

Электрический ток в различных средах.

**Проводимость и
сопротивление
материалов**

Тема 4

СОДЕРЖАНИЕ

1. **Электрический ток в металлах**
2. **Зависимость сопротивления металлов от температуры**
3. **Явление сверхпроводимости**
4. **Электрический ток в жидкостях**
5. **Электрический ток в газах**
6. **Электрический ток в вакууме**
7. **Электрический ток в полупроводниках**
8. **Зависимость сопротивления полупроводников от температуры**

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

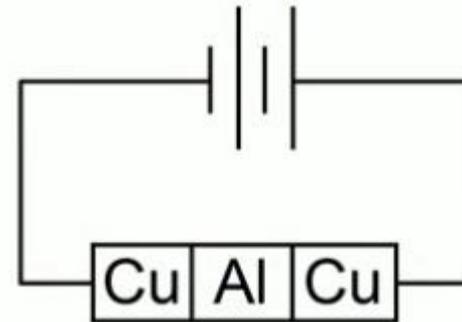


“Электрический ток в металлических проводниках никаких изменений в этих проводниках, кроме их нагревания, не вызывает”.

Это было подтверждено опытами Э. Рикке (1901 г.).

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

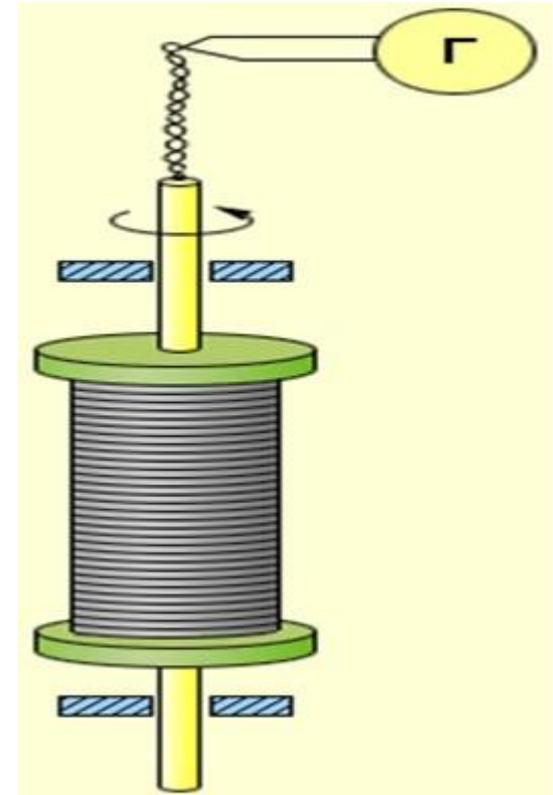
- Электрический ток пропускали в течении года через три прижатых друг к другу, хорошо отшлифованных цилиндра - медный, алюминиевый и медный.
- Общий заряд, прошедший за это время через цилиндры, был очень велик (около $3,5 \cdot 10^6$ Кл).
- После окончания опытов было установлено, что носителями заряда в металлах являются не ионы, а электроны.



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

Опыты, английских физиков Р. Толмена и Т. Стюарта (1916 г).

На катушку наматывают проволоку, концы которой припаивают к двум скользящим контактам и соединяются с чувствительным гальванометром. Катушку приводят во вращение, а затем резко останавливают. Стрелка гальванометра при торможении катушки отклоняется, что говорит о возникновении кратковременного тока.

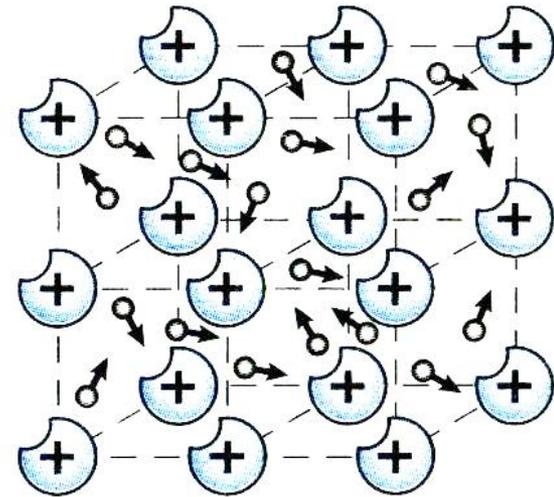


Т. Стюарт и Р. Толмен определили экспериментально удельный заряд частиц.

$$\frac{e}{m} = 1,75882 \cdot 10^{11} \text{ Кл / кг.}$$

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

Таким образом, электрический ток в металлах – это упорядоченное движение электронов под действием электрического поля. Опыты показывают, что при протекании тока по металлическому проводнику не происходит переноса вещества, следовательно, ионы металла не принимают участия в переносе электрического заряда.



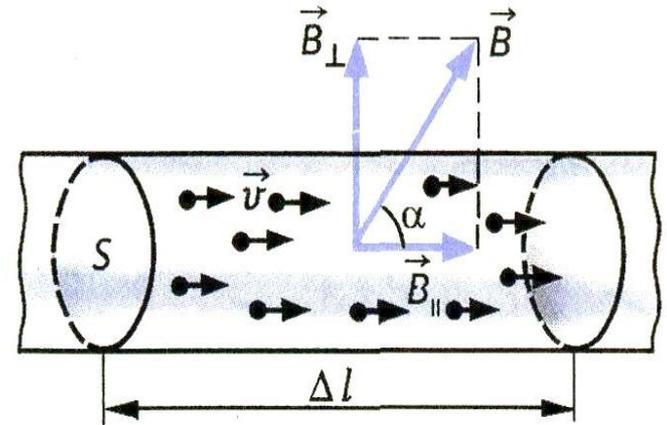
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

В начале 20 века немецкий физик

П. Друде и голландский физик **Х. Лоренц** создали классическую теорию электропроводности металлов.

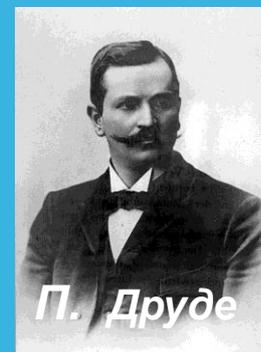
Основные положения:

1. Хорошая проводимость металлов объясняется наличием в них большого числа электронов.
2. Под действием внешнего электрического поля на беспорядочное движение электронов накладывается упорядоченное движение, т.е. возникает ток.

