

**В. Брэгг. История электромагнетизма
ОГИЗ
Москва – Ленинград
1947**

Из Предисловия.

В начале 1941 г. выяснилась настоятельная необходимость в значительном количестве людей, способных управлять новыми техническими средствами ВОЙНЫ.....

Таких людей надо специально обучать, поскольку без понимания и умения нельзя быстро освоить принципы новых приборов. В большинстве своём эти приборы, особенно те из них, которые употребляются в радиосвязи, являются приборами электрическими.....

Тема № 1. Проводниковые МЭТ

Лекция 1-01

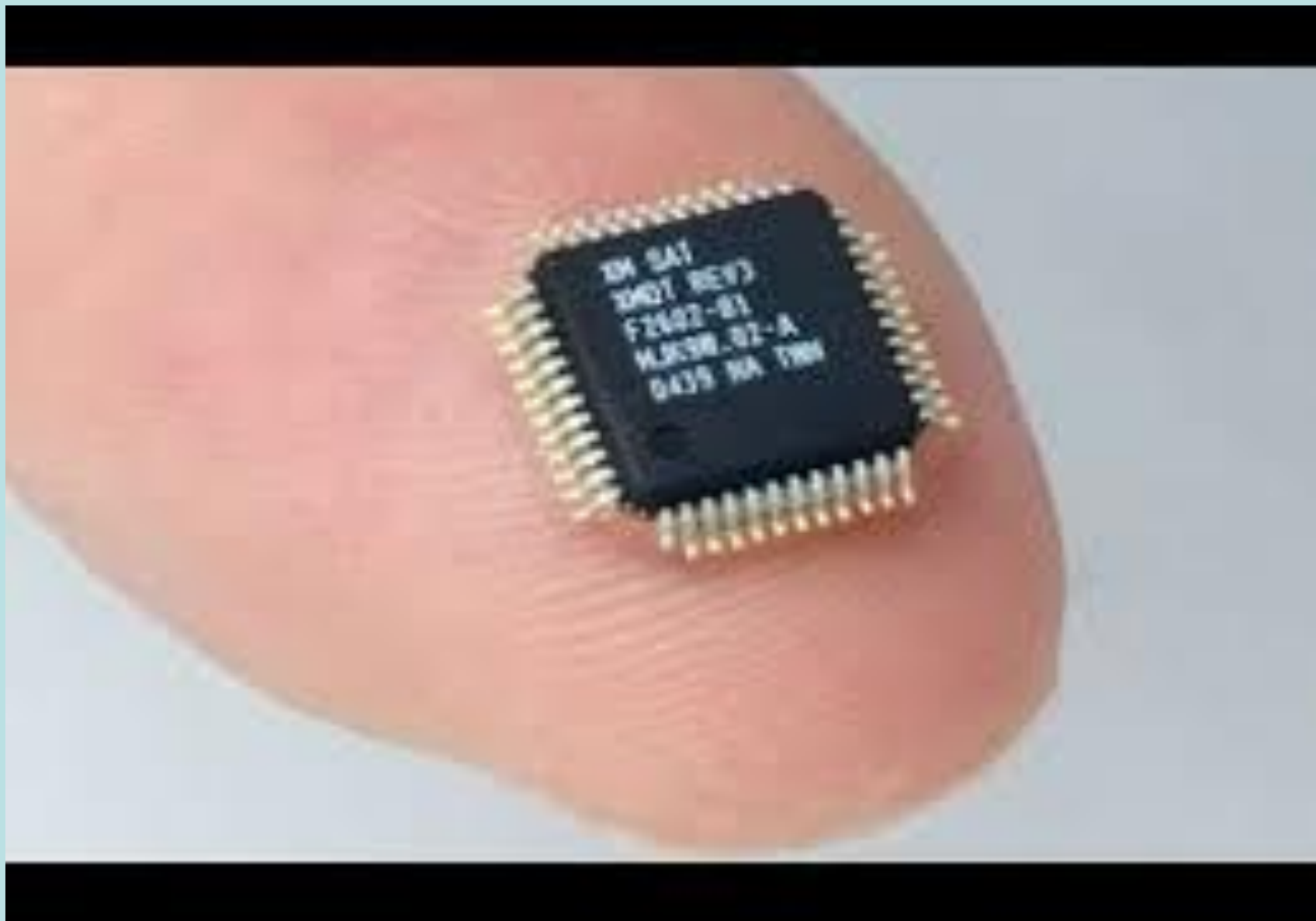
Физические подходы к созданию проводниковых материалов с заданными свойствами

- 1. Предмет и задачи дисциплины**
- 2. Электронные процессы в металлах**
- 3. Влияние структурных дефектов на электрические свойства металлов. Свойства металлических сплавов**
- 4. Размерные эффекты в тонких металлических пленках**
- 5. Перколяционные эффекты в композитных сильно неоднородных системах**





Интегральная микросхема 1



1. Введение. Предмет и задачи дисциплины МЭТ

Основной целью дисциплины «МЭТ» является: подготовка курсантов по физике микро- и нанопроцессов, необходимая для формирования способности к деятельности, обеспечивающей модернизацию, внедрение и эксплуатацию различных средств связи, а также в качестве базы для изучения военно-технических и специальных дисциплин.

Курсанты должны получить представление о механических, электрофизических, теплофизических, химических и оптических свойствах материалов, используемых при создании элементов ЭТ, с учетом особенностей их функционирования и условий эксплуатации.

Предметом изучения в дисциплине «МЭТ» являются физические свойства материалов электронных компонентов, используемых в технике связи.

Задачи дисциплины:

- 1. Понимание курсантами физических процессов и явлений в проводящих, диэлектрических и магнитных средах;**
- 2. умение решать задачи по данным темам;**
- 3. владение методикой измерений основных параметров проводников, п/п и диэлектрических материалов, используемых в электронной технике.**

2. Электронные процессы в металлах

Проводниками (П) называют материалы, обладающие сильно выраженной электропроводностью.

Проводить эл. ток могут среды в любом агрегатном состоянии.

Твердыми П являются металлы (М), сплавы и некоторые модификации углерода.

Для понимания большинства свойств М достаточно теории Друде-Зоммерфельда созданной на рубеже 19 и 20 веков.

Основные предположения теории Друде

Классическая теория проводимости металлов, объясняющая многие опытные факты, основывается на следующих предположениях:

1. металл содержит свободные электроны (электроны проводимости), образующие идеальный газ;
2. в металле электроны движутся хаотически, что является следствием их столкновений с ионами кристаллической решетки. Средняя тепловая энергия электронов $\langle E \rangle = \langle m_e v^2 / 2 \rangle$ является их средней кинетической энергией;
3. ионы считаются неподвижными, поскольку имеют массу много большую по сравнению с массой электронов m_e .

Статистика электронов в металлах

Эл - частицы со спином $1/2 \rightarrow$ относятся к фермионам.

Эл газ в КР надо рассматривать **как квантовую систему**

тождественных фермионов, которые подчиняются принципу

запрета Паули, а их распределением по энергиям является

распределение Ферми-Дирака

$$\langle n_E \rangle = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1}.$$

