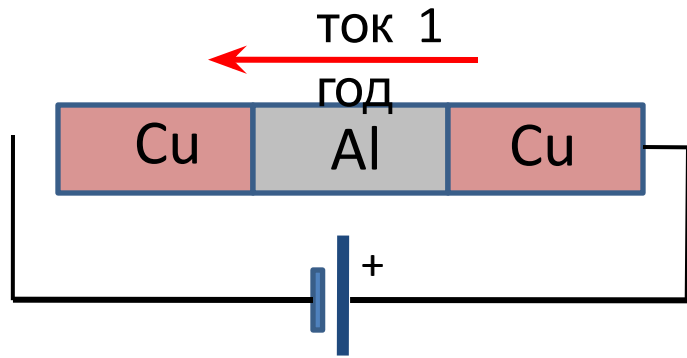


# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

# Природа электрического тока в металлах

## Опыт Рикке



До опытов Рикке было хорошо известно, что ток в жидкостях и газе связан с переносом вещества.

Целью данного эксперимента было выяснение вопроса – существует ли хотя бы в малейшей

степени перенос вещества при прохождении тока по металлу.

С этой целью Рикке взял три цилиндра с тщательно отполированными торцами, составил из них электрическую цепь, как это показано на рисунке,

и пропускал по этой цепи ток в одном направлении в течение длительного времени (1 год). Затем он разобрал цепь и тщательно исследовал под микроскопом торцы, находившиеся в контакте друг с другом.

## Результаты эксперимента

Оказалось, что на контактирующих торцах  
цилиндров  
не обнаружено следов другого металла

## **Вывод**

Прохождение электрического тока по металлу не  
связано с  
переносом вещества

# Опыт Стюарта и

## Толмена

Носители электрического тока в металлах являются свободными в том смысле, что при сколь угодно

малом

напряжении в проводнике возникает ток

(механическая аналогия – брусок, лежащий на Земле сдвинется с места начиная только

с определенной величины силы. Большой корабль при отсутствии ветра и течения можно

сдвинуть с места одним мизинцем)

## Идея эксперимента

Если проводник разогнать до большой скорости и затем резко

затормозить, то носители заряда продолжат

движение по

# «Водяная» аналогия



При резком торможении тележки вода  
продолжает свое  
движение по инерции и выливается из кузова  
тележки

удалось определить отношение . Оно оказалось равным  $1,8 \cdot 10^{11}$  Кл/кг. Эта величина совпадает с отношением заряда электрона к его массе, найденным ранее из других опытов.

# Классическая теория проводимости металлов

Друде и Лорентц предложили рассматривать электроны в металле как свободный газ.

Скорость теплового хаотического движения свободных

электронов определяется соотношением:

$$\frac{m \cdot V^2}{2} = \frac{3}{2} k T$$

где  $m$  – масса электрона,

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$V$  – скорость теплового

движения

$k$  – постоянная Больцмана,

$k =$

Однако в рамках этой теории возникли трудности. Из теории следовало, что удельное сопротивление должно быть пропорционально корню квадратному из температуры, между тем, согласно опыту,  $\rho \sim T$ . Кроме того, теплоемкость металлов, согласно этой теории, должна быть значительно больше теплоемкости одноатомных кристаллов. В действительности теплоемкость металлов мало отличается от теплоемкости неметаллических кристаллов. Эти трудности были преодолены только в квантовой теории.



# Скорость упорядоченного движения электронов в металле

Оценим скорость упорядоченного движения электронов в металле, считая, что на каждый атом металла приходится по

$$I = j \cdot S = e \cdot n \cdot v_y \cdot S$$

одному свободному электрону.

