



Scientific Research Institute
of Technological Progress

Магнитные материалы

ликбез для «чайников»

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 χ_m - магнитная восприимчивость материала.

Магнитная восприимчивость является безразмерной величиной, характеризующей способность магнетика перемagnetничиваться. 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 μ 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, Tu**.

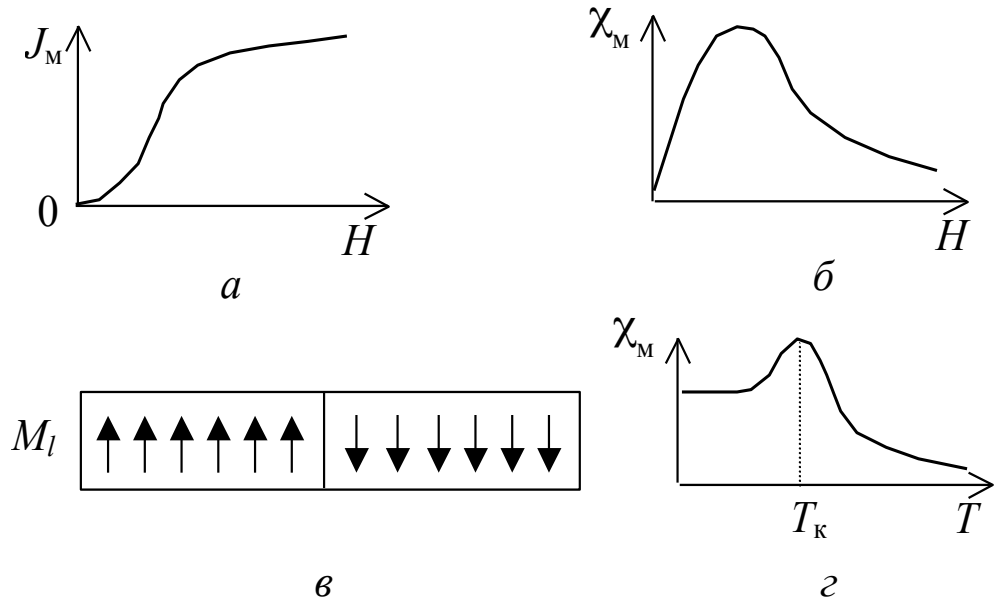
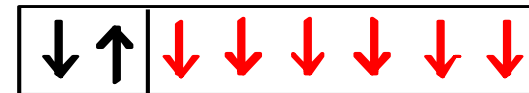
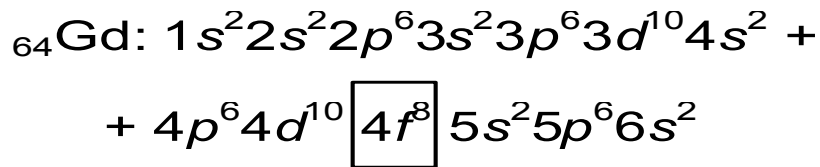
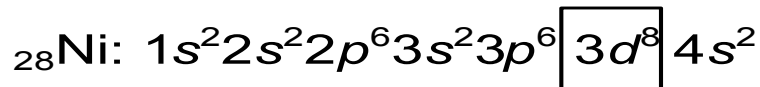
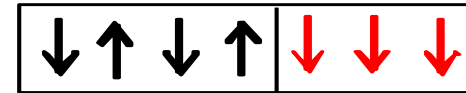
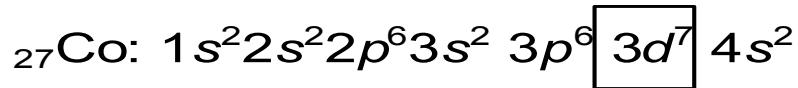
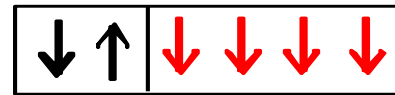
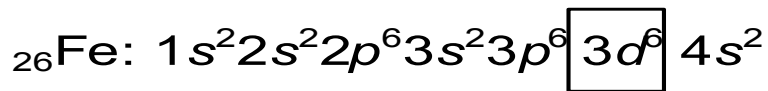


Рис. 3.6. Зависимость намагниченности J_M - а и магнитной восприимчивости χ_M - б ферромагнетиков от напряженности внешнего магнитного поля H ; в - доменная структура ферромагнетика; з - температурная зависимость χ_M

Природа ферромагнетизма



a

б

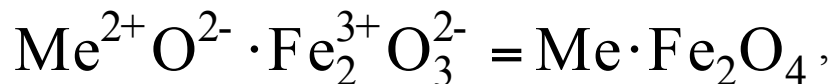
Конфигурации электронных оболочек ферромагнетиков - *a* и условные изображения ориентации спинов электронов на недостроенных электронных оболочках - *б*

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 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

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

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

a – межатомное расстояние

d – диаметр атома;

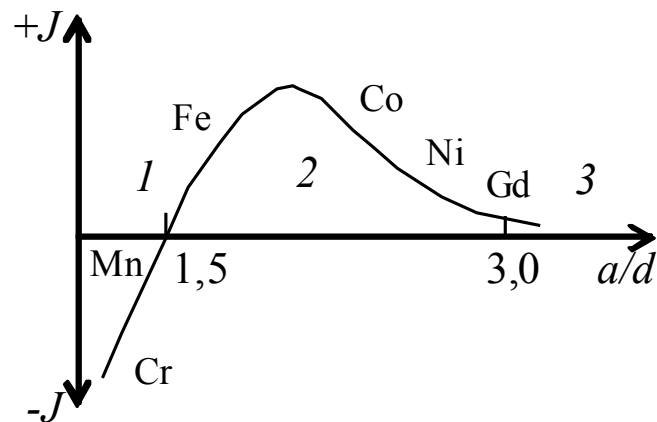


Рис. 3.9. Зависимость обменного интеграла J от отношения a/d

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 $\varphi=180^\circ$ и направления намагниченности в соседних доменах оказываются противоположными (рис. 3.10, *б*).

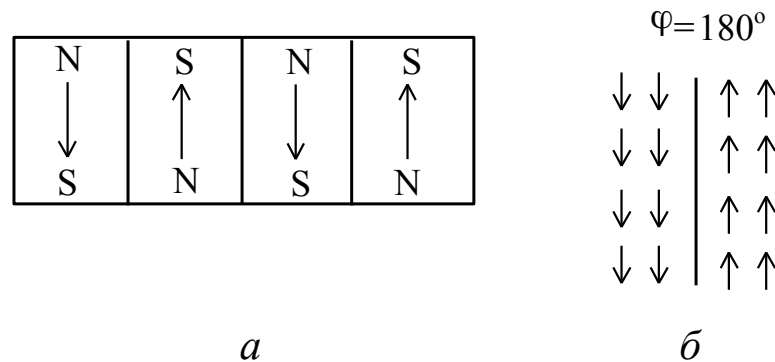


Рис. 3.10. Доменная структура ферромагнетиков:
а - схема деления ферромагнетиков на домены;
б - структура доменной границы

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, *а*), **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 $\langle 100 \rangle$.

