

# *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  $N=кг \cdot м/с^2$

Работа, энергия  $Н \cdot м$

Мощность  $Вт=Дж/с$

Разн.потенц.  $В=Вт/А$

Заряд  $Кл=А \cdot с$

Напр.эл.поля  $В/м$

Эл.сопр.  $Ом=В/А$

Эл.ёмкость  $Ф=Кл/В$

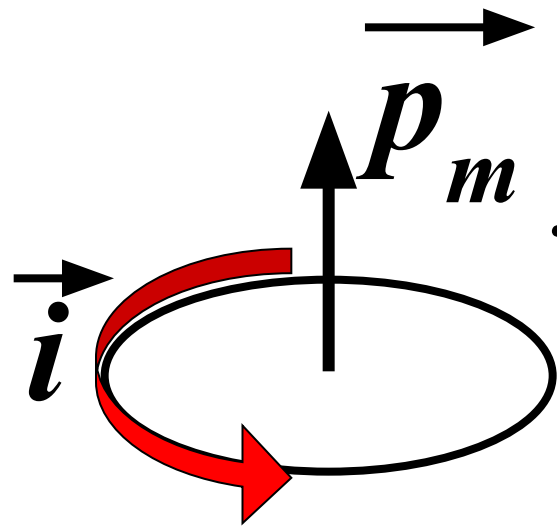
Магн.индукция  $Тл=Кл \cdot Ом/м^2$

Напр.магн.поля  $А/м$

# *Магнитные материалы*

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

# Основные определения



Элементарный

*магнитный момент атома*

$$\vec{p}_m = i\mathcal{S} \cdot \vec{n}$$

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

Векторная сумма магнитных  
моментов атомов в единице объёма  
называется

намагниченностью  $M$  [А/м]:

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

$\chi$  — 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  $M \neq 0$ .

# *Виды магнетизма:*

Различают следующие механизмы намагничивания:

- 1. Диамагнетизм**
- 2. Парамагнетизм**
- 3. Ферромагнетизм**
- 4. Антиферромагнетизм**
- 5. Ферримагнетизм**

**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**

**Парамагнетизм – свойство вещества слабо намагничиваться согласованно с внешнем 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**



