

# Магнитные материалы

Выполнил: Павел Андреевич

*Магнитные материалы (магнетики)* - это материалы, заметно изменяющие свою намагниченность при воздействии на них возбуждающего внешнего магнитного поля.

# Намагниченность

Намагниченность  $J_M$  связана с напряженностью возбуждающего магнитного поля  $H$  соотношением

$$J_M = \chi_M H, \text{ А/м}, \quad (3.1)$$

где  $\chi_M$  - магнитная восприимчивость материала.

Магнитная восприимчивость является безразмерной величиной, характеризующей способность магнетика перемагничиваться. Вещества с отрицательной магнитной восприимчивостью  $\chi_M < 1$  называют *диамагнетиками*. Материалы с положительной магнитной восприимчивостью  $\chi_M > 1$  являются *парамагнетиками*.

$1 + \chi_M = \mu$  – относительная магнитная проницаемость вещества

Очевидно, что диамагнетики характеризуются значением магнитной проницаемости  $\mu < 1$ , а для парамагнетиков  $\mu > 1$ .

# Магнитное поле в веществе

Индукция намагниченности в веществе  $B_i$  измеряется в теслах (Т) и выражается соотношением

$$B_i = \mu_0 J_M = \mu_0 \chi_M H, \text{ Тл}, \quad (3.2)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Г/м - магнитная постоянная.

Обозначим индукцию внешнего магнитного поля через  $B_0$ :

$$B_0 = \mu_0 H, \text{ Т}. \quad (3.3)$$

Индукция результирующего магнитного поля внутри магнетика представляет сумму внешней  $B_0$  и внутренней  $B_i$  индукций:

$$B = B_0 + B_i. \quad (3.4)$$

Подставляя в выражение (3.4) значения  $B_0$  из (3.3) и  $B_i$  из (3.2) получим, что

$$B = \mu_0 H + \mu_0 \chi_M H = \mu_0 (1 + \chi_M) H, \quad (3.5)$$

где  $1 + \chi_M = \mu$  - статическая магнитная проницаемость вещества.

Заменяя в формуле (3.5) значение  $1 + \chi_M$  на  $\mu$  получим известное выражение, связывающее напряженность магнитного поля  $H$  с индукцией магнитного поля  $B$  в веществе:

$$B = \mu_0 \mu H. \quad (3.6)$$

Из выражения (3.6) получаем соотношение для статической магнитной проницаемости вещества в виде

$$\mu = (1/\mu_0) B/H. \quad (3.7)$$

# Ферромагнетизм

**Ферромагнетики** - это магнитоупорядоченные материалы, атомы которых имеют большое количество неспаренных (нескомпенсированных) спиновых магнитных моментов атомов.

К классу ферромагнетиков относятся элементы переходных групп **Fe, Co, Ni** (элементы группы железа), а также редкоземельные элементы **Gd, Dy, Ho, Er, Tm**.

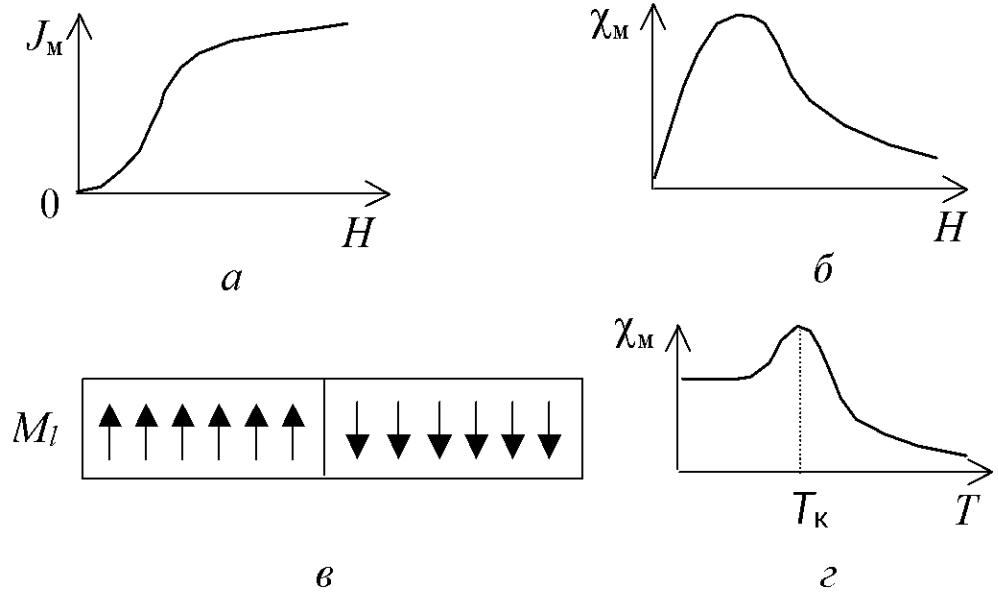
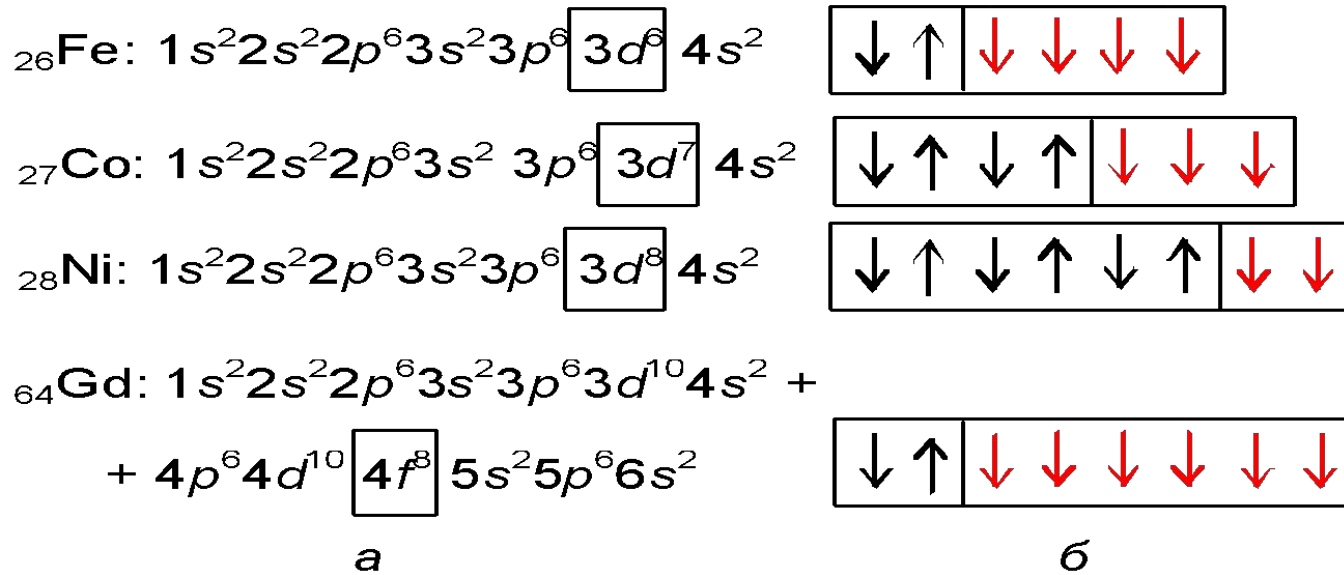


Рис. 3.6. Зависимость намагниченности  $J_M$  - а и магнитной восприимчивости  $\chi_M$  - б ферромагнетиков от напряженности внешнего магнитного поля  $H$ ; в - доменная структура ферромагнетика; г - температурная зависимость  $\chi_M$

# Природа ферромагнетизма



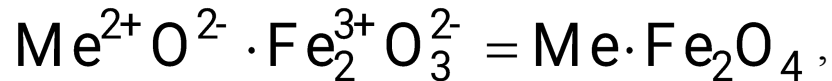
**Конфигурации электронных оболочек ферромагнетиков - *a*** и условные изображения ориентации спинов электронов на недостроенных электронных оболочках - *б*

Материал	$\chi_M = \mu - 1$	$T_K$ °C	Количество неспаренных электронов
${}_{26}\text{Fe}$	1000	770	4
${}_{27}\text{Co}$	150	1150	3
${}_{28}\text{Ni}$	240	360	2

# Антиферромагнетики и ферримагнетики

**Антиферромагнетики** – это металлы, у которых спонтанно возникает антипараллельная ориентация спиновых магнитных моментов соседних одинаковых атомов (рис. 3.8, а). К антиферромагнетикам относятся металлы переходной группы - **хром** (Cr), **марганец** (Mn) и их окислы.

**Ферримагнетики.** Это материалы, магнитные свойства которых обусловлены нескомпенсированным антиферромагнетизмом. К ферримагнетикам относятся **ферриты** - сложные химические соединения, характеризующиеся антипараллельным расположением неравных магнитных моментов соседних атомов, представляющих различные химические элементы, входящие в состав феррита. Химическая формула феррита записывается в виде



где  $\text{Me}^{2+}$  - катион двухвалентного металла, так называемый *характеризующий ион*. Ориентация спиновых магнитных моментов атомов соседних ячеек, входящих в состав ферримагнетика, условно изображена на рис. 3.8, б.



Рис. 3.8. Условные изображения ориентации спиновых магнитных моментов в различных материалах: а - антиферромагнетики; б - ферримагнетики

## Влияние межатомного расстояния на магнитные свойства материалов

Магнитные моменты атомов в ферромагнитных и антиферромагнитных материалах выстраиваются параллельно друг другу в результате *обменного взаимодействия электронов* внутренних недостроенных оболочек атомов. Энергия обменного взаимодействия рассчитывается из выражения

$$W_{\text{обм}} = -2J \sum_{i=1}^N (\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_{i+1}), \text{ Дж}, \quad (3.28)$$

где  $J$  - обменный интеграл, Дж;  $(\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_{i+1}) = S_i S_{i+1} \cos \phi$  - скалярное произведение результирующих спинов  $i$ -го и  $(i+1)$ -го соседних атомов;  $\phi$  - угол между направлениями спинов электронов соседних атомов;  $N$  - число спинов.

$a$  – межатомное расстояние

$d$  – диаметр атома;

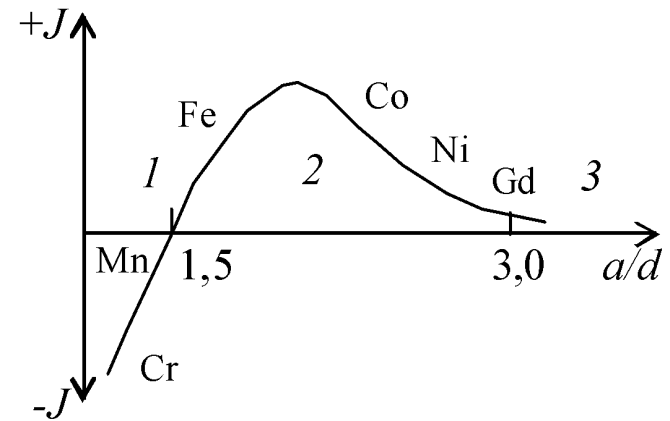


Рис. 3.9. Зависимость обменного интеграла  $J$  от отношения  $a/d$

*Область 1.* Характеризуется значениями  $(a/d) \leq 1,5$ ;  $J < 0$ . **Антиферромагнетик**

*Область 2.* Характеризуется значениями  $1,5 \leq (a/d) \leq 3,0$ ;  $J > 0$ . **Ферромагнетик**

*Область 3.* Характеризуется значениями  $(a/d) \geq 3,0$ ;  $J > 0$ . **Парамагнетик**



# Доменная структура ферромагнетиков

Внутреннее размагничивающее поле приводит к самопроизвольному делению материала на более мелкие магнитные структуры - **домены** с противоположными магнитными полюсами (рис. 3.10, *а*). При этом внутреннее магнитное поле замыкается внутри ферромагнетика, уменьшая избыточную **свободную магнитную энергию**.

Доменная граница представляет собой переходную область, называемую **стенкой Блоха**, размером около 0,1 мкм (примерно 400 межатомных расстояний). В этой области магнитные моменты атомов плавно разворачиваются на угол  $\phi=180^\circ$  и направления намагниченности в соседних доменах оказываются противоположными (рис. 3.10, *б*).

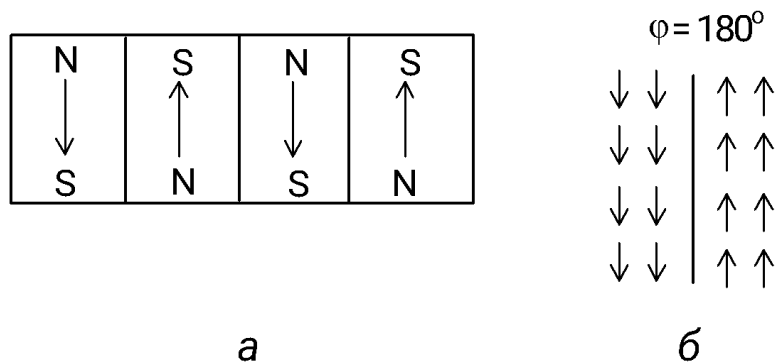


Рис. 3.10. Доменная структура ферромагнетиков:  
а - схема деления ферромагнетиков на домены;  
б - структура доменной границы

# Магнитная анизотропия

В монокристаллах ферромагнитных материалов имеются направления *легкого и трудного намагничивания*, то есть существует **магнитная анизотропия**. Для намагничивания монокристаллического образца до насыщения вдоль одной из осей легкого намагничивания нужно затратить значительно меньшую энергию, чем для такого же намагничивания вдоль оси трудного намагничивания.

