

## Лекция 18. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы

Это материалы, главным образом ферро- и ферримагнетики, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в относительно слабых магнитных полях напряженностью  $H = 10-10^3$  А/м. Наряду с малой коэрцитивной силой мерой магнитной мягкости может служить также величина статической относительной магнитной проницаемости: начальной  $\mu \sim 10^2-10^5$  и максимальной  $\mu \sim 10^3-10^6$ , а потери на магнитный гистерезис не превышают  $10^2$  Дж/м<sup>3</sup> на один цикл перемагничивания. Типичные свойства групп магнитно-мягких материалов приведены в табл. 4.1.

В переменных магнитных полях, где большей частью и используются магнитомягкие материалы, важными характеристиками их являются, удельные магнитные потери, т.е. мощность потерь на частоте перемагничивающего поля, и динамическая проницаемость  $\mu_d$ . С ростом частоты и намагниченности потери возрастают, а проницаемость снижается. По характеру применения магнитно-мягкие материалы различаются на низко и высокочастотные. На частотах  $f \leq 10^4-10^5$  Гц в качестве магнитомягких материалов используют в основном железо и металлические сплавы, при более высоких частотах  $10^5-10^{10}$  Гц - тонкие магнитные пленки, ферриты и магнитные диэлектрики.

Низкочастотные металлические материалы подразделяются на несколько групп: железо различной степени чистоты и низкоуглеродистые стали; сплавы железа с кремнием (так называемые электротехнические стали), прецизионные материалы, т.е. сплавы железа, никеля, кобальта (Fe-Ni, Fe-Si-Al, Fe-Al, Fe-Co).

К материалам, имеющим высокую магнитную проницаемость и малую коэрцитивную силу относятся железоникелевые сплавы, называемые пермаллоями. Эти свойства во многом объясняются практическим отсутствием в пермаллоях эффектов анизотропии и магнитострикции. Хорошая технологичность позволяет получать ленты толщиной до 0.5 мкм, что создает возможность использования пермаллоя до частот  $10^5$  Гц в качестве экранов электромагнитного излучения, сердечников трансформаторов. Особую группу магнитомягких материалов образуют аморфные ферро- и ферримагнитные материалы, получаемые с помощью специальных технологий. Они сочетают определенную магнитную структуру с аморфной атомной структурой. Особенности магнитного состояния аморфных магнетиков определяются спецификой аморфного состояния вещества - отсутствием дальнего и наличием атомного ближнего порядка, термодинамической неравновесностью, флуктуациями атомных магнитных моментов. За исключением магнитных стекол, представляющих систему хаотически «замороженных» в пространстве магнитных моментов, остальные аморфные магнитные материалы обладают большим магнитным порядком. Перспективность технического использования аморфных магнетиков связана с высокой магнитной проницаемостью ( $\sim 10^5$ ), малыми магнитными потерями ( $\sim 0.5$  Вт/кг), большим электрическим сопротивлением.

Таблица 4.1. Основные группы магнитно-мягких материалов и их типичные свойства.

