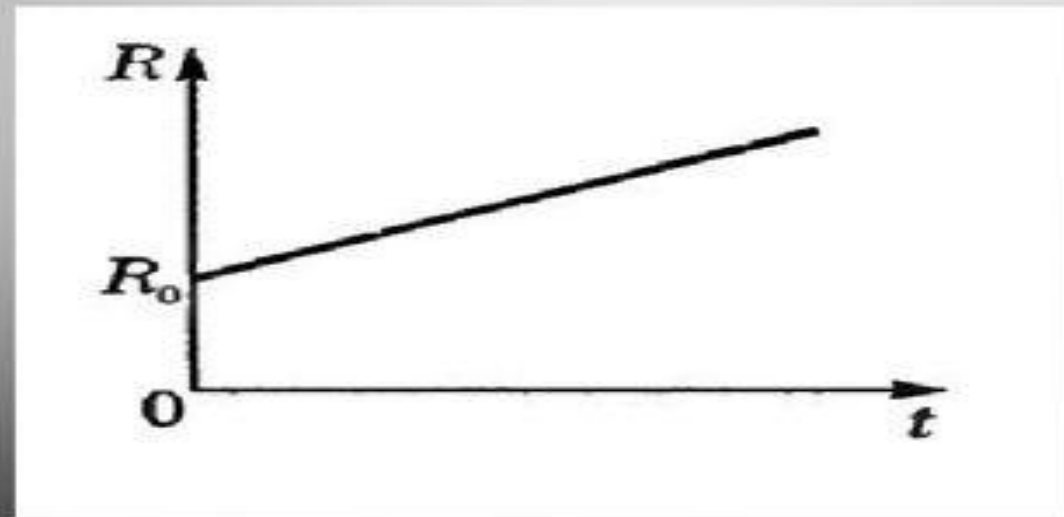
$$\frac{R - R_0}{R} = \alpha t.$$

Коэффициент пропорциональности называют *температурным коэффициентом сопротивления*. Он характеризует зависимость сопротивления вещества от температуры. Температурный коэффициент сопротивления численно равен относительному изменению сопротивления проводника при нагревании на 1 К. У растворов электролитов сопротивление с ростом температуры не увеличивается, а уменьшается.

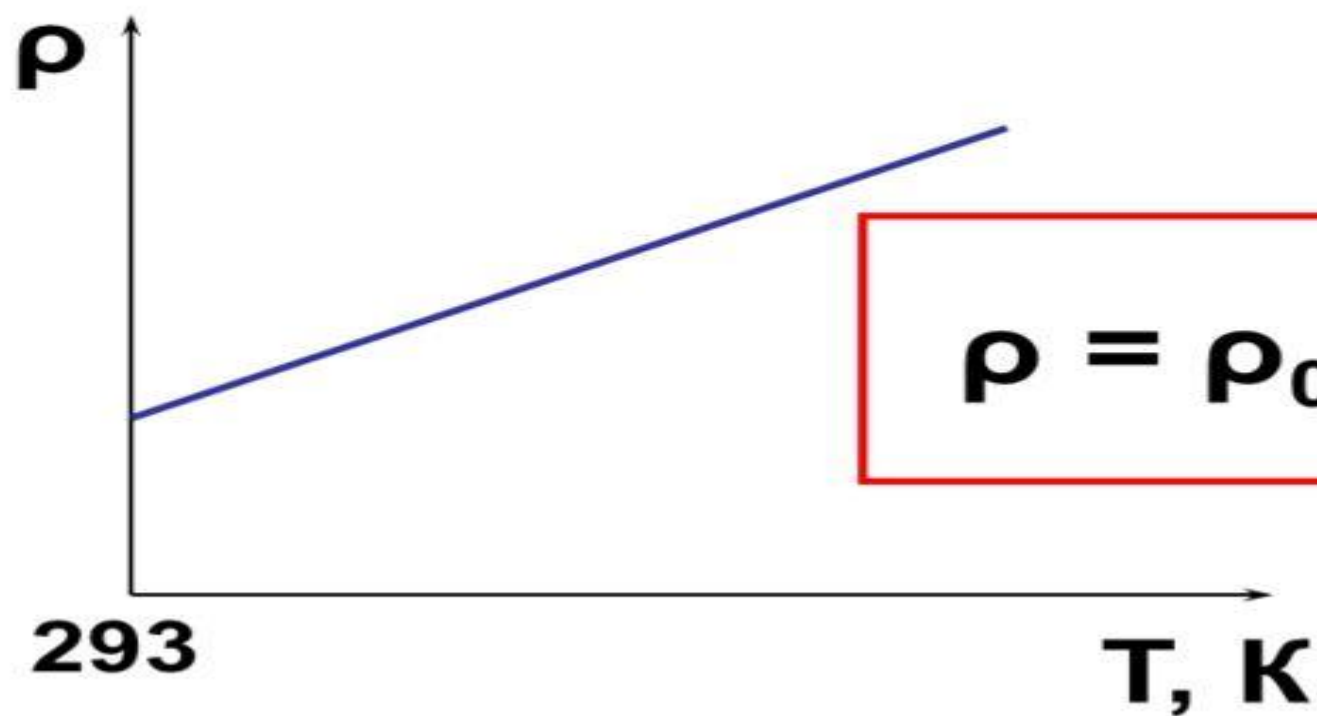
При нагревании проводника его геометрические размеры меняются незначительно. Сопротивление проводника меняется за счёт изменения его удельного сопротивления.

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t).$$

Сопротивление металлических проводников увеличивается с повышением температур



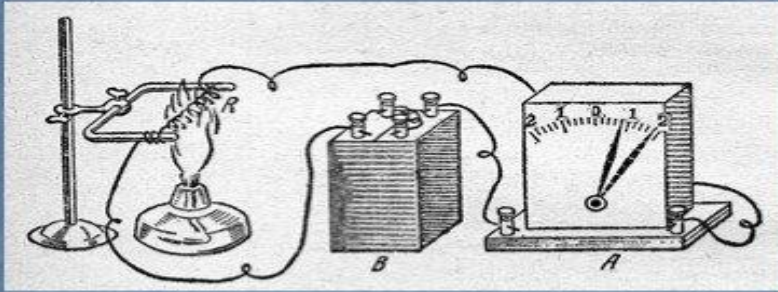
Зависимость сопротивления проводника от температуры



$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

$$\alpha = \frac{1}{273} K^{-1}$$

Зависимость сопротивления проводника от температуры

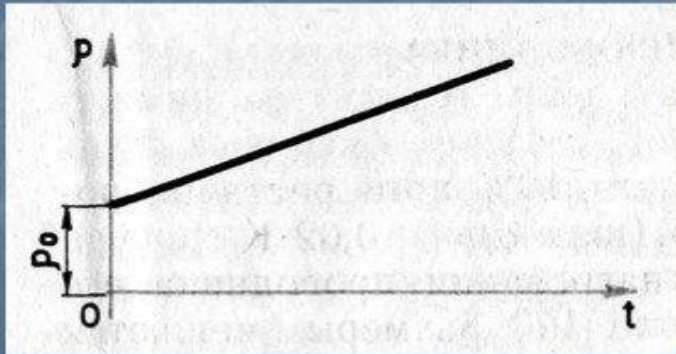


$$\frac{R - R_0}{R} = \alpha t$$

$$R = R_0(1 + \alpha t),$$

где α - температурный коэффициент сопротивления,

R_0 - сопротивление проводника при $t = 0^{\circ}\text{C}$



$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$$

ρ - удельное сопротивление проводника

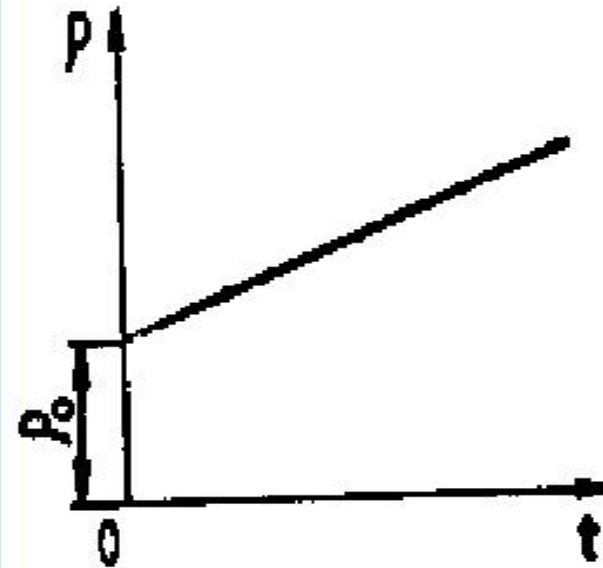
ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

