

Лекция 15

КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Основные технические применения магнитных материалов находят в электротехнике, радиотехнике, электронике, приборостроении, компьютерной технике, морской, авиационной и космической навигации, геофизических методах разведки полезных ископаемых, автоматике и телемеханике. В технике широкое применение нашли также магнитная дефектоскопия и магнитные методы контроля. Магнитные материалы идут на изготовление магнитопроводов генераторов, моторов, трансформаторов, реле, магнитных усилителей, элементов магнитной памяти, стрелок компасов, устройств магнитной записи и т.д.

Если рассматривать магнитные материалы с точки зрения лёгкости намагничивания и перемагничивания, то их можно подразделить на магнитно-твёрдые и магнитно-мягкие материалы. Хотя к магнитно-мягким и магнитно-твёрдым материалам относится подавляющее большинство магнитных материалов, в отдельные группы выделяют термомагнитные сплавы, магнитострикционные материалы, магнитодиэлектрики и другие специальные материалы.

Качество приборов на основе магнитных материалов непрерывно повышается путём применения новых функциональных материалов и совершенствования технологии производства (термические обработки материалов в защитных средах, вакуумной плавки и др.). Например, управляя кристаллической и магнитной текстурой магнитных материалов можно уменьшать потери энергии в них на перемагничивание, что особенно важно для электротехнических сталей. Получение специального вида кривых намагничивания и петель гистерезиса возможно при воздействии на материалы магнитных полей, радиоактивного излучения, нагрева и др. В настоящее время разрабатывается широкий спектр функциональных магнитных материалов, в которых магнитные свойства сочетаются с целым рядом других свойств (электрическими, оптическими, тепловыми).

15.1 Магнитно-мягкие материалы

Магнитно-мягкие материалы (МММ) – магнитные материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в относительно слабых магнитных полях напряжённостью $H \approx 8 \div 800$ А/м ($0,1 \div 10$ Э). При температурах ниже точки Кюри МММ спонтанно намагничены, но внешне не проявляют магнитных свойств, так как состоят из хаотически ориентированных намагниченных до насыщения областей (доменов).

МММ характеризуются высокими значениями магнитной проницаемости – начальной $\mu_a \approx 10^2 \div 10^5$ и максимальной $\mu_{max} \approx 10^3 \div 10^6$. Коэрцитивная сила H_C магнитно-мягких материалов колеблется от 0,8 до 8 А/м (от 0,01 до 0,1 Э), а потери на магнитный гистерезис очень малы $\sim 1 \div 10^3$ Дж/м² на один цикл перемагничивания. Способность МММ намагничиваться в слабых магнитных полях обусловлена низкими значениями энергии магнитной кристаллической анизотропии, а у некоторых из них (например, у МММ на основе Fe-Ni и у некоторых ферритов) – также низкими значениями магнитострикции. Это связано с тем, что намагничивание происходит в результате смещения границ между доменами, а также вращения вектора намагничённости доменов.

Подвижность границ, способствующая намагничиванию, снижается в случае присутствия в материале различных неоднородностей и напряжений, изменяющих энергию границ при их смещении. Поэтому свойствами МММ обладают также магнитные материалы, имеющие значительную энергию магнитной кристаллической анизотропии, но в которых отсутствуют (вернее, присутствуют в малых количествах) вредные примеси внедрения (углерод, азот, кислород и др.), дислокации и другие дефекты, искажающие кристаллическую решётку, а также включения в виде других фаз или пустот размером существенно больше параметров решётки. Однако процесс вращения вектора намагниченности в таких материалах требует приложения более сильных полей. Получение таких малодефектных материалов связано с большими технологическими трудностями. К МММ принадлежит ряд сплавов (например, *перминвары*) и некоторые ферриты с малой энергией магнитной кристаллической анизотропии, но с хорошо выраженной одноосной анизотропией, которая формируется при отжиге материала в магнитном поле. Некоторые МММ (например, *пермендюр*) имеют слабую анизотропию, но большие значения магнитострикции.

По назначению магнитно-мягкие материалы подразделяют на 2 группы: материалы для техники слабых токов и электротехнические стали.

