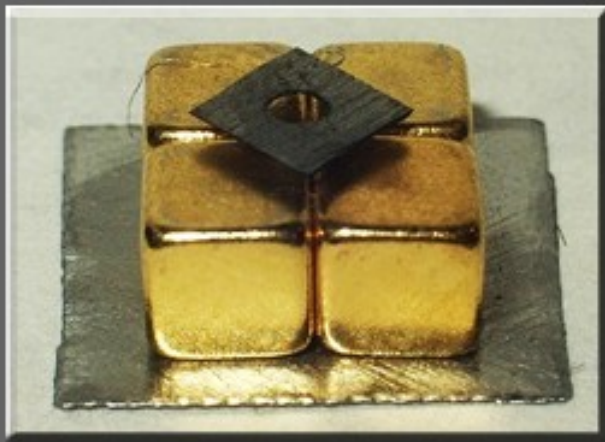
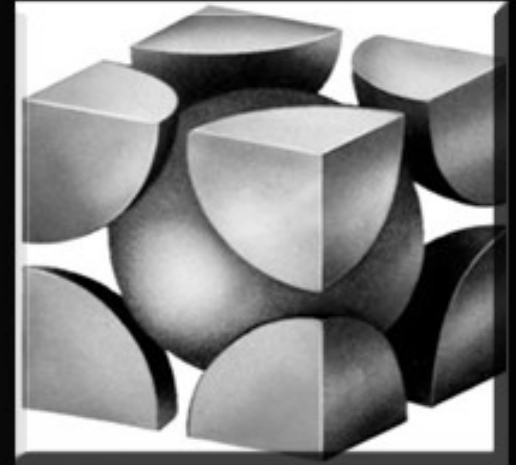
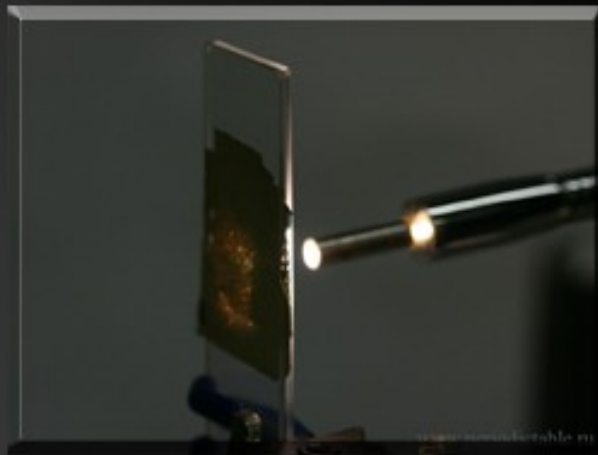


Материалы электронной техники



Цели и задачи дисциплины

Предмет дисциплины «Материалы электронной техники»: физические закономерности, определяющие свойства и поведение материалов в различных условиях их эксплуатации, во взаимосвязи с конкретным применением в элементах и устройствах электронной техники различного функционального назначения.

Цель преподавания дисциплины – изучение свойств основных полупроводниковых, диэлектрических, проводниковых и магнитных материалов; принципов выбора материала для конкретного применения в электронной технике; изучение зависимости свойств материалов от положения их элементов в периодической системе Менделеева.

Задачи дисциплины: формирование подхода к оценке возможностей использования материалов в конкретных элементах и устройствах электронной техники.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективная профессиональная деятельность в сфере промышленной электроники в значительной степени определяется прочными знаниями свойств, характеристик и параметров материалов электронной техники и навыками их применения в различных

Требования к результатам освоения

дисциплины:

- способность собирать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по тематике исследования, использовать достижения отечественной и зарубежной науки, техники и технологии;
- способность выполнять работы по технологической подготовке производства материалов и изделий электронной техники;
- готовность к участию в монтаже, испытаниях и сдаче в эксплуатацию опытных образцов материалов и изделий электронной техники;

Место дисциплины в структуре основной образовательной программы(ООП):

- Курс «Материалы электронной техники» входит в **базовую** часть профессионального цикла дисциплин подготовки бакалавров по направлению 210100 – «Электроника и наноэлектроника».
- **Дисциплина является предшествующей** для следующих дисциплин профессионального цикла: «Твердотельная электроника», «Квантовая и оптическая электроника», «Наноэлектроника», «Магнитные элементы электронных устройств», «Основы проектирования электронной компонентной базы», «Основы технологии электронной компонентной базы», «Основы преобразовательной техники», «Энергетическая электроника».

В результате изучения дисциплины студент должен **знать:**

- физическую сущность процессов, протекающих в проводниковых, полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалах при их использовании в современных устройствах электронной техники различного функционального назначения;
- методы оценки основных свойств материалов электронной техники;
- физические принципы работы, основные эксплуатационные характеристики и параметры пассивных элементов электронной техники;
- технические характеристики и экономические показатели отечественных и зарубежных разработок в области создания материалов электронной техники;
- основные направления, связанные с внедрением новых материалов и технологий, и отражающие требования и тенденции развития электронной техники.

В результате изучения дисциплины студент должен **уметь:**

- рассчитывать основные параметры и характеристики материалов электронной техники;
- проводить экспериментальные исследования материалов электронной техники;
- выбирать материалы различного функционального назначения с учетом технико-экономических показателей, допустимых нагрузок, влияния внешних факторов.

В результате изучения дисциплины студент должен **владеть:**

- методами расчета параметров и основных характеристик материалов электронной техники;
- методиками проведения эксперимента по исследованию характеристик материалов.

Тематические разделы ДИСЦИПЛИНЫ

- Общие свойства и отличительные особенности материалов электронной техники
- Проводниковые материалы
- Резисторы
- Диэлектрики
- Конденсаторы
- Активные диэлектрики и элементы функциональной электроники
- Магнитные материалы
- Полупроводниковые материалы

Общие свойства и отличительные особенности материалов электронной техники

Материалы электронной техники

```
graph TD; A[Материалы электронной техники] --> B[Функциональные материалы]; A --> C[Конструкционные материалы];
```

Функциональные
Материалы обеспечивающие реализацию определенных функций в элементах электронной техники

Конструкционные
Материалы предназначенные для реализации вспомогательных функций

Общие свойства и отличительные особенности материалов электронной техники

- Основной характеристикой материалов электронной техники является **удельная электропроводность** – σ (Сименс/м), как коэффициент пропорциональности между плотностью тока $j = \sigma \cdot E$.
- Удельная электропроводность зависит только от свойств материала. Для оценки электропроводности материала широко используется **удельное электрическое сопротивление** $\rho = 1/\sigma$ (Ом · м).

По реакции на внешнее электрическое поле МЭТ принято подразделять на:

$\rho < 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ Проводники

$10^{-5} < \rho < 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ Полупроводники

$\rho > 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ Диэлектрики

Следует отметить, что удельное сопротивление ρ хороших проводников электрического тока составляет $10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а у лучших диэлектриков ρ превосходит значение $10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

По реакции на внешнее магнитное поле материалы электронной техники можно подразделить на пять групп:

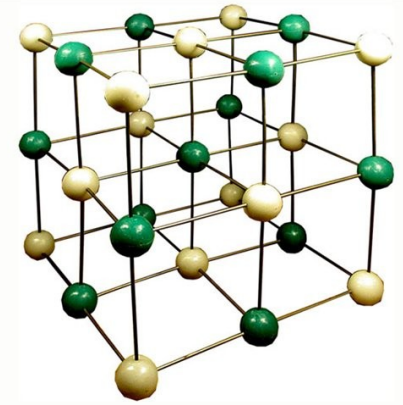
- Диамагнетики
- Парамагнетики
- Ферромагнетики
- Антиферромагнетик
и
- Ферримагнетики

Свойства материалов

Свойства материалов обусловлены физической структурой и химическим составом материалов. Таким образом, чтобы объяснить индуцированные в материале физические явления и эффекты:

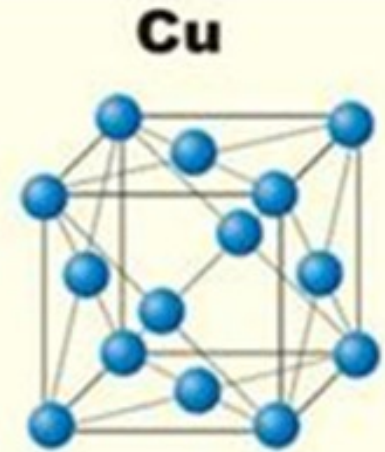
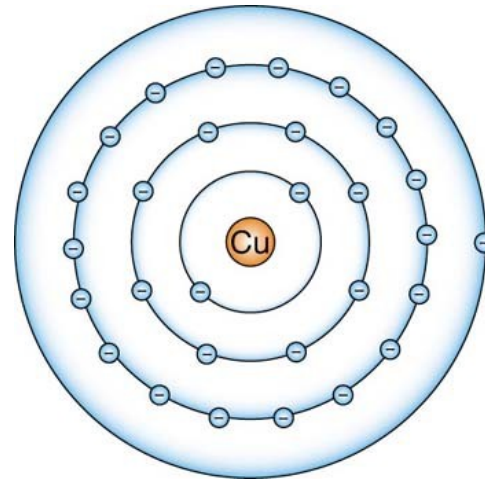
- Поляризацию
- Намагничивание
- Деформацию
- Теплоемкость
- Магнитострикцию

при воздействии на материал электромагнитных, механических, тепловых полей и других воздействий следует знать **молекулярно-атомную структуру** материала



Проводниковые материалы

Металлы, согласно квантовой теории, имеют кристаллическое строение: в узлах кристаллической решетки находятся положительные ионы, окруженные коллективизированными атомами (электронным газом).



$$\rho = 0.0017 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}$$

Медь



Универсальные физические постоянные

Название	Обозначение	Числовое значение
Число молекул в <u>кипомоле</u> вещества (число Авогадро)	N_A	$6,022 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} = 8,617 \cdot 10^{-5} \frac{\text{эВ}}{\text{К}}$
Атомная единица массы	<u>а.е.м.</u>	$1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя электрона	m_e	$9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,486 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.}$
Масса покоя протона	m_p	$1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,007276 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.}$
Заряд электрона	e	$1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$

Универсальные физические постоянные

Название	Обозначение	Числовое значение
Масса покоя протона	m_p	$1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,007276 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.}$
Заряд электрона	q_e	$1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$
Магнитная постоянная	μ_0	$12,5664 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$
Магнетон Бора	μ_B	$9,274 \cdot 10^{-24} \frac{\text{Дж}}{\text{Тл}}$
Постоянная Планка	h	$6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} = 4,14 \cdot 10^{-15} \frac{\text{эВ}}{\text{К}}$
Постоянная Планка, деленная на 2π	\hbar	$1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

Проводниковые материалы

Свободные электроны хаотически перемещаются по кристаллу со средней тепловой скоростью. В электрическом поле напряженностью электроны получают добавочную скорость упорядоченного движения – скорость дрейфа, благодаря чему и возникает электрический ток.

Согласно квантовой теории величина определяется выражением:
$$\sigma = \frac{q_e \cdot n}{m^* \cdot V_F} \cdot \lambda$$

где q_e – заряд электрона; λ – длина свободного пробега электрона (расстояние, которое проходит электрон за время между столкновениями с узлами кристаллической решетки); n – концентрация свободных электронов; h – постоянная Планка; V_F – тепловая скорость электронов, обладающих энергией, близкой к энергии Ферми E_F ; m^* – эффективная масса электрона в кристалле.

Температурная зависимость удельного сопротивления металлов.

Согласно эмпирически установленному **правилу Маттиссена**, удельное сопротивление реальных металлов представляет собой сумму двух составляющих:

$$\rho = \rho_T + \rho_{\text{ост}}$$

Причинами рассеяния электронов в реальных металлах, создающего удельное электрическое сопротивление, являются:

- тепловые колебания узлов кристаллической решетки (ρ_T – тепловая составляющая удельного электрического сопротивления);
- примеси и дефекты структуры ($\rho_{\text{ост}}$ – составляющая, обусловленная нетепловыми факторами).

Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления

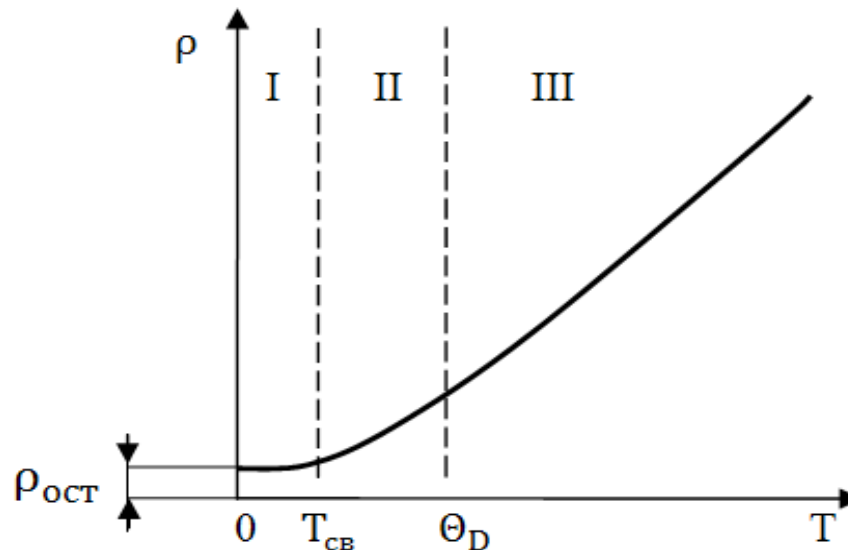
Относительное изменение удельного электрического сопротивления металлов при изменении температуры характеризует температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ (чаще используют обозначение α_{TK_ρ}):

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}$$

Температурный коэффициент удельного сопротивления α_{TK_ρ} характеризует относительное изменение удельного электрического сопротивления при изменении температуры на один градус и имеет размерность, обратную температуре.

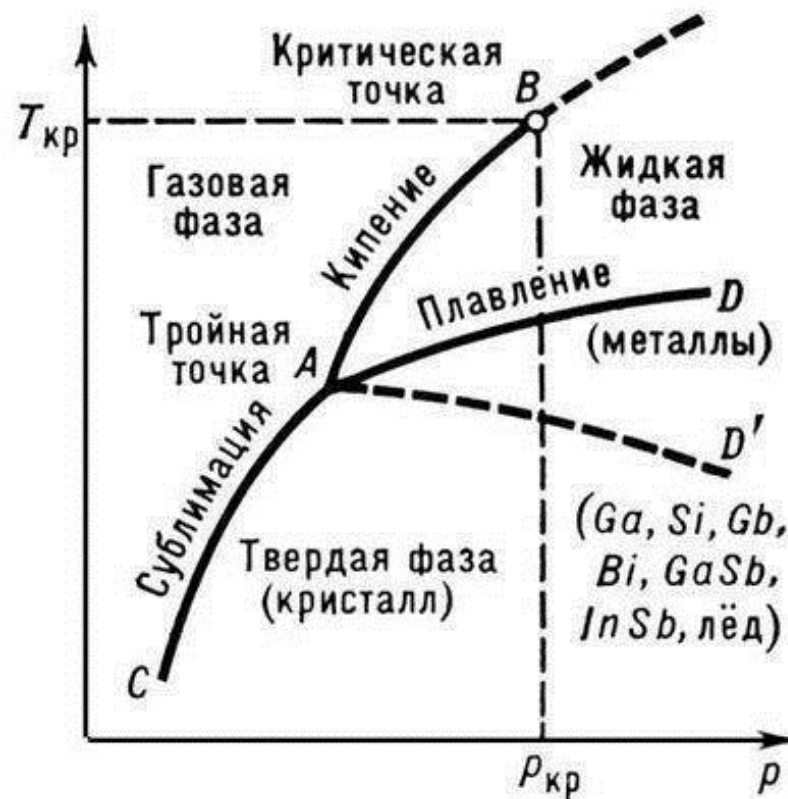
Температурная зависимость удельного электрического сопротивления металла

У металлов значение положительное, что связано с увеличением амплитуды тепловых колебаний узлов кристаллической решетки. Температурная зависимость удельного сопротивления металлов приведена на рисунке



Влияние температуры на удельное сопротивление металлов.

При переходе из твердого состояния в жидкое у большинства металлов наблюдается резкое увеличение удельного сопротивления (в 1,5...2 раза), связанное с нарушением ближнего порядка в расположении атомов. Исключение составляют висмут (*Bi*), сурьма (*Sb*), галлий (*Ga*), объем которых при плавлении уменьшается, что сопровождается уменьшением удельного сопротивления.



Влияние примесей и дефектов на удельное сопротивление металлов.

Примеси вносят наиболее существенный вклад в величину остаточного сопротивления $\rho_{ост}$. Атомы любого элемента примеси $\rho_{ост}$ повышают, даже если сама примесь обладает большей электропроводностью.

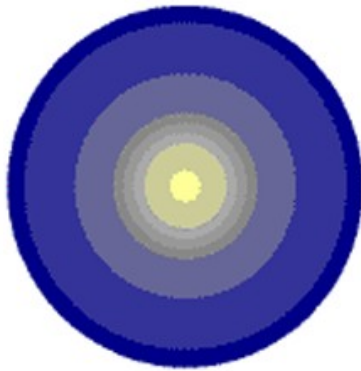
Рассеяние электронов проводимости на атомах примеси тем сильнее, чем больше разница в валентности элемента примеси и металла-растворителя.



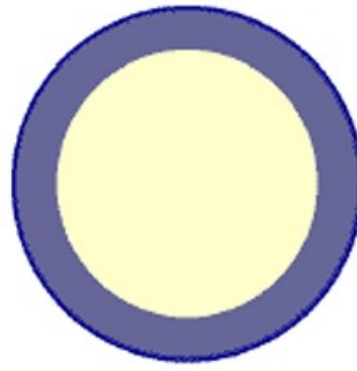
Проводниковые материалы

При протекании по проводнику быстроизменяющегося тока наблюдается неравномерное распределение плотности тока по сечению проводника: плотность тока максимальна на поверхности проводника и убывает по мере проникновения вглубь проводника. Это явление

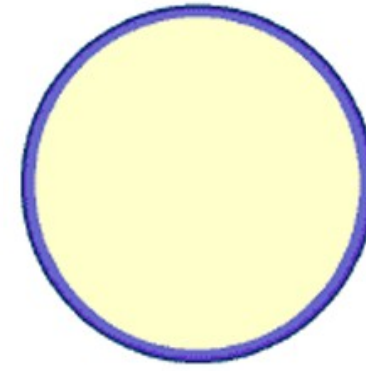
СКИН-ЭФФЕКТ



60Hz.
6" (150mm)



1000Hz.
0.2" (5mm)



400KHz.
0.030" (0.75mm)

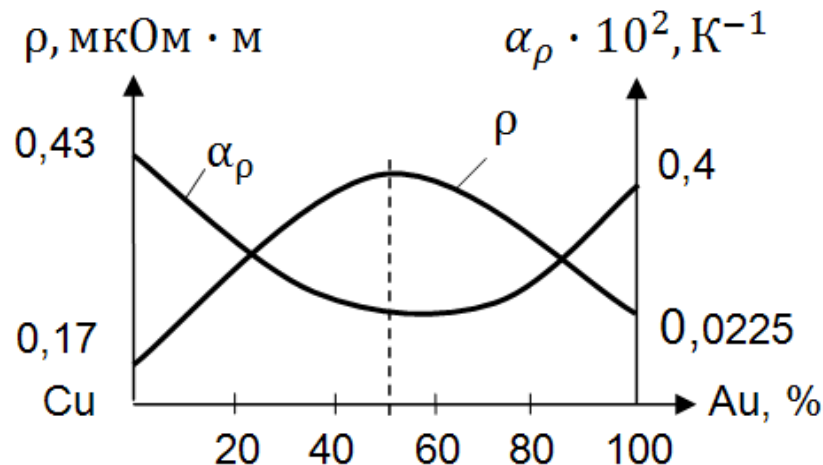
Глубина проникновения тока в металле (ток показан голубым цветом)

Физический смысл скин-эффекта

Физический смысл глубины проникновения поля (глубины скин-слоя) – это расстояние, на котором плотность тока уменьшается в $e = 2,72$ раз по отношению к значению на поверхности. Например, величина скин-слоя от частоты для медного проводника составляет: при частоте $\nu = 50 \text{ Гц}$ глубина проникновения поля $\Delta = 9,39 \text{ мм}$; при частоте $\nu = 10 \text{ кГц}$ $\Delta = 0,66 \text{ мм}$; при частоте $\nu = 100 \text{ кГц}$ $\Delta = 0,21 \text{ мм}$

Зависимости удельного электрического сопротивления и температурного коэффициента удельного электрического сопротивления от состава сплава

В *сплавах со структурой твердых растворов* может значительно превосходить тепловую составляющую. Для большинства твердых растворов с неограниченной растворимостью (*Au-Ag, Ag-Cu, Cu-Au* и др.) изменение остаточного сопротивления в зависимости от состава сплава хорошо описывается параболической функцией в соответствии с *законом Нордгейма*:

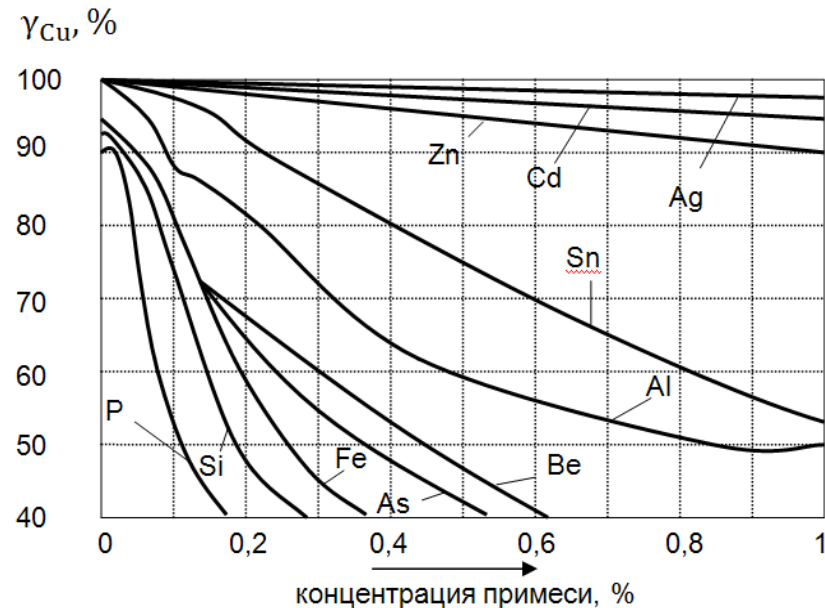


Электрическое сопротивление тонких металлических пленок.

- Металлические пленки, наносимые на диэлектрическую или полупроводниковую подложку, широко используются в микроэлектронике. По выполняемым функциям различают **резистивные пленки** (тонкопленочные резисторы) и **пленки высокой проводимости** (контактные площадки, межэлементные соединения, обкладки конденсаторов).
- Для получения тонких пленок используют следующие **методы**:
 - термическое испарение металла с последующей конденсацией на подложку;
 - испарение электронным лучом;
 - катодное или ионно-плазменное осаждение;
 - эпитаксиальное наращивание.

Влияние примесей на удельную электропроводность меди

- Любая примесь уменьшает электропроводность меди. Примеси, входящие в состав меди можно разделить на три группы:
- Никель (Ni), цинк (Zn), сурьма (Sb), олово (Sn), алюминий (Al), мышьяк (As), железо (Fe), фосфор (P). Эти примеси оказывают большое влияние на электропроводность.
- Свинец (Pb), висмут (Bi) и другие – практически не растворимы в меди. Эти примеси оказывают небольшое влияние на электропроводность.
- Кислород (O) и сера (S) образуют с медью хрупкие химические соединения. Кислород, находясь в растворе, уменьшает электропроводность. Кислород, если он присутствует в меди, образует закись меди, которая приводит к значительной потере прочности.



Условные обозначения химических элементов в марках цветных металлов и сплавов

Элемент	Химический символ	Обозначение элемента	Элемент	Химический символ	Обозначение элемента
Алюминий	<i>Al</i>	А	Ртуть	<i>Hg</i>	Р
Бериллий	<i>Be</i>	Б	Свинец	<i>Pb</i>	С
Железо	<i>Fe</i>	Ж	Сурьма	<i>Sb</i>	Су
Иридий	<i>Ir</i>	И	Теллур	<i>Te</i>	Те
Кадмий	<i>Cd</i>	Кд	Титан	<i>Ti</i>	Т
Кремний	<i>Si</i>	К	Фосфор	<i>P</i>	Ф
Магний	<i>Mg</i>	Мг	Хром	<i>Cr</i>	Х
Марганец	<i>Mn</i>	Мц	Цинк	<i>Zn</i>	Ц
Медь	<i>Cu</i>	М	Церий	<i>Zr</i>	Цр
Мышьяк	<i>As</i>	Мш	Палладий	<i>Pd</i>	Пд
Никель	<i>Ni</i>	Н	Золото	<i>Au</i>	Зл
Олово	<i>Sn</i>	О	Серебро	<i>Ag</i>	Ср

Примеры маркировки проводниковых материалов

- **Пример**: Сплав МНМц15-20 – медный сплав с содержанием 15 % никеля и 20 % марганца.
- **Пример**: Латунь ЛЦ23А6Ж3Мц2 – литейная латунь с содержанием 23 % цинка, 6 % алюминия, 3 %, железа, 2 % марганца, остальное – медь (ГОСТ 17711–80).

Медь

Самый распространенный способ очистки меди это **электрорафинирование**. Обычно используются аноды из черновой меди, катоды из тонких листов чистого металла и электролит, содержащий сульфат меди и серную кислоту. При пропускании через электролитическую ванну тока, медный анод растворяется, причем металлы, находящиеся в ряду напряжений правее меди (серебро, золото, платиновые металлы), в раствор не переходят, а оседают в виде анодного шлама на дно электролитической ванны. На катоде, наоборот, происходит выделение чистой меди, а металлы, находящиеся в ряду напряжений левее меди, остаются в растворе. В результате, получаются пластинки чистой меди, одну из которых можно



Проводниковый алюминий.

- Алюминий (Al) – металл, занимающий второе место по значению (после меди) среди проводниковых материалов благодаря комплексу его электрических и механических свойств, важнейшими из которых являются:
- высокая электропроводность (удельное сопротивление алюминия $\rho = 0,028 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$, что лишь на одну треть уступает электропроводности меди); $\gamma = 2,7 \text{ г/см}^3$
- малый удельный вес (плотность алюминия, что в 3,5 раза ниже, чем у меди);
- высокая пластичность (алюминий прекрасно обрабатывается давлением – прокаткой, прессованием, штамповкой, ковкой);
- высокая теплопроводность и более чем удовлетворительная коррозионная стойкость.

Проводниковый алюминий.

В зависимости от назначения и метода обработки алюминий делят на *алюминий первичный* (ГОСТ 11069-74) и *алюминий технически чистый*. Первичный алюминий маркируется буквой **А**, после которой указывается чистота материала в виде дробной части содержания основного металла в весовых %:

Особой чистоты (ОСЧ)	Высокой чистоты (ВЧ)	Технически чистый
A999	A995, A99, A97, A95	A85, A8, A7, A7E. A5, A5E, A0

Если в конце марки стоит буква **Е** – металл предназначен для получения проволоки, если стоит буква **Р** – рафинированный.

Изготовление слитков алюминия

Расплавленный алюминий можно вылить в чистую и сухую форму. Если используется форма из керамики или графита, перед отливкой формы необходимо обязательно нагреть для удаления воды. Благодаря низкой температуре плавления, алюминий и его сплавы можно отливать в металлические разъемные формы (литье в кокиль). В отличие от литья в песчаные формы, этот метод позволяет получить отливки с точными размерами и более высоким качеством поверхности. Кроме того, металлические формы - многоразовые.

Слитки на фото, получены из алюминиевых гранул и отлиты в графитовую форму. Чистота исходного металла - 99.5%

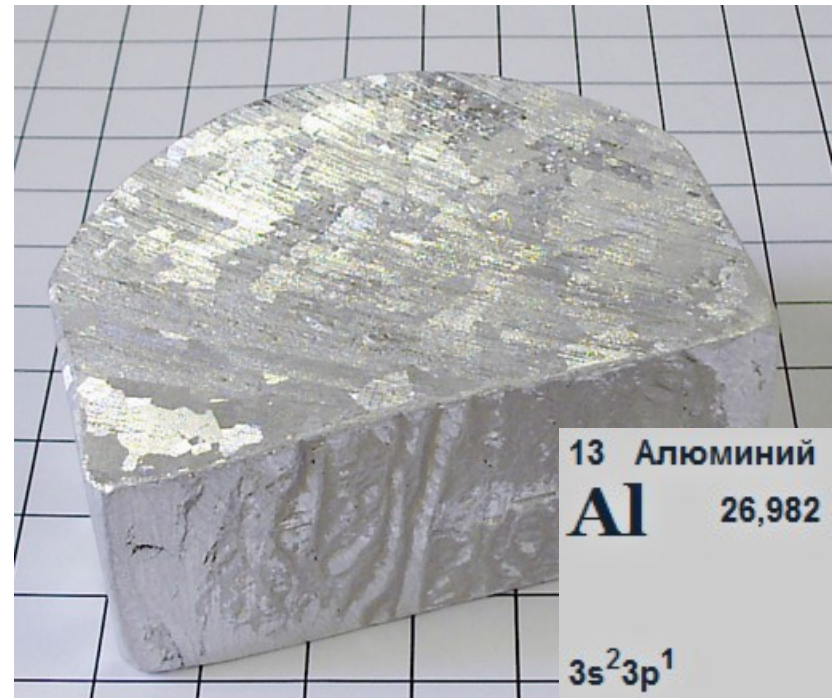
Алюминий марки А995

В промышленности слитки алюминия выпускаются обычно массой от нескольких десятков килограмм и больше.



Особо чистый слиток алюминия марки А999

Это образец
особо чистого
алюминия.
Образец вырезан
из слитка,
поверхность
подвергнута
травлению и на
ней видна
крупнозернистая
структура слитка.



Благородные металлы.

К благородным металлам относят:

Серебро
(Ag)



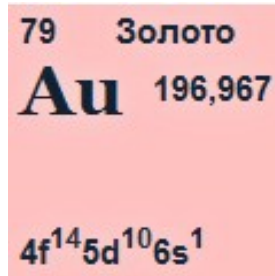
- **Серебро (Ag)** – металл с наиболее высокой тепло- и электропроводностью из всех проводниковых материалов, $0,015 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (). Прочность и твердость 20 МПа , $0,5 \text{ ГПа}$ не высокие (). Химическая стойкость серебра ниже химической стойкости других благородных металлов.
- Высокая пластичность серебра позволяет получать тонкую фольгу и проволоку диаметром до $0,01 \text{ мм}$. Благодаря высокой тепло- и электропроводности серебро входит в состав многих контактных сплавов.