- **Опыт:**
Если пропустить ток от аккумулятора через стальную спираль, а затем начать нагревать ее в пламени горелки, то амперметр покажет уменьшение силы тока.
- Это означает, что с изменением температуры сопротивление проводника меняется.
- Если при температуре, равной 0°C , сопротивление проводника равно R_0 , а при температуре t оно равно R , то относительное изменение сопротивления, как показывает опыт, прямо пропорционально изменению температуры - Δt :

$$\frac{R-R_0}{R} = \alpha \Delta t$$

(1)

- Коэффициент пропорциональности α называют температурным коэффициентом сопротивления. Он характеризует зависимость сопротивления вещества от температуры.
- Температурный коэффициент сопротивления численно равен относительному изменению сопротивления проводника при нагревании на 1 К. Для всех металлических проводников $\alpha > 0$ и незначительно меняется с изменением температуры.



Зависимость сопротивления электролита от температуры

Температурная зависимость сопротивления электролита объясняется в основном изменением удельного сопротивления.

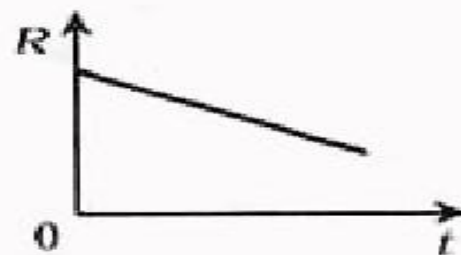
$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

, где альфа - температурный коэффициент сопротивления

Для электролитов всегда

$$\alpha < 0$$

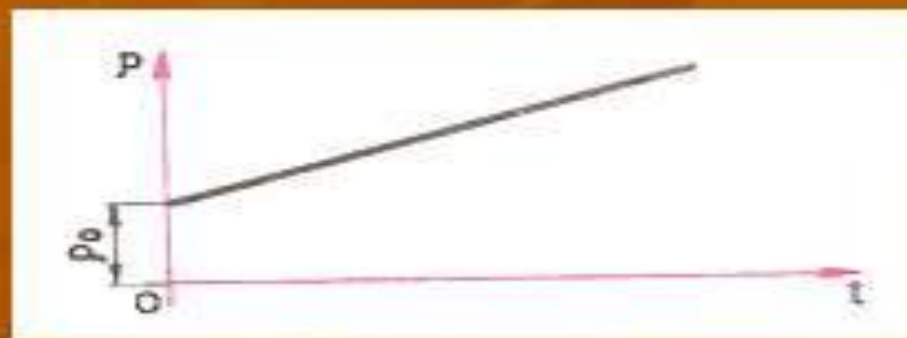
поэтому



Сопротивление электролита можно рассчитать по формуле:

$$R = R_0 (1 + \alpha t)$$

Так как температурный коэффициент меняется при изменении температуры проводника, то удельное сопротивление проводника линейно зависит от температуры.

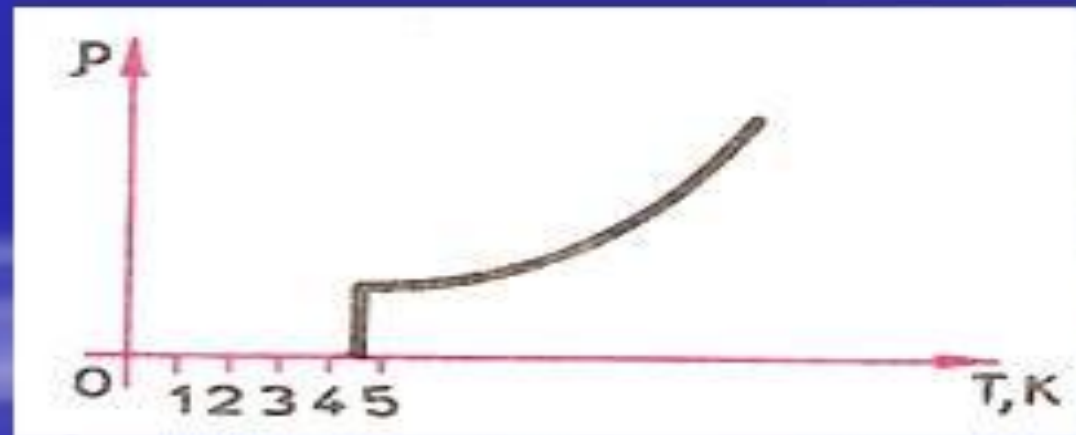


Хотя температурный коэффициент довольно мал, учёт зависимости сопротивления от температуры при расчёте нагревательных приборов совершенно необходим.

Зависимость сопротивления металлов от температуры используют в **термометрах сопротивления**. Такие термометры позволяют измерять очень низкие и очень высокие температуры, когда обычные жидкостные термометры непригодны.

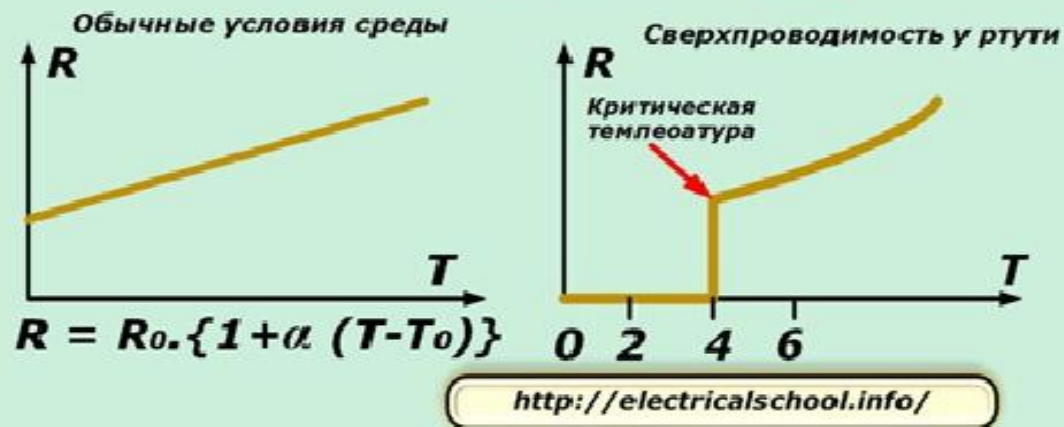
Сверхпроводимость

Сверхпроводимость – это явление, в котором у некоторых металлов удельное сопротивление падает до 0 при t выше абсолютного 0. Явление сверхпроводимости открыл в 1911 году голландский физик Камерлинг-Оннес. Он обнаружил, что при охлаждении ртути в жидком гелии её сопротивление сначала меняется постепенно, а затем при температуре 4,1 К очень резко падает до 0.