В *технике слабых токов* широкое применение нашли такие представители магнитно-мягких материалов как *бинарные и легированные сплавы* на основе Fe-Ni (*пермаллой*), имеющие низкую $H_C \approx 0,01$ Э и очень высокие μ_a (до 10^5) и μ_{max} (до 10^6). К этой же группе относятся сплавы на основе Fe-Co (например, *пермендюр*), которые среди МММ обладают наивысшими точкой Кюри ($950 \div 980$ °С) и значением магнитной индукции насыщения B_s , достигающей 2,4 Тл, а также сплавы Fe-Al и Fe-Si-Al. Для работы при частотах до 10^5 Гц используют сплавы на основе Fe-Co-Ni с постоянной магнитной проницаемостью, достигаемой термической обработкой образцов в поперечном магнитном поле, которое формирует индуцированную одноосевую анизотропию (кристаллическая магнитная анизотропия при этом должна быть как можно меньше). Постоянство магнитной проницаемости (в пределах 15%) сохраняется при индукциях до 0,8 Тл и обеспечивается тем, что при намагничивании таких МММ процесс вращения является доминирующим.

В области частот $10^4 \div 10^8$ Гц нашли применение *магнитодиэлектрики*, представляющие собой композиции из тонких порошков карбонильного железа, пермаллоя или альсифера, смешанных с диэлектрической связкой. Широко применяются в технике слабых токов *смешанные ферриты* (например, соединение из цинкового и никелевого ферритов), а также *ферриты-гранаты*, кристаллическая структура которых одинакова с природными гранатами. Для них характерно исключительно высокое электрическое сопротивление и практическое отсутствие скин-эффекта. Ферриты-гранаты применяют при очень высоких частотах (если невелики диэлектрические потери).

Магнитно-мягкие сплавы выплавляют в металлургических печах, для придания необходимой формы слитки подвергают ковке или прокатке. Ферриты получают спеканием окислов металлов при высоких температурах, изделия прессуют из порошка (для чего феррит размалывают) и обжигают. Из магнитно-мягких сплавов изготавливают сердечники трансформаторов (микрофонных, выходных, переходных, импульсных и других), магнитные экраны, элементы магнитной памяти, сердечники головок магнитной записи; из ферритов, кроме того, – магнитные антенны, волноводы и др.

К *электротехническим сталям* относятся сплавы на основе железа, легированные Si (0,3÷6 % по массе); сплавы содержат также 0,1÷0,3% Mn. Стали вырабатывают горячекатаные – изотропные, и холоднокатаные – текстурированные. Потери энергии при перемагничивании текстурированной стали ниже, а магнитная индукция выше, чем горячекатаной. Электротехнические стали применяют в производстве генераторов электрического тока, трансформаторов, электрических двигателей и др. Для улучшения магнитных свойств все холоднокатаные магнитно-мягкие сплавы и стали подвергают термической обработке (при 1100÷1200 °С) в вакууме или в среде водорода. Сплавы Fe-Co, Fe-Ni и Fe-Al склонны к упорядочению структуры при температурах 400÷700 °С, поэтому в этой области температур для каждого сплава должна быть своя скорость охлаждения, при которой создаётся нужная структура твёрдого раствора.

В приложении 7 приведены характеристики некоторых наиболее распространённых магнитно-мягких материалов.

Особое внимание следует уделить интенсивно применяемым в качестве магнитно-мягких материалов, *аморфным и нанокристаллическим сплавам*.

Нанокристаллические магнитные материалы представляют собой уникальные по своим свойствам магнитно-мягкие сплавы на основе железа с нанокристаллической структурой в виде зерен ОЦК фазы α -Fe размером около 10 нм. Первый нанокристаллический магнитно-мягкий сплав разработали японские инженеры в компании Hitachi Metals (японская заявка на патент от 1986 года). Через несколько лет после публикации первых результатов новые материалы стали широко использоваться во всем мире. Сплавы с такой структурой получают чаще всего из *аморфных лент* в результате проведения кристаллизационного отжига, так что эти сплавы можно с полным основанием отнести к классу быстрозакаленных материалов, поскольку исходный продукт – аморфную ленту – производят методом закалки из расплава.

На рис.15.1 приведена зависимость коэрцитивной силы H_C от размера зерна в аморфных, поликристаллических и нанокристаллических сплавах. Коэрцитивная сила резко растёт с увеличением размера зерна $H_C \sim d^6$ вплоть до $d \approx 50$ нм. При дальнейшем повышении размера зерна коэрцитивность проходит через максимум и для образцов с d больше 150 нм и далее уменьшается по закону $H_C \sim 1/d$, хорошо известному для поликристаллических ферромагнетиков. Из рисунка видно, что в аморфных и нанокристаллических магнитно-мягких сплавах свойства сравнимы с лучшими поликристаллическими образцами.