Серебро

Серебро является лучшим проводником электрического тока (не считая сверхпроводников) и одним из лучших проводников тепла, за исключением алмаза (который проводит тепло примерно в 7-10 раз лучше), тепловых трубок и жидкого гелия-II (в которых теплопередача обусловлена физическими явлениями). Благодаря высокой электропроводности, устойчивости к окислению и тому, что даже если на поверхности металла в результате окисления образуется сульфидная пленка, она так же проводит ток (хоть и несколько хуже металла), серебро широко используется для изготовления электрических контактов. Серебряные покрытия применяются для декоративных целей, защиты от коррозии и получения зеркальных поверхностей.



Благородные металлы.

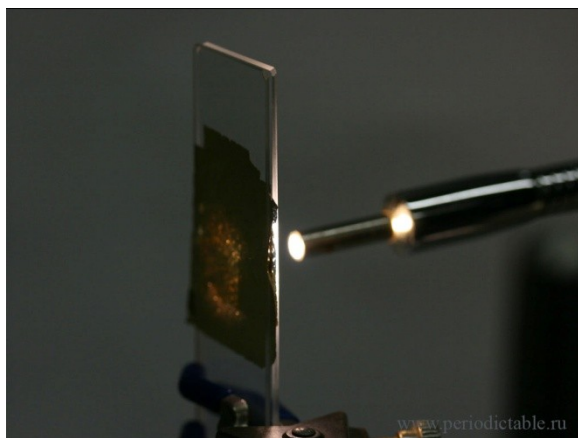


Золото (Au) обладает высокой тепло- и электропроводностью и существенно более высокой коррозионной стойкостью, чем серебро, не окисляется и не образует сернистых пленок. Золото отличается высокой пластичностью, что позволяет проводить многократную обработку давлением, но имеет очень низкую твердость и прочность. Значительно повышаются механические свойства золота при образовании сплавов. Чаще всего используют сплавы золота с никелем, платиной, упрочняемые закалкой

Выращенный кристалл золота



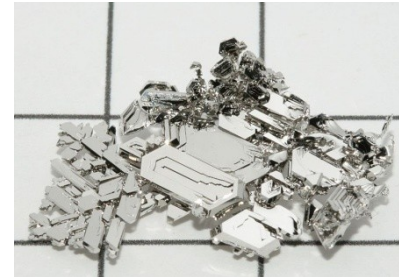
Золото это самый пластичный металл, из него можно изготовить фольгу толщиной меньше микрометра.



Металлы тоже могут быть прозрачными. Проще всего убедиться в этом, если посмотреть на просвет золотое напыление на каком-нибудь стеклянном изделии (бокале, вазе и т.п.). Но и с фольгой тоже можно пронаблюдать такой эффект. Для этого нужно зажать пару листков золота между стеклами и посмотреть сквозь них на яркий источник света. На фотографии видно, что листы сами по себе имеют довольно много дефектов (поэтому лучше взять пару листков) но сине-зеленую окраску золота также видно очень отчетливо

Благородные металлы.

78	Платина
Pt	195,08
$4f^{14}5d^96s^1$	

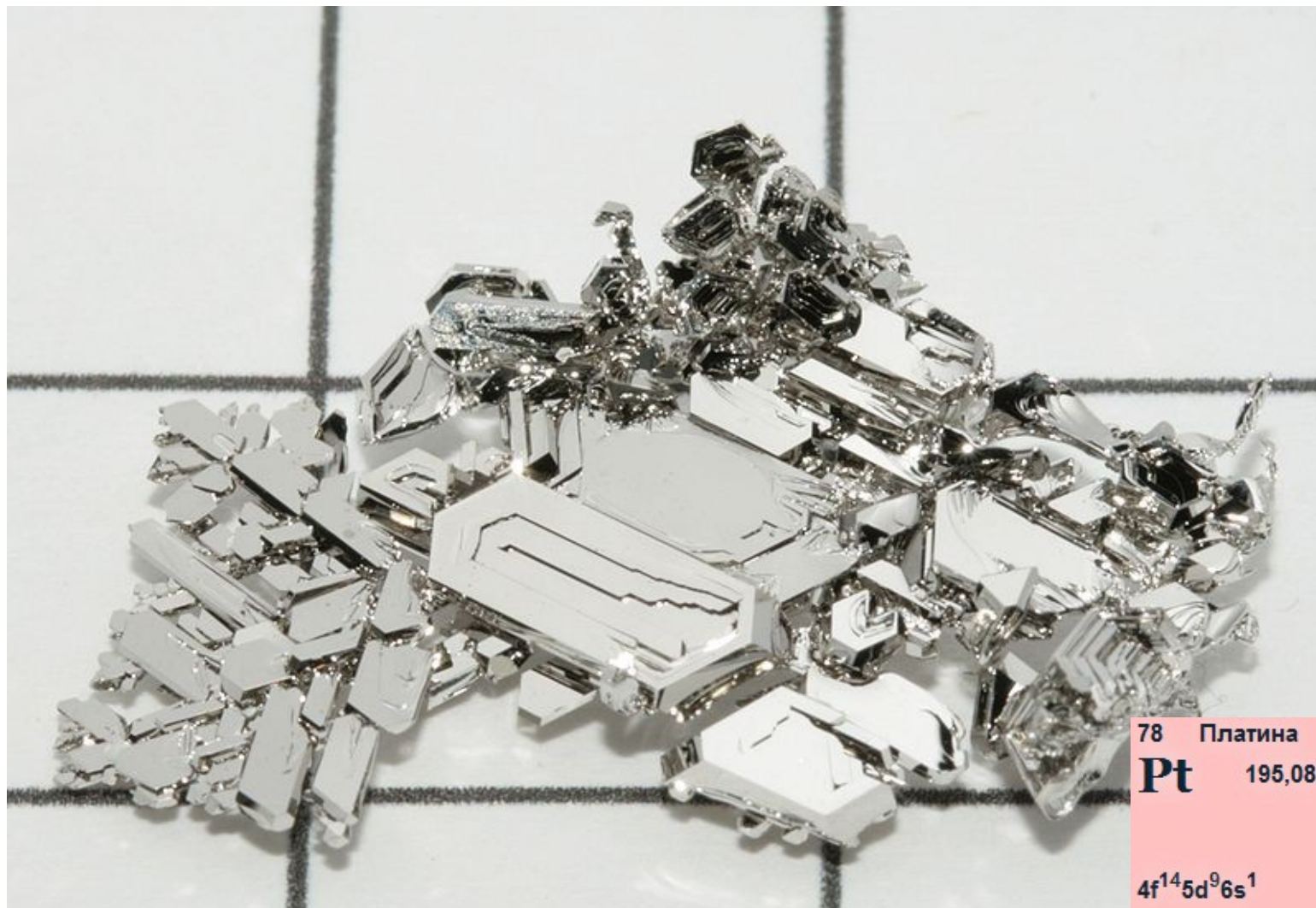


$$\rho = 0,098 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$$

Платина (Pt) обладает наибольшим удельным сопротивлением среди всех благородных металлов.

Платина прекрасно поддается механической обработке, вытягивается в очень тонкую проволоку и ленты. Для платины характерна очень высокая химическая стойкость. Платина не растворяется во многих кислотах, не образует сернистых пленок, что обеспечивает платиновым контактам стабильное переходное сопротивление.

Выращенный кристалл платины



Свойства и применение платины

Платина устойчива к анодному растворению в самых разных кислотах. Поэтому из неё делают электроды для электрохимических измерений и электрохимического получения разнообразных веществ в лабораторных условиях. Электрод на первом фото - самодельный. Небольшой кусок платины нетрудно прокатать в пластинку, а потом приварить к ней проволоку. На втором фото - электроды заводского изготовления. Встречаются также электроды в виде сеток - они имеют большую поверхность, но сложнее в изготовлении и несколько дороже (в пересчете на грамм металла).



Благородные металлы.

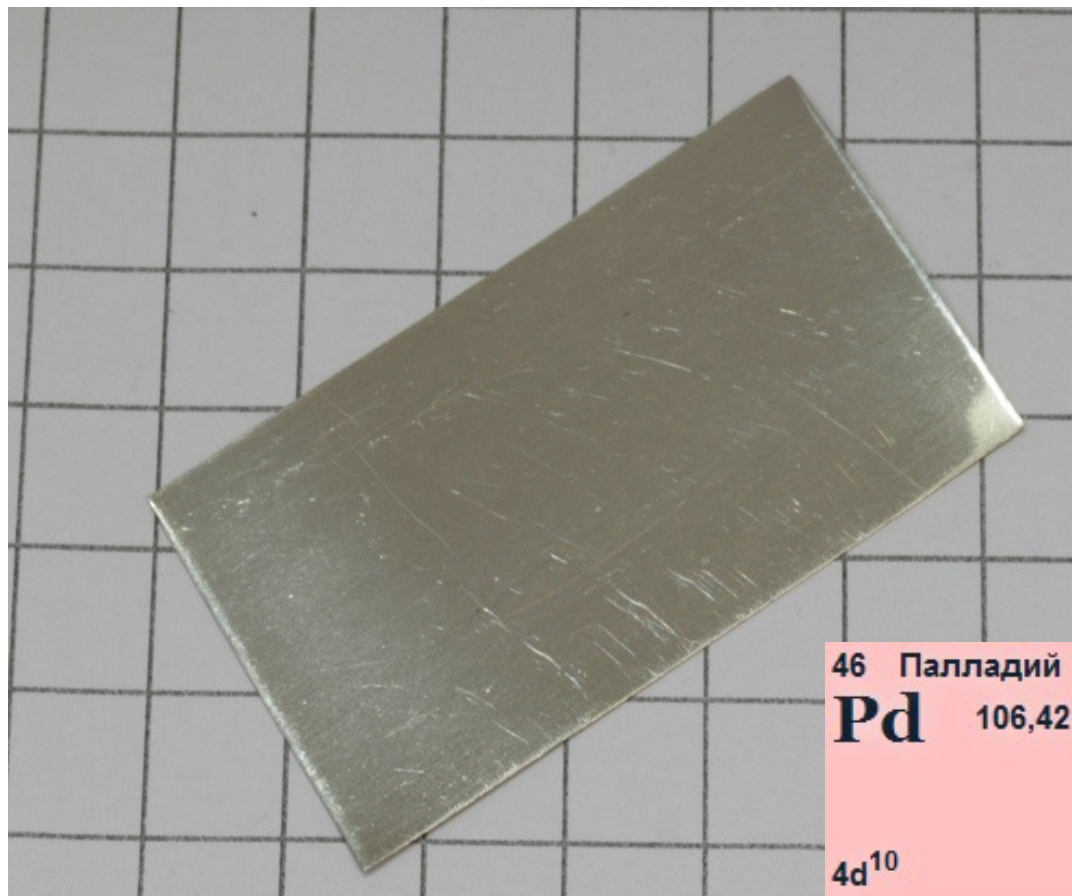
- Из других металлов платиновой группы наиболее широко применяется **палладий (Pd)**, который по свойствам близок к платине, но в 4-5 раз дешевле и в два раза легче платины. Стойкость к окислению палладия по сравнению с платиной ниже (окисление платины на воздухе начинается при температуре 540°C, а палладия – при температуре 350°C). Палладий обладает хорошими механическими свойствами ($\sigma_{\text{в}} = 200 \text{ МПа}$, $\delta = 40\%$)
- Особенностью палладия является способность интенсивно поглощать кислород (в более чем 850-кратном объеме по отношению к собственному объему). При последующем нагреве в вакууме поглощенный кислород вновь выделяется. Это свойство используется для заполнения водородом газоразрядных приборов.

Выращенный кристалл палладия



Палладий

Как и многие другие металлы, палладий легко прокатывается в листы или фольгу. На фотографии - образец палладиевой жести.



Тугоплавкие металлы.

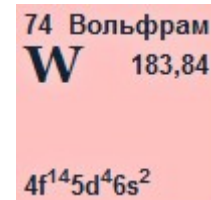
К тугоплавким металлам относятся металлы с температурой плавления выше 1700 °C:

Вольфрам (W) – наиболее тугоплавкий из всех металлов ($T_{пл} = 3410$ °C), имеет высокую твердость и хорошую проводимость.

Вольфрам – один из важнейших материалов электровакуумной техники. Благодаря волокнистой структуре, приобретаемой в результате обработки ковкой или волочением, тонкая вольфрамовая проволока диаметром до 0,01 мм обладает



$$\rho = 0,055 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$$



Вольфрам



Вольфрам

Вольфрам с трудом поддается механической обработке, поэтому выточить или отштамповать такой тигель было бы если не невозможно, то крайне сложно. Тигель изготовлен по процессу газофазного восстановления гексафторида вольфрама водородом (кстати, WF_6 это, пожалуй, самый тяжелый газ из известных науке). При его восстановлении водородом на поверхности нагретого медного цилиндра, вокруг последнего образуется плотный слой вольфрама. После получения слоя заданной толщины, медный цилиндр удаляют. Такие тигли применяют для дистилляции редкоземельных металлов и изготовления сплавов. Поскольку вольфрам окисляется на воздухе, тигли используют в вакууме или в инертной атмосфере.



Вольфрам

Кроме электронно-лучевой плавки, существует еще один способ расплавить вольфрам. Это аргонно-дуговая плавка. Таким же методом изготовлен один из образцов рения. В отличие от электронно-лучевой плавки, при плавлении в дуге примеси летучих металлов удаляются хуже (поскольку плавление проводят при атмосферном давлении, а не в вакууме). Но именно этот метод позволяет приготовить сплавы вольфрама с такими летучими металлами, которые в вакууме запросто улетают из сплава.

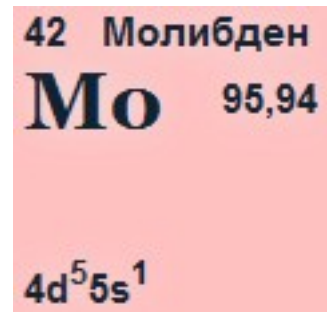


Тугоплавкие металлы.

- **Молибден (Mo)** – аналог вольфрама, но менее $T_{пл} = 2620$ тугоплавкий (°C) и твердый. Среди всех тугоплавких металлов молибден обладает наименьшим удельным сопротивлением . Из молибдена изготавливают сетки и электроды электровакуумных приборов.
- Большое практическое значение имеют **сплавы вольфрама с молибденом (W-Mo-сплавы)**, которые образуют структуру твердого раствора во всем диапазоне концентраций.



$$\rho = 0,05 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$$



Молибден



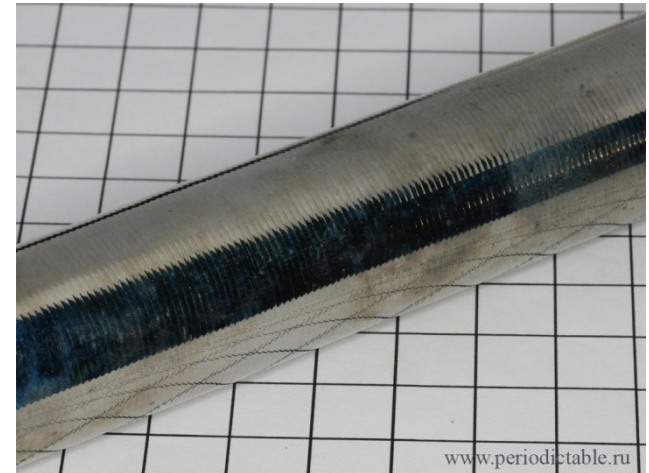
42 Молибден

Mo 95,94

$4d^5 5s^1$

Молибден

- Из молибдена можно изготовить проволоку. Из молибденовой проволоки делают высокотемпературные нагреватели, испарители для установок резистивного напыления и детали вакуумных электронных приборов.
- Монокристаллы молибдена используют в производстве мишеней для рентгеновских трубок, специальных зеркал и в физических исследованиях. Выращивают такие кристаллы методом плавающей зоны с нагревом электронным пучком.



Тугоплавкие металлы.

Рений (Re) - редкий и тяжелый металл с температурой плавления, близкой к температуре плавления вольфрама

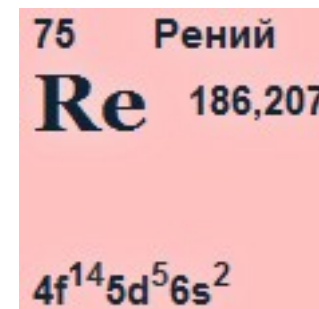
($T_{пл} = 3180$ °C).

Рений твердый и прочный, как вольфрам, и пластичный, как молибден, имеет высокое удельное сопротивление

Рений и его сплавы с вольфрамом применяют в производстве электровакуумных приборов взамен вольфрама, так как рений меньше испаряется в атмосфере водорода, отличается более длительным сроком службы.



$$\rho = 0,214 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$$



Рений

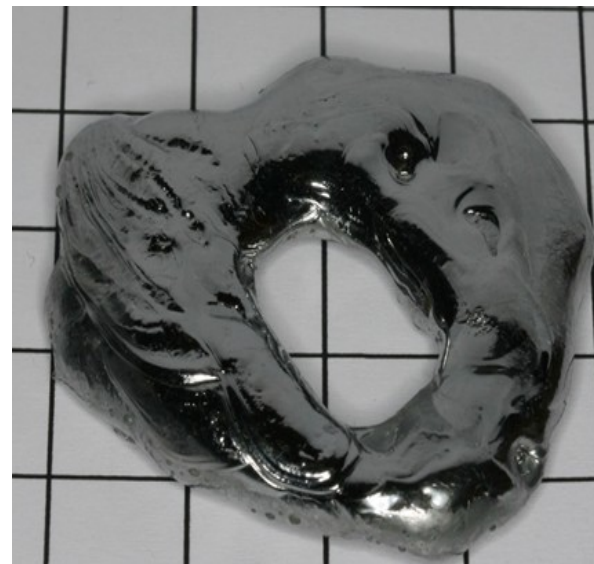


Рений

Этот металл находится на втором месте по температуре плавления (после вольфрама). Соединения рения применяются в качестве катализаторов в нефтехимической отрасли и в тонком органическом синтезе.

Вольфрам/вольфрам-рениевыми термопарами можно измерять температуру до 3100 градусов, а его сплавы сохраняют прочность при температурах до 2000 °С. Но рений легко окисляется на воздухе. Это происходит из-за того, что оксид рения кипит уже при температуре немного выше 350 градусов. При окислении он улетает с поверхности металла, не защищая её.

Однако в вакууме рений и его сплавы устойчивы и, благодаря низкому давлению паров, используются в деталях авиакосмических аппаратов.



75	Рений
Re	186,207
$4f^{14}5d^56s^2$	

Рений



На этом фото – слиток рения, полученный методом электронно-лучевой плавки. Процесс в основном похож на выращивание монокристаллов вольфрама, но при этом, как правило, ограничиваются несколькими проходами расплавленной зоны, поскольку монокристаллическая структура в данном случае не требуется.

Тугоплавкие металлы.

Тантал (Ta) по тугоплавкости несколько уступает Вольфраму ($T_{пл} = 3000^\circ\text{C}$), но значительно превосходит его по пластичности, что позволяет изготавливать проволоку и фольгу толщиной до 10 мкм. Тантал образует на поверхности плотную оксидную пленку Ta_2O_5 , устойчивую до температуры 1500°C . Это свойство используется при производстве электролитических и тонкопленочных конденсаторов высокой удельной емкости, получаемых путем анодного оксидирования.



$$\rho = 0,124 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$$

73	Тантал
Ta	180,948
$4f^{14}5d^36s^2$	

Тантал



Тантал

Чистый тантал пластичен (причем это свойство сохраняется даже при очень низких температурах, до -210 градусов). Прокаткой тантала получают листы, которые можно видеть на фотографии.



Тантал

Около трети всего производимого тантала используется при изготовлении танталовых конденсаторов и других электронных приборов. Танталовые конденсаторы обладают намного большим сроком службы по сравнению с алюминиевыми электролитическими. Цветные цилиндры на фото – это электроды из конденсаторов. Яркий зеленый и красный цвет поверхности обусловлен присутствием пленки оксида различной толщины и структуры.



Тантал

Танталовый слиток, полученный **зонной плавкой**, методом плавающей зоны с нагревом электронным лучом. Данный метод позволяет получить наиболее чистый металл, поскольку зона расплава не контактирует с тиглем. Процесс производится в высоком вакууме и позволяет удалить все летучие примеси, а перемещение расплавленной зоны вдоль слитка удаляет растворимые примеси, как при обычной зонной плавке.



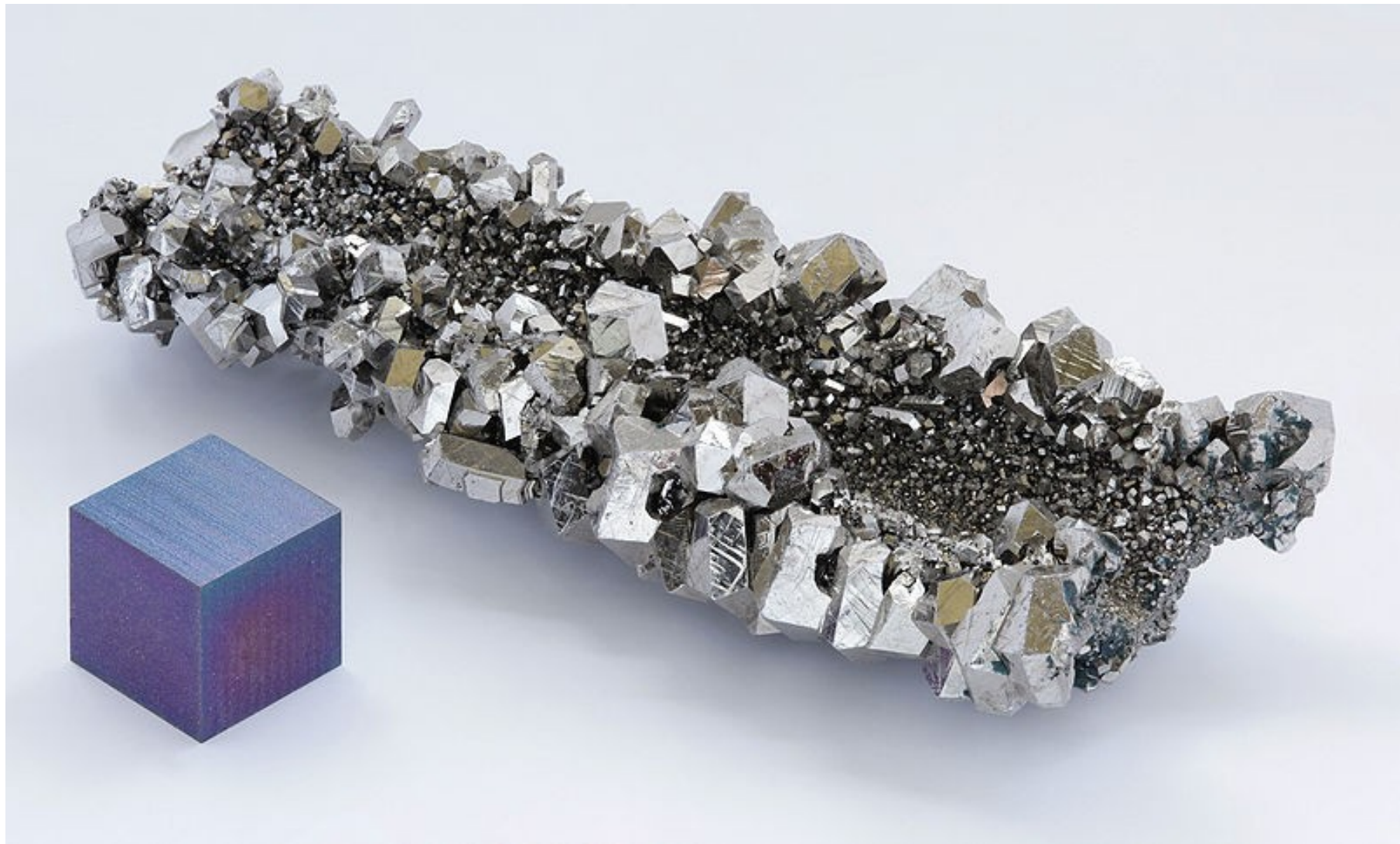
Тугоплавкие металлы.

Ниобий (Nb) по тугоплавкости (2500 °C) уступает танталу, обладает высокой способностью поглощать газ в интервале температур от 400 °C до 900 °C. Среди всех тугоплавких металлов у ниобия наименьшая работа выхода электронов, а среди всех химических элементов ниобий обладает самой высокой критической температурой перехода в сверхпроводящее состояние ($T_{св} = 9,2\text{K}$). Поэтому ниобий, как и тантал ($T_{св} = 4,5\text{K}$), применяют в криоэлектронике.



41	Ниобий
Nb	92,906
$4d^4 5s^1$	

Ниобий

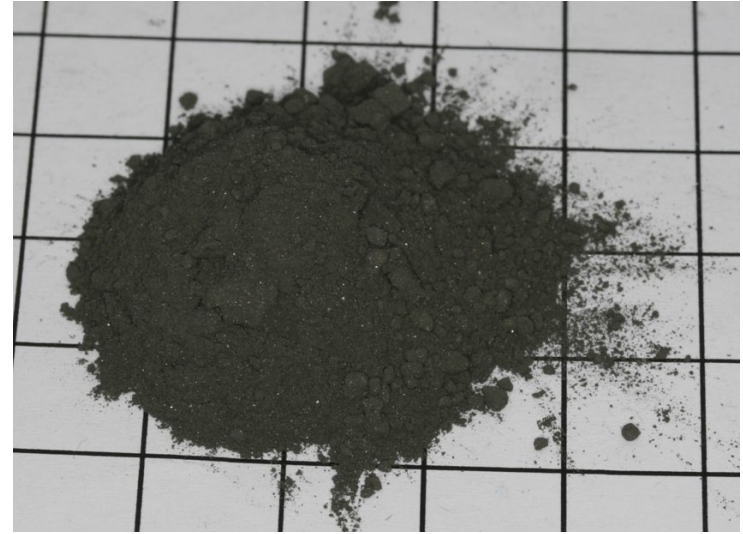


Применение ниобия

Основное количество ниобия потребляет металлургическая промышленность (в виде феррониобия). Там он используется в качестве присадки к стали (для улучшения её свариваемости), в производстве сварочных электродов и специальных сплавов. Ниобий и его сплавы с титаном, при охлаждении жидким гелием, переходят в сверхпроводящее состояние. Температура их перехода (T_c) не является самой высокой среди остальных сверхпроводников (она составляет примерно 10-20 К). Для сравнения, T_c для керамики $YBa_2Cu_3O_7$ равна 100К. Но, в отличие от керамики, сплавы ниобия пластичны и из них можно сделать проволоку для намотки катушки электромагнита. Длина такой проволоки, например, в магните ЯМР спектрометра с частотой 250 мегагерц - более 19 километров!

Применение ниобия

- Иногда ниобий используют в производстве электролитических конденсаторов (как замену более дорогому танталу). В этих конденсаторах электроды изготовлены из спеченного порошка ниобия. Также, порошок ниобия находит некоторое применение в пиротехнике (для изготовления составов-замедлителей, горящих без выделения газов).
- Как и большинство металлов, ниобий легко поддается механической обработке. На фото - пруток чистого (99.9%) металлического ниобия, проточенный на токарном станке.



Применение ниобия

- Этот металл можно прокатать в тонкую фольгу. Но, как и в случае с титаном, танталом и некоторыми другими металлами, пластичным является только металл, не содержащий примесей кислорода, азота и других неметаллов. Эти примеси делают ниобий хрупким и ломким.



Применение ниобия

Одним из методов очистки ниобия является электрорафинирование в солевом расплаве. При таком методе, черновой ниобий погружается в электролит, состоящий из смеси расплавленных хлоридов металлов, и является анодом. На катоде при пропускании тока выделяется чистый металл. Вид осадка зависит от многих факторов: плотности тока, состава электролита, температуры и т.п. Обычно, таким методом получают порошки металла, которые затем применяются в электротехнике (производство конденсаторов)



Тугоплавкие металлы.

Хром (Cr) обладает сравнительно невысокой температурой плавления по сравнению с другими тугоплавкими металлами.

Отличительная особенность хрома – высокая стойкость к окислению даже при повышенных температурах, поэтому хром используется в качестве защитного покрытия изделий из конструкционных материалов. Хром обладает хорошей адгезионной способностью к стеклу, керамике, ситаллам и хорошо совместим с другими проводящими материалами.



Хром



Криопроводники

Среди материалов высокой проводимости особое место занимают криопроводники – металлические проводники, удельное сопротивление которых при охлаждении снижается плавно, без скачков, и при криогенных температурах (при $T < -195$ °С) становится на несколько порядков ниже, чем при нормальной температуре. При очень низких температурах удельное сопротивление, вызванное рассеянием электронов на тепловых колебаниях кристаллической решетки, становится пренебрежимо малым, и сопротивление в основном обуславливается искажениями решетки, вызванными наличием примесей и наклепа. Поэтому металлы, применяемые в качестве криопроводников, должны быть отождествлены и

Криопроводники

При температуре жидкого водорода ($-252,6\text{ }^{\circ}\text{C}$) наиболее эффективными в качестве криопроводников являются особо чистые Cu и Al, а при температуре жидкого азота – технически чистый Be (примесей не более 0,1 %). Однако бериллий высокотоксичен и дорог, малотехнологичен и имеет сильновыраженный магниторезистивный эффект, поэтому в качестве криопроводника чаще всего используют алюминий, например, марки А999. При температуре жидкого гелия ($-269\text{ }^{\circ}\text{C}$) алюминий имеет удельное сопротивление не более 10^{-12} Ом·м.

Криопроводники применяют в основном для изготовления проводов, работающие при температуре жидкого водорода ($-252,6\text{ }^{\circ}\text{C}$), неона ($-245,7\text{ }^{\circ}\text{C}$) или азота ($-195,6\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Основные физические свойства некоторых чистых металлов

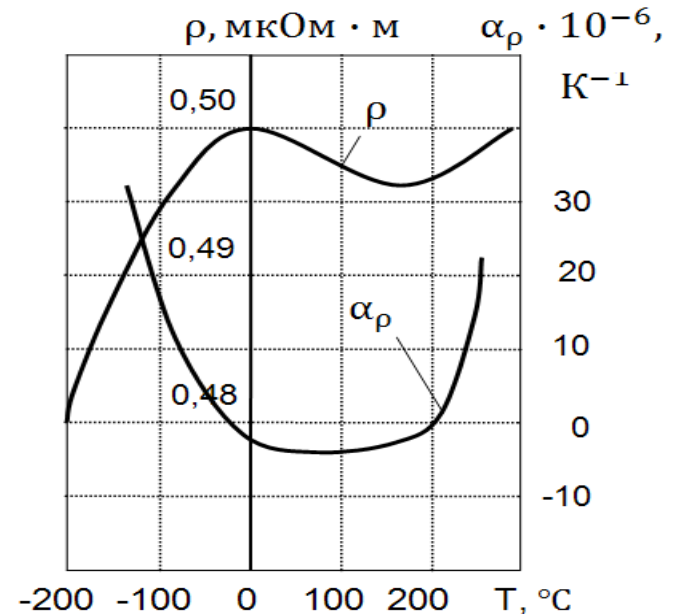
Металл	Химический символ	Плотность, кг/м ³	Температура плавления, °С	ТКЛР $\times 10^6$, К ⁻¹	Удельное электро-сопротивление, мкОм·м	Температура перехода в сверхпроводящее состояние, К
Алюминий	Al	2700	660	21	0,028	1,2
Бериллий	Be	1840	1280	12,0	0,041	0,03
Ванадий	V	6110	1900	8,3	0,248	5,13
Вольфрам	W	19 300	3380	4,4	0,055	0,01
Галлий	Ga	5920	30	18,1	0,136	1,09
Гафний	Hf	13 290	2220	5,9	0,351	0,35
Индий	In	730	156	28,4	0,090	3,41
Иридий	Ir	22 400	2410	6,5	0,054	0,14
Кадмий	Cd	8650	321	29,0	0,074	0,52
Молибден	Mo	10 200	2620	5,3	0,05	0,93
Ниобий	Nb	8570	2470	7,2	0,15	9,2
Олово	Sn	7290	232	23,0	0,113	3,72
Осмий	Os	22 500	3000	4,6	0,095	0,71
Рений	Re	21 020	3180	6,7	0,214	1,7
Ртуть	Hg	13 500	-39	182,0	0,958	4,15
Рутений	Ru	12 400	2250	9,1	0,075	0,47
Свинец	Pb	11 340	327	28,3	0,190	7,2
Тантал	Ta	16 600	3000	6,6	0,124	4,5
Титан	Ti	4520	1670	8,1	0,47	0,39
Торий	Th	11 600	1750	11,5	0,13	1,37
Цинк	Zn	7140	419	30	0,059	0,88
Цирконий	Zr	650	1855	6,3	0,41	0,55

Сплавы для резисторов и технических сопротивлений.