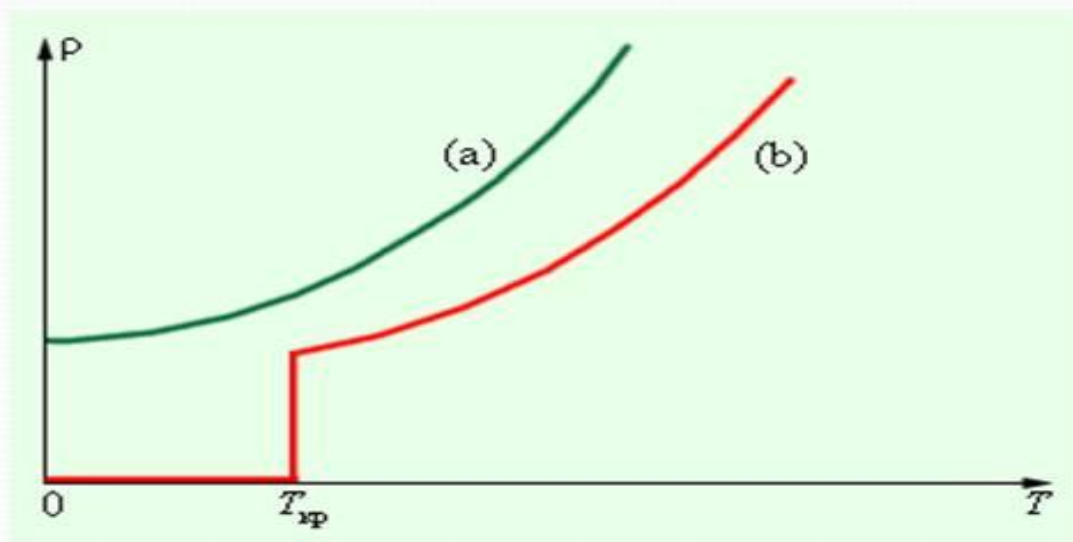
Зависимость сопротивления проводника от температуры

Зависимость сопротивления металлического проводника от температуры



- Удельное сопротивление, а следовательно, и сопротивление металлов, зависит от температуры, увеличиваясь с ее ростом. Температурная зависимость сопротивления проводника объясняется тем, что
- 1. возрастает интенсивность рассеивания (число столкновений) носителей зарядов при повышении температуры;
- 2. изменяется их концентрация при нагревании проводника.

Зависимость сопротивления проводника от температуры

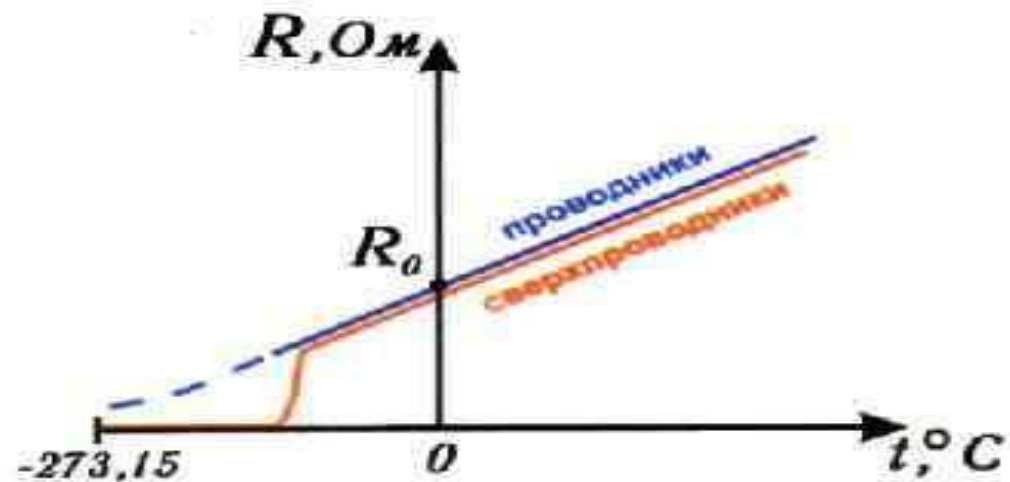


- (а) – проводник
- (б) – сверхпроводник

Сопротивление и удельное сопротивление зависят от температуры. Для металлов:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$$

$$R = R_0(1 + \alpha t)$$



α - температурный коэффициент сопротивления ($^\circ\text{C}^{-1}$)

Графическая зависимость сопротивления от температуры для металлов дана на рис.

Резисторы и термисторы. Зависимость сопротивления от температуры

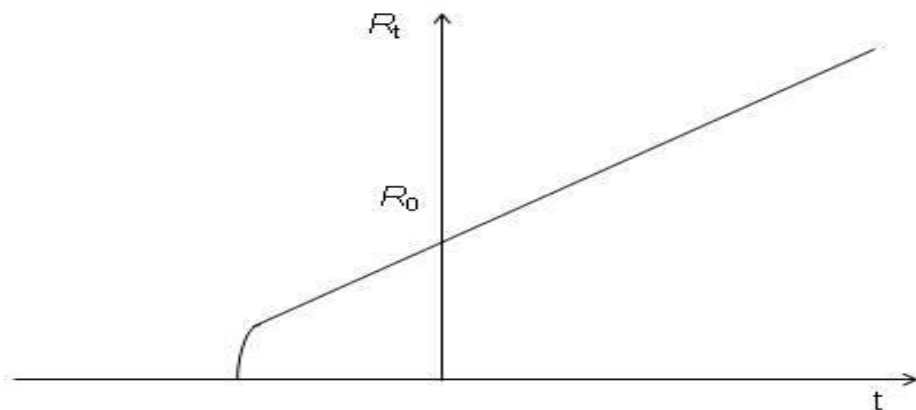


Рис. Зависимость сопротивления проводников от температуры

Изобразим эту зависимость графически (рис. 1.2.1)

Для большинства металлов $\alpha \approx 10^{-3}$, например, для меди $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

Однако, существуют сплавы, для которых $\alpha \approx 10^{-5}$. Их сопротивление практически не зависит от температуры. Один из таких сплавов называется **константан**.

При создании электрического тока в кольце у сверхпроводника сила тока остаётся неизменной неограниченно долго, так как нет потерь на нагревание проводника.

Сверхпроводники находят широкое применение. Так, сооружают мощные электромагниты со сверхпроводящей обмоткой, которые создают магнитное поле на протяжении длительных интервалов времени без затрат энергии. *Ведь выделения теплоты в сверхпроводящей обмотке не происходит.*

Однако получить сильное магнитное поле с помощью сверхпроводящего магнита нельзя. *Очень сильное магнитное поле разрушает сверхпроводящее состояние.*

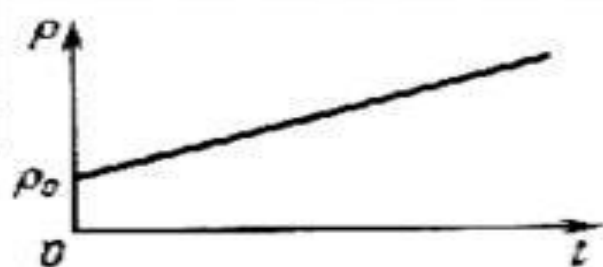
Сверхпроводящие магниты используются в ускорителях элементарных частиц, магнитогидродинамических генераторах.

Объяснение сверхпроводимости возможно только на основе квантовой теории. Оно было дано в 1957 году американскими учёными Дж. Бардиным, Л. Купером, Дж. Шриффером и советским учёным академиком Н.Н. Боголюбовым.

В 1986 году была открыта высокотемпературная сверхпроводимость. Получены сложные оксиды соединения лантана, бария и других элементов с температурой перехода в сверхпроводящее состояние около 100 К. Это выше температуры кипения жидкого азота при атмосферном давлении.

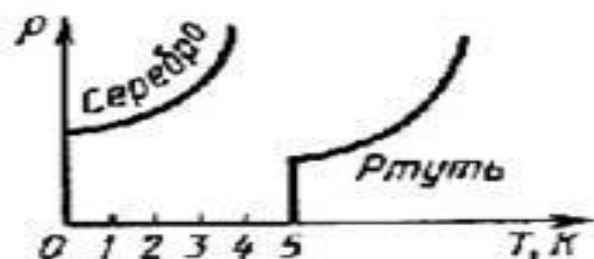
Высокотемпературная сверхпроводимость в будущем приведёт к новой технической революции во всей электротехнике, радиотехнике, конструировании ЭВМ.

Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры



$$\rho = \rho_0(1 + a t),$$

Сверхпроводимость



Исчезновение сопротивления проводника при низких температурах.

