

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



© 2019 Томский политехнический университет, ОЭЭ ИШЭ

Лектор: к.т.н., доцент Васильева Ольга Владимировна

Магнитные материалы



Литература

- **Преображенский А.А. Бишард Е.Г.**
- **Магнитные материалы и элементы М. Высш. шк. 1986г.**
- **Мишин Д.Д. Магнитные материалы М. Высш. шк. 1981г.**
- **Справочник по электротехническим материалам том3 под ред. Ю.В. Корицкого Энергоатомиздат 1988г.**

Система единиц СИ Производные

Основные

Длина l [м]

Масса m [кг]

Время t [с]

Сила эл.тока I [А]

Температура T [°К]

Сила света [св]

Вспомогательные

Плоский угол [рад]

Телесный угол [стер]

Скорость м/с

Сила Н=кг·м/с²

Работа, энергия Н·м

Мощность Вт=Дж/с

Разн.потенц. В=Вт/А

Заряд Кл=А·с

Напр.эл.поля В/м

Эл.сопр. Ом=В/А

Эл.ёмкость Ф=Кл/В

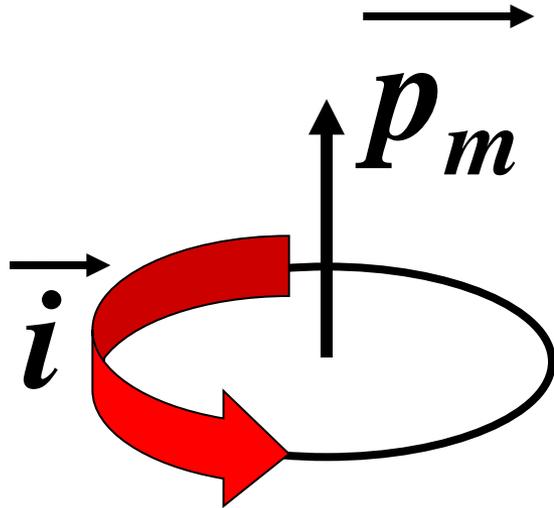
Магн.индукция Тл=Кл·Ом/м²

Напр.магн.поля А/м

- **Магнитными** называются материалы, которые применяются в технике с учетом их **магнитных свойств** и характеризуются способностью **накапливать, хранить и трансформировать магнитную энергию**.
- **Магнитные свойства** вещества определяются его **атомной структурой** и зависят, прежде всего, от того, обладают ли атомы вещества постоянным **магнитным моментом**.



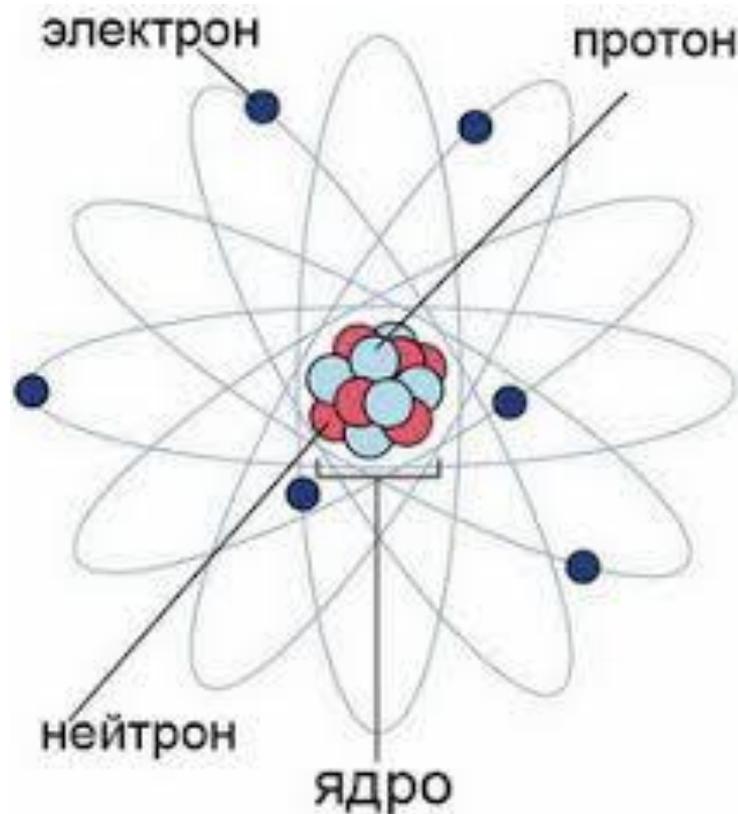
Основные определения



$$\vec{p}_m = iS \cdot \vec{n}$$

Элементарный **магнитный момент атома** - является векторной суммой **орбитальных и спиновых магнитных моментов электронов**, а также **магнитного момента ядра**, который составляет 10^{-3} магнитного момента электрона.

- *Масса ядра* значительно *больше массы электрона*, ПОЭТОМУ МОЖНО СЧИТАТЬ, ЧТО *элементарными носителями магнитных моментов* В ВЕЩЕСТВАХ ЯВЛЯЮТСЯ *электроны*.



Векторная сумма *магнитных моментов атомов*
в единице объёма называется
намагниченностью M [А/м]:

$$\vec{M} = \Sigma \vec{p}_m ; \quad \vec{M} = \chi \cdot \vec{H}$$

χ — магнитная восприимчивость

Суммарное *магнитное поле в объёме вещества* называется *магнитной индукцией* B [Тл]:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \vec{H}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [Гн/м]}$$

$$\mu = 1 + \chi ; \mu_a = \mu_0 \mu$$

Намагничиванием называется процесс *ориентации магнитных моментов атомов* вещества под влиянием внешнего магнитного поля, в результате которого *намагниченность* материала становится $M \neq 0$.

Магнетизм атома порождается *тремя причинами*:

- Наличием у электрона **спинового магнитного момента**, который связан с соответствующим **механическим моментом электрона**.
- Орбитальным движением электронов в атоме, создающим **орбитальный магнитный момент**, или — наличием **магнитного момента** пространственного движения электронного облака вокруг ядра.
- **Магнитным моментом атомного ядра**, который создается **спиновыми моментами** протонов и нейтронов.

- *Орбитальные и спиновые магнитные моменты* отдельных электронов складываются в *результатирующие* орбитальные спиновые моменты атомов. Единица измерения атомных магнитных моментов – *магнетон Бора* μ_B :

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж / Тл}, \quad \hbar = h/2\pi,$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка;

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл - заряд электрона;

$m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг - масса электрона.