**Ферромагнетизм – свойство вещества  
сильно намагничиваться согласованно с  
внешнем магнитным полем**

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

Магнитная проницаемость  $\mu$  от  $10^3$  до  $10^7$

**Ферромагнетики**

**Fe, Co, Ni**

**Cd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm**

**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**

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  $\mu$  до  $10^7$

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

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

# Намагничивание ферромагнетиков

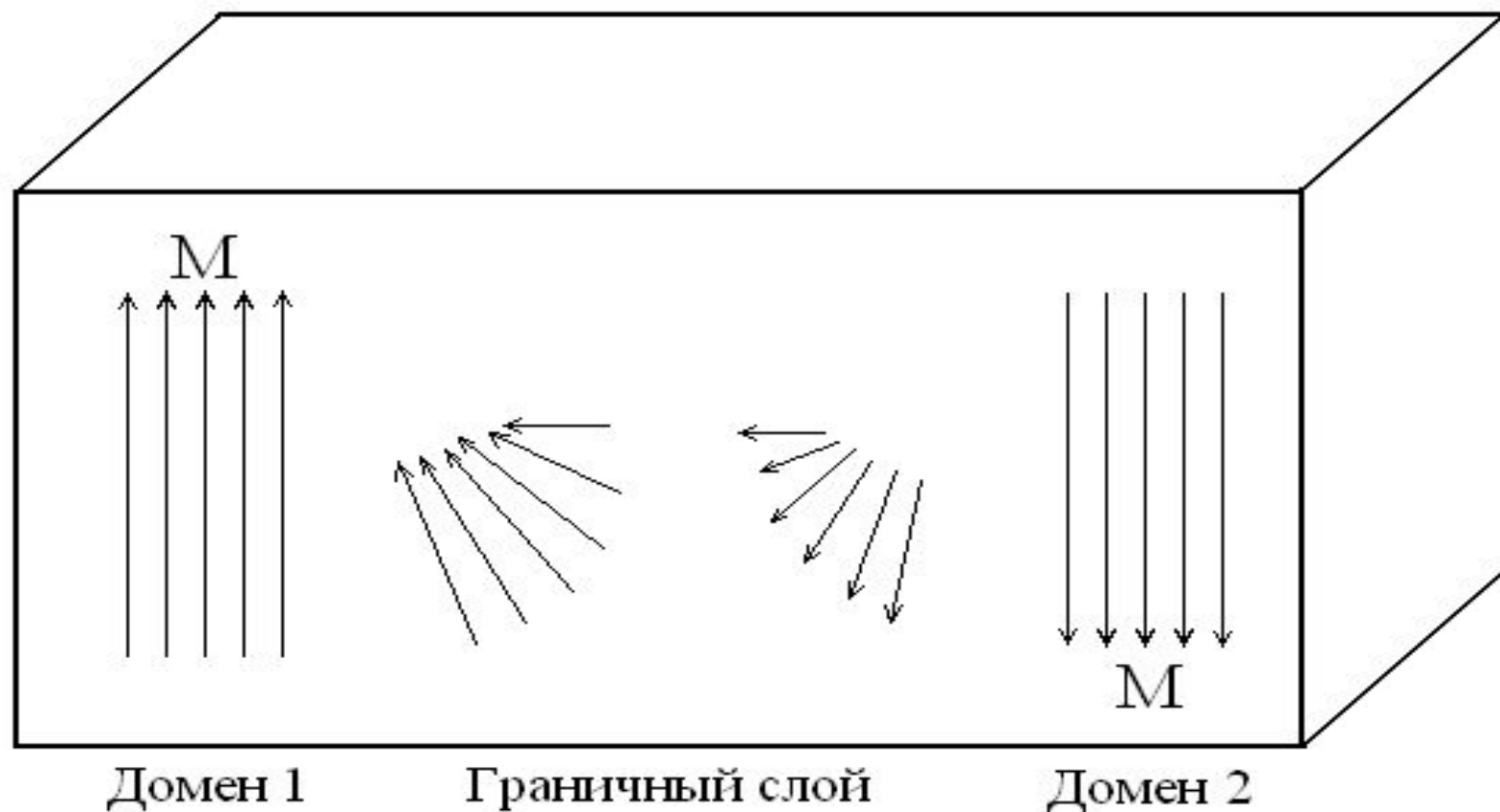
Доменом называется макроскопическая область материала, внутри которой намагниченность спонтанно ( $H=0$ ) достигает насыщения, т. е. внутри домена магнитные моменты практически всех атомов ориентированы в одном направлении.

## Условия возникновения доменной структуры (ферромагнетизма)

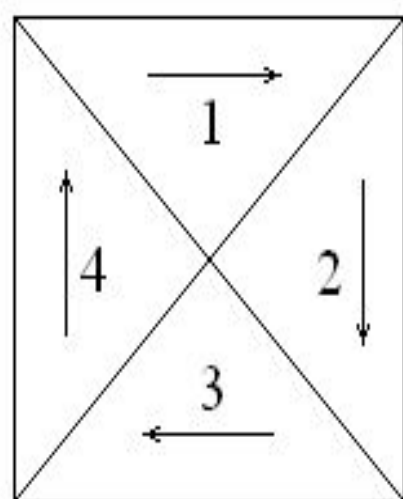
1. Наличие внутренних незаполненных электронных оболочек ( $d$  или  $f$ ) атома;
2. Величина интеграла обменной энергии  $A > 0$ , что выполняется если диаметр незаполненных оболочек мал по сравнению с межатомным расстоянием кристаллической решетки:  $a/d > 1,5$ .

## Особенность ферромагнетиков:

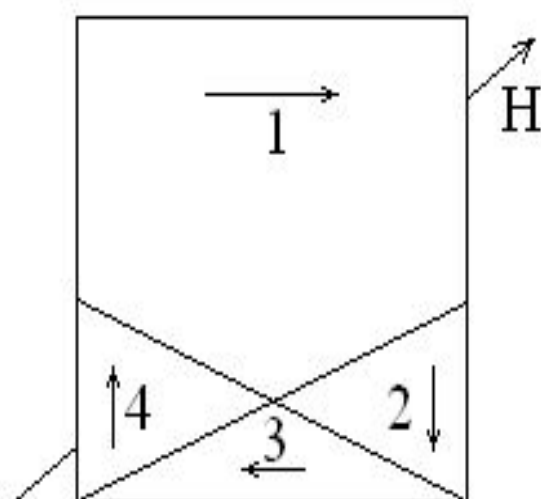
1. Наличие доменной структуры
2. Зависимость магнитного состояния от предшествующей магнитной истории
3. Наличие температуры Кюри