Для **железа**, кристаллизующегося в ОЦК решетку (рис. 3.11, *a*), направлениями легкого намагничивания являются шесть эквивалентных направлений  $\langle 100 \rangle$ . Направления трудного намагничивания для монокристалла железа - это шесть эквивалентных направлений  $\langle 111 \rangle$ , представляющих пространственные диагонали куба.

**Никель**, кристаллизующийся в ГЦК решетку, наоборот, характеризуется направлениями легкого намагничивания  $\langle 111 \rangle$ , совпадающими с пространственной диагональю куба (рис. 3.11*б*), а направления трудного намагничивания монокристалла никеля совпадают с ребрами куба и характеризуются индексами  $\langle 100 \rangle$ .

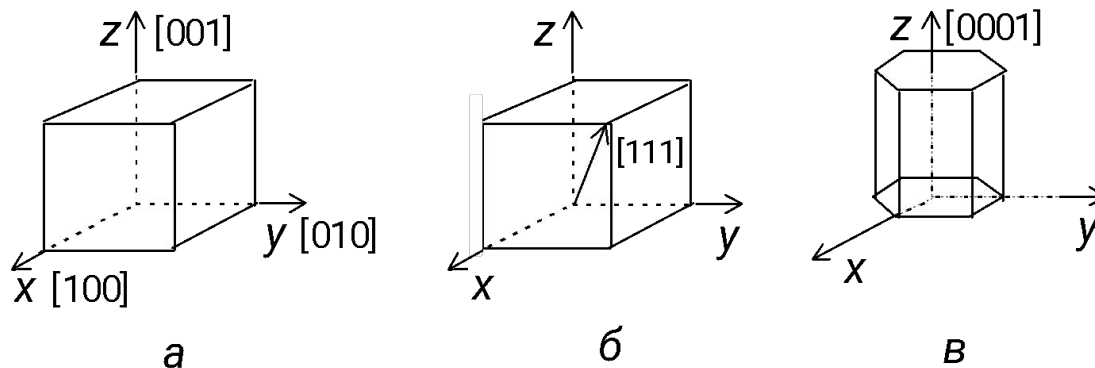


Рис. 3.11. Направления легкого намагничивания для элементов переходной группы: *a* - железо; *б* - никель; *в* - кобальт

# Процессы при намагничивании ферромагнетиков

Начальная (основная) кривая намагничивания ферромагнетика. Эта кривая представлена на рис. 3.12. Она получается при монотонном увеличении напряженности магнитного поля  $H$  в образце от нуля до некоторого максимального значения.

Напряженность магнитного поля, создаваемого при пропускании тока в катушке, рассчитывается из соотношения

$$H = \frac{IN}{l}, \text{ А/м,} \quad (3.29)$$

где  $N$  - число витков соленоида,  $l$  - длина соленоида.

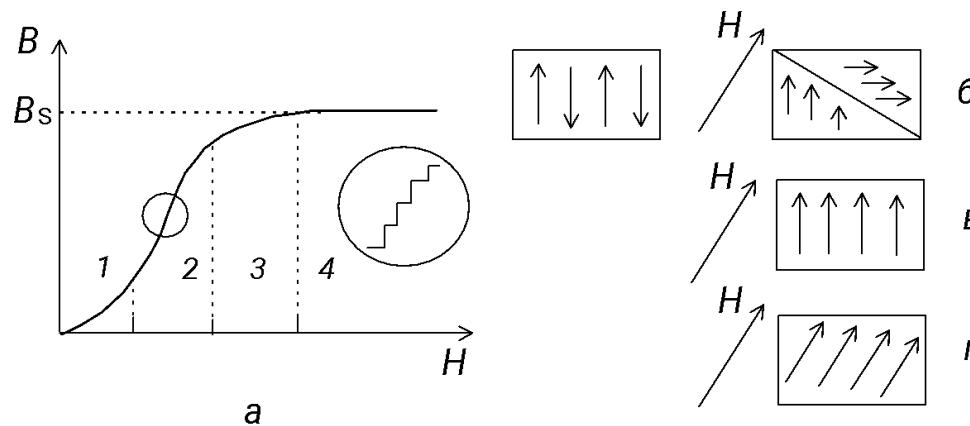


Рис. 3.12. Основная (начальная) кривая намагничивания ферромагнетика  $a$ ; условные изображения структуры доменов на различных участках кривой намагничивания:  $б$  - необратимое смещение доменных границ на участке 2;  $в$  - процесс вращения на участке 3;  $г$  - ориентация магнитных моментов вдоль поля на участке 4

## Кривая намагничивания при циклическом перемагничивании

$B_s$  – индукция технического насыщения;

$B_r$  – остаточная индукция;

$H_c$  – коэрцитивная сила.

**Дифференциальная магнитная проницаемость**

$$\mu_d = (1/\mu_0) dB/dH. \quad (3.31)$$

Значение  $\mu_d$  находится путем дифференцирования основной кривой намагничивания ферромагнетика

$B=f(H)$

**Начальная магнитная проницаемость**

$$\mu_H = (1/\mu_0) \lim_{H \rightarrow 0} (B/H) \quad (3.32)$$

**Импульсная магнитная проницаемость**

$$\mu_{\text{и}} = (1/\mu_0) \Delta B/\Delta H. \quad (3.33)$$

где  $\Delta B = B_s - B_r$  - изменение индукции возбуждающего импульсного магнитного поля;

$\Delta H = H_2 - H_1$  - изменение напряженности импульсного магнитного поля;

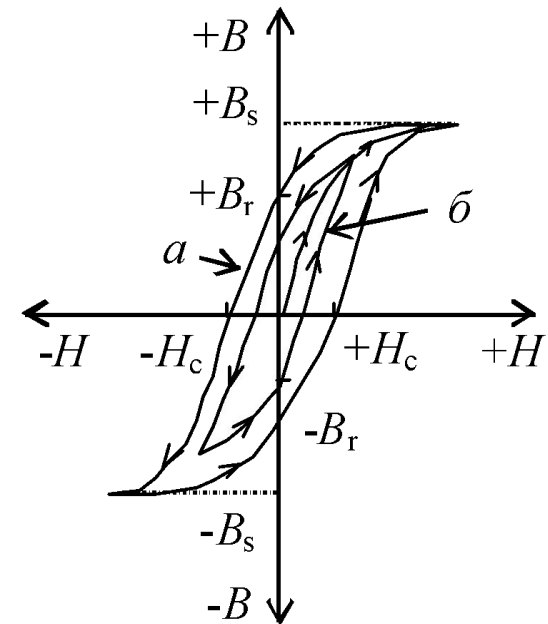


Рис. 3.13. Предельная -  $a$  и частная -  $б$  кривые намагничивания при циклическом перемагничивании

# Эффект магнитострикции в ферромагнетиках

Процесс перемагничивания магнитного материала сопровождается **эффектом магнитострикции**, то есть *изменением формы и размера магнитного материала*. При этом в результате деформации в кристаллической решетке ферромагнетика возникают внутренние механические напряжения.

Количественной мерой магнитострикции служит коэффициент магнитострикции  $M$ , который определяется как относительное изменение линейного размера  $\Delta l/l$  магнитострикционного материала:

$$M = \frac{\Delta l}{l}, \quad (3.35)$$

где  $\Delta l = l - l_1$  - абсолютное изменение размера образца;  $l$  - исходный размер образца;  $l_1$  - размер образца при возбуждении внешним магнитным полем

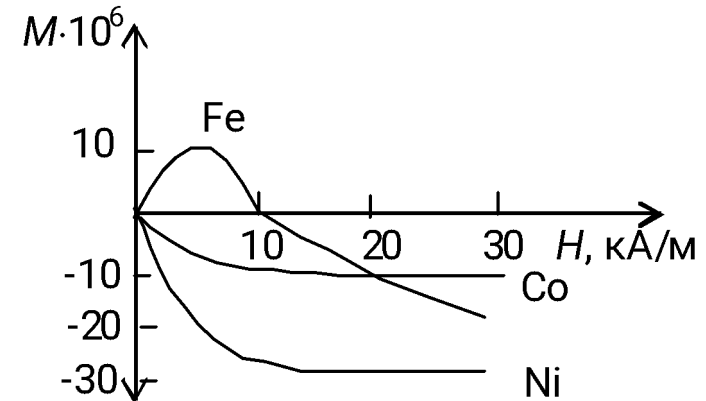


Рис. 3.16. Зависимость коэффициента магнитострикции  $M = f(H)$  для элементов группы железа

# Компенсация чётности магнитострикционного эффекта

Рассмотрим воздействие на магнитострикционный материал переменного магнитного поля  $H\sim$ , изменяющегося по гармоническому закону

$$H = H_m \sin 2\pi f t, \quad (3.36)$$

где  $H_m$  - амплитуда,  $f$  - частота магнитного поля,  $t$  - время.

В результате воздействия частота деформации ферромагнетика удваивается и изменяется по закону

$$\xi = \xi_m \sin 4\pi f t, \quad (3.37)$$

где  $\xi = \Delta l / l$  - относительная деформация,  $\xi_m$  - амплитуда деформации.

Из рис. 3.17, в следует, что *если одновременно с переменным магнитным полем  $H\sim$  на магнитострикционный материал воздействовать постоянным магнитным полем  $H_0$  (полем смещения), то эффект удвоения частоты устраняется.*

При этом частотная зависимость деформации образца магнитострикционного материала описывается выражением

$$\xi = \xi_0 + \xi_m \sin 2\pi f t, \quad (3.38)$$

где  $\xi_0$  - статическая деформация образца магнитострикционного материала.

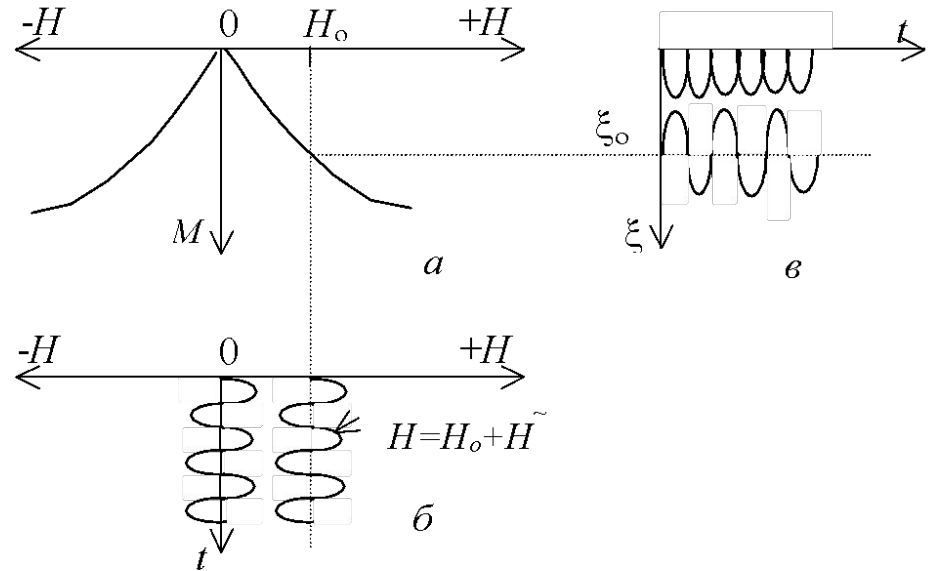


Рис. 3.17. Иллюстрация четности магнитострикционного эффекта для Ni: а- зависимость коэффициента магнитострикции  $M=f(H)$  для переменного магнитного поля  $\tilde{H}$ ; б - изменение напряженности магнитного поля  $H=f(t)$ ; в - деформация образца  $\xi=f(t)$

$H_0$  - постоянная составляющая магнитного поля,  $\xi_0$  - статическая деформация образца в результате действия смещающего магнитного поля  $H_0$ .

# Магнитострикционный преобразователь

В радиотехнике магнитострикционные преобразователи широко применяются в **электромеханических фильтрах (ЭМФ)**. Конструкция простейшего магнитострикционного преобразователя изображена на рис. 3.18.

Специфическим параметром магнитострикционных преобразователей является **коэффициент электромеханической связи**,  $k_m$ , значение которого определяется из соотношения

$$k_m^2 = P_a / P_r, \quad (3.39)$$

где  $P_a$  - мощность акустических колебаний, излучаемых преобразователем,  $P_r$  - мощность, потребляемая преобразователем от генератора электрических сигналов.

Значение коэффициента электромеханической связи для типичных магнитострикционных преобразователей составляет 0,1...0,3.