К важным достоинствам аморфных и нанокристаллических магнитно-мягких сплавов, полученных кристаллизацией из аморфного состояния, относится сочетание высоких величин индукции насыщения и магнитной проницаемости (рис. 15.2), а также повышенная величина удельного электрического сопротивления, что уменьшает потери при высокочастотном перемагничивании. Кроме того, достоинствами аморфных и нанокристаллических магнитно-мягких сплавов является низкая стоимость составляющих и относительная простота технологии их приготовления (быстрая закалка из расплава с последующей частичной рекристаллизацией). Аморфные сплавы также характеризуются лучшими в сравнении с поликристаллами механическими свойствами и повышенной коррозионной стойкостью. К недостаткам аморфных и нанокристаллических материалов

можно отнести ограниченный диапазон температур эксплуатации, что связано с их принципиальной структурной нестабильностью.

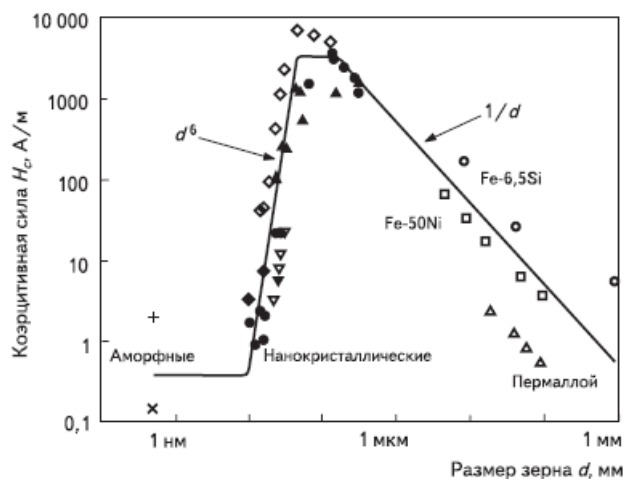


Рис 15.1 Зависимость коэрцитивной силы H_C от размера зерна d в магнитно-мягких материалах

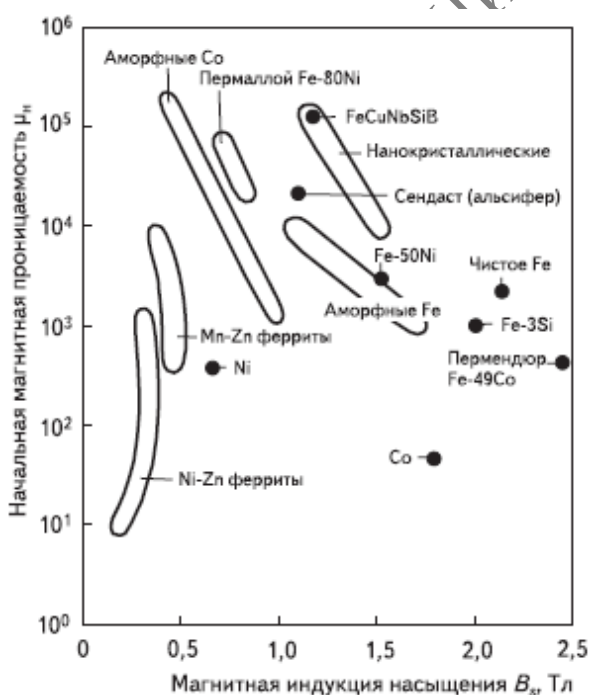


Рис. 15.2 Взаимосвязь начальной магнитной проницаемости μ_n и магнитной индукции насыщения B_s в магнитно-мягких материалах

Создание нанокристаллических магнитно-мягких сплавов и освоение их выпуска в промышленном масштабе явилось существенным прорывом в решении ряда проблем физического материаловедения магнитно-мягких сплавов и в удовлетворении запросов современной техники. Это обусловлено тем, что нанокристаллические сплавы не только обладают гистерезисными магнитными свойствами на уровне лучших кристаллических (сплавы типа пермаллоев) и аморфных (сплавы на основе Co с близкой к нулю магнитострикцией) материалов, но одновременно обладают высокой индукцией насыщения, сравнимой с B_s высококремнистых электротехнических сталей. В настоящее

время наибольшее распространение получили нанокристаллические магнитно-мягкие сплавы на основе FeCuNbSiB, названные разработчиками файнметами (finemet).