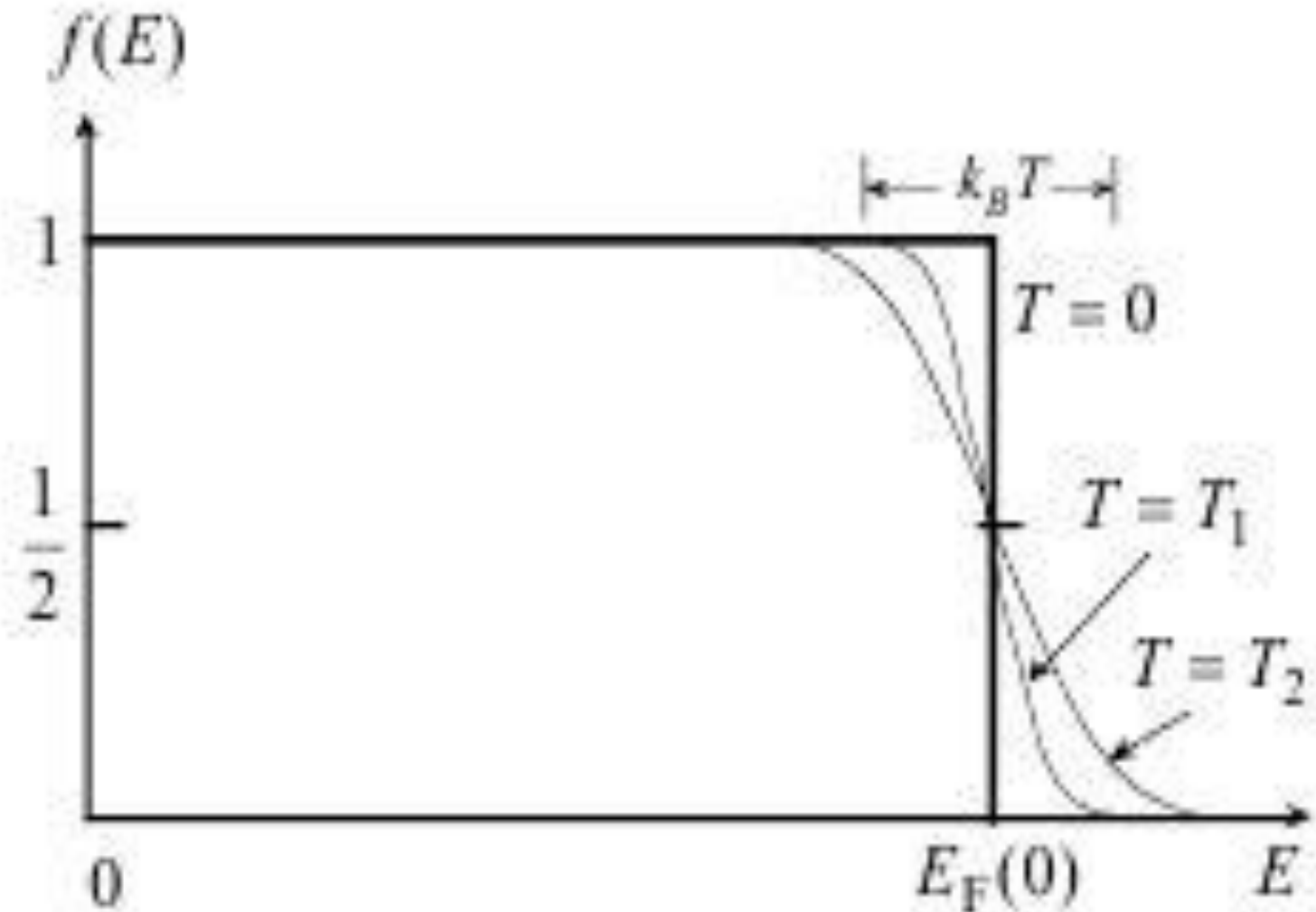
Здесь $\langle n_E \rangle$ - число заполнения энергетического уровня с энергией

E , E_F - энергия Ферми, которая определяется положением высшего
заполненного уровня (Ферми) при $T = 0$ К.

В силу **принципа запрета Паули** и **принципа минимума**

потенциальной энергии, при $T = 0$ К все электроны займут самые
низшие уровни энергии.

ФД – распределение при разных температурах $f(E) = \langle n_E \rangle$



Действие внешнего эл. поля E сводится к появлению у эл (из-за столкновений с ионами КР) постоянной дрейфовой скорости v_D , которая накладывается на тепловую

$$v_D = -\frac{eE\tau}{m_e}, \quad \text{или по модулю} \quad v_D = \frac{eE\tau}{m_e},$$

где τ - среднее время свободного пробега эл между столкновениями с ионами. Плотность дрейфового тока выражается формулой

$$\mathbf{j} = nev_D,$$

где n - концентрация электронов. Сравнивая это выражение с законом Ома в дифференциальной форме

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E},$$

получаем для электропроводности металла

$$\sigma = \frac{e^2 n \tau}{m_e}.$$

Теплопроводность металлов. Закон Видемана-Франца

Хороший проводник тепла = Хороший проводник электричества

Теплопроводность в металлах главным образом осуществляется электронами, а коэффициент теплопроводности κ дается формулой

$$\kappa = \frac{1}{3} v_T^2 \tau C_V,$$

где C_V - теплоемкость металла при постоянном объеме. С учетом приведенных формул, отношение κ к σ (**закон Видемана-Франца**) имеет вид

$$\frac{\kappa}{\sigma} = \frac{3}{2} \left(\frac{k}{e} \right)^2 T,$$

где k - постоянная Больцмана. Из (2.5) следует, что отношение κ к σ для всех металлов одинаково.

Температурная зависимость удельного сопротивления металлов

В небольшом интервале температур вблизи 0° С удельное сопротивление ρ металлов и сплавов изменяется по линейному закону

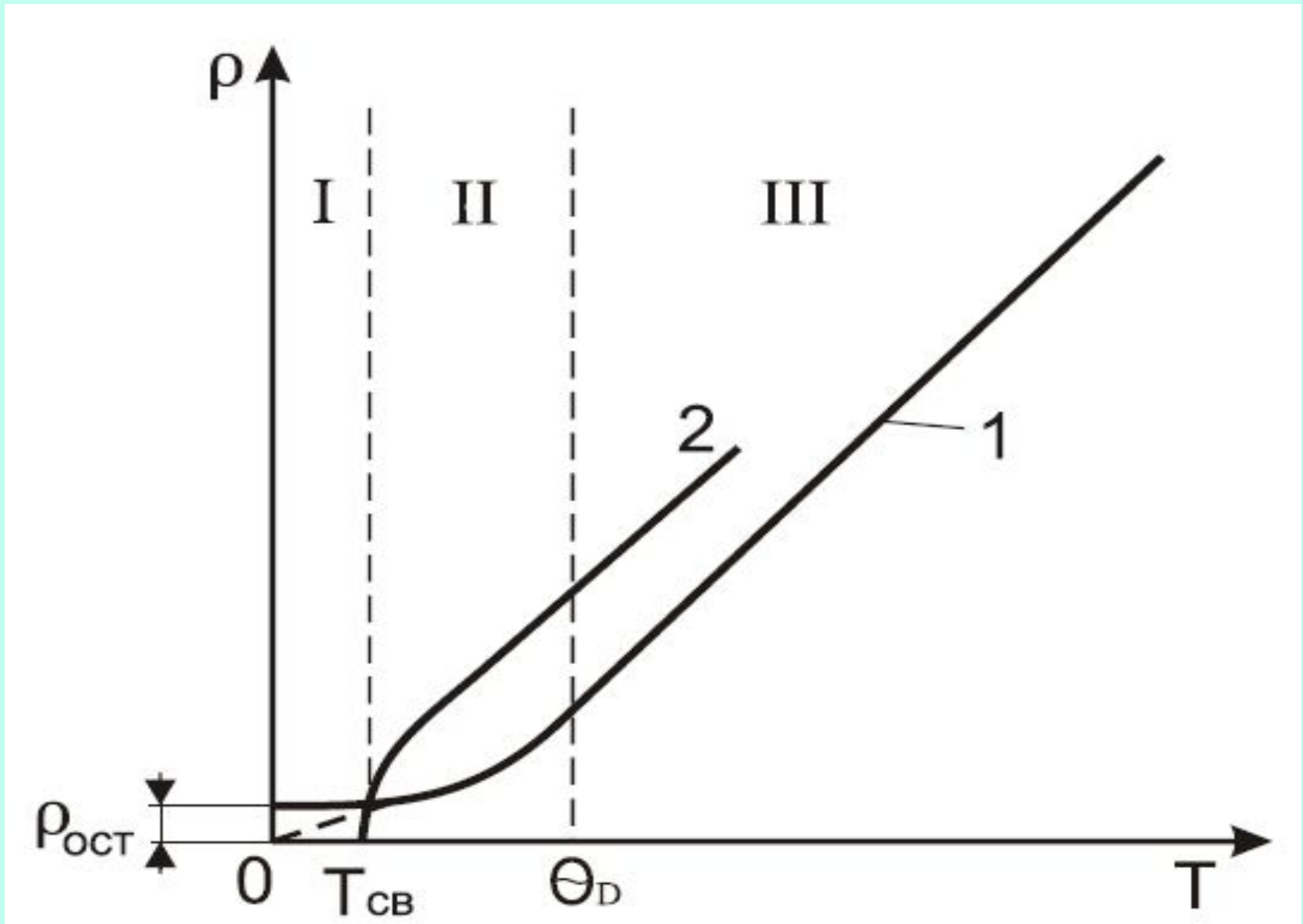
$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t),$$

