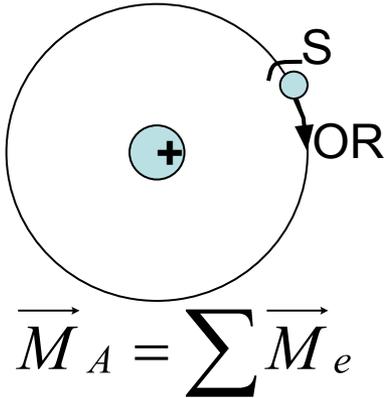


# Магнитные материалы



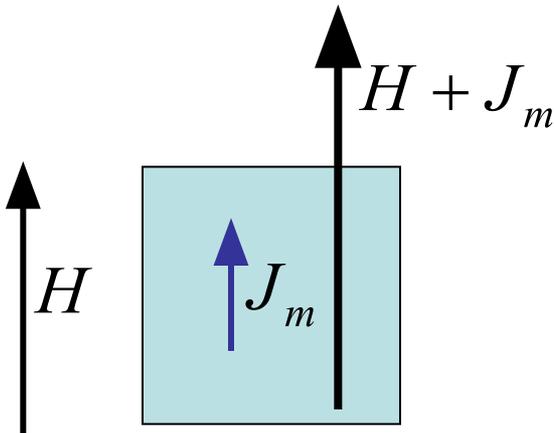
$$\vec{M}_e = \vec{M}_{OR} + \vec{M}_S \quad - \text{ магнитный момент электрона}$$

$$\vec{J}_m = \frac{\sum_{i=1}^N \vec{M}_A}{V} \quad \text{намагниченность} \quad \vec{J}_m = k_m \vec{H}$$

магнитный момент атома

$k_m$  - магнитная восприимчивость

Образец помещенный в магнитное поле напряженностью  $H$



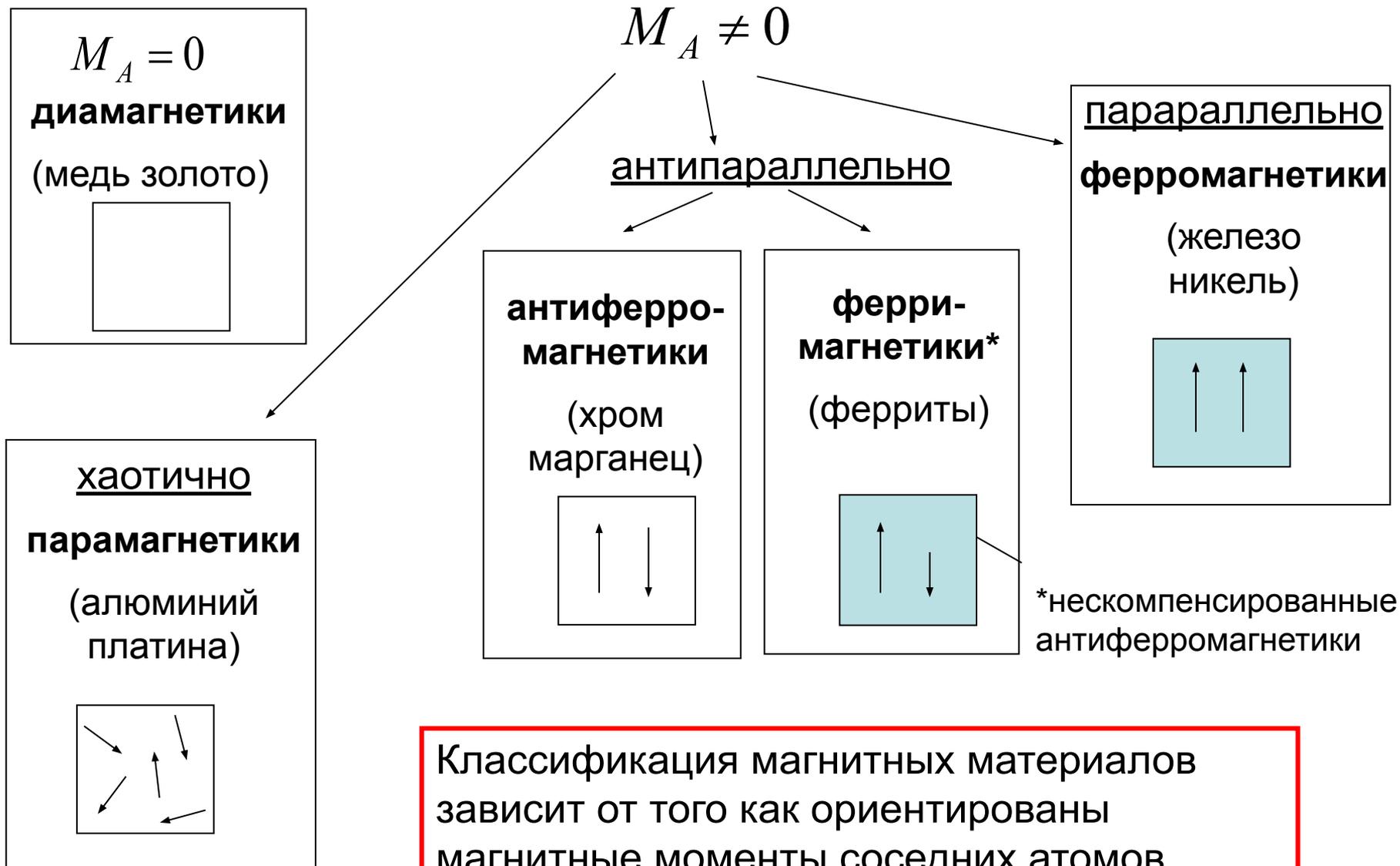
Полное поле в образце – сумма внешнего поля и намагниченности