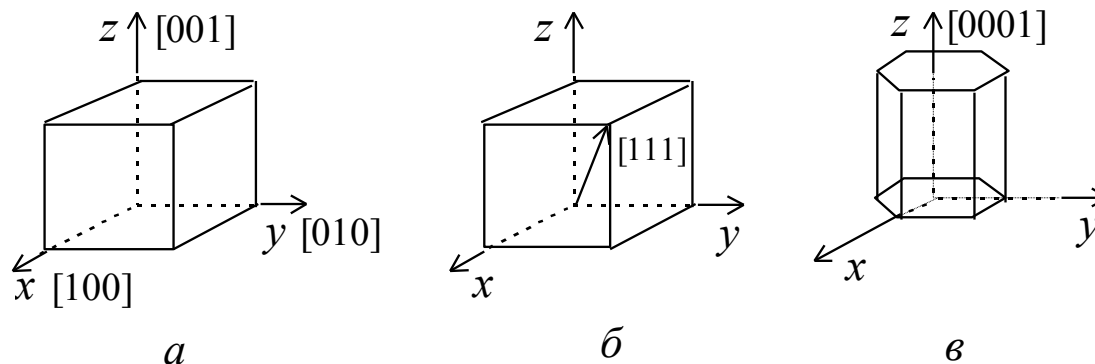


Рис. 3.11. Направления легкого намагничивания для элементов переходной группы: *а* - железо; *б* - никель; *в* - кобальт

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.

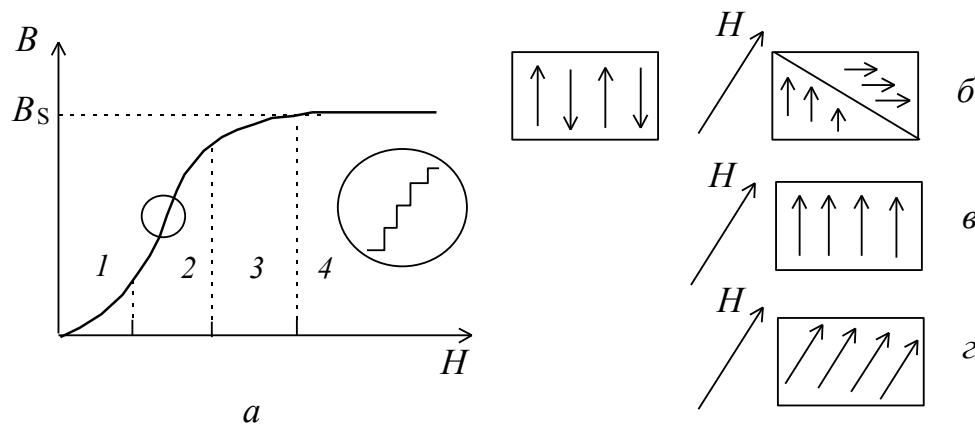


Рис. 3.12. Основная (начальная) кривая намагничивания ферромагнетика a ; условные изображения структуры доменов на различных участках кривой намагничивания: $б$ - необратимое смещение доменных границ на участке 2; $в$ - процесс вращения на участке 3; $г$ - ориентация магнитных моментов вдоль поля на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

Кривая намагничивания при циклическом перемангничивании

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 μ_d находится путем дифференцирования основной кривой намагничивания ферромагнетика $B=f(H)$

$B=f(H)$

Начальная магнитная проницаемость

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

Импульсная магнитная проницаемость

$$\mu_H = (1/\mu_0) \Delta B/\Delta H. \quad (3.33)$$

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

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

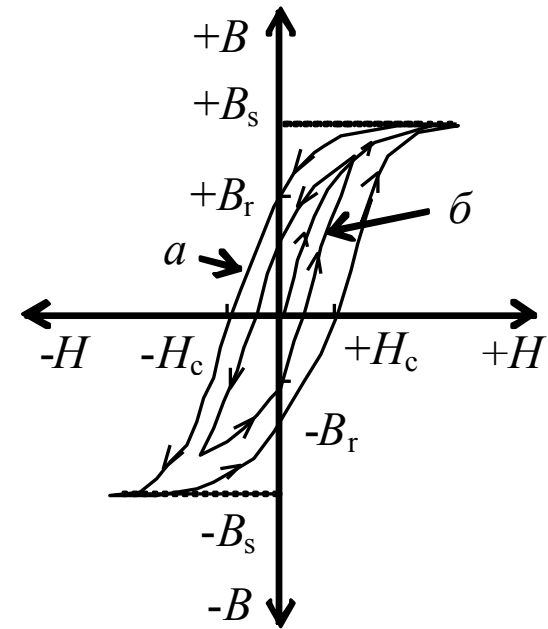


Рис. 3.13. Предельная - *а* и частная - *б* кривые намагничивания при циклическом перемангничивании

Эффект магнитострикции в ферромагнетиках

Процесс перемagnичивания 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

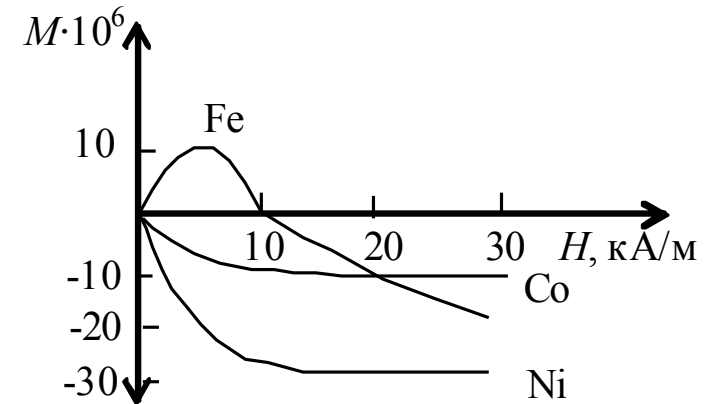


Рис. 3.16. Зависимость коэффициента магнитострикции $M=f(H)$ для элементов группы железа

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, ξ_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 ξ_0 - статическая деформация образца магнитострикционного материала.