Пример решения задачи

Определите сопротивление алюминиевого проводника при температуре $t_2 = 90$ °С, если при температуре $t_1 = 20$ °С его сопротивление $R_1 = 4,0$ Ом. Температурный коэффициент сопротивления алюминия $\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

Дано:

$$t_2 = 90 \text{ °С}$$

$$t_1 = 20 \text{ °С}$$

$$R_1 = 4,0 \text{ Ом}$$

$$\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$$

$$R_2 = ?$$

Решение. Согласно формуле (24.2) сопротивления проводника при температурах t_1 и t_2 соответственно

$$R_1 = R_0(1 + \alpha \Delta T_1), \quad R_2 = R_0(1 + \alpha \Delta T_2).$$

Решая систему уравнений, получим

$$R_2 = R_1 \frac{1 + \alpha \Delta T_2}{1 + \alpha \Delta T_1}.$$

Поскольку $\Delta T = \Delta t = t - t_0$, где $t_0 = 0,0$ °С, то $\Delta T_2 = 90$ К, $\Delta T_1 = 20$ К.

$$R_2 = 4,0 \text{ Ом} \cdot \frac{1 + 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1} \cdot 90 \text{ К}}{1 + 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1} \cdot 20 \text{ К}} = 5,1 \text{ Ом}.$$

Ответ: $R_2 = 5,1$ Ом.



Электрический ток в полупроводниках



Исследования проводимости различных материалов начались непосредственно в XIX веке сразу после открытия гальванического тока. Первоначально материалы делили на две группы: проводники и диэлектрики. Позже были открыты материалы, чьи свойства не подходили полностью ни под одну группу. Эти вещества получили название полупроводников, хотя они вполне заслуживали и названия «полуизоляторов». Они проводят ток несколько лучше, чем изоляторы, и значительно хуже проводников.



Электрические свойства веществ

проводники

Удельное сопротивление -
от 10^{-8} до 10^{-6} Ом·м

полупроводники

Удельное сопротивление -
от 10^{-3} до 10^7 Ом·м

диэлектрики

Удельное сопротивление -
от 10^{10} до 10^{16} Ом·м

Полупроводники – вещества, удельное сопротивление которых больше удельного сопротивления металлов, но меньше удельного сопротивления диэлектриков

Полупроводники в природе



Алмаз

B 10.81 Бор	5	C 12.011 Углерод	6	N 14.007 Азот	7				
Al 26.981 Алюминий	13	Si 28.086 Кремний	14	P 30.973 Фосфор	15	S 32.06 Сера	16		
Zn 65.38 Цинк	30	Ga 69.72 Галлий	31	Ge 72.59 Германий	32	As 74.921 Мышьяк	33	Se 78.96 Селен	34
Cd 112.40 Кадмий	48	In 114.82 Индий	49	Sn 118.69 Олово	50	Sb 121.75 Сурьма	51	Te 127.60 Теллур	52
Hg 200.59 Ртуть	80								



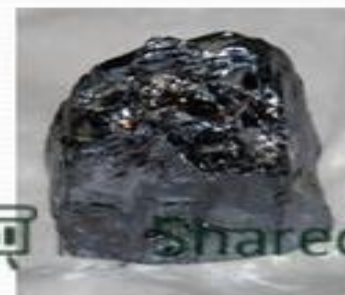
Кремний



Арсенид галлия



Арсенид индия



Shared

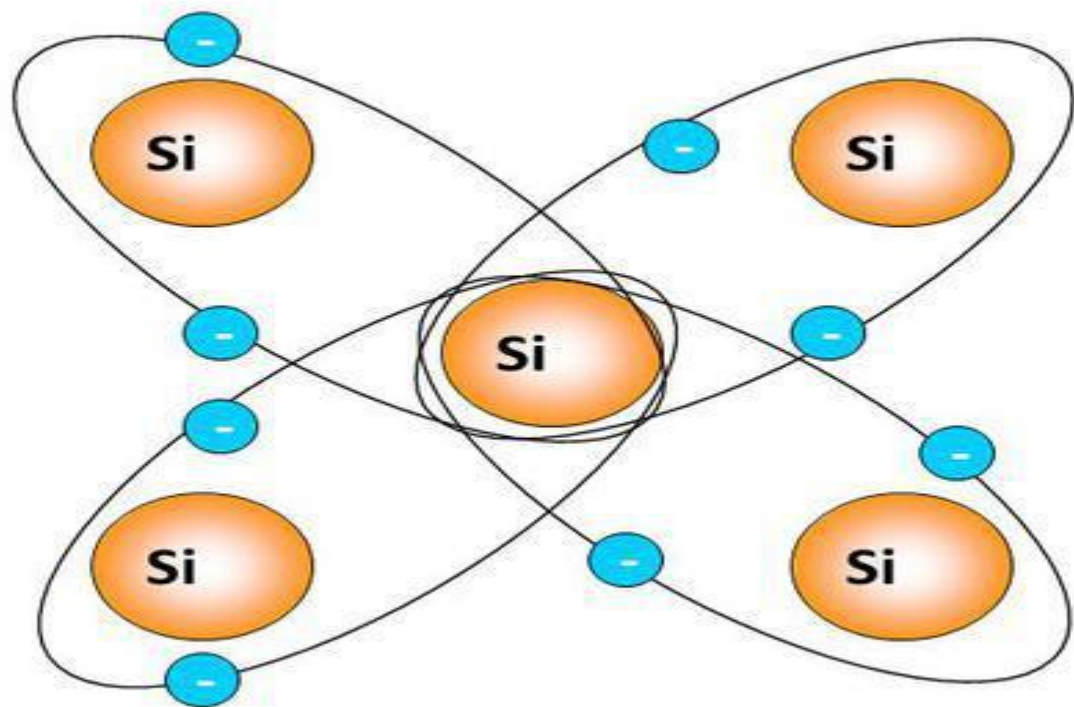
Физические свойства полупроводников

Полупроводники — материалы, которые по своей удельной проводимости занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками. Основным свойством этих материалов является увеличение электрической проводимости с ростом температуры.

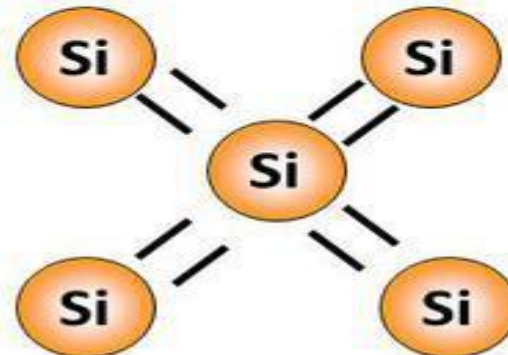




Строение полупроводника на примере кремния

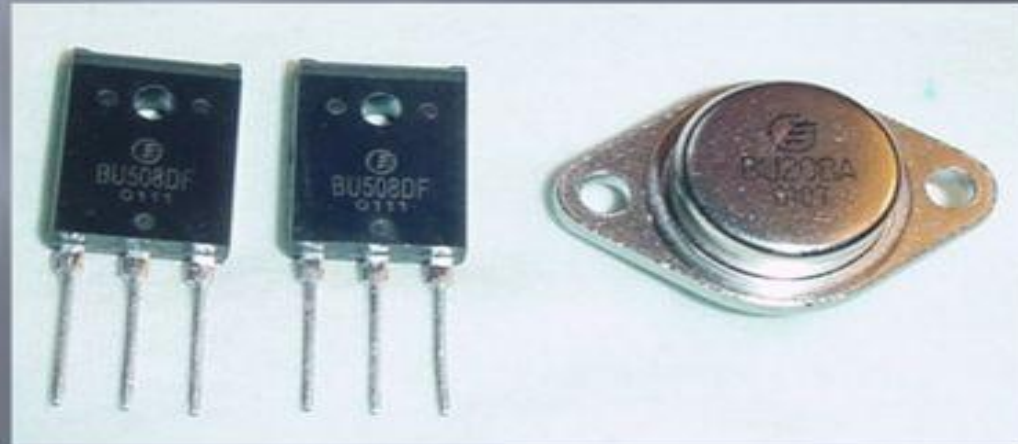


Кремний – 4 валентный химический элемент. Каждый атом имеет во внешнем электронном слое по 4 электрона, которые используются для образования парноэлектронных (ковалентных) связей с 4 соседними атомами