- Определение **полного магнитного момента атома** существенно облегчается в связи с тем, что у **заполненных оболочек** как **орбитальные**, так и **спиновые магнитные моменты скомпенсированы**, поэтому **можно учитывать** только **не полностью заполненные** электронные оболочки.



Виды магнетизма:

Различают следующие *механизмы*
намагничивания:

- **Диамагнетизм.**
- **Парамагнетизм.**
- **Ферромагнетизм.**
- **Антиферромагнетизм.**
- **Ферримагнетизм.**

- Все вещества различаются по *величине и знаку магнитной восприимчивости* χ , а также по *характеру* ее зависимости от *температуры* и *напряженности* внешнего магнитного поля.
- *Диамagnetиками* называют вещества, в которых имеет место *полная взаимная компенсация* как *орбитальных*, так и *спиновых* магнитных моментов.

Диамагнетизм — свойство вещества *слабо намагничиваться* *противоположно* внешнему магнитному полю.

Магнитная восприимчивость $\chi \sim -10^{-5} \div -10^{-7}$

Магнитная проницаемость $\mu \approx 0,9999$

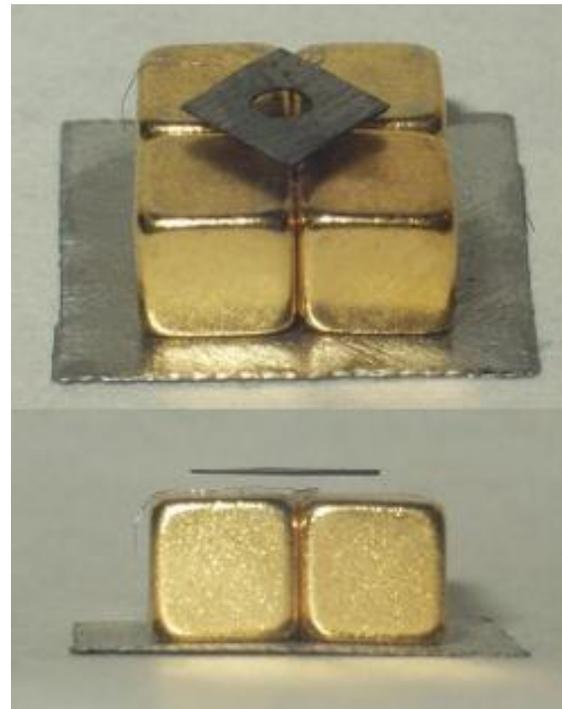
Диамагнетики

Cu, Ag, Au, Be, Zn, Ga, B, Pb, Sb

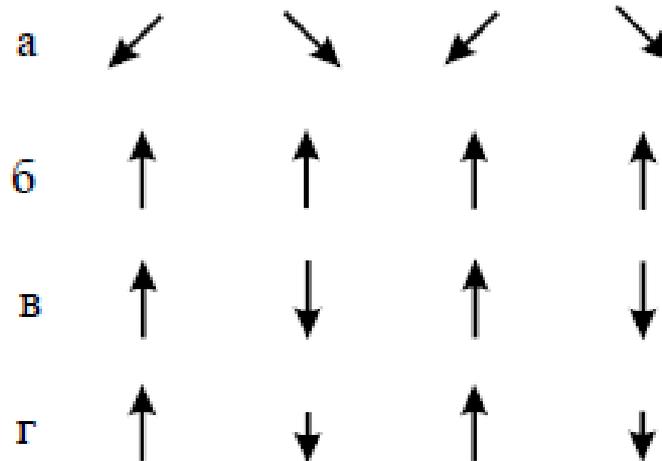
Be – бериллий, *Ga* – галлий, *B* – бор, *Pb* – свинец, *Sb* - сурьма.

- **Диамagnetики** отличаются тем, что они **выталкиваются** из **неоднородного** магнитного поля.
- К **диамagnetным** веществам относятся *водород, инертные газы, азот, хлор, вода, большинство органических соединений, ряд металлов, а также графит, стекло и др.*

Диамagnetик в **однородном** поле стремится расположиться **поперек** силовых линий.



- Вещества, атомы которых имеют *постоянные магнитные моменты*, могут быть **парамагнитными**, **ферро-**, **антиферро-** или **ферримагнитными** в зависимости от характера взаимодействия между магнитными моментами атомов.



Схематическое изображение расположения спинов в
(а) парамагнитных, (б) ферромагнитных, (в) антиферромагнитных и
(г) ферримагнитных веществах

- **Парамагнетиками** называются вещества, в которых **взаимодействие** между постоянными магнитными моментами атомов – **элементарными магнитными диполями** – **мало**, суммарный магнитный момент равен нулю.
- Для **парамагнитных газов** и **редкоземельных элементов** температурная зависимость **магнитной восприимчивости** характеризуется **законом Кюри**:

$$\chi = C / T,$$

где C – постоянная Кюри, T – температура, К.

- Для *переходных парамагнитных металлов*, у которых взаимодействием между элементарными носителями магнетизма (молекулярным полем) пренебречь нельзя, справедлив более общий **закон Кюри-Вейсса**:

$$\chi = C / (T - \Delta),$$

где Δ – постоянная Вейсса, различная для разных веществ (может быть и больше, и меньше нуля).

Парамагнетизм — свойство вещества *слабо намагничиваться согласованно* с внешним магнитным полем.

Магнитная восприимчивость $\chi \sim 10^{-2} \div 10^{-6}$

Магнитная проницаемость $\mu \approx 1,0001..$

Парамагнетики

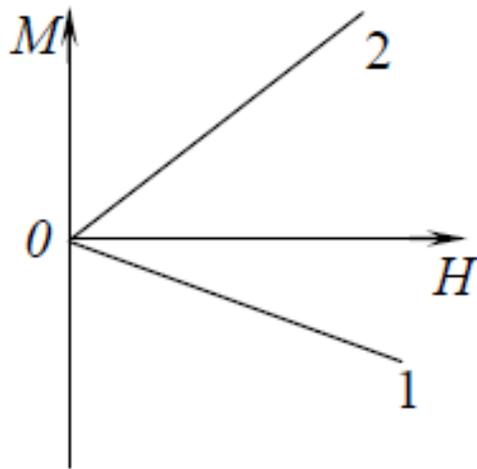
Al, O, Pt, Mg, Pd, Cr, Ca, Mo

Pt – платина, *Pd* – палладий, *Cr* – хром, *Mo* – молибден.