$$H + J_m = H + k_m H = \mu H$$

$$\mu = 1 + k_m$$

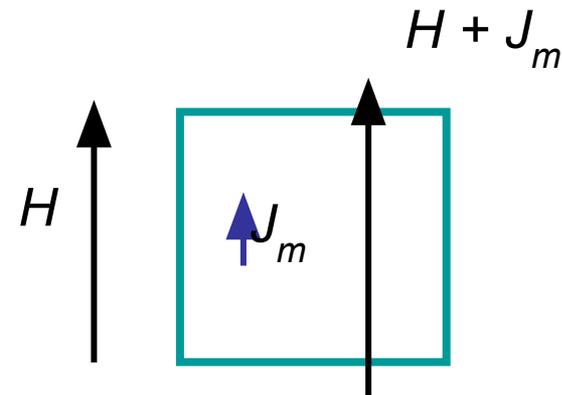
$\mu$  - магнитная проницаемость

# Классификация магнитных материалов

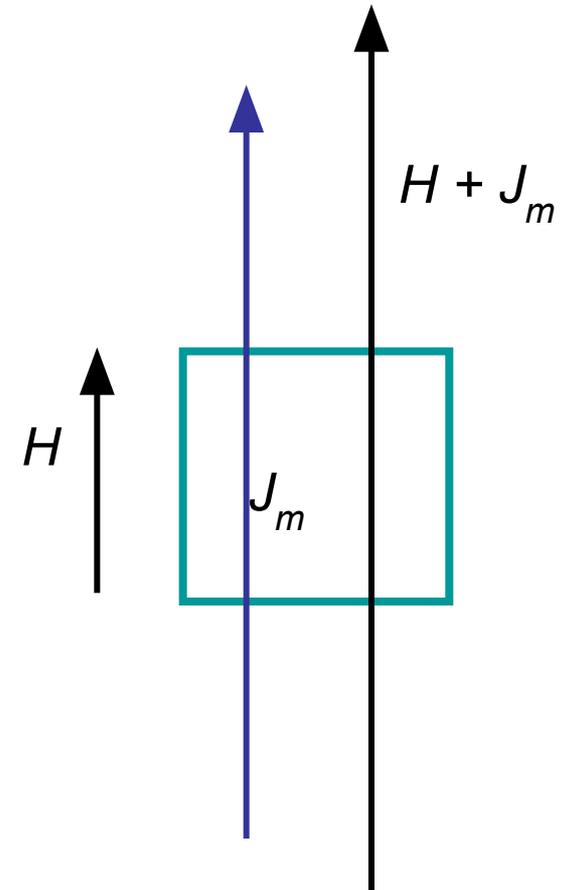


# Классификация магнитных материалов

диа	$k_m \approx -10^{-6}$	$\mu \approx 1$
пара	$k_m \approx 10^{-4}$	$\mu \approx 1$
антиферро	$k_m \approx 10^{-4}$	$\mu \approx 1$
<b><u>ферри</u></b>	$k_m \approx 10^3 - 10^4$	$\mu \approx 10^3 - 10^4$
<b><u>ферро</u></b>	$k_m \approx 10^4 - 10^5$	$\mu \approx 10^4 - 10^5$