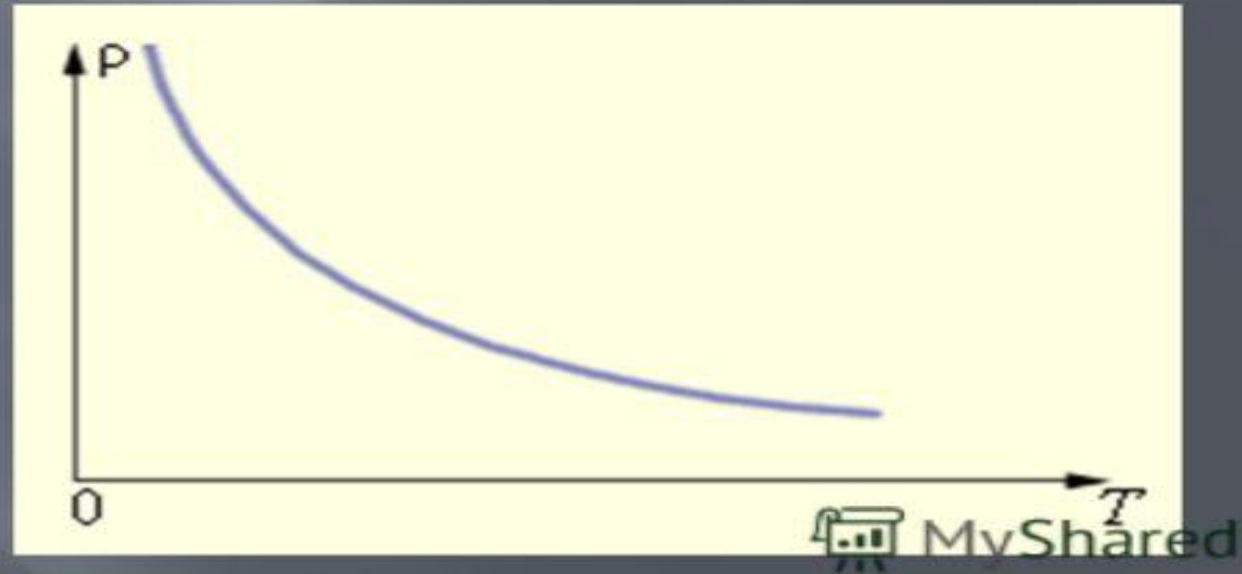
При низких температурах (включая и комнатную) химически чистые полупроводники не проводят электрический ток

- ✓ Полупроводники – это вещества, у которых удельное сопротивление с увеличением температуры не растет, как у металлов, а, наоборот, чрезвычайно резко уменьшается. Носителями являются электроны и дырки.



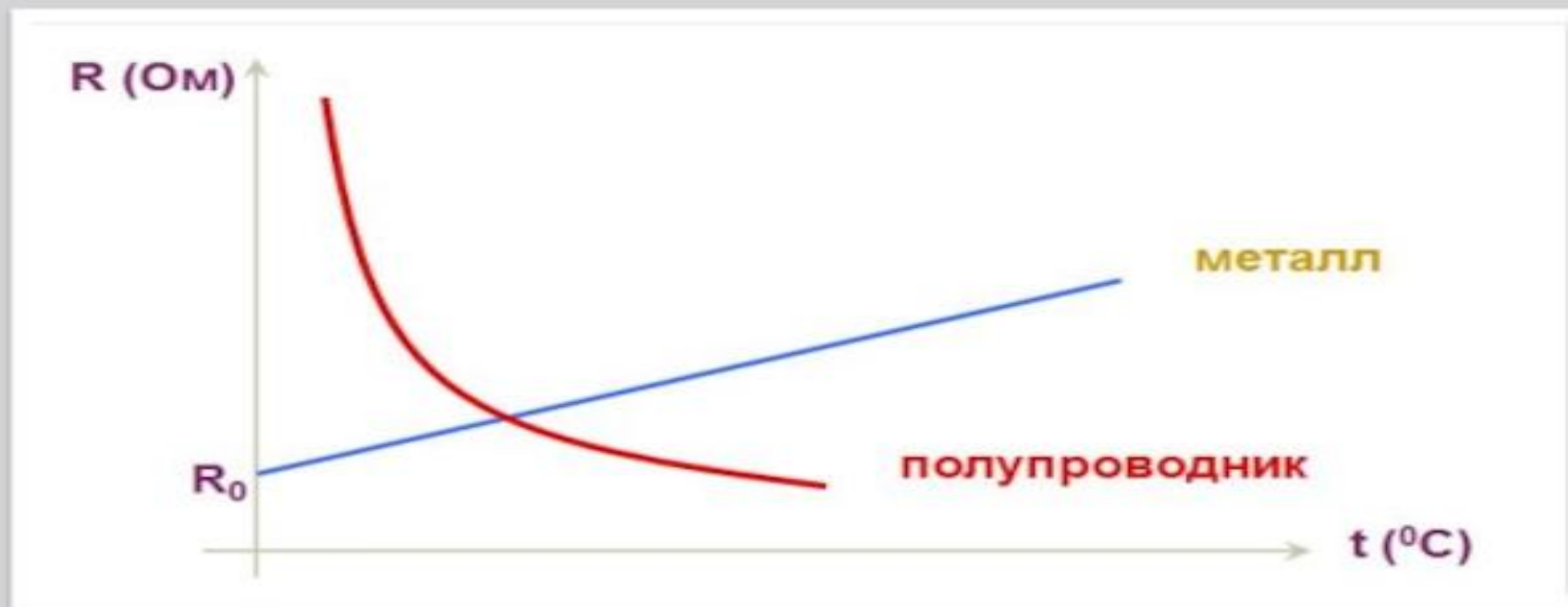
Зависимость удельного сопротивления от температуры

При повышении температуры полупроводника его удельное сопротивление быстро уменьшается.



Проводимость полупроводников зависит от температуры. В отличие от проводников, сопротивление которых возрастает с ростом температуры, сопротивление полупроводников при нагревании уменьшается. Вблизи абсолютного нуля температуры полупроводники имеют свойства диэлектриков.

Это происходит потому, что при увеличении температуры растет число свободных носителей заряда, проводимость полупроводников растет, сопротивление уменьшается