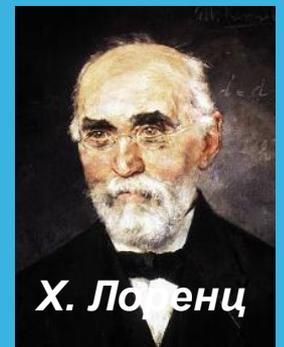


3. Сила электрического тока, идущего по металлическому проводнику равна:

$$I = e n S v_{\text{д}}$$



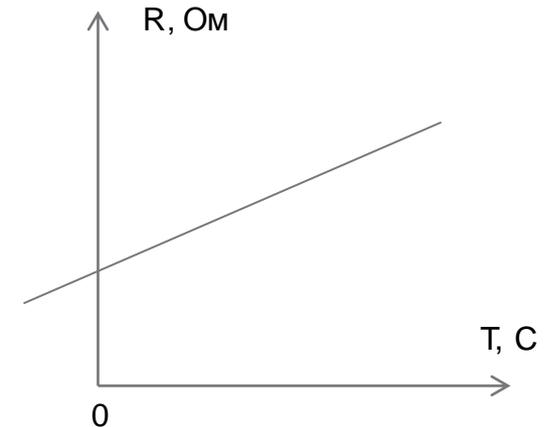
П. Друде



Х. Лоренц

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

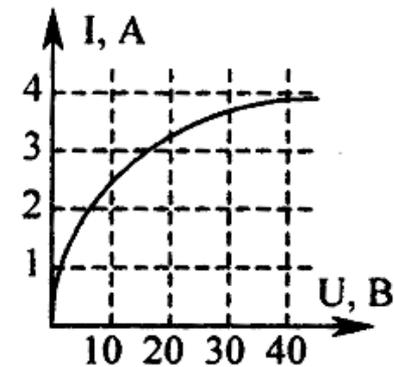
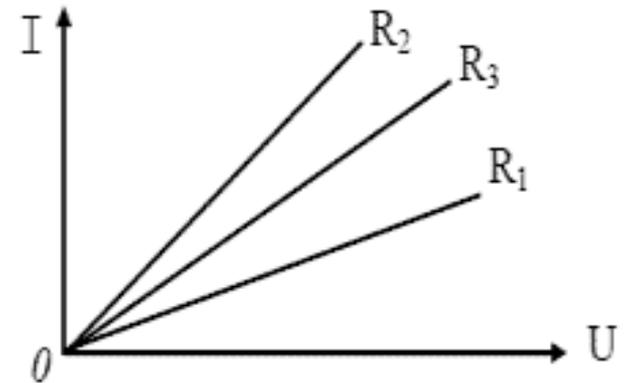
4. Так как внутреннее строение у разных веществ различное, то и сопротивление тоже будет различным.
5. При увеличении хаотического движения частиц вещества происходит нагревание тела, т.е. выделение тепла. Закон Джоуля-Ленца.
6. У всех металлов с увеличением температуры растет и сопротивление.



, α – температурный коэффициент сопротивления

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

- **Вольт - амперная характеристика** показывает зависимость тока от напряжения.
- Вольт-амперная характеристика для металлического проводника отражает закон Ома и представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат

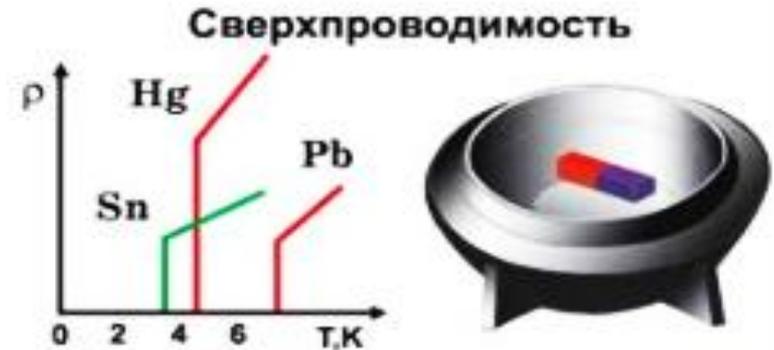


ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

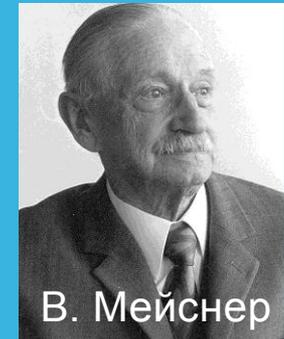
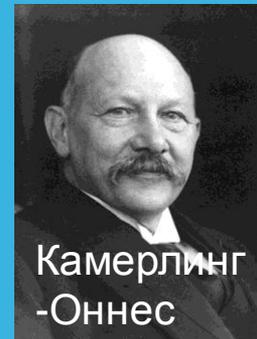
Явление сверхпроводимости

В 1911 голландский физик
Камерлинг-Оннес

Сверхпроводимость - свойство некоторых материалов обладать строго нулевым электрическим сопротивлением при достижении ими критической температуры. Известны несколько сотен соединений, чистых элементов, сплавов и керамик, переходящих в сверхпроводящее состояние. Сверхпроводимость - квантовое явление.



Эффект Мейснера, заключающемся в полном вытеснении магнитного поля из объема сверхпроводника. Существование этого эффекта показывает, что сверхпроводимость не может быть описана просто как идеальная проводимость в классическом понимании.



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЖИДКОСТЯХ

В 1887г. Шведский учёный **С. Аррениус** для объяснения особенностей водных растворов веществ предложил теорию электролитической диссоциации. В дальнейшем эта теория была развита многими учёными, в том числе И.А. Каблуковым и В.А. Кистяковским



Сванте Аррениус

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЖИДКОСТЯХ

Основные положения ТЭД

1. Все вещества по способности проводить электрический ток в растворах делятся на электролиты и не электролиты.

Электролиты
(водные растворы проводят эл. ток)

Вещества с ионной и ковалентной полярной связью

Все растворимые кислоты, основания (щёлочи) и соли

Не электролиты
(водные растворы не проводят эл. ток)

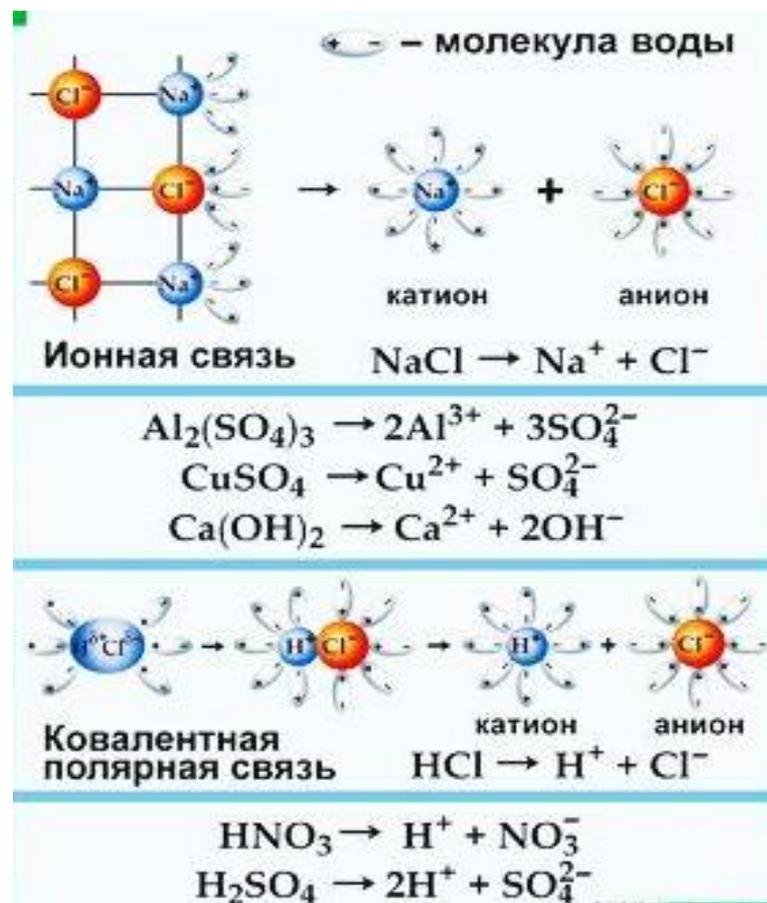
Вещества с ковалентной неполярной и слабополярной связью

Все простые вещества, все оксиды и н/р кислоты, основания и соли

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЖИДКОСТЯХ

2. В растворах электролиты диссоциируют на положительные и отрицательные ионы.