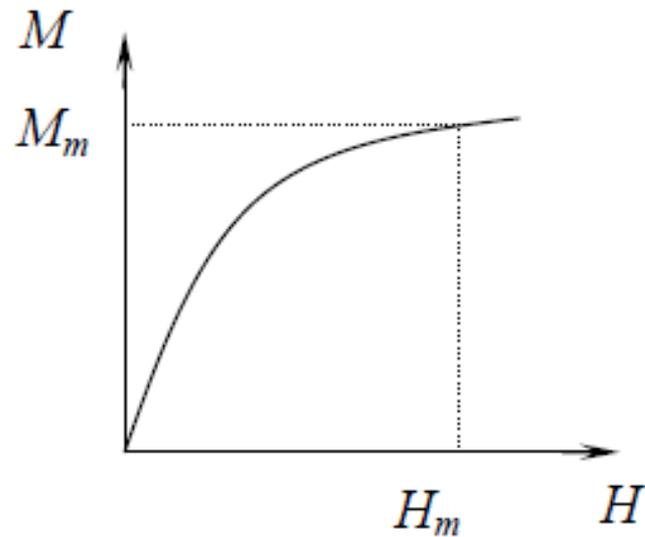
- **Парамагнетики** отличаются тем, что они *втягиваются* в неоднородное магнитное поле.
- К **парамагнетикам** относятся *кислород, окись азота, соли железа, кобальта и никеля, щелочные металлы, ряд других металлов.*

Парамагнетик в однородном поле стремится расположиться *вдоль* силовых линий.





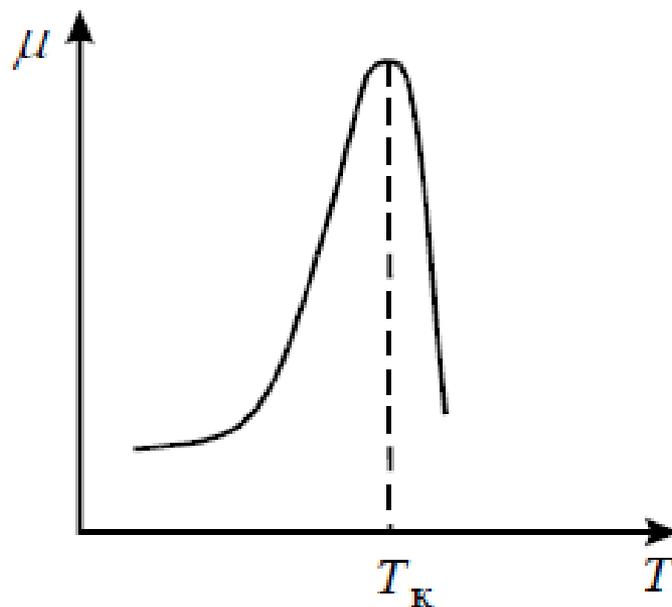
a



б

Зависимость намагниченности M от напряженности поля H : а—для диамагнетиков (1) и для парамагнетиков (2); б—для парамагнетиков при низких температурах или очень сильных полях

- **Ферромагнетиками** называются вещества, в которых **магнитные моменты** атомов взаимодействуют так, что они **выстраиваются параллельно** друг другу.



Типичная зависимость магнитной проницаемости ферромагнитных материалов от температуры

Ферромагнетизм – свойство вещества *сильно намагничиваться согласованно* с внешним магнитным полем.

Магнитная восприимчивость $\chi \sim 10^3 \div 10^7$

Магнитная проницаемость μ от 10^3 до 10^7

Ферромагнетики

Fe, Co, Ni, Cd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm

Cd – кадмий, *Tb* – тербий, *Dy* – диспрозий, *Ho* – гольмий, *Er* – эрбий, *Tm* – тулий.

- Для **ферромагнетиков** характерно также наличие **гистерезиса**.
- **Гистерезис** обусловлен **необратимостью процессов намагничивания**, что приводит к рассеянию энергии и снижению качества устройств. Однако благодаря ей материал остается **намагниченным** после снятия намагничивающего поля.



Антиферромагнетики – материалы, в которых в результате обменного взаимодействия соседних атомов происходит *антипараллельная ориентация* равных по величине магнитных моментов.

Магнитная восприимчивость $\chi \sim 10^{-2} \div 10^{-5}$

Магнитная проницаемость $\mu \approx 1,0001..$

Антиферромагнетики

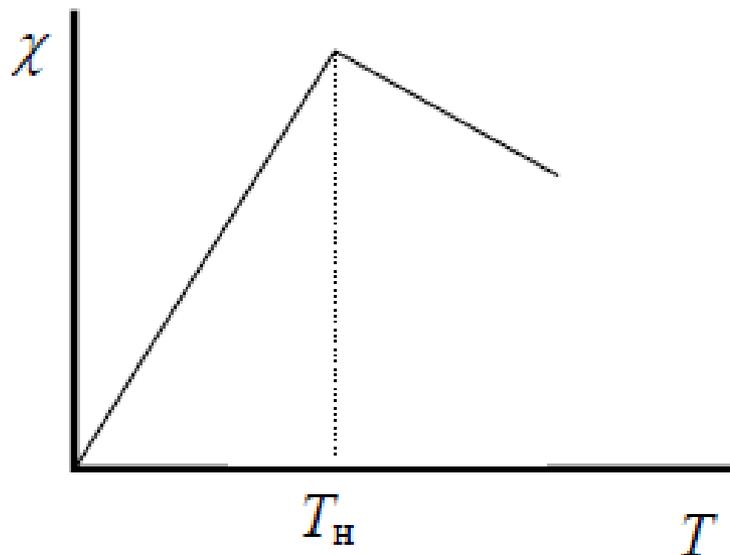
Ce, Nd, Pr, Sm, Eu, Mn, Cr

Ce – церий, *Nd* – неодим, *Pr* – празеодим, *Sm* – самарий, *Eu* – европий, *Mn* – марганец.

- **Антиферромагнетикам** свойственна **специфическая температурная зависимость** магнитной восприимчивости.
- К **антиферромагнетикам** относятся *редкоземельные металлы, хром, марганец, многие окислы, хлориды, фториды, сульфиды, карбонаты переходных элементов, например на основе марганца и др.*



В *точке Нееля* T_N упорядоченное расположение спинов полностью нарушается и **антиферромагнетик становится парамагнетиком**, после чего зависимость $\chi(T)$ подчиняется закону Кюри-Вейсса.