К **магнотстрикционным материалам** относят магнитно-мягкие материалы, у которых достаточно велик эффект магнотстрикции. Магнотстрикционные материалы применяют в качестве преобразователей электромагнитной энергии в другие виды (например, в механическую), для датчиков давления.

К магнотстрикционным материалам относятся: никель, сплавы Fe-Al (алфер), Fe-Ni (пермаллой), Co-Ni, Fe-Co, Co-Fe-V (пермендюр) и другие; ряд ферритов (CoFe_2O_4 , NiFe_2O_4), некоторые редкоземельные металлы, их сплавы и соединения. Никель обладает хорошими магнотстрикционными, механическими и антикоррозионными свойствами; пермендюр имеет большие значения магнотстрикции насыщения и намагничённости; ферриты обладают высокими удельными электросопротивлением и коррозионной стойкостью, кроме того, ферриты самые дешёвые магнотстрикционные материалы.

15.2. Магнитно-твёрдые материалы

Магнитно-твёрдые материалы (МТМ) либо магнитно-жесткие (высококоэрцитивные) материалы – это магнитные материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в сравнительно сильных магнитных полях напряжённостью в тысячи и десятки тысяч А/м (10^2 – 10^3 Э).

Магнитно-твёрдые материалы характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы H_C , остаточной индукции B_r , магнитной энергии $(BH)_{\max}$ на участке размагничивания. После намагничивания магнитотвёрдые материалы остаются постоянными магнитами из-за высоких значений B_r и H_C . Большая коэрцитивная сила магнитно-твёрдых материалов может быть обусловлена следующими причинами:

- 1) задержкой смещения границ доменов благодаря наличию посторонних включений или сильной деформации кристаллической решётки;
- 2) выпадением в слабомагнитной матрице мелких однодоменных ферромагнитных частиц, имеющих или сильную кристаллическую анизотропию, или анизотропию формы.

Магнитно-твёрдые материалы классифицируют по разным признакам, например, по физической природе коэрцитивной силы, по технологическим признакам и другим. Из магнитно-твёрдых материалов наибольшее значение в технике приобрели: литые и порошковые (недеформируемые) магнитные материалы типа Fe-Al-Ni-Co; деформируемые сплавы типа Fe-Co-Mo, Fe-Co-V, Pt-Co; ферриты (гексаферриты и кобальтовый феррит). В качестве магнитно-твёрдых материалов используются также соединения редкоземельных элементов (особенно лёгких) с кобальтом; магнитоласты и магнитоэласты из порошков альнико, ферритов со связкой из пластмасс и резины, материалы из порошков Fe, Fe-Co, Mn-Bi, SmCo_5 .

Высокая коэрцитивная сила литых и порошковых магнитно-твёрдых материалов (к ним относятся материалы типа альнико, магнико и другие) объясняется наличием мелкодисперсных сильномагнитных частиц вытянутой формы в слабомагнитной матрице. Охлаждение в магнитном поле приводит к предпочтительной ориентации этих частиц вдоль их продольных осей. Повышенными магнитными свойствами обладают подобные магнитно-твёрдые материалы, представляющие собой монокристаллы или сплавы,

созданные путём направленной кристаллизации [их максимальная магнитная энергия $(BH)_{\max}$ достигает нескольких десятков кГс·Э]. Магнитотвёрдые материалы типа Fe-Al-Ni-Co очень тверды, обрабатываются только абразивным инструментом или электроискровым методом, при высоких температурах их можно изгибать. Изделия из таких магнитно-твёрдых материалов изготавливают фасонным литьём или металлокерамическим способом.

Деформируемые сплавы (важнейшие из них – комопы и викаллои) более пластичны и значительно легче поддаются механической обработке. Дисперсионно-твёрдеющие сплавы типа Fe-Co-Mo (комопы) приобретают высококоэрцитивное состояние (магнитную твёрдость) в результате отпуска после закалки, при котором происходит распад твёрдого раствора и выделяется фаза, богатая молибденом. Сплавы типа Fe-Co-V (викаллои) для придания им свойств магнитно-твёрдых материалов подвергают холодной пластической деформации с большим обжатием и последующему отпуску.

Высококоэрцитивное состояние сплавов типа Pt-Co возникает за счёт появления упорядоченной тетрагональной фазы с энергией анизотропии порядка 5 Дж/см³. Из литых, порошковых и деформируемых магнитно-твёрдых материалов изготавливают постоянные магниты, используемые в измерительных приборах (например, амперметрах и вольтметрах постоянного тока), в микродвигателях и гистерезисных электрических двигателях, в часовых механизмах и др.