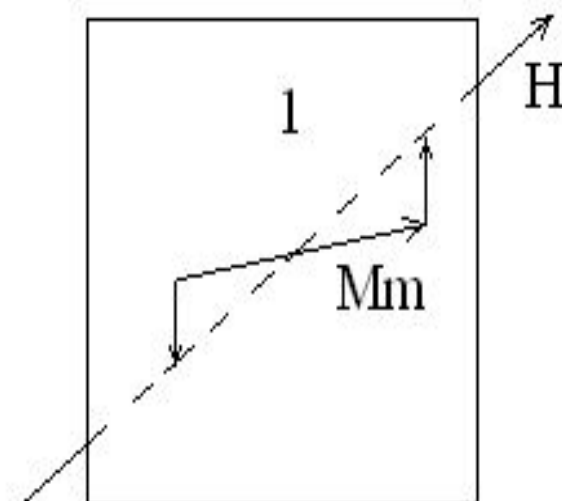
Магнитная структура граничного слоя в кристалле



а



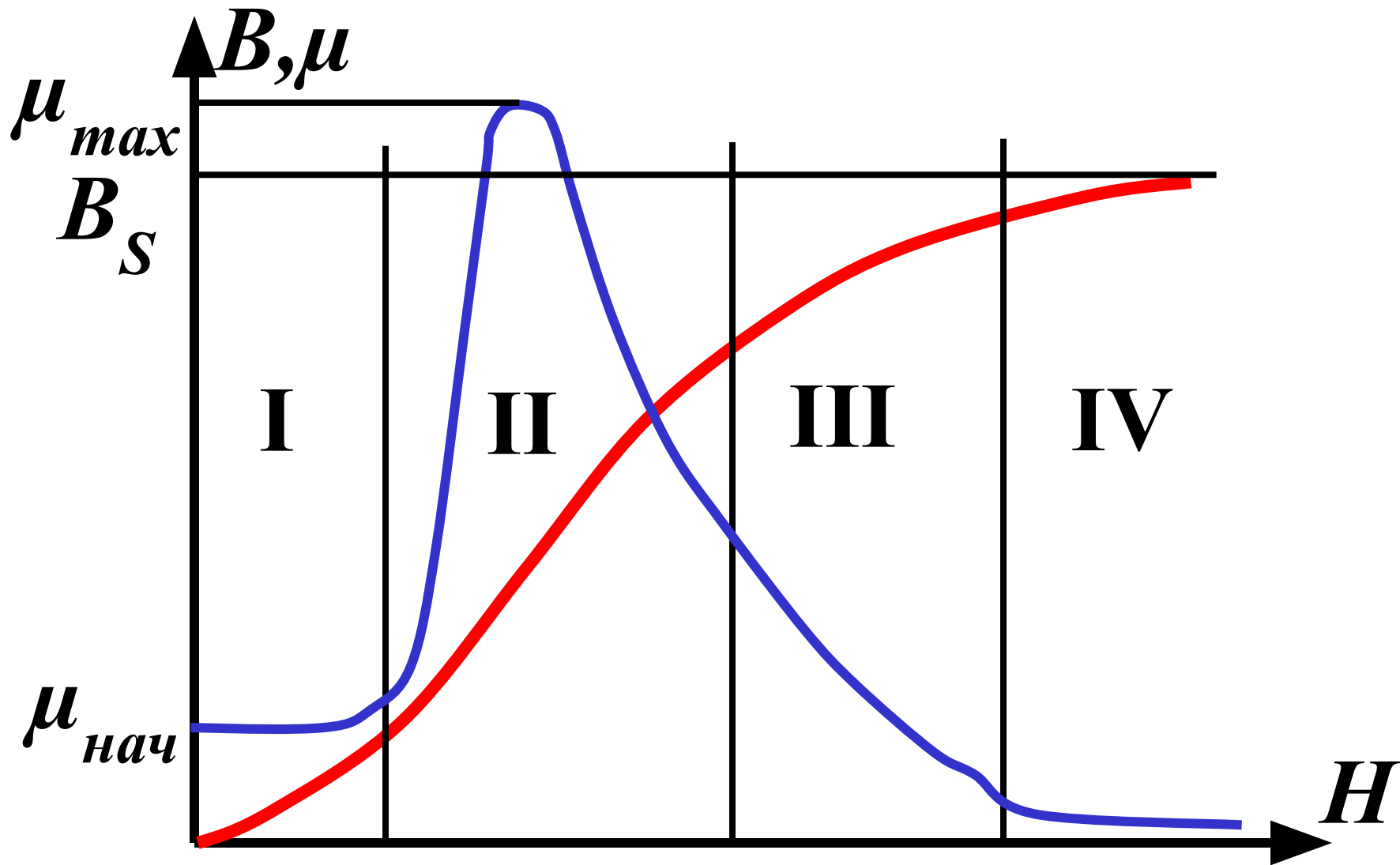
б



в

Схема процессов, протекающих при намагничивании