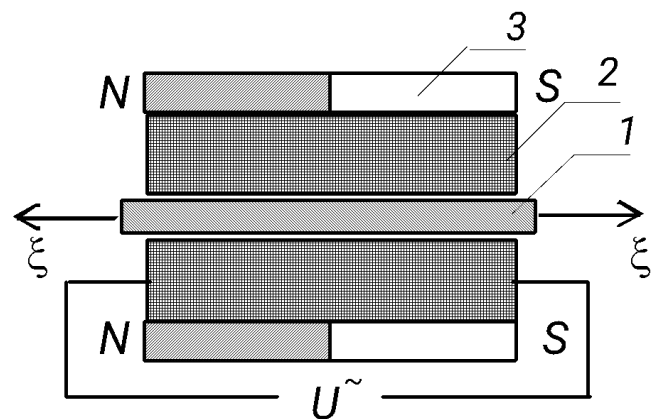


Рис. 3.18. Конструкция магнитострикционного преобразователя:  
1 - стержень из магнитострикционного материала, 2 - катушка возбуждения, 3 - постоянный магнит

# Перемагничивание ферромагнетиков в переменных электромагнитных полях

Процесс перемагничивания сопровождается потерями энергии, приводящими к нагреву материала. Удельная мощность потерь энергии на перемагничивание  $p_c$  складывается из двух составляющих:

$$p_c = p_\Gamma + p_B, \text{ Вт/кг}, \quad (3.40)$$

где  $p_\Gamma$  - *удельная мощность потерь на гистерезис* (потери на гистерезис);  $p_B$  - *мощность потерь на вихревые токи*.

В практических случаях для вычисления *удельных потерь на гистерезис* пользуются эмпирической формулой

$$p_\Gamma = \eta B_M^n f, \text{ Вт/кг}, \quad (3.42)$$

где  $\eta \approx 1$  - коэффициент;  $B_M$  - максимальная индукция, достигаемая в данном цикле, Тл;  $n=(1,6...2)$ - показатель степени, зависящий от  $B_M$ ;  $f$ - частота, Гц.

При расчете *удельных потерь на вихревые токи* пользуются экспериментально полученным соотношением

$$p_B = \zeta B_M^2 f^2, \text{ Вт/кг}, \quad (3.43)$$

где  $\zeta \sim 1/\rho$  - постоянный коэффициент для данного материала



# Высокочастотные потери в ферромагнетиках

На частотах более 50 кГц в слабых электромагнитных полях потери в ферромагнетиках характеризуются параметром, который носит название *тангенс угла магнитных потерь* и обозначается  $\operatorname{tg}\delta_{\mu}$ . Физический смысл  $\operatorname{tg}\delta_{\mu}$  нетрудно выяснить, выполнив анализ соотношения

$$\operatorname{tg}\delta_{\mu} = P_a / P_x, \quad (3.44)$$

где  $P_a$  - активная мощность электромагнитного поля, выделяющаяся в ферромагнетике в виде тепла;  $P_x$  - полная мощность возбуждающего магнитного поля.

Для ферромагнитных сердечников высокочастотных катушек индуктивности максимальное значение  $\operatorname{tg}\delta_{\mu}$  не должно превышать 0,1.

Величину, обратную  $\operatorname{tg}\delta_{\mu}$ , называют *добротностью*  $Q$ , следовательно  $Q = 1/\operatorname{tg}\delta_{\mu}$ .

# Поверхностный эффект в ферромагнетиках

Вихревые токи оказывают размагничивающее действие на ферромагнетик и экранируют его центральные области от проникновения внешнего переменного магнитного поля. Этот эффект проявляется в уменьшении индукции магнитного поля в ферромагнетике и снижении эффективной магнитной проницаемости материала  $\mu_{\text{эф}}$ . Значение переменной магнитной индукции  $B_{\sim}$  внутри ферромагнетика уменьшается с глубиной  $x$  по экспоненциальному закону (рис. 3.19)

$$B_{\sim} = B_0_{\sim} \exp(-x/x_{\text{эф}}), \quad (3.45)$$

где  $B_0_{\sim}$  - индукция переменного магнитного поля на поверхности ферромагнетика;  $x_{\text{эф}}$  - эффективная глубина проникновения магнитного поля в ферромагнетик, представляющая глубину  $x$ , для которой  $B_{\sim}/B_0_{\sim} = 0,37$ .

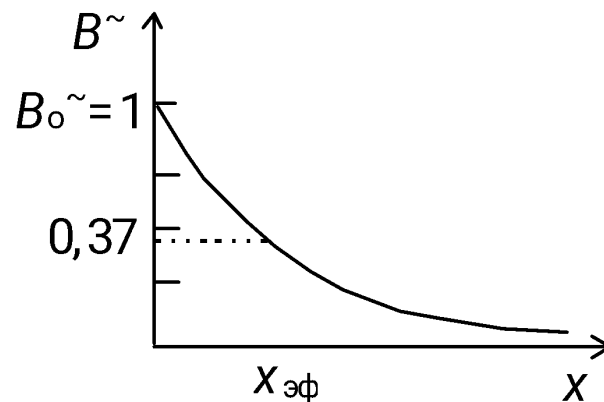


Рис. 3.19. Зависимость  $B_{\sim} = f(x)$

Значение  $x_{\text{эф}}$  рассчитывается по формуле

$$x_{\text{эф}} = 5 \cdot 10^2 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \text{ м}, \quad (3.46)$$

где  $\rho$  - удельное электросопротивление ферромагнетика, Ом·м;  $f$  - частота электромагнитного поля, Гц;  $\mu$  - эффективная магнитная проницаемость материала.

# Классификация магнитных материалов

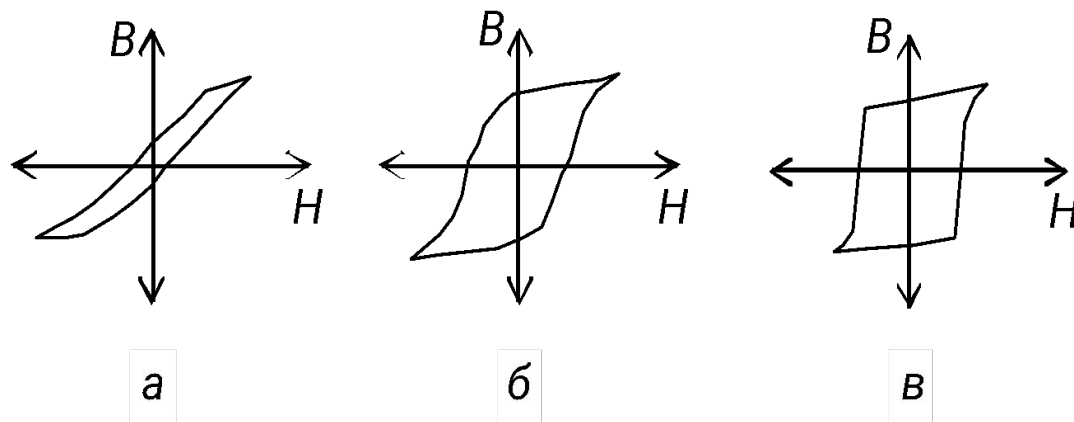
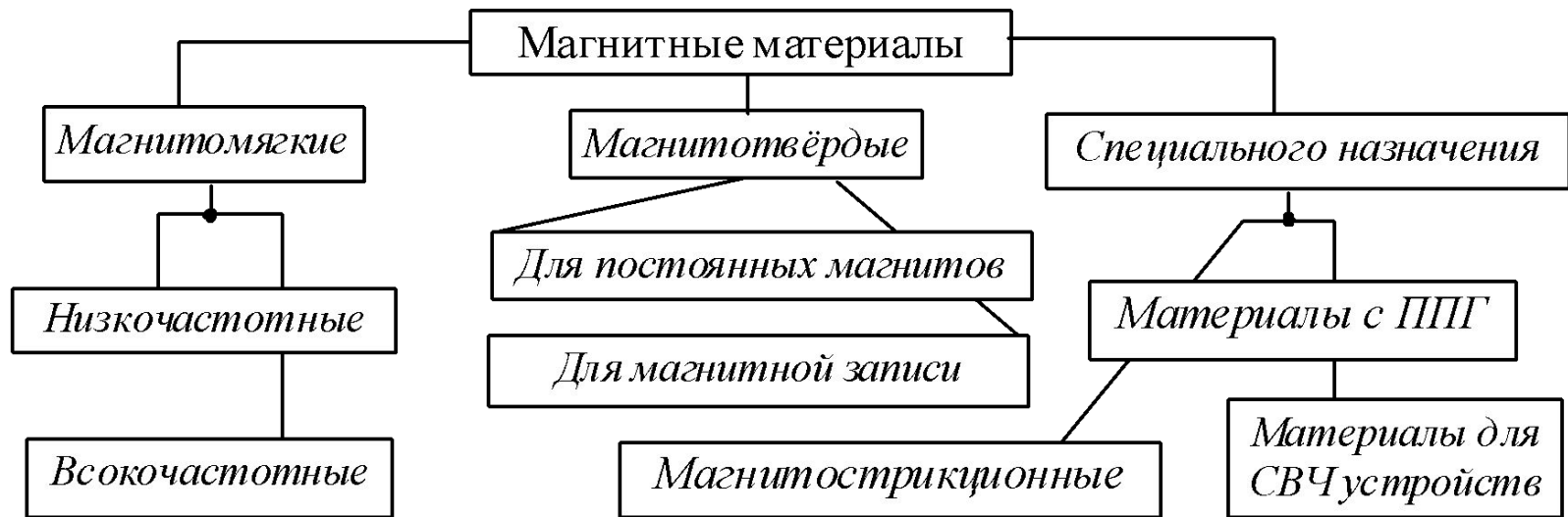


Рис. 3.19. Предельные петли гистерезиса различных материалов: а - магнитомягкие материалы; б - магнитотвёрдые материалы; в - материалы с ППГ

**Магнитомягкие материалы** - это материалы, которые имеют относительно небольшое значение коэрцитивной силы, не превышающее 4 кА/м и, в связи с этим, характеризующиеся узкой петлей гистерезиса.

**Магнитотвёрдые материалы** характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы (более 4 кА/м) и обладают широкой петлей гистерезиса.

**Материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ)** имеют форму петли гистерезиса, близкую к прямоугольной.

# Магнитомягкие материалы

# Низкочастотные магнитомягкие материалы



## Общие требования, предъявляемые к низкочастотным магнитомягким материалам:

- высокая индукция насыщения ( $B_s \approx 1$  Тл), что позволяет разработчику снижать массо-габаритные характеристики проектируемой магнитной системы;
- относительно невысокие потери на перемагничивание ( $p_m = 20 \dots 30$  Вт/кг) при работе в переменных электромагнитных полях и достаточно высокое электросопротивление ( $\rho \approx 0,6 \times 10^{-6}$  Ом·м);
- высокая пластичность, позволяющая осуществлять механическую обработку, и малая зависимость магнитных свойств от механических напряжений, возникающих при деформировании листовых ферромагнитных материалов.

# Магнитомягкие материалы для работы в постоянных магнитных полях

## 1. Технически чистое железо -

это железо, содержащее менее 0,1% примесей. Характеристики технического железа приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

$\mu_n$	$H_c$ , А/м	$B_s$ , Т	$\rho \cdot 10^6$ , Ом·м
250-500	50- 100	2	0,1

2. **Электротехническая нелегированная сталь с содержанием 0,3% кремния (Si).** Этот материал выпускается в виде ленты и листов по ГОСТ 3863 и ГОСТ 11036.

**Обозначение марок электротехнической нелегированной стали состоит из пяти цифр**, например: сталь **10895**, сталь **21864**. В условном обозначении *первая цифра* означает способ проката стали (1 - горячекатаная, 2 - холоднокатаная); *вторая цифра* - 0 или 1, говорит о том, что концентрация кремния в стали составляет 0,3%; *третья цифра* - всегда 8 (что указывает на нормировку стали по коэрцитивной силе); *четвертая и пятая* цифры представляют значение коэрцитивной силы, А/м.

Значение коэрцитивной силы  $H_c$  электротехнических нелегированных сталей равно 60...100 А/м, индукция насыщения  $B_s$  составляет 1,3...1,6 Тл.

## Магнитомягкие материалы для работы в низкочастотных магнитных полях

*Электротехнические кремнистые стали с содержанием 0,4...4% Si* относятся к магнитомягким материалам для работы в низкочастотных магнитных полях. Введение кремния в железо увеличивает электрическое сопротивление стали и снижает удельные потери на перемагничивание.

Изготавливаются электротехнические стали в соответствии с требованиями государственных стандартов: ГОСТ 21427.0 “*Сталь электротехническая листовая. Классификация и марки*”; ГОСТ 21427.1 “*Сталь листовая электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая*”; ГОСТ 21427.2 “*Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая*”.