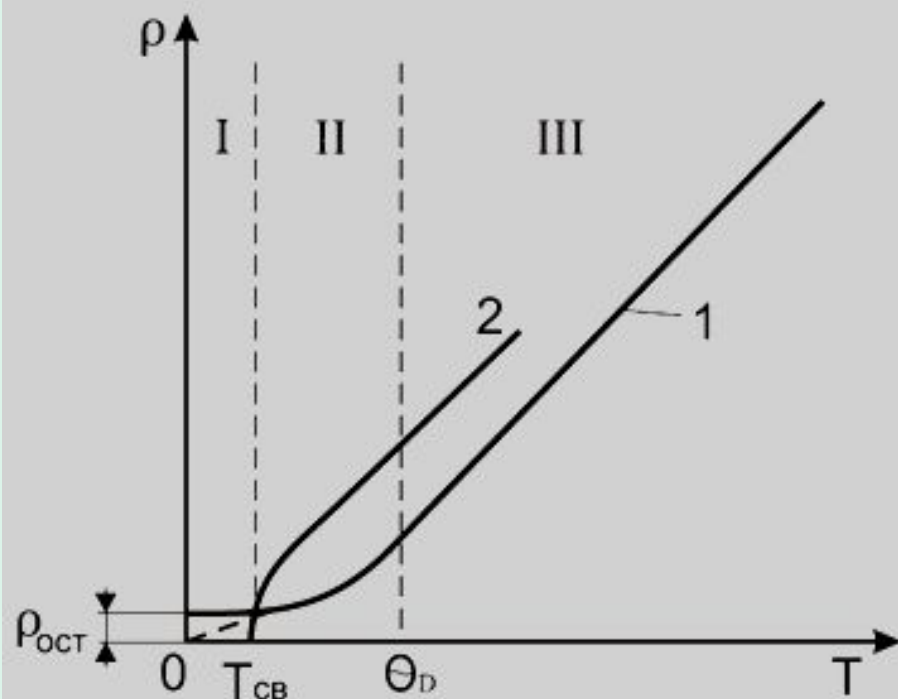
где $t \equiv t^\circ$ – температура по Цельсию, α – температурный коэффициент электрического сопротивления, который определяется формулой

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{d\rho}{dt} .$$

При понижении температуры электропроводность ($\sigma = 1/\rho$) и теплопроводность увеличиваются. Около половины М при очень низких температурах становятся сверхпроводниками.

Температурная зависимость удельного электрического сопротивления металла (1) и сверхпроводника (2)





Температурная зависимость
удельного электрического
сопротивления
металла (1) и сверхпроводника (2)

В области сверхнизких температур, близких к абсолютному нулю, значение ρ практически не зависит от температуры (участок I) и определяется остаточным сопротивлением $\rho_{ост}$

В узкой переходной области II удельное сопротивление растет по степенной зависимости $\rho \sim T^n$

Экспериментально установлено, что линейная зависимость справедлива от

$T = \frac{2}{3} \theta_D$ и сохраняется у большинства

металлов вплоть до температуры плавления. В области линейной зависимости (III) удельное электрическое сопротивление определяется по формуле

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_\rho (T - T_0)]$$

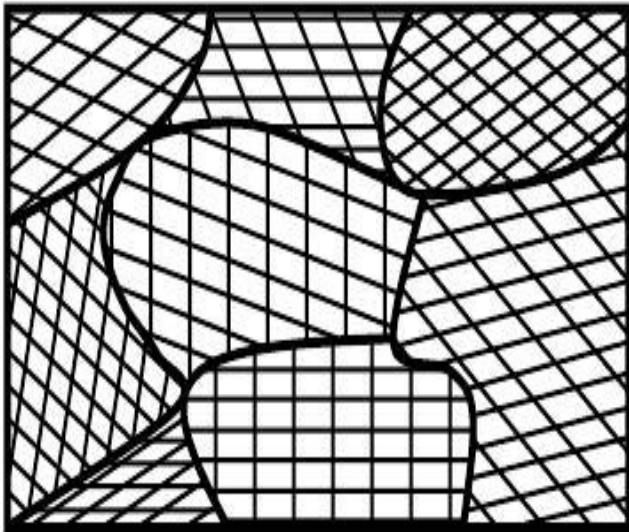
Для справки

Температура Дебая Θ_D - температура, при которой число возбужденных колебаний = числу степеней свободы кристалла.

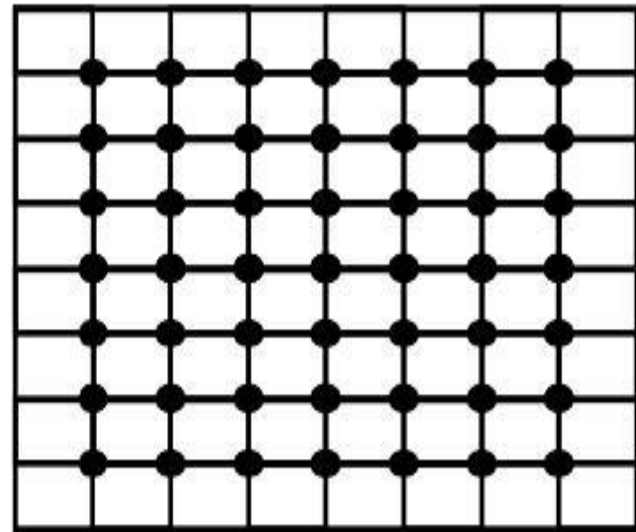
3. Влияние структурных дефектов на электрические свойства металлов. Свойства металлических сплавов

Атомы в монокристалле образуют регулярную кристаллическую решетку (КР) .

В КР выделяется элементарная ячейка (ЭЯ) – «кирпичик». Складывая эти кирпичики - восстанавливаем весь монокристалл.