Намагниченность ферро и ферримагнетиков во много раз больше, чем напряженность внешнего магнитного поля

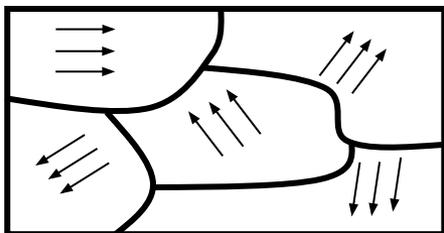


$$B = \mu_0 \mu H$$

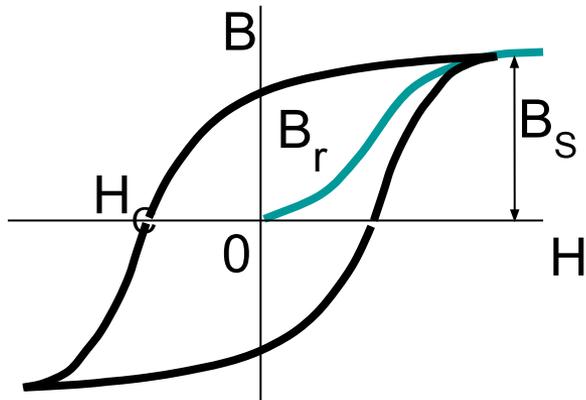
- магнитная индукция внутри образца

# Свойства ферро и ферримагнетиков

## Доменная структура



## Гистерезис



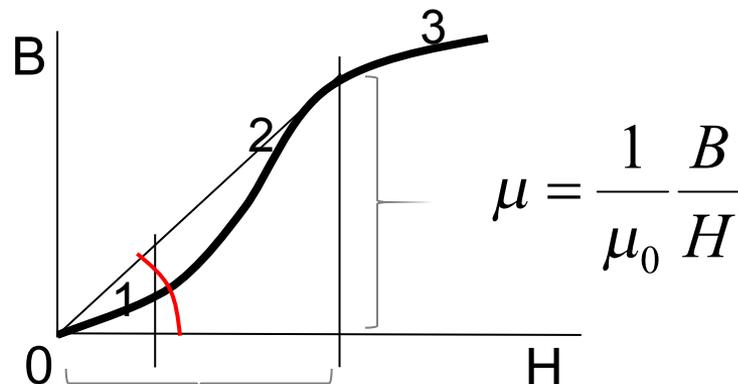
$B_s$  – индукция насыщения

$B_r$  – остаточная индукция

$H_c$  – коэрцитивная сила

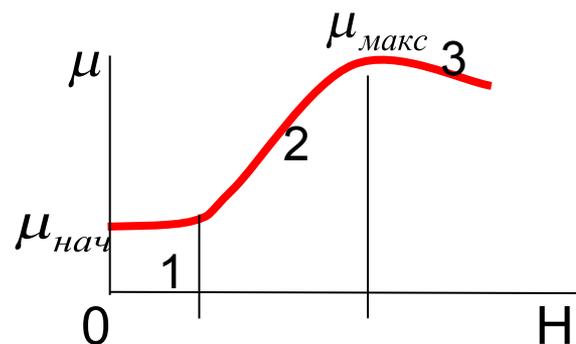
Коэрцитивная сила – такая напряженность магнитного поля, при которой материал размагничивается