Манганин МНМц3-12 –

классический сплав меди с никелем и марганцем ($Cu + 3\% Ni + 12\% Mn$) для образцовых резисторов и электроизмерительных приборов высокого класса точности

($\pm 0,001^\circ C$). Благодаря наличию марганца термо-э.д.с. манганина с медью составляет не более $1,0 \text{ мкВ}/^\circ C$.



Зависимости удельного сопротивления и температурного коэффициента удельного сопротивления манганина от температуры

Сплавы для резисторов и технических сопротивлений.

Константан МНМц40-1,5 – сплав меди с никелем ($Cu + 40\% Ni + 1,5\% Mn$).

Отличается высокой прочностью и пластичностью в отожженном состоянии, обеспечивает большое значение термо-э.д.с. в паре с медью ($40 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$), в основном используется для технических сопротивлений, потенциометров, термопар.

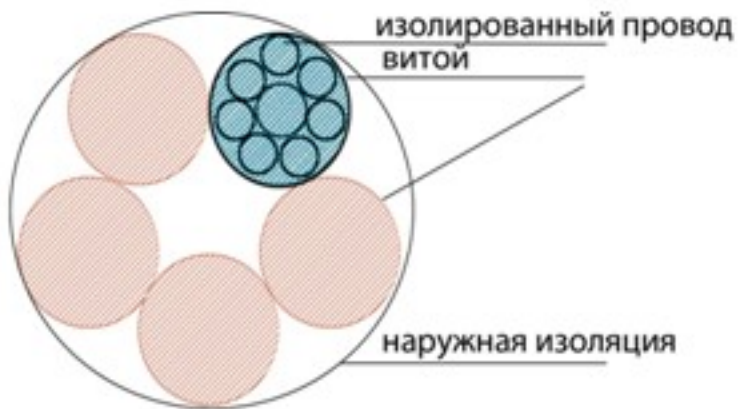
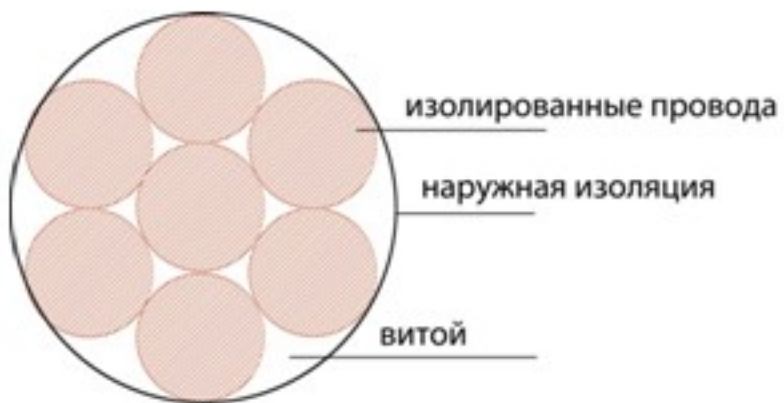
Основной недостаток сплавов на основе меди – их окисление с течением времени, что недопустимо для прецизионных потенциометров.



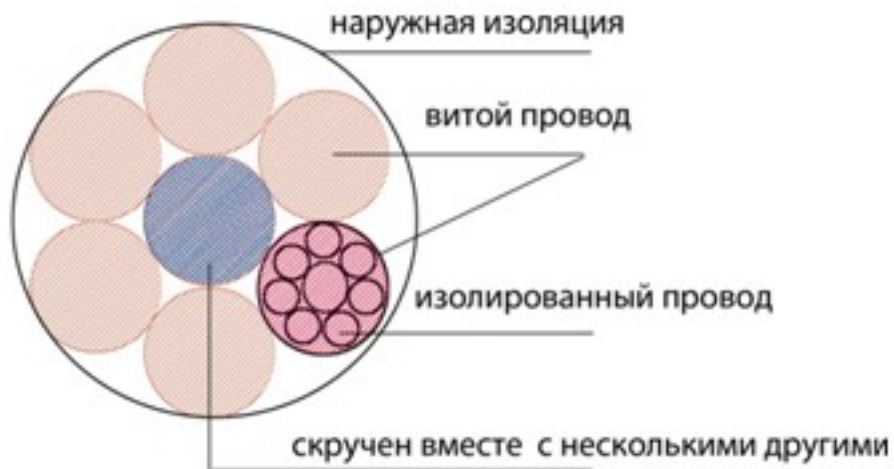
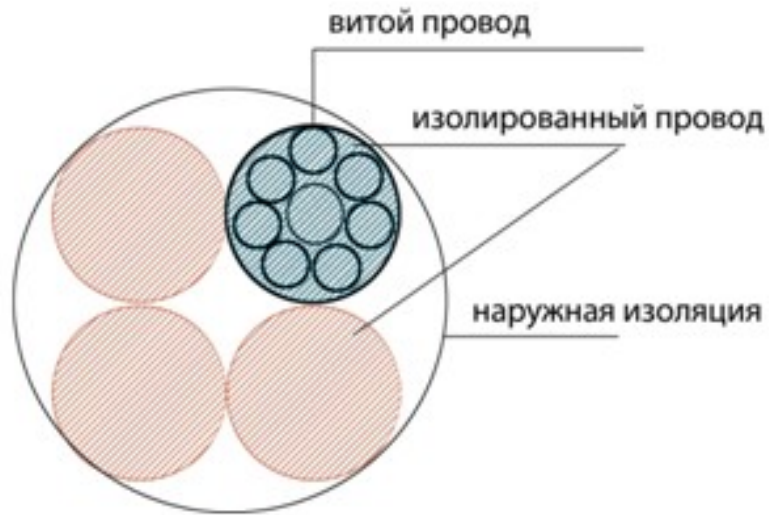
Проводниковые материалы

Для борьбы со скин-эффектом применяют проводники различного сечения: **плоские** (в виде лент), **трубчатые** (полые внутри), **наносят на поверхность проводника слой металла** с более низким удельным сопротивлением. Также с целью подавления скин-эффекта используют **литцендрат** – систему из нескольких изолированных и специальным образом переплетенных проводников

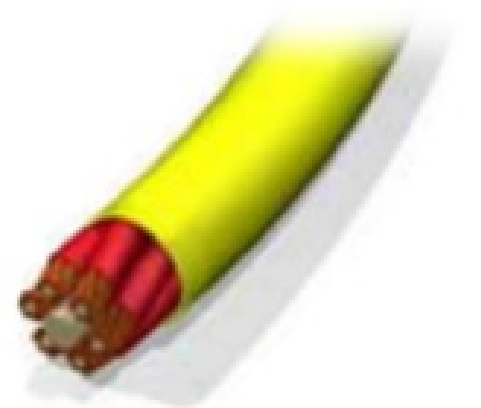
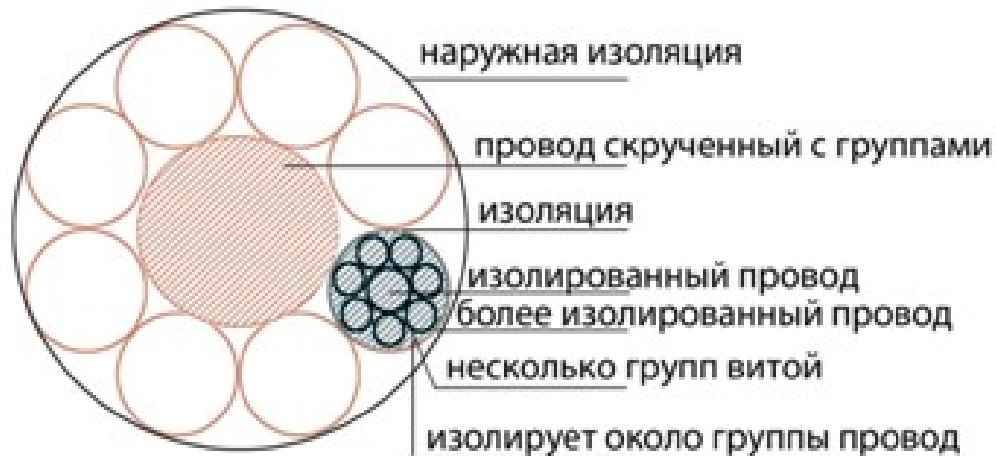
Параметры литцендрата



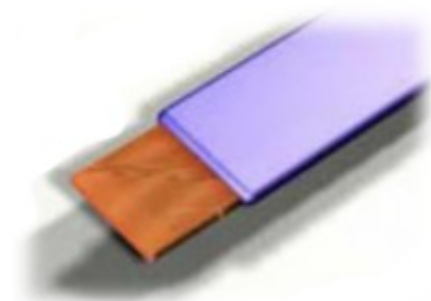
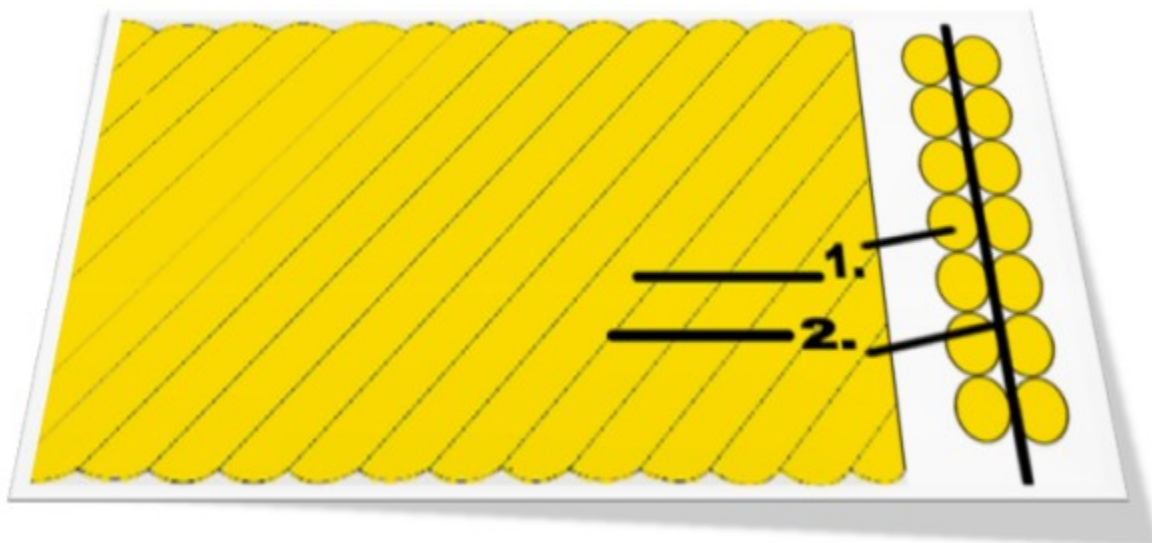
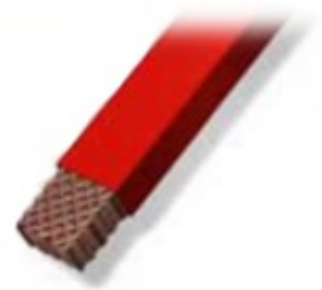
Параметры литцендрата



Параметры литцендрата

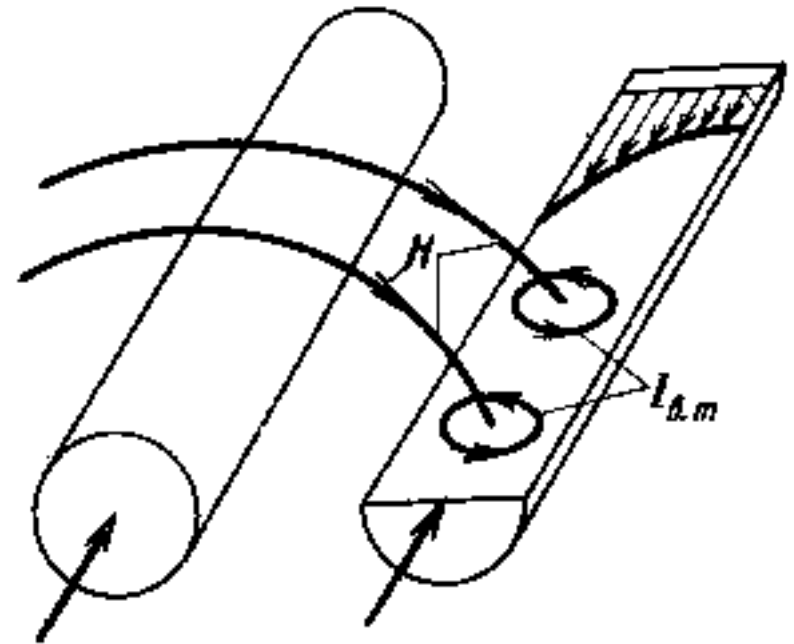


Параметры литцендрата



Эффект близости

Влияние частоты на сопротивление проводников может быть связано не только со скин-эффектом, но и с макроскопической формой проводника. Если некоторые участки проводника близко расположены друг к другу, появляется возможность их взаимного влияния друг на друга посредством изменяющихся магнитных полей. Указанное явление называется **эффектом близости**.



Проводниковые материалы

Материалы высокой проводимости

К проводниковым материалам высокой проводимости принято относить материалы с величиной удельного сопротивления $\rho < 0.1$ мкОм·м



Медь

$$\rho = 0.0017 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}$$



Золото

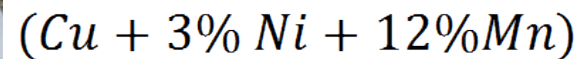
$$\rho = 0.0025 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}$$

Материалы высокого удельного сопротивления

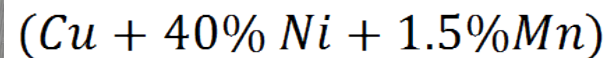
К материалам высокого удельного сопротивления относят материалы, у которых $\rho > 0.3$ мкОм·м



Манганин



Константан



Резисторы

Рези́стор (англ. **resistor**, от лат. **resisto** — сопротивляюсь) — пассивный элемент электронной цепи, предназначенный для создания в электронной цепи заданной величины активного сопротивления и для идеального резистора в любой момент времени выполняется закон Ома для участка цепи: мгновенное значение напряжения на резисторе пропорционально току проходящему через резистор —

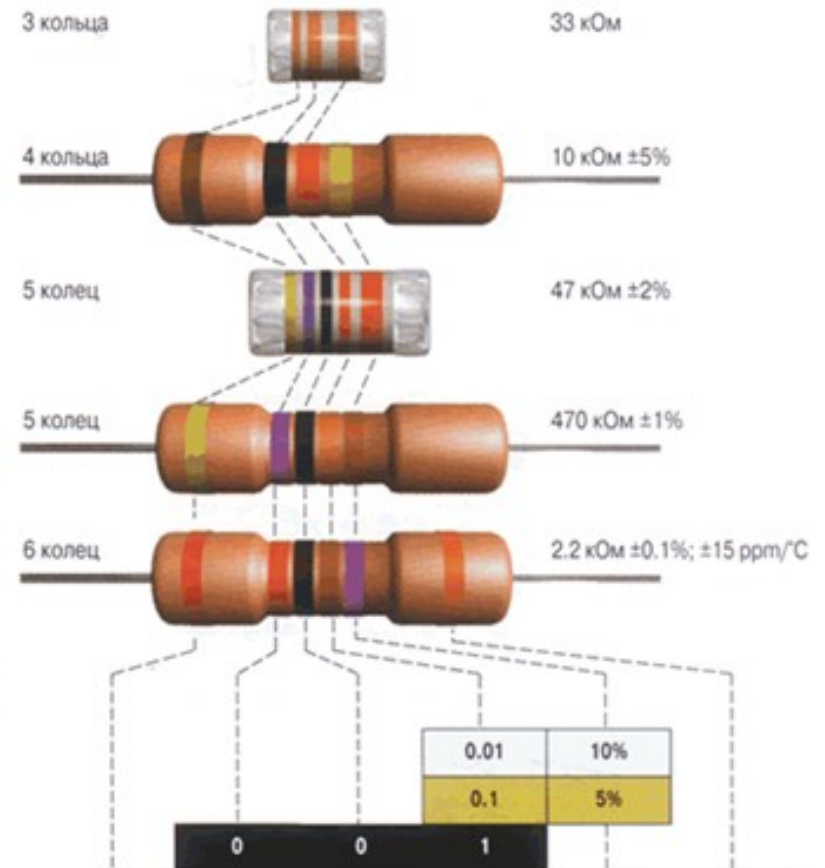
Резистор, являясь дискретным элементом электронной цепи или составной частью интегральной схемы, обеспечивает перераспределение энергии электрического тока между участками электронной цепи.



Принцип действия резисторов основан на использовании свойства материалов оказывать сопротивление протеканию электрического тока. **Особенностью резисторов является** то, что при протекании тока через резистор энергия упорядоченного движения носителей заряда превращается в тепловую энергию и рассеивается в окружающем пространстве за счет теплоотдачи и излучения.

Маркировка резисторов

Серебряный				0.01	10%	
Золотой				0.1	5%	
Черный		0	0	1		
Коричневый	1	1	1	10	1%	100
Красный	2	2	2	10^2	2%	50
Оранжевый	3	3	3	10^3		15
Желтый	4	4	4	10^4		25
Зеленый	5	5	5	10^5	0.5%	
Голубой	6	6	6	10^6	0.25%	10
Фиолетовый	7	7	7	10^7	0.1%	5
Серый	8	8	8	10^8	0.05%	
Белый	9	9	9	10^9	Допуск	1
Цвет	1-я цифра	2-я цифра	3-я цифра	Множитель		ТКС, ppm/°C

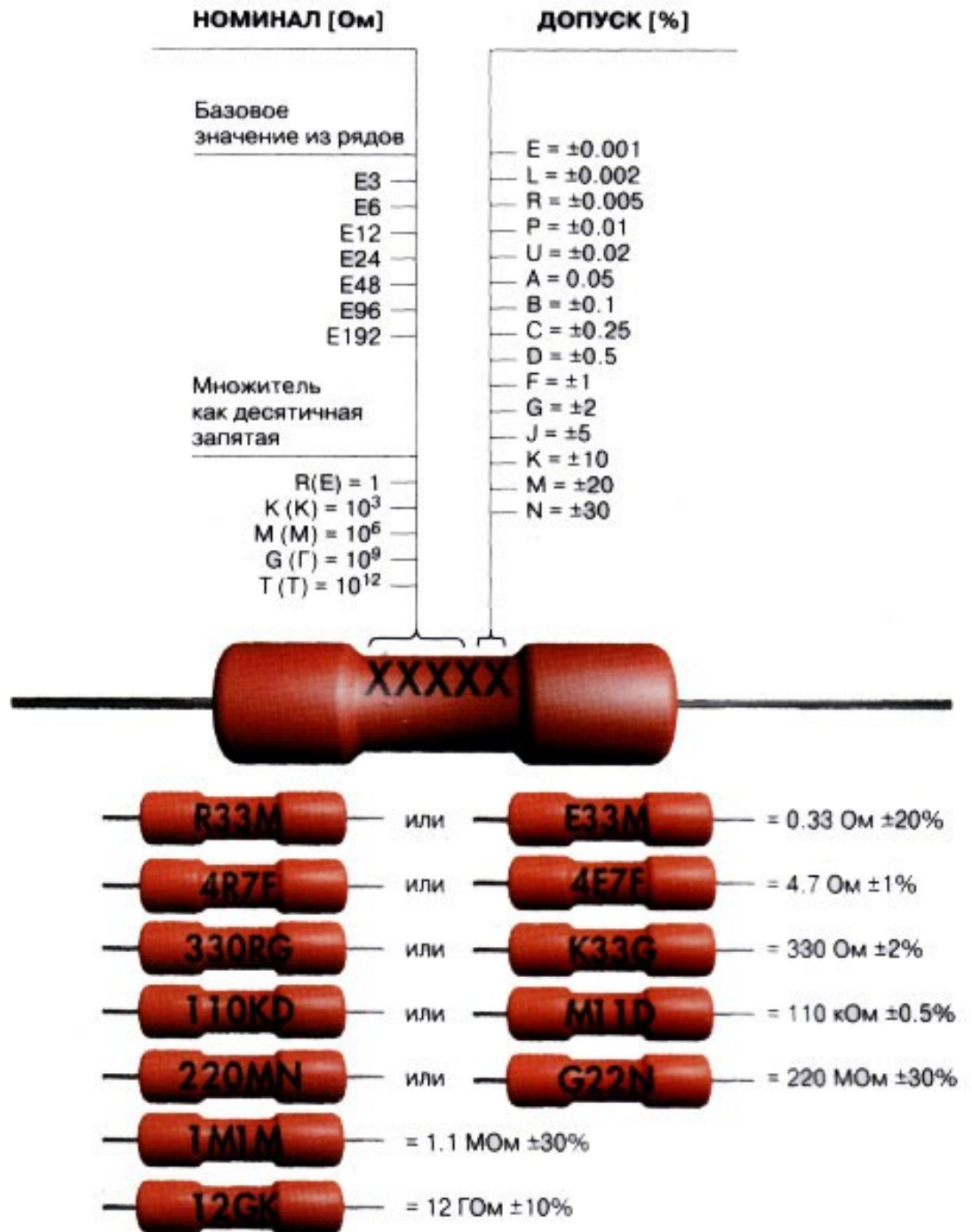


Серии резисторов специального назначения по стандартам







MIL

Серия	Наименование резистора	№ стандарта
RL	Стандартные металлопленочные резисторы (допуск $\pm 2, \pm 5$)	M I L-R-22684
RN	Металлопленочные прецизионные резисторы	M I L-R-10509
RE	Мощные проволочные резисторы с алюминиевым радиатором	M I L-R-18546
RNC	Металлопленочные резисторы с уровнем надежности «S»	M I L-R-55182
Резисторов специального RL	Металлопленочные резисторы с уровнем надежности «P»	M I L-R-39017
R		
RB	Проволочные прецизионные резисторы миниатюрные и субминиатюрные	M I L-R-93
RBR	Проволочные прецизионные резисторы с уровнем надежности «R»	M I L-R-39005
RW	Проволочные мощные резисторы для поверхностного монтажа	M I L-R-26
RNR,	Металлопленочные прецизионные резисторы с герметичным уплотнением	M I L-R-55182
RNN		
RCR	Углеродистые композиционные резисторы	M I L-R-39008
M55342	Толстопленочные кристаллы резисторов с уровнем надежности «R»	M I L-R-55342

Буквенно-цифровой код для маркировки значений сопротивления резисторов



Цветовой код для обозначения значений сопротивления резисторов

Металлопленочные резисторы-предохранители	NFR		12 кОм ±5%
Металлопленочные общего применения	SFR		12 кОм ±5%
Толстопленочные высокоомные, высоковольтные (>10 МОм; >1 кВ)	VR		2.7 МОм ±5%
Металлопленочные мощные (1 Вт/2 Вт)	PRO1/2		82 кОм ±5%
	MRS16		47 кОм ±10%
Металлопленочные прецизионные	MRS25		390 кОм ±10%; ±50 ppm/°C

Классификация резисторов

Дискретные резисторы классифицируются по назначению, виду вольт-амперной характеристики, характеру изменения сопротивления, технологии изготовления.

- По назначению дискретные резисторы делятся на резисторы общего и специального назначения.
- По виду вольт-амперной характеристики дискретные резисторы делятся на линейные резисторы и нелинейные резисторы.
- По характеру изменения сопротивления – на постоянные резисторы, переменные регулировочные резисторы и переменные подстроечные резисторы.
- По технологии изготовления резисторы классифицируют на проволочные резисторы, пленочные металлические резисторы, металлофольговые резисторы, угольные резисторы и интегральные резисторы



Классификация резисторов

Высоковольтные резисторы для компактных схем

Благодаря способности поглощать импульсные всплески энергии данная серия высоковольтных резисторов является оптимальным решением для таких приложений как: зарядка/разрядка конденсаторов, делители напряжения и цепи защиты от перенапряжений. Такие решения могут применяться в следующих областях применения: высоковольтные источники лазеры, радары, медицинское и военное оборудование.



Варисторы для монтажа на печатную плату

Благодаря компактному размеру и способностью поглощать импульсные всплески энергии данная серия SR резисторов является оптимальным решением для большинства приложений силовой электроники; в особенности для мягкого включения DC конденсаторов в импульсных источниках питания. Резисторы серии SR, способные выдерживать скачки напряжений, могут успешно применяться в таких приложениях, где необходимо обеспечить защиту от перенапряжений и разгрузку шунтирующих вентилей.



Дисковые резисторы

Благодаря возможности работать при энергиях от нескольких джоулей до мега джоулей, при частотах до нескольких мега герц, дисковые резисторы HVR могут быть использованы в самых ответственных приложениях, таких как: передача электроэнергии, импульсная мощность, AC / DC промышленные приводы, тяговый привод, поглощающая нагрузка и схемы формирования импульсов.

Классификация резисторов



Керамические резисторные сборки

Керамические углеродные резисторы предлагаются либо отдельно, отсортированными наборами, либо уже собранные в готовую сборку, для удобства монтажа.

Стандартные резисторные сборки включают следующие компоненты:

- Стекловолоконные стяжки для монтажа дисковых резисторов.
- Алюминиевые шестигранные концевые упоры, с фиксацией штифтом на обоих концах.
- Дисковые пружины, обеспечивающие сдвигающее усилие (≥ 350 кг).
- Изолированные стойки для упрощения установки.
- Изогнутые алюминиевые контактные выводы.

Классификация резисторов



Резисторы с алюминиевым охладителем

Argol разработаны для применений, требующих высокого рассеяния мощности в ограниченном пространстве. Проволочные резисторы серии HS в алюминиевых корпусах для установки на радиатор характеризуются высокими уровнями изоляции и минимальным тепловым сопротивлением элемента, доступны в номиналах от R005 до 100K с допусками до 1%, с рассеянием мощности до 300 Вт.

Power Range	5,5W - 300W
Dielectric Strength	1000VAC - 5000VAC
Working Voltage	160V - 2500V
Cooling media	Heat Sink / Air



Water cooled resistor

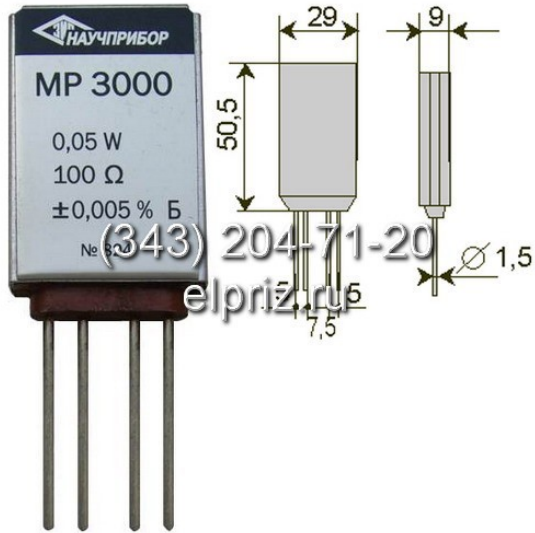
100W-500KW

1Ω-10K

±1%, ±5%, ±10%

Резисторы с водяным охлаждением

Классификация резисторов



MR3000M - Особостабильные резисторы

Особостабильные прецизионные резисторы с регулируемым экстремумом температурной зависимости для комплектования однозначных и многозначных мер сопротивления класса от 0,002 до 0,00001.

Диапазон от 1 Ом до 100kОм.

Годовая нестабильность до $\pm 0,0001\%$,

ТКС не более $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ в точке экстремума.

Номинальное значение сопротивления, Ом	Допускаемое отклонение от номинального значения, %	ТКС 10^{-6} , $1/^\circ\text{C}$	Номинальная мощность рассеивания, Вт	Нестабильность, % за год
от 1 до 100000	0,005	1-3,5	0,05	0,0005
	0,01	1-5	0,125	0,001
	0,1	± 10	0,5	0,002

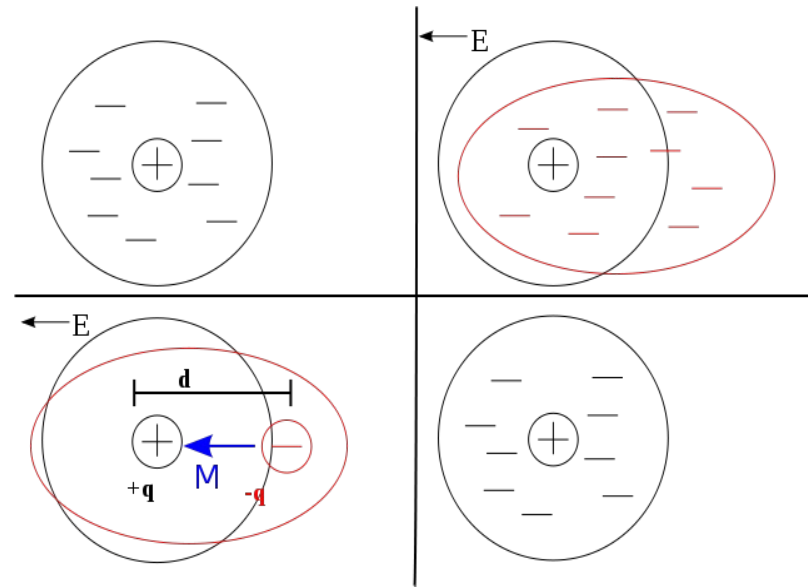


Прецизионный резистор, SMD 0.022 Ω 5 W $\pm 1\%$

Диэлектрики

Диэлектрик (изолятор) — вещество, плохо проводящее или совсем не проводящее электрический ток. Концентрация свободных носителей заряда в диэлектрике не превышает 10^8 см⁻³. Основное свойство диэлектрика состоит в способности поляризоваться во внешнем электрическом поле. С точки зрения зонной теории твёрдого тела диэлектрик — вещество с шириной запрещённой зоны больше 3 эВ.