Зависимость магнитной восприимчивости антиферромагнетика от температуры

Ферримагнетики (ферриты) – материалы, в которых обменное взаимодействие соседних атомов приводит к *антипараллельной ориентации* различных по величине (нескомпенсированных) магнитных моментов.

Магнитная восприимчивость $\chi \sim$ до 10^7

Магнитная проницаемость μ до 10^7

Ферриты $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MeO}$

где **Me** – Mg, Fe, Zn, Co, Cu, Cd, Mn и др.

- Для **ферримагнетиков**, как и для **ферромагнетиков**, характерно **наличие доменной структуры**.
- К **ферримагнетикам** относятся **ферриты** — соединения, которые могут иметь различную структуру кристаллической решетки типа **шпинели**, **граната**, **каменной соли**, **гексагональную** и др.

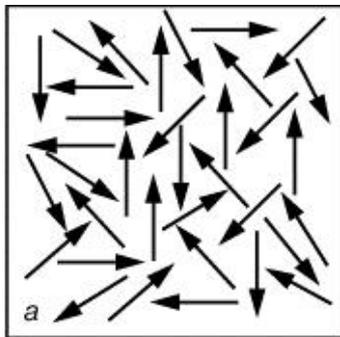
По **электрическим свойствам** ферриты представляют собой **полупроводники**.



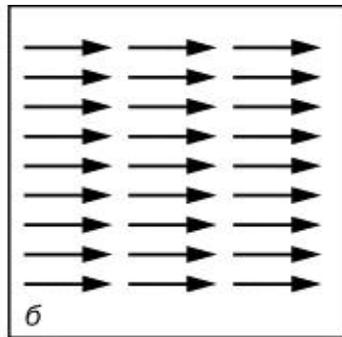
- *Ферримагнетики* отличаются от *ферромагнетиков* меньшей величиной *индукции насыщения* и имеют более сложную *температурную зависимость* индукции насыщения.
- Упрощенно это можно объяснить наличием в структуре *сложного материала* *двух или более подрешеток*, создающих *встречные нескомпенсированные магнитные моменты*.

Намагничивание ферромагнетиков

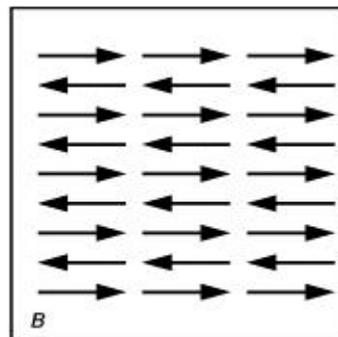
Доменом называется *макроскопическая* область материала, внутри которой *намагниченность* спонтанно ($H=0$) достигает насыщения, т.е. внутри домена *магнитные моменты* практически всех атомов ориентированы в *одном* направлении.



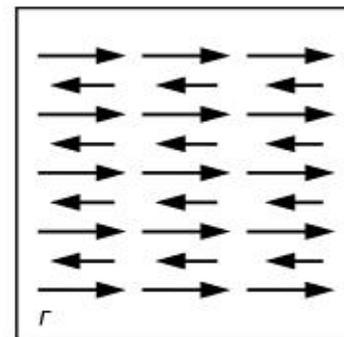
Парамагнитное вещество во внешнем поле — атомные магниты разупорядочены



Ферромагнитное вещество — атомные магниты упорядочены



Антиферромагнитное вещество — атомные магниты ориентированы антипараллельно и магнитный момент отсутствует



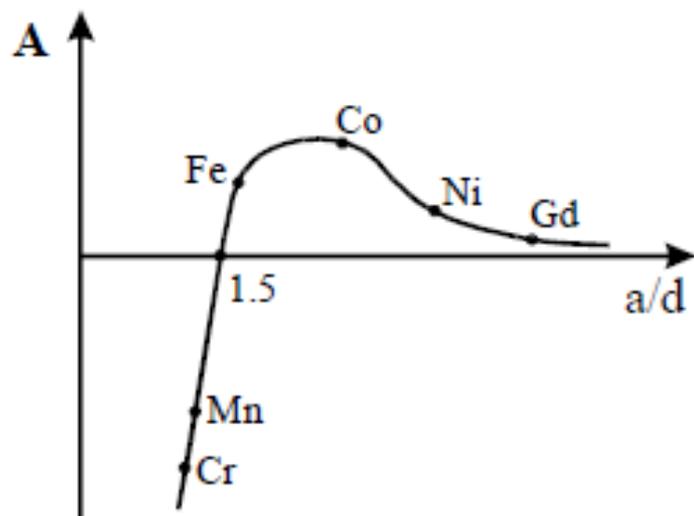
Ферримагнитное вещество — некомпенсированная антипараллельная ориентация

Условия возникновения доменной структуры (ферромагнетизма)

- *Наличие внутренних незаполненных электронных оболочек (d или f) атома.*
- *Величина интеграла обменной энергии $A > 0$, что выполняется если диаметр незаполненных оболочек мал по сравнению с межатомным расстоянием кристаллической решетки: $a/d > 1,5$.*

Количество электронов в каждой оболочке

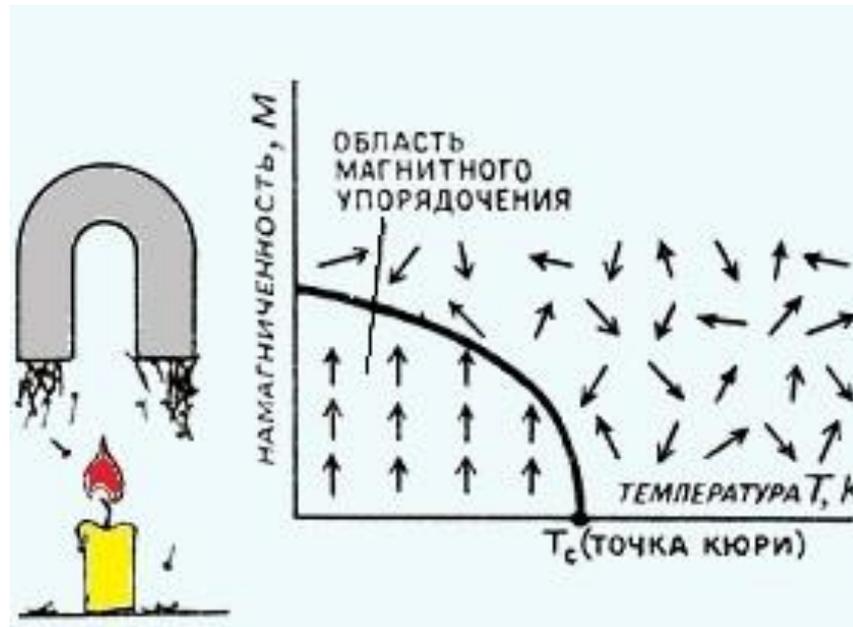
уровень/подуровень	0 (s)	1 (p)	2 (d)	3 (f)	4 (g)	5 (h)	6 (i)	Итого в оболочке
1 (K)	2							2
2 (L)	2	6						8
3 (M)	2	6	10					18
4 (N)	2	6	10	14				32
5 (O)	2	6	10	14	18			50
6 (P)	2	6	10	14	18	22		72
7 (Q)	2	6	10	14	18	22	26	98