## Кривая намагничивания



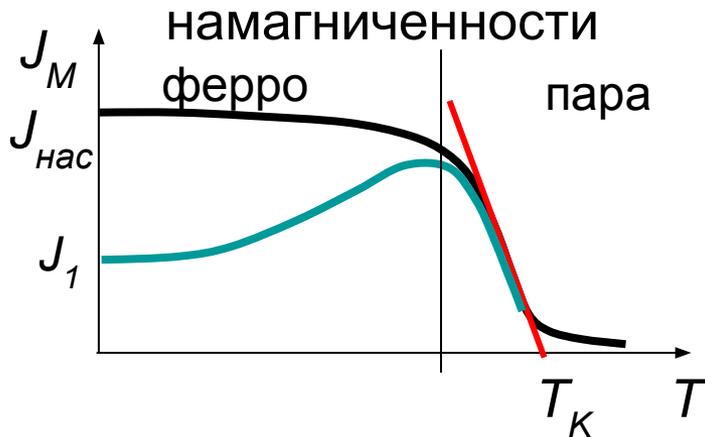
1 – упругое намагничивание  
3 - насыщение

## Зависимость $\mu$ от $H$



# Свойства ферро и ферримагнетиков

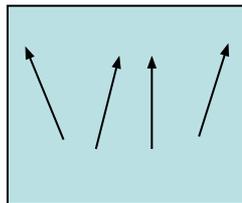
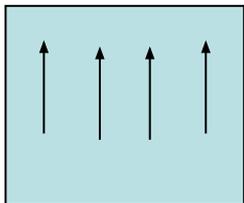
Температурная зависимость



$T_K$  - температура Кюри

Температура Кюри

Элемент	$T_K, ^\circ\text{C}$
Fe	771
Co	1115
Ni	354
Ni+25%Cu	105
Ni+5%Mo	120



$$J_{нас} > J_1$$

# Сравнение ферро и ферримагнетиков

## Сходство

- Доменная структура
- Похожие кривые намагничивания и петля гистерезиса
- Похожие температурные зависимости намагничивания

## Различия

Ферро (Fe, Ni, Co)	Ферри ( $\text{MeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ )
<ul style="list-style-type: none"><li>• Низкое удельное сопротивление</li><li>• Более высокая индукция насыщения</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Высокое удельное сопротивление</li></ul>

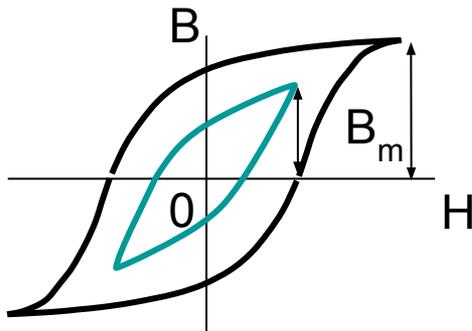
# Магнитные потери

В переменном магнитном поле происходит разогрев образца вследствие магнитных потерь

$$P_A = P_\Gamma + P_T$$

## Потери на гистерезис

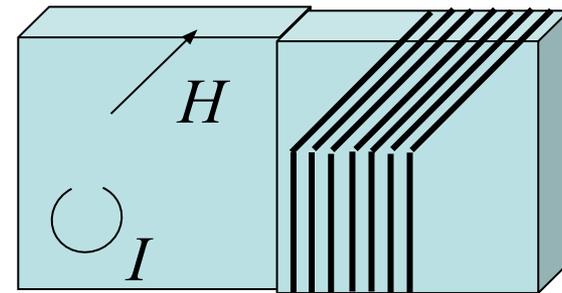
$$P_\Gamma = \eta f B_m^n$$



$\eta$  - пропорциональна площади петли гистерезиса

## Потери на вихревые токи

$$P_T = \xi f^2 B_m^2$$



$\xi$  - пропорциональна проводимости

## Уменьшение потерь

- Материал с узкой петлей гистерезиса

- Материал с высоким  $\rho$
- Разделение на изолированные пластины

# Магнитные потери и поверхностный эффект

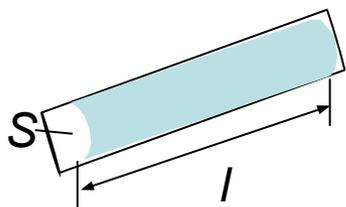
$$L = \mu_0 \mu \frac{n^2 S}{l}$$

- индуктивность сердечника ( $n$  – число витков)