Поликристалл



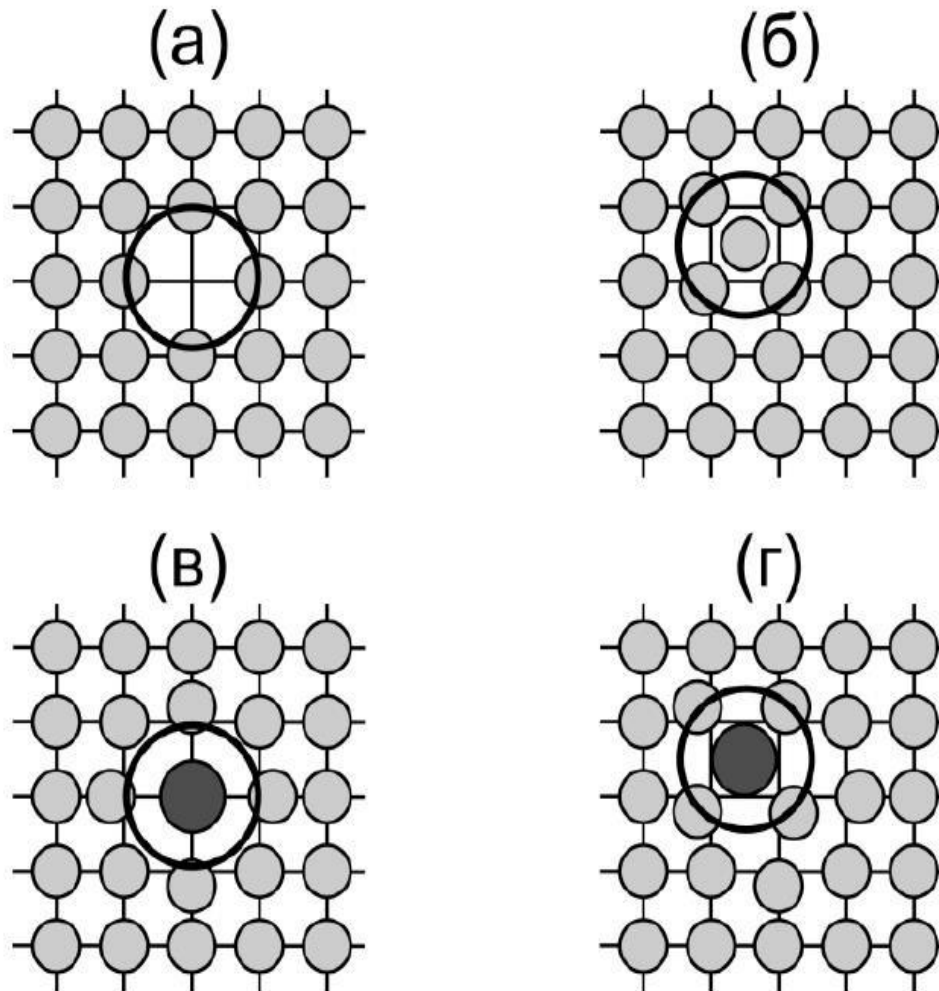
Монокристалл

Дефекты кристаллов

Точечные (нульмерные) дефекты 0d	Во всех трех измерениях не превышают одного или нескольких междуатомных расстояний	Вакансии, атомы в междоузлиях
		Примесные атомы, ди- и тривакансии
Линейные (одномерные) дефекты 1d	Протяженные в одном измерении (на расстояния, сравнимые с размером кристалла)	Краевые и винтовые дислокации, микротрещины
Поверхностные (двумерные) дефекты 2d	Простираются в двух измерениях на расстояния, сравнимые с размером кристалла	Плоскости двойникования, границы зерен и блоков, стенки доменов, дефекты упаковки, поверхность кристалла
Объемные (трехмерные) дефекты 3d		Микропустоты, поры, частицы другой фазы, включения

<p>Точечные (нульмерные) дефекты</p> <p>0d</p>	<p>Во всех трех измерениях не превышают одного или нескольких межуатомных расстояний</p>	<p>Вакансии, атомы в междоузлиях</p> <p>Примесные атомы, ди- и тривакансии</p>
<p>Линейные (одномерные) дефекты</p> <p>1d</p>	<p>Протяженные в одном измерении (на расстояния, сравнимые с размером кристалла)</p>	<p>Краевые и винтовые дислокации, микротрещины</p>
<p>Поверхностные (двумерные) дефекты</p> <p>2d</p>	<p>Простираются в двух измерениях на расстояния, сравнимые с размером кристалла</p>	<p>Плоскости двойникования, границы зерен и блоков, стенки доменов, дефекты упаковки, поверхность кристалла</p>
<p>Объемные (трехмерные) дефекты</p> <p>3d</p>		<p>Микропустоты, поры, частицы другой фазы, включения</p>

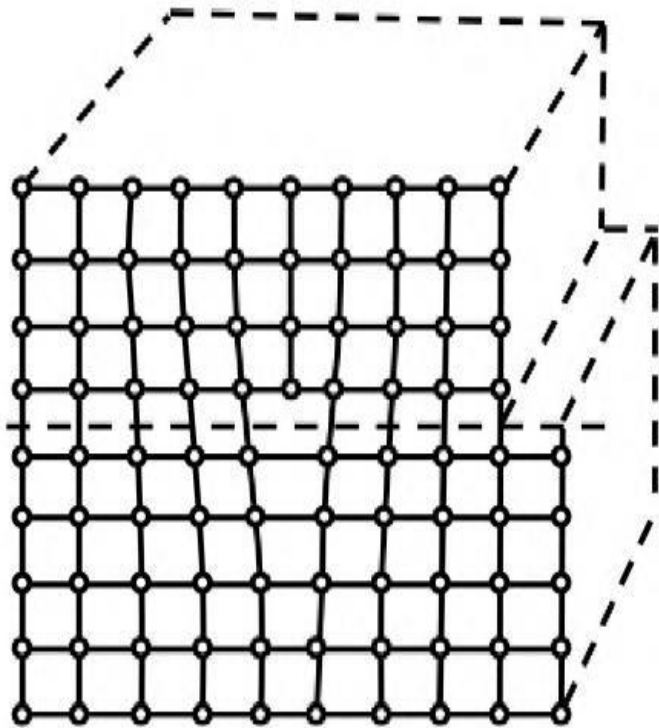
Точечные дефекты



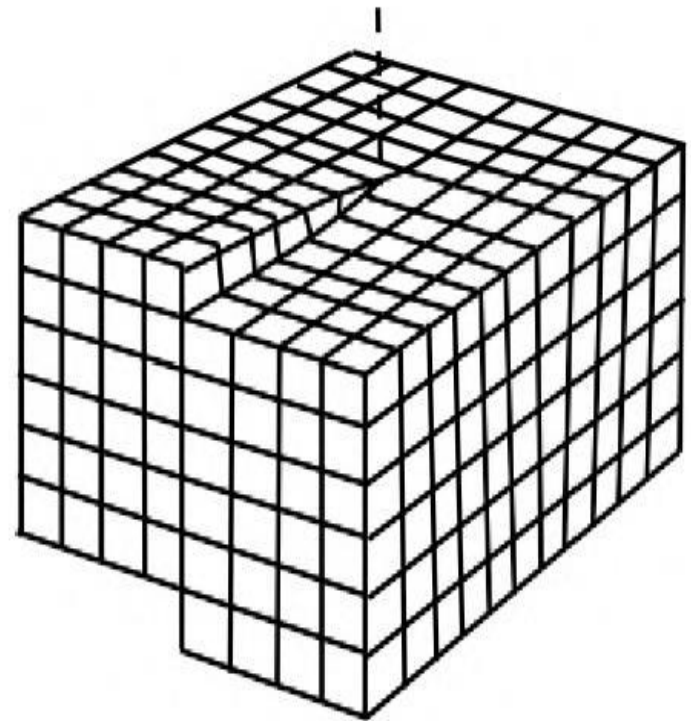
Точечные дефекты: (а) вакансия, (б) атом внедрения, (в) примесный атом замещения, (г) примесный атом внедрения

Линейные дефекты

К линейным дефектам КР относятся дислокации.
Простейшими видами дислокаций являются краевая и винтовая.



Краевая дислокация



Винтовая дислокация

Причины рассеяния эл в реальных металлах (создающего электрическое сопротивление):

- 1) тепловые колебания узлов КР (ρ_T - тепловая составляющая эл сопротивления);**
- 2) примеси и дефекты структуры ($\rho_{ост}$ - составляющая, обусловленная нетепловыми факторами).**

Правило Маттиссена: $\rho = \rho_T + \rho_{ост}$.

Примеси вносят наиболее существенный вклад в величину $\rho_{ост}$.

Рассеяние эл проводимости на атомах примеси тем сильнее, чем больше разница в валентности примесного элемента и металла – растворителя.

Атомы любого примесного элемента повышают ρ , даже если сама примесь обладает большей σ .

Дефекты структуры - вакансии, атомы в междоузлии, дислокации, границы зерен и субзерен и т.д., также вносят вклад в рост $\rho_{ост}$. Чем выше плотность дефектов, тем больше удельное сопротивление.

Удельное сопротивление металлических сплавов

ρ сплава всегда выше, чем ρ любого его компонента. Характер изменения ρ сплава зависит от фаз и структур в сплаве, что определяется диаграммой состояния. В сплавах со структурой твердых растворов рост может значительно превосходить тепловую составляющую ρ_T . Для большинства твердых растворов изменение $\rho_{ост}$ в зависимости от состава сплава хорошо описывается функцией (закон Нордгейма)