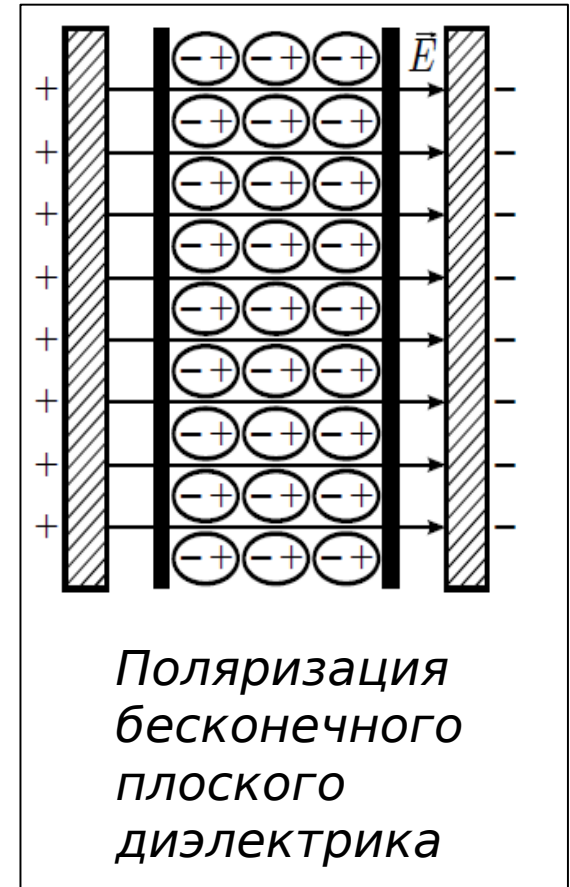
По выполняемым свойствам диэлектрики делятся на пассивные диэлектрики и активные диэлектрики. По электрическому строению молекул различают неполярные и полярные диэлектрики. Из разнообразных физических свойств — тепловых, электрических, механических — в физике диэлектриков изучаются главным образом электрические свойства. При этом к диэлектрикам относят такие вещества, в которых: может существовать электрическое поле; проводимость при нормальных условиях обычно ниже, чем 10^{-10} Ом⁻¹м; ширина запрещенной зоны больше (2 — 3)эВ (для кристаллов); токи электрического смещения превышают токи электропроводности.



Поляризация

Поляризацией называют состояние диэлектрика, характеризующееся наличием электрического момента у любого элемента его объема. Различают поляризацию, возникающую под действием внешнего электрического поля, и спонтанную (самопроизвольную), существующую в отсутствие поля. В некоторых случаях поляризация диэлектриков появляется под действием механических напряжений.

Способность различных материалов поляризоваться в электрическом поле характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = C / C_0$, где C — емкость конденсатора с данным диэлектриком, C_0 — емкость того же конденсатора в вакууме (т. е. геометрическая емкость между электродами).



Виды поляризации

- **Электронная** — смещение электронных оболочек атомов под действием внешнего электрического поля. Самая быстрая поляризация (до 10–15 с). Не связана с потерями.
- **Ионная** — смещение узлов кристаллической структуры под действием внешнего электрического поля, причем смещение на величину, меньшую, чем величина постоянной решетки. Время протекания 10–13 с, без потерь.
- **Дипольная** (Ориентационная) — протекает с потерями на преодоление сил связи и внутреннего трения. Связана с ориентацией диполей во внешнем электрическом поле.
- **Электронно-релаксационная** — ориентация дефектных электронов во внешнем электрическом поле.
- **Ионно-релаксационная** — смещение ионов, слабо закрепленных в узлах кристаллической структуры.
- **Структурная** — ориентация примесей и неоднородных макроскопических включений в диэлектрике. Самый медленный тип.

Виды

поляризации

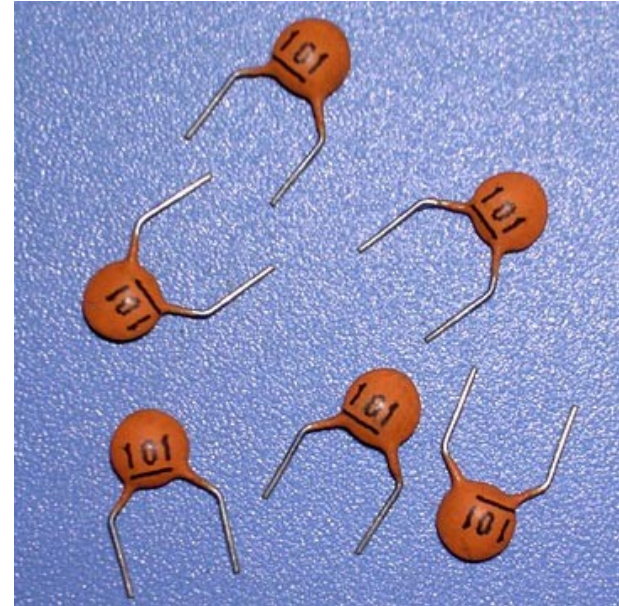
- **Самопроизвольная (спонтанная)** — благодаря этому типу поляризации у диэлектриков, у которых он наблюдается, поляризация проявляет существенно нелинейные свойства даже при малых значениях внешнего поля, наблюдается явление гистерезиса. Такие диэлектрики (сегнетоэлектрики) отличаются очень высокими значениями диэлектрической проницаемости (от 900 до 7500 у некоторых видов конденсаторной керамики). Введение спонтанной поляризации, как правило, увеличивает тангенс угла потерь материала (до 10⁻²)
- **Резонансная** — ориентация частиц, собственные частоты которых совпадают с частотами внешнего электрического поля.
- **Миграционная поляризация** обусловлена наличием в материале слоев с различной проводимостью, образованию объемных зарядов, особенно при высоких градиентах напряжения, имеет большие потери и является поляризацией замедленного действия.
- **Поляризация диэлектриков (за исключением резонансной)** максимальна в статических электрических полях. В переменных полях, в связи с наличием инерции электронов, ионов и электрических диполей, вектор электрической поляризации зависит от частоты. В связи с этим вводится понятие дисперсии диэлектрической проницаемости.

Электропроводность диэлектриков

- **Электропроводность** – способность вещества проводить электрический ток, а также сам процесс протекания электрического тока обусловленного упорядоченным движением свободных электрических зарядов

Керамика

Керамика – материал, получаемый спеканием неорганических солей с различными минералами или оксидами металлов. Исходные компоненты могут быть не пластичными (кристаллообразующими) и пластичными. Кристаллообразующими компонентами являются неорганические соли (хлористые алюминий, железо, магний и др.), минералы (кварц, глинозем, тальк), оксиды металлов (циркония, бария, кальция, магния, титана и др.) и карбонаты. Пластичными – различные глинистые материалы, облегчающие оформление заготовок и деталей. Керамика широко применяется для изготовления элементов корпусов, изоляторов, деталей полупроводниковых приборов. В производстве корпусов используют алюмооксидную, минолундовую, стеатитовую, кордиеритовую и



Керамика

Алюмооксидная керамика содержит от 90 до 97 % Al_2O_3 . Температура плавления алюмооксидной керамики 2050 °С. Удельное сопротивление – от 10^{12} до 10^{16} Ом·см. Диэлектрическая проницаемость при 20 °С и частоте 106 Гц равна 8...12. Тангенс угла диэлектрических потерь составляет от 0,001 до 0,0003. Электрическая прочность от 45 до 60 кВ/мм. Стеатитовая керамика получила свое название по основному компоненту – тальку (стеатиту), имеющему состав от $3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$ до $4MgO \cdot 5SiO_2 \cdot H_2O$. Стеатитовую керамику используют при изготовлении корпусов интегральных микросхем, а также в качестве изоляционного высокочастотного материала (проходные изоляторы, подложки, изолирующие кольца). Характерной особенностью стеатитовой керамики является ее высокая механическая прочность и малые диэлектрические потери. В производстве используют стеатитовую керамику СПК-2, СПК-5, ТК-21, ТКП, СК-1 и СНЦ, электрофизические свойства которой зависят от состава исходной шихты и режима отжига.

Состав алюмооксидной керамики

Марка	Компоненты керамики, %							
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O
22X	94,4	2,76	0,45	2,39	–	–	–	–
22XC	94,4	2,76	0,49	2,35	–	–	–	–
ВГ-IV	95,3	3,30	–	–	0,30	1,2	–	–
М-7	94,0	4,00	–	–	2,00	–	0,05	0,05

Состав стеатитовой керамики

Марка	Компоненты керамики, %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	BaO	Na ₂ O	K ₂ O	ZnO
СПК-2	62,15	7,64	0,66	1,96	26,78	–	0,56	0,25	–
СПК-5	58,0	6,91	0,84	2,22	26,01	–	0,25	0,46	5,31
ТК-21	55,12	6,07	0,66	6,39	27,30	–	0,11	0,35	–
ТКП	66,58	6,18	0,76	0,33	25,68	–	0,12	0,28	–
СК-1	54,22	0,99	0,76	–	28,60	15,4	0,01	0,02	–
СНЦ	53,0	1,37	0,30	0,16	27,70	11,4	0,04	0,08	5,35

Конденсаторы

Конденсáтор (от лат. condensare — «уплотнять», «сгущать») — двухполюсник с определённым значением ёмкости и малой омической проводимостью; устройство для накопления заряда и энергии электрического поля. Конденсатор является пассивным электронным компонентом. Обычно состоит из двух электродов в форме пластин (называемых обкладками), разделённых диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами обкладок.

Конденсаторы являются одним из самых распространённых компонентов электронной техники, а мировое производство конденсаторов представляет собой мощную индустрию с ежегодным приростом производства около 30%. Происходят и серьёзные качественные изменения в номенклатуре конденсаторов, связанные с внедрением новых материалов и технологий, новых конструктивных решений, отражающих требования и тенденции развития электронной техники.



Свойства конденсатора

Основным параметром конденсатора является его электрическая емкость, которая служит коэффициентом пропорциональности между зарядом q конденсатора и напряжением U на его электродах –

Электрическая емкость конденсатора зависит от размеров и конфигурации конденсатора, а также от диэлектрической среды между электродами конденсатора и для плоского конденсатора определяется выражением:

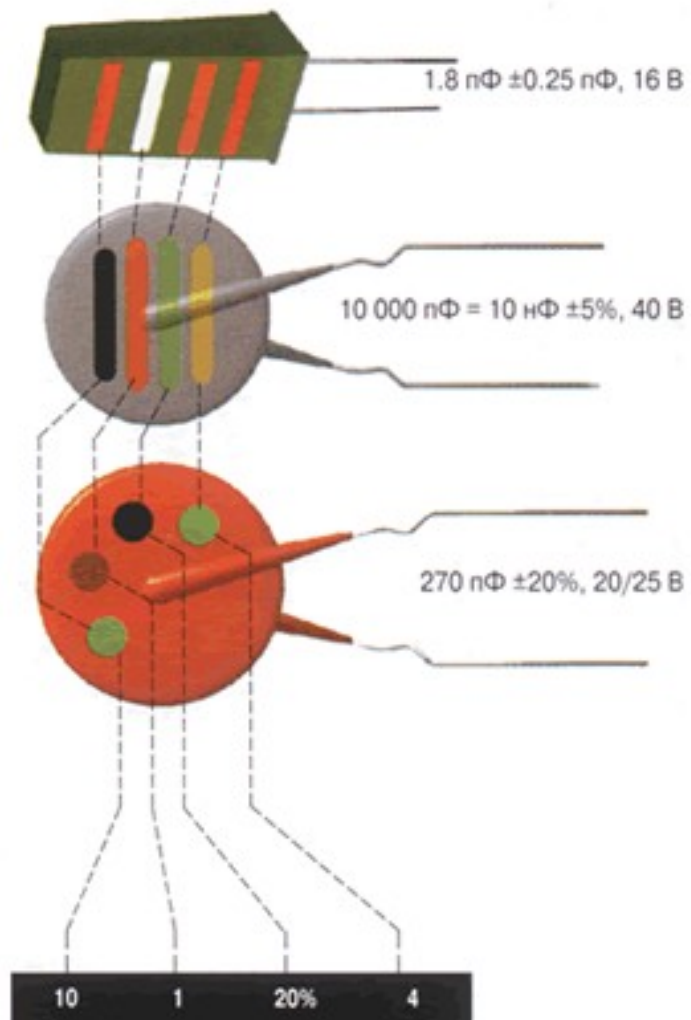
$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot S}{d}$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная; ϵ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; S – площадь электродов; d – расстояние между электродами.

Цветовой код для маркировки конденсаторов

Черный	10	1	20%	4
Коричневый	12	10	1%	6.3
Красный	15	100	2%	10
Оранжевый	18	10^3	0.25 нФ	16
Желтый	22	10^4	0.5 нФ	40
Зеленый	27	10^5	5%	20/25
Голубой	33	10^6	1%	30/32
Фиолетовый	39	10^7	-20...+50%	
Серый	47	0.01	-20...+80%	3.2
Белый	56	0.1	10%	63
Серебряный	68			2.5
Золотой	82		5%	1.6

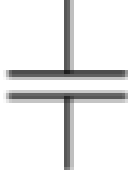
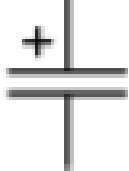
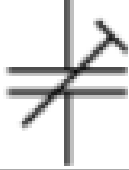

Цвет 1-я и 2-я Множитель Допуск Напряжение
 цифры
 нФ



Примеры буквенно-цифровых кодов для маркировки значений емкости

Значения емкости	Маркировочный код	Значения емкости	Маркировочный код	Значения емкости	Маркировочный код
0,1 пФ	p10	10 нФ	10n	15 мкФ	15μ
0,15 пФ	p15	33,2 нФ	33n2	1 мФ	1m0
1 пФ	1p0	100 нФ	100n	1,5 мФ	1m5
10 пФ	10p	1 мкФ	1μ0	15 мФ	15m
1 нФ	1n0	1,5 мкФ	1μ5	59,0 мФ	59m

Условные графические обозначения конденсаторов на схемах должны соответствовать ГОСТ 2.728-74 либо международному стандарту IEEE 315—1975:

Обозначение по ГОСТ 2.728-74	Описание
	Конденсатор постоянной ёмкости
	Поляризованный конденсатор
	Подстроечный конденсатор переменной ёмкости
	Варикап

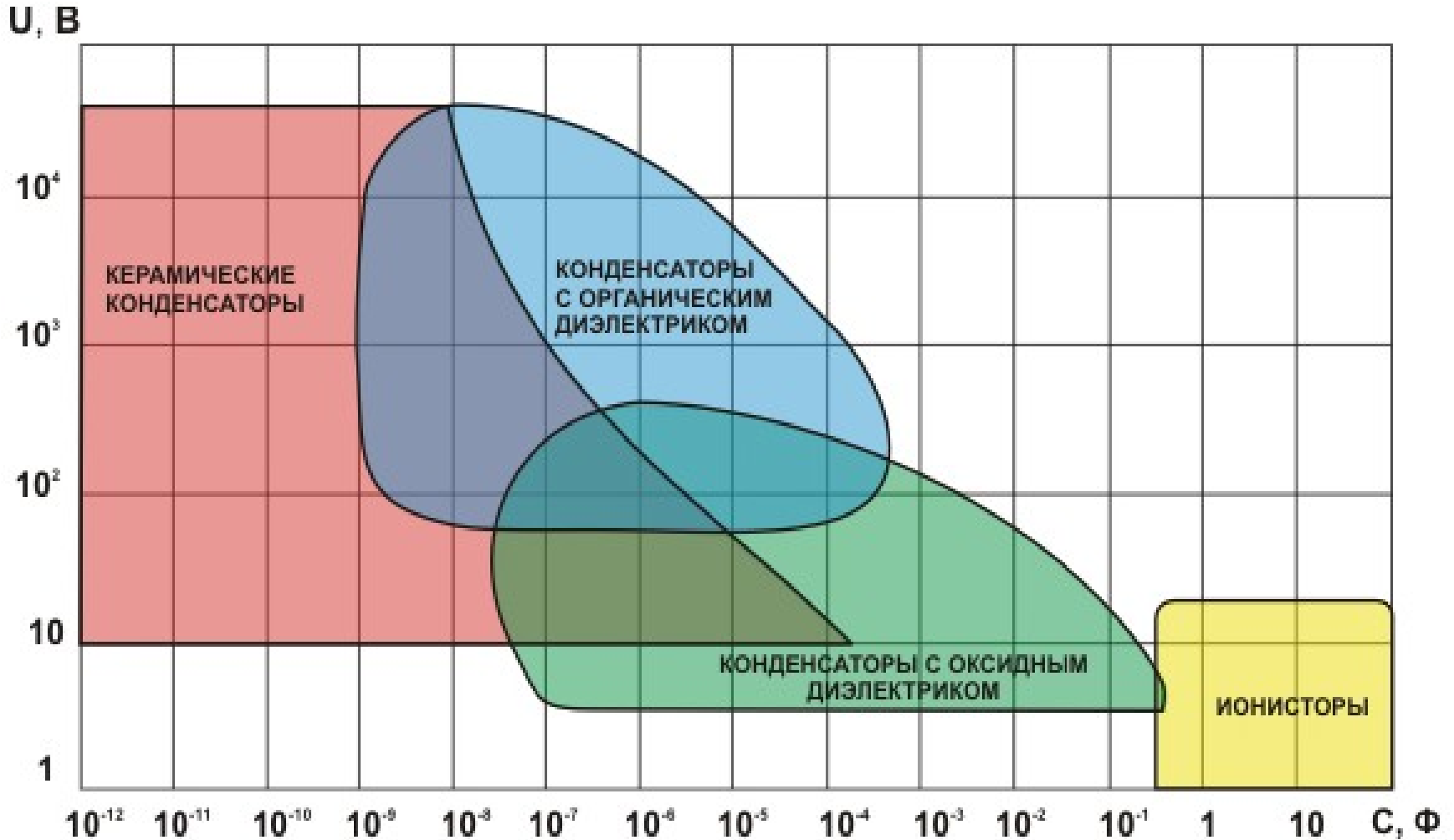
Классификация конденсаторов

- Основная классификация конденсаторов проводится по типу диэлектрика в конденсаторе. Тип диэлектрика определяет основные электрические параметры конденсаторов: сопротивление изоляции, стабильность ёмкости, величину потерь и др.
- По виду диэлектрика различают:
 - **Конденсаторы вакуумные** (обкладки без диэлектрика находятся в вакууме).
 - **Конденсаторы с газообразным диэлектриком.**
 - **Конденсаторы с жидким диэлектриком.**
 - **Конденсаторы с твёрдым неорганическим диэлектриком:** стеклянные (стеклоэмалевые, стеклокерамические, стеклоплёночные), слюдяные, керамические, тонкослойные из неорганических плёнок.
 - **Конденсаторы с твёрдым органическим диэлектриком:** бумажные, металlobумажные, плёночные, комбинированные — бумажноплёночные, тонкослойные из органических синтетических плёнок.
 - **Электролитические и оксидно-полупроводниковые** конденсаторы. Такие конденсаторы отличаются от всех прочих типов прежде всего своей огромной удельной ёмкостью. В качестве диэлектрика используется оксидный слой на металлическом аноде. Вторая обкладка (катод) — это или электролит (в электролитических конденсаторах), или слой полупроводника (в оксидно-полупроводниковых), нанесённый непосредственно на оксидный слой. Анод изготавливается, в зависимости от типа конденсатора, из алюминиевой, ниобиевой или танталовой фольги или спечённого порошка.

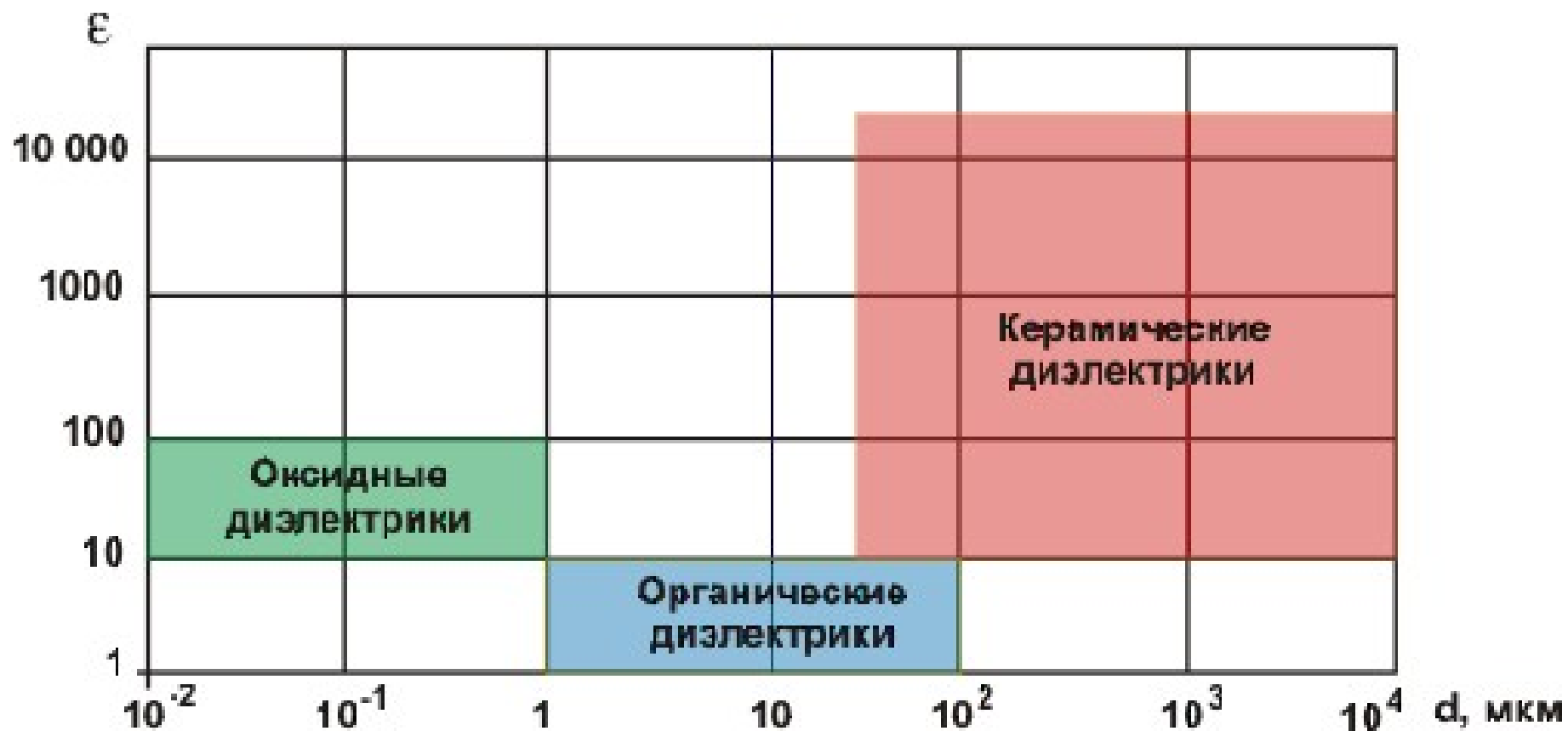
Классификация конденсаторов по форме

Название	Ёмкость	Электрическое поле	Схема
Плоский конденсатор	$C = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$	$E = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon_r A}$	
Цилиндрический конденсатор	$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \frac{l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$	$E(r) = \frac{Q}{2\pi r l \epsilon_0 \epsilon_r}$	
Сферический конденсатор	$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)^{-1}$	$E(r) = \frac{Q}{4\pi r^2 \epsilon_0 \epsilon_r}$	
Сфера	$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r R_1$		

Наиболее характерные области сочетания номинальных емкостей и напряжений различных видов конденсаторов



Значения диэлектрической проницаемости и толщины диэлектриков для оксидных, органических и керамических конденсаторов



Классификация конденсаторов

Керамические конденсаторы отличаются наиболее широким диапазоном номинальных напряжений и подразделяются на *НИЗКОВОЛЬТНЫЕ* и *ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ*.

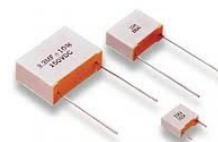
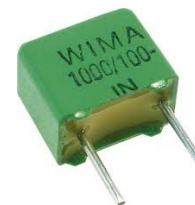
Конденсаторы с оксидным диэлектриком, применяемые в современной электронной технике, подразделяются:

- По материалу основы оксидного слоя — *алюминиевые, танталовые, ниобиевые*;
- По конструкции анода — *фольговые* и *объемно пористые*;
- По материалу катода — *оксидно-электролитические* и *оксидно-полупроводниковые*;

Конденсаторы с органическим диэлектриком

По типу диэлектрика подразделяются на:

- Полиэтилентерефталатные
- Полипропиленовые
- Полиэстровые
- Комбинированные



Ионистор

Ионистор (суперконденсатор, ультраконденсатор, англ. EDLC, Electric double-layer capacitor) — конденсатор с органическим или неорганическим электролитом, «обкладками» в котором служит двойной электрический слой на границе раздела электрода и электролита.

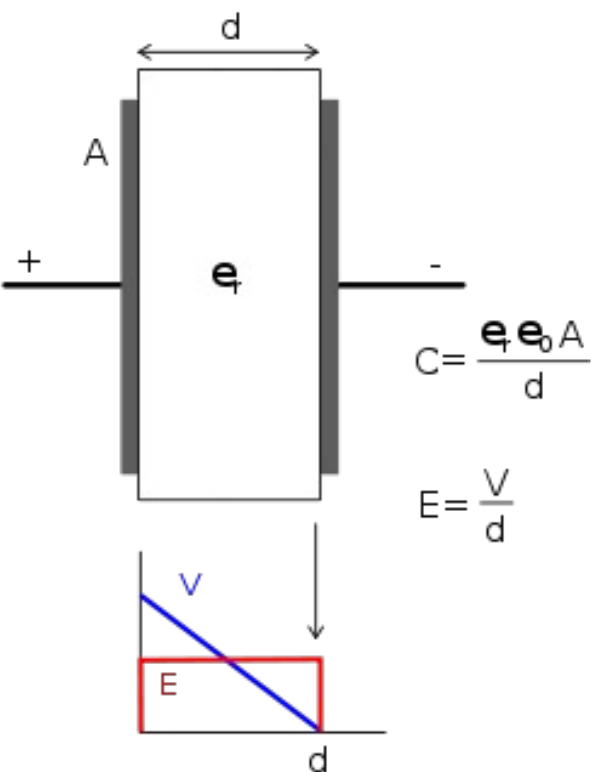
В ионисторах энергия накапливается в процессе зарядки за счет поляризации двойных электрических слоев (ДЭС) на границах раздела "анод-электролит" и "катод-электролит"

В связи с тем, что толщина двойного электрического слоя (то есть расстояние между «обкладками» конденсатора) крайне мала, запасённая ионистором энергия выше по сравнению с обычными конденсаторами того же размера. К тому же, использование двойного электрического слоя вместо обычного диэлектрика позволяет намного увеличить площадь поверхности электрода. Типичная ёмкость ионистора — несколько фарад, при номинальном напряжении 2—10 вольт.