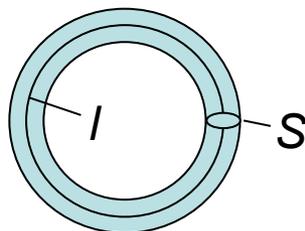
$$H = \frac{nl}{l}$$

- напряженность поля ( $n$  – число витков,  $I$  - ток)

## Форма сердечника

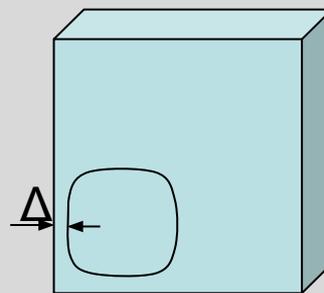


стержневой



тороидальный

## Поверхностный эффект



$$B(z) = B_0 \exp\left(-\frac{z}{\Delta}\right)$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu}}$$

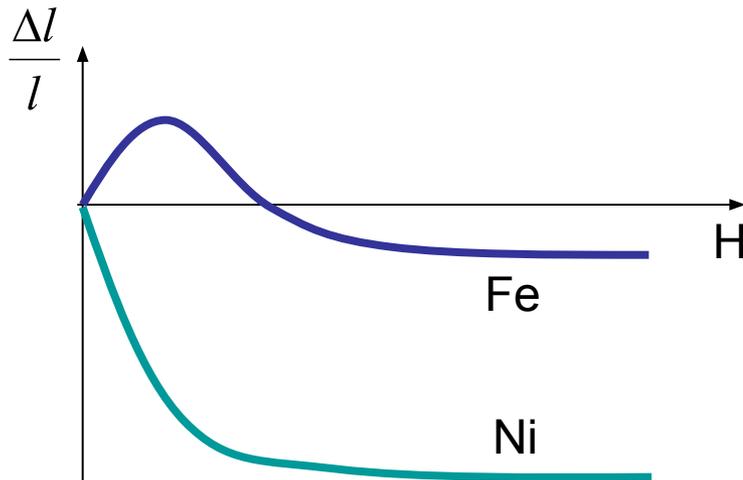
При высоких частотах намагничивается приповерхностный слой толщиной  $\Delta$

# Магнитострикция

Изменение размеров и формы тела при намагничивании называется магнитострикцией

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l}$$

относительная деформация  
характеризует магнитострикцию



Магнитострикция затрудняет процесс намагничивания (т.е. магнитная проницаемость снижается)

## Применение

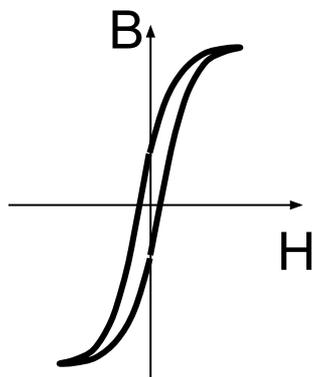
Преобразователи энергии (магнитной в механическую и наоборот): излучатели и приемники

# Классификация магнитных материалов

(по величине потерь на гистерезис)

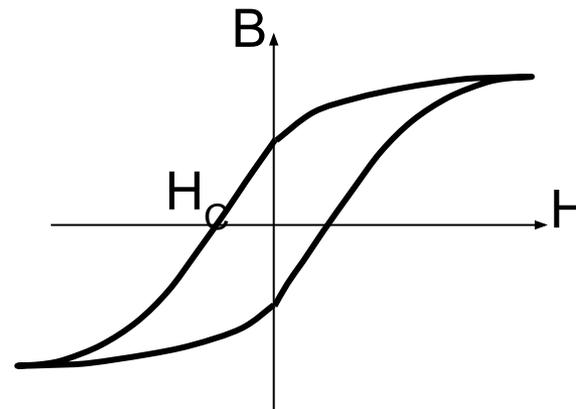
## Магнитомягкие

(с узкой петлей гистерезиса)