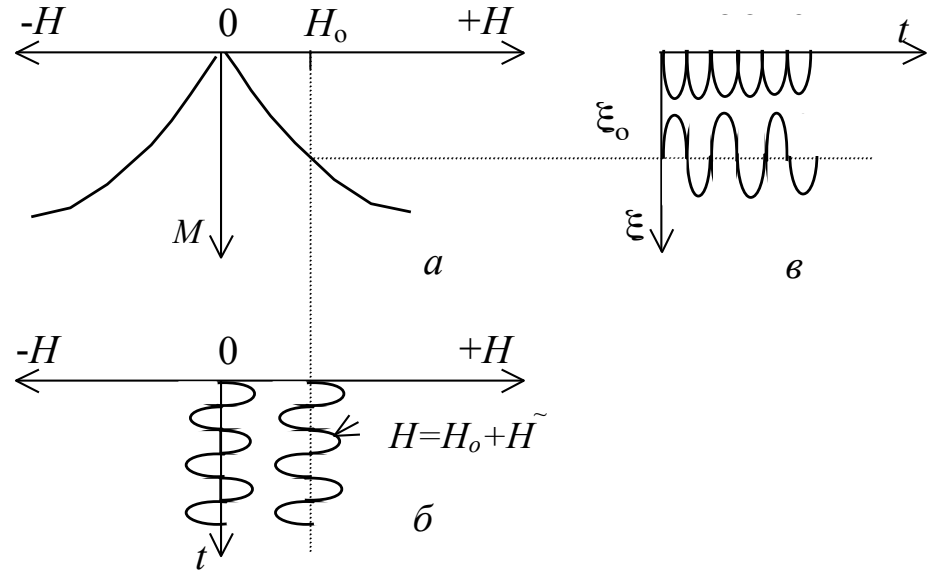


Рис. 3.17. Иллюстрация четности магнитострикционного эффекта для Ni: а- зависимость коэффициента магнитострикции $M=f(H)$ для переменного магнитного поля $H\sim$; б - изменение напряженности магнитного поля $H=f(t)$; в - деформация образца $\xi=f(t)$

H_0 - постоянная составляющая магнитного поля, ξ_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.

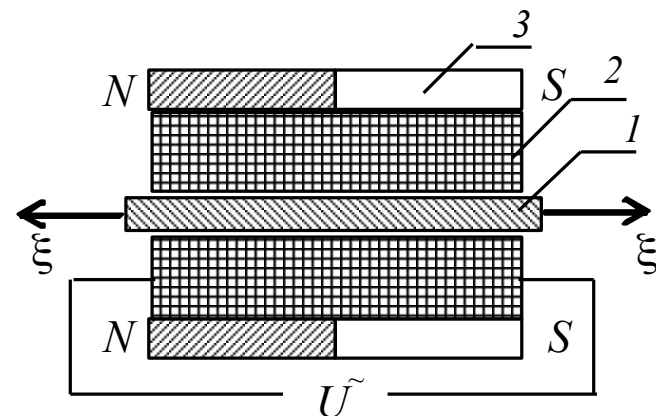


Рис. 3.18. Конструкция магнитострикционного преобразователя:
1 - стержень из магнитострикционного материала, 2 - катушка возбуждения, 3 - постоянный магнит

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_Γ - *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 $B_{\sim}/B_0_{\sim}=0,37$.

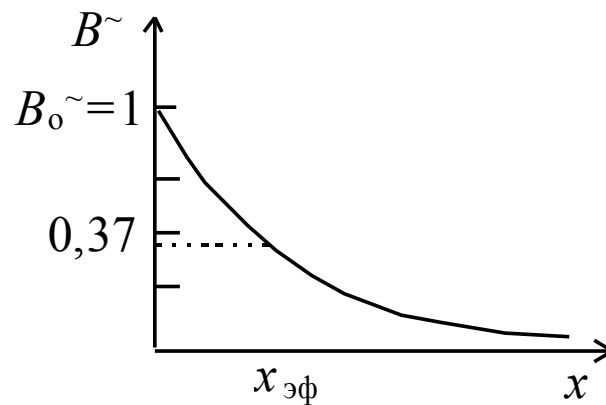


Рис. 3.19. Зависимость $B_{\sim}=f(x)$

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 ρ - удельное электросопротивление ферромагнетика, Ом·м; f - частота электромагнитного поля, Гц; μ - эффективная магнитная проницаемость материала.

Классификация магнитных материалов

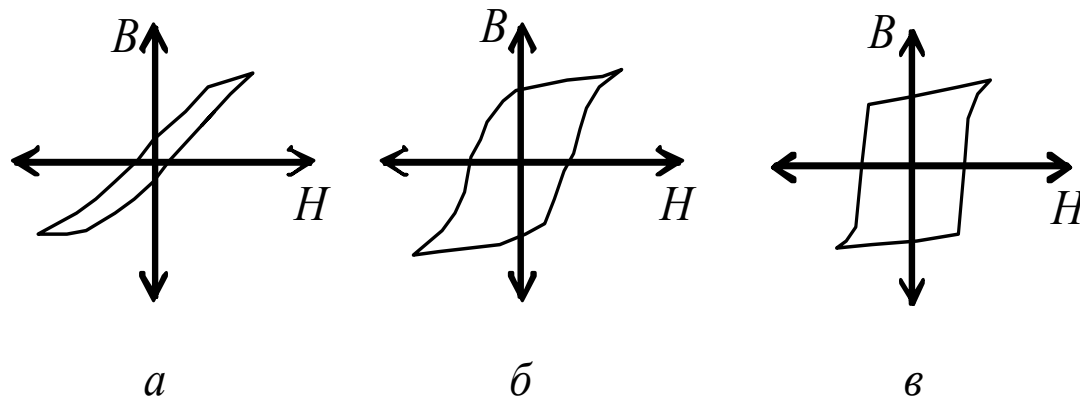
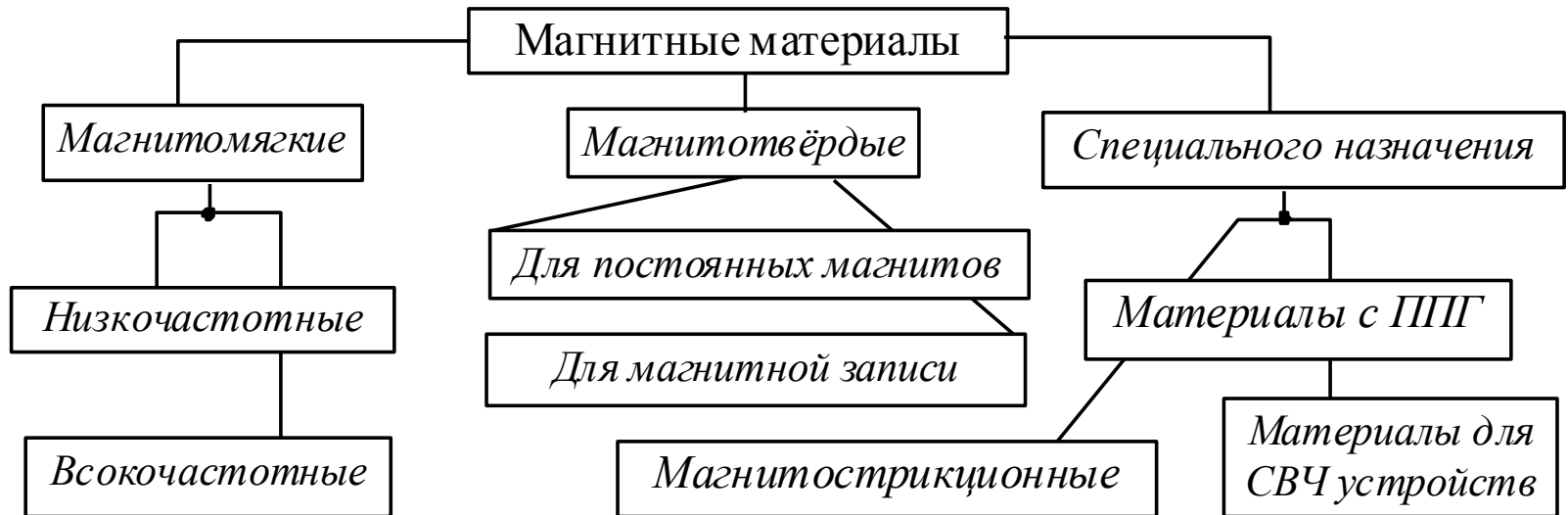