Пусть по проводнику сечением  $S=1 \text{ мм}^2$  течет ток  $I=10 \text{ А}$

где  $n$  – концентрация

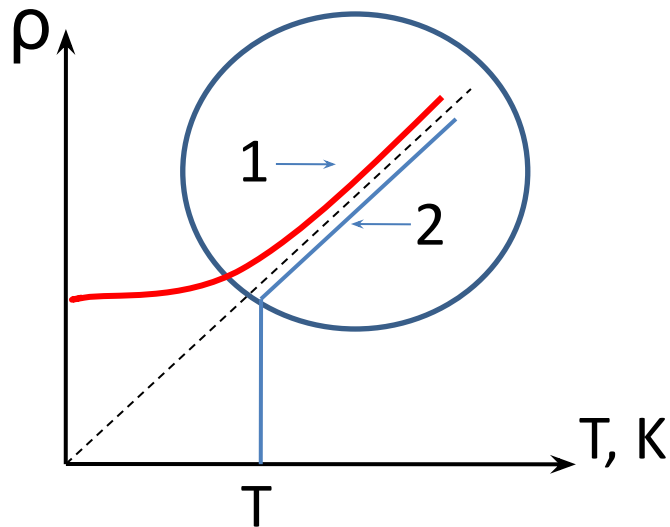
электронов

Если масса вещества в единице объема – это плотность  $\rho$ , а

$\mu$  – молекулярный вес, то  $\rho/\mu$  – это число молей в

М.б. самостоятельно найти для меди и сравнить с  
тепловой

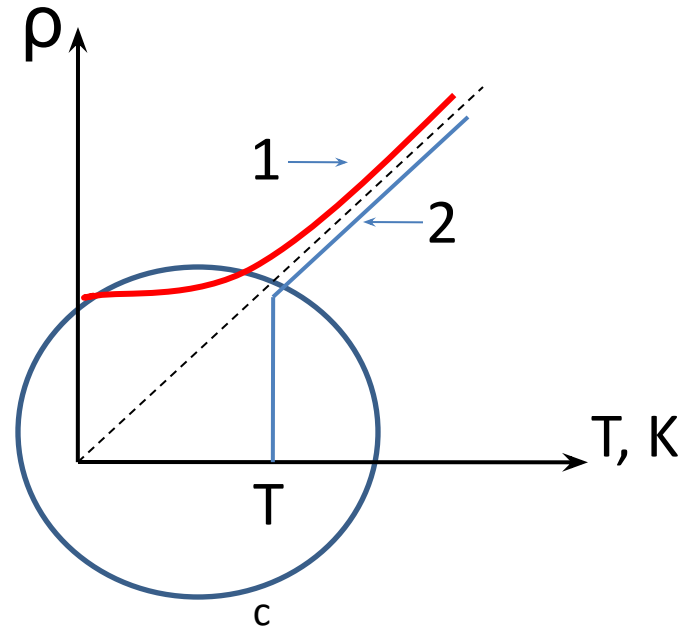
# Температурная зависимость проводимости металлов



Для металлов при комнатной температуре и выше наблюдается линейный рост сопротивления с температурой:

$R=R_0+\alpha\cdot\Delta t$ , где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления,  $\Delta t$ -разница между текущей температурой и температурой, при которой  $R=R_0$ .

Для чистых металлов  $\alpha \approx 1/273 \text{ K}^{-1}$ .



При низких температурах колебания кристаллической решетки не оказывают существенного влияния на движение свободных электронов.

Удельное сопротивление  $\rho$  не изменяется с температурой (график №1).

Для некоторых металлов при температуре  $T_c$  сопротивление становится равным нулю – проводник переходит в сверхпроводящее

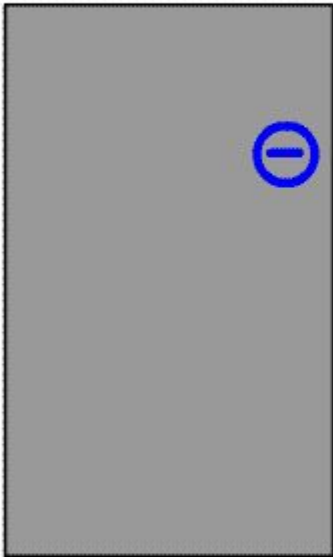
# **Контактные явления**

# Понятие о работе выхода

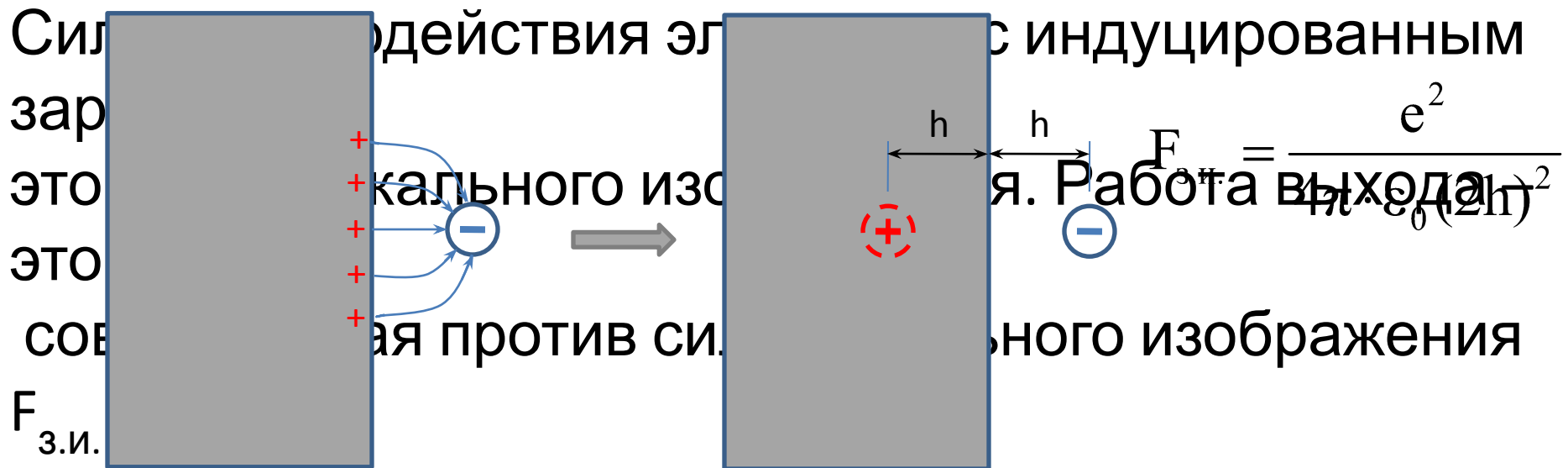
Работа выхода – это энергия, которую необходимо затратить, чтобы удалить электрон из металла в вакуум на  $\infty$

металл

вакуум



Электрон, находящийся вне металла, вызывает появление индукционного заряда на его поверхности. Эти индукционные заряды притягивают к себе электрон, находящийся в вакууме, затрудняя тем самым его удаление от поверхности металла.



$$A = \int_0^{\infty} \frac{e^2 \cdot dx}{16\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot x^2} = \frac{e^2}{16\pi \cdot \varepsilon_0} \left( -\frac{1}{x} \right)_0^{\infty} = \frac{e^2}{16\pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \infty = \infty$$

Интегрировать от поверхности металла ( $x=0$ ) нельзя, т.  
к.