Носители тока в электролитах образуются за счет диссоциации (разделении на ионы различных знаков) молекул растворенного вещества под воздействием электрического поля полярных молекул воды.



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЖИДКОСТЯХ

Типы ионов

По заряду:

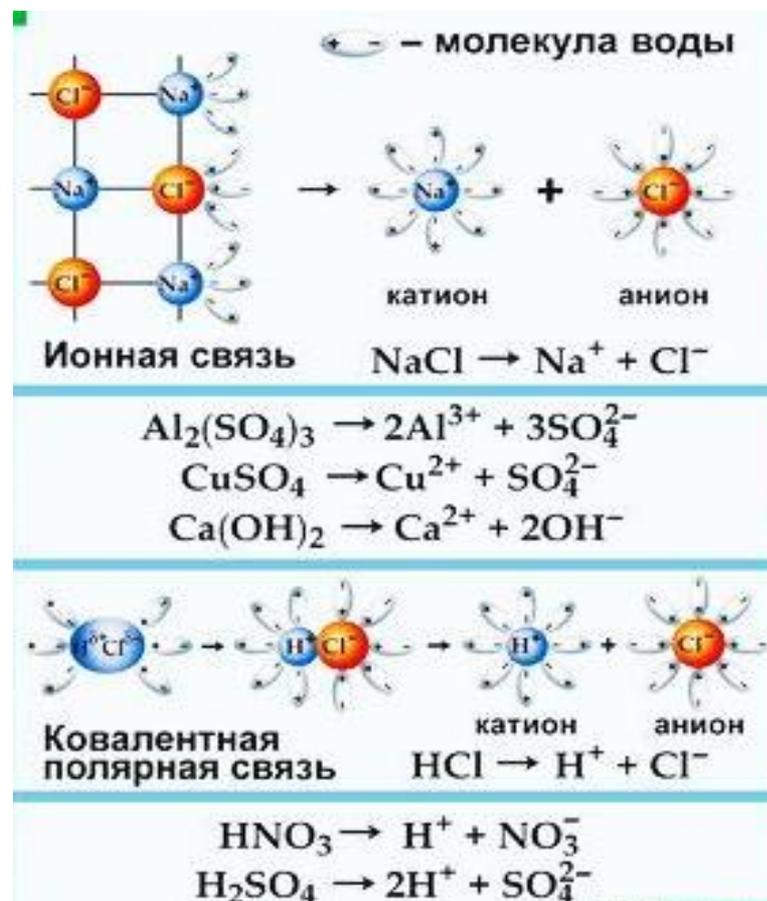
катионы (положительные) и
анионы (отрицательные).

По отношению к воде:

Гидратированные и негидратированные (в безводных средах)

По составу:

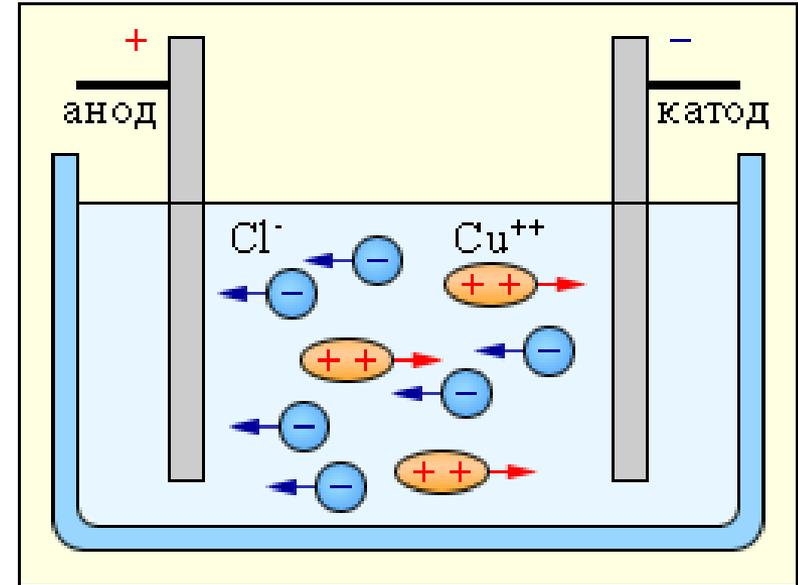
простые и сложные.



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЖИДКОСТЯХ

3. При протекании электрического тока через растворы электролитов вместе с зарядом всегда переносится вещество - это явление называется электролизом.

Отсюда следует, что носителями тока в этих проводниках являются заряженные атомы, или группы атомов, т. е. ионы.



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЖИДКОСТЯХ

Законы Фарадея:

1. Масса вещества, выделившегося на электродах при электролизе, прямо пропорциональна величине заряда, прошедшего через электролит
2. При одинаковом количестве электричества (электрическом заряде, прошедшем через электролит) масса вещества, выделившегося при электролизе, пропорциональна отношению молярной массы вещества к валентности

$$m = kq$$

k – электрохимический эквивалент вещества (равен массе вещества, выделившегося при прохождении через электролит заряда 1 Кл)

$$m_1 : m_2 = k_1 : k_2 = \frac{M_1}{n_1} : \frac{M_2}{n_2}$$

M – масса выделившегося вещества
 k – электрохимический эквивалент
 M – молярная масса вещества
 n – валентность вещества

Исследовал электролиз и открыл его законы английский физик Майкл Фарадей в 1834 году

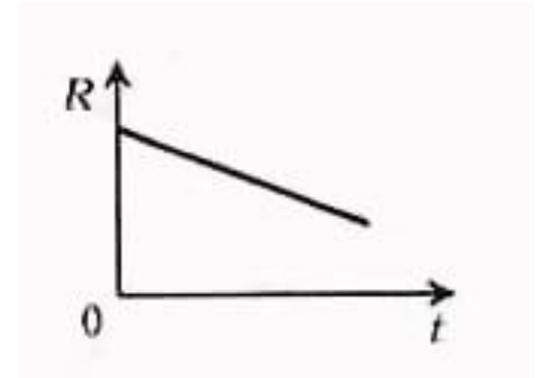


ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЖИДКОСТЯХ

Зависимость сопротивления электролита от температуры

Температурная зависимость сопротивления электролита объясняется в основном изменением удельного сопротивления

()