Рис. 3.19. Предельные петли гистерезиса различных материалов: *a* - магнитомягкие материалы; *б* - магнитотвёрдые материалы; *в* - материалы с ППГ

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

μ_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

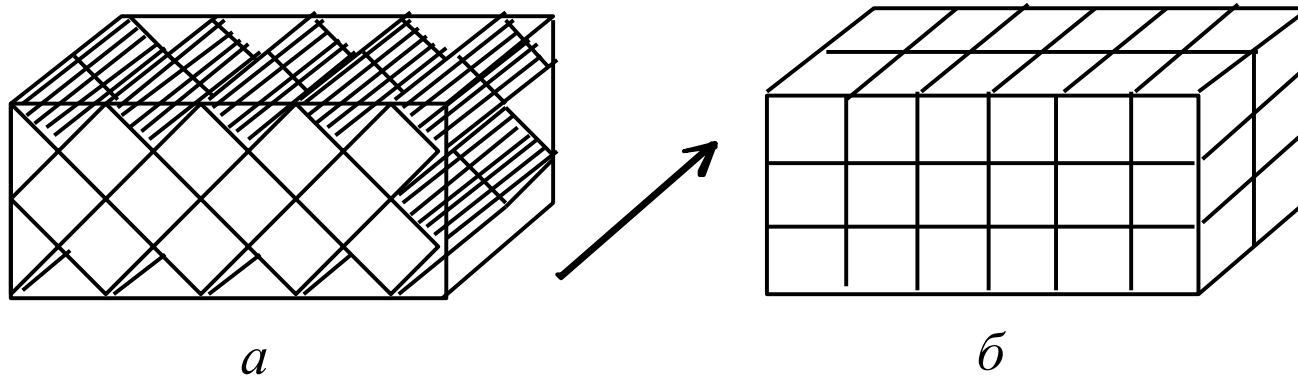


Рис. 3.20. Условное изображение текстур электротехнической стали: *а* - ребровая текстура; *б* - кубическая текстура (стрелкой указано направление проката)

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° 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. ρ , 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, V, Ti. Особенностью этих сплавов является чрезвычайно высокое значение начальной магнитной проницаемости μ_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 железо-никелевого 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 пермендюрорв

μ_H	$H_c, \text{ A/}$ M	$B_s, \text{ T}$	$\rho \cdot 10^6, \text{ Ом} \cdot \text{ м}$
$5 \cdot 10^3$	160	2...2,2	0,2

Пермендюрорв, 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 пермендюрорв марок 48K2Ф, 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

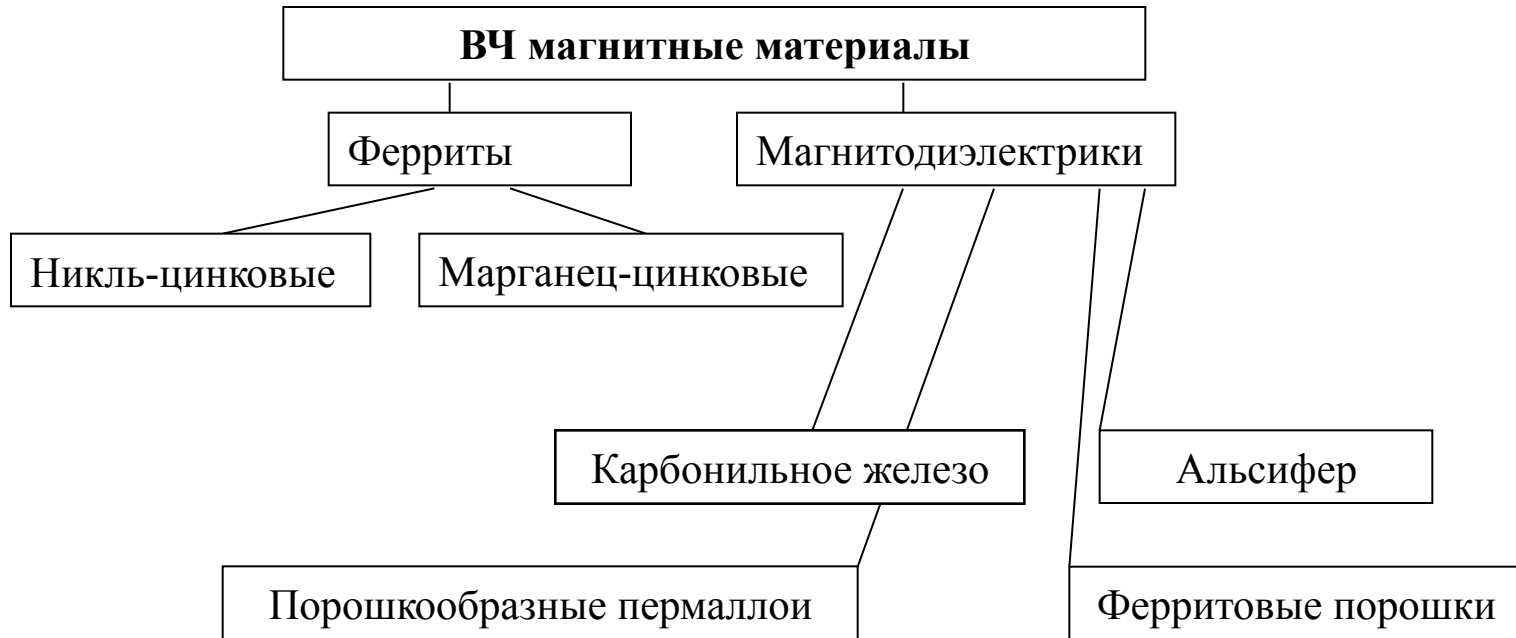
Аморфные магнитные сплавы

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 $\mu=(5000...370\ 000)$, индукцией насыщения $B_s=(0,78...1,5\ \text{Т})$, малой коэрцитивной силой $H_c=(0,15...10\ \text{А/м})$, высоким удельным сопротивлением $\rho=(0,013...0,016\ \text{Ом}\cdot\text{м})$.