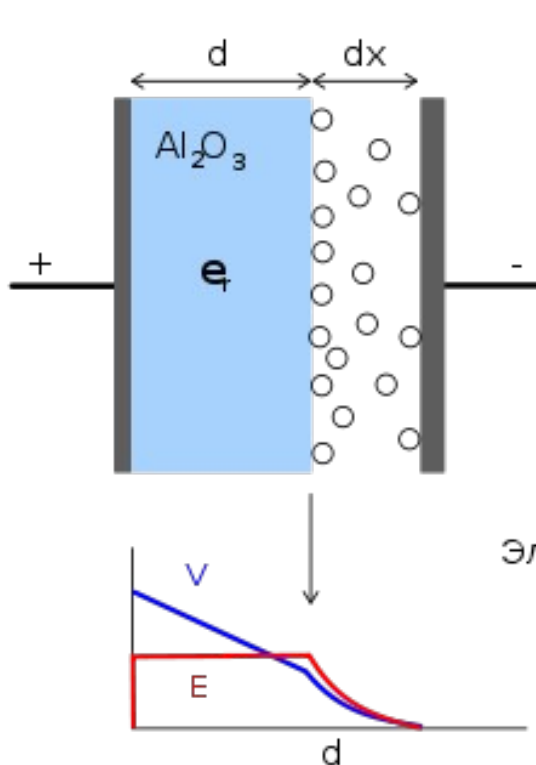


Сравнение конструктивных схем трёх конденсаторов. Слева: «обычный» конденсатор, в середине: электролитический, справа: ионистор

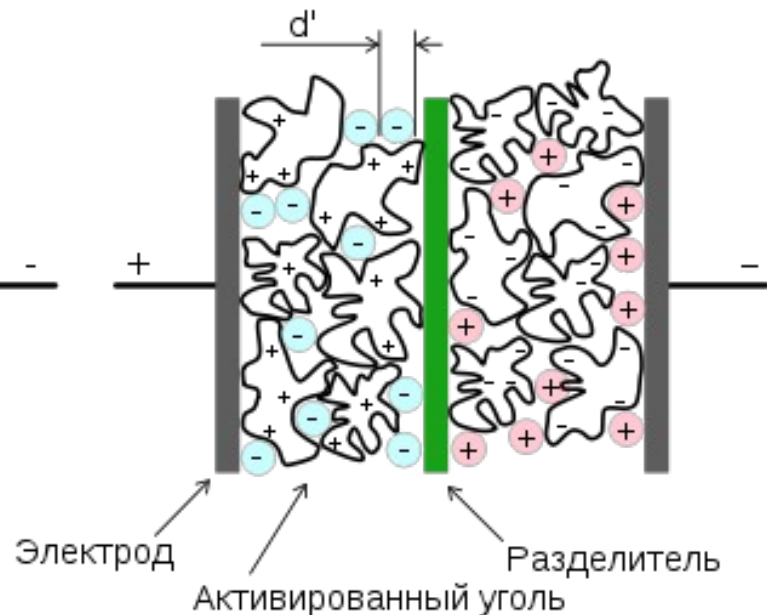
Электростатический



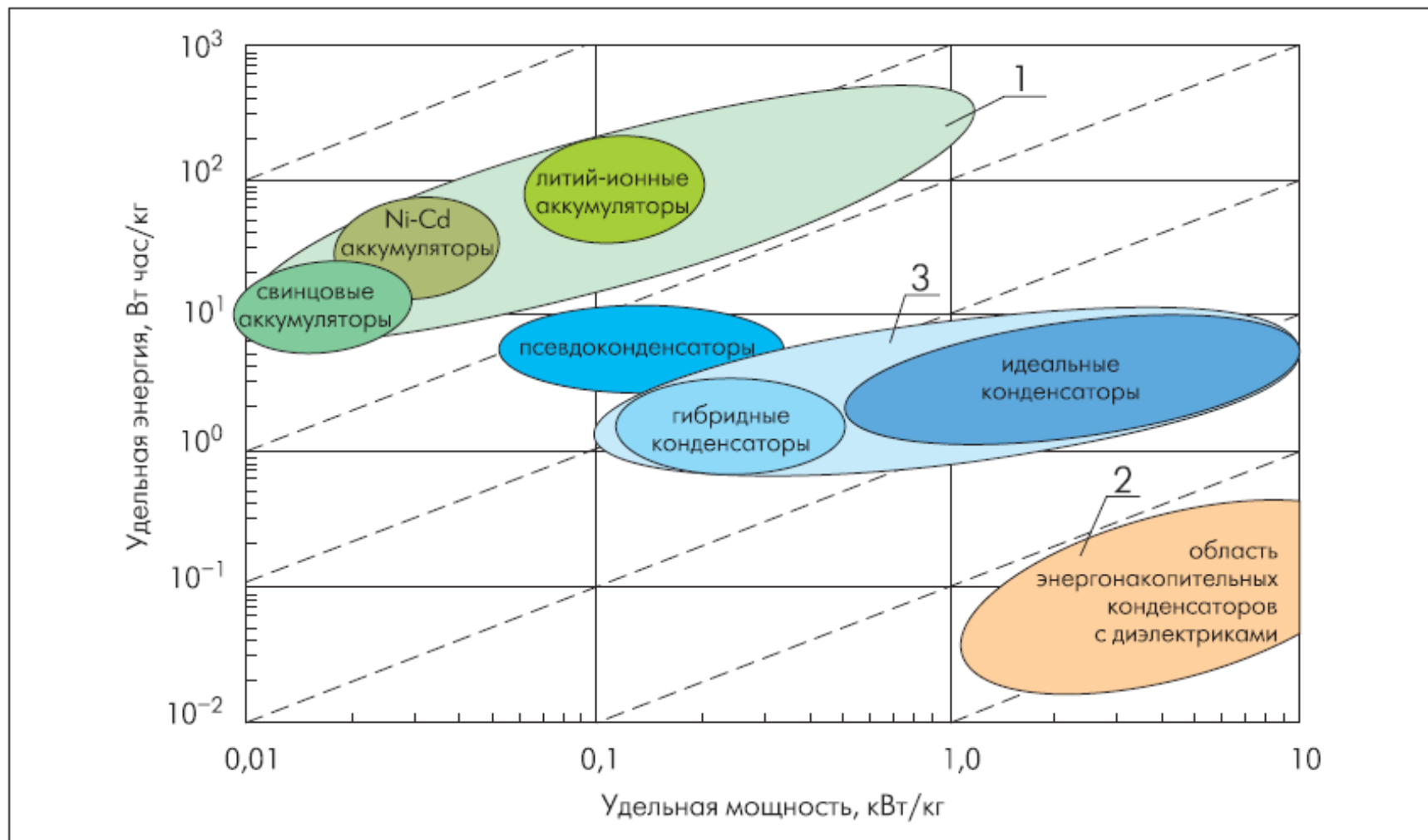
Электролитический



С двойным электрическим слоем



Сравнительные характеристики электрохимических накопителей электрической энергии



- 1 — область перспективного развития перезаряжаемых химических источников тока (аккумуляторов);
- 2 — область перспективного развития энергонакопительных конденсаторов с диэлектриками;
- 3 — область перспективного развития конденсаторов с двойным электрическим слоем

Применение конденсаторов

- Конденсаторы находят применение практически во всех областях электротехники.
- Конденсаторы (совместно с катушками индуктивности и/или резисторами) используются для построения различных цепей с частотно-зависимыми свойствами, в частности, фильтров, цепей обратной связи, колебательных контуров и т. п.
- При быстром разряде конденсатора можно получить импульс большой мощности, например, в фотовспышках, электромагнитных ускорителях, импульсных лазерах с оптической накачкой, генераторах Маркса, (ГИН; ГИТ), генераторах Кокрофта-Уолтона и т. п.

Применение конденсаторов

- Так как конденсатор способен длительное время сохранять заряд, то его можно использовать в качестве элемента памяти или устройства хранения электрической энергии.
- В промышленной электротехнике конденсаторы используются для компенсации реактивной мощности и в фильтрах высших гармоник.
- Конденсаторы способны накапливать большой заряд и создавать большую напряжённость на обкладках, которая используется для различных целей, например, для ускорения заряженных частиц или для создания кратковременных мощных электрических разрядов

Активные диэлектрики и элементы функциональной электроники

Пьезоэлектрический эффект —

эффект возникновения поляризации диэлектрика под действием механических напряжений (прямой пьезоэлектрический эффект).

Существует и обратный пьезоэлектрический эффект — возникновение механических

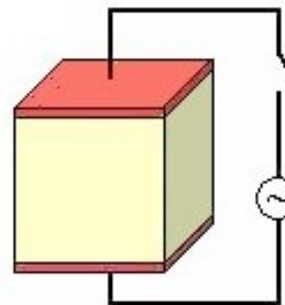
деформаций под обратным пьезоэлектрическим эффектом

наблюдается в одних и тех же кристаллах — пьезоэлектриках.

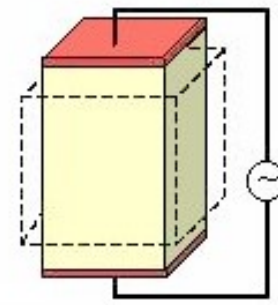
Прямой эффект открыт братьями Жаком и Пьером Кюри в 1880 г.

Обратный эффект был предугадан в 1881 г. Липпманом на основе термодинамических соображений и в том же году экспериментально подтверждён братьями Кюри.

Пьезоэффект нельзя путать с электрострикцией. В отличие от электрострикции прямой пьезоэффект наблюдается только в кристаллах без центра симметрии (из 32 точечных групп кристаллов таких 21).



В сети нет электрического тока

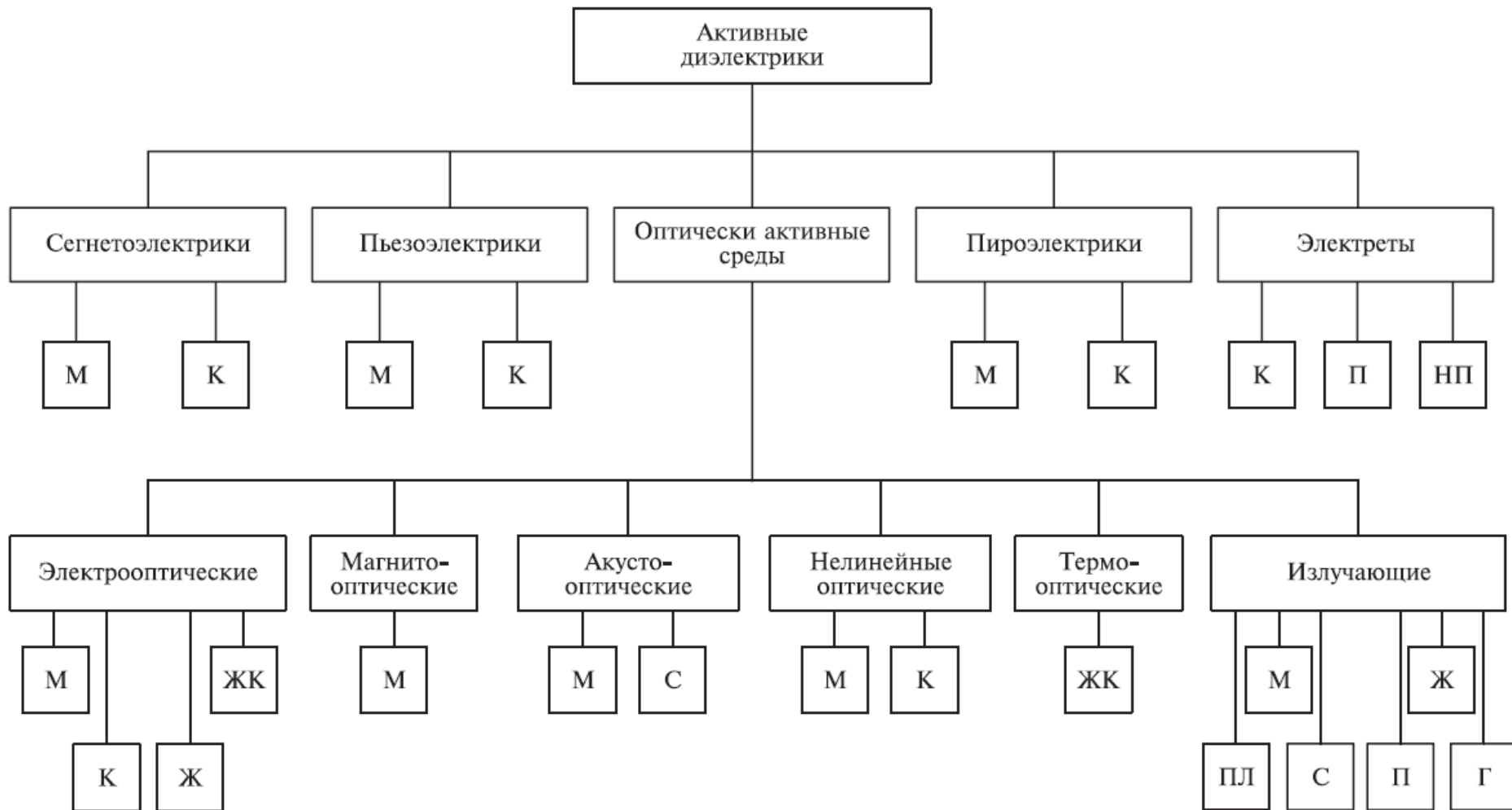


В сеть есть электрический ток

Основные эффекты в активных диэлектриках

Воздействие	Отклик				
	Электрический	Магнитный	Механический	Тепловой	Изменение оптических свойств
Электрическое поле	Поляризация, электрический ток	Электро-магнитный эффект	Обратный пьезоэффект	Электро-калорический эффект	Электро-оптический эффект
Магнитное поле	Магнито-электрический эффект	Намагничивание	Магнито-стрикция	Магнито-калорический эффект	Магнито-оптический эффект
Механическое напряжение	Прямой пьезоэффект	Пьезо-магнитный эффект	Деформация	Упруго-тепловой эффект	Фотоупругий эффект
Изменение теплоты	Пиро-электрический эффект	Термо-магнитный эффект	Термическое расширение	Теплоемкость	Термо-оптический эффект
Свет	Фото-вольтаический эффект	Фото-магнитный эффект	Фотострикция	Поглощение света	Преломление и отражение

Классификация активных диэлектриков



М - монокристаллы; К - керамика; С - стекла; П - полимеры; НП - неорганические пленки; Ж - жидкости; ЖК - жидкие кристаллы; Г - газы; ПЛ- порошковые люминофоры

Электрострикция

Электрострикция — эффект изменения линейных размеров вещества при приложении к нему электрического поля. Наблюдается абсолютно во всех веществах (в отличие от пьезоэффекта, который существует лишь в кристаллах с определённой симметрией).

Связь между деформацией и электрическим полем является квадратичной. Линейная связь между деформацией и электрическим полем наблюдается в пьезоэлектриках.

Наиболее высокие значения электрострикции наблюдаются в веществах, получивших название сегнетоэлектрические релаксоры.

Формально, электрострикционный коэффициент — это тензор четвёртого ранга (Q_{ijkl}), зависящий от механического напряжения (тензор второго ранга x_{ij}) и поляризации (тензоры первого ранга P_k, P_l).

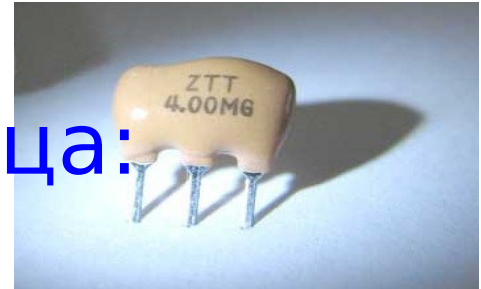
Пьезоэлектрические и электрострикционные материалы

Пьезоэлектрики — диэлектрики, в которых наблюдается пьезоэффект, то есть те, которые могут либо под действием деформации индуцировать электрический заряд на своей поверхности (прямой пьезоэффект), либо под влиянием внешнего электрического поля деформироваться (обратный пьезоэффект). Оба эффекта открыты братьями Жаком и Пьером Кюри в 1880—1881 гг.

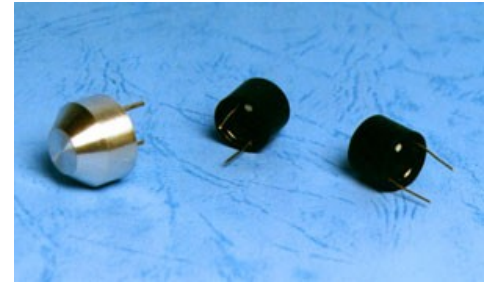


Пьезоэлектрики широко используются в современной технике как датчики давления, пьезоэлектрические детонаторы, источники звука огромной мощности, миниатюрные трансформаторы, кварцевые резонаторы для высокостабильных генераторов частоты, пьезокерамические фильтры, ультразвуковые линии задержки и др. Наиболее широкое применение в этих целях кроме кристаллического кварца получила поляризованная пьезокерамика, изготовленная из поликристаллических сегнетоэлектриков, например, из цирконата-титаната свинца.

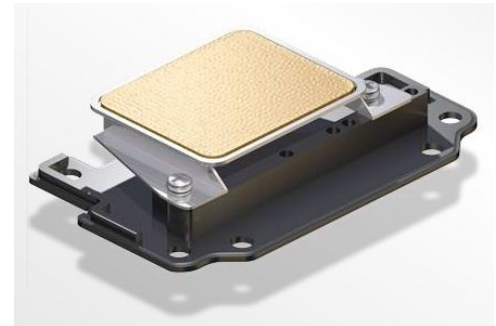
Цирконат-титанат свинца:



Пьезокерамика:



Сегнетоэлектрик:



Пироэлектрики

Пироэлектричество — явление возникновения электрического поля в кристаллах при изменении их температуры. Первое упоминание о пироэлектрическом эффекте содержится в записках Теофрастуса, датированных 314 г. до н. э., который заметил, что нагретые кристаллы турмалина притягивают к себе соломинки и частички пепла. Свойства турмалина были открыты вновь в 1707 году Иоганном Георгом Шмидтом. Связь явления пироэлектричества с электрическими явлениями было доказано Эпинусом в 1756 году.

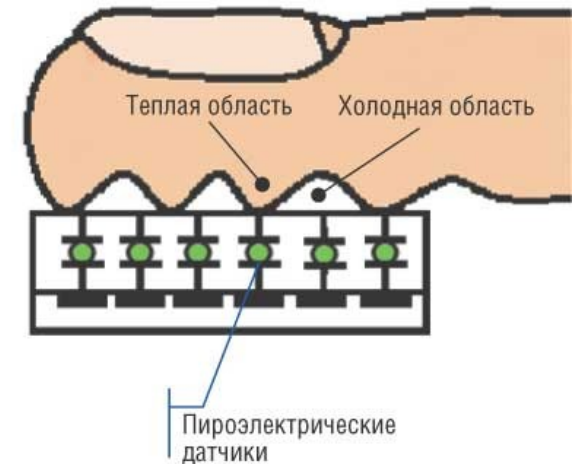
Пироэлектрики (от др. греч. πῦρ — огонь) — кристаллические диэлектрики, обладающие спонтанной (самопроизвольной) поляризацией, то есть поляризацией в отсутствии внешних воздействий

Пироэлектрики

Явление:

Обычно спонтанная поляризация пироэлектриков незаметна, так как электрическое поле, создаваемое ею, компенсируется полем свободных электрических зарядов, которые «натекают» на поверхность из его объёма и из окружающего воздуха. При изменении температуры величина спонтанной поляризации изменяется, что вызывает появление электрического поля, которое можно наблюдать, пока свободные заряды не успеют его скомпенсировать. Это явление называется пироэлектрическим эффектом.

Изменение спонтанной поляризации и появление электрического поля в пироэлектриках может происходить не только при изменении температуры, но и при деформировании. Таким образом, все пироэлектрики являются пьезоэлектриками, но не все пьезоэлектрики обладают пироэлектрическим эффектом. Ниже точки Кюри пироэлектрики являются сегнетоэлектриками.



Электреты

Электрёт — диэлектрик, длительное время сохраняющий поляризованное состояние после снятия внешнего воздействия, которое привело к поляризации (или заряджению) этого диэлектрика, и создающий в окружающем пространстве квазипостоянное электрическое поле.



Большое количество используемых материалов, методов внешнего воздействия, технологических приемов для создания поляризованного состояния в диэлектриках обуславливают многообразие проявления электретного эффекта в них.

Современные представления об электретном эффекте основаны на двух типах зарядов в диэлектриках — гетеро- и гомозаряде. Гетерозаряд обусловлен электрической поляризацией в объеме диэлектриков вследствие ориентации диполей, ионной (или электронной) поляризации, а также смещением пространственного заряда. В этом случае отрицательный заряд электрета сосредотачивается у анода, положительный у катода, и возникающее электрическое поле противоположно по направлению полю поляризации.

Электреты

- Существует несколько способов изготовления электретов. Большинство из них основано на том, что диэлектрик помещают в электрическое поле и подвергают дополнительному физическому воздействию, которое уменьшает время релаксации диполей либо ускоряет процесс миграции заряженных частиц. В зависимости от вида физического воздействия различают термоэлектреты, электроэлектреты, фотоэлектреты, магнитоэлектреты, радиоэлектреты.
- Электретное состояние может возникать и без приложения к диэлектрику внешнего электрического поля, например, от механической деформации (механоэлектреты), при зарядении диэлектрика в поле коронного разряда (короноэлектреты), при нагревании полимеров в контакте с электродами из разнородных металлов (металлополимерные электреты), при электризации трением (трибоэлектреты), под воздействием плазмы тлеющего разряда. Электретный эффект присущ сегнетоэлектрикам (сегнетоэлектреты), тканям живого организма (биоэлектреты). При фиксировании ориентированных в электрическом поле диполей и смещенных ионов химическим путем, например, вулканизацией, получают хемоэлектреты.

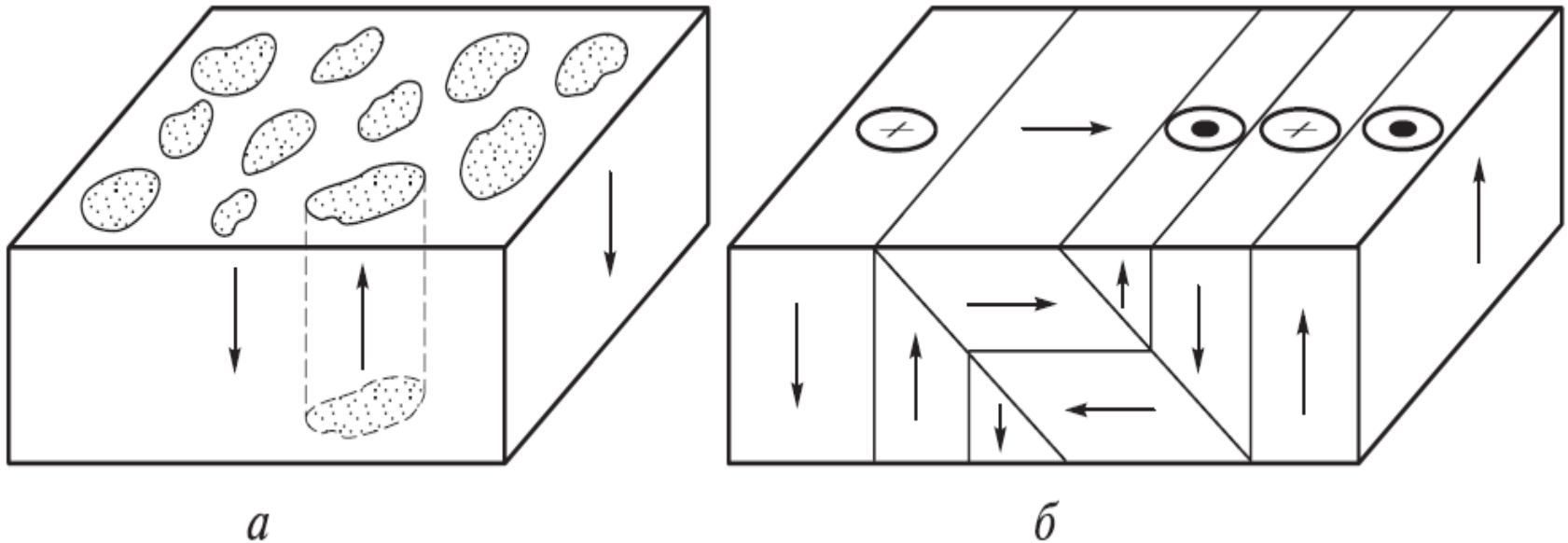
Электреты

Важнейшей характеристикой электретов, определяемой экспериментально, является эффективная поверхностная плотность зарядов ($\sigma_{\text{эф}}$, Кл/м²), равная разности между гомо- и гетерозарядами. Другим параметром, характеризующим свойства электретов, является время релаксации зарядов τ_p (время уменьшения заряда в e раз). Временем жизни электрета $\tau_{\text{ж}}$ называется промежуток времени, в течение которого материал сохраняет электретные характеристики. У различных полимеров τ составляет 3 — 10 лет.

Сегнетоэлектрики

- **Сегнетоэлектрики** (названы по первому материалу, в котором был открыт сегнетоэлектрический эффект — сегнетова соль) — твёрдые диэлектрики (некоторые ионные кристаллы и пьезоэлектрики), обладающие в определённом интервале температур собственным электрическим дипольным моментом, который может быть переориентирован за счёт приложения внешнего электрического поля. Сегнетоэлектрические материалы обладают гистерезисом по отношению к электрическому дипольному моменту.
- В англоязычной литературе для обозначения явления применяется термин **ферроэлектрики** (образовано по аналогии с ферромагнетиками).
- Типичный представитель сегнетоэлектриков — сегнетова соль, двойная соль винной кислоты $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; именно её название лежит в основе термина «сегнетоэлектрик». К сегнетоэлектрикам с более простой структурой относят целый ряд кристаллов со структурой перовскита, например, титанат бария BaTiO_3 , титанат свинца PbTiO_3 , а также их твердые растворы.

Схема доменной структуры сегнетоэлектриков при отсутствии внешних воздействий



а - одноосный сегнетоэлектрик (триглицинсульфат);
б - многоосный сегнетоэлектрик (титанат бария)

Магнитные материалы

Магнитные материалы, *Магнетики* — материалы, вступающие во взаимодействие с магнитным полем, выражающееся в его изменении, а также в других физических явлениях — изменение физических размеров, температуры, проводимости, возникновению электрического потенциала и т. д. В этом смысле к магнетикам относятся практически все вещества (ни у какого из них магнитная

восприимчивость не равна нулю). Среди них различают **диамагнетики** (имеющие небольшую отрицательную магнитную восприимчивость — и несколько ослабляющие магнитное поле) или **парамагнетики** (имеющие небольшую положительную магнитную восприимчивость — и несколько усиливающие магнитное поле); более редко встречаются **ферромагнетики** (имеющие большую положительную магнитную восприимчивость — и намного усиливающие магнитное поле)



Виды магнитных материалов

- Магнитотвёрдые материалы
- Магнитомягкие материалы
- Магнитострикционные материалы
- Магнитооптические материалы
- Термомагнитные материалы

Ферромагнетики

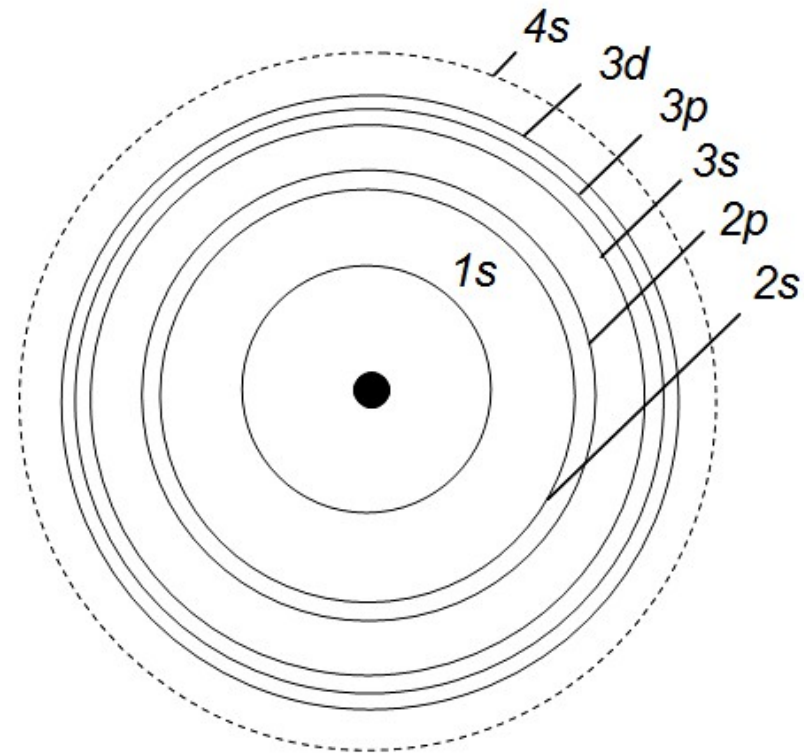
Ферромагнетики — вещества (как правило, в твёрдом кристаллическом или аморфном состоянии), в которых ниже определённой критической температуры (точки Кюри) устанавливается дальний ферромагнитный порядок магнитных моментов атомов или ионов (в неметаллических кристаллах) или моментов коллективизированных электронов (в металлических кристаллах). Иными словами, ферромагнетик — такое вещество, которое, при температуре ниже точки Кюри, способно обладать намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля.

Свойства ферромагнетиков:

- Магнитная восприимчивость ферромагнетиков положительна и значительно больше единицы.
- При не слишком высоких температурах ферромагнетики обладают самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздействий.
- Для ферромагнетиков характерно явление гистерезиса

Электронные оболочки и подоболочки в атоме железа

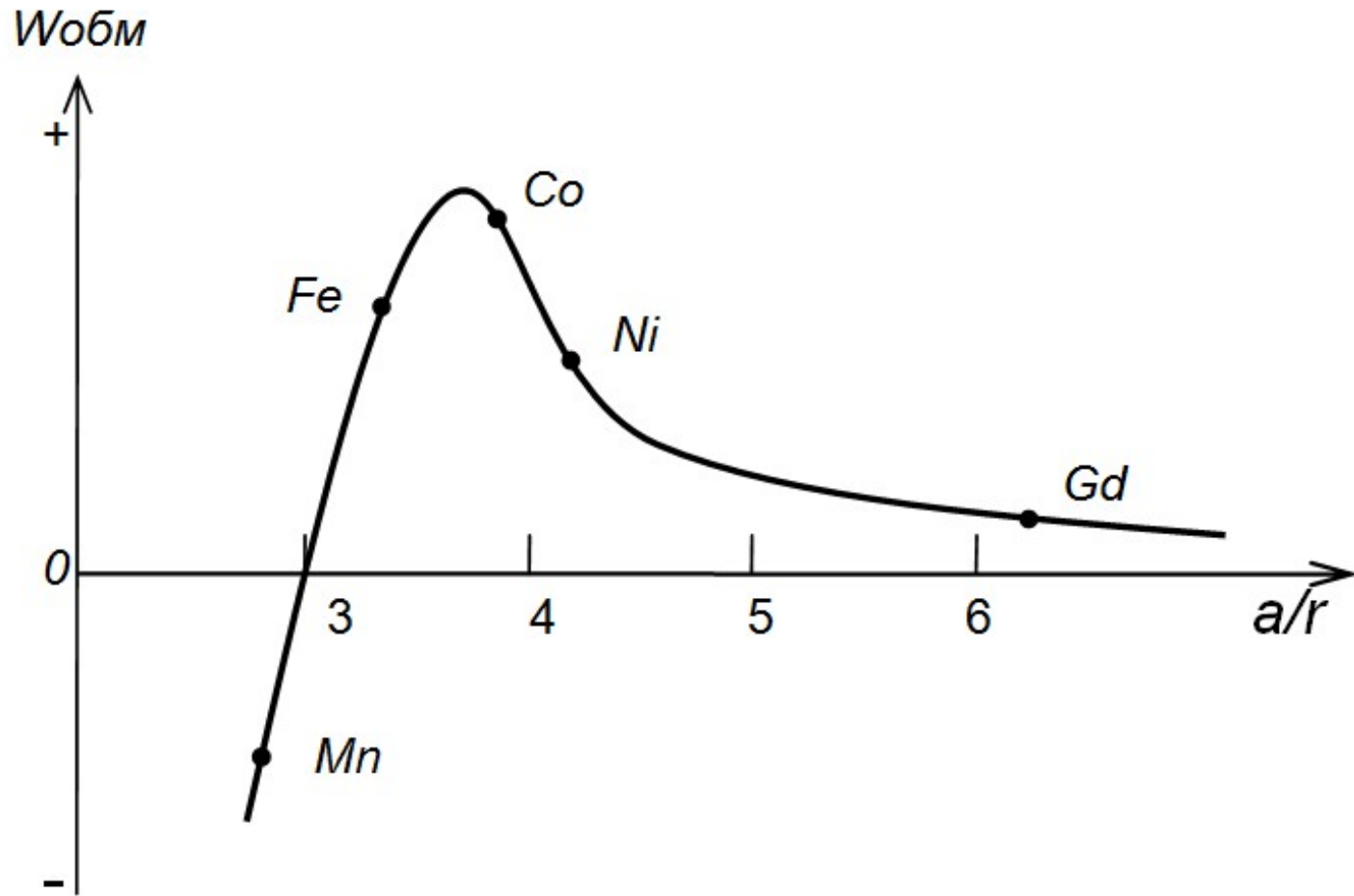
Если оболочка или подоболочка атома полностью построена, то в ней число положительных спинов равно числу отрицательных спинов. В атоме железа не заполнена предпоследняя подоболочка 3d, которой не хватает четырех электронов. У этой оболочки имеются пять “положительных” спинов и один “отрицательный” спин. Таким образом, имеется четыре нескомпенсированных спина, которые и определяют результирующий магнитный момент атома.



Подобное отсутствие компенсации спиновых моментов в одном из внутренних слоев электронной оболочки атома является необходимым условием *ферромагнетизма*, но не достаточным, это можно увидеть на примере атомов марганца (Mn).

- Вторым условием возникновения ферромагнетизма является наличие сильного электростатического взаимодействия между электронами соседних атомов, способного ориентировать их нескомпенсированные спиновые магнитные моменты одинаковым образом.
- Эти моменты, складываясь, вызывают появление самопроизвольной намагниченности вещества даже в отсутствие внешнего магнитного поля, это и является признаком ферромагнетизма.