# Текстурованные электротехнические стали

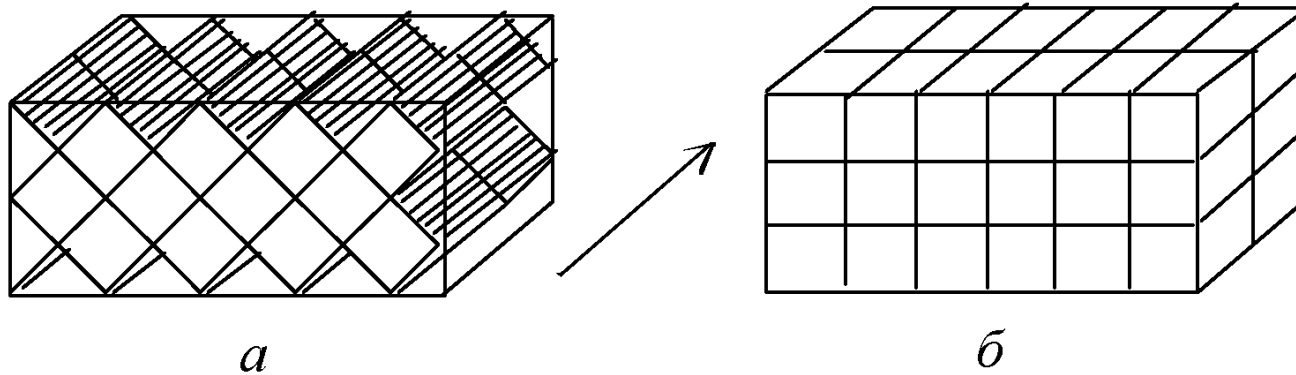


Рис. 3.20. Условное изображение текстур электротехнической стали: *а* - ребровая текстура; *б* - кубическая текстура (стрелкой указано направление проката)

Для получения высокого значения индукции насыщения  $B_s$  электротехническую кремнистую сталь подвергают холодной прокатке с последующим отжигом для снятия остаточных механических напряжений. Такая сталь называется *текстурованной*. Различают два вида текстурованной стали (рис. 3.20).

**Стали с ребровой текстурой**, при которой ребра кубических кристаллографических ячеек расположены в направлении проката (рис. 3.20, *а*). Этот случай соответствует кристаллографическим направлениям  $\langle 100 \rangle$  вдоль направления проката. Главная диагональ куба с направлением  $\langle 111 \rangle$  расположена под углом  $55^\circ$  к направлению проката.

**Стали с кубической текстурой**, при которой ребра кубов с кристаллографическими направлениями  $\langle 100 \rangle$  ориентированы вдоль и поперек направления проката (рис. 3.20, *б*). По этим направлениям проявляются наилучшие магнитные свойства электротехнической стали.



# Система обозначения электротехнических кремнистых сталей

Стали различных марок, обозначаются трех-четырёхзначными цифрами. Согласно ГОСТ 21.4270 обозначение электротехнической кремнистой стали состоит из трех цифр, например **сталь 341, сталь 342**. *Первая цифра* указывает на тип стали (1 - горячекатаная изотропная, 2 - холоднокатаная изотропная, 3 - холоднокатаная с ребровой текстурой, 5 - холоднокатаная с кубической текстурой). *Вторая цифра* обозначает содержание кремния в стали (0 - 0,4%, 1 - 0,4...0,8%, 2 - 0,8...1,8%, 3 - 1,8...2,8%, 4 - 2,8...3,8%, 5 - 3,8...4,8%). *Третья цифра* означает группу по основной нормируемой характеристике (0 – удельные потери при  $B = 1,7$  Т и частоте 50 Гц; 1 – удельные потери при  $B = 1,5$  Т и частоте 50 Гц; 2 – удельные потери при  $B = 1$  Т и частоте 400 Гц для горячекатаной и при  $B = 1,5$  Т и частоте 400 Гц для холоднокатаной анизотропной; 6 – магнитная индукция в слабых магнитных полях при  $H = 0,4$  А/м; 7 – магнитная индукция в средних магнитных полях при  $H = 10$  А/м);

## Основные параметры электротехнической стали

Марка стали	Магнитная проницаемость		Коэрцитивная сила $H_c$ , А/м	Магнитная индукция при $H = 2000$ А/м, Тл	Удельные потери, Вт/кг	Удельное сопр. $\rho$ , $10^{-6}$ Ом·м
	начальная	максимальная				
1411	250	5500	44	1,52	2	0,52
1511	300	6000	36	1,49	1,55	0,6
1561	600	10 000	20	$7,7 \cdot 10^{-4}$	–	0,55
1572	600	7000	–	1,3	–	0,55
3411	500	16 000	20	1,81	1,1	0,5
3421	~600	–	36	~1,7	20...21	0,5

# Низкокоэрцитивные магнитомягкие сплавы

Это сплавы системы Fe-Ni (пермаллои), сплавы системы Fe-Co (пермендюры) и сплавы системы Fe-Co-Ni с добавками Mn, Cr, Si, Cu, Va, Ti. Особенностью этих сплавов является чрезвычайно высокое значение начальной магнитной проницаемости  $\mu_n$ , достигающее  $5 \times 10^4 \dots 10^5$ .

Пермаллои и пермендюры в виде листовых материалов толщиной до 0,005 мм можно использовать для работы в переменных электромагнитных полях с частотой 10...30 кГц. Высокие магнитные свойства низкокоэрцитивных магнитомягких сплавов объясняются малой кристаллографической анизотропией намагниченности этих материалов. В результате облегчается поворот магнитных моментов атомов из направления легкого намагничивания в направление намагничивающего внешнего поля  $H$ .

**Пермаллои** – железоникелевые сплавы, легированные хромом, молибденом, кремнием, медью или другими присадками. Пермаллои характеризуются высокой магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях (при напряженности поля менее  $0,1 \text{ Нс}$ ) на низких частотах. Эти сплавы имеют высокую магнитную проницаемость, высокое удельное электрическое сопротивление, малую коэрцитивную силу и значительное магнитное насыщение.

## Система обозначения низкокоэрцитивных магнитомягких сплавов

Согласно ГОСТ 10994 и ГОСТ 10160 в обозначении пермаллоя или пермендюра две первые цифры обозначают содержание элемента, условное обозначение которого указано после этих цифр. Обозначения элементов кодируются следующими буквами: Н- Ni, К- Co, М- Mo, Х- Cr, С- Si, Д- Cu, Ю- Al, Ф- Va, Г- Mn. Буквы А или И в конце обозначения сплава указывают на его улучшенные свойства, буква П означает, что сплав характеризуется прямоугольной петлей гистерезиса. Через дефис может быть указан способ выплавки сплава (ВИ- вакуумно-индукционный, Эл- электронно-лучевой, П- плазменный, Ш- электрошлаковый, ВД- вакуумно-дуговой). **Например**, 82НМП-ВИ - это обозначение марки железоникелевого пермаллоя с ППГ и кубической текстурой, полученного вакуумно-индукционным способом.

# Марки пермаллоев

Марка сплава*	Основная характеристика сплава
45Н, 50Н	Наивысшая магнитная проницаемость в слабых полях
38НС, 42НС, 50НХС	Высокая магнитная проницаемость и повышенное удельное электрическое сопротивление
50НП, 68НМП, 34НКМП, 35НКХСП, 40НКМП, 79НМП, 77НМДП, 65НП	Прямоугольная петля гистерезиса. Сплавы обладают анизотропией магнитных свойств
79НМ, 80НХС, 81МА, 83НФ	Наивысшая магнитная проницаемость в слабых полях

\* Буквенные обозначения сплавов: Н – никель, С – кремний, Х – хром, М – молибден, Д – медь, Ф – ванадий, А или И – улучшенные свойства, П – прямоугольная петля гистерезиса.

# Характеристики пермендюроров

$\mu_H$	$H_c,$ А/М	$B_s,$ Т	$\rho \cdot 10^6,$ Ом·м
$5 \cdot 10^3$	160	2...2,2	0,2

**Пермендюроры**, как уже отмечалось, относятся к сплавам системы Fe-Co с добавками ванадия, введение которого улучшает технологические свойства сплава при механической обработке. В виде листовых материалов выпускаются пермендюроры марок 48К2Ф, 49КФ, 49КНФ.

# Магнитные параметры лент из пермаллоев

Марка сплава	Толщина ленты, мм	Начальная магнитная проницаемость, не менее	Максимальная магнитная проницаемость, не менее	Коэрцитивная сила, $H_c$ , А/м, не более	Индукция технического насыщения, Тл, не менее
50Н	0,1	2300	24 660	16	1,5
45Н	0,1	1990	19 900	24	1,5
50НХС	0,1	2470	24 700	13	1
	0,35	3180	30 230	8	1
50НП*	0,005	—	15 100	40	1,5
	0,1	—	59 660	15	1,5
79НМ	0,005	9940	35 000	6,4	0,75
	0,35	29 800	222 750	1	0,73

# Аморфные магнитные сплавы

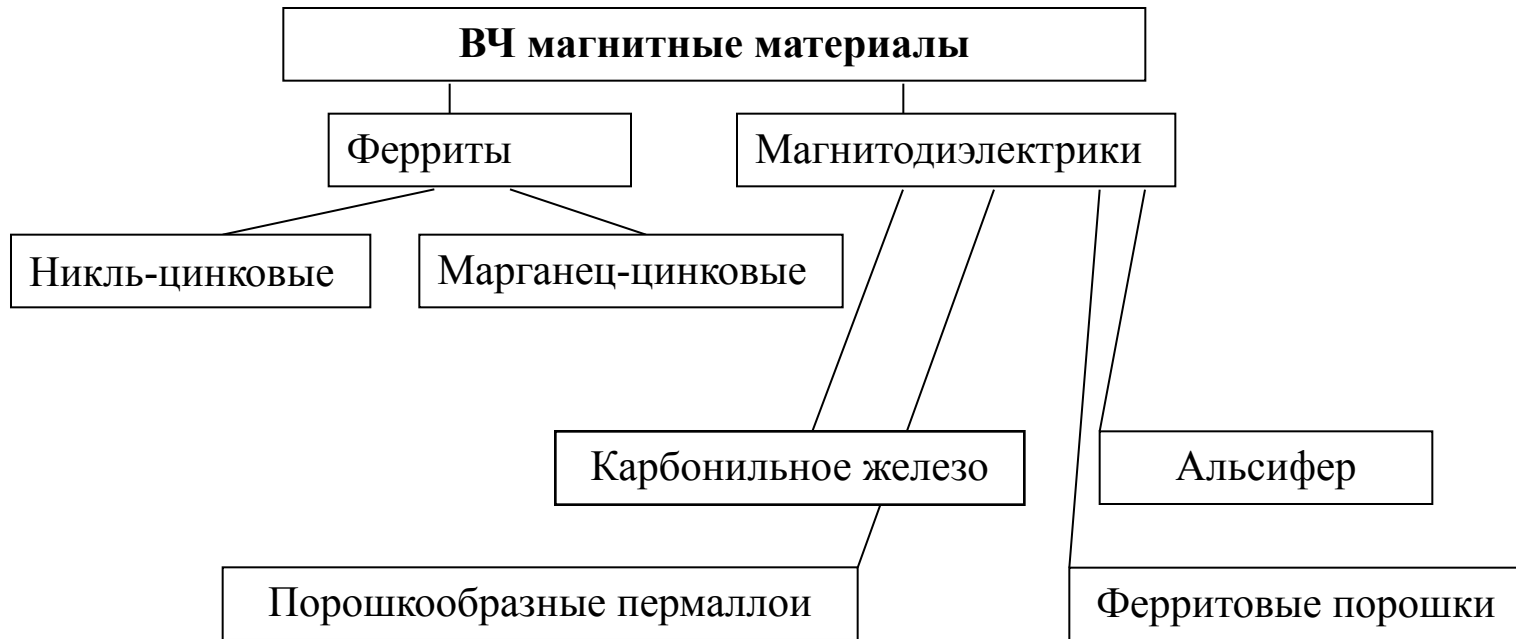
*Аморфные магнитные сплавы* – современные магнитные материалы на основе сплавов системы Fe-Ni-Co с аморфной структурой и характеристиками, превышающими аналогичные свойства кристаллических сплавов – пермаллоев. Металлические магнитные сплавы с аморфной структурой обладают комплексом уникальных свойств с высокими магнитными, прочностными, коррозионно-стойкими свойствами, большим удельным сопротивлением. Изделия из аморфных магнитных материалов, относящихся к магнитомягким материалам, обладают высокими начальной и максимальной проницаемостью  $\mu=(5000\dots370\ 000)$ , индукцией насыщения  $B_s=(0,78\dots1,5\ \text{T})$ , малой коэрцитивной силой  $H_c=(0,15\dots10\ \text{A/m})$ , высоким удельным сопротивлением  $\rho=(0,013\dots0,016\ \text{Ом}\cdot\text{м})$ .

Аморфные магнитные сплавы технологичны при изготовлении и обработке, они не требуют дополнительного проката и поверхностной обработки. Очень важным обстоятельством, стимулирующим внедрение аморфных сплавов, является необязательность отжига при изготовлении из них магнитопроводов. Для получения оптимальных магнитных свойств применяют термомагнитную обработку (ТМО), которая проще термообработки пермаллоя и осуществляется в ряде случаев на воздухе.



# **Высокочастотные магнитомягкие материалы**

# Классификация высокочастотных магнитных материалов

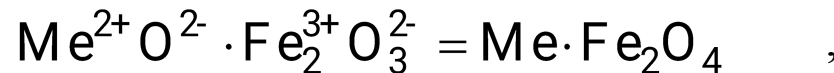


# Ферриты 1

**Ферриты** - это оксидные магнитные поликристаллические или (реже) монокристаллические материалы, относящиеся к классу ферромагнетиков. Основными особенностями ферритов являются высокое удельное электросопротивление  $\rho$ , достигающее  $10 \dots 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  и широкий диапазон значений начальной магнитной проницаемости  $\mu_n$  от 10 до 50000. Недостатком ферритов является невысокое значение индукции насыщения  $B_s$ , составляющее  $0,2 \dots 0,4 \text{ Тл}$ . Значениями электрических параметров можно управлять путем изменения химического состава феррита.