## Магнитотвердые

(с широкой петлей гистерезиса)



**Применение:**

В трансформаторах,  
дросселях, электромагнитах,

Постоянные магниты,  
элементы памяти,

# Классификация магнитных материалов

## Магнитомягкие

(по величине потерь на вихревые токи)

### Низкочастотные

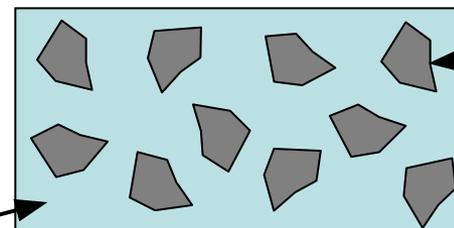
( $\rho$  мало)

- железо
- сталь
- пермаллой (Fe – Ni)
- альсифер (Fe-Si-Al)

### Высокочастотные

( $\rho$  велико)

- ферриты
- магнитодиэлектрики



диэлектрик

порошок  
магнитного  
материала

магнитодиэлектрик –  
композиционный материал

# Магнитомягкие низкочастотные материалы

## Железо и стали

<i>Материал</i>	$\mu_{нач}$	$\mu_{макс}$	$H_c, A/m$	$B_{нас}, Tл$
Карбонильное железо	2000	20000	6,4	0,1

Применение: магнитопроводы, работающие в постоянном поле

Электротехническая сталь	400	5000	10 - 65	2
--------------------------	-----	------	---------	---

Применение: генераторы, двигатели, силовые трансформаторы

Кремнистая электротехническая сталь - основной магнитомягкий материал массового применения

# Магнитомягкие низкочастотные материалы

## Пермаллои

(железо-никелевые сплавы)

<i>Вид пермаллоев</i>	$\mu_{нач}$	$\mu_{макс}$	$H_c, A/m$	$B_{нас}, Тл$
Низконикелевые	2000	20000	8 – 24	1
Высоконикелевые	40000	200000	1 – 8	0,75
Супермаллой (Ni, Fe, Mo, Mn)	100000	1000000	0,3	0,79
Альсифер (Fe, Si, Al)	35000	100000	1,8	-
Пермендюр (Fe, Co, V)	300	1000	-	2

Применение: для изготовления малогабаритных трансформаторов, реле

# Магнитомягкие материалы

## Некоторые марки ферритов

Марка	$T_K, ^\circ\text{C}$	$\mu_{\text{нач}}$	$\mu_{\text{макс}}$	$\rho, \text{Ом} \cdot \text{м}$
20000НМ	110	20000	35000	$< 0,01$
4000НМ	125	4200	7000	0,5
1000НН	110	1000	3000	$10^4$
150ВН	400	150	330	$10^4$
7ВН	450	7	15	$10^6$

Применение: сердечники катушек индуктивностей, стержневые антенны, высокочастотные трансформаторы, магнитные головки в аудио и видео аппаратуре

# Магнитотвердые материалы

## Литые высококоэрцитивные сплавы

$Fe - Ni - Al$

$Fe - Ni - Co - Al$

Сплав	$H_c$ , кА/м	$B_r$ , Тл
ЮНД4	40	0,50
ЮНДК31Т3Б	92	1,15
ЮНДК35Т5Б	110	1,02

Б – ниобий, Д – медь, Н – никель,  
Т – титан, Ю – алюминий, К -кобальт

## Сплавы на основе редкоземельных металлов

$RCO_5$

Сплав	$H_c$ , кА/м	$B_r$ , Тл
$SmCo_5$	560	0,92
$PrCo_5$	415	0,94

$NdFeB$	850	1,2
---------	-----	-----

Применение: постоянные магниты, диски для записи информации