Отличительное свойство группы М.-м.м.	Марка типичного материала	$B_s$ , Тл	$T_C$ , °С	$H_C$ , А/М	$\mu_a$	$\mu_{\max}$	$\rho \cdot 10^6$ , Ом·см
Наибольшая намагниченность насыщения, высокая точка Кюри, $T_C$	железо 20832	2.16	770	32	-	$5 \cdot 10^3$	10
	сплав Fe-Co 49 КФ	2.40	940	175	-	$4.4 \cdot 10^3$	20
Низкие магнитные потери $P$ при частоте 50 Гц	электротехнич. сталь: анизотропная, 3415 (0.35 мм)	2.0	740	-	-	-	50
	изотропная, 2412 (0.35 мм)	2.0	740	-	-	-	50
	аморфный сплав на основе Fe (25 мкм)	1.56	415	2.4	-	-	130
Низкие магн. потери при перемагничивании в полях звуковых частот	электротехнич. сталь: анизотропная, 3415 (0.05 мм)	2.0	740	32	-	-	50
	изотропная, 2412 (0.1 мм)	2.0	740	36	-	-	51
	аморфный сплав на основе Fe (25 мкм)	1.58	405	8	-	-	125
Низкие магн. потери в диапазоне высоких и сверхвысоких частот	феррит 150 ВЧ	0.35	400	250	170	350	$10^{12}$
	магнитодиэлектрик Р 100	-	-	-	10	-	-
Наивысшая магн. проницаемость $\mu_{\max}$ в слабых полях	феррит-гранат 30С46	0.13	280	80	70	-	$10^{14}$
	79 НМ (0.05 мм) 81 НМА (0.05 мм)	0.73 0.5	450 260	1.2 0.56	$3 \cdot 10^4$ $1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$ $3 \cdot 10^5$	55 80
Повышенное электросопротивление	50НХС (0.1 мм)	1.0	360	10	$3 \cdot 10^2$	$2.8 \cdot 10^4$	90
	12Ю	1.0	600	24	$1 \cdot 10^3$	-	100
Высокая индукция	50 Н (0.1 мм)	1.5	500	14	$3 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^4$	45
Прямоугольная петля гистерезиса	50 НП (0.05 мм)	1.52	500	11	-	$8 \cdot 10^4$	45
	68НМП (0.1 мм)	1.15	580	0.8	-	$5.5 \cdot 10^5$	45
Высокая магнитострикция	49К2Ф (0.2 мм)	2.35	960	160	$7 \cdot 10^2$	$5.5 \cdot 10^3$	40
	9Ю-ВИ (0.2 мм)	1.4	710	60	-	$1.5 \cdot 10^3$	90

Чаще всего используют аморфные сплавы металлов группы железа с добавкой ряда металлоидов (В, С, N, Si, Р) и редкоземельных элементов.

Аморфные материалы находят применение при создании трансформаторов, магнитных экранов, систем магнитной памяти и головок магнитофонов.

В электронике и смежных областях: радиотехнике, вычислительной технике и ряде других, наибольшее применение находят магнитные пленки. Они представляют собой слой магнитного вещества (обычно ферро- или ферримагнетиков) толщиной от нанометра до нескольких микрометров. Магнитные пленки отличаются от массивных образцов магнетиков рядом физических свойств.

Одной из наиболее существенных свойств магнитных пленок является сильная магнитная анизотропия, которая определяет тип магнитной доменной структуры и характер процессов намагничивания. В пленках с преобладающей продольной анизотропией вектор спонтанной намагниченности лежит в плоскости пленки и в этом случае образуются вытянутые, так называемые, плоские магнитные домены (ПМД). В пленках с преобладающей перпендикулярной анизотропией ось легкого намагничивания (ОЛМ) ориентирована по нормали к поверхности. Такие пленки в отсутствие магнитного поля обладают неупорядоченной лабиринтной доменной структурой с двумя типами доменов, намагниченность которых направлена либо вдоль, либо против нормали к поверхности пленки. При увеличении напряженности внешнего поля (поля смещения) лабиринтная доменная структура превращается в структуру изолированных ЦМД. ЦМД существуют в определенном интервале значений напряженностей поля смещения:  $H_1 < H_c < H_2$ . При  $H_{см} = H_1$  он растягивается в полосу ( $H_1$  – поле эллиптической неустойчивости), а при  $H_{см} = H_2$  возникает коллапс, т.е. схлопывание доменов ( $H_2$  – поле коллапса).

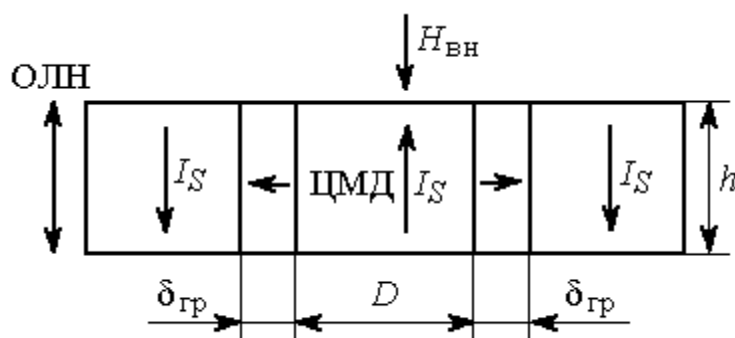


Рис. 4.4. Структуры цилиндрического магнитного домена

Цилиндрические магнитные домены легко передвигаются по пленке под действием неоднородного магнитного поля.