Характер зависимости обменной энергии $W_{обм}$ от отношения межатомного расстояния к радиусу незаполненной оболочки атома

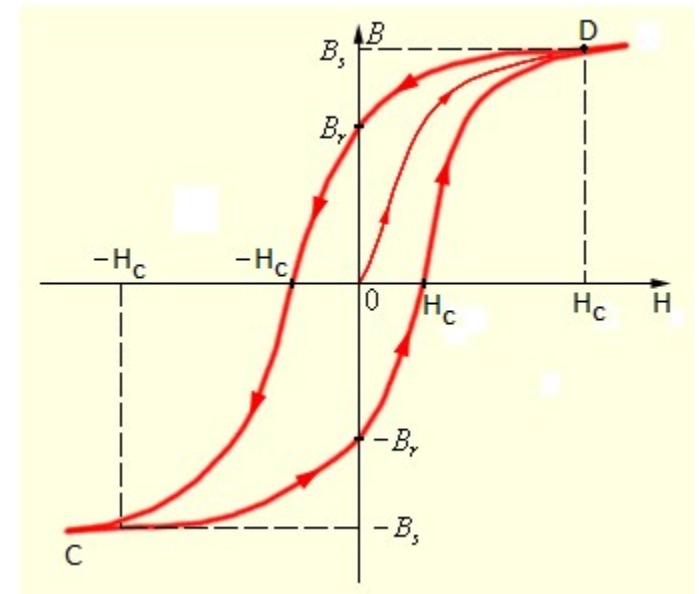


Основными особенностями ферромагнетиков являются:

- Наличие макроскопических областей (доменов) спонтанного намагничивания до насыщения без воздействия внешнего магнитного поля
- Сильная зависимость магнитного состояния от напряженности внешнего магнитного поля
- Наличие температуры, выше которой ферромагнетик теряет свои свойства и становится парамагнетиком
- Наличие отставания намагниченности от напряженности магнитного поля
- Изменение линейных размеров и формы при изменении магнитного состояния (явление *магнитострикции*)

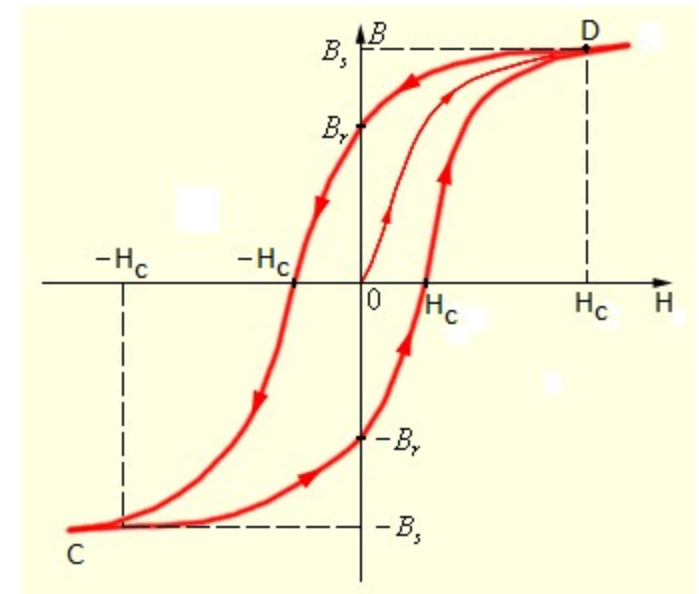
Характеристики и параметры ферромагнетиков

- При изменениях напряженности магнитного поля на величины, сравнимые с коэрцитивной силой, имеют место необратимые процессы намагничивания и перемагничивания. В это случае значения намагниченности магнитного материала при изменении знака поля не совпадают.
- Необратимые процессы намагничивания и перемагничивания сопровождаются рассеянием энергии, при котором, в частности, происходит выделение теплоты, что и обуславливает отставание намагниченности от напряженности. Это явление называют *магнитным гистерезисом*, а замкнутую кривую называют *петлей гистерезиса*.



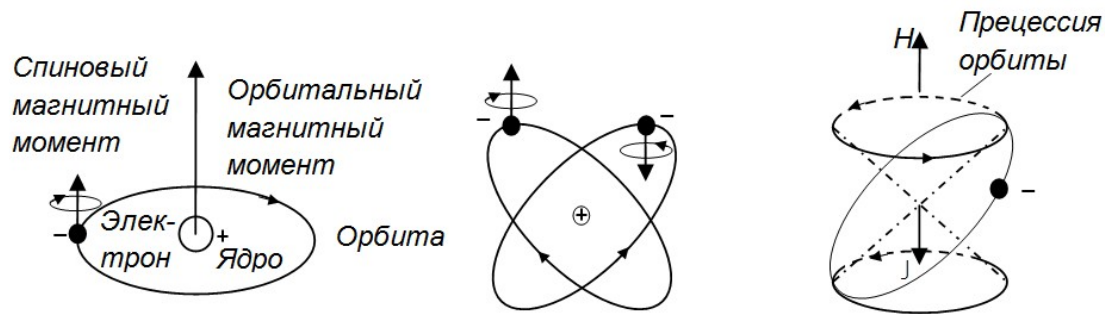
Характеристики и параметры ферромагнетиков

- Кривая OD , отображающая закон нарастания индукции при увеличении напряженности поля при условии, что вещество предварительно было размагничено, называется *первоначальной кривой намагничивания*
- Основными характеристиками петли гистерезиса являются остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_c . Площадь этой петли определяет величину потерь энергии на гистерезис в единице объема за один цикл перемагничивания.



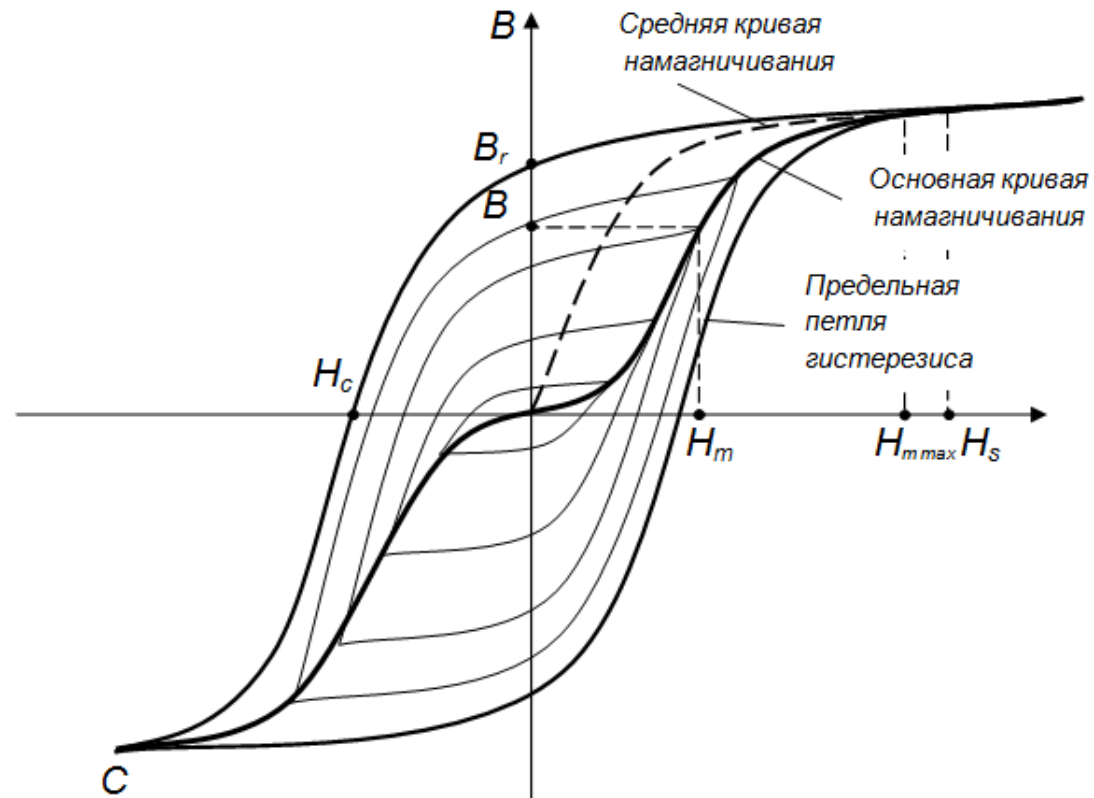
Свойства магнитных материалов

Материалы, помещенные во внешнее магнитное поле, намагничиваются. Известно, что электроны обладают *орбитальными* и *спиновыми магнитными моментами*, а магнитные свойства атома обусловлены в основном магнитными свойствами его электронов (протоны и нейтроны, входящие в ядро атома, тоже имеют магнитные моменты, но в сотни раз меньше, чем электроны).

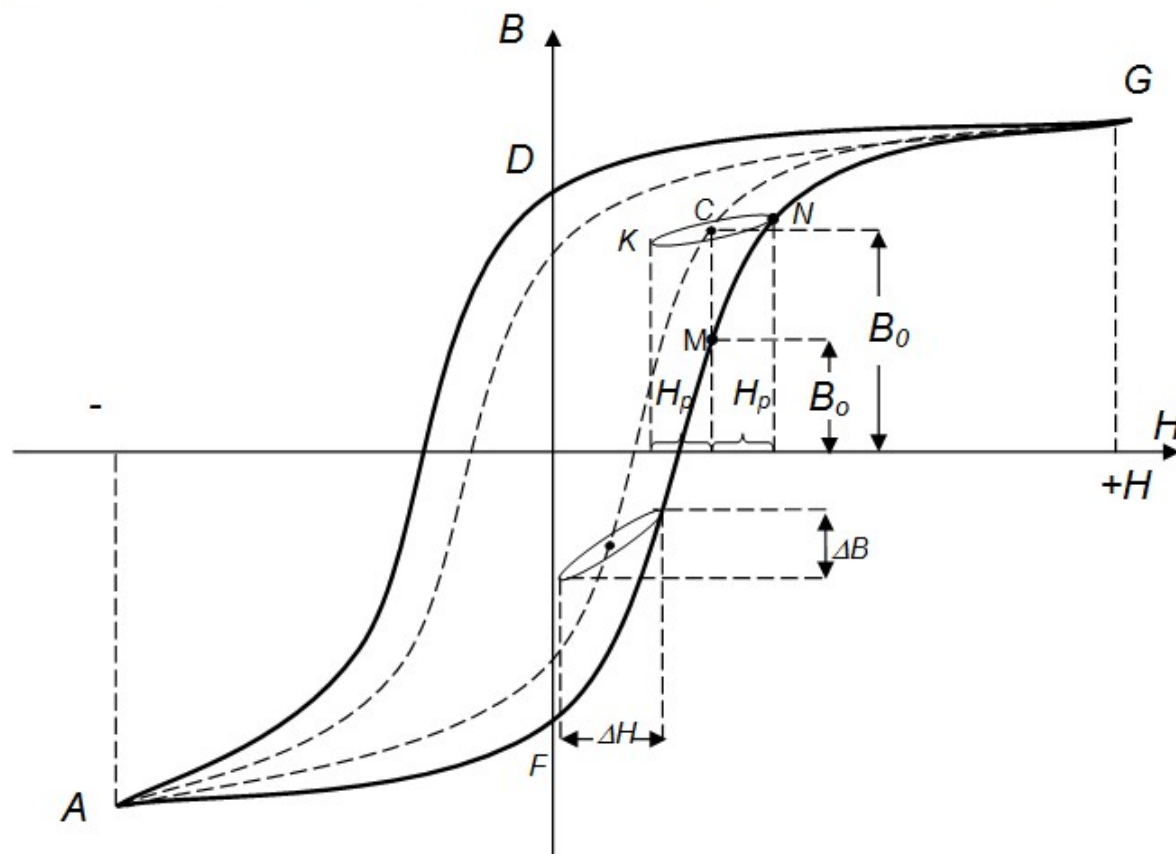


Магнитные моменты электрона в атоме

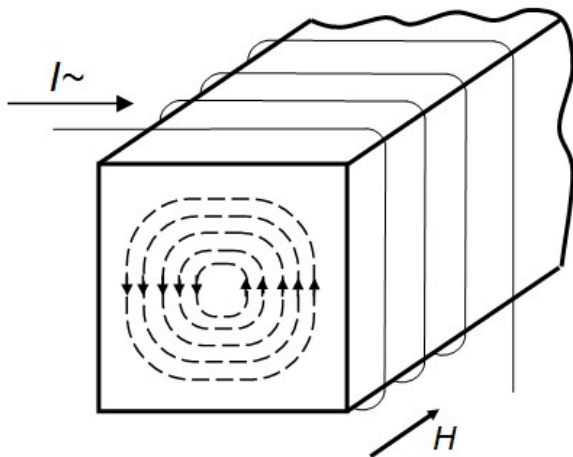
Семейство частных симметричных петель гистерезиса



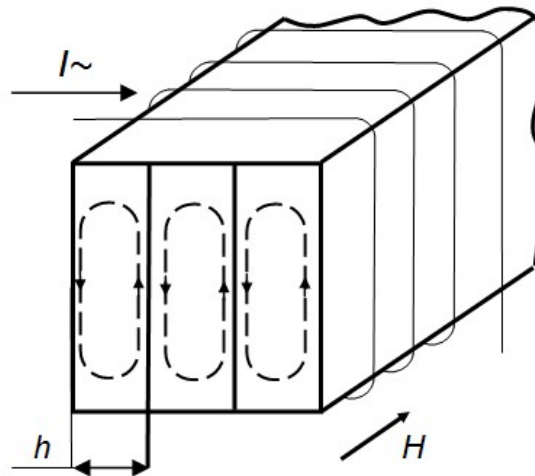
Уменьшение влияния гистерезиса для постоянного поля при наложении переменного поля.



Вихревые токи в поперечном сечении сплошного (а) и сборного (б) магнитопроводов.



(a)



(б)

$$\rho_{\hat{a}} = 1,64 \frac{B_m^2 \cdot f^2 \cdot h^2}{\gamma \cdot \rho}$$

где h - толщина листа; γ - плотность материала магнитопровода; ρ - удельное электрическое сопротивление материала магнитопроводов.

Ферромагнитное упорядочение

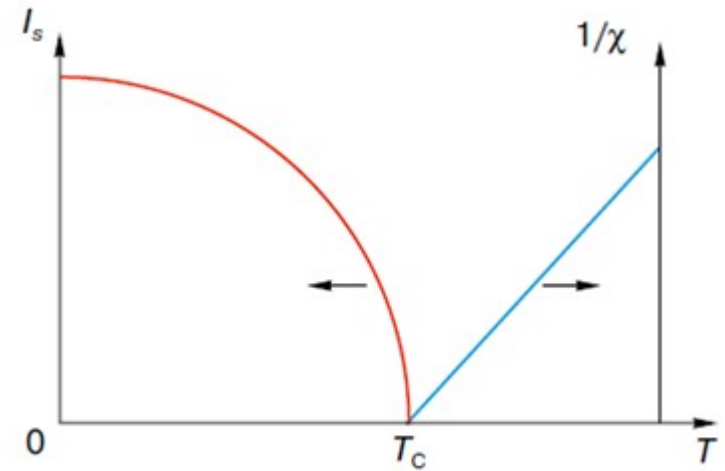
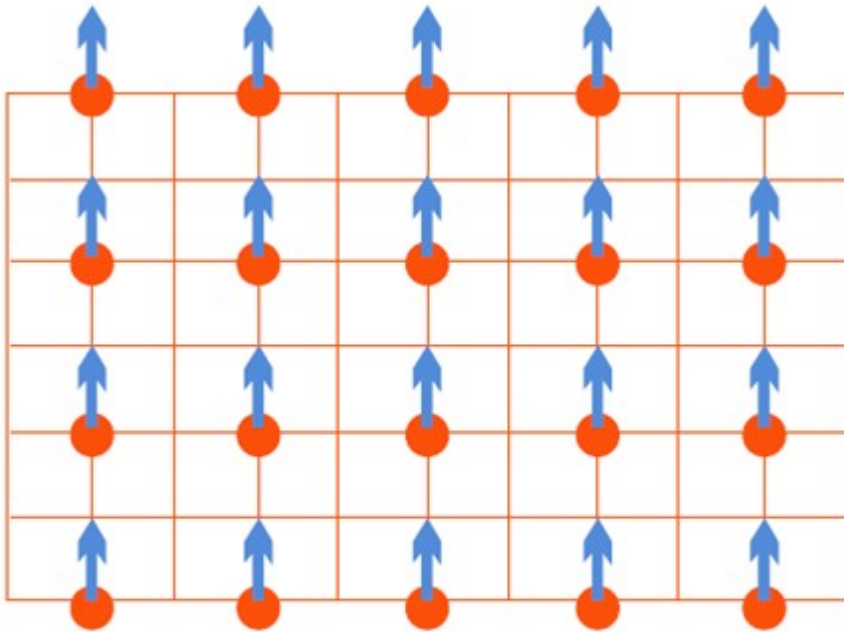
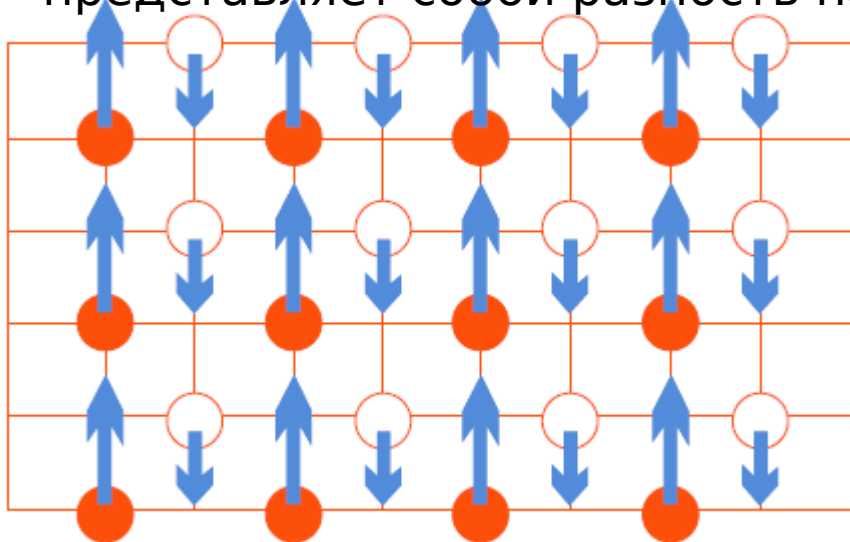


Рис. 1. а – температурные зависимости спонтанной намагниченности I_s и обратной магнитной восприимчивости $1/\chi$ ферромагнетика; б – ферромагнитная структура.

Ферримагнитное упорядочение

Ферромагнетики и антиферромагнетики являются кристаллическими веществами, причем кристаллическую решетку антиферромагнетика можно рассматривать как сложную решетку, состоящую из двух подрешеток, намагниченных противоположно. Явление неполной компенсации магнитных моментов двух подрешеток (*ферримагнетизм*) приводит к тому, что в ферримагнетиках также возникает некоторая результирующая спонтанная намагниченность, которая заметно меньше спонтанной намагниченности ферромагнетиков, так как представляет собой разность намагниченностей подрешеток.



Различие магнитных моментов подрешеток обусловлено тем, что подрешетки образуются из ионов разных элементов либо из ионов одного и того же элемента, но с разной валентностью.

Ферримагнитная
структура

Необходимо знать классификацию материалов по магнитным

свойствам.

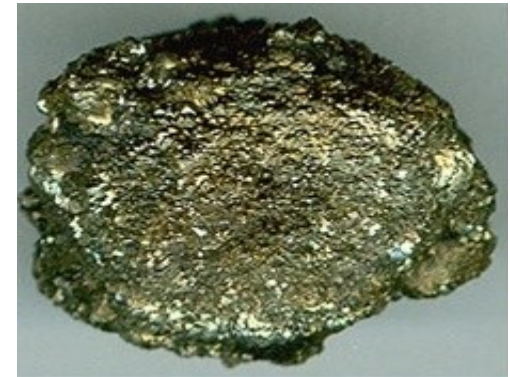
- **Диамагнетики**

Это вещества, атомы, ионы или молекулы которых не имеют результирующего магнитного момента при отсутствии внешнего поля. Диамагнитный эффект является результатом воздействия внешнего магнитного поля на молекулярные токи и проявляется в том, что возникает магнитный момент, направленный в сторону, обратную внешнему полю.



- **Парамагнетики**

Это вещества, атомы, ионы или молекулы которых имеют результирующий магнитный момент при отсутствии внешнего магнитного поля. Во внешнем магнитном поле парамагнетики намагничиваются согласно с внешним полем, т. е. имеют положительную магнитную восприимчивость ($\lambda > 0$). Парамагнитный эффект присущ веществам с нескомпенсированным магнитным моментом атомов при отсутствии у них порядка в ориентации этих моментов.



Классификация магнитных материалов

Ферромагнетики

Это вещества, в которых магнитные моменты атомов или ионов находятся в состоянии самопроизвольного магнитного упорядочения, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля. При воздействии внешнего магнитного поля магнитные моменты доменов приобретают преимущественное ориентирование в направлении этого поля и ферромагнитное вещество намагничивается. Ферромагнитные вещества характеризуются большим значением магнитной восприимчивости ($\gg 1$), а также ее нелинейной зависимостью от напряженности магнитного поля и температуры, способностью намагничиваться до насыщения при обычных температурах даже в слабых магнитных полях, гистерезисом — зависимостью магнитных свойств от предшествующего магнитного состояния, точкой Кюри, т. е. температурой, выше которой материал теряет



Классификация магнитных материалов

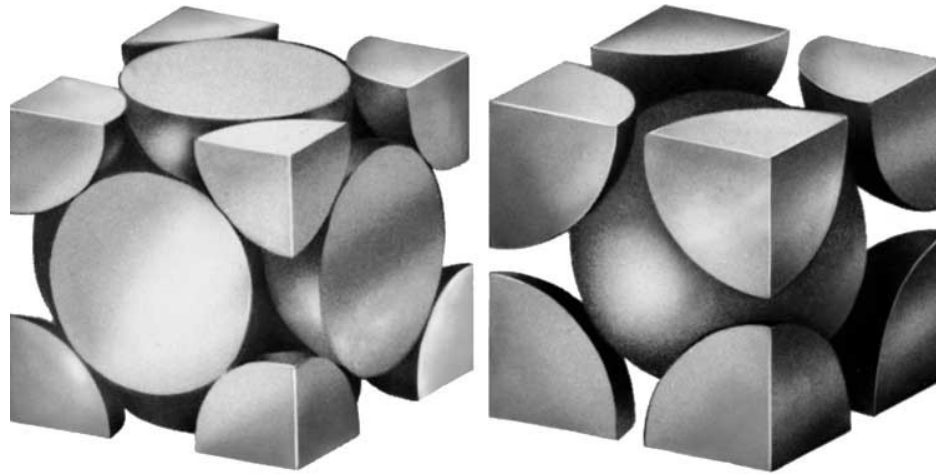
Антиферромагнетики

Это вещества, в которых магнитные моменты атомов или ионов находятся в состоянии самопроизвольного магнитного упорядочения, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов равны нулю. При воздействии внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов приобретают преимущественную ориентацию вдоль внешнего поля и антиферромагнитное вещество намагничивается. Антиферромагнитные вещества характеризуются кристаллическим строением, небольшим коэффициентом магнитной восприимчивости ($\lambda = \text{от } 10^{-3} \text{ до } 10^{-5}$), постоянством восприимчивости в слабых полях и сложной зависимостью от магнитного поля в сильных полях, специфической зависимостью от температуры, а также температурой точки Нееля, выше которой вещество переходит в парамагнитное состояние.

Следует твердо уяснить природу ферромагнетизма, знать характеристики и параметры ферромагнетиков


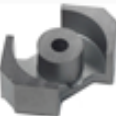


- **Ферромагнетизм** – магнитоупорядоченное состояние вещества, в котором большинство атомных магнитных моментов параллельны друг другу, так что вещество обладает самопроизвольной(спонтанной) намагниченностью.
- Для ферромагнитных кристаллов характерно наличие внутренних незаполненных электронных слоев. Для железа ,никеля и кобальта незаполненными являются 3d-подслой, для гадолиния подслой – 4f.
- Появление в ферромагнетиках атомного магнитного порядка обусловлено обменным взаимодействием, стремящимся установить спины соседних атомов или ионов параллельно друг другу.

феррита (α - железа)







ФЕРРИТ (от лат. ferrum – железо), – близкая по составу к Fe структурная составляющая углеродистых сталей и чугунов, а также легированных сталей и чугунов, содержащих, кроме железа и углерода, добавки других металлов. Кроме этого, феррит – фазовая составляющая других структур, например, **перлита**. На микрофотографиях феррит как структурная составляющая имеет форму полиэдрических зерен, а в перлите имеет форму полосок, проходящих через зерно перлита.

СЕРДЕЧНИКИ ИЗ МАГНИТОМЯГКИХ ФЕРРИТОВ

конфигурация феррита	ферриты Россия	ферриты Epcos	ферриты Magnetics	ферриты CosmoFerrites	ферриты ЮВ Азия
 <p>Кольцевые ферритовые сердечники</p>	К	R	TC	T	OR(T) 1 2
 <p>Квадратные ферритовые сердечники</p>	KB	RM	RM	RM, PQ, EP 1 2	RM, EP, PQ
 <p>Броневые ферритовые сердечники</p>	Б	PM, P, P Halves, PR, EP, TT	POT,DS, RS, EP, PQ	EP, PTC, POT	P, PC
 <p>Ш-образные ферритовые сердечники</p>	Ш	E, ELP, ETD,ER, EC, EFD, DE, EV	E, EEM, EFD, EC, ETD, EER, ER, Planar	EE, EC,ETD, EER, EFF, UU, I, EVD, EFC, EED, EI, ET&UT, Planer E	EE, EPC, EER, ET, EI, EF, EED, UU 1 2 3 4 5 6 7 8 9

СЕРДЕЧНИКИ ИЗ МАГНИТОМЯГКИХ ФЕРРИТОВ

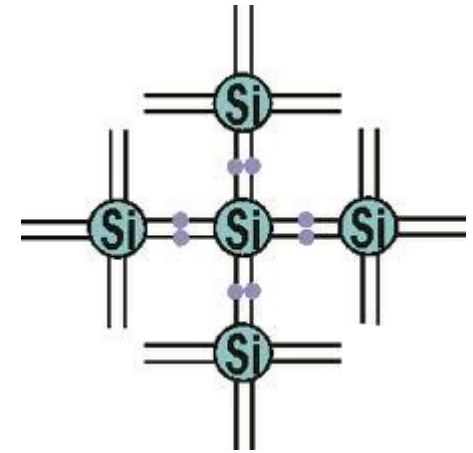
конфигурация феррита	ферриты Россия	ферриты Ersos	ферриты Magnetics	ферриты CosmoFerrites	ферриты ЮВ Азия
 Двухотверстные сердечники	Тр	Double-aperture			RID, K6P
 Гантельные ферритовые сердечники	Гт				SDR, DRH, DR, DRWW
 П-образные ферритовые сердечники	ПК, П, ППК, ПП	I/U, UR	U, I		ETS
 Трубчатые ферритовые сердечники	Т, ПТ				RH

Основные характеристики низкочастотных магнитомягких материалов

Материал	$\mu_{нач}$	μ_{max}	$H_c, A/m$	$B_m, Tл$	$\rho, мКОм\cdot м$
Техническое железо	400	4000	50...100	2,2	0,1
Электролитическое железо	600	15000	30	2,2	0,1
Карбонильное железо	3000	20000	6,4	2,2	0,1
Монокристалл чистого железа	20000	$1,4 \cdot 10^6$	0,8	-	0,1
Электротехническая сталь	200...600	3000...8000	10...65	2,0	0,25...0,6
Низконикелевые пермаллои	4000	$(15...60) \cdot 10^3$	5...30	1,0...1,6	0,45...0,9
Высоконикелевые пермаллои	$7 \cdot 10^3 ... 10^5$	$10^4 ... 3 \cdot 10^5$	0,65...5	0,65...1,05	0,16...0,85
Супермаллой: 79НМ: 79%Ni, 5%Mo, 15%Fe, 0,5%Mn	100000	$1,5 \cdot 10^6$	0,3	0,8	0,6
Альсифер: 5,6%Al, 9,5%Si Fe ост.	35400	117000	1,8		0,8

Полупроводниковые материалы

Полупроводники характеризуются значениями удельной электрической проводимости в пределах от до (при температуре $T=300\text{ K}$), обладают высокой чувствительностью электропроводности к внешним энергетическим воздействиям (температуре, электрическому полю, свету потокам быстрых частиц и др.), а также к содержанию примесей и дефектов в кристаллах.



Качественное отличие полупроводников от металлов состоит в том, что и при добавлении примесей, и при возрастании температуры электропроводность полупроводников возрастает, в то время как у металлов – уменьшается.

Изучение электрических свойств полупроводников и полупроводниковых приборов чаще всего проводят на основе применения **модели ковалентной связи** и **модели энергетических зон (зонной модели)**.

Полупроводниковые материалы

Группа IV		Группа III-V	
собственные полупроводники	составной полупроводник	2-х компонентные полупроводники	3-х компонентные полупроводники
Кремний, Si	Карбид кремния, SiC	Антимонид алюминия, AlSb	$Al_xGa_{1-x}As$
Германий, Ge	Кремний-германий, SiGe	Арсенид алюминия, AlAs	InGaAs
Серое олово, α -Sn		Нитрид алюминия, AlN	InGaP

Дырочная электропроводность

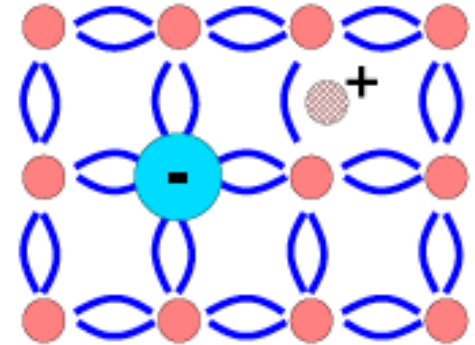
- Отсутствие электрона в атоме полупроводника условно назвали **дыркой**. Атом с дыркой (положительный ион) может притянуть к себе электрон из соседнего атома. Этот электрон при переходе заполняет дырку, а в соседнем атоме образуется новая дырка. Далее процесс повторяется. В результате дырка перемещается от одного атома к другому, создавая **дырочную** электропроводность. *Дырку можно рассматривать как частицу, аналогичную электрону, но с зарядом противоположного знака.* При дырочной электропроводности в действительности тоже перемещаются электроны, но более ограничено, чем при электронной (электроны переходят из данных атомов только в соседние атомы).
- *Таким образом, электрический ток в полупроводнике одновременно создается движением электронов и дырок.*

Физические процессы полупроводников

- *Процесс образования пары электрон-дырка называют **генерацией носителей заряда**.*
- При этом генерация может быть следствием не только воздействия тепловой энергии (тепловая генерация), но и кинетической энергии движущихся частиц (ударная генерация), энергии электрического поля, энергии светового облучения (световая генерация) и так далее.
- *Процесс восстановления разорванных ковалентных связей называют **рекомбинацией**.*
- При этом носители заряда – электрон и дырка – исчезают (рекомбинируют).
- *Промежуток времени с момента генерации частицы, являющейся носителем заряда, до ее рекомбинации называют **временем жизни**, а расстояние, пройденное частицей за время жизни, – **диффузионной длиной**.*

Полупроводник n-типа

Термин «**n-тип**» происходит от слова «negative», обозначающего отрицательный заряд основных носителей. Этот вид полупроводников имеет примесную природу. В четырёхвалентный полупроводник (например, кремний) добавляют примесь пятивалентного полупроводника (например, мышьяка). В процессе взаимодействия каждый атом примеси вступает в ковалентную связь с атомами кремния.