К магнитно-твёрдым материалам относятся гексаферриты, то есть ферриты с гексагональной кристаллической решёткой (например, BaO·6Fe₂O₃, SrO·6Fe₂O₃). Кроме гексаферритов, в качестве магнитно-твёрдых материалов применяется феррит кобальта CoO·Fe₂O₃ со структурой шпинели, в котором после термической обработки в магнитном поле формируется одноосевая анизотропия, что и является причиной его высокой коэрцитивной силы. Магнитно-твёрдые ферриты применяют для работы в условиях рассеянных магнитных полей и в СВЧ-диапазоне. Изделия из ферритов изготавливают методами порошковой металлургии.

Наиболее перспективными в настоящее время считаются спеченные магнитные сплавы *неодим-железо-бор* (Nd-Fe-B). Отметим их основные преимущества. Во-первых, достигнутое значение энергетического произведения $(BH)_{\max}$ у магнитов Nd-Fe-B – наибольшее из всех известных материалов (до 50 кГс·Э, или до 400 кДж/м³), однако это ещё не предел – из теоретических вычислений следует, что для этого материала максимально возможное значение $(BH)_{\max} = 64$ кГс·Э (~ 512 кДж/м³).

Во-вторых, они характеризуются высокой температурой Кюри T_C , составляющей около 160÷170 °С для марок с рабочей температурой 80 °С. Однако в настоящее время выпускаются марки Nd-Fe-B с рабочей температурой даже до 200 °С, что открывает широкие перспективы их применения в электромоторах, использующих постоянные магниты. Одним из важнейших и по сути дела определяющих в экономическом плане достоинств сплава Nd-Fe-B является его относительно низкая цена по сравнению с другими типами магнитных материалов.

В Приложении 8 приведены магнитные свойства некоторых технических магнетиков.

15.3. Термомагнитные сплавы

К термомагнитным сплавам относят ферромагнитные сплавы, имеющие резко выраженную температурную зависимость намагниченности в заданном магнитном поле. Это свойство проявляется в определённом интервале температур вблизи точек Кюри, значения которых у термомагнитных сплавов находятся между 0 и 200 °С.

Известны три основные группы термомагнитных сплавов:

- медно-никелевые (30÷40% Cu),
- железо-никелевые (30% Ni),
- легированные железо-никелевые (30÷38% Ni), содержащие Cr (до 14%), Al (до 1,5%), Mn (до 2%).

Медно-никелевые сплавы могут применяться в области температур от –50 до +80 °С; их недостаток – низкие значения намагниченности. Железо-никелевые сплавы предназначены для работы от 20 до 80 °С; при отрицательных температурах в этих сплавах возможно изменение кристаллографической структуры, сопровождающееся повышением точки Кюри и снижением температурного коэффициента намагниченности.

Наибольшее распространение получили *легированные железо-никелевые сплавы*. В зависимости от состава они могут применяться в узкой (от –20 до +35 °С) либо широкой (от –60 до +170 °С) температурных областях. На базе легированных железо-никелевых сплавов созданы многослойные термомагнитные материалы, имеющие лучшие магнитные характеристики, чем сплавы.

Основная область применения термомагнитных сплавов – термокомпенсаторы и терморегуляторы магнитного потока в измерительных приборах (гальванометрах, счётчиках электроэнергии, спидометрах и т.п.), выполняемые в виде шунтов, отводящих на себя часть потока постоянного магнита. Принцип действия такого шунта основан на том, что с повышением температуры резко уменьшается его намагниченность, вследствие чего увеличивается поток в зазоре магнита. Благодаря этому компенсируется погрешность прибора, связанная с температурными изменениями индукции магнита, электрического сопротивления измерительной обмотки, жёсткости противодействующих пружин. Термомагнитные сплавы применяют также в реле, момент срабатывания которых зависит от температуры.

15.4. Материалы для магнитной записи

Под магнитной записью понимают запись информации путем изменения магнитного состояния носителя и создания в нем распределения намагниченности, соответствующего записываемому сигналу. Магнитный носитель содержит материал, способный намагничиваться под действием внешнего магнитного поля и сохранять приобретенную намагниченность практически неограниченно долгое время. К таким материалам относятся металлы – железо, кобальт и никель, а также некоторые оксиды металлов и ферриты, например гамма-модификация оксида железа $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, диоксид хрома CrO_2 , феррит бария $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$.