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

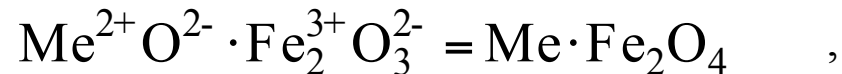


Ферриты 1

Ферриты - это оксидные магнитные поликристаллические или (реже) монокристаллические материалы, относящиеся к классу ферромагнетиков. Основными особенностями ферритов являются высокое удельное электросопротивление ρ , достигающее $10...10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и широкий диапазон значений начальной магнитной проницаемости μ_n от 10 до 50000. Недостатком ферритов является невысокое значение индукции насыщения B_s , составляющее 0,2...0,4 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 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 $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ и $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$, соответственно, где x - содержание цинка. Распределение катионов по междуузлиям А и В изображается в виде формулы

$$\begin{array}{ccc} \left[\text{Zn}_x \text{Fe}_{1-y}^{\rightarrow} \right] & \left[\text{Me}_{1-x}^{\leftarrow} \text{Fe}_{1+y}^{\leftarrow} \right] & , \\ \text{подрешетка} & \text{подрешетка} & \\ \text{А} & \text{В} & \end{array} \quad (3.43)$$

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

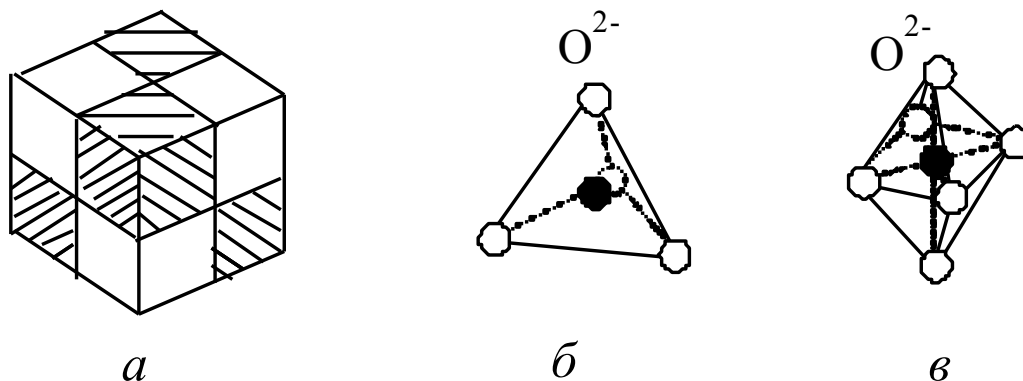


Рис. 3.21. Структура феррошпинели: *а* - элементарная ячейка; *б* - тетраэдрическое междуузлие (тип *A*);
в - октаэдрическое междуузлие (тип *B*)

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. Высокопроницаемые 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 броневого 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

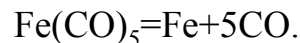
μ_n	ρ , Ом·м	$f_{кр}$, кГц	$\alpha_{\mu,T} \cdot 10^6$, 1/К
10...250	10^9	100	25...180

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 μ_n .

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 тн 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 α_m, T , число, стоящее после дефиса - значение начальной магнитной проницаемости тн).

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

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 магнитотвёрдых 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/м³; W_{\max} - удельная магнитная энергия.

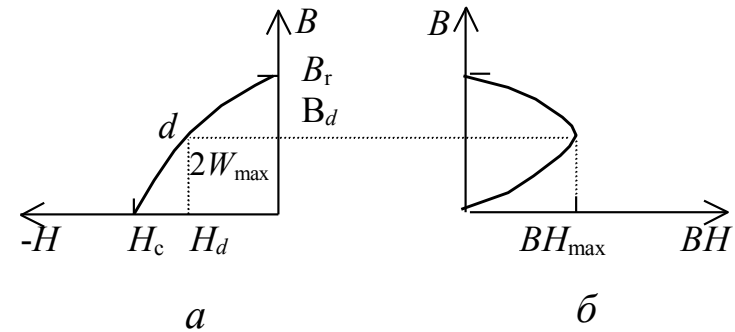


Рис. 3.22. Характеристики магнитотвёрдых материалов: а - кривая размагничивания $B=f(H)$; б - график $B=f(BH)$

Специфическим параметром магнитотвёрдого материала является коэффициент выпуклости γ 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 магнитожестький материал предварительно измельчается до частиц размером $0,1...1$ мкм. Границы доменов совпадают с физическими границами зерен и в дальнейшем их смещение становится невозможным.

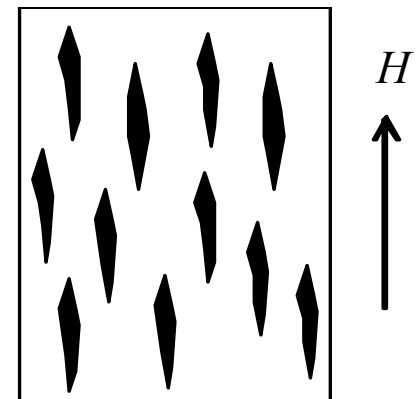


Рис. 3.24. Распределение пластинчатых выделений магнитной фазы под воздействием сильного магнитного поля

Классификация магнитотвёрдых материалов



Характеристики магнитотвёрдых материалов 1

1. Литые высококоэрцитивные сплавы. К этой группе магнито жестких 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 ³
Сплавы ЮНД: ЮНД4, ЮНТС	0,4... 0,5	40 ...50	4...5
Сплавы ЮНДК: ЮНДК31ТЗБА	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 ($\rho = 10 \dots 10^6 \text{ Ом} \times \text{м}$), 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/м³, 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/м³.

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/м³. 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.