интеграл расходится, работа равна бесконечности  
Как быть ???

Концентрация **свободных** электронов в металле  $\sim 10^{28}$   
 $\text{м}^{-3}$  и

она не может измениться скачком до нуля на переходе  
металл-

вакуум – часть электронного облака «выпирает» наружу и  
на

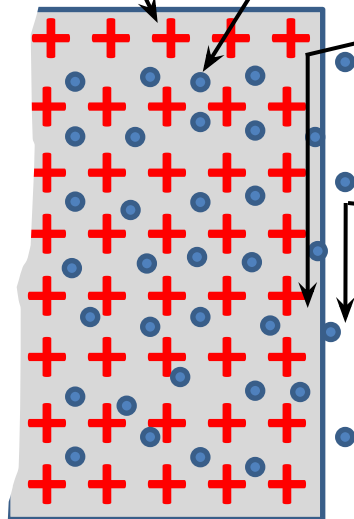


+ ионы, находящиеся в узлах кристаллической  
решетки

свободные  
электроны

тонкий приповерхностный  
слой, обедненный  
электронами

слой электронов,  
«выпирающий»  
наружу



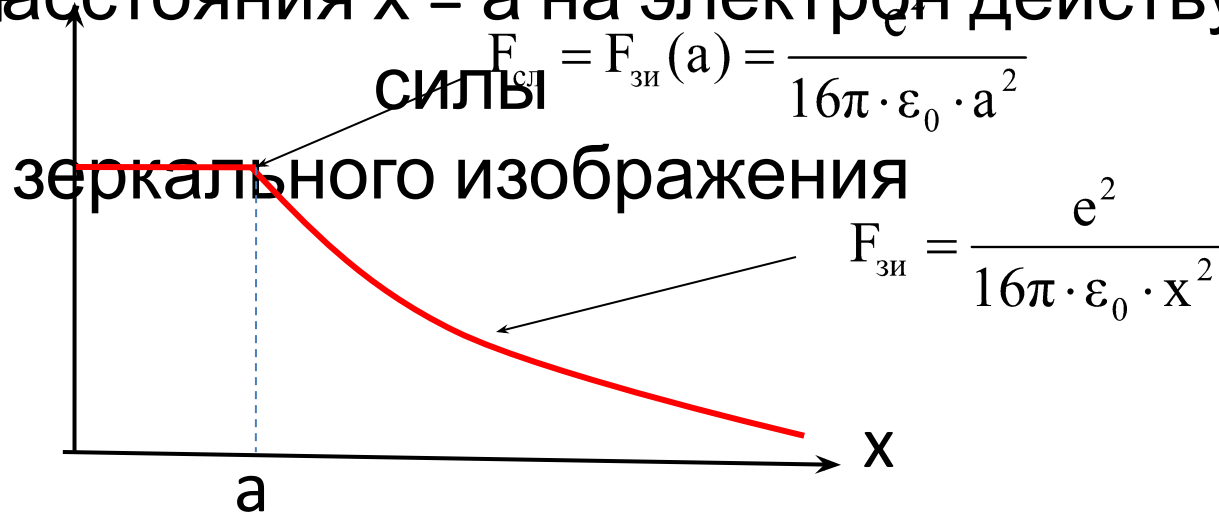
## Модел

От поверхности металла ( $x=0$ ) до некоторого расстояния  $x = a$

электрон движется в однородном электрическом поле, образованном обедненным приповерхностным слоем металла

и облаком «выпирающих» электронов.

Начиная с расстояния  $x = a$  на электрон действуют



Тогда работа выхода складывается из работы по преодолению двойного электрического слоя и работы против сил зеркального

$$A_{\text{ВЫХ}} = \frac{e^2}{16\pi \cdot \epsilon_0 \cdot a^2} \cdot a + \int_a^{\infty} \frac{e^2}{16\pi \cdot \epsilon_0 \cdot x^2} dx = \frac{e^2}{16\pi \cdot \epsilon_0 \cdot a^2} + \frac{e^2}{16\pi \cdot \epsilon_0 \cdot a^2}$$

$$A_{\text{ВЫХ}} = \frac{e^2}{8\pi \cdot \epsilon_0 \cdot a^2}$$

**Контактная разность  
потенциалов  
(КРП)**

Приведем в соприкосновение два различных металла.

В каждом из металлов имеются свободные электроны и

поэтому возникает потенциал из одного металла в другой и наоборот.



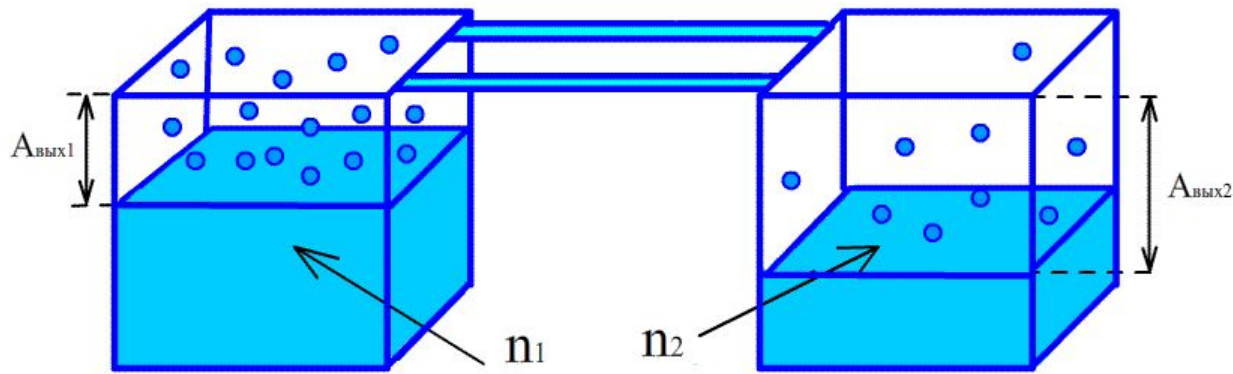
Вопрос: от чего зависит величина тока исходящего из