Кристаллографическая структура ферритов характеризуется ионной связью между атомами и аналогична структуре минерала шпинели  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ .

Химическая формула феррита записывается в виде



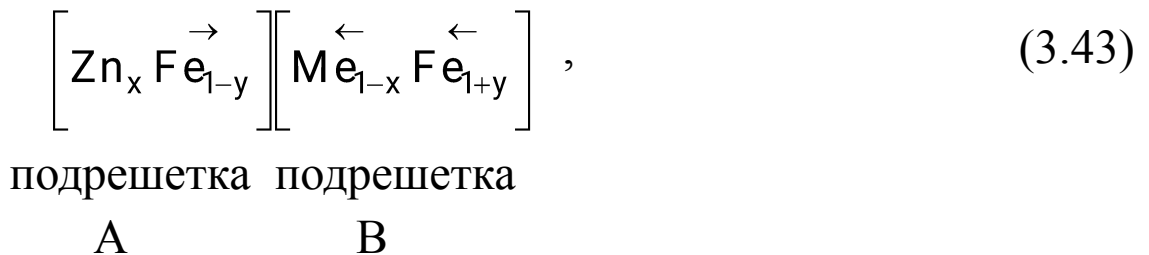
где  $\text{Me}^{2+}$  - катион двухвалентного металла, так называемый *характеризующий ион*.

Высокие магнитные свойства феррошпинели проявляются, если в качестве Me используются такие металлы, как **Ni, Mn**. Худшие магнитные свойства проявляются у ферритов, в которых ионами металла служат такие химические элементы, как Co, Cu, Mg. Феррит является немагнитным, если характеризующими ионами являются Zn и Cd.

## Ферриты 2

В качестве характеризующих ионов при изготовлении магнитомягких ферритов обычно используют Ni, Mn и Zn. Соответствующие ферриты называют **никель-цинковыми** и **марганец-цинковыми**. Они относятся к так называемым *амфотерным шпинелям*, для которых характерно равномерное распределение ионов никеля (марганца) и  $Fe^{3+}$  по А и В кислородным междуузлиям.

Химические формулы названных ферритов записывают в виде  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  и  $Mn_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ , соответственно, где  $x$ - содержание цинка. Распределение катионов по междуузлиям А и В изображается в виде формулы



где  $x$  - концентрация цинка;  $1-x$  - концентрация Me;  $1-y$  - относительное содержание трехвалентного железа в подрешетке А;  $1+y$  - относительное содержание трехвалентного железа в подрешетке В; символ Me - ионы  $Ni^{2+}$  или  $Mn^{2+}$ ; стрелки над символами указывают направления намагниченности ионов.

# Элементарная ячейка феррошпинели

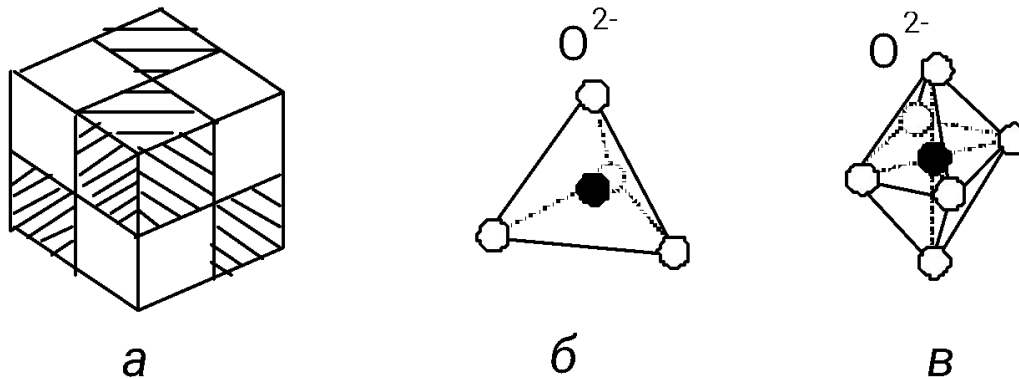


Рис. 3.21. Структура феррошпинели: а - элементарная ячейка; б - тетраэдрическое междуузлие (тип А); в - октаэдрическое междуузлие (тип В)

Элементарная ячейка шпинели представляет кубическую плотноупакованную ячейку, в вершинах и центрах граней которой находятся ионы кислорода  $O^{2-}$ . Элементарная ячейка состоит из 8 структурных единиц типа  $MeFe_2O_4$  (рис. 3.21, а). Ионы  $Me^{2+}$  и  $Fe^{3+}$  расположены внутри этих структурных единиц в междуузлиях. Элементарная ячейка, изображенная на рис. 3.21, а, содержит 56 ионов, в том числе 32 иона  $O^{2-}$ , 16 ионов  $Fe^{3+}$  и 8 ионов  $Me^{2+}$ .

Таким образом, в ферритах решающую роль в обеспечении магнитных свойств играет косвенное обменное взаимодействие, осуществляемое при участии кислородных ионов. Главным является взаимодействие по типу А-О-В, где А и В- ионы, находящиеся в междуузлиях А и В, разделенных атомами кислорода, О.

# Основные электромагнитные параметры магнитомягких ферритов

Марка феррита	Начальная магнитная проницаемость	Критическая частота, МГц, при $\operatorname{tg}\delta = 0,1$	Параметры петли гистерезиса		Удельное электрическое сопротивление, Ом·м
			$B_s$ , Т	$H_c$ , А/м, не более	
400НН	350...500	3,5	0,25	64	$10^4$
1000НН	800...1200	0,4	0,27	20	$10^4$
1000НМ	800...1200	0,6	0,37	28	0,5
1500НМ	1200...1800	0,6	—	24	0,5
1500НМ1	1200...1800	0,6	0,35	16	5
2000НН	1700...2500	0,1	0,25	8	10
2000НМ	1700...2500	0,5	0,39	24	0,5
2000НМ1	1700...2500	0,5	0,34	16	5
2000НМС	1600...2400	0,33	0,25*	22	1
2000НМС1	1600...2400	0,34	0,27*	18	1
3000НМС	2600...3400	0,36	0,28*	12	1
4000НМ	3500...4800	0,1	0,37	8	0,5
10000НМ	8000...15000	0,05	—	4	0,1

# Характеристики ферритов

**1. Ферриты общего применения.** К этой группе ферритов относятся Ni-Zn ферриты марок 100НН, 400НН, 600НН, 1000НН, 2000НН и др. с предельными (критическими) частотами применения  $f_{кр}$ , составляющими 30...0,1 МГц. Mn-Zn ферриты марок 1000НМ, 1500НМ, 2000НМ, 3000НМ рассчитаны для работы в диапазоне частот от 0,6 до 0,1 МГц. Видно, что значение критической частоты снижается с ростом магнитной проницаемости феррита.

**2. Термостабильные ферриты** характеризуются низким значением температурного коэффициента начальной магнитной проницаемости, не превышающим  $(1...10) \times 10^{-6}$  1/К. К ним относятся Ni-Zn ферриты марок 7ВН, 20ВН, 30ВН, 50ВН, 100ВН, 150ВН, рассчитанные на предельные частоты применения 200..25 МГц. Марганец-цинковые ферриты марок 700НМ, 1000НМ3, 1500НМ1, 2000НМ1 применяются на более низких частотах 5...0,5 МГц.

**3. Высокотрениваемые ферриты** представляют Mn-Zn ферриты марок 4000НМ, 6000НМ, 10000НМ, 20000НМ, рассчитанные для работы в сравнительно низкочастотном диапазоне 0,05...0,1 МГц.

**4. Ферриты для телевизионной техники** используются в качестве стержневых и броневых магнитопроводов трансформаторов строчной развертки (ТВС) телевизоров. К ним относятся Mn-Zn ферриты марок 2500НМС1, 3000НМС, рассчитанные для применения на частотах 0,36...0,4 МГц.

**5. Ферриты для импульсных трансформаторов** - это, как правило, Ni-Zn ферриты, которые служат в качестве магнитопроводов мощных импульсных трансформаторов для работы при частотах 2...0.3 МГц. Выпускаются ферриты марок 300ННИ, 350ННИ, 450ННИ, 1000ННИ.

**6. Ферриты для ферровариометров** предназначены для применения в катушках индуктивности с перестраиваемой индуктивностью в диапазоне частот от 250 до 6 МГц. К этой группе относятся ферриты из ряда 10ВНП, 35ВНП, 55ВНП, 60ВНП, 65ВНП, 90ВНП, 150ВНП, 200ВНП, 300ВНП.

**7. Ферриты для широкополосных трансформаторов** применяются в высокочастотных трансформаторах радиочастотного диапазона 80...8 МГц. Ферриты марок 50ВНС...300ВНС характеризуются значением  $\text{tg} \delta_{\mu} = (6,7...33) \times 10^{-3}$ .

**8. Ферриты для магнитных головок** выпускаются в виде дисков. Для их изготовления используются Ni-Zn ферриты марок 500НТ, 1000НТ, 2000НТ и Mn-Zn ферриты марок 500МТ, 1000МТ, 2000МТ, 5000МТ.

**9. Ферриты для индуктивных бесконтактных датчиков** марок 800НН и 1200НН характеризуются резким уменьшением магнитной проницаемости вблизи температур Кюри 70 °С и 195 °С.

**10. Ферриты для магнитного экранирования** представляют Ni-Zn ферриты марок 200ВНРП и 800ВНРП, отличающиеся большим значением  $\text{tg} \delta_{\mu}$ , достигающим  $10^{-2}$ .

# Магнитодиэлектрики

Таблица 3.10

$\mu_H$	$\rho$ , Ом·м	$f_{кр}$ , кГц	$\alpha_{\mu, T} \cdot 10^6$ , 1/К
10...250	$10^9$	100	25...180

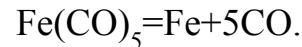
Магнитодиэлектрики, представляют композиционные магнитные материалы, содержащие наполнитель - порошок ферромагнетика и связующее из изолирующего материала, в качестве которого применяется бакелитовая смола, полистирол, стекло. Обобщенные характеристики магнитодиэлектриков представлены в таблице 3.10.

Магнитодиэлектрики характеризуются достаточно хорошими частотными характеристиками в широком диапазоне частот, отличаются высокой температурной и временной стабильностью магнитных характеристик. Поэтому магнитодиэлектрики нашли широкое применение в качестве сердечников высокочастотных катушек индуктивности. Недостатком магнитодиэлектриков является сравнительно невысокое значение начальной магнитной проницаемости  $\mu_H$ .



# Характеристики магнитодиэлектриков

**Карбонильное железо.** Этот материал получают в виде порошка в результате химической реакции восстановления пентакарбонила железа:



Размер частиц порошка 1,5...3,5 мкм. Восстановленное железо содержит 1% примесей углерода, азота, кислорода. Широкое распространение получили такие марки карбонильного железа, как **P-10, P-20, P-100**. В обозначении марки железа число характеризует предельную частоту использования данного материала, в МГц. Начальная магнитная проницаемость  $\mu_n$  сердечников, изготовленных из карбонильного железа, обычно составляет 10...15 единиц.

**Альсифер** представляет собой тройной металлический сплав системы Fe-Al-Si, содержащий 9,6% Si и 5,6% Al. Это твердый и хрупкий материал с высокими магнитными свойствами. Сплав размалывается в порошок, который и является основой для изготовления сердечника

Согласно ГОСТ 8763 для обозначения марки альсифера используется буквенно-цифровая система обозначений. Выпускаются альсиферы марок **ТЧ-90, ТЧК-55, ТЧ-50, ТЧ-60, ВЧ-22, ВЧК-22, ВЧ-32** (ТЧ - для тональной частоты, ВЧ - высокочастотный материал, К - пониженное значение температурного коэффициента магнитной проницаемости  $\alpha_{\mu, T}$ , число, стоящее после дефиса - значение начальной магнитной проницаемости  $\mu_n$ ).

Альсиферы используются в сравнительно низкочастотном диапазоне 0,02...0,7 МГц. Специфической особенностью альсиферов является отрицательное значение  $\alpha_{\mu, T}$ , достигающее минус  $(200... 600) \times 10^{-6}$  1/К.

**Порошкообразные пермаллои** представляют из себя порошок железо-никелевого сплава. Система обозначения порошкообразных пермаллоев аналогична системе обозначений альсиферов. Для производства сердечников выпускается порошкообразный пермаллой марок **П-250, П-160, П-140, П-100, П-60, П-20, ПК-100, ПК-60, ПК-20**. Критическая частота магнитодиэлектриков с наполнителем из порошкообразного пермаллоя составляет 0,03...1 МГц.

**Ферритовые порошки** изготавливают из отходов ферритового производства и применяют в качестве наполнителя при изготовлении магнитодиэлектриков. При обозначении в технической документации используется система маркировки ферритовых порошков, принятая для карбонильного железа. Выпускаются ферритовые порошки марок **НМ-5, ВН-20, ВН-60, ВН-220** (НМ- низкочастотный материал на основе Mn-Zn феррита, ВН- высокочастотный материал на основе Ni-Zn феррита, число, стоящее после дефиса - значение предельной рабочей частоты  $f_{кр}$  в МГц).