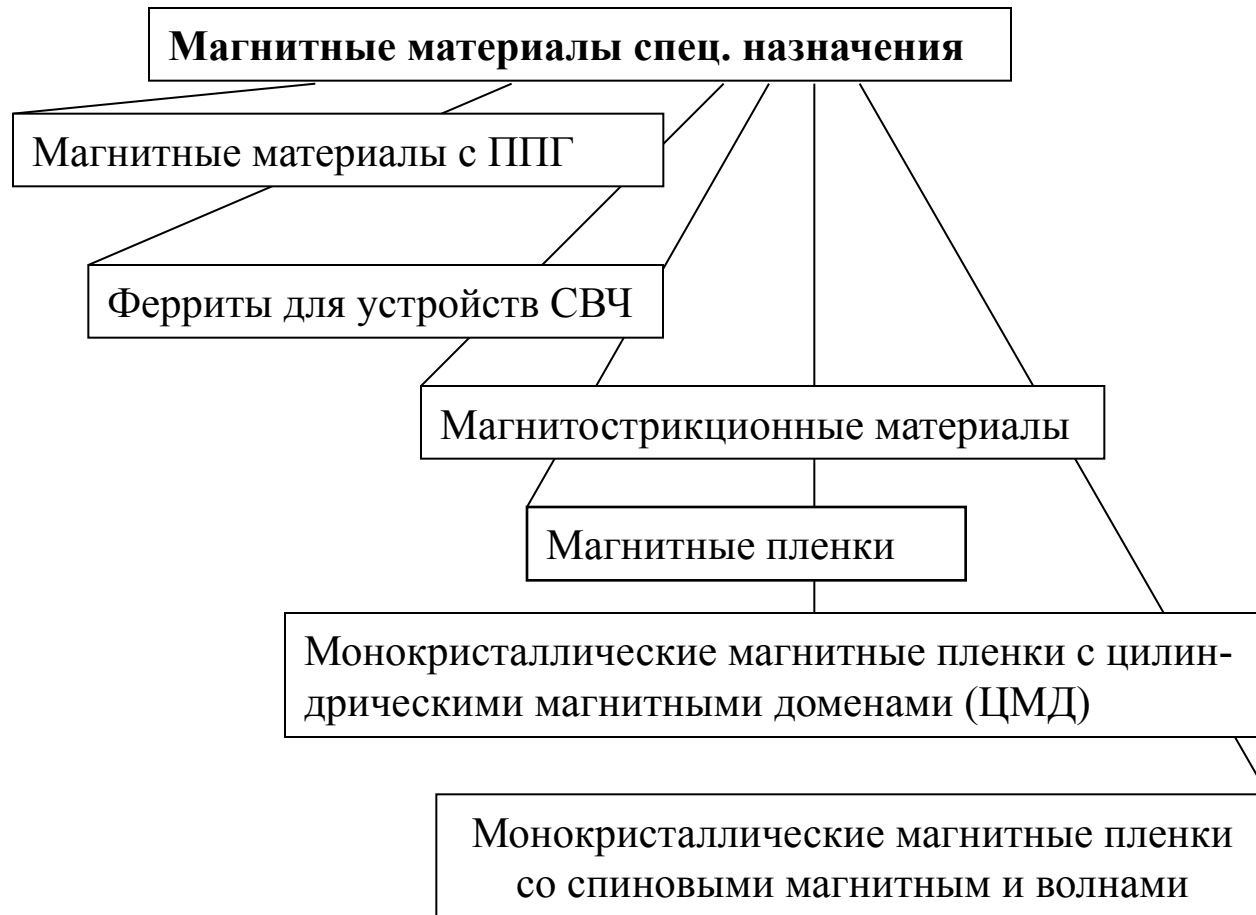
В качестве магнитного компонента широко применяются порошки закиси железа $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ с мелкими однодоменными частицами коричневого цвета. Часто используется смесь магнетита Fe_3O_4 и $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, представляющая материал с повышенным значением коэрцитивной силы.

Другой широко распространенный материал для магнитной записи - это диоксид хрома 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 **A4205-3Б** маркируется лента для компакт-кассеты на лавсановой основе, толщиной 18 мкм, номер разработки 05, с шириной 3,8 мм.

Магнитные материалы специального назначения

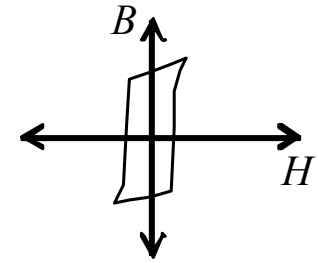
Классификация магнитных материалов специального назначения



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 эрстедах ($1 \text{ Э} = 79,6 \text{ А/м}$), например, **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 4π .

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 **49K2Ф**, **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.

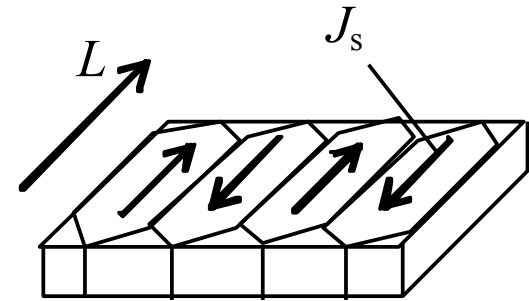


Рис. 3.25. Расположение доменов в плоскости тонкой магнитной пленки

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° 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*).).

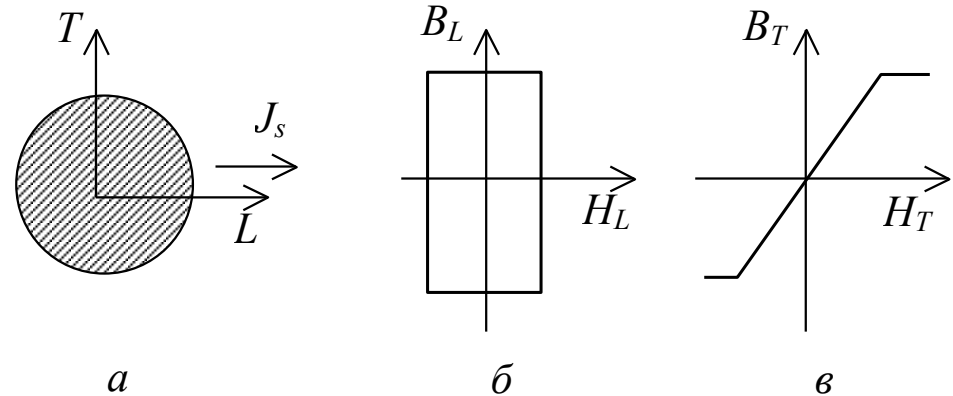


Рис. 3.26. Направления легкого L и трудного T намагничивания в тонкой магнитной пленке - *а*; вид петли гистерезиса: *б* - в направлении легкого намагничивания; *в* - в направлении трудного намагничивания