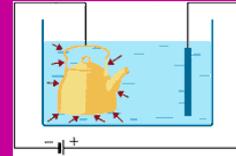


ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЖИДКОСТЯХ

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОЛИЗА

Получение химически чистых веществ

Гальваностегия



Гальванопластика



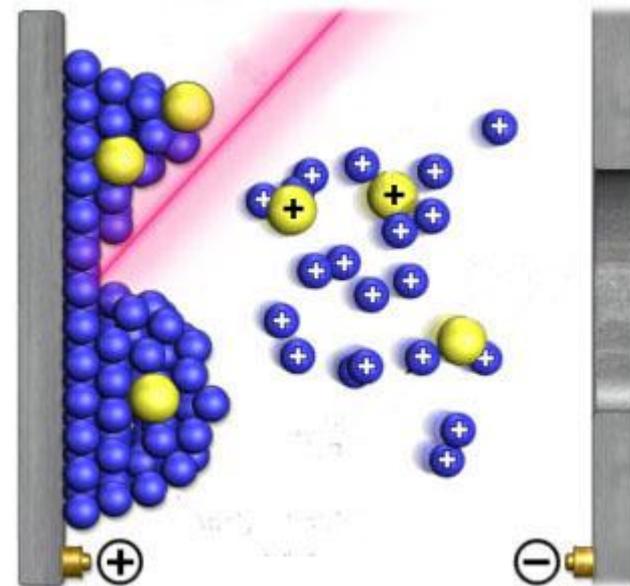
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

Зарядим конденсатор и подключим его обкладки к электromетру. Заряд на пластинах конденсатора держится сколь угодно долго, не наблюдается перехода заряда с одной пластины конденсатора на другую. Следовательно воздух между пластинами конденсатора не проводит ток.

Нагреем теперь воздух в промежутке между пластинами конденсатора – прибор укажет появление тока, следовательно при высокой температуре часть нейтральных молекул газа распадается на положительные и отрицательные ионы.

Такое явление называется **ионизацией** газа.

Прохождение электрического тока через газ называется *разрядом*.



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

Разряд, существующий при действии внешнего ионизатора - **несамостоятельный**.

Концентрация молекул —

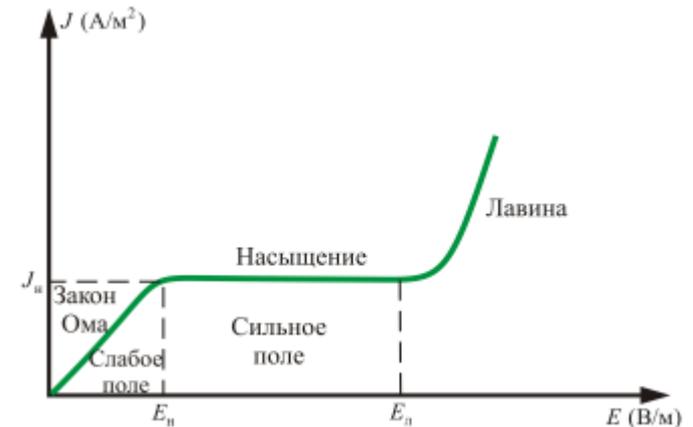
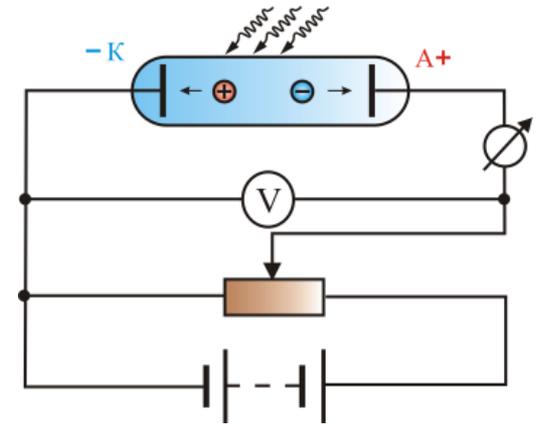
Условие равновесия

Если слабое поле, то

Выразим j через подвижность $(\vec{v} \rightarrow)$

Множитель при \vec{v} не зависит от напряженности поля. Обозначим его через σ , тогда мы получим закон Ома в дифференциальной форме

Вывод: в случае слабых электрических полей ток при самостоятельном разряде подчиняется закону Ома

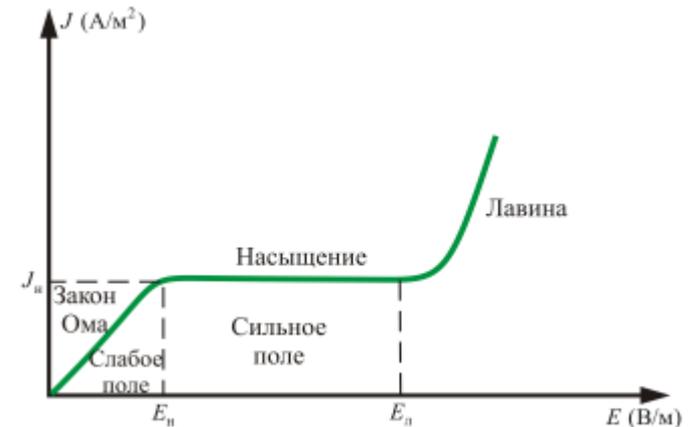
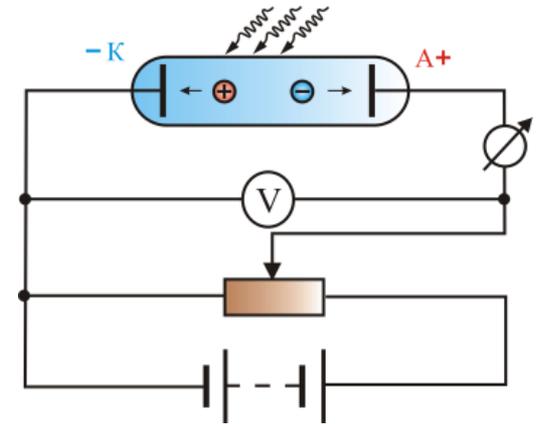


ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

Разряд, существующий при действии внешнего ионизатора - **несамостоятельный**.

Если сильное поле, то число, генерируемых ионизатором ионов в единицу времени, не зависит от напряженности поля. Плотность тока будет определяться только величиной E и не будет зависеть от J !