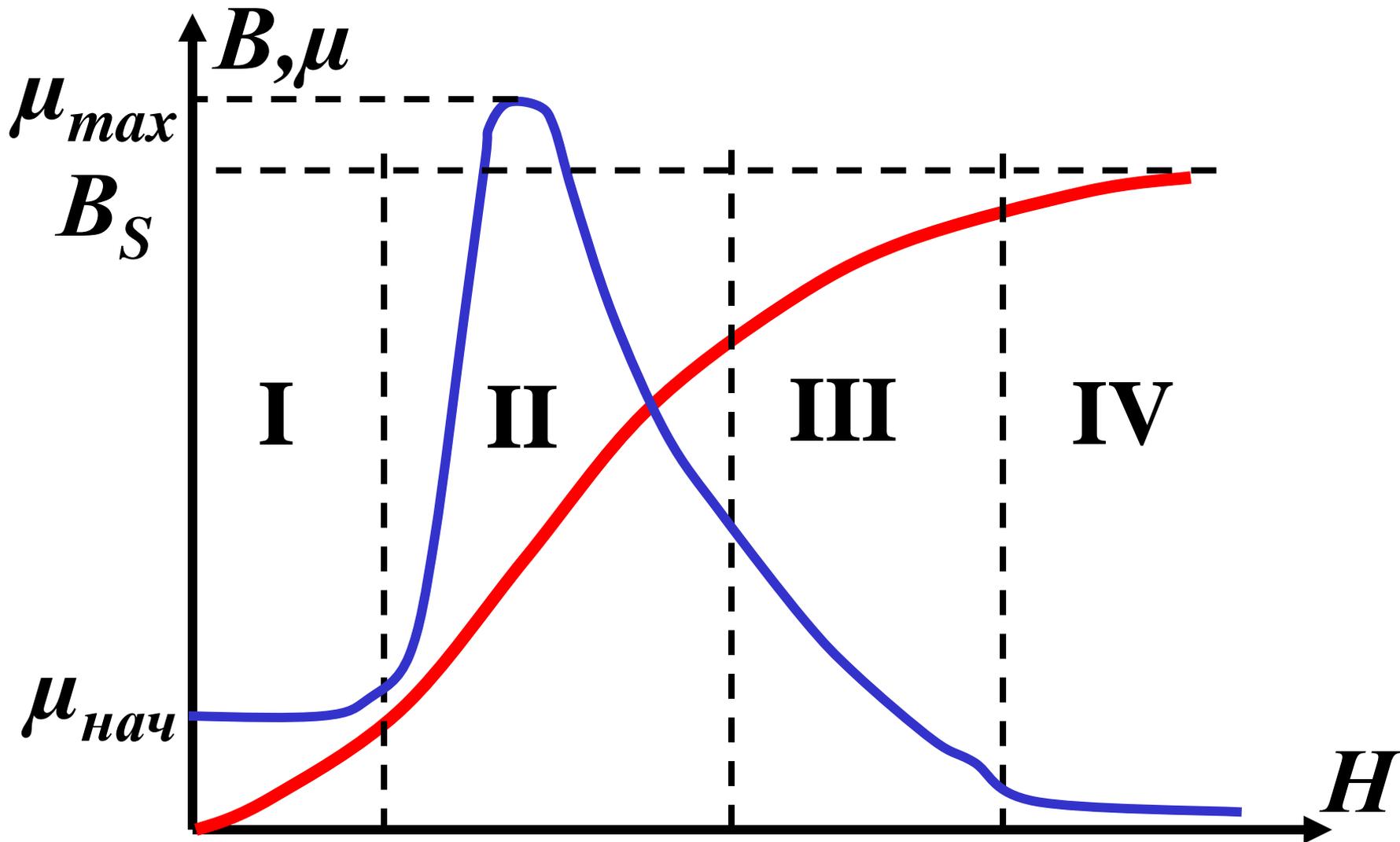


Зависимость интеграла обменной энергии A от отношения параметра решетки a к диаметру внутренней недостроенной оболочки d

Особенность ферромагнетиков:

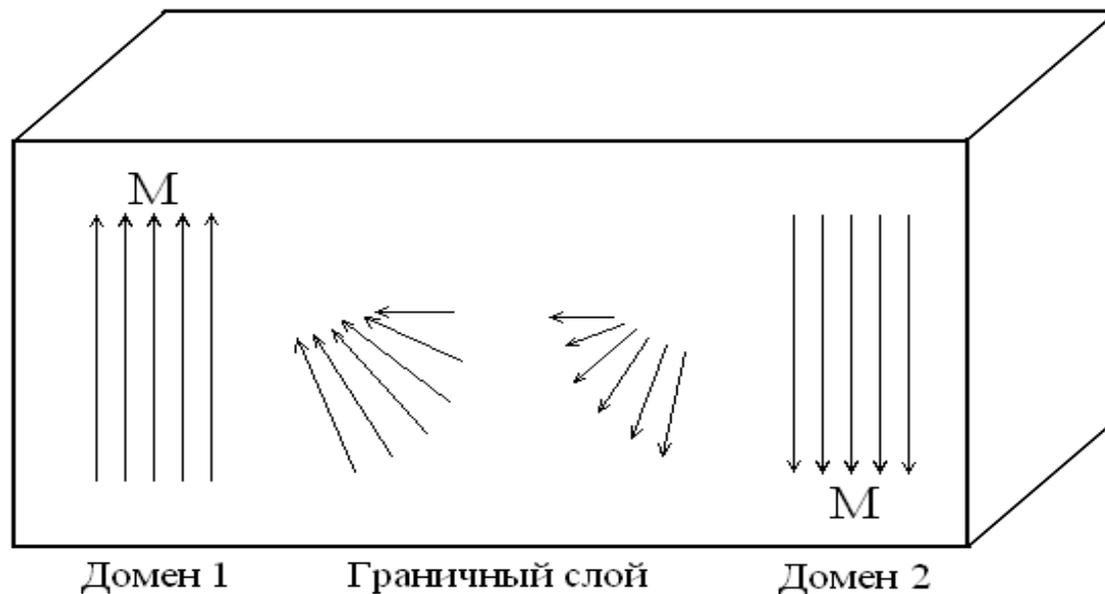
- Наличие *доменной структуры*.
- Зависимость *магнитного состояния* ОТ предшествующей *магнитной истории*.
- Наличие *температуры Кюри*.