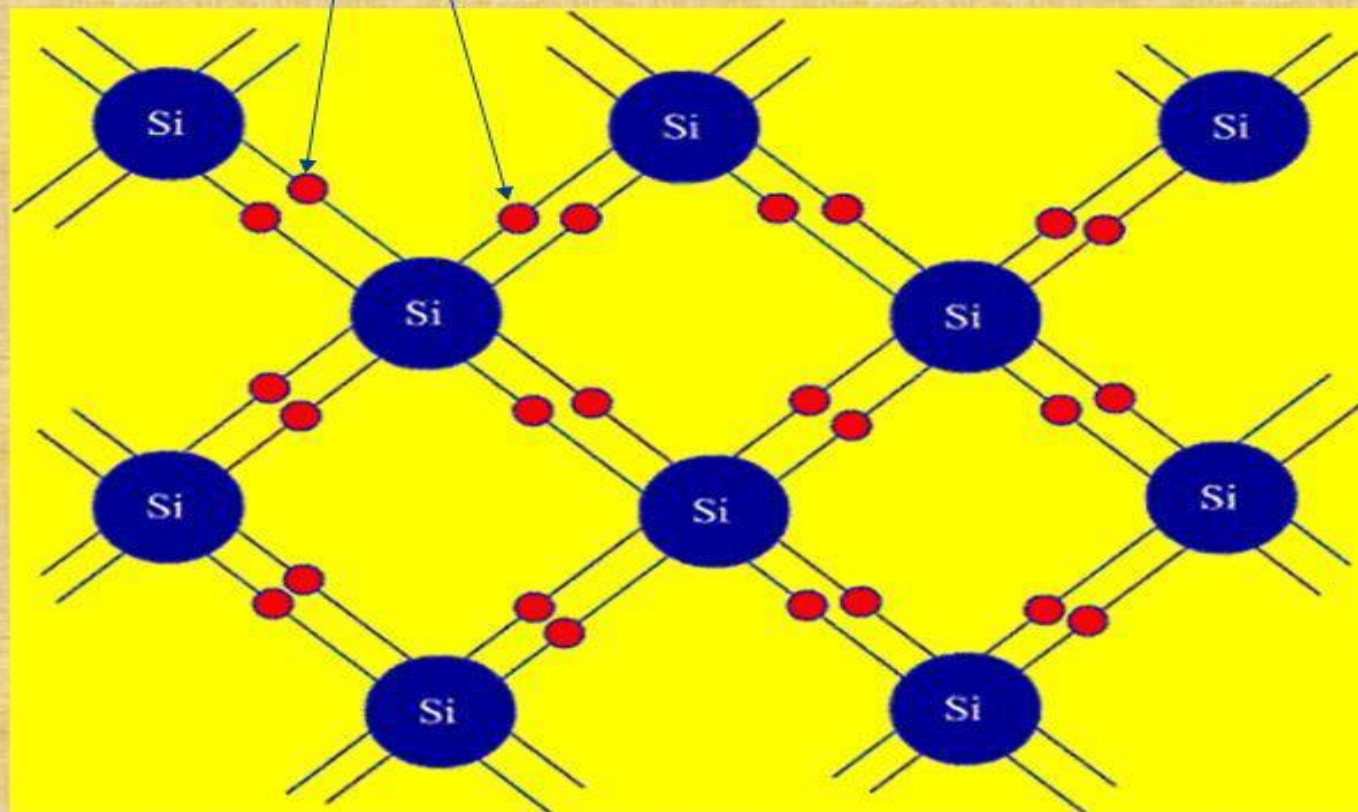
Основные свойства полупроводников

Полупроводниками являются химические элементы кремний (Si), германий (Ge), селен (Se), Теллур (Te) и некоторые химические соединения.

При низких температурах чистые полупроводники не проводят электрического тока, т.к. в них нет свободных зарядов. Кремний и германий имеют на внешней электронной оболочке по 4 электрона. В кристалле каждый из этих электронов принадлежит двум соседним атомам, образуя т.н. ковалентную связь. Эти электроны участвуют в тепловом движении, но остаются на своих местах в кристалле.

Строение кристалла кремния

Валентные электроны



При повышении температуры некоторые электроны покидают свои места в кристалле.

Когда электрон уходит со своего места в кристалле, он становится свободной частицей и движется в кристалле хаотически. Оставленное электроном место называют «дыркой». На место дырки приходит валентный электрон, расположенный поблизости, при этом образуется новая дырка. На место этой новой дырки также приходит электрон, и т.д. Таким образом, дырка перемещается по кристаллу полупроводника также хаотически.

При приложении к кристаллу внешнего электрического поля движение свободных электронов и дырок происходит под его воздействием: электроны движутся к плюсу, а дырки – к минусу. При этом дырка ведёт себя как частица, заряженная положительно.



Количество электронов и дырок в чистом полупроводнике невелико, и поэтому ток в нём очень слабый. Для увеличения количества свободных заряженных частиц в полупроводник внедряются примеси. При этом используется технология, позволяющая атомам примеси замещать атомы кремния или германия в кристаллической решётке.

Для увеличения количества свободных электронов к полупроводнику подмешивают некоторое количество пятивалентного элемента – мышьяка (As). При этом 4 валентных электрона атома мышьяка заполняют ковалентные связи, а пятый электрон остаётся свободным. При наличии электрического поля он перемещается в сторону плюса. Если атомов примеси достаточно, то в кристалле протекает значительный ток.





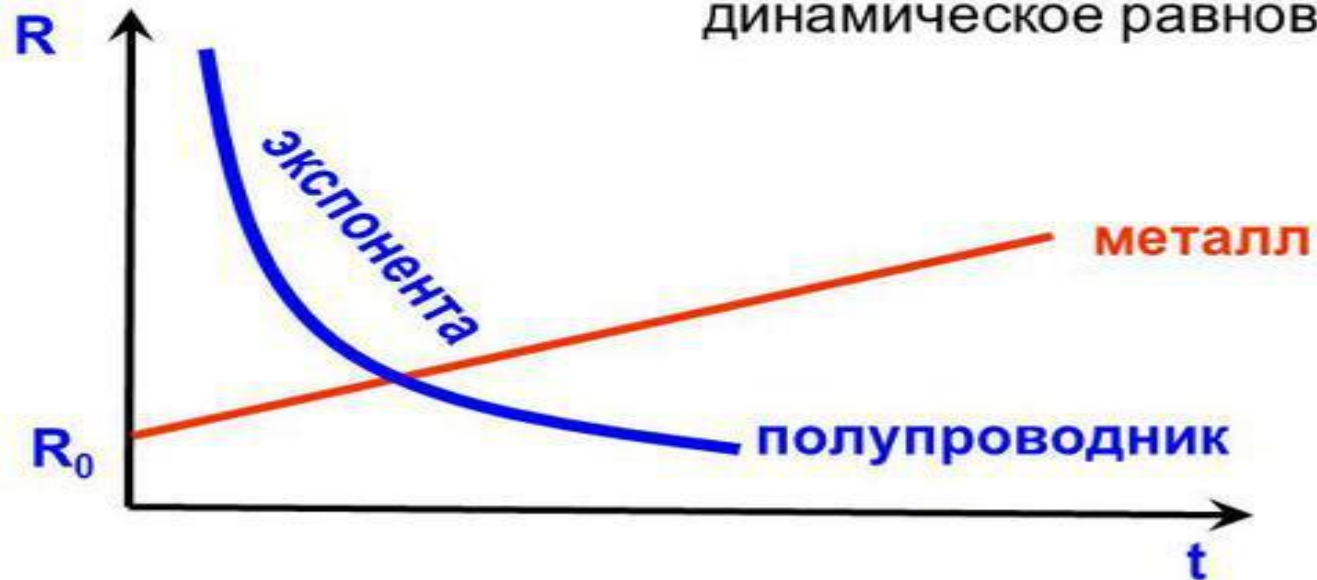
Строение полупроводника на примере кремния

С увеличением температуры у полупроводников возрастает число свободных электронов и дырок, их проводимость увеличивается, а сопротивление падает



График зависимости сопротивления от температуры

При неизменной температуре между электронами и дырками поддерживается динамическое равновесие



При отсутствии электрического поля электроны и дырки участвуют в тепловом хаотическом движении