# Магнитотвердые материалы

# Параметры магнитотвёрдых материалов

Основные параметры магнитотвёрдых материалов определяются по **кривой размагничивания**, которая представляет собой второй квадрант предельной кривой намагничивания  $B=f(H)$  при циклическом перемагничивании (рис. 3.22, а). Для характеристики удельной магнитной энергии  $W_{\max}$ , накопленной в магните, пользуются кривой  $B=f(BH)$ , изображенной на рис. 3.22, б.

Из графиков рис. 3.22, а, б следует, что к основным параметрам магнито-твёрдых материалов относятся:

$H_c$  - коэрцитивная сила, А/м;  $B_r$  - остаточная индукция, Тл;  $(BH)_{\max} = 2W_{\max}$  - максимальное значение произведения индукции  $B$  на значение напряженности магнитного поля  $H$  для данной кривой размагничивания, кДж/м<sup>3</sup>;  $W_{\max}$  - удельная магнитная энергия.

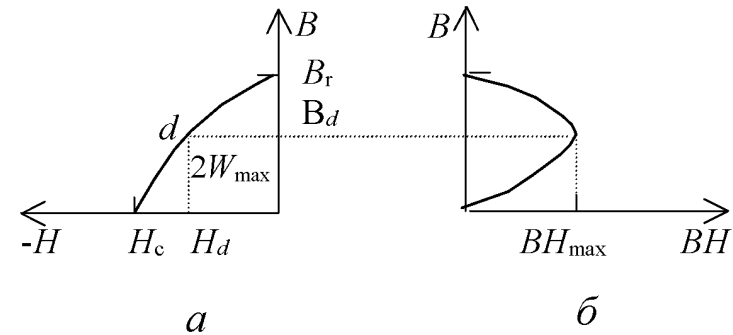


Рис. 3.22. Характеристики магнитотвёрдых материалов: а - кривая размагничивания  $B=f(H)$ ; б - график  $B=f(BH)$

Специфическим параметром магнитотвёрдого материала является коэффициент выпуклости  $\gamma$  кривой  $B=f(BH)$ , который определяется из соотношения

$$\gamma = \frac{(BH)_{\max}}{B_r H_c} \quad (3.44)$$

## Природа намагниченного состояния

Для того, чтобы получить высокое значение коэрцитивной силы  $H_c$ , необходимо затруднить процесс перемагничивания материала, обусловленный смещением доменных границ. Это достигается путем создания текстурованного состояния магнетика.

**Магнитная текстура** создается способом охлаждения высококоэрцитивного сплава из расплавленного состояния в сильном магнитном поле с напряженностью  $H=150...300$  кА/м. В результате достигается упорядоченность пластинчатых выделений сильномагнитной фазы (рис. 3.24). Этот метод эффективен, например, для сплавов, содержащих кобальт.

**Кристаллическая текстура** создается методом направленной кристаллизации расплава из магнитного материала, заливаемого в форму.

Для создания текстурованного магнитного состояния применяется также прессование порошкообразного магнетика в сильном магнитном поле с напряженностью  $H=250...400$  кА/м. В этом случае магнитожесткий материал предварительно измельчается до частиц размером  $0,1...1$  мкм. Границы доменов совпадают с физическими границами зерен и в дальнейшем их смещение становится невозможным.

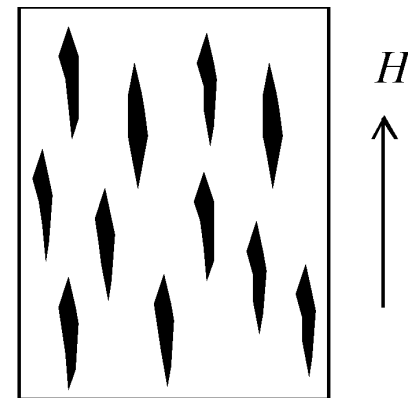


Рис. 3.24. Распределение пластинчатых выделений магнитной фазы под воздействием сильного магнитного поля

# Классификация магнитотвёрдых материалов



# Характеристики магнитотвёрдых материалов 1

**1. Литые высококоэрцитивные сплавы.** К этой группе магнитожестьких материалов относятся сплавы систем Al-Ni-Cu-Fe (ЮНД) и Al-Ni-Cu-Co-Fe (ЮНДК), содержащие около 50% Fe, 7...14% Al, 14...25% Ni, 2...4% Cu, а сплавы ЮНДК - 14...40% Co.

Условное обозначение литого высококоэрцитивного сплава в технической документации состоит из букв, являющихся условным обозначением легирующего элемента (Ю- Al, Н- Ni, Д- Cu, К- Co, Т- Ti, Б- Nb, С- Si), и чисел, указывающих процентное содержание компонента в сплаве. Добавки Cu, Ti и Nb обеспечивают стабильность магнитных характеристик сплавов. В конце обозначения могут стоять буквы А (сплав с кристаллической текстурой) или АА (монокристаллический материал).

Основные характеристики литых высококоэрцитивных сплавов представлены в таблице 3.11, где  $B_r$  - индукция насыщения,  $H_c$  - коэрцитивная сила,  $W_{max}$  - магнитная энергия. Из таблицы 3.11 видно, что сплавы ЮНДК обладают более высокими магнитными характеристиками, чем сплавы ЮНД.

Наиболее высокими значениями магнитной энергии  $W_{max}$  обладают монокристаллические сплавы ЮНДК. Например, монокристалл сплава ЮНДК40Т8АА характеризуется значением коэрцитивной силы  $H_c=145$  кА/м.

Таблица 3.11

Тип сплава	$B_r$ , Т	$H_c$ , кА/м	$W_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup>
Сплавы ЮНД: ЮНД4, ЮНТС	0,4... 0,5	40 ...50	4...5
Сплавы ЮНДК: ЮНДК31Т3БА	1,15	92	32

**2. Металлокерамические магнитотвердые материалы.** Магниты на основе сплавов ЮНДК изготавливаются также методом *порошковой металлургии*. С этой целью порошок из сплава ЮНДК прессуется в форме под давлением около 103 МПа с последующим спеканием при  $T=1200...1350$  °С. Для получения магнитных свойств металлокерамическое изделие подвергается термомагнитной обработке. Выпускаются металлокерамические магниты марок ММК-1, 2, 3,...,11. Характеристики магнитов ММК близки к характеристикам сплавов ЮНДК, однако они имеют более высокую (в 3...6 раз) механическую прочность, могут быть изготовлены с более сложной геометрической конфигурацией. При использовании связующего из пластмассы методом прессования порошка из сплава ЮНДК можно изготовить **металлопластические магниты**.

## Характеристики магнитотвёрдых материалов 2

**3. Магнитотвердые ферриты.** В качестве магнитотвердых ферритов применяют феррит бария  $\text{BaO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ , феррит стронция  $\text{SrO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ , кристаллизующиеся в гексагональную структуру, а также феррит кобальта  $\text{CoO} \times \text{Fe}_2\text{O}_3$  с кубической структурой типа шпинели. Магнитотвердые ферриты изготавливаются методами порошковой металлургии и в 3...4 раза дешевле литых сплавов.

К особенностям магнитотвердых ферритов относятся высокие значения коэрцитивной силы  $H_c$ , достигающие 150...300 кА/м, большое значение удельного электросопротивления ( $\rho=10...10^6$  Ом×м), относительно невысокое значение остаточной индукции  $B_r$ , равное 0,19...0,39 Т. К недостаткам магнитотвердых ферритов следует отнести пониженную температурную стабильность магнитных параметров и хрупкость.

В технической документации используется буквенно-цифровая система условных обозначений магнитотвердых ферритов: БИ - феррит бария изотропный; БА, СА - феррит бария или стронция анизотропный; РА - бариево-стронциевый феррит анизотропный. Число перед буквенным обозначением указывает на величину удвоенной магнитной энергии  $2W_{\max}=(BH)_{\max}$  в кДж/м<sup>3</sup>, число после буквенного обозначения является значением коэрцитивной силы магнита  $H_c$ , кА/м. Например, к распространенным маркам магнито жестких ферритов относятся **4БИ145, 21СА320, 28БА190**.

# Характеристики магнитотвёрдых материалов 3

**4. Магнитные сплавы на основе редкоземельных элементов.** К этим сплавам относятся интерметаллические соединения кобальта с редкоземельными металлами типа  $RCo_5$ ,  $R_2Co_7$ ,  $R_2Co_{17}$ , где индексом R обозначены редкоземельные металлы Sm, Pr, Ce, La, Y. Указанные сплавы имеют очень большую магнитную кристаллографическую анизотропию и характеризуются рекордными значениями коэрцитивной силы  $H_c$ , составляющими  $(2...20) \times 10^6$  А/м. Изделия из сплавов на основе редкоземельных металлов изготавливаются методами порошковой технологии в виде дисков, колец, пластин. Разработаны образцы пленочных магнитов, наносимых на подложку методом вакуумного напыления.

Промышленностью освоен выпуск магнитов на основе сплавов  $SmCo_5$  и  $PrCo_5$ . В технической документации используется буквенно-цифровая система обозначений марок этих сплавов, где КС означает кобальтово-самариевый магнит, КСП- магнит на основе сплава кобальта, самария и празеодима. Число после буквенного обозначения указывает на процентное содержание самария (или самария и празеодима) в сплаве. Например, **КС37, КСП37А** (буква А в конце обозначения указывает на сплав с улучшенной текстурой). Типичные характеристики выпускаемых магнитов следующие:  $B_r=0,7... 0,9$  Т,  $H_c=640...1300$  кА/м,  $W_{max} = 55...72$  кДж/м<sup>3</sup>.

**5. Легированные мартенситные стали.** К магнитотвердым материалам этой группы относятся закаленные на мартенсит нержавеющей стали с добавками Cr, W, Co. Этот вид магнитотвердых материалов находит в настоящее время ограниченное применение из-за невысоких магнитных свойств. Значение коэрцитивной силы  $H_c$  легированных мартенситных сталей не превышает 5...15 кА/м, магнитная энергия  $W_{max}$  составляет 1..2,5 кДж/м<sup>3</sup>. Распространены марки мартенситных сталей **EX3, EXB6, EX9K15M**, допускающие обработку резанием.



# Магнитотвердые материалы для магнитной записи

Это материалы, которые наносятся в виде ферролакового покрытия на полимерные или металлические носители - ленты и диски для осуществления аудио- и видеозаписи, а также для записи, хранения и ввода информации в ЭВМ. Оптимальным требованиям удовлетворяют ферромагнитные материалы с коэрцитивной силой  $H_c = 20 \dots 50$  кА/м, характеризующиеся формой кривой размагничивания, близкой к прямоугольной.

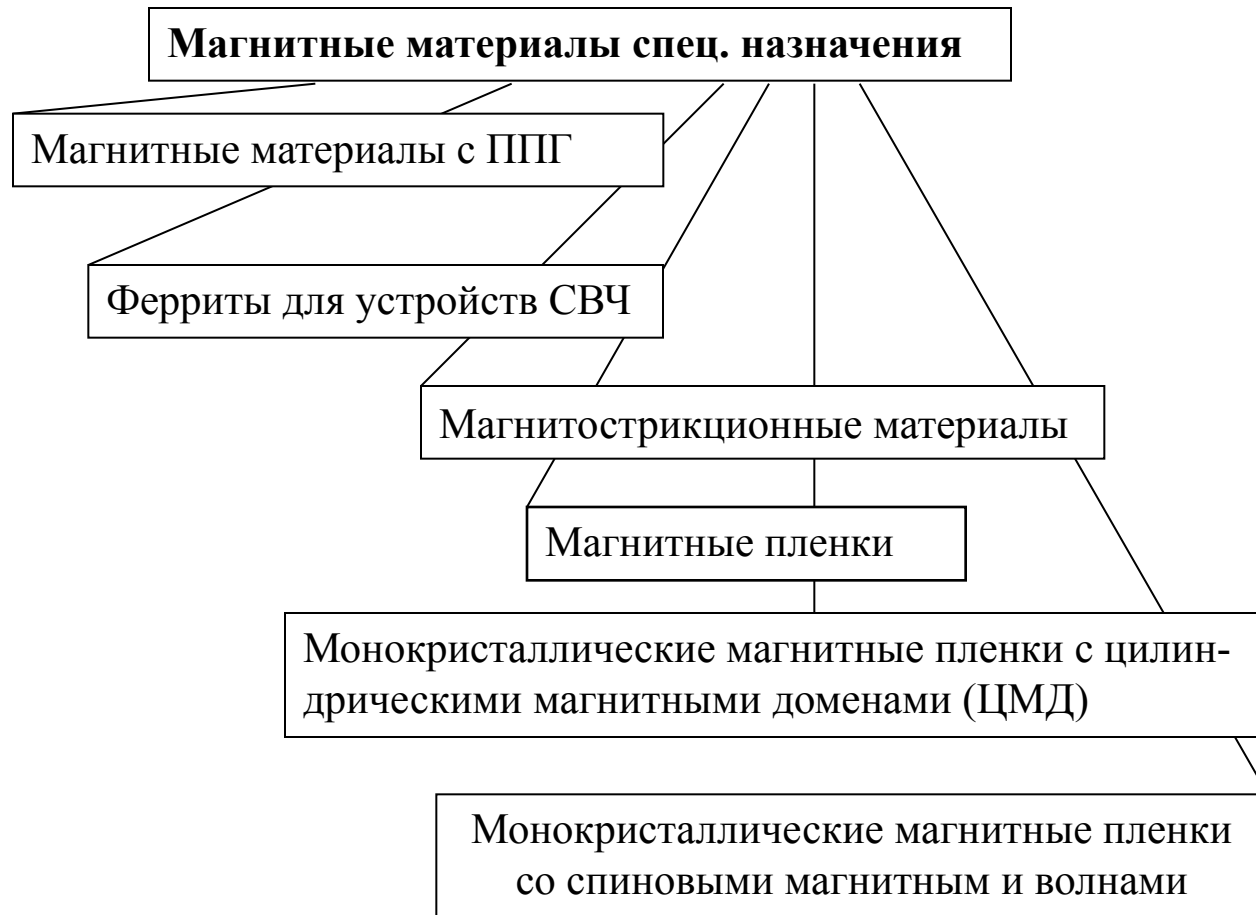
В качестве магнитного компонента широко применяются порошки закиси железа  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  с мелкими однодоменными частицами коричневого цвета. Часто используется смесь магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , представляющая материал с повышенным значением коэрцитивной силы.