металла?

$$-\frac{A_{\text{ВЫХ}}}{kT}$$

Очевидно: чем выше концентрация свободных носителей

тока, тем больше ток:



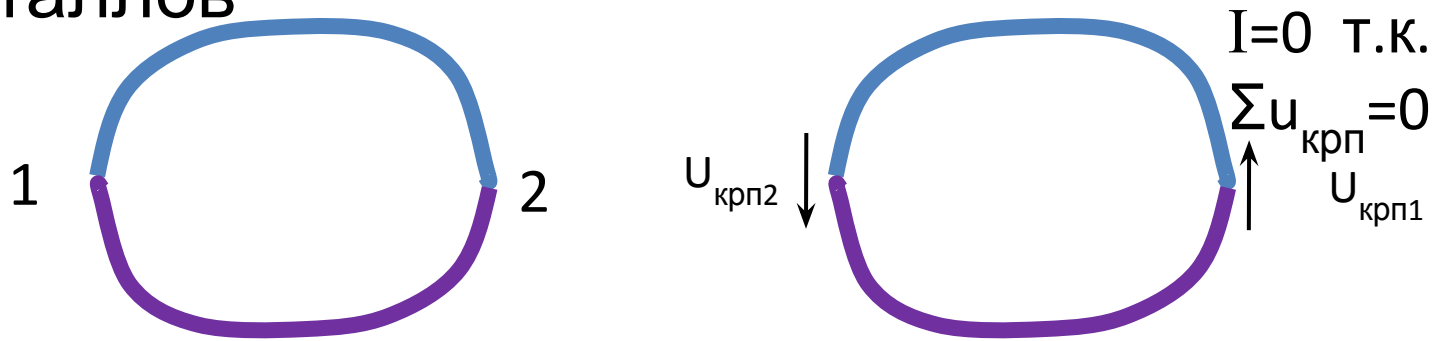
Мет.  
1

Мет.  
2

Пусть ток, текущий из первого металла (Мет1) во второй  $I_1$  больше обратного тока  $I_2$ . Тогда Мет1 будет заряжаться +, а Мет2 – отрицательно. Возникающая при этом разность потенциалов приводит к уменьшению тока  $I_1$  с одновременным увеличением тока  $I_2$ . Рост  $U$  между металлами будет

# Термоэлектрические явления

Составим замкнутую цепь из двух разнородных металлов



На каждом из контактов возникает контактная разность

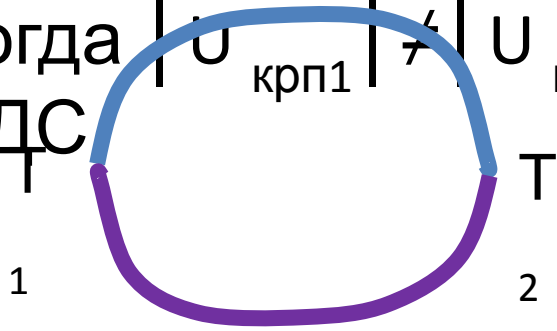
потенциалов, но ток в цепи отсутствует, т.к. алгебраическая

Для того, чтобы в этой цепи возник электрический ток

необходимо нарушить условия динамического равновесия

на одном из контактов – изменить его температуру.

Тогда  $U_{крп1} \neq U_{крп2}$ ,  $I \neq 0$  в цепи возникает термоЭДС  $\mathcal{E}_{термо} = \alpha(T_1 - T_2)$

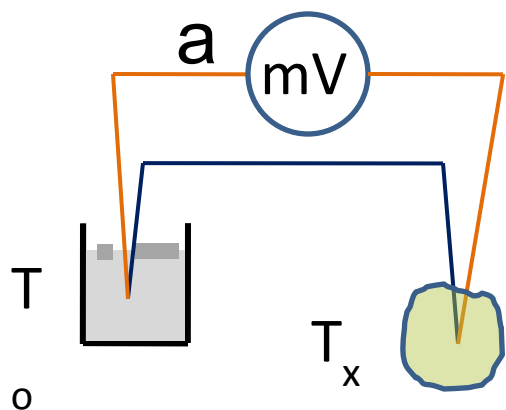


где  $\alpha$  – коэффициент термоЭДС, зависящий от природы соединяемых материалов



# Практическое использование

термопар



Один из спаев разнородных металлов находится при известной температуре  $T_0$ . (на рисунке это вода, в которой плавают лед  $-0^\circ\text{C}$ ). Второй спай помещается туда, где необходимо измерить температуру ( $T_x$ ).