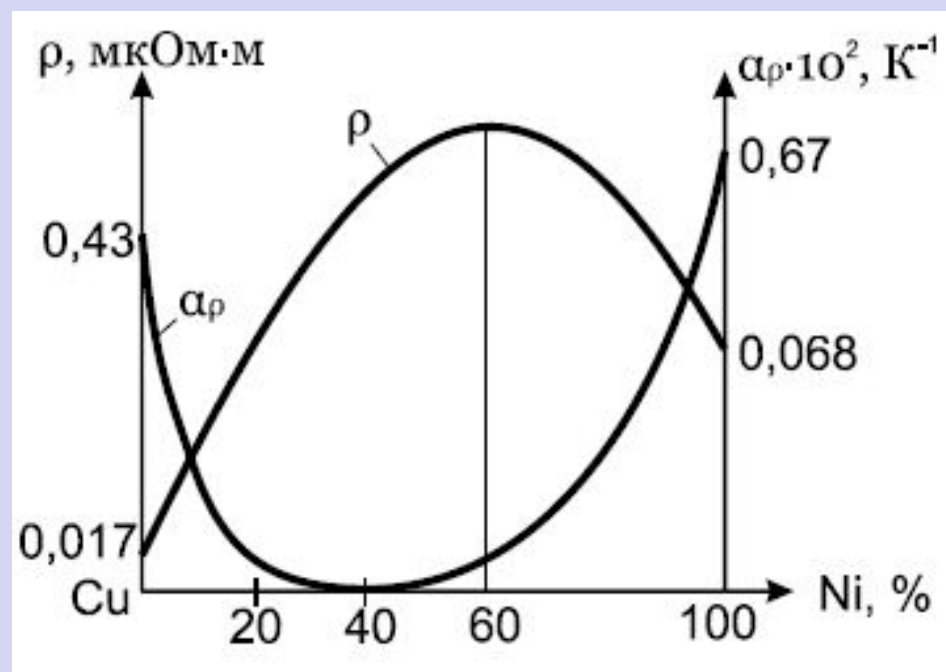
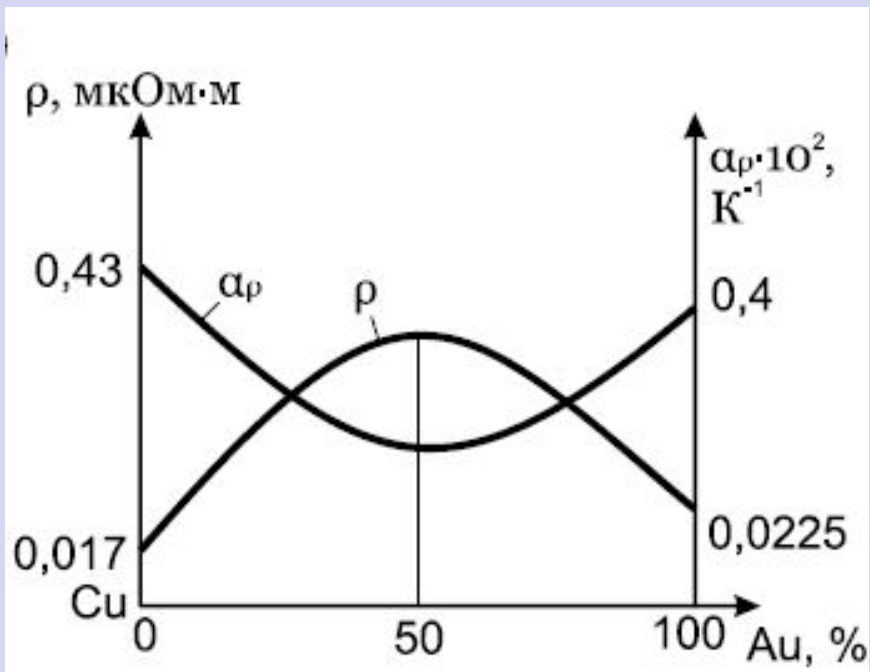
$$\rho_{ост} = c \cdot x_A x_B = c \cdot x_A (1 - x_A)$$

где x_A и x_B - атомные доли компонентов в сплаве; c - постоянная, зависящая от природы сплава.

Справка

Металлические **твердые растворы - сплавы**, однофазные в твердом состоянии, в которых один из компонентов (растворитель) сохраняет свою КР, а атомы другого (или других) компонента располагаются в решетке растворителя, изменяя ее размеры (периоды решетки).

Зависимость ρ и α от состава сплава непереходных М (слева) и в случае, когда один из компонентов есть М переходной группы (справа)



Справка: Переходные металлы - элементы побочных подгрупп таблицы Менделеева, в атомах которых появляются электроны на d- и f-орбиталях.

4. Размерные эффекты в тонких металлических пленках

Умеем делать пленки толщиной от 10^{-7} до 10^{-8} м.

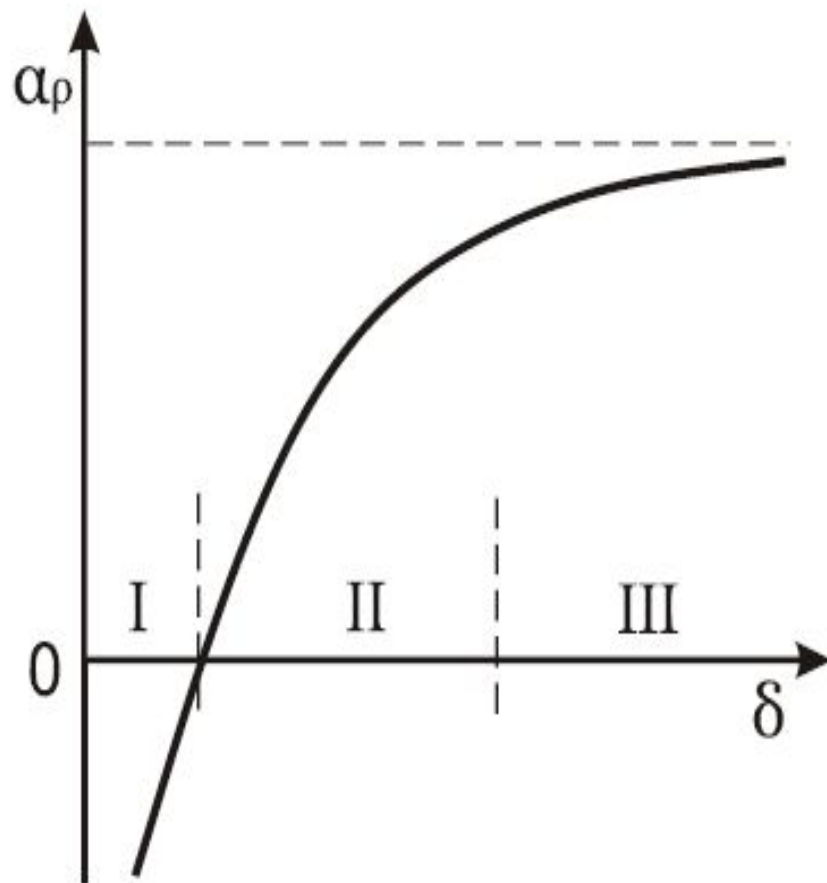
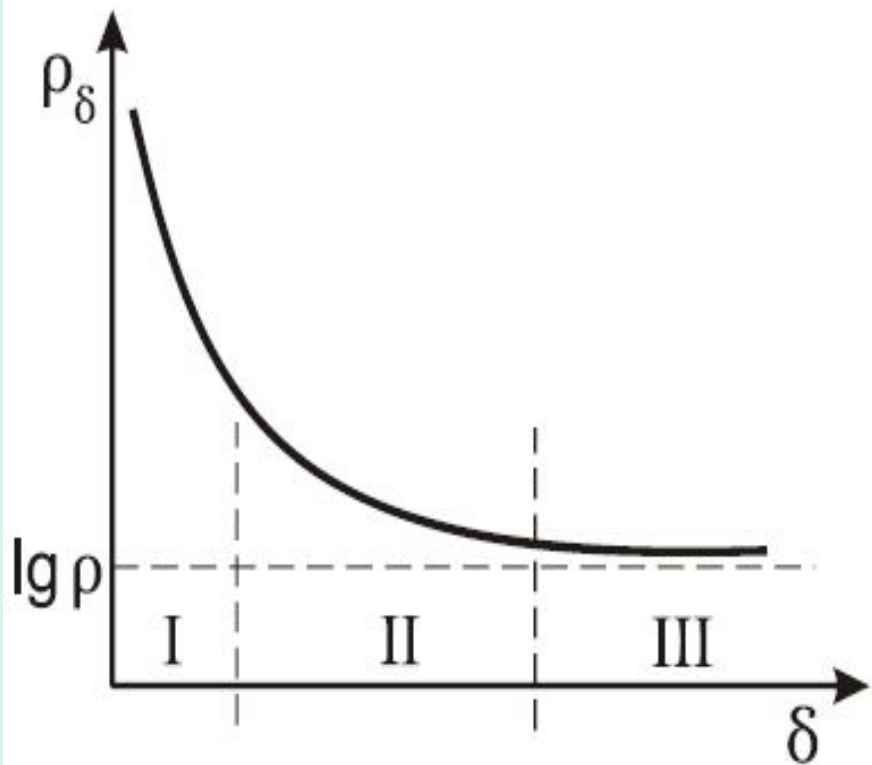
По выполняемым функциям различают **резистивные пленки** (тонкопленочные резисторы) и **высокопроводящие** пленки (контактные площадки, межэлементные соединения, обкладки конденсаторов).