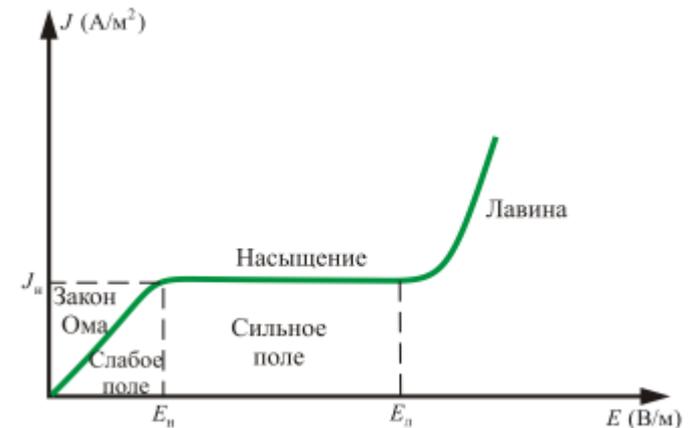
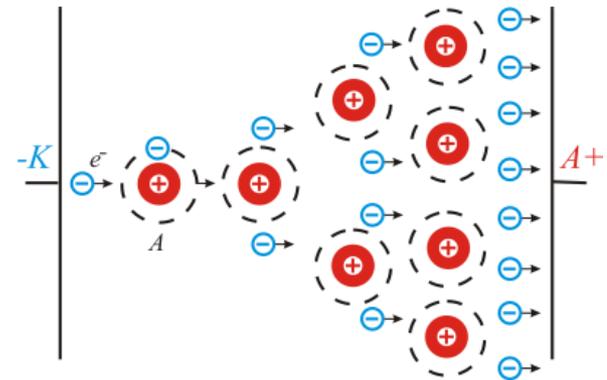
Максимальное значение тока, при котором все образующиеся ионы уходят к электродам, носит название **тока насыщения**.



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

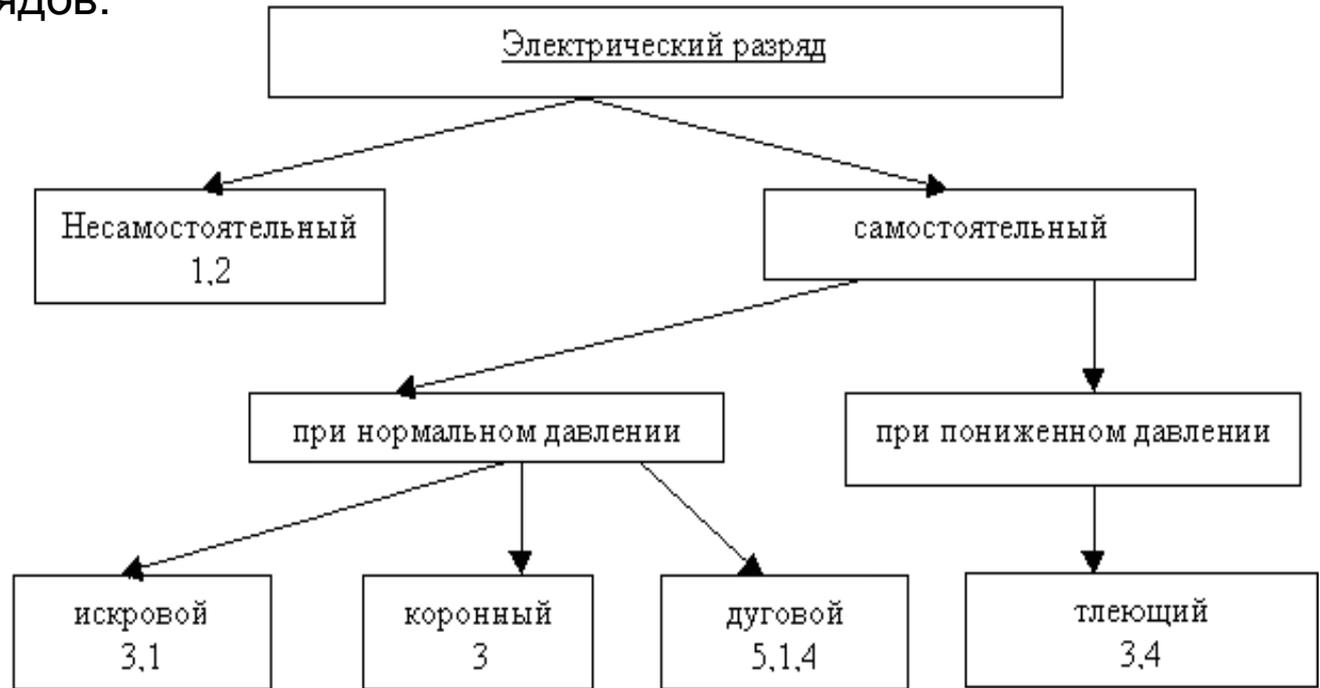
Разряд, существующий при действии внешнего ионизатора - **несамостоятельный**.

Увеличение напряженности поля ведет к образованию лавины электронов. Электроны получают энергию достаточную для ионизации молекул газа, происходит *лавинообразное размножение* первичных ионов и электронов



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

Виды газовых разрядов:

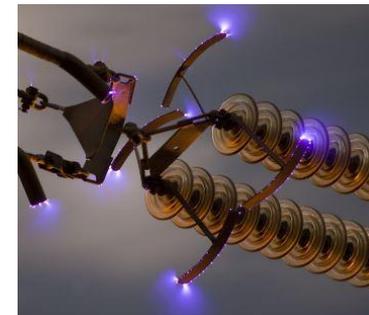


ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

Искровой газовый разряд возникает обычно при давлениях порядка атмосферного и сопровождается характерным звуковым эффектом — «треском» искры. Температура в главном канале искрового разряда может достигать 10 000 К. В природе искровые разряды часто возникают в виде молний.



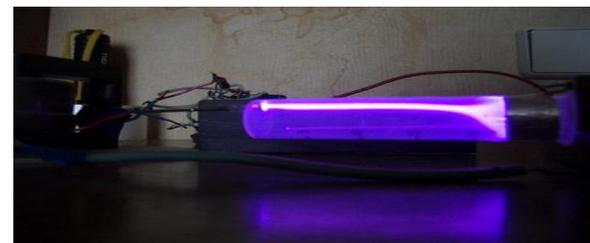
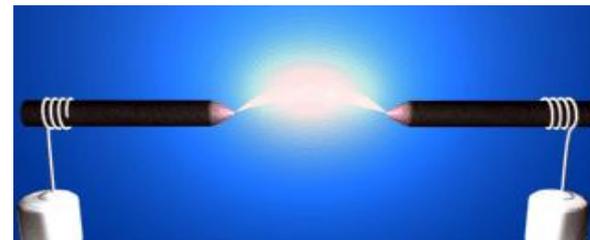
Коронный газовый разряд возникает при давлениях порядка атмосферного в сильно неоднородном электрическом поле. Подобные поля формируются у электродов с очень большой кривизной поверхности (острия, тонкие провода). Когда напряжённость поля достигает предельного значения для воздуха (около 30 кВ/см), вокруг электрода возникает свечение, имеющее вид оболочки или короны



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

Дуговой газовый разряд - несамостоятельный дуговой разряд, в котором основным источником электронов является термоэлектронная эмиссия, для чего катод искусственно разогревается от вспомогательного устройства. Электроны, испускаемые накалившимся катодом, способствуют возникновению и горению разряда.

Тлеющий газовый разряд - формируется, как правило, при низком давлении газа и малом токе. При увеличении проходящего тока превращается в дуговой разряд.



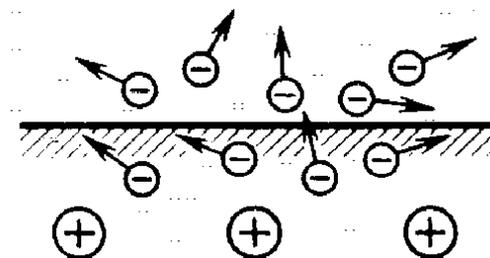
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ

Поскольку в вакууме нет свободных носителей зарядов, то он является идеальным диэлектриком.