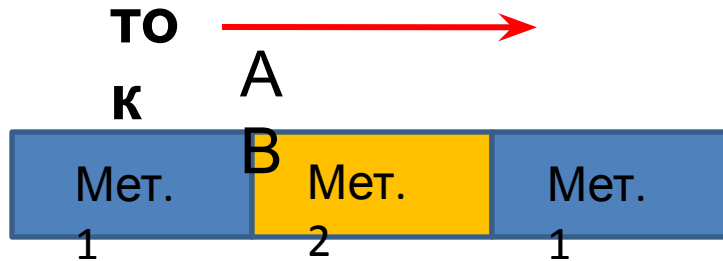
Предварительно для данной пары металлов производится градуировка милливольтметра

и по его показаниям определяется

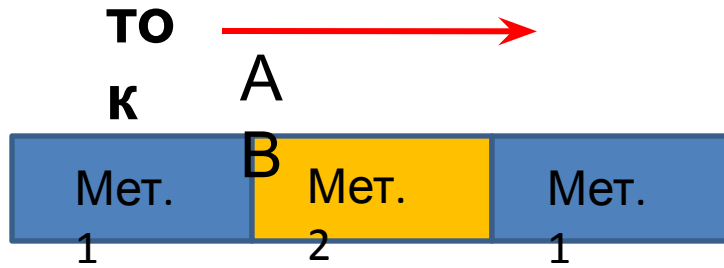
величина  $T_x$

согласно соотношению:  $U = \alpha (T_0 - T_x)$

# Эффект Пельтье



При пропускании тока по цепи, составленной из разнородных металлов, на фоне Ленц-Джоулева тепла на одном из контактов (пусть А) происходит дополнительное выделение теплоты, а на другом (В) – ее поглощение.



**Объяснение:** если средняя энергия свободных электронов ( $W_1$ ) в первом металле больше, чем во втором ( $W_2$ ), то электроны, переходя из Мет.1 в Мет.2 отдают часть своей энергии на контакте А, принимая энергию электронов в Мет.2. Когда электроны переходят из Мет.2 в Мет.1 (контакт В), то они должны получить дополнительную энергию в соответствии с энергией  $W_1$  - контакт В охлаждается.

Дополнительное тепло, выделяющееся на одном из

контактов или поглощаемое на другом, определяется

соотношением:  $\Delta Q = \Pi \cdot I \cdot t$ , где  $\Pi$  –

коэффициент

Для металлов этот эффект сравнительно невелик, темплье, величина которого зависит от природы

однако контактирующих материалов,  $I$  – сила тока,  $t$  – время для полупроводниковых материалов он нашел

практическое

применение – созданы полупроводниковые

холодильники, а в последнее время

полупроводниковые модули используются

и для охлаждения электронных элементов

компьютеров

# Эффект Томсона



Томсон теоретически показал, что, подобного явлению Пельтье, при прохождении электрического тока даже по однородному проводнику, вдоль которого создан градиент температуры, должно наблюдаться добавочное выделение или поглощение тепла кроме обычного ленц-джоулева тепла в зависимости от направления тока.

# **Электрический ток в полупроводниках**

Как и в случае металлов, прохождение электрического  
тока по  
полупроводнику не связано с переносом вещества и  
обусловлено движением электронов.

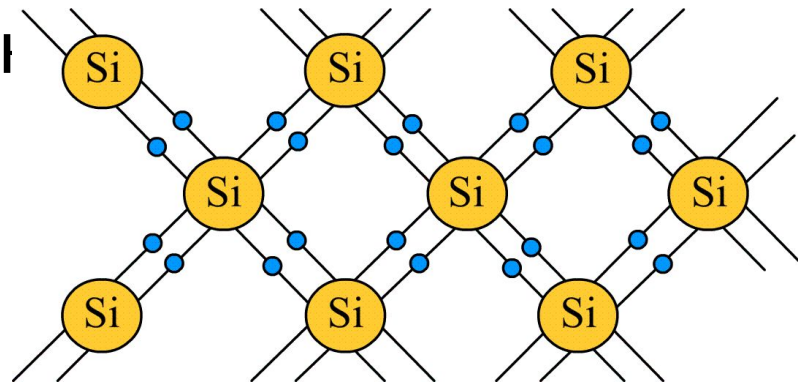
Проводимость полупроводников существенно ниже,  
чем у  
металлов, но в отличие от металлов она изменяется в  
широких  
пределах в зависимости от наличия примесей и  
различного  
рода внешних воздействий – нагрева или охлаждения,  
облучения светом и микрочастицами

# Общие представления о проводимости

Работа по теме «Общие представления о проводимости

полупроводников

на примере «1



проводника – Si

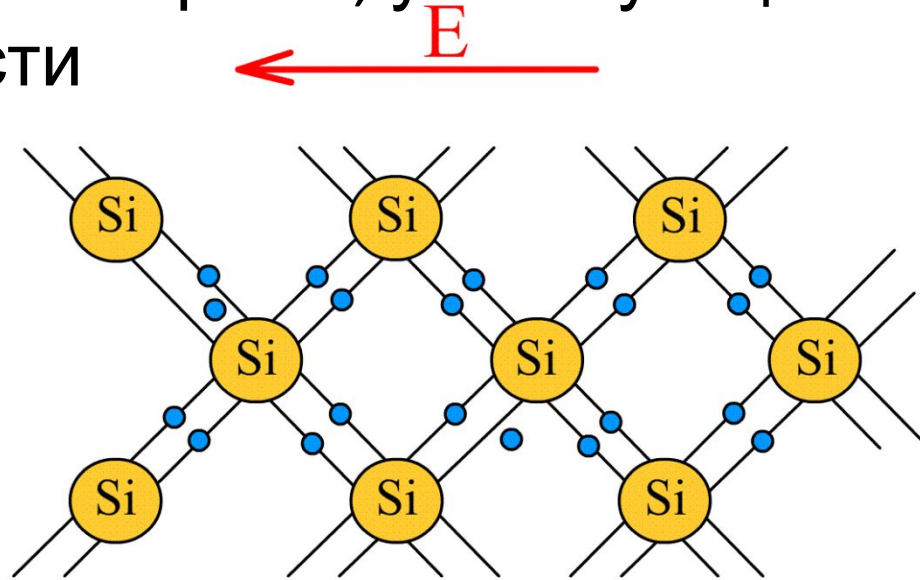
Атомы Si имеют четыре валентных электрона. В кристаллической решетке каждый атом окружен четырьмя ближайшими соседями.