Свойство магнитных материалов намагничиваться и сохранять намагниченность характеризуется кривой намагничивания. В процессе магнитной записи (рис. 15.3) носитель транспортируется с постоянной скоростью v относительно магнитной головки записи, которая представляет собой электромагнит. Считывание информации с

магнитного носителя устроено аналогично устройству записи. Магнитный поток Φ , выходящий из намагниченных участков движущегося носителя воздействует на считывающую головку. Сердечник головки воспроизведения, как и головки записи, изготовлен из материала с высокой магнитной проницаемостью. Поэтому, когда головка находится в контакте с носителем, выходящий из него магнитный поток замыкается через сердечник, пронизывая находящуюся на нем обмотку. При движении носителя магнитный поток в сердечнике изменяется во времени так же, как и остаточный магнитный поток вдоль носителя. При этом в обмотке наводится ЭДС индукции, которая и представляет собой выходной сигнал головки.

Активными материалами рабочего слоя носителей магнитной записи являются порошки либо пленки магнитно-твердых материалов. К основным магнитным характеристикам относятся: максимальная остаточная намагниченность J_R , получаемая если намагнитить носитель до насыщения (до значения J_S) и выключить напряженность намагничивающего поля H ; коэффициент прямоугольности предельной кривой намагничивания $K_H = J_R/J_S$; коэрцитивная сила H_C – значение напряженности поля, при которой намагниченность равна нулю, т.е. когда происходит размагничивание носителя.

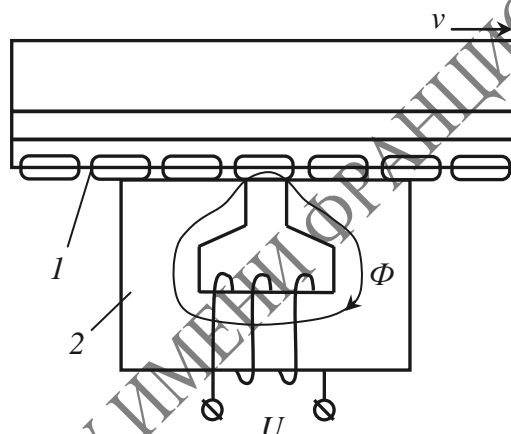


Рис. 15.3 Процесс магнитной записи: 1 – носитель; 2 – магнитная головка записи;
 Φ – магнитный поток; v – относительная скорость движения носителя

Значительный прогресс в применении магнитных материалов связан с открытием в 1988 году эффекта гигантского магнетосопротивления (ГМС). Это квантовомеханический эффект, наблюдаемый в тонких металлических плёнках, состоящих из чередующихся ферромагнитных и проводящих немагнитных слоёв. Эффект состоит в существенном изменении электрического сопротивления такой структуры при изменении взаимного направления намагниченности соседних магнитных слоёв. Направлением намагниченности можно управлять, например, приложением внешнего магнитного поля. В основе эффекта лежит рассеяние электронов, зависящее от направления спина. Непременным условием гигантского магнетосопротивления является начальная антипараллельная (или случайная) ориентация магнитных моментов различных слоев.

Эффект гигантского магнетосопротивления, обнаруженный в 1988 году в мультислойных магнитных пленках Fe/Cr, проявляется в виде значительного ослабления электросопротивления пленки при приложении внешнего магнитного поля. Под действием поля векторы намагниченности ферромагнитных слоев выстраиваются

параллельно, при этом скачком изменяется длина свободного пробега электрона за счет изменения так называемого спин-зависимого рассеяния.

За открытие гигантского магнетосопротивления физики Альбер Ферт (Франция) и Петер Грюнберг (Германия) были удостоены Нобелевской премии по физике в 2007 году. Основная сфера применения эффекта – датчики магнитного поля, используемые для считывания информации в жёстких дисках, биосенсорах, устройствах МЭМС и др. Обладающие гигантским магнетосопротивлением многослойные структуры применяются в магниторезистивной оперативной памяти в качестве ячеек, хранящих один бит информации. Этот эффект успешно используется для изготовления сверхмалых головок записи-считывания. На основе управления спином электрона сегодня создается электроника нового поколения, связанная с малым потреблением энергии, получившая название “спинтроника”.

15.5 Цилиндрические магнитные домены

Цилиндрические магнитные домены (ЦМД) – «магнитные пузырьки», изолированные однородно намагниченные подвижные области ферро- или ферритмагнетика (домены), имеющие форму круговых цилиндров и направление намагниченности, противоположное направлению намагниченности остальной его части (рис. 15.4). ЦМД обнаружены в конце 1950-х годов в ортоферритах и гексаферритах.