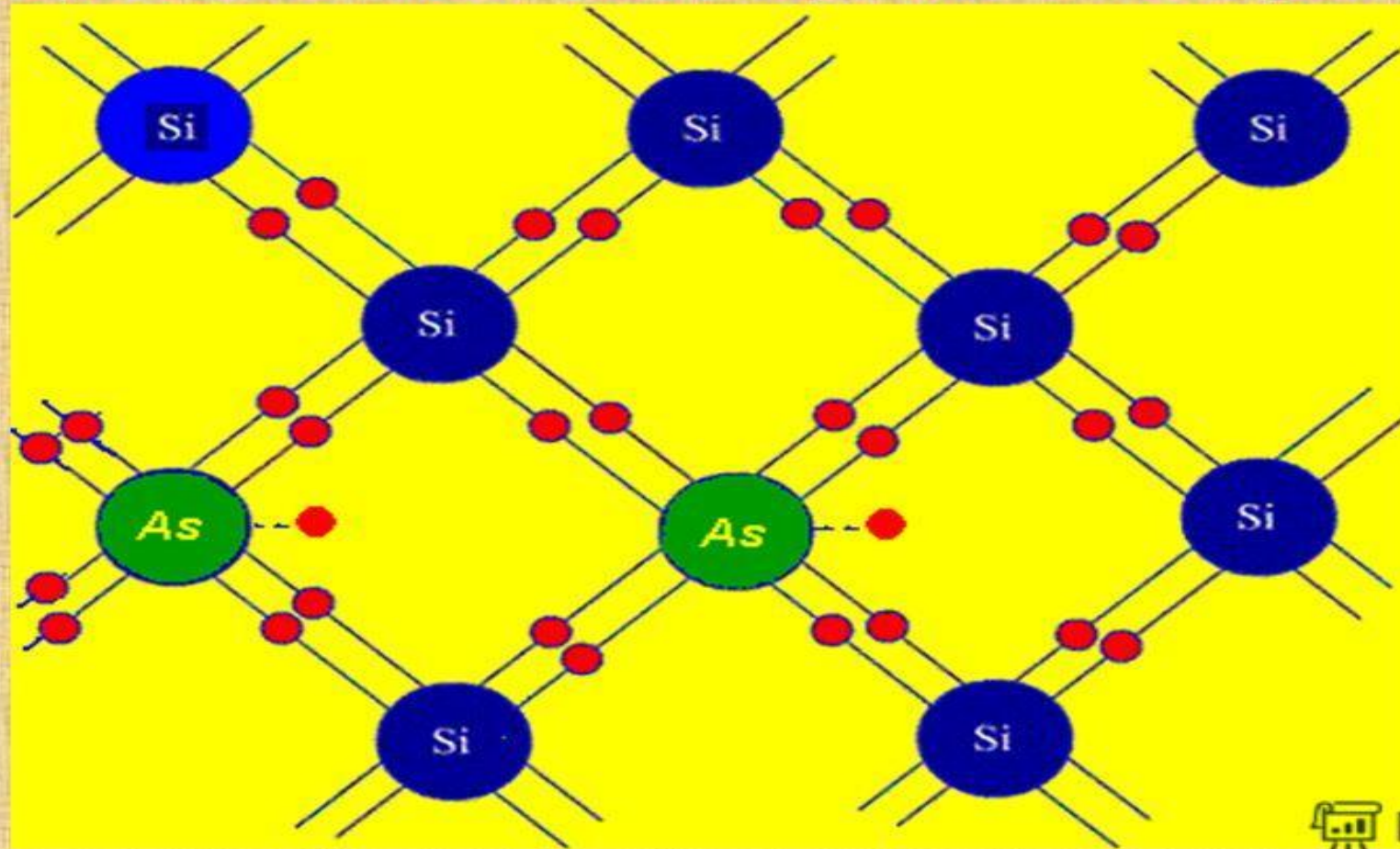


Ток в химически чистом полупроводнике – это упорядоченное движение электронов и дырок по полупроводнику вдоль силовых линий электрического поля, в которое он помещен

Проводимость химически чистых полупроводников, обусловленная движением электронов и дырок, называется **электронно-дырочной (собственной) проводимостью**

Полупроводники с собственной проводимостью называются **собственными полупроводниками**

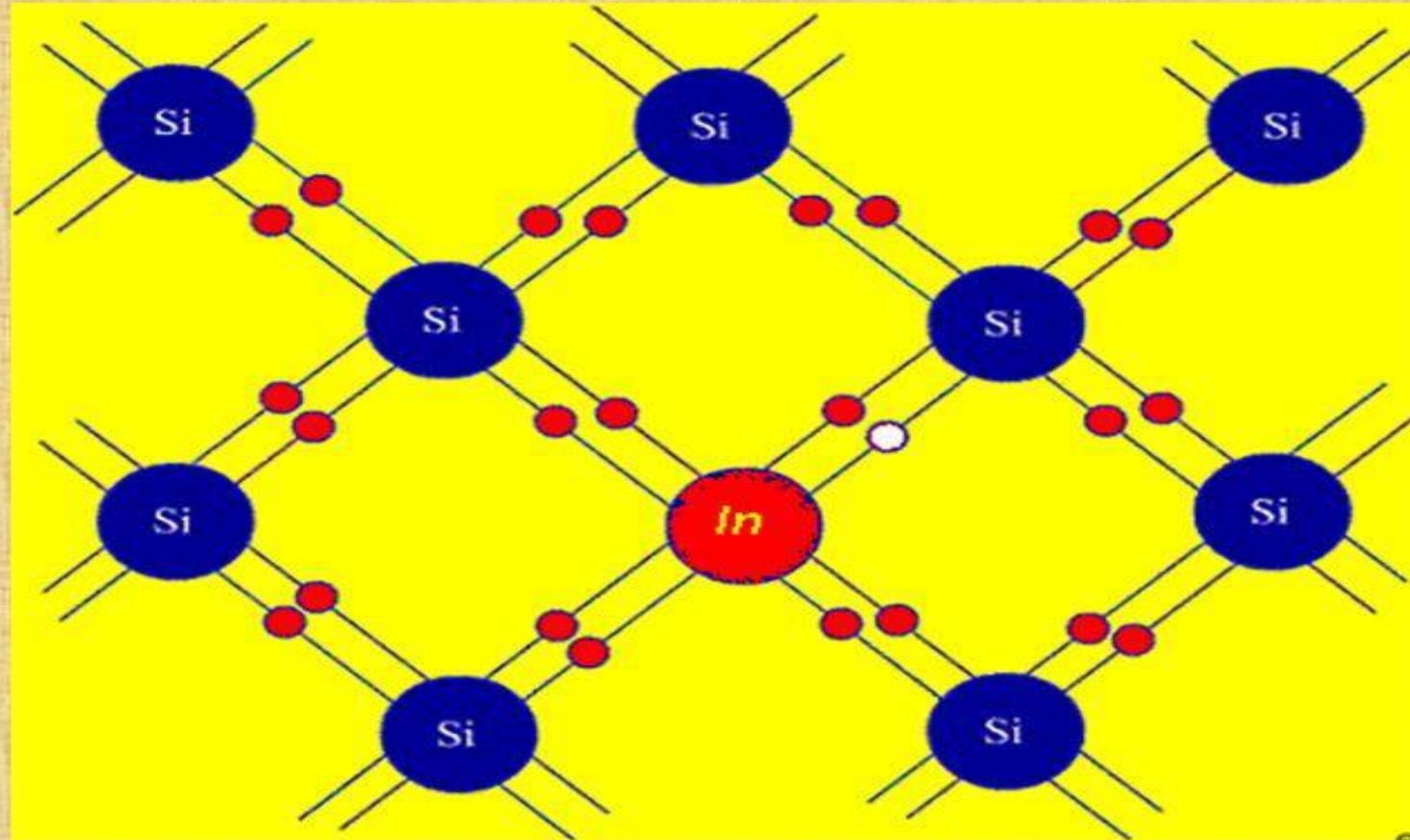
Внедрение атомов мышьяка в кристаллическую структуру кремния с образованием свободных электронов



Примесь, которая образует свободные электроны, называется донорной, а полупроводник с такой примесью называется полупроводником *n*-типа (от слова *negative* – отрицательный).