Появление ионов привело бы к исчезновению вакуума и получению ионизированного газа. Но наличие свободных электронов обеспечит протекание тока через вакуум.

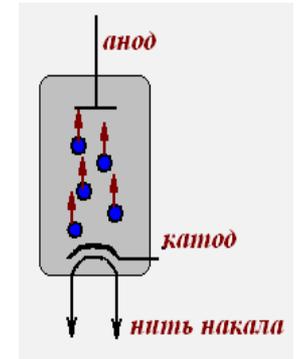
Явление термоэлектронной эмиссии - процесс испускания веществом электронов при нагревании.

$$\frac{mv^2}{2} \geq A_{\text{вых}}$$



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ

- Явление *термоэлектронной эмиссии* лежит в основе принципа действия электронных ламп: вакуумного диода, вакуумного триода.
- Зависимость термоэлектронного тока от анодного напряжения в области малых положительных значений описывается **законом трёх вторых** (установлен русским физиком С. А. Богуславским и американским физиком И. Ленгмюром):



где B - коэффициент, зависящий от формы и размеров электродов, а также их взаимного расположения.

- При увеличении анодного напряжения ток возрастает до некоторого максимального значения, называемого током насыщения. Плотность тока насыщения определяется формулой **Ричардсона - Дешмана**, выведенной теоретически на основе квантовой статистики:

$$\left(\langle \rangle \right)$$

$\langle \rangle$ - усреднённое по спектру термоэлектронов значение коэффициента отражения электронов от потенциального порога;

A - термоэлектрическая постоянная;

Φ - работа выхода электронов из катода;

k - постоянная Больцмана;

T - термодинамическая температура

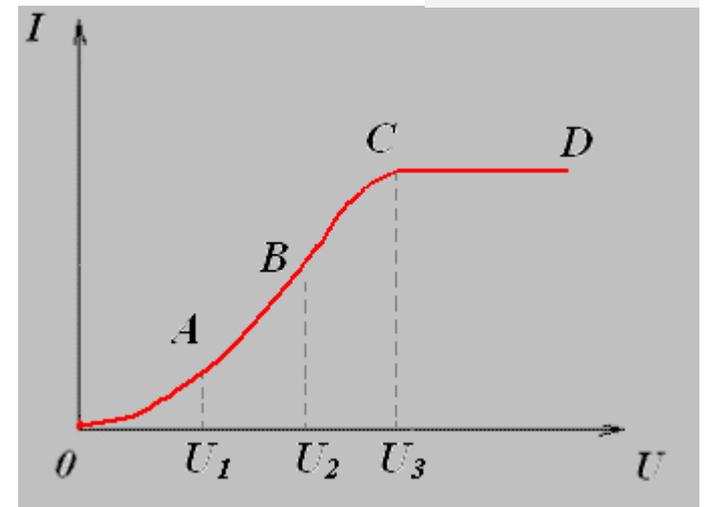
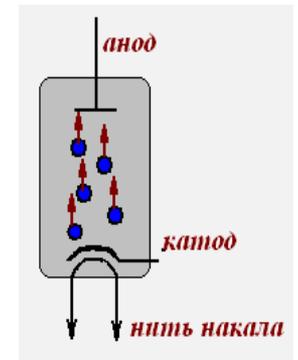
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ

Вольт-амперная характеристика вакуумного диода

Участок АВ является характеристикой прямой зависимости силы тока от напряжения, выполняется закон Ома.

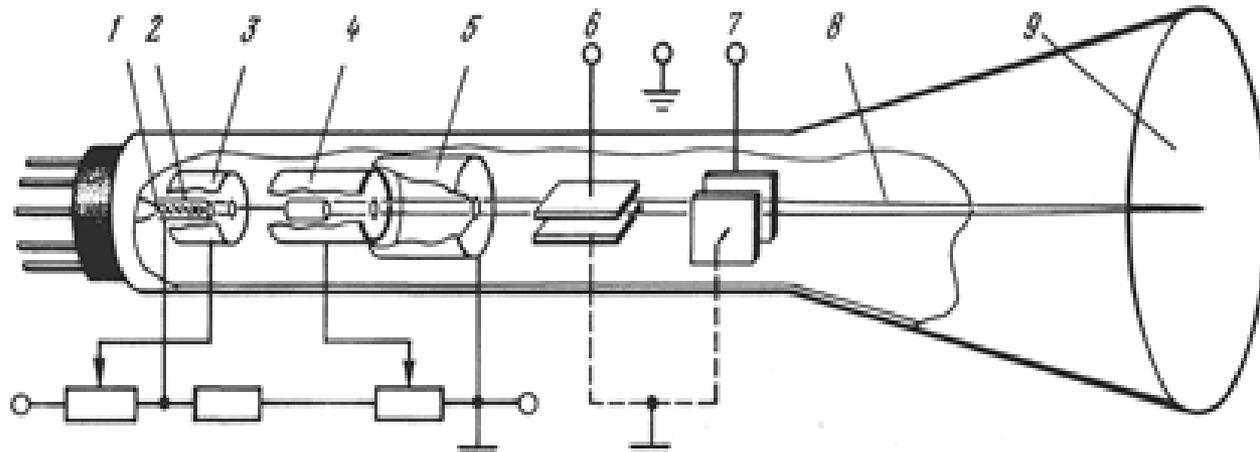
Нелинейная зависимость на участке ВСD объясняется тем, что число электронов, устремляющихся к аноду, становится больше числа электронов, вылетающих с катода.

При достаточно большом значении напряжения U_3 все электроны, вылетающие с катода, достигают анода, и электрический ток достигает насыщения.



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ

Электронно-лучевая трубка



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Полупроводники - твердые вещества, проводимость которых зависит от внешних условий (в основном от нагревания и от освещения).

Удельное сопротивление проводников при комнатной температуре находится в интервале от **Ом·м.** Типичными представителями полупроводников являются кристаллы *германия и кремния.*

К полупроводникам принадлежат **12** химических элементов в средней части таблицы Менделеева