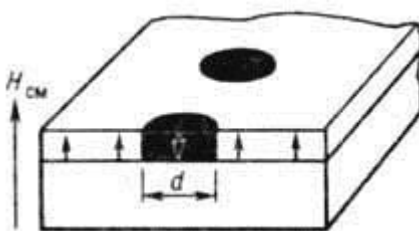


Рис. 15.4 Цилиндрические магнитные домены в тонкой магнитной плёнке с одноосной анизотропией ($H_{см}$ – магнитное поле смещения, d – диаметр ЦМД).

ЦМД получают в тонких (1÷100 мкм) плоскопараллельных пластинах (плёнках) монокристаллических ферритмагнетиков (ферриты-гранаты) или аморфных ферромагнетиков (сплавы d- и f-переходных элементов) с единственной осью лёгкого намагничивания, направленной перпендикулярно поверхности пластины. Магнитное поле, формирующее ЦМД (поле подмагничивания), прикладывается по оси лёгкого намагничивания. В отсутствие внешнего подмагничивающего поля доменная структура пластин имеет неупорядоченный лабиринтообразный вид (рис. 15.5, а). При наложении подмагничивающего поля домены, не имеющие контакта с краями пластины, стягиваются и образуют ЦМД (рис. 15.5, б).

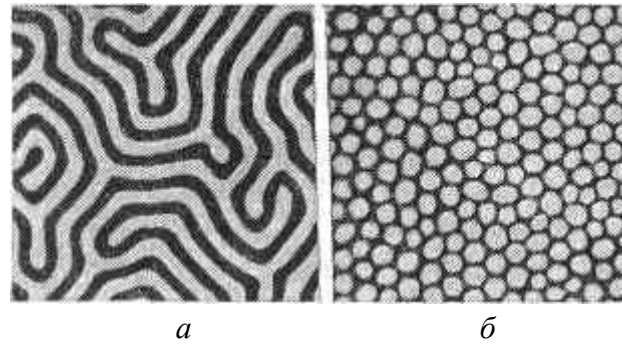


Рис. 15.5 Лабиринтная доменная структура магнитно-одноосных пластин в отсутствие магнитного поля, наблюдаемая под микроскопом в поляризованном свете (*а*, размер доменов ~ 10 мкм) и цилиндрические магнитные домены, образовавшиеся при помещении пластины в подмагничивающее поле (*б*)

Изолированные ЦМД существуют в определенном интервале значений напряжённости поля смещения $H_1 < H_{см} < H_2$ (рис. 15.6, *а*). При $H = H_2$ происходит коллапс (схлопывание) ЦМД, при $H = H_1$ он растягивается в полосу. Критическое поле H_1 называют полем эллиптической неустойчивости, H_2 – полем коллапса. Значения этих полей зависят от соотношения между толщиной плёнки h и её характеристической длиной l (рис. 15.6, *б*). При изменении величины $H_{см}$ в интервале от H_1 до H_2 диаметр ЦМД изменяется примерно на 50% относительно среднего значения, равного $8l$. Зависимость диаметра ЦМД от поля смещения практически линейная.