Подвижные ЦМД в феррит-гранатовых тонких пленках используются как элементы памяти в запоминающих устройствах; основой является домен с определенным направлением спонтанной намагниченности.

Другое перспективное направление применения магнитных пленок в информационной технике состоит в разработке магнитооптической памяти

(магнитооптические диски). Информация на такие диски записывается термомагнитным способом с помощью лазеров, а считывание происходит с помощью магнитооптических эффектов Керра или Фарадея. При этом плотность записи информации может достигать  $10^7$  бит/см<sup>2</sup>. Феррит-гранатовые пленки используются в устройствах управления оптическим пучком (дефлекторы, переключатели, модуляторы).

В СВЧ технике магнитные пленки применяются при создании фильтров, фазовращателей и вентилях. Магнитомягкие пленки (в основном, пермалой 2Fe-Ni) используются при создании магнитопроводов, полюсных наконечников в магнитных головках для записи и считывания информации.

К высокочастотным магнитомягким материалам относятся магнитные диэлектрики, которые обладают очень низкой электропроводностью, характерной для обычных диэлектриков. Наиболее важными их представителями являются ферриты, т.е. сложные окислы железа. В состав ферритов входят анионы кислорода  $O^{2-}$ , образующие основу кристаллической решетки, в промежутках между которыми располагаются катионы  $Fe^{3+}$  и катионы переходных металлов. Большинство ферритов являются ферримагнетиками.

Наиболее характерны с точки зрения практических применений ферриты со структурой шпинели с общей химической формулой  $MeOFe_2O_3$ , где Me - двухвалентный металл (Ni, Co, Mn, Mg) и ферриты со структурой граната с общей химической формулой  $Me_3Fe_5O_{12}$ , где Me - трехвалентный ион щелочноземельной и редкоземельной групп таблицы Менделеева (Y, Cd, Sm). Некоторые ферриты относятся к ферромагнетикам и антиферромагнетикам.

Ферриты - шпинели и феррит - гранаты нашли широкое применение в радиотехнике как материалы с малыми потерями на вихревые токи в антеннах, сердечниках радиочастотных контуров, в сверхвысокочастотной технике в качестве активных элементов переключателей, циркуляторов, вентилях. Их использование в СВЧ электронике основано на эффекте поворота плоскости поляризации электромагнитных волн в магнитном поле (эффект Фарадея) и эффекте зависимости значения магнитной проницаемости от магнитного поля. Все ферриты обладают высокой оптической прозрачностью, что позволяет их использовать в устройствах магнитного управления параметрами оптического пучка. Магнитные полупроводники со структурой шпинели нашли применение для создания ячеек памяти, для термомагнитной и фотомагнитной записи. Эпитаксиальные пленки феррит-гранатов являются одним из лучших материалов для устройств с цилиндрическими магнитными доменами.

К магнитным диэлектрикам также относят спрессованные ферромагнитные порошки (железа, магнетита и других металлов) с каким-либо диэлектриком. Так как в таких материалах не возникают вихревые токи, они получили некоторое применение в технике, но с открытием ферритов стали утрачивать свое значение.

Магнитотвердые материалы - ферромагнитные материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в сравнительно сильных магнитных полях напряженностью  $H \sim 10^3-10^5$  А/м. Магнитотвердые материалы характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы  $H_C \sim 10^3-10^6$  А/м, остаточной индукции  $B \sim 0,5-15$  Тл, и максимальной плотностью магнитной энергии  $(BH)_{\max} \sim 10-10^3$  кДж/м<sup>3</sup>.

Природа высоких значений коэрцитивной силы определяется одним (или несколькими) основным механизмом задержки процессов перемагничивания в ферромагнетиках: необратимым поворотом намагниченности  $M_S$  магнитных доменов; задержкой образования или роста зародышей перемагничивания; закреплением доменных границ (стенок) на различных неоднородностях и структурных несовершенствах кристалла.

По преобладающему технологическому признаку твердые материалы можно разделить на следующие группы:

1. Углеродистые легированные стали, характеризующиеся умеренными значениями коэрцитивной силы ( $H_C \sim 5-7 \cdot 10^3$  А/м) и плотностью магнитной энергии  $(B \cdot H)_{\max} \sim 1-4$  кДж/м<sup>3</sup>, что ограничивает область их применения.