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

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

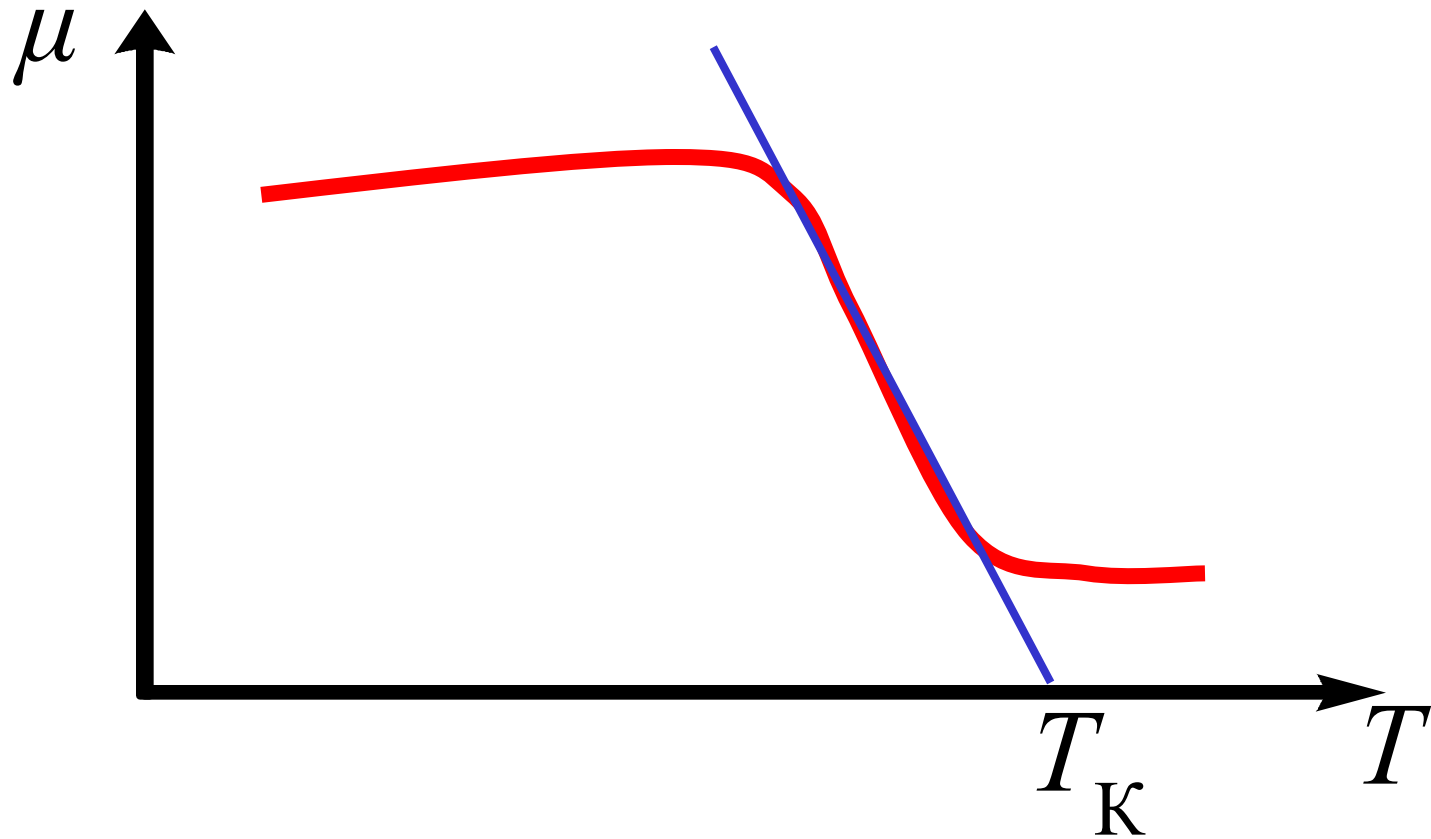
$$\mu_{\max} = B_{\max} / H_{\max} \quad (3)$$