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

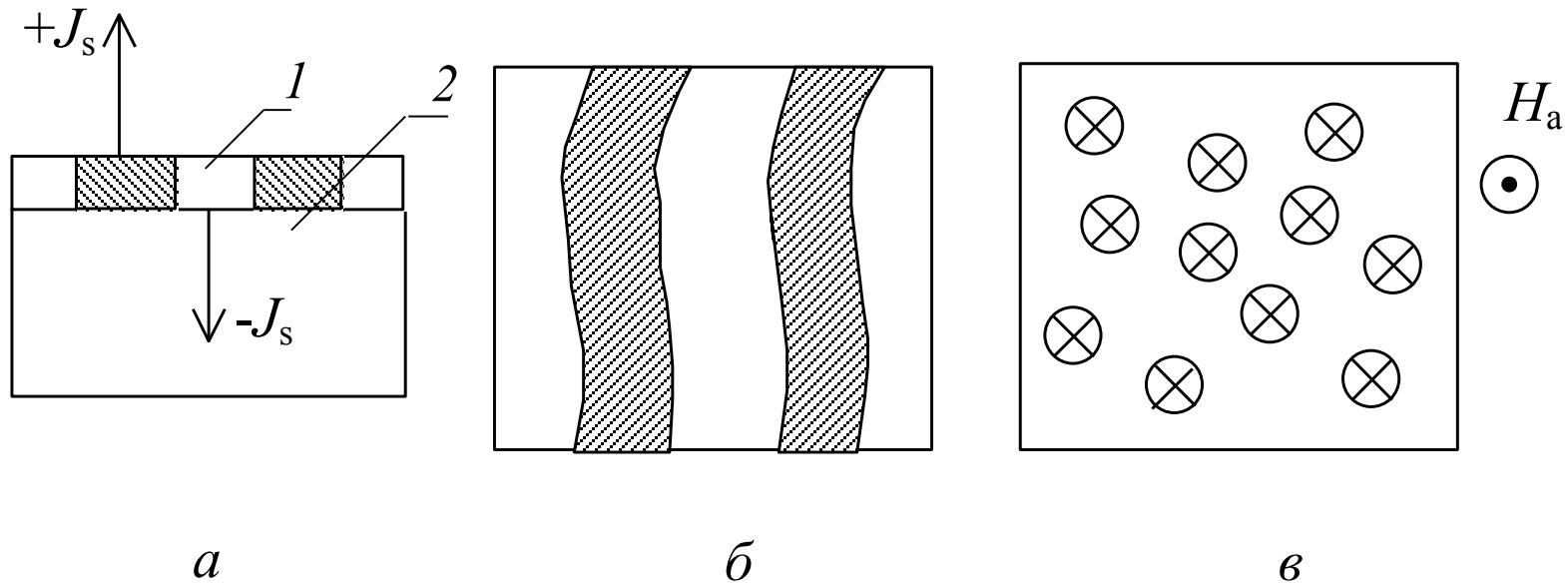


Рис. 3.27. Магнитные домены в монокристаллических пленках: *a* - структура монокристаллической пленки (поперечный разрез); *б* - полосовые магнитные домены (вид сверху); *в* - возникновение цилиндрических магнитных доменов под влиянием внешнего магнитного поля H

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_c*** этих материалов составляет около 24 А/м. В эпитаксиальных пленках ферритов-гранатов удалось получить ЦМД с диаметром около 1 мкм.

2. Вторым видом 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

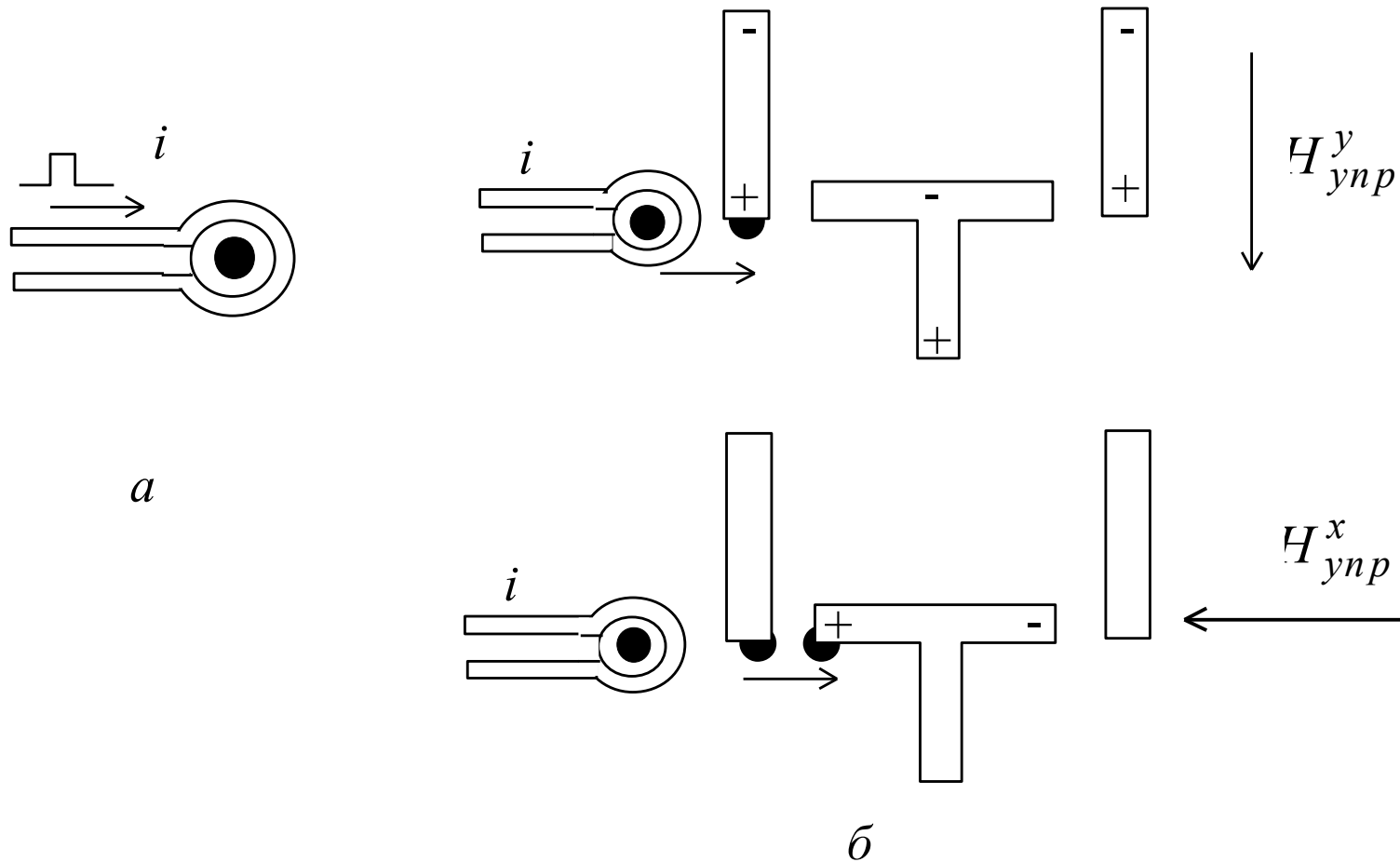


Рис. 3.28. Основные функциональные узлы устройства памяти на ЦМД: *а* - генератор ЦМД; *б* - схема продвижения ЦМД

Магнитостатические 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, магнитостатических 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.