ПЕРИОД	ГРУППА ЭЛЕМЕНТОВ	ГРУППА ЭЛЕМЕНТОВ															
		A I B	A II B	A III B	A IV B	A V B	A VI B	A VII B	A VIII B	A IX B	A X B	A XI B	A XII B	A XIII B	A XIV B	A XV B	
I	1	H 1.00795 ВОДОРОД														He 4.002603 ГЕЛИЙ	
II	2	Li 6.941 ЛИТИЙ	Be 9.012182 БЕРИЛЛИЙ	B 10.811 БОР	C 12.0107 УГЛЕРОД	N 14.0064 АЗОТ	O 15.9994 КИСЛОРОД	F 18.998403 ФТОР	Ne 20.1797 НЕОН								
III	3	Na 22.98977 НАТРИЙ	Mg 24.304 МАГНИЙ	Al 26.98154 АЛЮМИНИЙ	Si 28.086 КРЕМНИЙ	P 30.97376 ФОСФОР	S 32.06 СЕРА	Cl 35.453 ХЛОР	Ar 39.948 АРГОН								
IV	4	K 39.0983 КАЛИЙ	Ca 40.08 КАЛЬЦИЙ	Sc 44.9559 СКАНДИЙ	Ti 47.88 ТИТАН	V 50.9415 ВАНАДИЙ	Cr 51.9961 ХРОМ	Mn 54.938045 МАРГАНЕЦ	Fe 55.845 ЖЕЛЕЗО								
	5	Cu 63.546 МЕДЬ	Zn 65.38 ЦИНК	Ga 69.723 ГАЛЛИЙ	Ge 72.6305 ГЕРМАНИЙ	As 74.9216 АРСЕН	Se 78.96 СЕЛЕН	Br 79.904 БРОМ	Kr 83.80 КРИПТОН								
V	6	Rb 85.4678 РУБИДИЙ	Sr 87.62 СТРОНЦИЙ	Y 88.90585 ИТРИЙ	Zr 91.224 ЦЕЛЗИЙ	Nb 92.90638 НИОБИЙ	Mo 95.94 МОЛИБДЕН	Tc 98.9062 ТЕХНЕЦИЙ	Ru 101.07 РУДИЙ								
	7	Ag 107.8682 СЕРЕБРО	Cd 112.411 КАДМИЙ	In 114.818 ИНДИЙ	Sn 118.710 ОЦИНК	Sb 121.757 АНТИМОН	Te 127.60 ТЕЛЛУРИЙ	I 126.90545 ЙОД	Xe 131.29 КСЕНОН								
	8	Cs 132.90545 ЦЕЗИЙ	Ba 137.327 БАРИЙ	La 138.90547 ЛАНТАНОИДЫ	Hf 178.49 ГАФНИЙ	Ta 180.94788 ТАНТАЛ	W 183.84 ВОЛЬФРАМ	Re 186.207 РЕЙЕНДИЙ	Os 190.23 ОСМИЙ								

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ



Майкл Фарадей

(Michael Faraday, 1791-1867)

$t \uparrow$

R ↓



примеси



Уиллоуби Смит

(Willoughby Smith, 1828 – 1891)



Абрам Фёдорович Иоффе

(1880-1960)

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

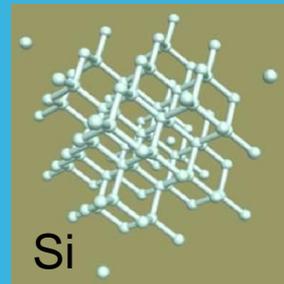
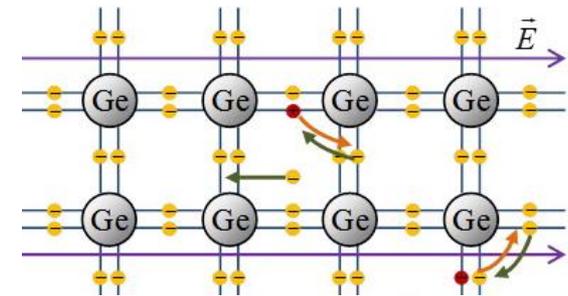
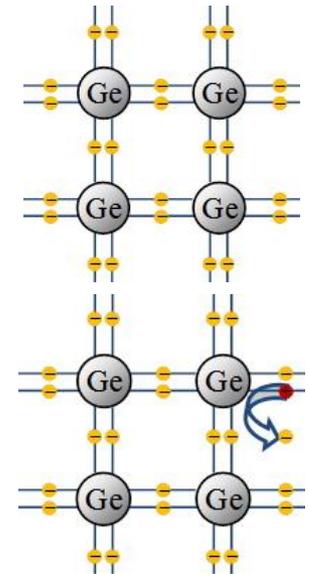
Собственная электрическая проводимость

Проводимость, обусловленную движением свободных электронов и равного им количества "дырок" в полупроводниковом кристалле без примесей, называют *собственной проводимостью полупроводника*.

Дополнительная энергия, которая должна быть затрачена, чтобы разорвать ковалентную связь и сделать электрон свободным, называется *энергией активации*.

Во внешнем электрическом поле электроны перемещаются в сторону, противоположную направлению напряженности электрического поля.

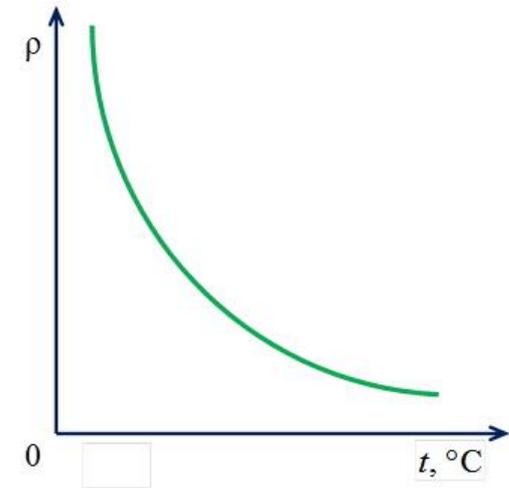
Общая удельная электропроводность полупроводника складывается из дырочной и электронной проводимостей.



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

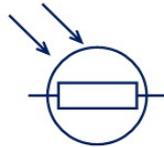
Собственная электрическая проводимость

С повышением температуры возрастает число разрывов ковалентных связей и увеличивается количество свободных электронов и дырок в кристаллах чистых полупроводников.



Практическое применение:

Фоторезисторы



Термисторы



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Примесная проводимость полупроводников

Примесной проводимостью полупроводников называется проводимость, обусловленная наличием примесей в полупроводнике.



донорные
(отдающие)



акцепторные
(принимающие)

Примесными центрами могут быть:

1. атомы или ионы химических элементов, внедренные в решетку полупроводника;
2. избыточные атомы или ионы, внедренные в междоузлия решетки;
3. различного рода другие дефекты и искажения в кристаллической решетке: пустые узлы, трещины, сдвиги, возникающие при деформациях кристаллов, и др.

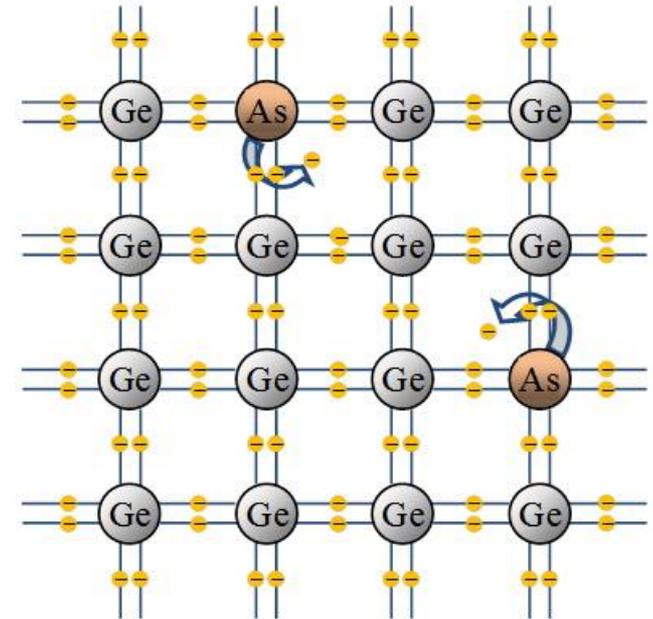
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Примесная проводимость полупроводников

Полупроводник с преимущественно электронной проводимостью, называемый полупроводником **n-типа**.