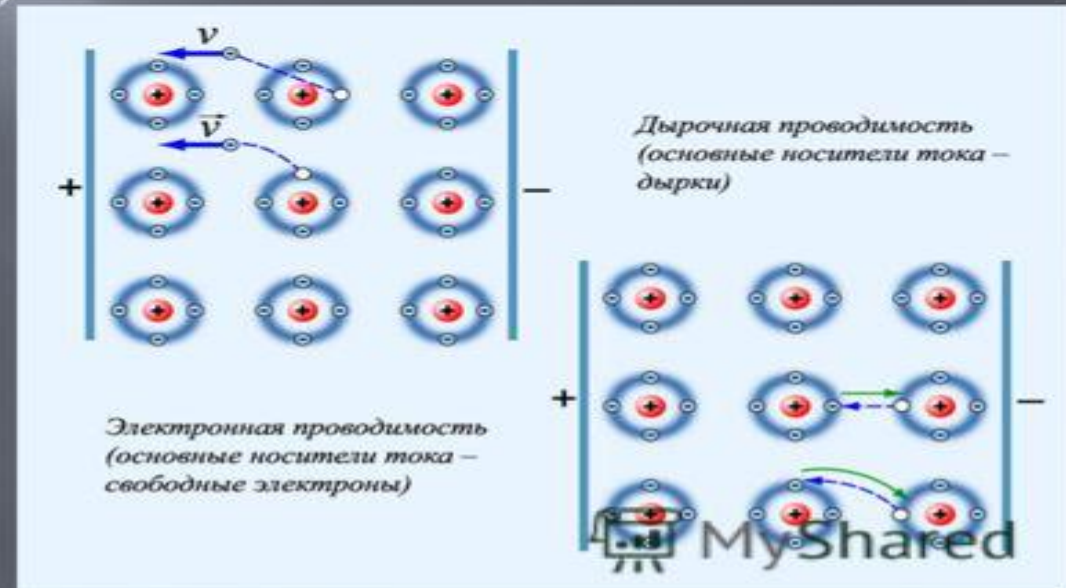
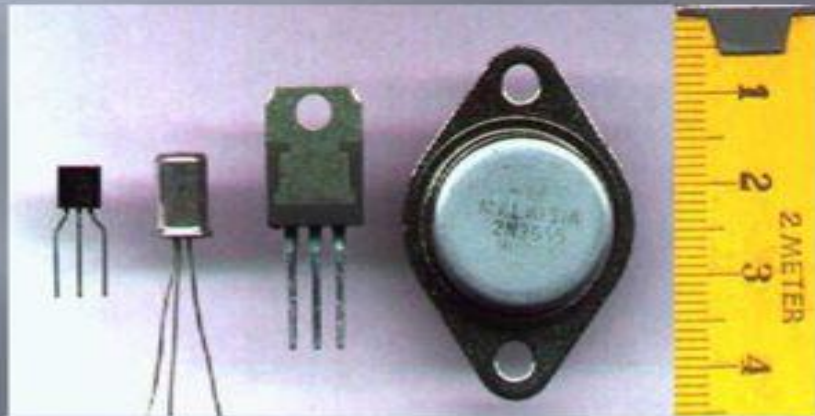
Для получения полупроводника с дырочной проводимостью в него внедряют элемент с тремя электронами на внешней оболочке, например, индий (In), электроны которого могут заполнить только 3 ковалентные связи из 4. В результате около атома индия образуется дырка, а в полупроводнике – дырочная проводимость. Такая примесь называется акцепторной, а полупроводник – *p*-типа (от слова *positive* – положительный).

Внедрение атомов индия в кристалл кремния с образованием дырок



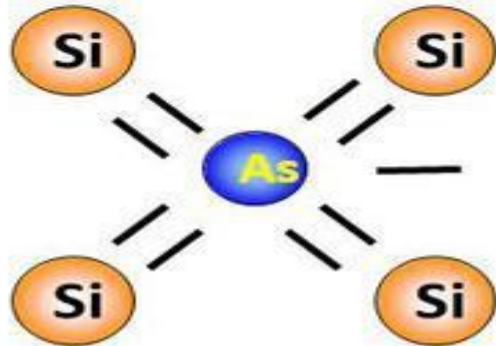
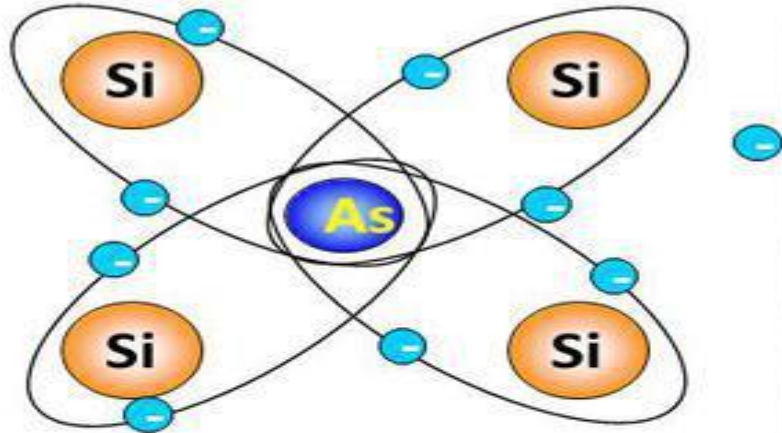
Электронная и дырочная проводимость

Проводимость чистых полупроводников (собственная проводимость) осуществляется перемещением свободных электронов (электронная проводимость) и перемещением связанных электронов на вакантные места парноэлектронных связей (дырочная проводимость)





Примесная проводимость полупроводников



Донорная проводимость – проводимость полупроводников, обусловленная наличием в них избыточных электронов примеси

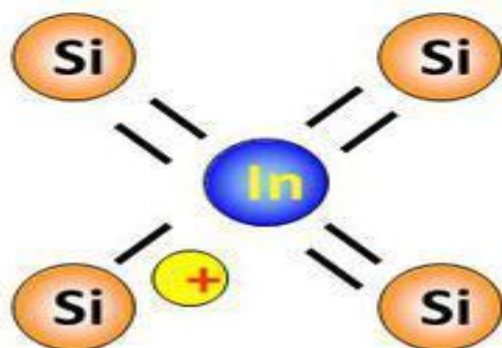
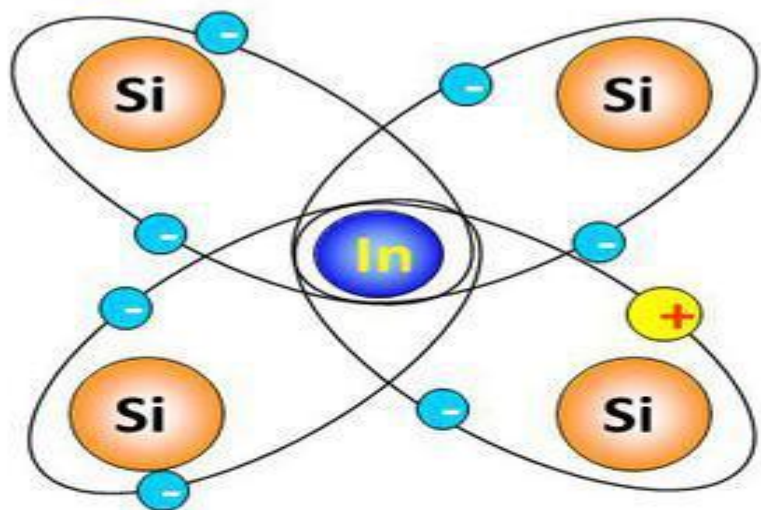
Донор (лат. donare - дающий) – вещество, поставляющее в полупроводник дополнительные электроны

Полупроводник n-типа (лат. negativus - отрицательный) – полупроводник с донорной примесью

Примесь является донором в том случае, когда ее валентность больше валентности основного полупроводника



Акцепторная проводимость полупроводников



Акцепторная проводимость – проводимость полупроводников, обусловленная наличием в них дырок

Акцептор (лат. accipere - приемник) – вещество, поставляющее в полупроводник дырки

Полупроводник p-типа (лат. positiv - положительный) – полупроводник с акцепторной примесью

Примесь является акцептором в том случае, когда ее валентность меньше валентности основного полупроводника



MyShared

Примесная проводимость полупроводников

Дозированное введение в чистый проводник примесей позволяет целенаправленно изменять его проводимость.

Поэтому для увеличения проводимости в чистые полупроводники внедряют примеси (легируют), которые бывают **донорные** и **акцепторные**



1.2. Резисторы и термисторы. Зависимость сопротивления от температуры

Для измерения температуры можно использовать и полупроводники с р- и n- проводимостью. Для полупроводников зависимость сопротивления от температуры носит обратный характер (рис. 1.2.2)

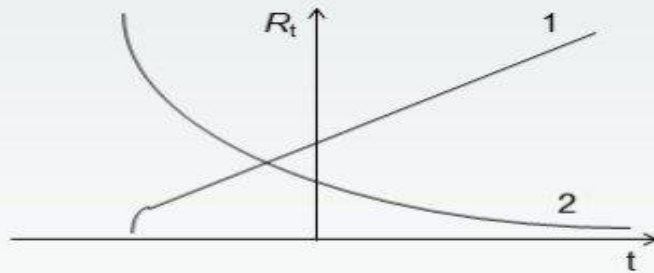


Рис. 1.2.2. Зависимость сопротивления от температуры: (1) - для терморезисторов, (2) - для термисторов.

Датчики температуры на основе металлических проводников носят название **терморезисторы**. Датчики на основе полупроводников носят название **термисторы**.