Возможна различная структура пленки от аморфной до монокристаллической.

Размерный и структурный факторы приводят к существенным отличиям эл. свойств тонких пленок от свойств объемных М.

Особенно сильно проявляется размерный эффект в том случае, когда толщина пленки соизмерима с длиной свободного пробега электронов.

Зависимость ρ и α от толщины металлической пленки



Три области

- I Малая толщина ($\delta = 1...10$ нм): большое значение ρ и отрицательное α . Объясняется технологией изготовления. Сопротивление такой пленки во многом определяется поверхностным сопротивлением участков диэлектрической подложки. Для таких пленок характерно понижение ρ с увеличением температуры ($\alpha < 0$), как у диэлектриков.

Другая причина: малая толщина пленки искусственно ограничивает длину свободного пробега эл. В соответствии с теорией Зоммерфельда формула

$$\sigma = \frac{e^2 n \tau}{m_e}$$

уточняется

$$\sigma = e^2 n l_F / m^* v_F$$

т.е. σ пропорциональна длине свободного пробега l_F или ρ обратно пропорциональна l_F .

- II При $\delta = 10 \dots 100$ нм диэлектрические промежутки между островками осажденного металла исчезают, пленка становится сплошной и $\alpha > 0$. Однако ρ пленки еще велико из-за высокой концентрации дефектов, образующихся в процессе ее роста (поглощаемых из газовой среды). Продолжают также сказываться размерные эффекты.**
- III При $\delta > 100$ нм сопротивление пленки близко к сопротивлению массивного образца, структура пленки и размерный эффект уже не оказывают значительного влияния на электрические свойства. Но даже у толстой пленки удельное сопротивление больше, чем у массивного образца, т.к. она не имеет строгой кристаллической структуры.**

При расчете сопротивления пленочного резистора используют «сопротивление квадрата».

Сопротивление пленочного резистора прямоугольной формы (номинальное сопротивление)

$$R = \rho \frac{l}{bd},$$

где ρ - удельное объемное сопротивление резистивного материала, l, b, d - длина, ширина и толщина резистивной пленки. Сопротивление квадрата резистивной пленки, не зависящее от его размеров и выражающееся в Ом

$$R_{\square} = \frac{\rho}{d}.$$

Коэффициент формы резистора

$$K_{\Phi} = \frac{l}{b}.$$

Общее сопротивление пленочного резистора прямоугольной формы дается формулой

$$R = R_{\square} K_{\Phi}.$$

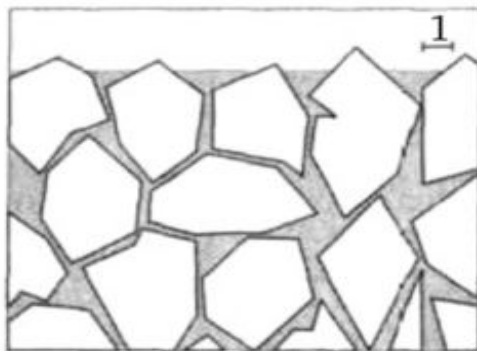
5. Перколяционные эффекты в композитных сильно неоднородных системах

- **Композит (композитный материал)** - многокомпонентный материал, состоящий из 2 или более компонентов с существенно различными физическими и/или химическими свойствами, которые приводят к появлению нового материала с характеристиками, отличными от характеристик отдельных компонентов и не являющимися их простой суперпозицией.
- В составе композита принято выделять **матрицу и наполнитель**.
- Варьируя состав матрицы и наполнителя, их соотношение, ориентацию наполнителя, получают широкий спектр материалов с требуемым набором свойств.

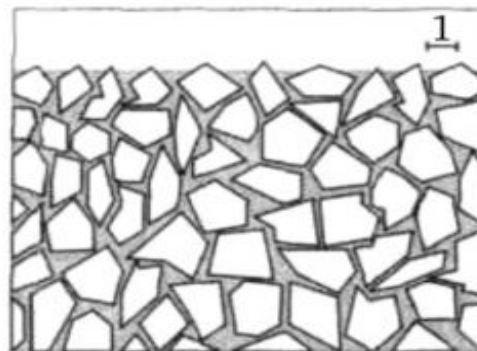
- Среди композитных проводящих материалов выделим **контактолы и керметы**.

Контактолы (токопроводящие клеи, краски) - маловязкие полимер-ные композиции. В качестве матрицы используют синтетические смолы, а токопроводящим наполнителем являются порошки металлов.

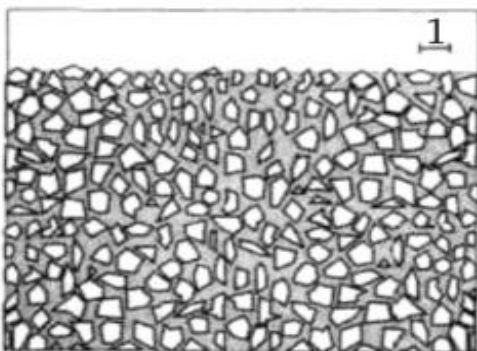
Керметы (тонкопленочные резисторы) - металлодиэлектрические композиции с неорганической матрицей. Существенным преимуществом керметных пленок является возможность варьирования их удельным сопротивлением в широких пределах.