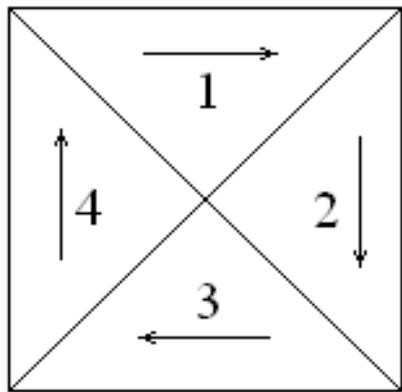
I—область самых слабых полей; II—область слабых полей;
 III—область средних полей; IV—область сильных полей

- **Область 1** – самых слабых магнитных полей характеризуется *обратимым смещением границ доменов* в магнитном поле и *линейной зависимостью $B(H)$* .
- **Область 2** – *необратимого смещения границ доменов*, характеризуется *наиболее сильной зависимостью $B(H)$* и μ проходит через *максимум*.
- **Область 3** – *область вращения вектора намагниченности* (поворот вектора намагниченности доменов *в направлении* поля).
- **Область 4** – *насыщение*. В этой области значение B практически *не зависит* от H .

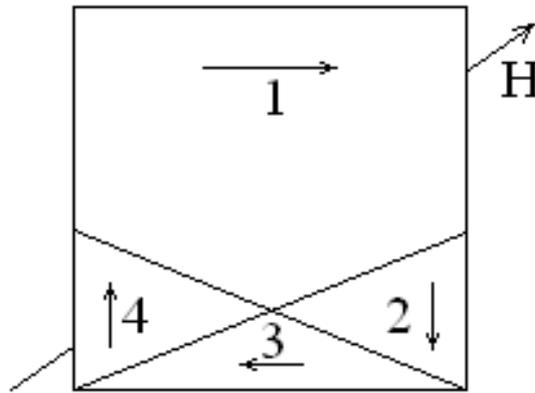


Магнитная структура граничного слоя в кристалле

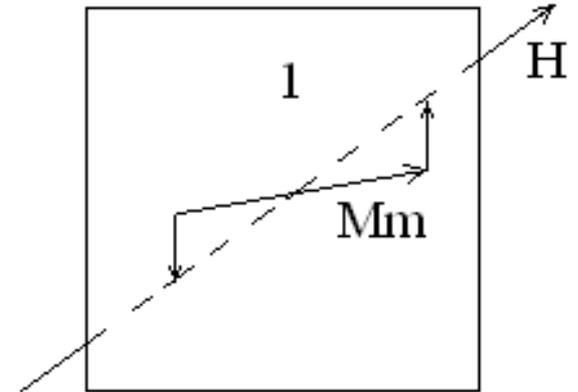
В граничном слое элементарные магнитные моменты имеют ориентацию переходную между направлениями намагниченности соседних доменов. Под действием внешнего поля граничные слои между соседними доменами смещаются таким образом, что размеры доменов, намагниченность которых составляет наименьшие углы с направлением поля, а следовательно, энергетически «выгодно» ориентированных по отношению к полю растут за счет других доменов



а



б



в

Схема процессов, протекающих при намагничивании

а – исходное состояние при $H=0$, когда в монокристалле имеются четыре домена с различно направленными векторами спонтанной намагниченности доменов (указаны стрелками); б – смещение границ доменов при воздействии внешнего магнитного поля (рост объема домена 1, благоприятно ориентированного относительно поля H); в – вращение вектора намагниченности M_m при дальнейшем увеличении магнитного поля

Процесс намагничивания *ферро- и ферримагнетиков* под действием приложенного магнитного поля напряженностью H можно свести к *двум подпроцессам*:

- *Подпроцесс смещения границ доменов* под действием приложенного магнитного поля.
- *Подпроцесс ориентации магнитных моментов доменов по направлению* приложенного магнитного поля.

$$\mu_a = B/H \quad (1)$$

$$\mu = \mu_a / \mu_0 \quad (2)$$

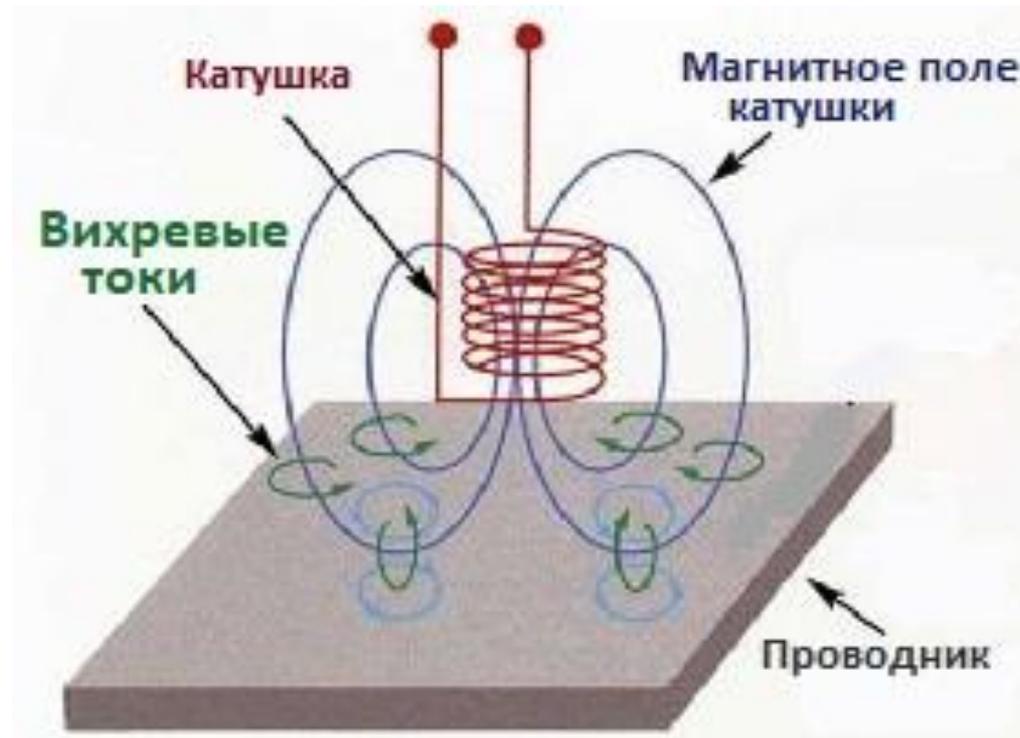
$$\mu_{\max} = B_{\max} / H_{\max} \quad (3)$$