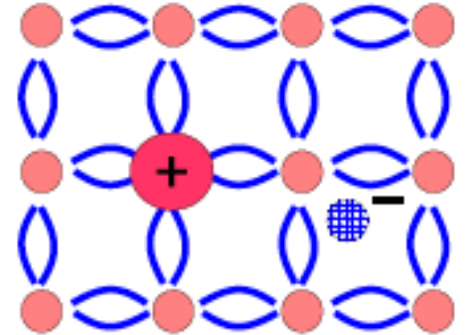


Однако для пятого электрона атома мышьяка нет места в насыщенных валентных связях, и он переходит на дальнюю электронную оболочку. Там для отрыва электрона от атома нужно меньшее количество энергии. Электрон отрывается и превращается в свободный. В данном случае перенос заряда осуществляется электроном, а не дыркой, то есть данный вид полупроводников проводит электрический ток подобно металлам. Примеси, которые добавляют в полупроводники, вследствие чего они превращаются в полупроводники n-типа, называются донорными.

Проводимость N-полупроводников приблизительно равна:

Полупроводник р-типа

Термин «**р-тип**» происходит от слова «positive», обозначающего положительный заряд основных носителей. Этот вид полупроводников, кроме примесной основы, характеризуется дырочной природой проводимости. В четырёхвалентный полупроводник (например, в кремний) добавляют небольшое количество атомов трехвалентного элемента (например, индия).



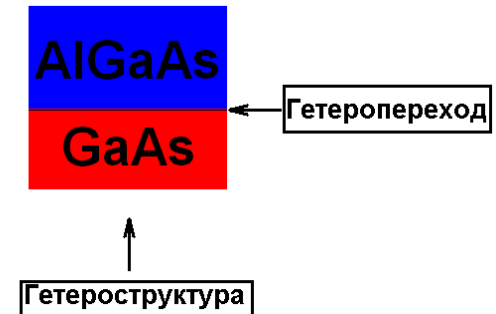
Каждый атом примеси устанавливает ковалентную связь с тремя соседними атомами кремния. Для установки связи с четвёртым атомом кремния у атома индия нет валентного электрона, поэтому он захватывает валентный электрон из ковалентной связи между соседними атомами кремния и становится отрицательно заряженным ионом, вследствие чего образуется дырка. Примеси, которые добавляют в этом случае, называются акцепторными.

Гетероструктура

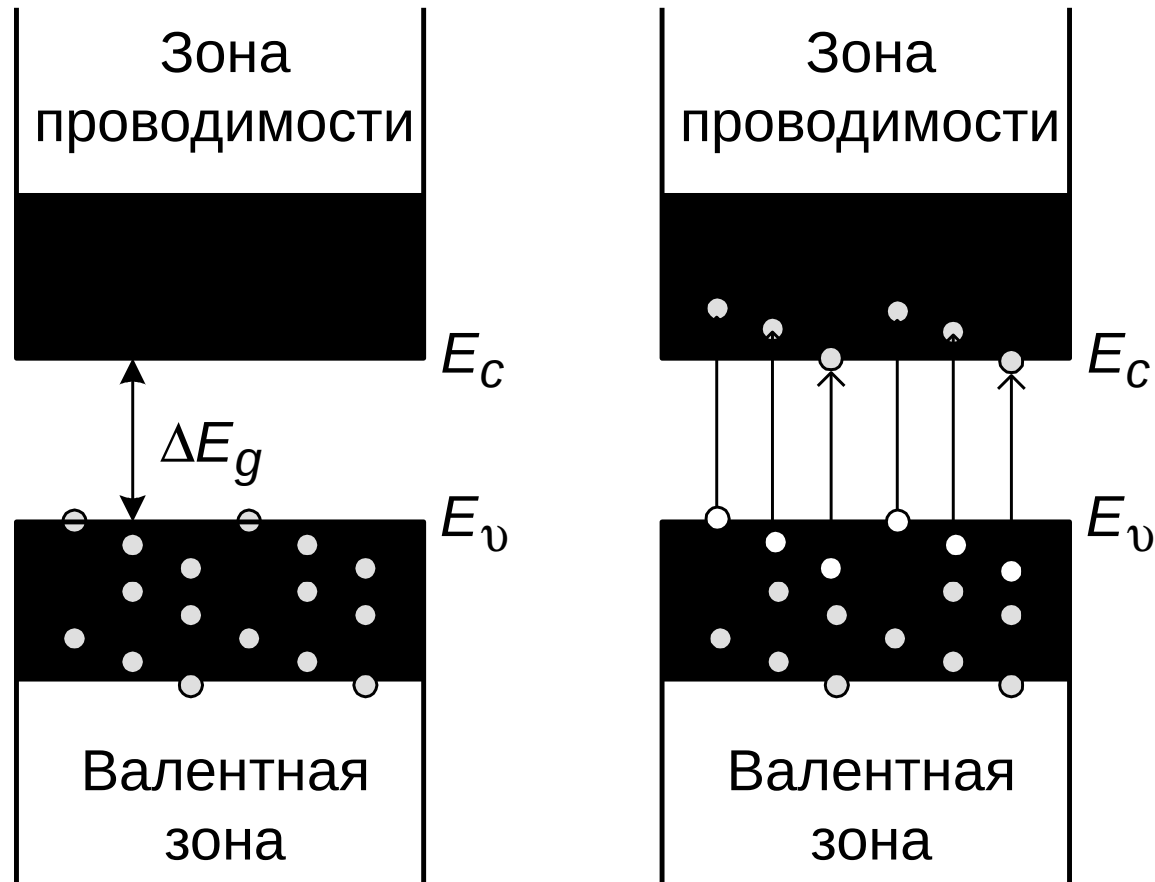
Из структуры энергетических зон полупроводников следует, что при температуре абсолютного нуля собственные полупроводники не проводят электрического тока. Нагревание полупроводников приводит к тому, что часть электронов валентной зоны приобретает энергию, достаточную для их перехода в зону проводимости, в результате чего возникает заметная электропроводность.

С увеличением температуры число электронов в зоне проводимости

увеличивается. При нагреве возбуждаются электроны проводимости и электропроводность и под действием других факторов, способных сообщить электронам энергию, достаточную для их перехода из валентной зоны в зону проводимости. Этими факторами могут быть световое облучение, ионизирующее излучение и др. Процесс образования электронов проводимости с точки зрения модели энергетических зон иллюстрируется на рисунке. Схема энергетических состояний электронов, представленная на рисунке, получила название **энергетической (зонной) диаграммы**.



Энергетическая зонная диаграмма собственного полупроводника



Легирование

Легирование (нем. *legieren* — «сплавлять», от лат. *ligare* — «связывать») — добавление в состав материалов примесей для изменения (улучшения) физических и химических свойств основного материала. Легирование является обобщающим понятием ряда технологических процедур, различают объёмное (металлургическое) и поверхностное (ионное, диффузное и др.) легирование.

При изготовлении полупроводниковых приборов под легированием понимается внесение небольших количеств примесей или структурных дефектов с целью контролируемого изменения электрических свойств полупроводника, в частности, его типа проводимости.

Электропроводность примесных полупроводников

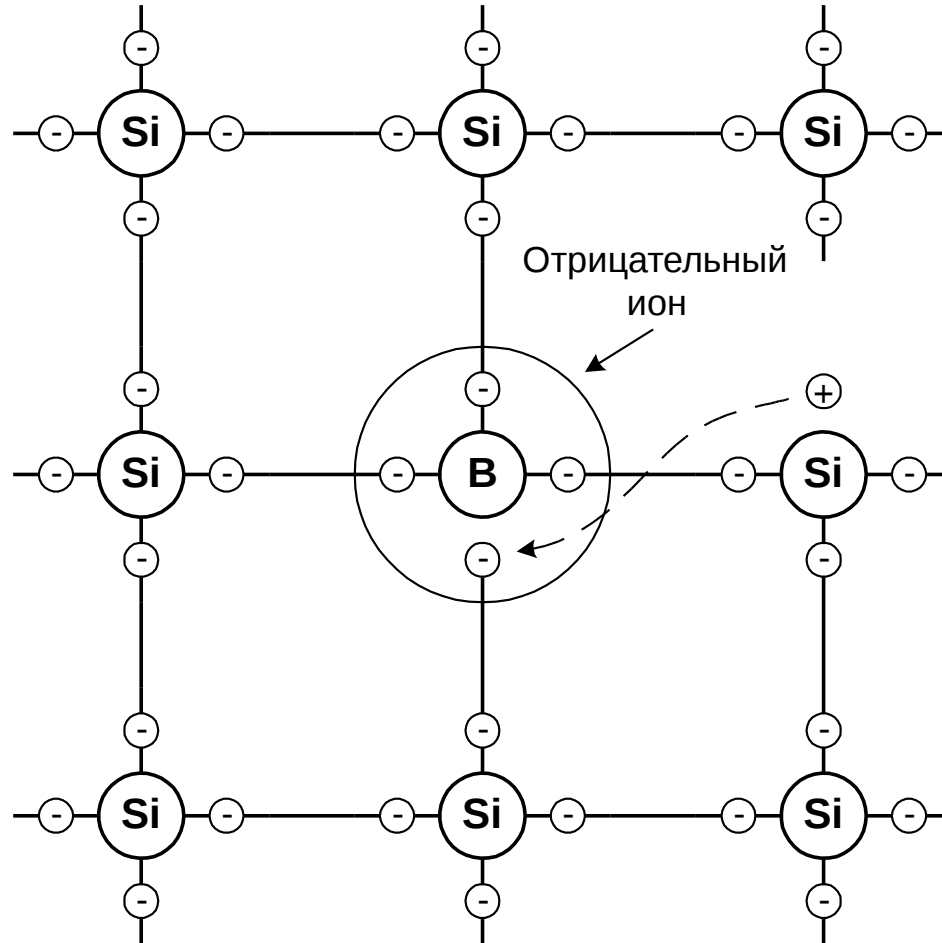
Удельное сопротивление полупроводников существенно меняется при введении в их кристаллическую решетку определенного количества специально подобранных химических добавок – примесей. Например, введение одного атома бора на 10^5 атомов кристалла кремния обеспечивает увеличение электропроводности при комнатной температуре в 1000 раз.

Полупроводники, электрические характеристики которых определяются примесями, носят название **примесных полупроводников**, а обусловленная внедрением примесей электропроводность – **примесной электропроводностью**.

Донорные полупроводники
Достаточно небольшого энергетического воздействия, чтобы оторвать избыточный электрон от примесного атома и сделать его свободным, при этом атом примеси превращается в положительно заряженный ион, неподвижно закрепленный в узле кристаллической решетки. Свободные электроны примесного происхождения добавляются к собственным свободным электронам, поэтому электропроводность полупроводника становится преимущественно электронной.

Такие примесные полупроводники называются **электронными (донорными) полупроводниками** или **полупроводниками *n*-типа**, а примеси, обуславливающие электронную проводимость – **донорными примесями**

Внедрение акцепторной примеси в кристалл кремния



Физические процессы в полупроводниках

В отличие от собственных полупроводников образование свободных электронов, обусловленное донорными примесями, не сопровождается образованием дырок, поэтому в полупроводниках n-типа **ОСНОВНЫМИ НОСИТЕЛЯМИ ЗАРЯДА** являются электроны, а **НЕОСНОВНЫМИ НОСИТЕЛЯМИ ЗАРЯДА** – дырки.

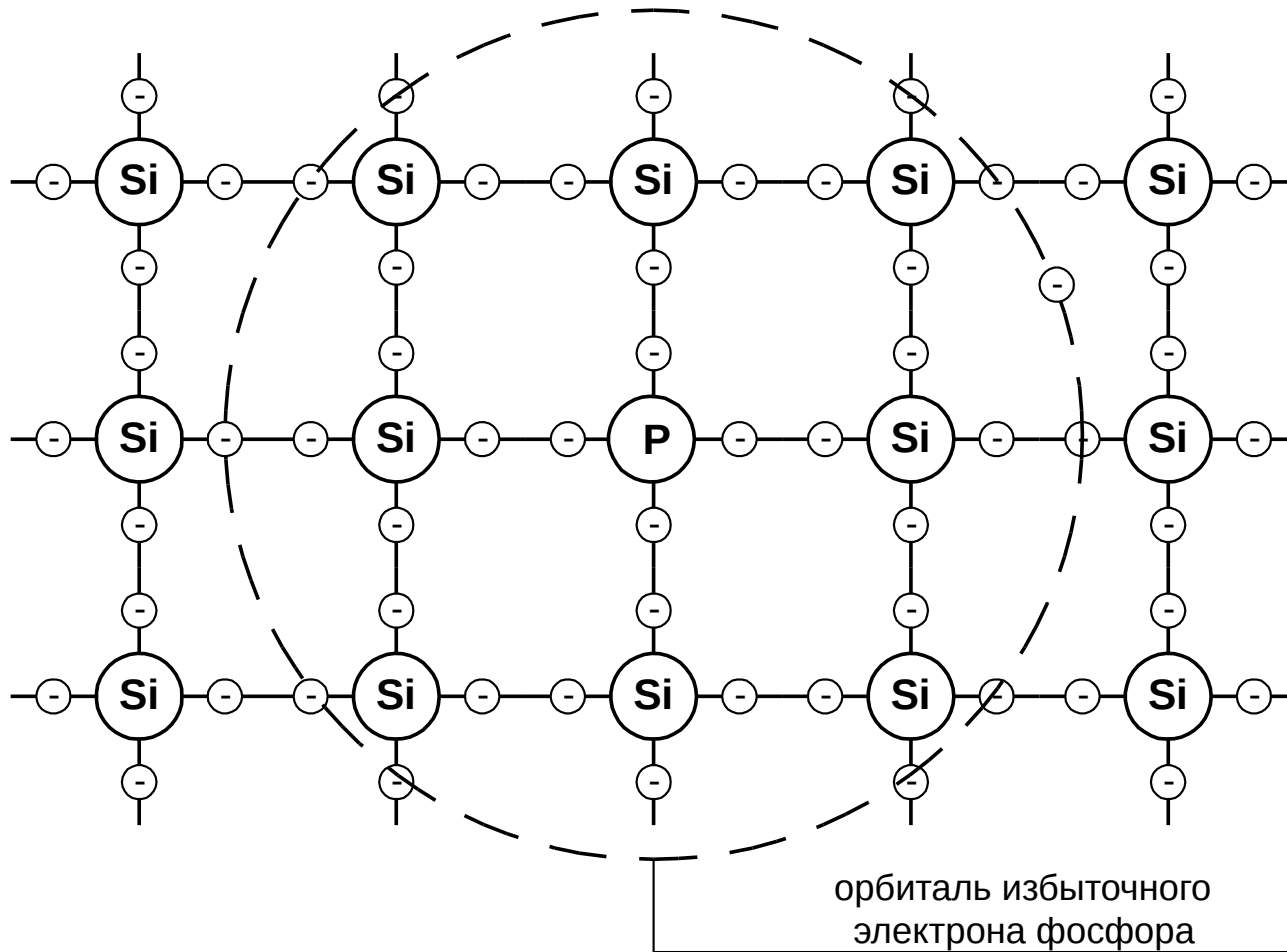
Наиболее распространенными донорными примесями по отношению к кристаллам кремния и германия являются атомы пятой группы периодической системы элементов Д. И. Менделеева: фосфор, мышьяк, сурьма, висмут.

Минимальная энергия, которую необходимо сообщить избыточному электрону донорной примеси, чтобы сделать его свободным, называется **энергией ионизации донорной**

Примесные полупроводники

Если в кристаллическую решетку кремния в качестве примеси внедрить атомы какого-либо трехвалентного элемента, например, бора, то для установления химических связей с четырьмя соседними атомами кристаллической решетки у примесного атома не хватает одного электрона, вследствие чего одна ковалентная связь оказывается ненасыщенной, то есть образуется вакансия (дырка). Потребность в установлении четырех химических связей приводит к тому, что атом бора может захватить недостающий электрон у одного из соседних атомов кремния. Захваченный электрон локализуется в примесном атоме и не принимает участия в создании электрического тока, так как атом-акцептор достроил свою оболочку до устойчивого состояния. В результате примесный атом превращается в отрицательный ион, неподвижно закрепленный в узле кристаллической решетки, а вблизи атома кремния, отдавшего электрон, появляется вакантное энергетическое состояние – дырка.

Внедрение донорной примеси в кристалл кремния



Физические процессы в полупроводниках

Дырки примесного происхождения добавляются к собственным дыркам, поэтому электропроводность полупроводника становится преимущественно дырочной. Такие примесные полупроводники называются **дырочными (акцепторными) полупроводниками** или **полупроводниками p-типа**, а примеси, обуславливающие дырочную проводимость – **акцепторными примесями**.

Минимальная энергия, необходимая атому-акцептору, чтобы захватить у соседнего атома кристаллической решетки электрон, недостающий для образования устойчивой электронной оболочки, называется **энергией ионизации акцепторной примеси**.

Численно величина энергии ионизации акцепторной примеси близка к энергии ионизации донорной примеси

Значение энергии ионизации трехвалентных примесей в германии и кремнии

Примесь	Энергия ионизации , эВ	
	Германий	Кремний
Бор	0,0104	0,045
Алюминий	0,0102	0,057
Галлий	0,0108	0,065
Индий	0,0112	0,160

Генерация, рекомбинация и время жизни носителей заряда в полупроводниках

Образование свободных электронов и дырок в полупроводниках – генерация носителей заряда – требует энергетических затрат и может происходить под действием целого ряда энергетических факторов: тепловых хаотических колебаний атомов кристаллической решетки (тепловая генерация), воздействия светового излучения (световая генерация), рентгеновского излучения, γ – излучения, ионизирующих частиц и других.

В зависимости от механизма перехода электронов в зону проводимости генерация носителей заряда может быть одноступенчатой и многоступенчатой. При одноступенчатой генерации электрон переходит в зону проводимости непосредственно из валентной зоны. При многоступенчатой генерации переход электрона в зону проводимости осуществляется в два этапа через энергетические уровни в запрещенной зоне, соответствующие ловушкам или генерационно-рекомбинационным центрам.

Рекомбинация

Рекомбинация, при которой электрон переходит непосредственно из зоны проводимости в валентную зону, отдавая энергию, большую или равную ширине запрещенной зоны, называется **межзонной** или **рекомбинацией зона-зона**.

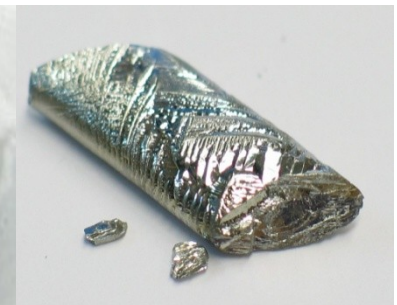
Рекомбинация, при которой электрон сначала захватывается некоторым локальным центром, имеющим энергетический уровень в запрещенной зоне, а затем переходит в валентную зону, называется **рекомбинацией через локальные центры**.

Локальные центры, участвующие в рекомбинации, называются *рекомбинационными центрами* или *ловушками рекомбинации*.

Чаще всего в роли таких центров выступают примесные состояния, и поэтому такая рекомбинация получила название *примесной рекомбинации*, хотя центрами рекомбинации могут быть и другие типы локальных состояний (собственные точечные дефекты решетки, дислокации и т.п.).

Полупроводниковые свойства проявляют химические элементы таблицы Д.И.Менделеева:

- Германий(Ge)
- Кремний(Si)
- Селен(Se)
- Теллур(Te)
- Йод(I)
- Бор(B)
- Углерод(C)
- Фосфор(P)
- Сера(S)
- Сурьма(Sb)
- Мышьяк(As)



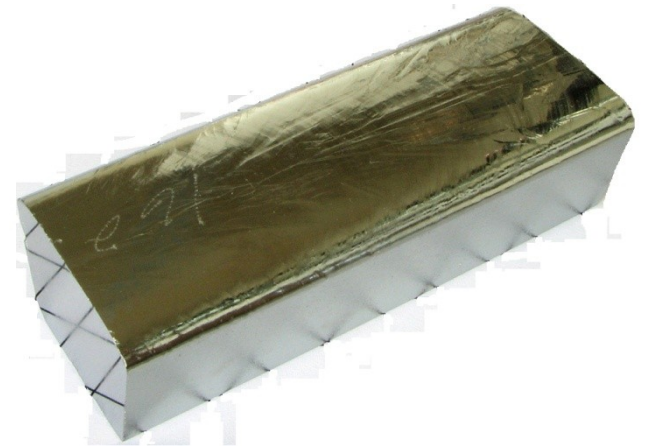
Германий

Германий - светло-серый полупроводник с металлическим блеском.

Очистка и выращивание монокристаллов германия производится методом **зонной плавки**. Германий является типичным непрямозонным полупроводником.

Параметры германия:

1. статическая диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 16,0$
2. ширина запрещённой зоны (300 К) $E_g = 0,67$ эВ
3. собственная концентрация $n_i = 2,33 \times 10^{13}$ см⁻³
4. Электронное сродство: $\chi = 4,0$ эВ



Кремний

Кремний – основной материал для полупроводниковой электроники. В промышленности кремний технической чистоты получают, восстанавливая расплав SiO_2 коксом при температуре около $1800\text{ }^\circ\text{C}$ в руднотермических печах шахтного типа. Чистота полученного таким образом кремния может достигать 99,9 % (основные примеси — углерод,



Кристаллическая решётка кремния кубическая гранецентрированная типа алмаза, параметр $a = 0,54307\text{ нм}$.

Параметры кремния:

1. Диэлектрическая проницаемость: 12
2. Подвижность электронов: $1200\text{—}1450\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.
3. Подвижность дырок: $500\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.
4. Ширина запрещённой зоны $1,205\text{--}2,84 \times 10^{-4}\text{ Т}$
5. Продолжительность жизни электрона: $5\text{ нс} \text{—} 10\text{ мс}$
6. Длина свободного пробега электрона: порядка $0,1\text{ см}$
7. Длина свободного пробега дырки: порядка $0,02 \text{—} 0,06\text{ см}$

Промышленные образцы кремния



Монокристаллический кремний,
диаметр слитка 45 мм.



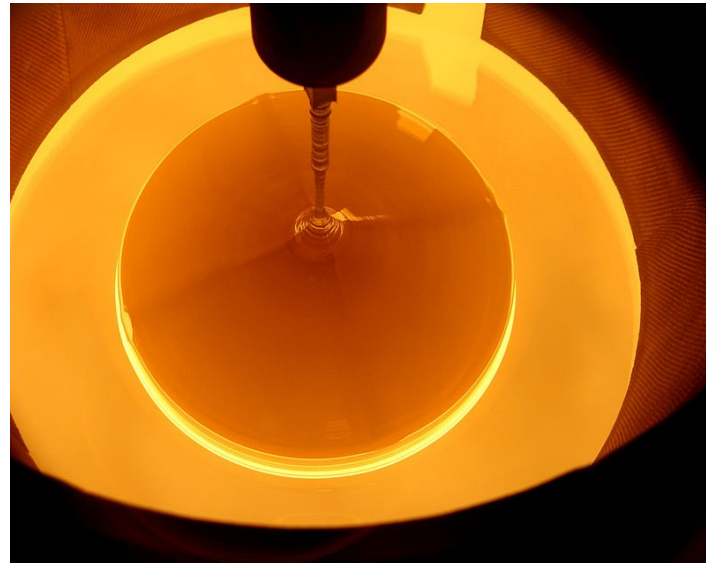
Наиболее совершенные монокристаллы
получают *методом вытягивания из
расплава (метод Чохральского)*.



Выращивание кристалла методом Чохральского



Кварцевый тигель,
заполненный
дроблёным
кремнием

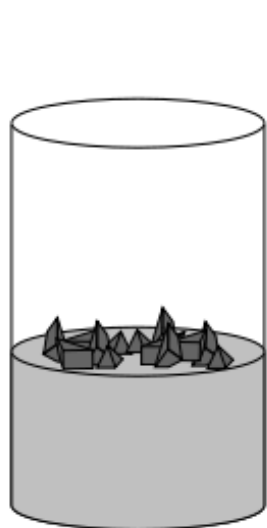


Начальная стадия
выращивания
цилиндрической части
монокристалла кремния

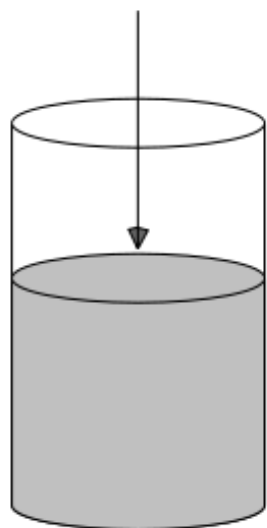


Монокристалл
кремния,
выращенный
методом
Чохральского

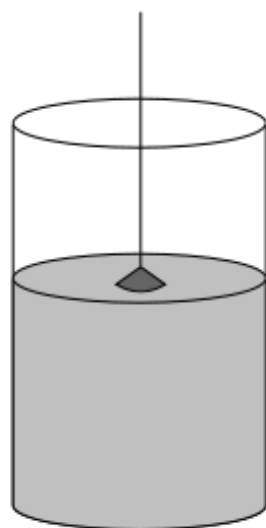
Формирование монокристалла кремния методом Чохральского



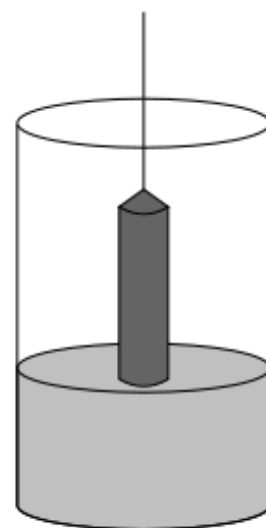
Плавление поликристаллического кремния



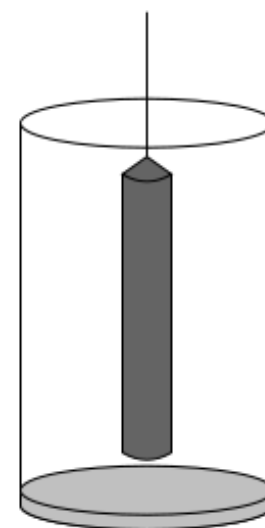
Введение в расплав зародыша кристалла



Начало роста кристалла



Вытягивание кристалла

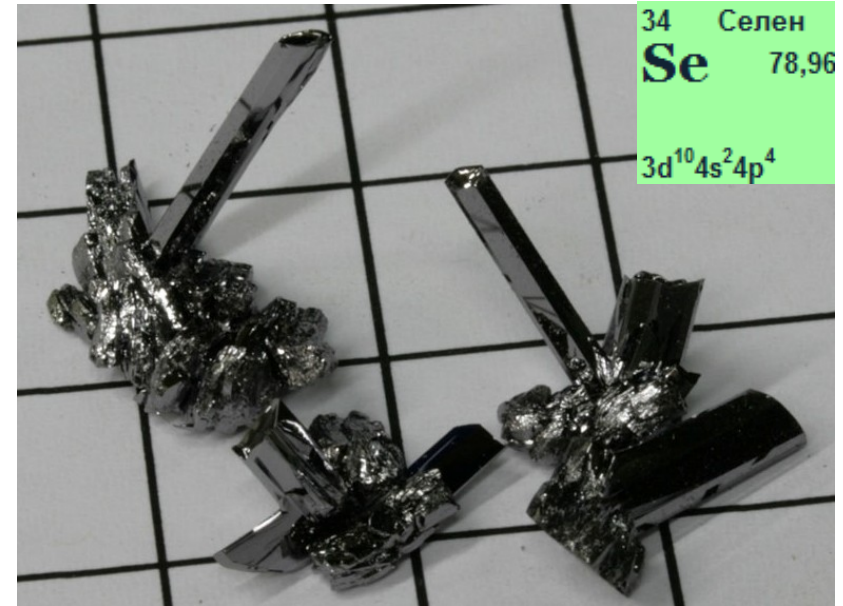


Сформированный кристалл

Выращенные кристаллы селена

Селён - хрупкий блестящий на изломе неметалл чёрного цвета. Применяют несколько способов получения:

- окислительный обжиг с возгонкой SeO_2 ;
- нагревание шлама с концентрированной серной кислотой, окисление соединений селена до SeO_2 с его последующей возгонкой;
- окислительное спекание с содой, конверсия полученной смеси соединений селена до соединений Se(IV) и их восстановление до элементарного селена действием SO_2



Черные, серые и красные аллотропные модификации селена



Теллур

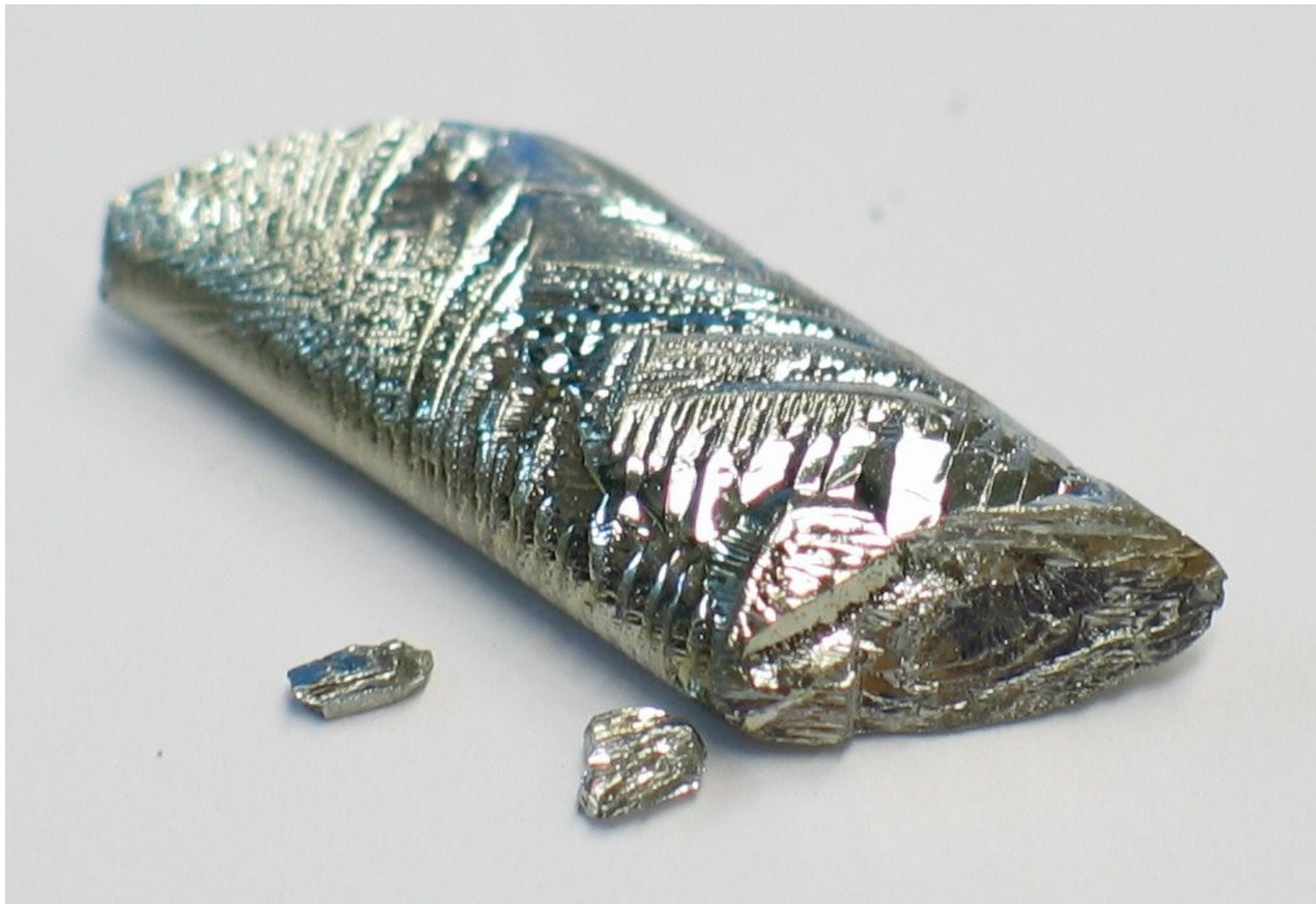
Теллур - хрупкое серебристо-белое вещество с металлическим блеском. В тонких слоях на просвет красно-коричневый, в парах - золотисто-жёлтый.