Другой широко распространенный материал для магнитной записи - это диоксид хрома  $\text{CrO}_2$ , представляющий порошок черного цвета. Диоксид хрома характеризуется более высокой коэрцитивной силой, а элементы памяти на его основе обладают повышенной чувствительностью в области высоких частот. Применяют также ленты и диски с двойным магнитным слоем  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 + \text{CrO}_2$ , позволяющие осуществить более качественную запись и чтение информации.

Для маркировки магнитных лент отечественного производства используется буквенно-цифровая система обозначений, где первая буква указывает на назначение ленты (А- звукозапись, Т- видеозапись, В- вычислительная техника), первая цифра после буквы обозначает материал основы (2- диацетат, 3- триацетат, 4- лавсан), второй цифрой кодируется толщина ленты (0- менее 10 мкм, 1- 10...15 мкм, 2- 15...20 мкм, 3- 20...30 мкм, 4- 30...40 мкм при стандартных толщинах ленты 18, 27 и 37 мкм), третья и четвертая цифры маркировки ленты обозначают номер технологической разработки, затем через дефис записывается число, обозначающее ширину ленты в мм. В конце обозначения стоят буквы Б (лента для бытовой записи) или Р (лента для студийной записи). Например, обозначением **А4205-3Б** маркируется лента для компакт-кассеты на лавсановой основе, толщиной 18 мкм, номер разработки 05, с шириной 3,8 мм.

# **Магнитные материалы специального назначения**

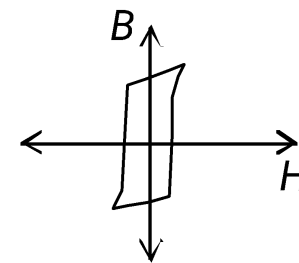
# Классификация магнитных материалов специального назначения



# Материалы с прямоугольной петлей гистерезиса

Эта группа магнитомягких поликристаллических материалов используется в изделиях, принцип действия которых основан на скачкообразном изменении индукции  $B$  магнитного поля при значениях напряженности магнитного поля  $H$ , превышающих коэрцитивную силу  $H_c$  магнитного материала. Как уже отмечалось, к таким изделиям относятся магнитные сердечники для запоминающих, логических и переключающих устройств вычислительной техники, автоматики, связи, а также для магнитопроводов трансформаторов. Сердечники, как правило, имеют тороидальную, то есть кольцеобразную форму. В качестве материалов для изготовления сердечников с ППГ применяют специальные ферриты и ленты микронной толщины из пермаллоя.

Ферриты с ППГ относятся к ферритам со структурой шпинели, которыми являются Mg-Mn ферриты с химической формулой  $(Mg, Mn)O \times Fe_2O_3$ . Используются также литиевые ферриты  $Li_2O \times Fe_2O_3$ .



Предельная петля гистерезиса материала с ППГ

Обозначение феррита с ППГ складывается из букв ВТ, перед которыми указывается число, обозначающее коэрцитивную силу материала в эрс-тедах ( $1 \text{ Э} = 79,6 \text{ А/м}$ ), напри-мер, **7ВТ**, **0,12ВТ** и так далее.

Пермаллои с ППГ представляют ленты из железоникелевых сплавов (**50НП**, **60НП**, **79НП** и др.) толщиной около 0,3 мкм. Эти материалы характеризуются высоким значением остаточной индукции  $B_r$ , достигающей 0,6...1,4 Т.

# Ферриты для устройств СВЧ

Применяются в диапазоне частот 300 МГц...300 ГГц (длины волн от 1 м до 1 мм).

**1. Ферриты со структурой граната** используются в метровом диапазоне. Имеют химическую формулу  $R_3Fe_5O_{12}$ , где R - иттрий (Y) или редкоземельный металл (Sm, Pr, Ce, La) с легирующими добавками. Ферриты химического состава  $Y_3Fe_5O_{12}$  носят название **железо-иттриевых гранатов**. Используются также ферриты составов  $(Y, Al)_3Fe_5O_{12}$  и  $(Y, Gd, Al, Mn)_3Fe_5O_{12}$ . К поликристаллическим ферритам для устройств СВЧ относятся ферриты марок **90СЧ-Б, 10СЧ-20, 60СЧ-1**. Эти ферриты характеризуются значением намагниченности насыщения  $J_s$  достигающей 1,3...3,5 кА/м. Выпускаются также монокристаллические ферриты-гранаты марок **140КГ-1 и 65КГ**, где число перед буквенным кодом указывает на величину намагниченности насыщения феррита в кА/м, умноженную на  $4\pi$ .

**2. Ферриты-шпинели** используются в приборах СВЧ сантиметрового диапазона. К ним относятся Mg-Mn ферриты состава  $(Mg, Mn)O \times Fe_2O_3$ , а также Li-Zn ферриты состава  $(Li, Zn)O \times Fe_2O_3$ . Марки ферритов **10СЧ1, 8СЧ7**, значения намагниченности насыщения 4...24 кА/м.

**3. Гексаферриты со структурой магнитоплюмбита** применяют в миллиметровом диапазоне СВЧ. Их химическая формула  $MeFe_{12}O_{19}$ , где Me - это Ba или Sr. Параметрический ряд гексаферритов включает 23 марки этих материалов (**04СЧА8...03СЧА**), характеризующихся значениями намагниченности насыщения от 8 до 18,3 кА/м.

# Магнитострикционные материалы

В качестве таких материалов в технике преобразования электрических колебаний в акустические и наоборот до начала 60-х годов широко использовалась лента толщиной до 0,05 мм, изготовленная из никеля марки **НП2Т** или **НП2**. Сердечник магнитострикционного преобразователя представляет из себя пакет тонких пластин, скрепленных специальными стяжками. В настоящее время применение никеля ограничено, так как разработаны более эффективные магнитострикционные материалы. К таким материалам относятся Fe-Co сплавы марок **49К2Ф**, **65К**, **Ni-Co сплавы (ниокси)**, **Fe-Al сплавы (алфер)**.

Для работы на повышенных частотах (до 600 кГц) наиболее пригодны магнитострикционные ферриты, обладающие высоким электрическим сопротивлением. К ним относится феррит никеля  $\text{NiO} \times \text{Fe}_2\text{O}_3$  марки **21СПА**, ферриты марок **601С**, **602С**, **607С**, выпускаемые в виде трубок и стержней длиной 3...50 мм и диаметром 3...5 мм.

# Магнитные пленки 1

В качестве материала для тонких магнитных пленок толщиной 0,1...1 мкм применяется пермаллой марки **80Н**, нанесенный методами катодного или ионноплазменного распыления в постоянном магнитном поле на подложку, изготовленную из специального стекла или алюминия. В тонких пленках, изготовленных таким образом, магнитные домены укладываются в плоскости пленки вдоль направления легкого намагничивания пленки, совпадающего с направлением внешнего подмагничивающего поля.

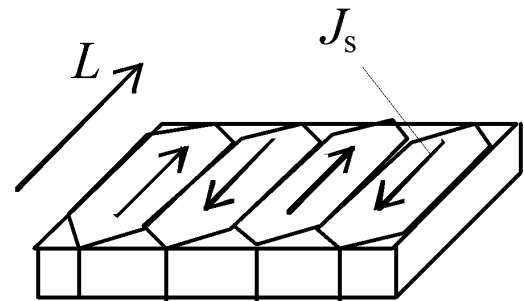


Рис. 3.25. Расположение доменов в плоскости тонкой магнитной пленки

Таким образом, пленка приобретает одноосную магнитную анизотропию с осью легкого намагничивания  $L$ , параллельно которой устанавливаются векторы намагниченности  $J_s$  отдельных доменов в пленке (рис. 3.25).

## Магнитные пленки 2

Ось трудного намагничивания  $T$  пленки лежит в плоскости пленки и составляет угол  $90^0$  с направлением легкого намагничивания, как это показано на рис. 3.26, *а*.

Форма петли гистерезиса, полученной при циклическом перемагничивании тонкой магнитной пленки, зависит от направления перемагничивающего магнитного поля.

В направлении оси  $L$  пленка характеризуется прямоугольной петлей гистерезиса (рис. 3.26, *б*).).

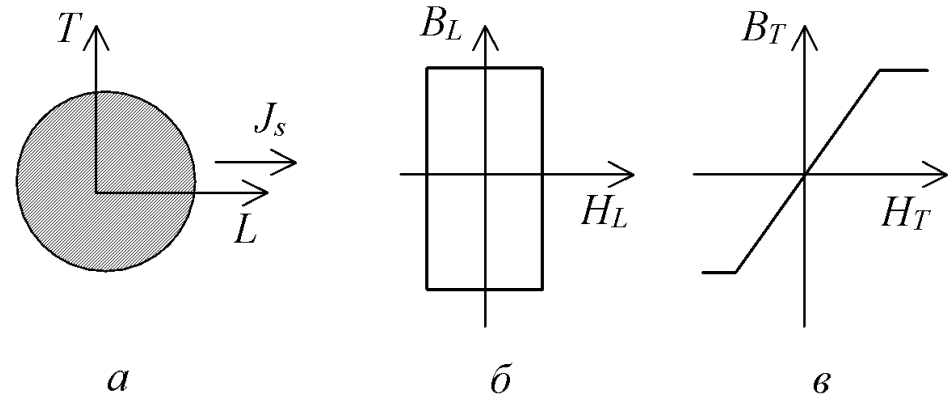


Рис. 3.26. Направления легкого  $L$  и трудного  $T$  намагничивания в тонкой магнитной пленке - *а*; вид петли гистерезиса: *б* - в направлении легкого намагничивания; *в* - в направлении трудного намагничивания

Это обстоятельство позволяет использовать тонкие магнитные пленки в качестве запоминающих элементов. При перемагничивании в направлении оси  $T$  тонкая магнитная пленка характеризуется очень узкой петлей гистерезиса, что свидетельствует о практически полном размагничивании пленки после выключения внешнего магнитного поля (рис. 3.26, *в*).



## Монокристаллические магнитные пленки с цилиндрическими магнитными доменами

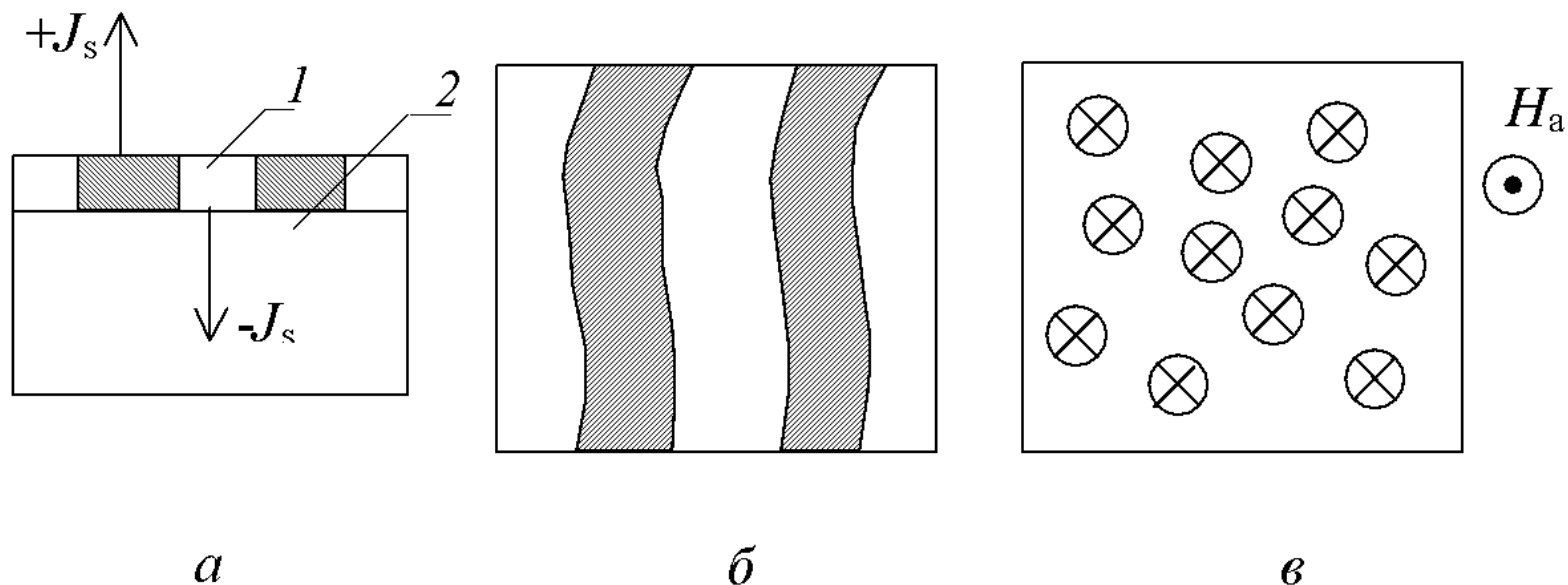


Рис. 3.27. Магнитные домены в монокристаллических пленках: *а* - структура монокристаллической пленки (поперечный разрез); *б* - полосовые магнитные домены (вид сверху); *в* - возникновение цилиндрических магнитных доменов под влиянием внешнего магнитного поля  $H$

*1* - магнитная пленка, *2* - монокристаллическая немагнитная подложка,  $M_s$  - направление намагниченности доменов

# Материалы для магнитных плёнок с ЦМД

1. Наиболее распространены **одноосные ферриты-гранаты** состава  $R_3Fe_5O_{12}$ , где символ R означает элемент Y или редкоземельные металлы Sm, Eu, Ho, Er. Коэрцитивная сила **H<sub>c</sub>** этих материалов составляет около 24 А/м. В эпитаксиальных пленках ферритов-гранатов удалось получить ЦМД с диаметром около 1 мкм.