Связь между атомами в кристалле Si является ковалентной, т. е.

осуществляется парами валентных электронов.



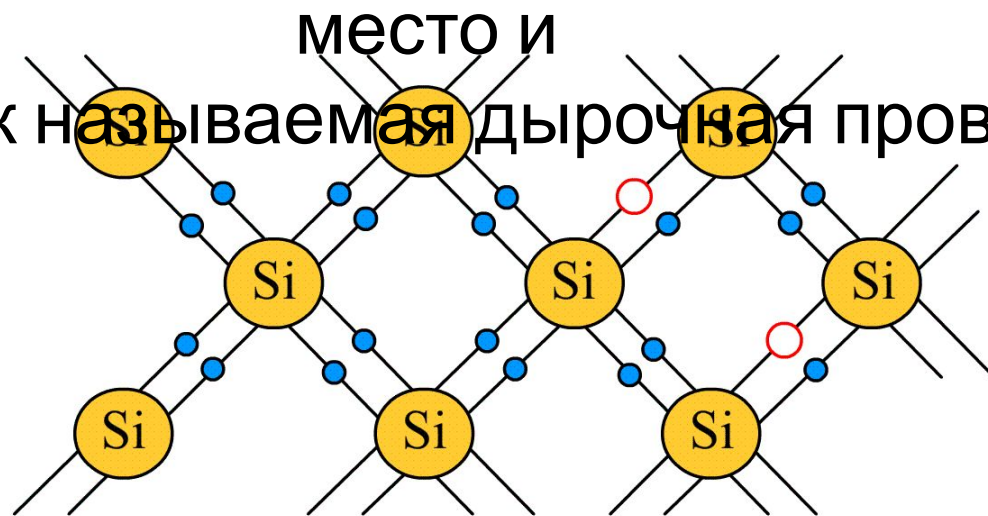
При  $T > 0$  К часть ковалентных связей рвется и появляются свободные электроны, участвующие в проводимости



Число разорванных связей растет с увеличением температуры,  
электронная проводимость увеличивается

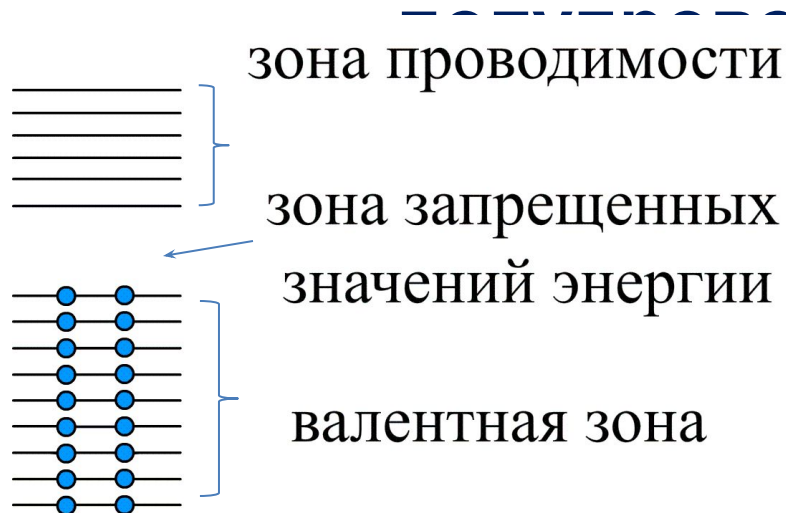
Обрыв связей и появление свободных электронов  
приводит еще  
к одному эффекту, увеличивающему проводимость:  
электроны  
соседних атомов перескакивают на освобожденное

возникает так называемая дырочная проводимость



Пустое место (вакансия), заряженная +, перемещается  
по полю,  
создавая эффект движения + заряда – дырочная  
проводимость

# Зонная модель

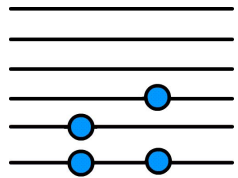


## Полупроводников

При  $T=0$  К валентная зона  
заполнена полностью,  
зона проводимости -  
пуста

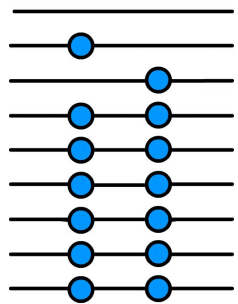
Электроны, полностью заполняющие зону, не могут участвовать в электрическом токе – под действием электрического поля на длине свободного пробега они должны двигаться с ускорением, т. е. переходить на более высокий энергетический уровень. Однако все уровни уже заняты.

**При  $T=0$  К полупроводник является**



При  $T > 0$  К часть электронов из валентной зоны,

преодолев запрещенную зону, переходит в зону проводимости.