Поскольку в полупроводнике n-типа число электронов значительно больше числа дырок, то электроны являются **основными** носителями заряда, а дырки – неосновными.

Донорная примесь



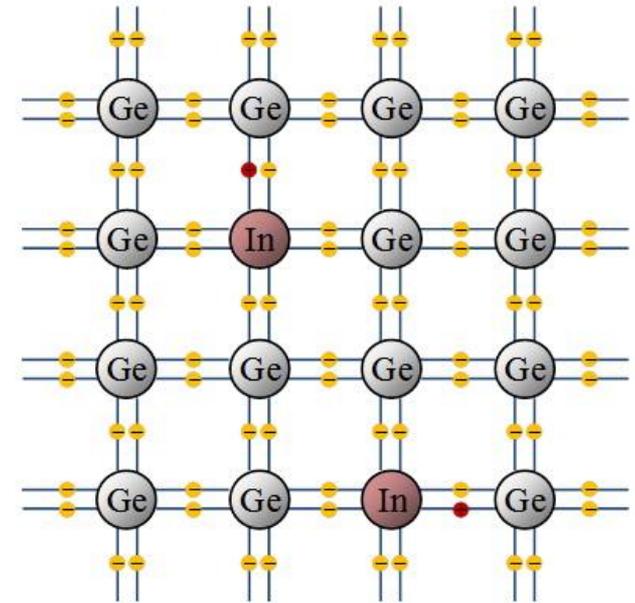
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Примесная проводимость полупроводников

Полупроводники, у которых концентрация дырок превышает концентрацию электронов проводимости, называются полупроводниками **p-типа**.

Поскольку в полупроводнике p-типа число дырок значительно больше числа электронов – дырки являются **основными** носителями заряда, а электроны неосновными.

Акцепторная примесь

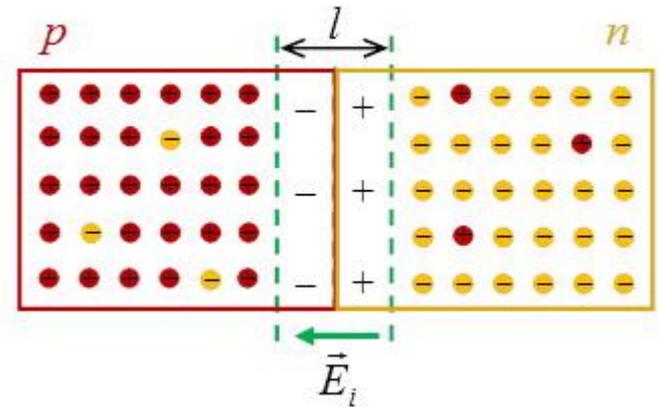


ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Примесная проводимость полупроводников

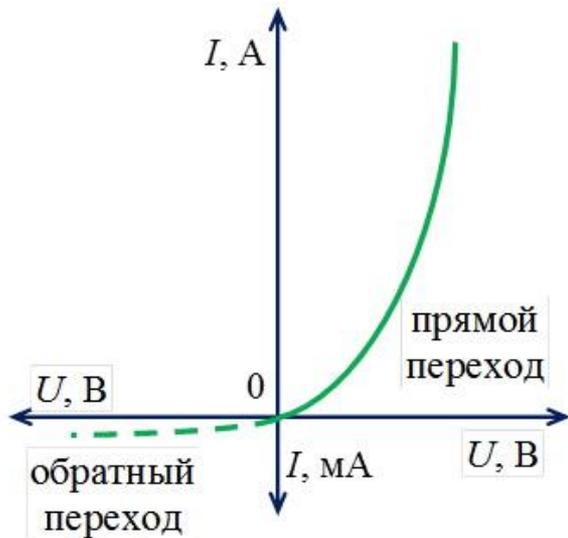
Электронно-дырочный переход

- Диффузия на границе раздела полупроводников с различными типами проводимости.
- Образуется запирающий слой разноименно заряженных ионов, толщина которого не превышает долей микрометра.
- Между слоями ионов возникает электрическое поле с напряженностью E_i .



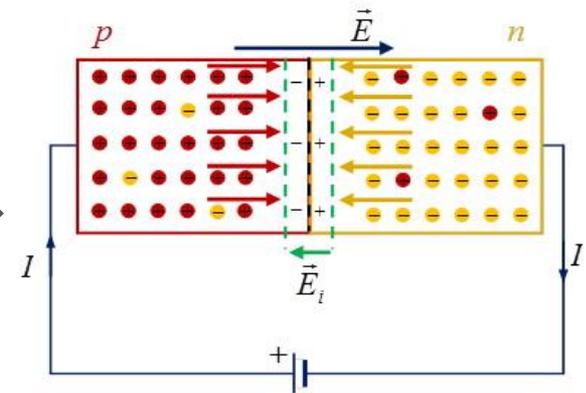
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Электронно-дырочный переход во внешнем электрическом поле

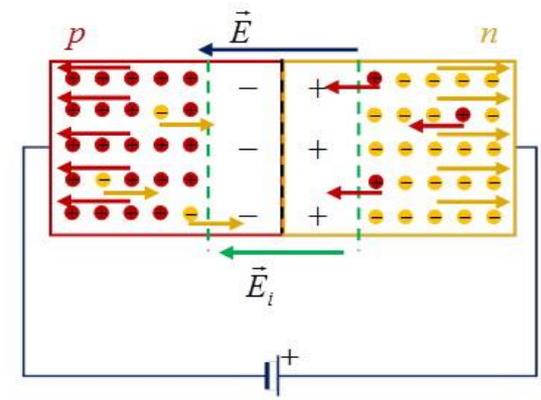


Вольт-амперная характеристика p-n перехода

Прямое включение



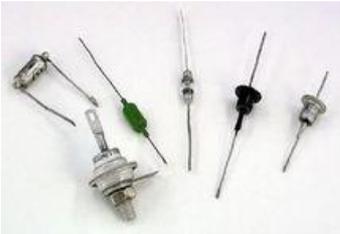
Обратное включение



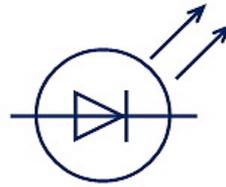
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Применение р-n перехода

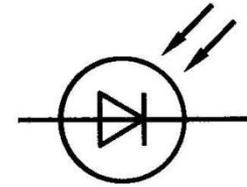
Полупроводниковый диод



Светодиоды



Фотодиоды



Способность р-n-перехода пропускать ток в одном направлении

Оптическое излучение при пропускании через него электрического тока.

преобразует попавший на р-n переход свет в электрический заряд за счёт процессов в р-n-переходе

СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!