μ может быть *статической* (опр-ся в *постоянном поле*) или *динамической* (μ_{\sim}) (опр-ся в *переменном поле*):

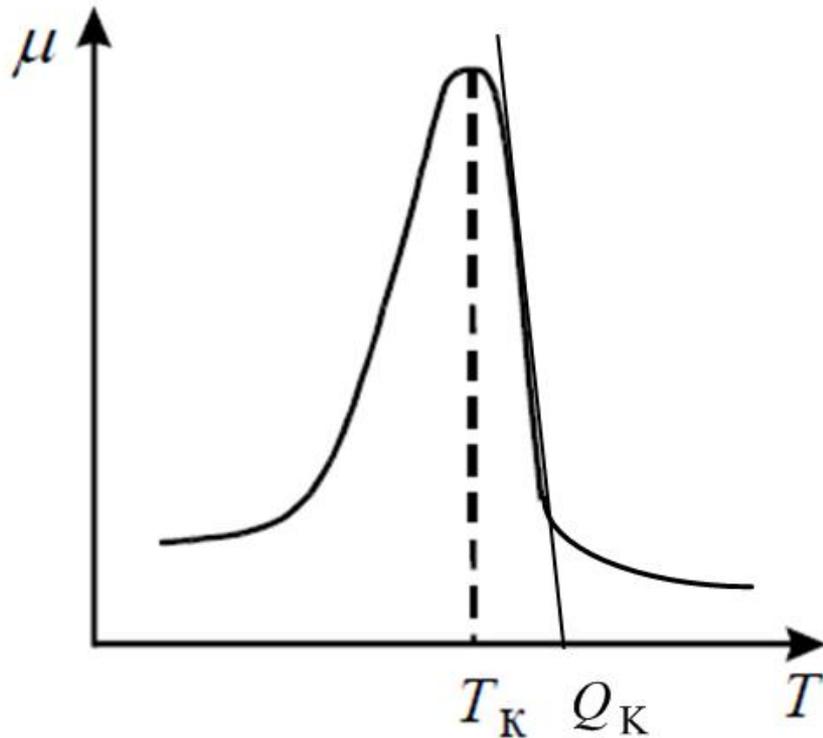
$$\mu_{\sim} = 1 / \mu_0 \cdot B_m / H_m \quad (4)$$

В *переменном магнитном поле* μ *зависит от частоты* f .

Значения *статической* и *динамической* магнитной проницаемостей *не совпадают*, т.к. на намагничивание в *переменном магнитном поле* влияют *вихревые токи*, *магнитная вязкость* и *резонансные явления*.

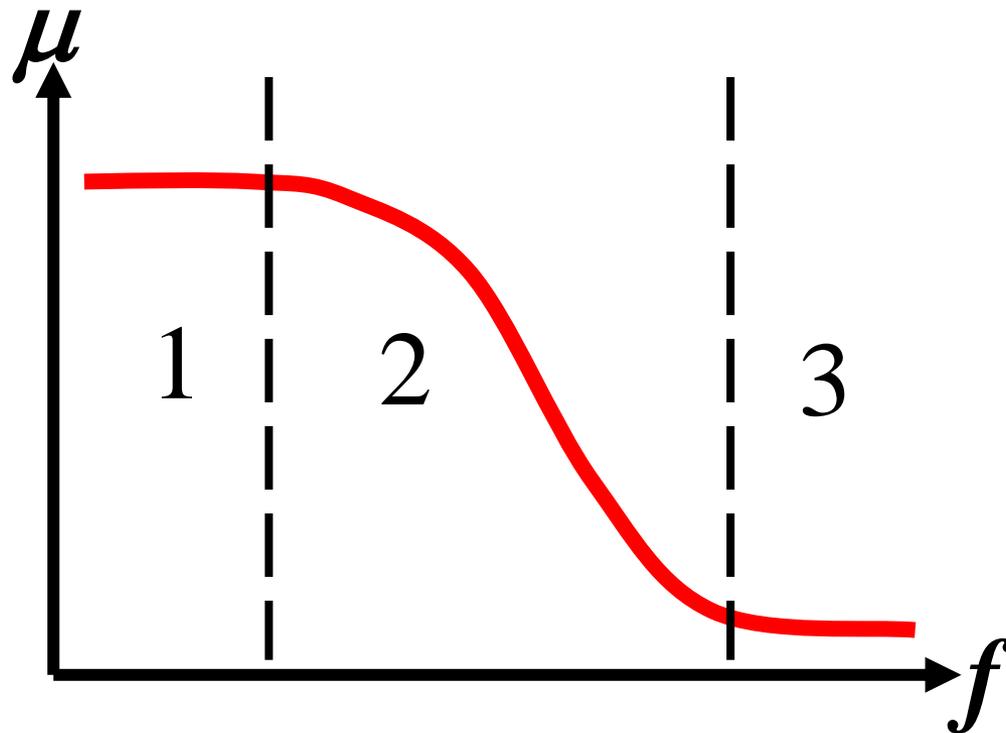


Зависимость *магнитной проницаемости* μ ферромагнитных материалов от *температуры* T .



Ориентация M_m доменов поворачивается вслед за полем, поэтому μ возрастает до T_K . При дальнейшем нагреве разрушается домен, μ резко убывает, все домены разрушены при Q_K (касательная к спадающему участку) – ферромагнитный материал переходит в парамагнитный.