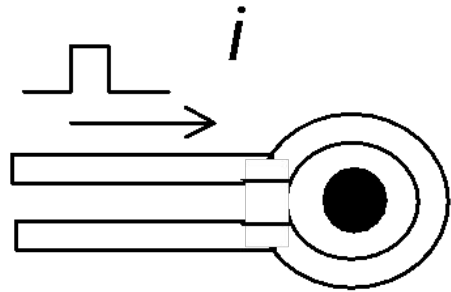
2. Второй вид материалов - это **ортоферриты** с химической формулой  $RFeO_3$ , где R, как и в предыдущем случае, означает иттрий или редкоземельные металлы. Диаметр ЦМД, полученных в эпитаксиальных пленках на основе ортоферритов, составляет около 10 мкм. Поэтому из-за больших размеров доменов ортоферриты считаются менее перспективными материалами для изготовления устройств на ЦМД.

3. Для изготовления монокристаллических пленок с ЦМД применяют также **гексаферриты**  $BaFe_{12}O_{19}$  и феррошпинели  $Mg_xMn_{1-x}Fe_2O_4$ .

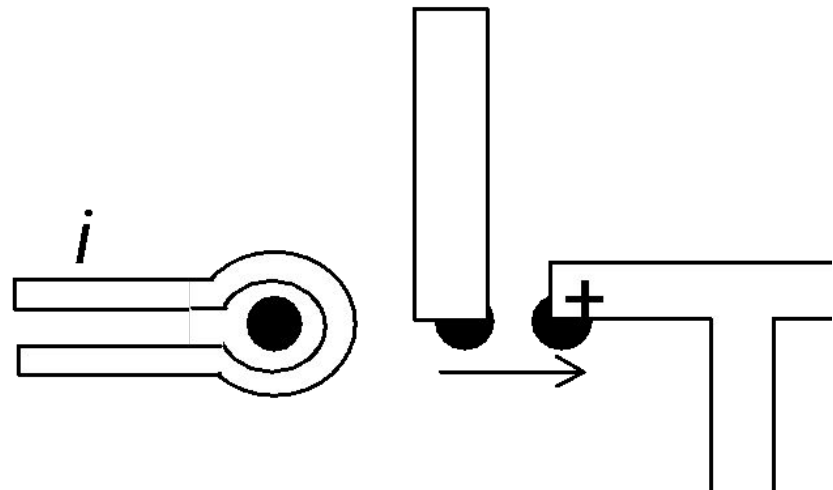
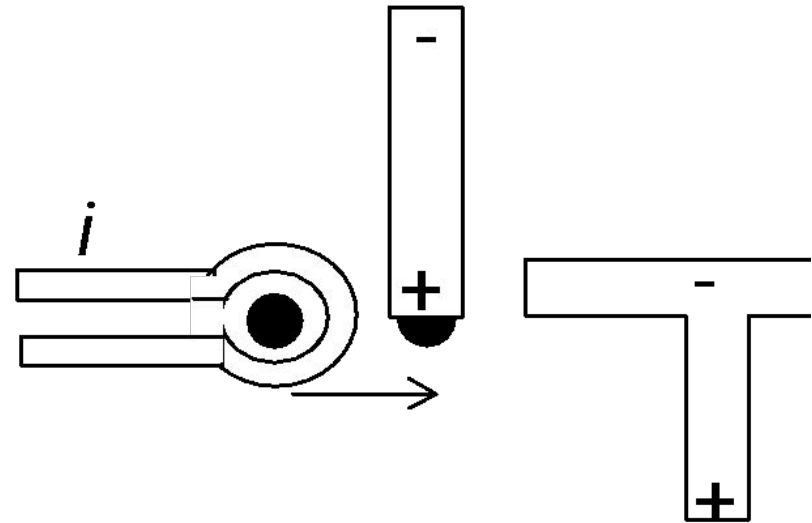
В качестве подложек используются пластинки, вырезанные из монокристаллов немагнитного галлий-гадолиниевого граната состава  $Gd_3Ga_5O_{12}$ . Этот материал характеризуется параметром кристаллической решетки, очень близким к параметру решетки феррита-граната

Эффект возникновения ЦМД удалось наблюдать также в аморфных пленках состава **GdCo** и **GdFe**, полученных напылением на стеклянные и кварцевые подложки. Это открывает новые возможности в развитии техники устройств на ЦМД из за меньшей стоимости их изготовления

# Устройство памяти на ЦМД



*a*



# Магнитоэстатические волны

**Принцип действия** спин-волновых устройств основан на явлениях возбуждения, распространения и приема СВЧ бегущих или стоячих когерентных спиновых волн или, как их часто называют, магнитоэстатических волн (МСВ). Физически эти волны являются волнами намагниченности (рис.3.29), существующими в магнитоупорядоченных кристаллах (ферромагнетиках, ферримагнетиках и антиферромагнетиках). Такие волны могут возбуждаться в очень широком диапазоне частот  $f=100$  МГц...10 ГГц и относятся к классу медленных электромагнитных волн, поскольку их фазовые скорости значительно меньше скорости света.

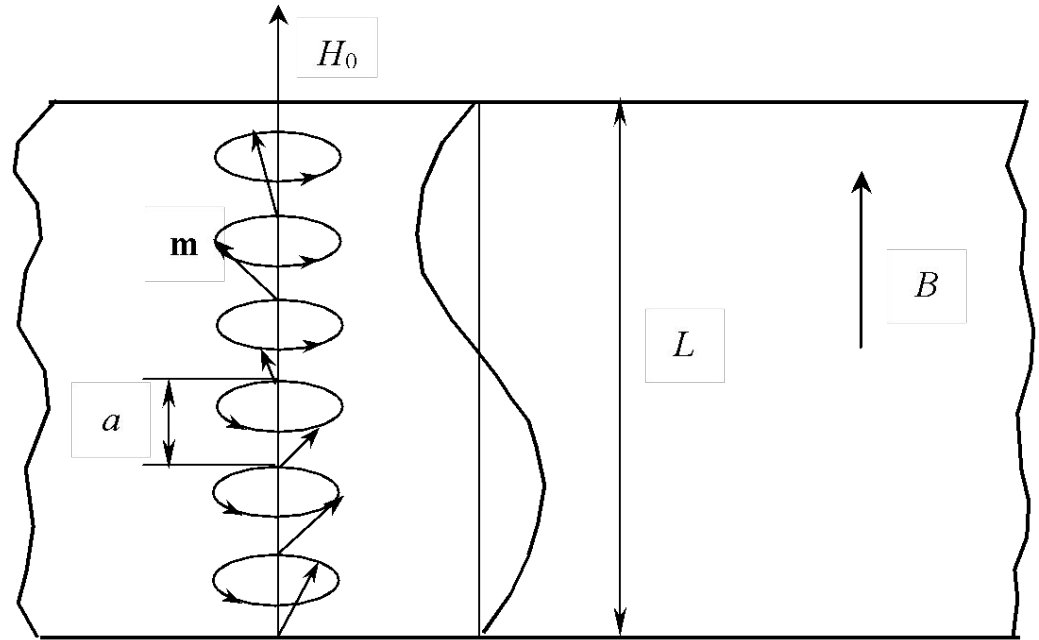


Рис.3.29. Возникновение спиновой магнитной волны в тонкой магнитной пленке

$L$ - толщина пленки;  $B$ - индукция магнитного поля в пленке;  
 $a$  – межатомное расстояние

Наиболее часто в качестве активного материала в спин-волновых устройствах используются **монокристаллические феррогранаты**, в частности, эпитаксиальные пленки железо-иттриевого граната  $Y_3Fe_5O_{12}$  толщиной 10 мкм, выращенные на монокристаллических подложках из немагнитного галлий-гадолиниевого граната ( $Gd_3Ga_5O_{12}$ ).

# Характеристики спиновой магнитной волны

Частота вращения  $f_H$  вектора  $\mathbf{m}$  переменной составляющей намагниченности прямо пропорциональна напряженности внешнего постоянного подмагничивающего поля  $H_0$  и рассчитывается из соотношения

$$f_H = \frac{|g|}{2\pi} \mu_0 H_0, \text{ с}^{-1}, \quad (3.47)$$

где  $|g| = 1,76 \cdot 10^{11}$  К/кг – гиромагнитное отношение;  $H_0$  – в А/м.

Эта частота является частотой собственных колебаний намагниченности и называется **частотой ферромагнитного резонанса (ФМР)** неограниченной среды.

В пленочных структурах возникает спектр бегущих магнитостатических волн, групповые скорости  $V_g$  которых определяются только толщиной  $L$  и намагниченностью насыщения  $J_0$  пленки:

$$V_g \approx \pi f_M L / 2, \text{ м/с}, \quad (3.48)$$

где частота  $f_M = \frac{|g|}{2\pi} \mu_0 J_0$  Гц.

# Спин-волновой фильтр

В ферромагнитной пленке 1, расположенной на диэлектрической подложке 2, входной преобразователь (антенна) 3 преобразует энергию электромагнитной волны в энергию спиновой волны. Спиновая волна распространяется по пленке и достигает выходной антенны 4, где происходит обратное преобразование спиновой волны в электромагнитную. В зависимости от назначения и типа устройства могут быть использованы одноэлементные или многоэлементные антенны, а их число может отличаться от двух. Входная и выходная антенны подключаются к линиям связи 5 (например, микрополосковым), которые могут содержать дополнительно элементы согласования. Ферромагнитная пленка окружена одним или двумя металлическими экранами 6, расположенными на некотором расстоянии от пленки, и снабжена поглотителями спиновых волн 7.

Ферромагнитная пленка 1 с преобразователями располагается в зазоре магнита 8, обеспечивающего создание поля подмагничивания необходимой величины и направления.

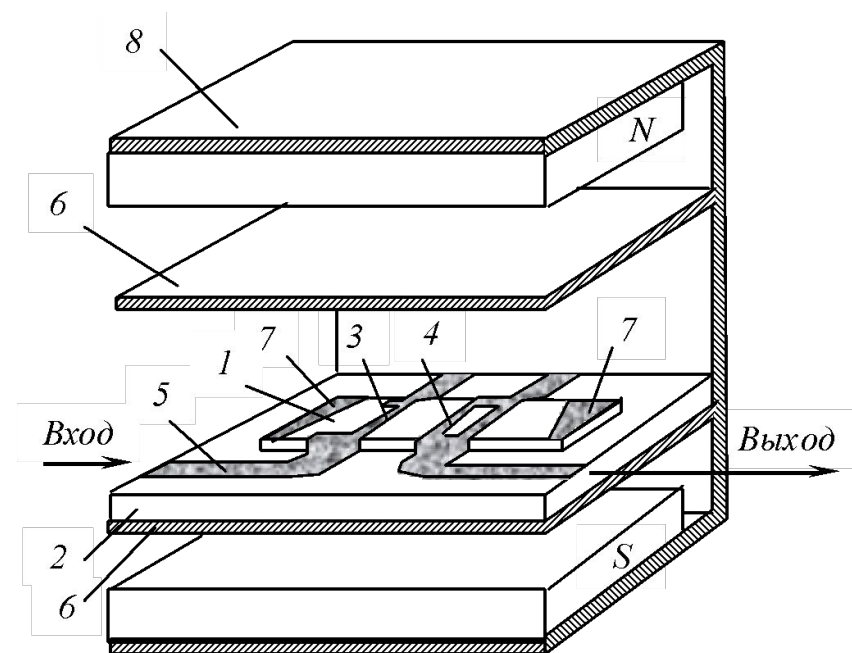


Рис. 3.30. Конструкция спин-волнового прибора

Все устройство помещается в корпус, который сам часто является элементом магнитной системы. Магнитная система служит для создания подмагничивающего поля  $H_0$  необходимой величины, направления и однородности. Она может быть электрически перестраиваемой и в этом случае представляет малогабаритный электромагнит. В неперестраиваемых магнитных системах для создания поля  $H_0$  используются постоянные магниты с магнитопроводом.