Величина магнитной проницаемости зависит от вида приложенного внешнего магнитного поля

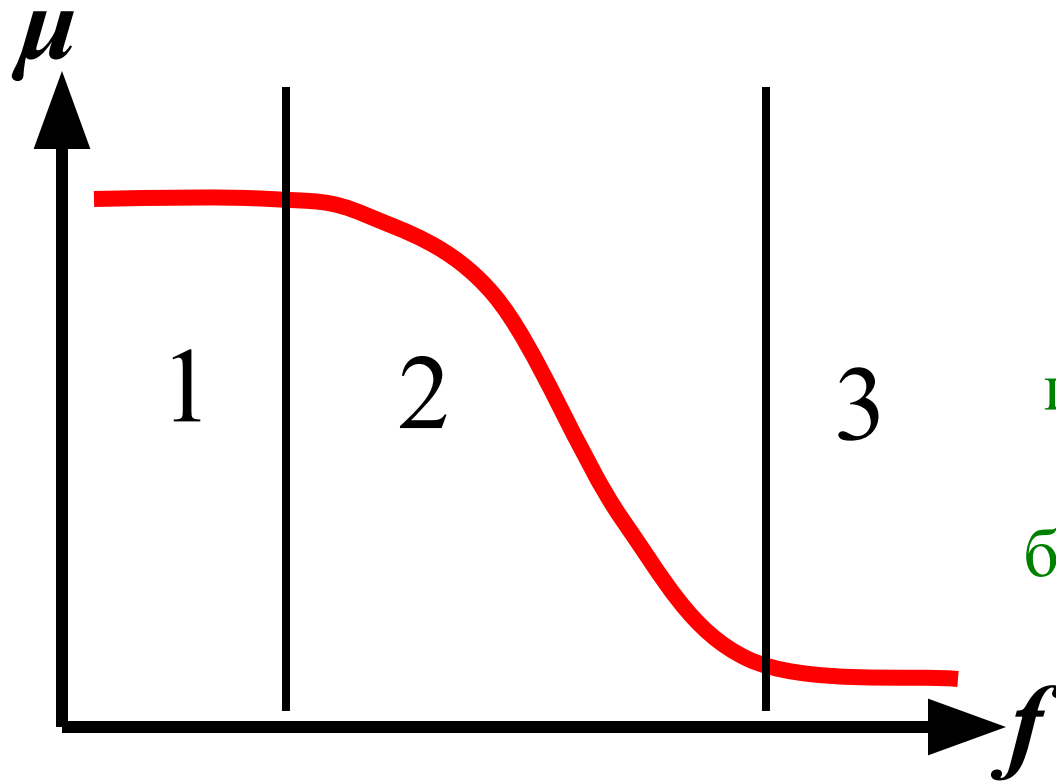
$$\mu_{\sim} = B_m / H_m \quad (4)$$

В переменном магнитном поле  $\mu$  зависит от частоты  $f$

Зависимость магнитной проницаемости  $\mu$  ферромагнитных материалов от температуры  $T$ .