2. Недеформируемые литые сплавы Их основой являются тройные соединения Al-Ni-Fe с добавками кремния, кобальта, титана, ниобия, меди. Они обладают повышенными значениями  $H_C \sim 10-60$  кДж/м<sup>3</sup>.

3. Деформируемые железо-кобальт-хромовые, железо-кобальт-ванадиевые сплавы, а также сплавы на основе благородных металлов : Pt-Co, Pd-Fe, Pt-Fe. Эти сплавы обычно подвергают пластической деформации под давлением в сочетании со структурным старением или упорядочением.

Магнитные характеристики деформированных сплавов превышают аналогичные характеристики для недеформированных сплавов : значение  $(BH)_{\max}$  в них может достигать  $\sim 100$  кДж/м<sup>3</sup>. В марках магнитотвердых сплавов буквы и цифры указывают на массовое содержание процентов : алюминия (Д), ванадия (Ф), вольфрама (В), кобальта (К), меди (Д), молибдена (М), никеля (Н), титана (Т). Буква А обозначает наличие кристаллической текстуры, улучшающей свойства сплава.

4. Материалы, получаемые прессованием порошков с их последующей термообработкой. Различают металлокерамические, металлопластические материалы; оксидные материалы (ферриты). Металлокерамические материалы получают из металлических порошков методом прессования без связующего материала, например, (Sm-Co) - самарий-кобальтовые материалы. Металлопластические материалы получают прессованием порошков вместе с изолирующей связкой, полимеризующейся при высокой температуре. Из оксидных материалов наиболее известен бариевый феррит (Ba-Fe-O).

Основные магнитотвердые материалы приведены в табл. 4.2.

К наиболее важным применениям магнитотвердых материалов относятся постоянные магниты как автономные источники постоянного магнитного поля. Обычно используются магнитотвердые материалы, прошедшие соответствующую термическую обработку и предварительно намагниченные

до насыщения. Обычно постоянные магниты входят как составная часть в магнитную систему, предназначенную для формирования магнитного поля, напряженность и конфигурация которого могут быть как постоянными так и регулируемые.

Наиболее важные характеристики постоянных магнитов: остаточная индукция  $B_d$  и энергетическое произведение (ВН). У совершенных материалов  $(ВН)_{\max}$  достигает значений 32Тл·кА/м.

Пространственная последовательность магнетиков образует магнитную цепь, по которой проходит определенный магнитный поток. Если магнитный поток возбуждается постоянными магнитами, то такая цепь называется поляризованной. К магнитной цепи применимы законы Ома и Кирхгофа.

$$F = \Phi R_m, \quad (4.8)$$

где  $\Phi$  - магнитный поток,  $R_m$  - магнитное сопротивление,  $F$  - магнитодвижущая сила:

$$R_m = L / (\mu \mu_0 S), \quad (4.9)$$

где  $L$  и  $S$  соответственно длина и поперечное сечение магнитной цепи.

Таблица 4.2. Основные магнитно-твердые материалы.

Материал	Состав, %	$H_c$	$B_r$
		кА/м	кДж/м <sup>3</sup>
Ални (ЮНД4)	15.5Al; 25Ni; 4Cu; ост. Fe	40.0	7.2
Алнико (ЮНДК24)	9Al; 14Ni; 24Co; 4Cu; 0.3Ni; ост. Fe	44.0	32
Алнико (ЮРДК25БА)	9Al; 15Ni; 25Cu; 4Cb; 0.8Nb; ост. Fe	62	52.8
Тиконал (ЮНДК35Т5БА)	7.6Al; 14Ni; 35Co; 3.5Cu; 5Ni; 0.8Nb; ост. Fe	125	96
Викаллоу 2	52 Co; 13V; ост. Fe	29.6-37.6	8-14
Кунифе 2	50Cu; 20 Ni; 2.5Co; ост. Fe	20.8	2.8-3.2
Кунико 2	35Cu; 24Ni; 41Co	36.0	4.0
Pt-Co	76Pt; 24Co	384	73.6
Fe-Co-Cr	63Fe; 25Cr; 12Co	50	61
Mn-Al-C	70Mn; 29.5Al; 0.5C	216	56
Бариевый феррит	BaO·6Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	116	24
Sm-Co	SmCo <sub>5</sub>	760	190
Sm-Co-Fe-Cu-Zr	Sm(Co, Fe, Cu, Zr) <sub>8</sub>	800	260
Nd-Fe-B-Co-Al	Nd <sub>15</sub> Fe <sub>62.5</sub> B <sub>5.5</sub> Co <sub>16</sub> Al <sub>1</sub>	880	324