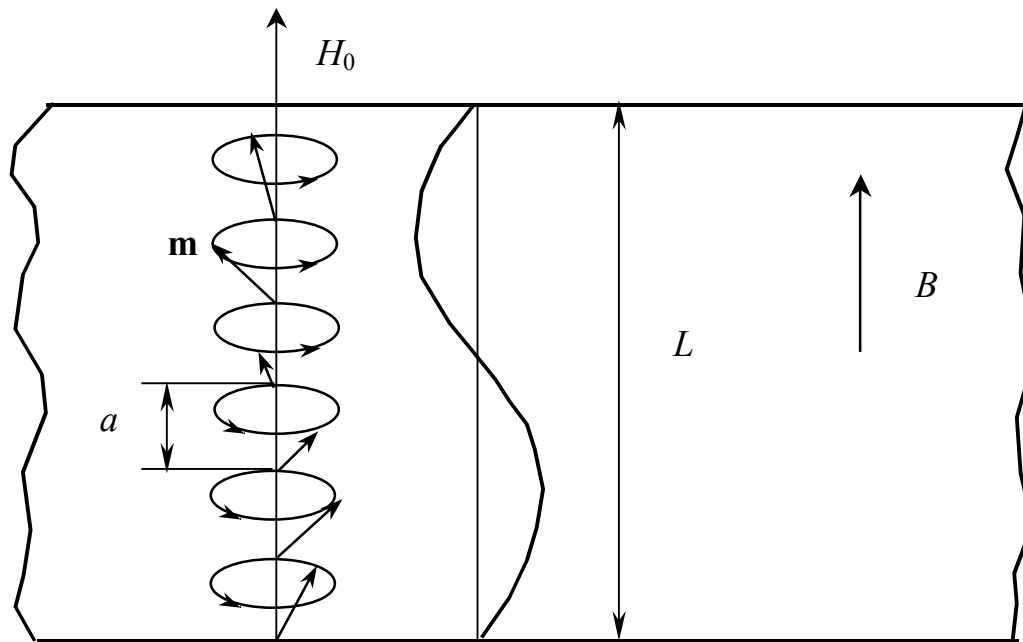


Рис.3.29. Возникновение спиновой магнитной волны в тонкой магнитной пленке

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 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ толщиной 10 мкм, выращенные на монокристаллических подложках из немагнитного галлий-гадолиниевого граната ($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$).

Характеристики спиновой магнитной волны

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

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

где $|g| = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ К/кг}$ – 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:

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

где частота $f_{\text{м}} = \frac{|g|}{2\pi} \mu_0 J_0$ 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.

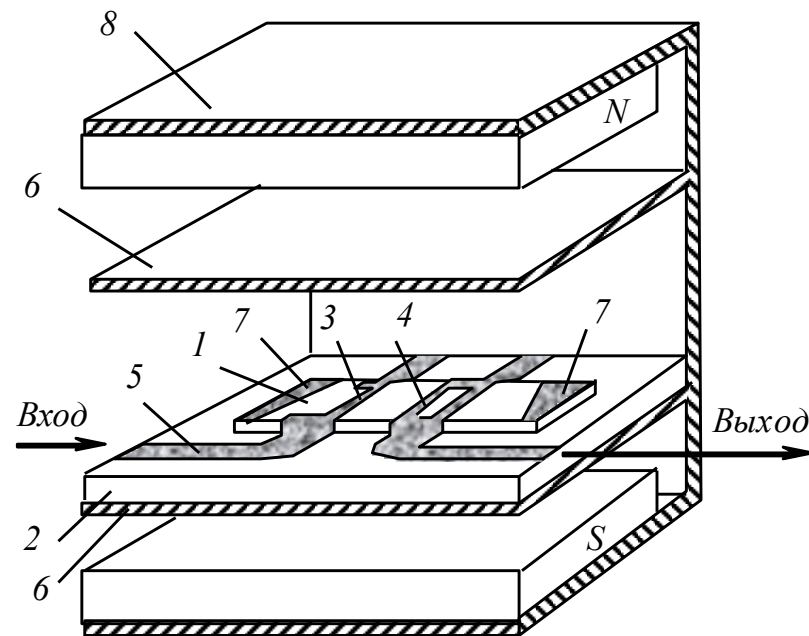
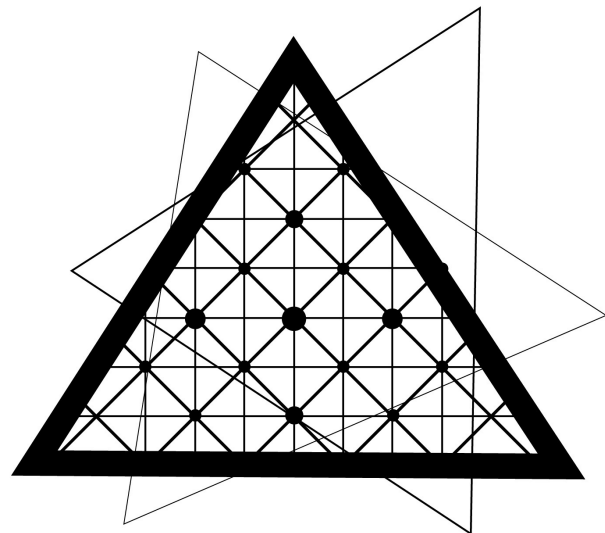


Рис. 3.30. Конструкция спин-волнового прибора

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 перестраиваемых магнитных системах для создания поля H_0 используются постоянные магниты с магнитопроводом.

Микropopoшкu мaгнuтнuх мaтepиaлoв пo тeхнoлoгuи Тopнaдo



EUROGROUP
TRADE CZ s.r.o.

Oderska 333/5
19600 Praha 9
Czech Republic