Электроны в зоне проводимости участвуют в

электрическом токе- **электронная проводимость**

**(полупроводник n типа)**

Электроны в валентной зоне также

участвуют в

Интенсивность перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости растет с увеличением температуры

энергетические состояния- свободные

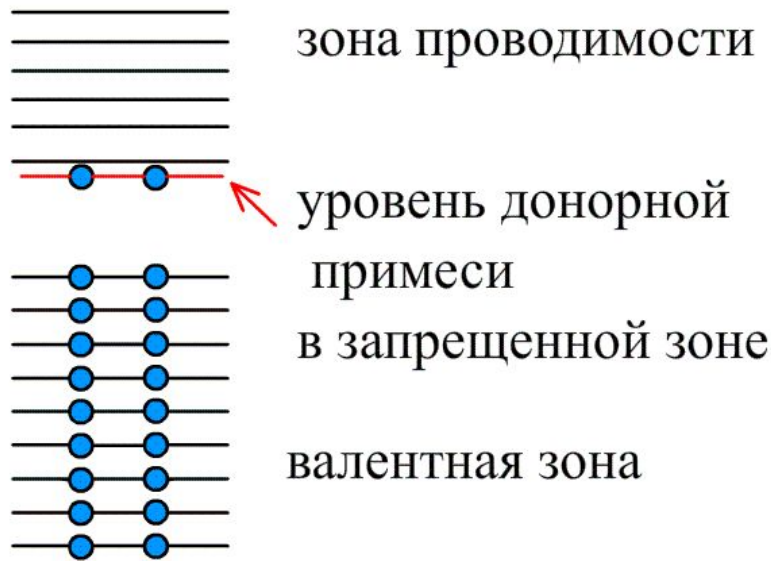
энергетические состояния- дырочная

**Проводимость полупроводников растет с**

**проводимостью (полупроводник p типа)**

# Влияние примесей на проводимость полупроводников

$T=0$  К



Если в кристаллическую решетку Si элемента 4-ой группы внедрить атом 5-ой группы, имеющих лишний электрон в зонной модели появится энергетический уровень в запрещенной зоне вблизи дна зоны проводимости, заполненный электронами.

При  $T=0$  К проводимость отсутствует.

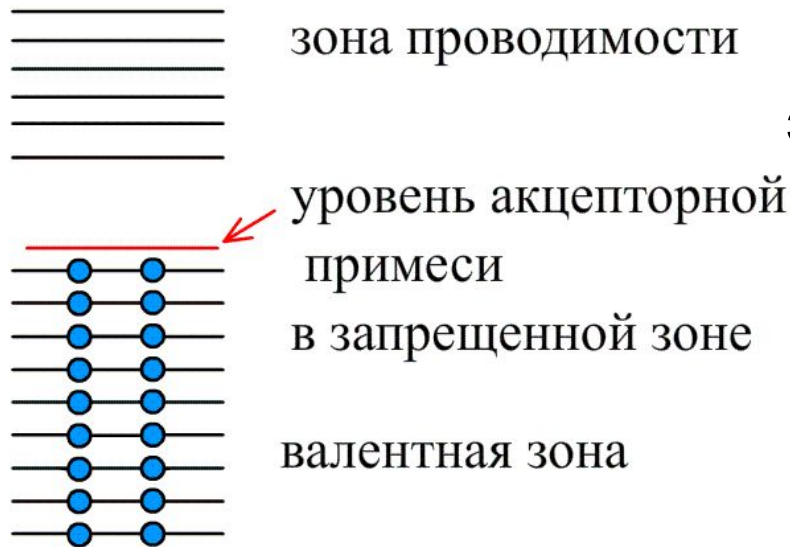
При  $T>0$  К электроны переходят в зону проводимости – возникает электронная проводимость

При дальнейшем увеличении температуры начинается интенсивный

переброс электронов из валентной зоны в зону проводимости –

это уже собственная

$T=0\text{ K}$



Если в кристаллическую решетку  $S$  элемента 4-ой группы, внедрить атом из 3-ей группы, имеющих электрон один меньше, то в зонной модели появится энергетический уровень в запрещенной зоне вблизи вершины валентной зоны не заполненный электронами.

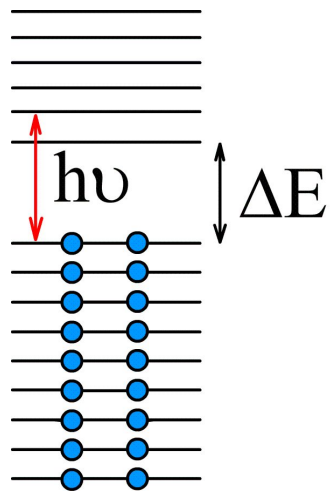
При  $T=0\text{ K}$  проводимость отсутствует.

При  $T>0\text{ K}$  электроны переходят из валентной зоны на акцепторные уровни, появляются свободные состояния в валентной зоне – возникает дырочная проводимость

При дальнейшем увеличении температуры начинается интенсивный

переброс электронов из валентной зоны в зону проводимости –

# Влияние света на проводимость полупроводников



Если ширина запрещенной зоны  $\Delta E$  меньше

энергии кванта света  $h\nu$ , то возникает так

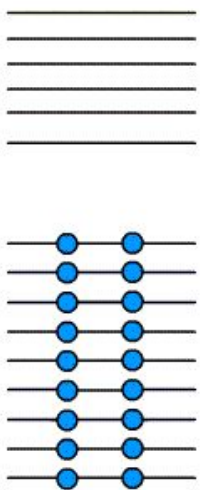
называемый внутренний фотоэффект –

переброс электронов из валентной зоны в

зону проводимости и свободных мест в

валентной зоне приводит к увеличению проводимости

полупроводника.