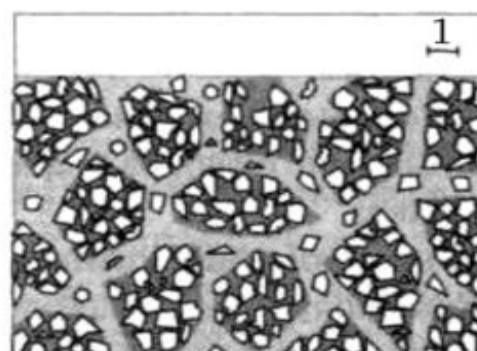
Макронаполненный
КОМПОЗИТ



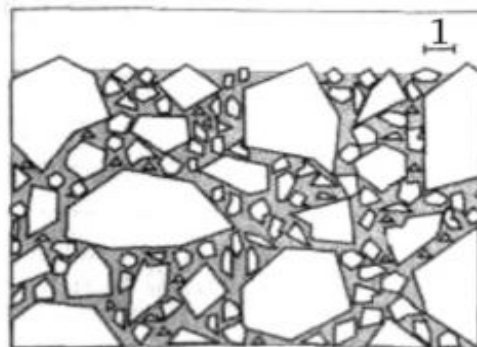
Мининаполненный
КОМПОЗИТ



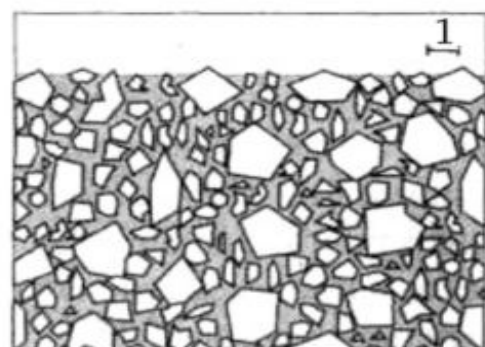
Гомогенный
микронаполненный
КОМПОЗИТ



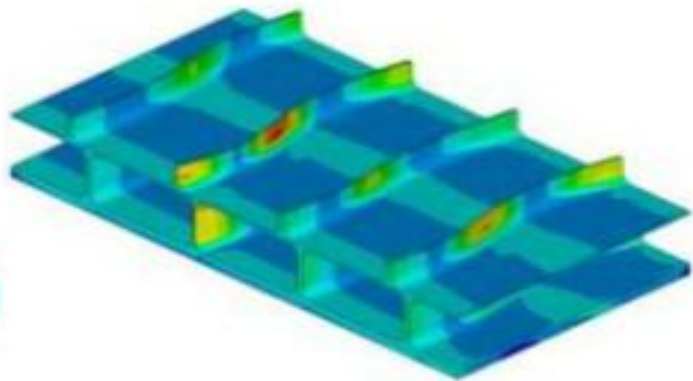
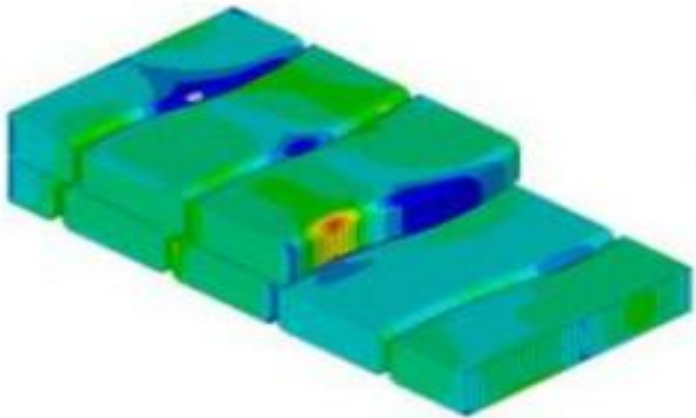
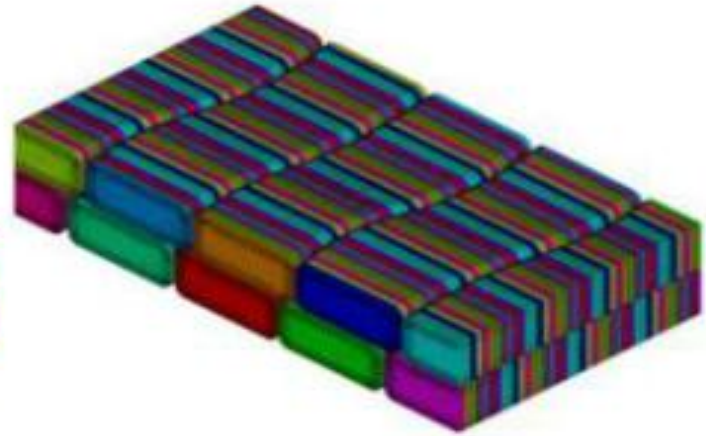
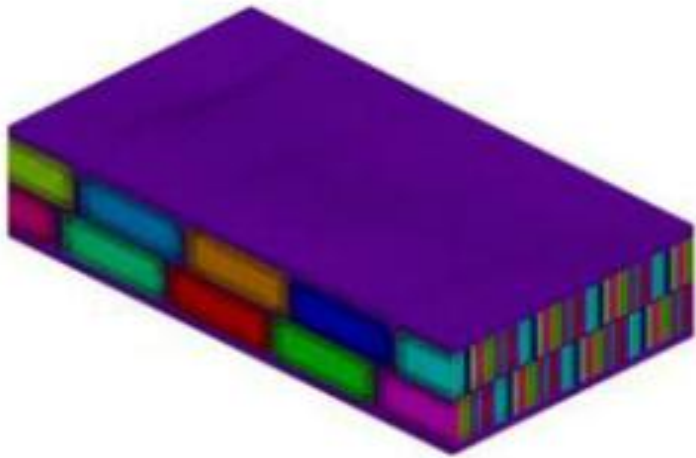
Негомогенный
микронаполненный
КОМПОЗИТ



Гибридный
КОМПОЗИТ



Микрогибридный
КОМПОЗИТ

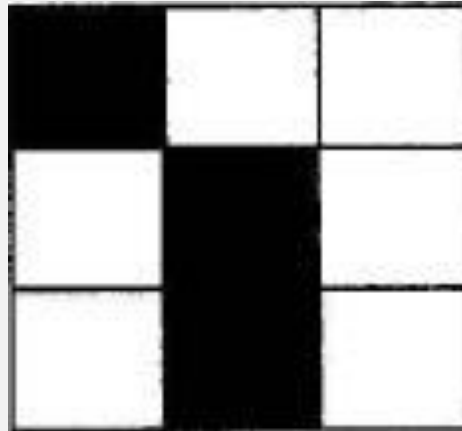


Теория перколяции или протекания (ТП)

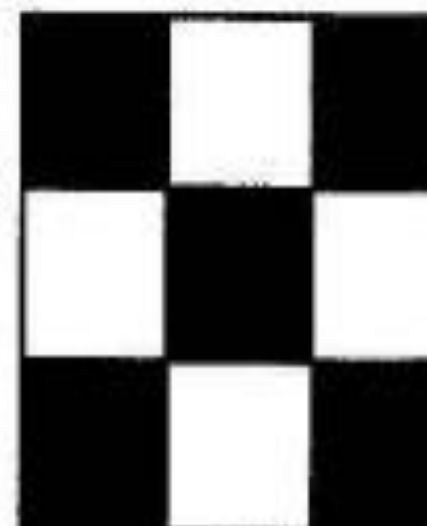
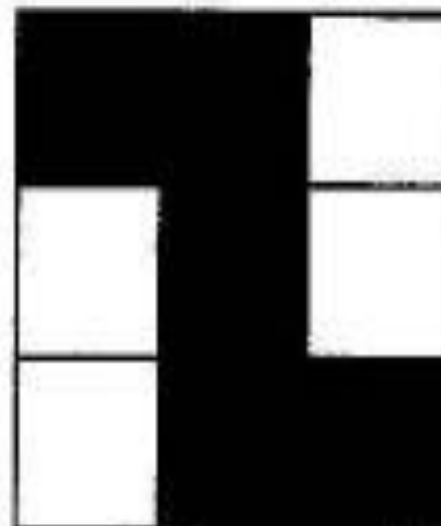
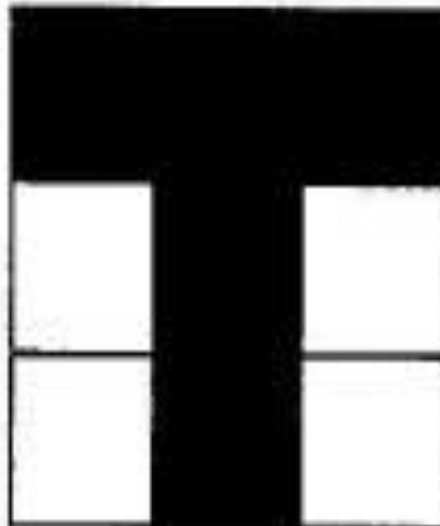
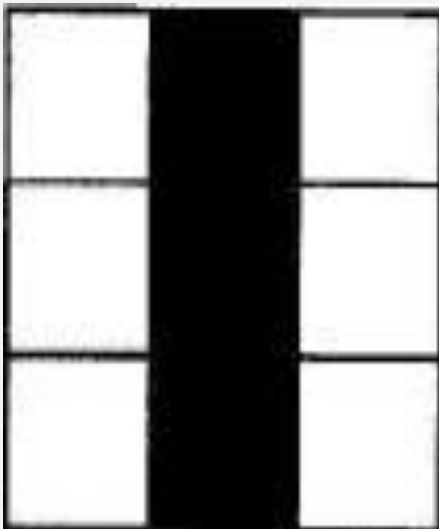
ТП описывает процессы переноса в неупорядоченных системах.

С ее помощью вычисляются как величины **порогов протекания**, так и свойства композитов (электрические, механические, тепловые и др.).