В природе встречается восемь изотопов теллура. Пять из них, ^{120}Te , ^{122}Te , ^{124}Te , ^{125}Te и ^{126}Te — стабильны.



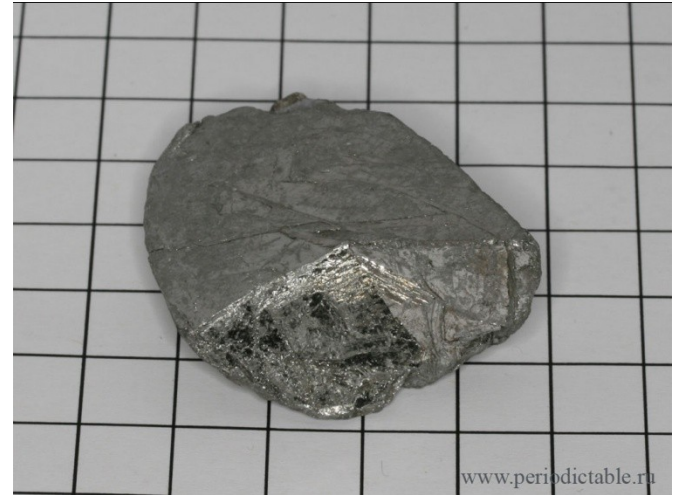
Остальные три — ^{123}Te , ^{128}Te и ^{130}Te — радиоактивны. Используется в производстве полупроводниковых материалов и, в частности, теллуридов свинца, висмута, сурьмы, цезия. Очень важное значение имеет в производстве теллуридов лантаноидов, их сплавов и сплавов с селенидами металлов для производства термоэлектрогенераторов с высоким коэффициентом полезного действия (до 72—78 %).

Слиток теллура



Теллур

Металлический теллур выпускается в виде слитков различной массы и чистоты. Как и для многих других веществ, для теллура выполняется правило: чем чище вещество и чем медленнее оно охлаждается, тем более крупные кристаллы в нем образуются. Первый кусок – часть слитка технического теллура. При затвердевании расплава образовалось много небольших кристалликов, на фото хорошо видно, что они начали расти от холодных стенок формы. Второй – теллур высокой чистоты, очищенный зонной плавкой. На самом деле, второй кусок довольно сильно поцарапан, но



Йод

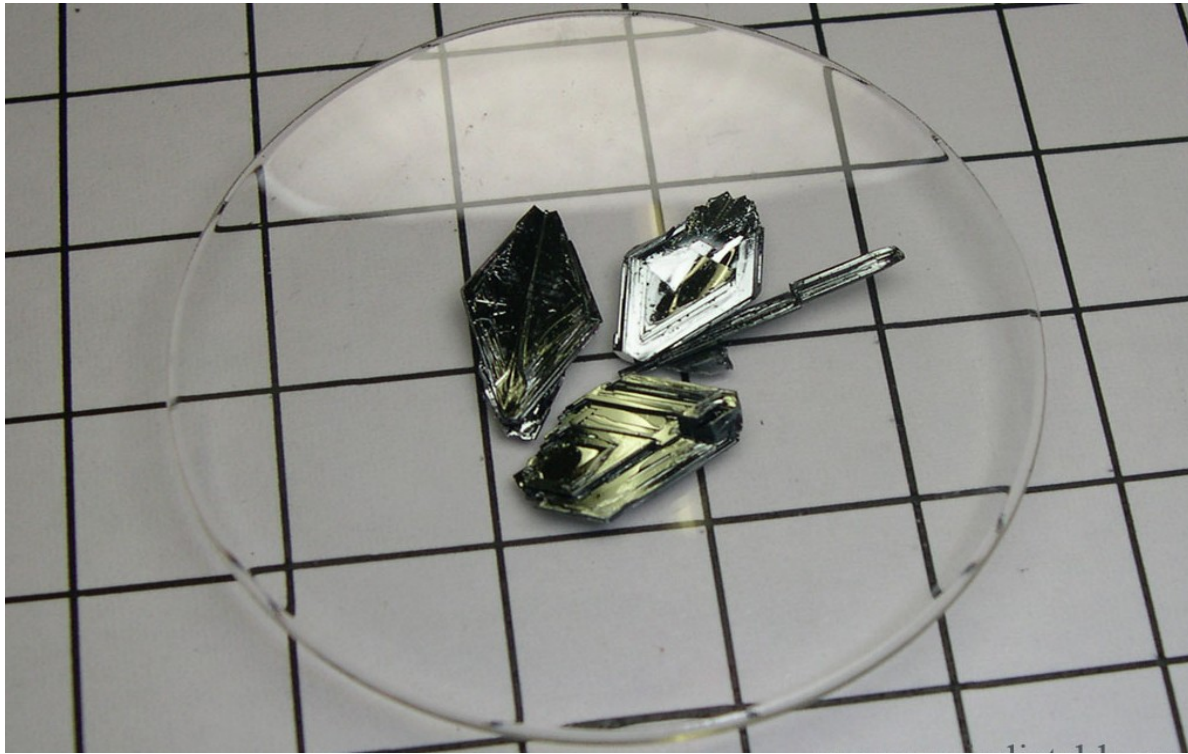
Иод (тривиальное (общеупотребительное) название — **йод**; от др.-греч. ἰώδης — «фиалковый (фиолетовый)») — элемент 17-й группы периодической таблицы химических элементов (по устаревшей классификации — элемент главной подгруппы VII группы), пятого периода, с атомным номером 53.

Обозначается символом **I** (лат. *Iodum*). Химически активный неметалл, относится к группе галогенов.

Простое вещество **йод** (CAS-номер: 7553-56-2) при нормальных условиях — кристаллы чёрно-серого цвета с фиолетовым металлическим блеском, легко



Йод



Эти кристаллы выросли всего за несколько часов в пробирке длиной 15 и диаметром 2 см. Они имеют вид плоских пластинок и имеют блестящую поверхность. Интересно отметить, что кристаллы йода похожи на кристаллы брома - те же ромбовидные пластинки.

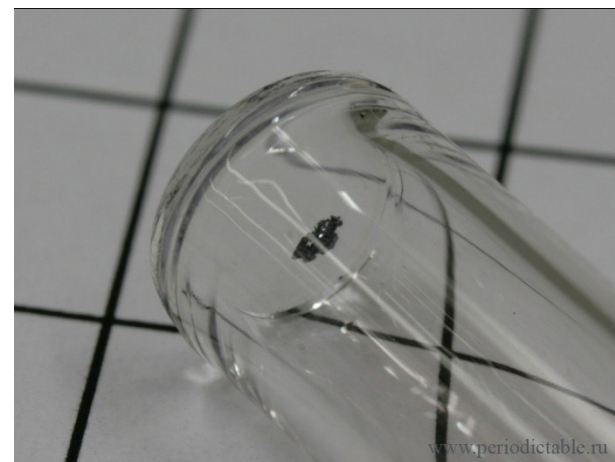
Йод

Вакуумированная стеклянная ампула в виде шарика, с несколькими граммами йода, запаянными в ней. Если любым способом создать разницу температур, как с одной стороны шарика иод начинает испаряться, а с другой – конденсироваться в виде кристаллов.



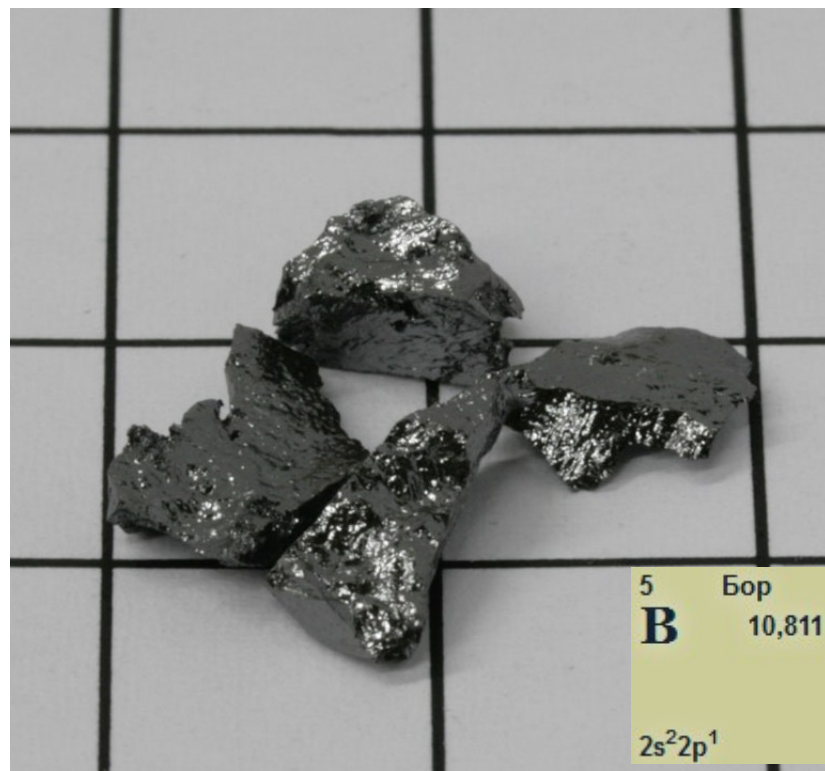
Йод

Электрический разряд в парах иода испускает довольно много ультрафиолетовых лучей и это используется при изготовлении небольших источников УФ для различных приборов. На фотографии - безэлектродная УФ лампа от хроматографического детектора. Лампа состоит из кварцевой колбочки с небольшим количеством иода внутри (на втором фото, я сконденсировал весь иод на одной стенке лампы, чтобы можно было примерно оценить его количество). В приборе она устанавливается между электродами высокочастотного генератора, и внутри колбочки возникает ВЧ разряд в парах I_2 . Поскольку в конструкции лампы нет электродов, которые могли бы реагировать с иодом, интенсивность излучения лампы остается постоянной в



Бор

Бор — элемент главной подгруппы третьей группы, второго периода периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева, с атомным номером 5. Обозначается символом **В** (лат. *Borium*). В свободном состоянии **бор** — бесцветное, серое или красное кристаллическое либо тёмное аморфное вещество. Известно более 10 аллотропных модификаций бора, образование и взаимные переходы которых определяются температурой, при которой бор был получен.



Бор

Аморфный бор выглядит как бурый порошок. При внесении в пламя он довольно легко загорается, а при смешении с окислителями (например, перманганатом калия) горит со взрывом. На основе смесей бора с хроматом или дихроматом калия изготавливают так называемые безгазовые составы. Это пиротехнические смеси, которые при горении не выделяют газообразных веществ. Такие смеси применяются, например, в качестве замедлителей в запалах.



Бор

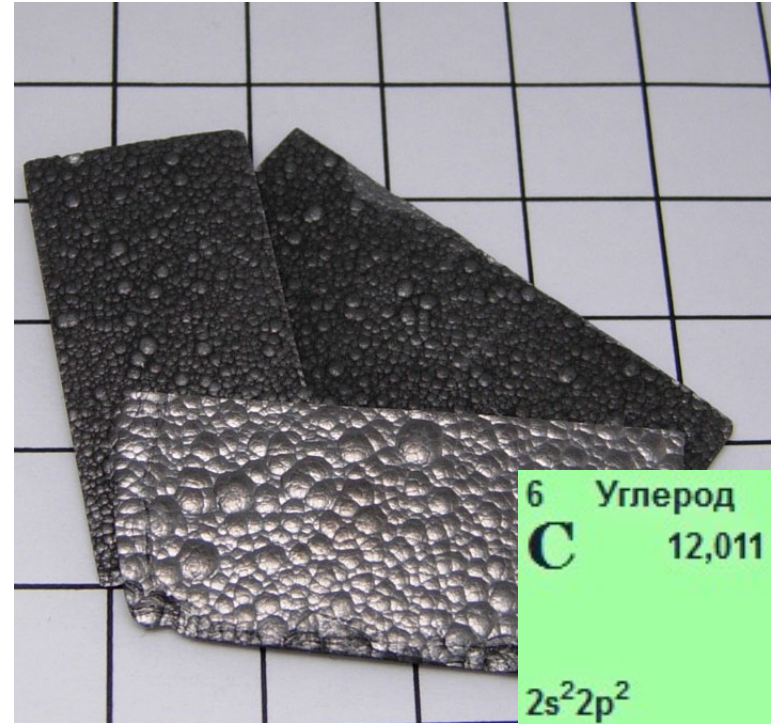


Кристаллический бор так же можно увидеть в виде порошка. Он имеет серый цвет и немного блестит из-за того, что состоит из мелких кристаллов.

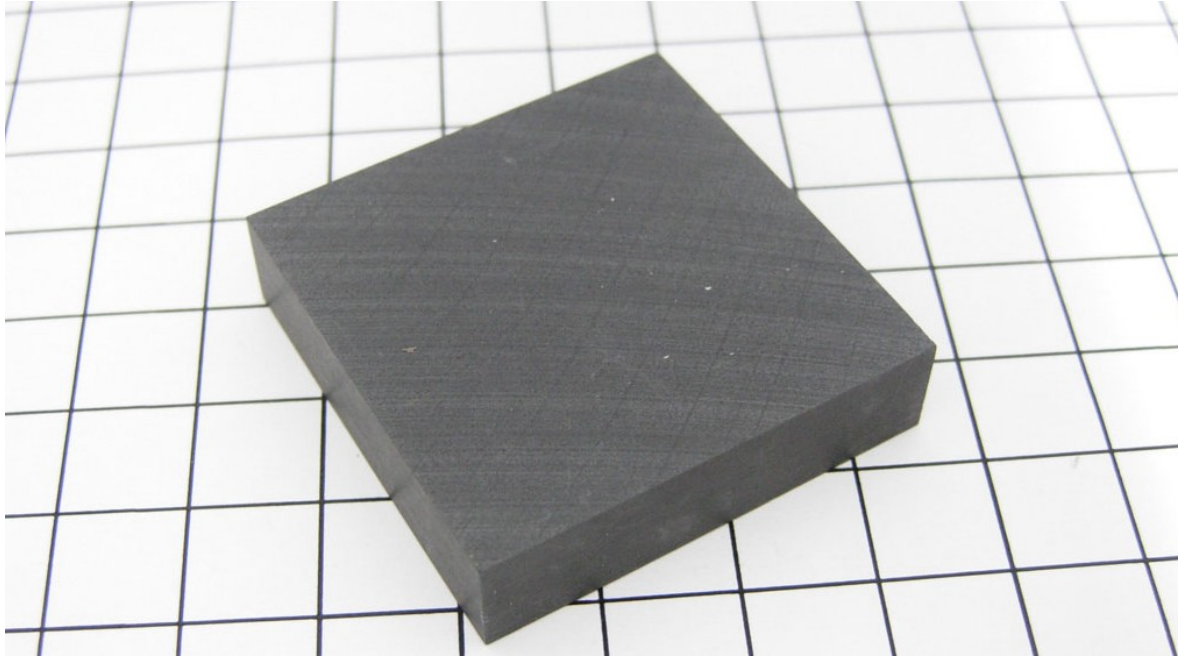
Углерод

Углерод (химический символ — С) — химический элемент 4-ой группы главной подгруппы 2-го периода периодической системы Менделеева, порядковый номер 6, атомная масса - 12,01115 .

Графит это, пожалуй, самая используемая в технике форма углерода. **Графит встречается и в самородном виде**, но для технических применений чаще используется **синтетический графит**



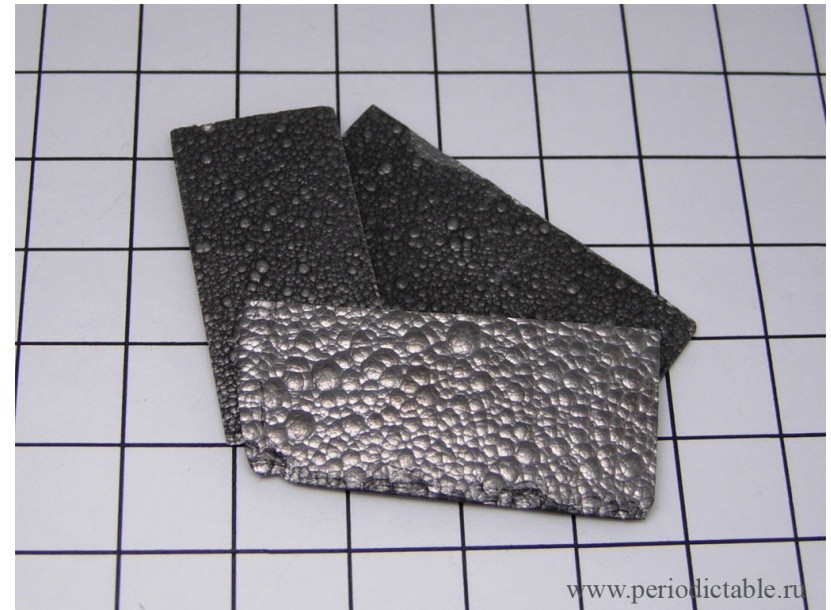
Углерод



Электроды для дуговых печей и электролизеров, замедлитель в ядерных реакторах, материал тиглей и лодочек для плавки металлов, футеровка химических аппаратов, материал нагревательных элементов, уплотнения – вот далеко не полный список применений графита. Графит обладает высокой теплопроводностью и очень устойчив к перепадам температуры, (то есть, например, раскаленный тигель из графита можно быстро охладить и он не треснет).

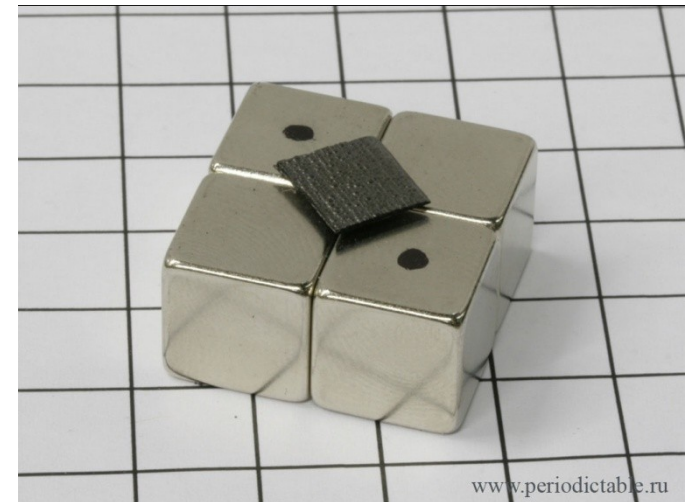
Углерод

На этом фото – образцы **пиролитического графита**. Его получают разложением летучих углеродосодержащих соединений на поверхностях, нагретых до высоких температур (пиролизом). При таком способе получения кристаллы графита растут ориентировано и поэтому пиролитический графит обладает сильно выраженной анизотропией. Например, графит можно, так же легко как и слюду, расщепить на более тонкие листочки.



Углерод

Графит является одним из самых сильных диамагнетиков (еще висмут и сверхпроводники), причем магнитная проницаемость у графита зависит от направления магнитного поля (диамагнетизм максимально выражен в направлении, перпендикулярном слоям), поэтому если тонкую пластину графита поместить над сильными магнитами, она будет находиться на высоте порядка 2 миллиметра.



Углерод

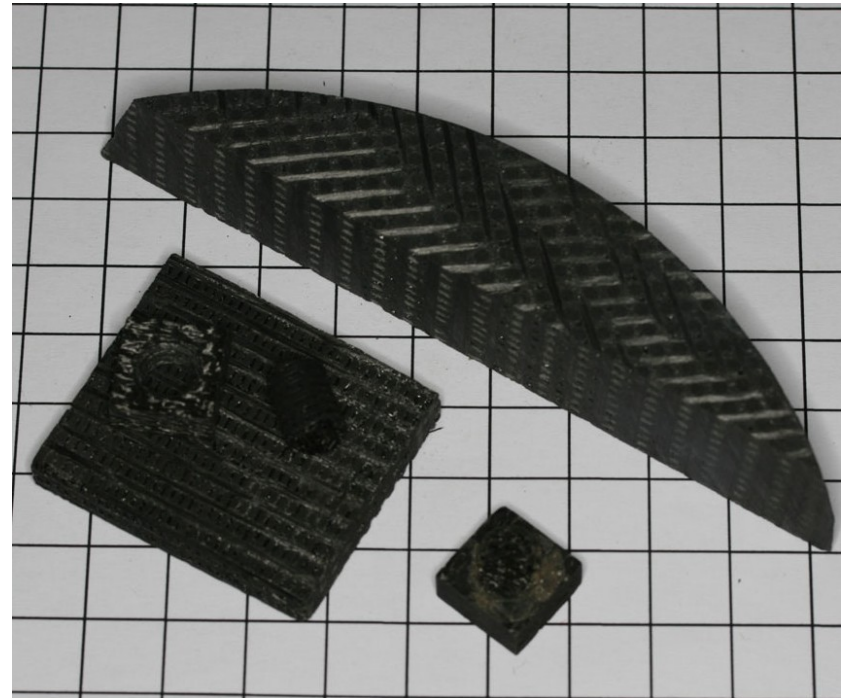


Графитовая
фольга

Сам по себе, графит это довольно хрупкое вещество, но после специальной обработки, можно превратить его в гибкий материал, из которого можно делать всевозможные термостойкие прокладки и уплотнения. На фото - графитовая фольга, как раз результат такой обработки.

Углерод

Это трехмерный композитный углеродный материал, который получен первоначальным сплетением углеродных нитей в трехмерную конструкцию, которая затем пропитывается например расплавленным кремнием. При реакции кремния с углеродом образуется карбид кремния, который придает материалу твердость и устойчивость к окислению кислородом воздуха при высоких температурах. Полученный материал хрупок, но зато выдерживает нагрузки при температурах больше 1500 градусов. Использовался в элементах конструкции космического корабля "Буран".



Фосфор

Белый фосфор представляет собой белое вещество. По внешнему виду очень похож на очищенный воск или парафин, легко режется ножом и деформируется от небольших усилий.



Красный фосфор - это более термодинамически стабильная модификация элементарного фосфора. Красный фосфор представляет собой *полимер* со сложной структурой.



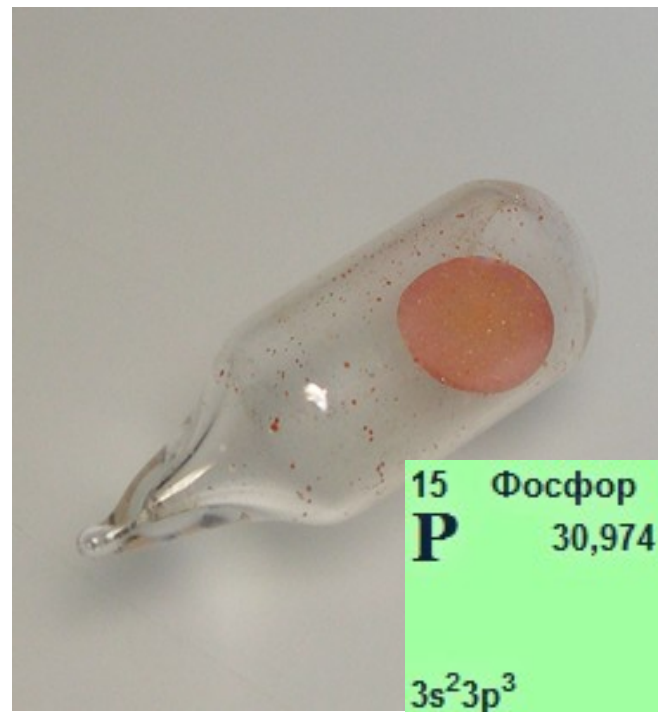
Чёрный фосфор — Чёрный фосфор представляет собой чёрное вещество с металлическим блеском, жирное на ощупь и весьма похожее на графит.



Аллотропные модификации фосфора – белый, красный, жёлтый, чёрный

Фосфор

Технический белый фосфор имеет желтоватую окраску, то есть термины «белый фосфор» и «желтый фосфор» обозначают одно и то же вещество, только разной степени чистоты. Этот образец в ампуле тоже был белым, но пожелтел на солнечном свете (примерно за полдня). Фосфор светится только в процессе окисления кислородом воздуха. Если положить фосфор под воду, слабое свечение наблюдаться будет, поскольку вода содержит небольшое количество растворенного кислорода, а в вакууме свечения нет.



Фосфор

Если нагреть белый фосфор в закрытом сосуде до 250–300 градусов, то белый фосфор превращается в порошок красного цвета (на фото) – красный фосфор. Несмотря на то, что основное количество фосфора, которое производится в промышленности, приходится на белый фосфор, красную модификацию можно встретить в лабораториях гораздо чаще, поскольку эта модификация гораздо безопаснее в использовании.



Фосфор

Еще одна модификация – **фиолетовый фосфор**. На самом деле, его с некоторой натяжкой можно считать красным фосфором, но отличий в этом случае будет все-таки больше, чем в случае белого и желтого фосфора. При нагревании белой модификации, в зависимости от температуры, могут получаться разные типы красного фосфора, которые могут различаться размером частиц, окраской и другими свойствами. Кусочки на фотографии это особо чистый фосфор, используемый в производстве полупроводников. Они получены нагреванием очень чистого белого фосфора до температуры 500 градусов в запаянных ампулах. По идее, все виды красного фосфора устойчивы на воздухе, но вот, например, если попытаться расколоть такой кусок, обломки могут загореться. Возможно, это связано с присутствием небольших примесей белого фосфора или с образованием мелких аморфных частиц, но лучше всего измельчать фиолетовый фосфор в инертной атмосфере

Фосфор



Фосфор

Свечение фосфора можно увидеть, если сильно нагреть в пробирке некоторое количество состава . Красный фосфор при нагревании превращается в белый, его пары конденсируются на более холодных стенках пробирки и начинают светиться. На первой фотографии видно, что от образца желтого фосфора идет небольшой дым – так желтый фосфор окисляется на воздухе. Если взять образец меньшего размера, то образец может и загореться.



Сера

Сéра — элемент 16-й группы (по устаревшей классификации — главной подгруппы VI группы), третьего периода периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева, с атомным номером 16. Проявляет неметаллические свойства. Обозначается символом **S** (лат. *Sulfur*). В водородных и кислородных соединениях находится в составе различных ионов, образует многие кислоты и соли. Многие серосодержащие



Сфалерит



Сфалерит - минерал, сульфид цинка **жёлтого, красновато-оранжевого, зеленовато-жёлтого, серого, тёмно-серого** цвета.

Встречается в кристаллах тетраэдрического, реже ромбодо-декаэдрического габитуса.



Сурьма

Сурьма́ (лат. *Stibium* — полуметалл серебристо-белого цвета с синеватым оттенком, грубозернистого строения. Известны четыре металлических аллотропных модификаций сурьмы, существующих при различных давлениях, и три аморфные модификации (взрывчатая, чёрная и жёлтая сурьма).



Сурьма

При комнатной температуре сурьма очень хрупкая.



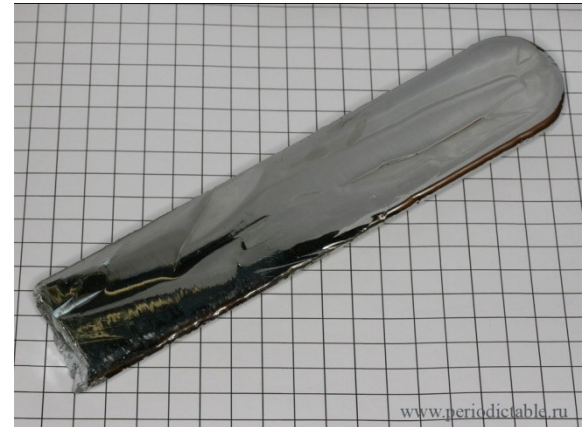
Образцы крупного слитка технической сурьмы.



Слиток сурьмы

Сурьма

Для полупроводниковой промышленности требуется чистый металл. На этих фотографиях – слиток сурьмы марки Су-000. Чистота металла в нем составляет 99.99%. Получают такие слитки зонной плавкой металла в графитовых лодочках. На самом деле, это не самая чистая сурьма. Существуют марки сурьмы Су-0000 и Су-00000, содержание металла в которых составляет, соответственно, 99.999% и 99.99999%. Легко заметить разницу в размерах кристаллов по сравнению с предыдущими образцами сурьмы. Более чистая сурьма образует очень крупные кристаллы. На размер кристаллов



Мышьяк

Мышьяк - хрупкий полуметалл
стального цвета.



Мышьяк

Соединения мышьяка с некоторыми редкими металлами (например галлием, индием, марганцем) достаточно широко применяются при изготовлении полупроводниковых лазеров, ИК сенсоров, диодов и других устройств. Для синтеза таких соединений требуются исходные вещества очень высокой чистоты (99.9999% и выше) так как свойства полученных полупроводников очень сильно зависят даже от наличия небольшого количества (тысячные доли процента) примесей.

Соединения мышьяка с галлием



В ампуле находится мышьяк чистотой 99.99999% (или 7N) фирмы Alfa Aesar, используемый при синтезе полупроводниковых соединений. Ампула заполнена аргоном, чтобы мышьяк не окислялся.

Таблица Менделеева

Группа → Период ↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo	
Лантаноиды *				57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
Актиноиды **				89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

п·o·p Семейства химических элементов			
■	Щелочные металлы	■	Неметаллы
■	Щёлочноземельные металлы	■	Галогены
■	Переходные металлы	■	Инертные газы
■	Металлы	■	Лантаноиды
■	Полуметаллы — металлоиды	■	Актиноиды