# Контактные явления

Как уже говорилось ранее контактные явления – эффекты

Зеебека, Пельтье, Томсона в полупроводниках проявляются

существенно более ярко по сравнению с металлами, что и



поскольку использовать эти материалы для создания генераторов

которого основана на эффекте Зеебека. Он устанавливался в промышленном масштабе

лампы и

использовался в 60-ые годы для питания радиоприемников

полупроводниковый

холодильник, работа которого основана на эффекте





**p-n**

**переход**

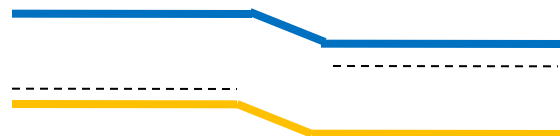
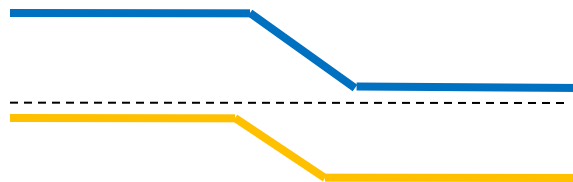
Первооснова полупроводниковой электроники – это p-n переход, образующийся на контакте полупроводников p и n типов

Проводимость полупроводников **n** типа в основном осуществляется за счет электронов - основные носители,  
дырки являются неосновными носителями

Проводимость полупроводников **p** типа в основном осуществляется за счет дырок- основные носители,  
электроны являются неосновными носителями

При контакте полупроводников  $n$  и  $p$  типов происходит диффузия

электронов из  $n$  области в  $p$  область и наоборот – дырок из  $p$  области в  $n$  область. Возникает контактная разность потенциалов.

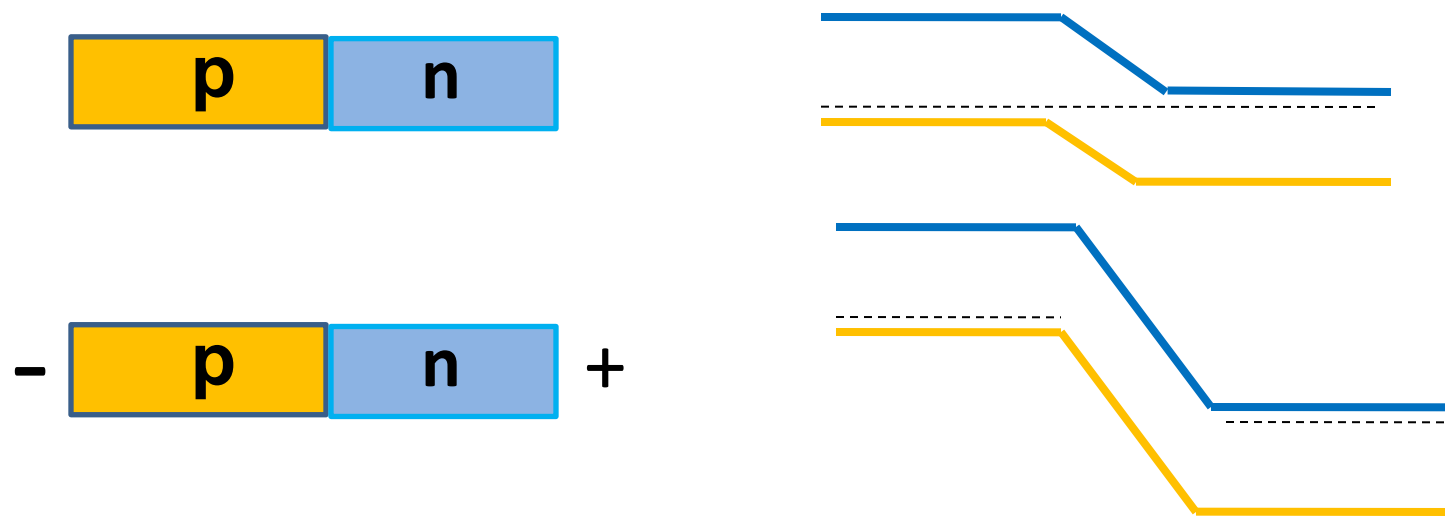


При подаче прямого напряжения (+ к  $p$  области, - к  $n$  области)

высота и ширина потенциального барьера понижается,

возрастает число основных носителей, способных преодолеть

потенциальный барьер. Ток быстро нарастает с



При подаче обратного напряжения (- к **p** области, + к **n** области)

высота и ширина потенциального барьера увеличивается,

уменьшается число основных носителей, способных преодолеть

потенциальный барьер. Ток через p-n переход определяется

неосновными носителями – он обычно мал и почти не

# Органические полупроводники

Необычный характер проводимости обнаружен в сравнительно новом классе полупроводниковых материалов – органических полупроводниках.

Так в ориентированных полимерных системах анизотропия проводимости, во взаимноперпендикулярных направлениях достигает двух порядков.

Эти материалы нашли применение в создании тонкопленочных элементов фотоэлектрических устройств, терморезисторов, тензодатчиков, антистатиков, датчиков влажности, приборов для