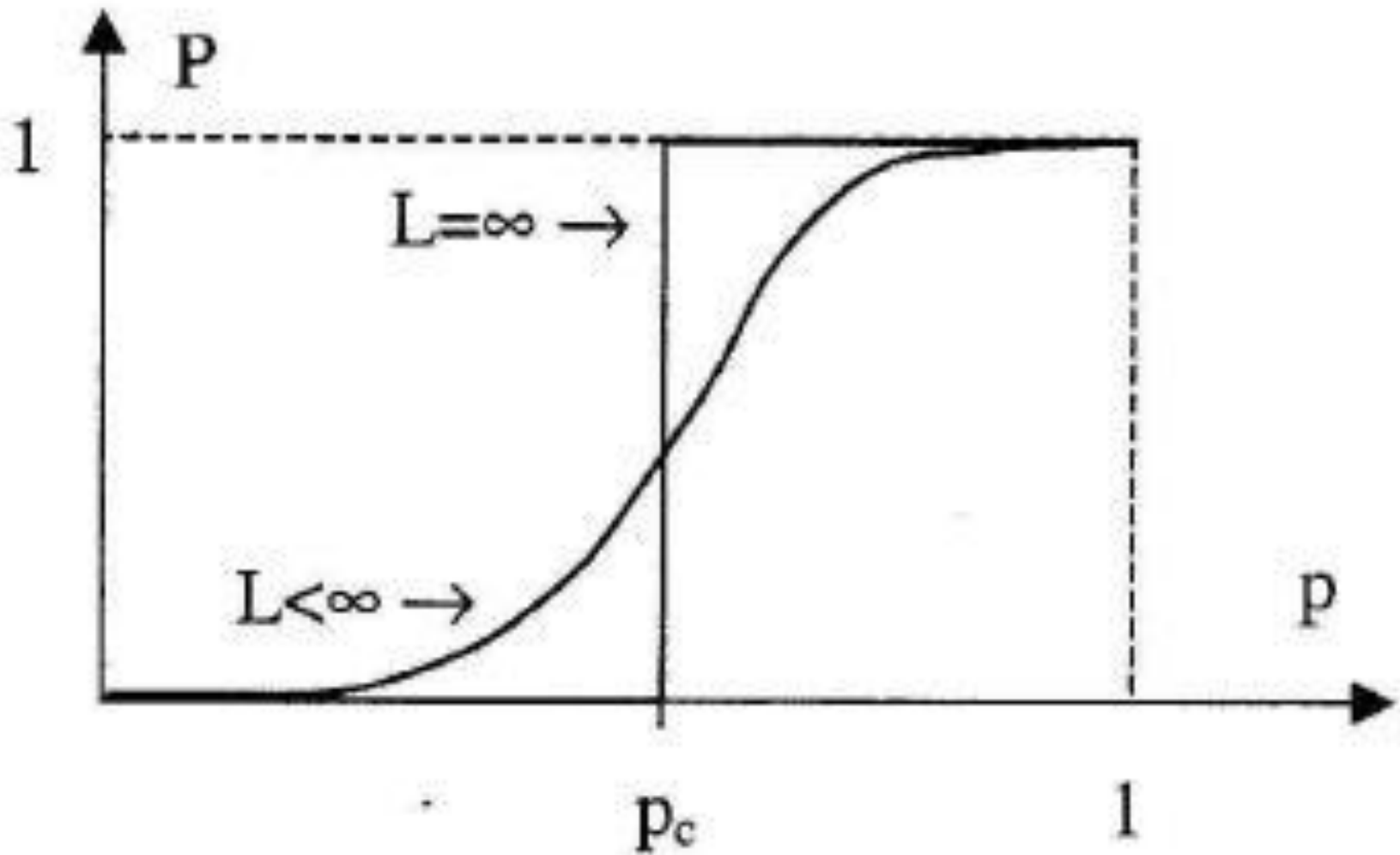
Пояснение: перколяция на решетке 3 на 3

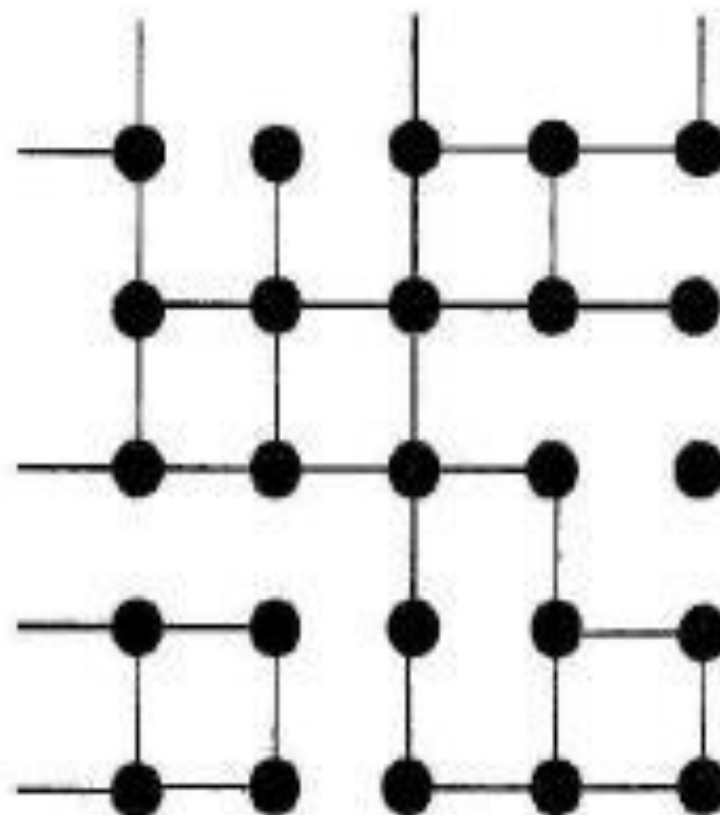
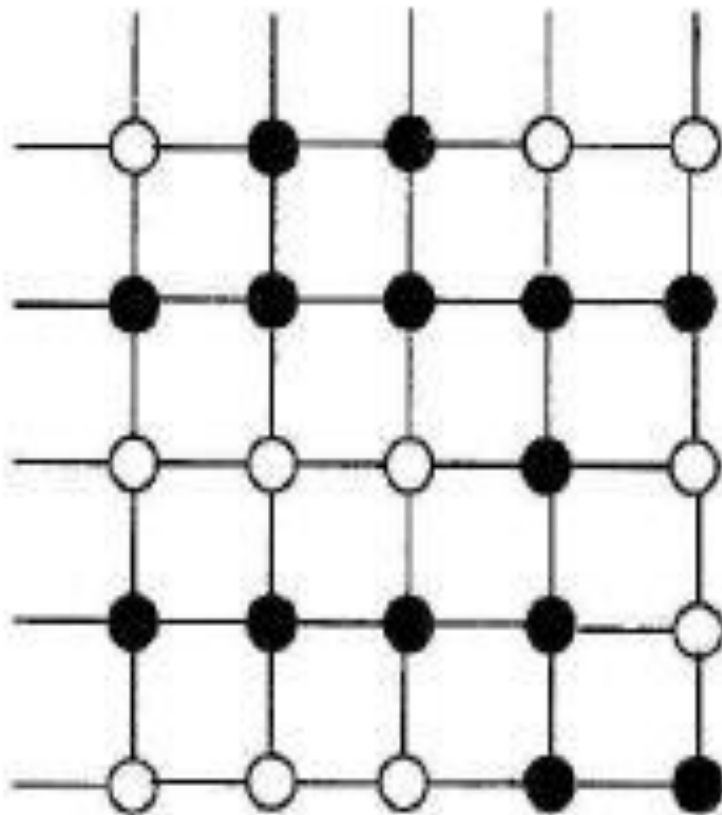


Вероятность того, что ток потечет при 3-х темных квадратах равна $3/84 = 1/24$, при 4-х: $18/84 = 3/14$, при 7-и ток потечет при любом положении темных квадратов.



Вероятность возникновения перколяции (P) в зависимости от доли заполненных узлов (p). L – размер квадратного поля





Цепочка связанных объектов называется **кластером**.
Вид решеток может быть разным.

Порог перколяции

При конечном размере квадрата критическая доля p_c – случайная величина.

При бесконечном размере квадрата критическая доля p_c – фиксированная величина.

Это строго доказано в математике!

Такую критическую долю p_c называют **порогом перколяции**.

Где возникают задачи перколяции?

Перколяция – протекание – percolation

Физика: описание

фазовых переходов, пористых и аморфных
материалов, неупорядоченных ионных
проводников,
галактических структур

Медицина: распространение эпидемий

Химия: описание процессов полимеризации

**Экология: описание распространения огня в лесных
пожарах,**

И т.д.

Протеканию эл. тока в композиционных материалах соответствует перколяционная задача, сформулированная для непрерывной среды. Согласно этой задаче, каждой точке пространства с вероятностью $p=x$ отвечает проводимость наполнителя $\sigma = \sigma_n$ и с вероятностью $(1-p)$ – проводимость диэлектрика $\sigma = \sigma_d$.

Порог протекания в этом случае равен минимальной доле пространства x_c , занятой проводящими областями, при которой система еще является проводящей. Таким образом, при критическом значении вероятности $p = x_c$ в системе наблюдается переход металл-диэлектрик.

При малых p все проводящие элементы содержатся в кластерах конечного размера, изолированных друг от друга. По мере увеличения p средний размер кластеров возрастает и при $p = x_c$ в системе впервые возникает бесконечный кластер. И, наконец, при больших p изолированными друг от друга будут непроводящие области.

Основным результатом теории перколяции является степенной характер концентрационного поведения удельной проводимости в критической области.