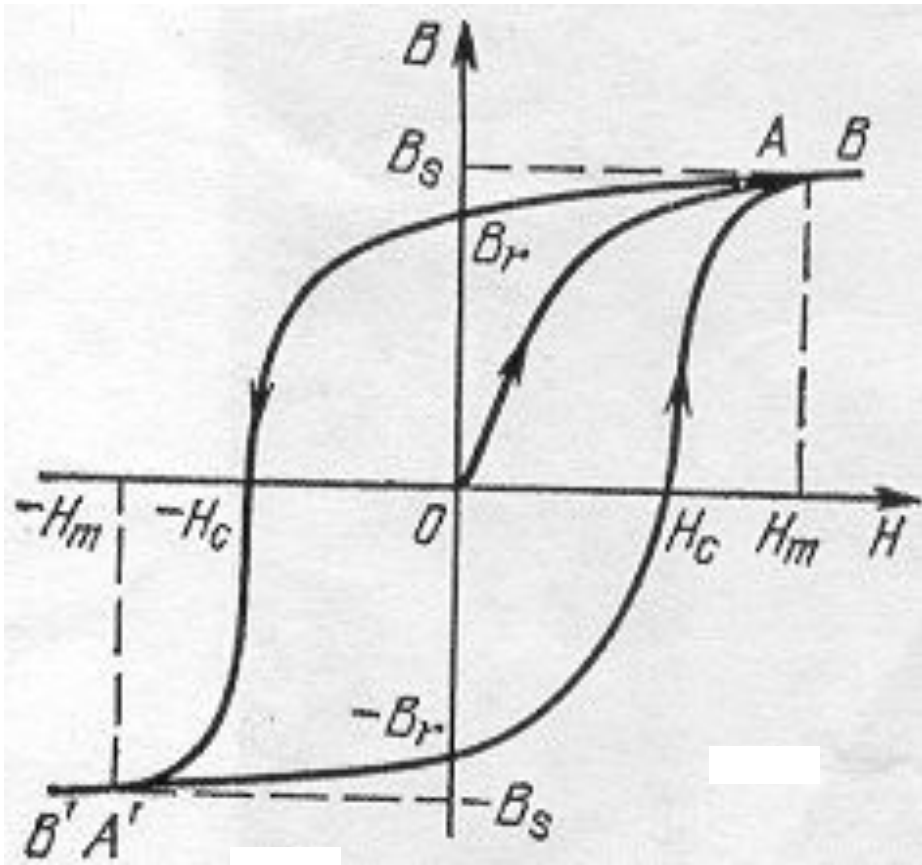


# ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ПРИЛОЖЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ $f$ НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ МАГНИТНУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ $\mu$



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

# 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

# *Виды потерь*

## 1. Потери на гистерезис

За один цикл к единице объема:

$$P_r = \oint H dB ; \text{ Дж/м}^3$$

Или к единице массы при перемагничивании  
с частотой  $f$  :

$$P_r = (f/D) \oint H dB ; \text{ Вт/м}^3$$

$f$  – частота [Гц]

$D$  – плотность вещества [кг/см<sup>3</sup>]

## 2. Потери на вихревые токи для листового сердечника

$$P_{\varepsilon} = \frac{1,64 \cdot d^2 \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2}{D \cdot \rho_V} \quad ; \quad \left[ \frac{Вт}{кг} \right]$$

$d$  — толщина листа [м]

$B_{\max}$  — амплитуда значения в [Тл]

$\rho_V$  — удельное объемное сопротивление [Ом·м]

# ВИДЫ МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ

## 1. ПОТЕРИ НА ГИСТЕРЕЗИС

$$P_{\Gamma} = f \frac{\oint H dB}{D} \text{ [Вт / кг]}$$

## 2. ПОТЕРИ НА ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

$$P_{\epsilon} = \frac{1,64 \cdot d^2 \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2}{D \cdot \rho_V}$$

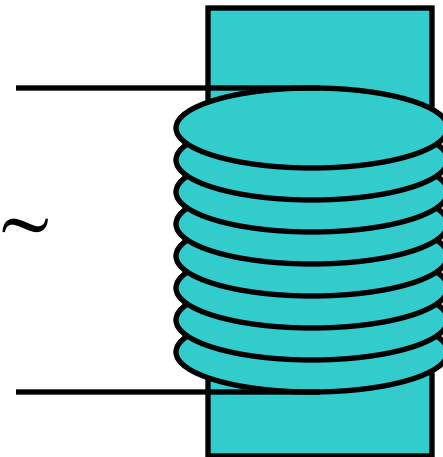
## 3. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ



# МАГНИТОСТРИКЦИЯ -

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

**Генераторы УЗ – колебаний.**



# Классификация магнитных материалов:

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