## Магнитострикционные материалы

К магнитострикционным материалам относятся ферромагнитные металлы и сплавы, а также ферримагнитные ферриты, обладающие хорошо выраженными стрикционными свойствами. Само понятие стрикция происходит от латинского слова *strictio* - сжатие, натягивание. В сильно магнитных веществах магнитострикция достигает значений порядка  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  для относительного удлинения. Магнитострикция вызывается деформацией кристаллической решетки в магнитном поле за счет изменения взаимодействия между соседними магнитными моментами атомов или ионов. Магнитострикция относится к четным эффектам, т.е. не изменяет величины и знака при изменении направления внешнего магнитного поля на противоположное. Из металлических магнитострикционных материалов наиболее употребительны никель и его сплавы (Ni-Co-V, Ni-Fe), железокобальтовые (Co-V-Fe), железоалюминиевые (Al-Fe) сплавы. Их используют в поликристаллической форме и изготавливают по обычной металлургической технологии. Преобразователи из металлов и их сплавов применяют на частотах до 20-40 кГц.

Ферритовые магнитострикционные преобразователи типа феррита никеля и феррита граната (феррит гранат иттрия) употребляют в виде поликристаллической керамики и реже в виде монокристаллов. Ферритовые материалы практически не обладают потерями на вихревые токи, поэтому могут использоваться до частот  $10^9$  Гц.

В настоящее время разработана технология получения металлических магнитострикционных материалов на основе соединений редкоземельных элементов (тербия Tb, диспрозия Dy) с железом. Магнитострикция этих материалов может достигать значений  $10^{-2}$ . Однако она достигается только в больших магнитных полях порядка десятков и сотен кА/м. Основные характеристики магнитострикционных материалов приведены в табл. 4.3.

На основе эффекта магнитострикции созданы магнитострикционные преобразователи (другое название - электромеханические преобразователи). Магнитострикционный преобразователь представляет собой сердечник из магнитострикционных материалов с обмоткой. Протекающий по обмотке переменный ток от внешнего источника создает в сердечнике переменное магнитное поле, которое вызывает его механические колебания. И, наоборот, колебания сердечника под действием внешней переменной силы, преобразуются в переменную намагниченность, наводящую в обмотке переменную ЭДС.

Магнитострикционные преобразователи используются и ультразвуковой технике, гидроакустике, сейсмических исследованиях и ряде других областей техники, в качестве излучателей и приемников акустических колебаний, фильтров, резонаторов, стабилизаторов частоты. Магнитострикционные преобразователи используются в качестве перемещающего устройства в ультразвуковых инструментах. Амплитуда колебания в этом случае может достигать десятков микрометров на частотах от килогерц до мегагерц.

При использовании магнитострикционных материалов в устройствах акустоэлектроники на частотах  $10^8$ - $10^9$  Гц основным их достоинством является высокая механическая добротность, достигающая  $10^5$ - $10^6$  для ферритгранатов иттрия.

Таблица 4.3. Основные характеристики магнитострикционных материалов.

Материал, его марка	Хим. состав	$\mu$	$\lambda_s, 100^{-6}$	$\rho, 10^{-5}$ Ом·см	$H_C, 10^2$ А/м	Q
Никель, НП2Т	Ni $\geq$ 98%	35	-37	0.7	1.7	700
Пермендюр, 49КФ	Co 49%, V 2%, ост. Fe	200	+70	3.4	1.4	600
Фльферы, 12Ю 14Ю	Al 12-14%, ост. Fe	30-100	+40	16	0.12-0.30	400
Феррит, 21СПА	NiOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + глазурь	20	-26	$10^7$	2-4	2000
Ферриты Виброкс	NiOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Cu, Co	20	-30	$10^7$	-	2000