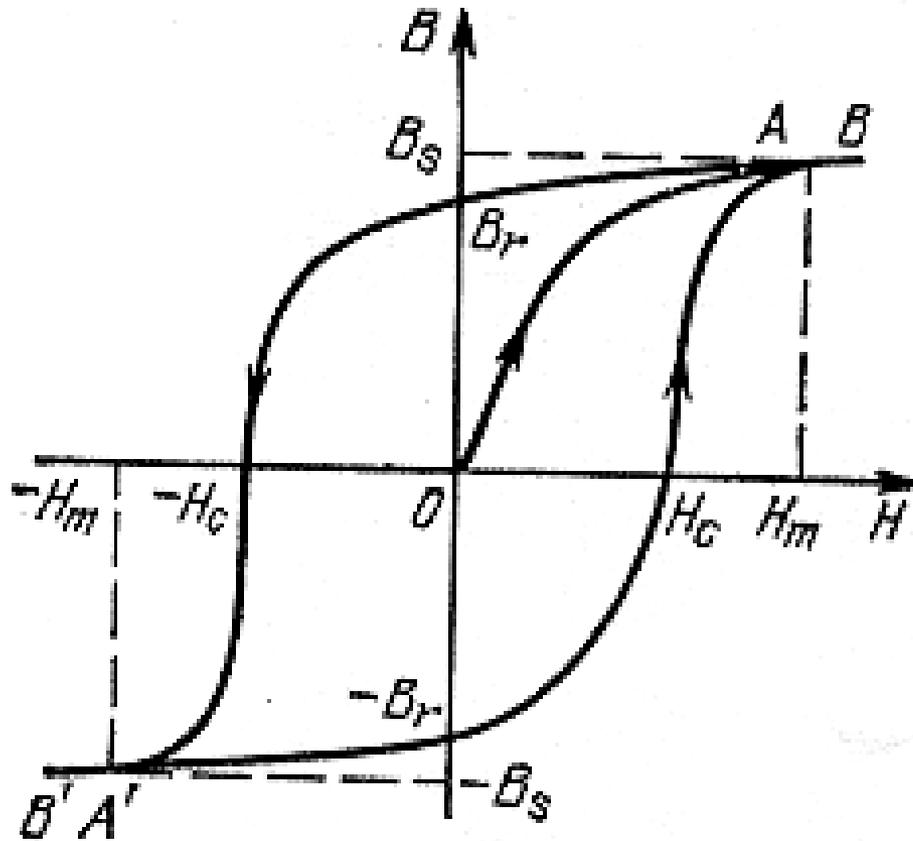
ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ПРИЛОЖЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ f НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ МАГНИТНУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ μ



С повышением
частоты магнитные
моменты доменов
не успевают
переориентироваться
вслед за
быстроизменяющимся
магнитным полем

Обл. 2 – домен начал разворачиваться вслед за H , а H развернулся уже в др. сторону. Обл. 3 – по магнитным свойствам – парамагнетик.

НАМАГНИЧИВАНИЕ ФЕРРО- И ФЕРРИМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ



1. B_s – индукция насыщения.
2. H_C – коэрцитивная сила.
3. B_r – остаточная индукция.
4. Потери на гистерезис (на перемагничивание) – площадь петли гистерезиса.

За три полупериода описывается петля гистерезиса. Уст-во проектируется т.о., чтобы работа была в обл. насыщения. B_r – как постоянный магнит.

- **Индукция насыщения** B_s – максимальная индукция, соответствующая *техническому насыщению*.
- **Остаточная индукция** B_r – индукция, которая сохраняется в *предварительно намагниченном образце* после снятия внешнего магнитного поля.
- **Коэрцитивная сила** H_c – напряженность размагничивающего поля, которое должно быть приложено к *предварительно намагниченному образцу* для того, чтобы *магнитная индукция* в нем стала равной *нулю*.

Виды потерь

1. Потери на гистерезис:

За один цикл к единице объема:

$$P_G = \oint H dV \quad [\text{Дж} / \text{м}^3],$$

или к единице массы при перемагничивании с частотой f :

$$P_G = f \frac{\oint H dV}{D} \quad [\text{Вт} / \text{м}^3],$$

где f – частота [Гц];

D – плотность вещества [кг/см³].

2. Потери на вихревые токи для листового сердечника:

$$P_v = \frac{1,64 \cdot d^2 \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2}{D \cdot \rho_v}; \text{ Вт/кг,}$$

где d – толщина листа [м];

B_{\max} – амплитудное значение [Тл];

ρ_v – удельное объемное сопротивление [Ом·м].

3. Дополнительные потери:

- Электрические машины и аппараты, в курсе рассматриваются потери, учитывающие воздушный зазор, острые углы и т.д.
- Данные потери не зависят от свойств материала.

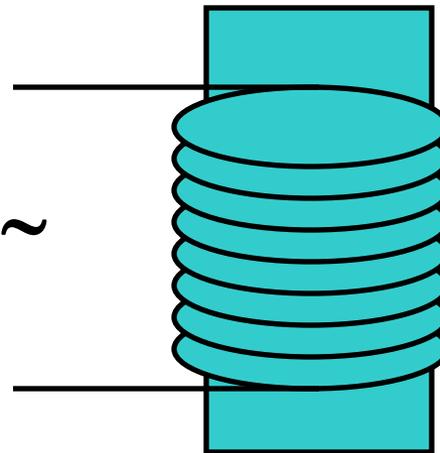
Снижение потерь:

- **Потери на гистерезис** – нельзя снизить, можно только заменить материал.
- **Потери на вихревые токи** - можно снизить, н-р, у трансформатора сердечник магнитопровода сделан шихтованным, ρ_V больше в тонком проводнике (лучше взять сотню тонких пр-в, чем один толстый).

МАГНИТОСТРИКЦИЯ -

**- ИЗМЕНЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ
МАТЕРИАЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Генераторы УЗ – колебаний. ~



Пожарные и другие сирены, изготовлены на основе таких генераторов.

Классификация магнитных материалов:

- 1. Магнитомягкие ($H_C < 4$ кА/м) – высокая μ , малая H_C , узкая петля гистерезиса, малые потери на перемагничение.**
- 2. Магнитотвердые ($H_C > 4$ кА/м) – большая B_r , широкая петля гистерезиса, большие потери на перемагничение.**
- 3. Магнитные материалы специального назначения**