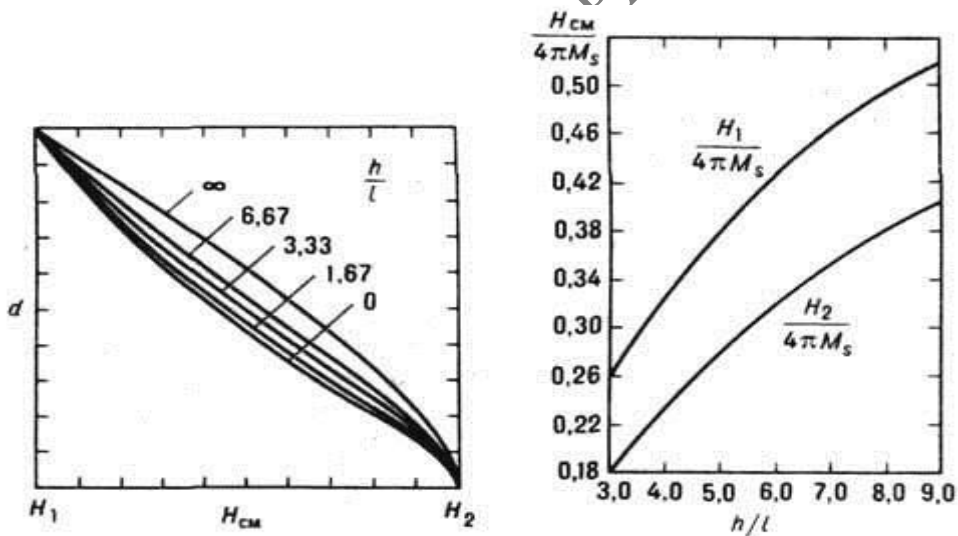


Рис. 15.6 Зависимость диаметра ЦМД d от поля смещения $H_{см}$ в плёнках различной толщины (*а*); зависимость критических полей H_1 и H_2 от соотношения h/l (*б*)

Свойства ЦМД (устойчивость в некотором интервале полей смещения, подвижность, возможность управлять их движением, способность находиться в различных состояниях и т.д.) определяют их применимость в устройствах обработки информации. ЦМД-устройство состоит из ряда функциональных элементов, обеспечивающих генерацию, продвижение, переключение и детектирование ЦМД. Идея таких устройств состоит в следующем. Пусть в плёнке каким-либо способом сформирован канал, вдоль которого могут перемещаться с заданной скоростью ЦМД (канал продвижения ЦМД). Информация представляется в двоичном коде по принципу

"наличия-отсутствия" ЦМД. В определенных позициях канала формируют генератор и детектор ЦМД, выполняющие те же функции, что головки записи и считывания в устройствах с подвижными магнитными носителями информации. Генератор преобразует поступающие на его вход от внешнего электронного устройства электрические импульсы в ЦМД, детектор производит обратное преобразование. Важное отличие ЦМД-устройств заключается в том, что в них не требуется механических перемещений каких-либо элементов.

Реальные размеры ЦМД зависят, помимо поля подмагничивания, от физических параметров материала и толщины плёнки. В центре интервала устойчивости диаметр ЦМД примерно равен толщине плёнки. В однородном поле подмагничивания ЦМД неподвижны, в неоднородном они перемещаются в область с меньшей напряжённостью поля. Существует предельная скорость перемещения ЦМД (для разных веществ от 10 до 1000 м/с). Скорость ЦМД ограничивают процессы передачи энергии от движущихся ЦМД кристаллической решётке, спиновым волнам и т.п., а также взаимодействие ЦМД с дефектами в кристаллах (с уменьшением числа дефектов скорость увеличивается). ЦМД наблюдаются под микроскопом в поляризованном свете (используется эффект Фарадея).

Начало практического использования ЦМД в вычислительной технике относится к 1967 г. Так, тонкие эпитаксиальные плёнки редкоземельных ферритов-гранатов, обладающие необходимыми свойствами, стали применяться в запоминающих устройствах цифровых вычислительных машин (для записи, хранения и считывания информации в двоичной системе счисления). Нули и единицы двоичного кода при этом изображаются соответственно присутствием и отсутствием ЦМД в данном месте плёнки. Существуют магнитные плёнки, в которых диаметр ЦМД менее 0,5 мкм, что позволяет, в принципе, осуществлять запись информации с плотностью более 10^7 бит/см². Практически реализованная система записи и считывания информации основана на перемещении ЦМД в магнитных плёнках при помощи тонких (0,3÷1 мкм) аппликаций из магнитно-мягкого материала (пермаллоя) Т-, Y- или V-образной (шевронной) формы, накладываемых непосредственно на плёнку с ЦМД. Аппликации намагничиваются вращающимся в плоскости плёнки управляющим магнитным полем $H_{упр}$ так, что в требуемом направлении возникает градиент поля, обеспечивающий перемещение ЦМД.

Запись информации осуществляют с помощью генераторов ЦМД, работающих на принципе локального перемагничивания материала импульсным магнитным полем тока, пропускаемого по проводнику в форме шпильки. Для считывания информации в запоминающих устройствах на ЦМД используют детекторы, работающие на магниторезистивном эффекте. Магниторезистивный детектор ЦМД представляет собой аппликацию специальной формы из проводящего материала (например, пермаллоя), сопротивление которого зависит от действующего на него магнитного поля. Проходя детектор, ЦМД своим полем изменяют его сопротивление, что можно зарегистрировать по изменению падения напряжения на детекторе. Запоминающие устройства на ЦМД обладают высокой надёжностью и низкой стоимостью хранения единицы информации. Применение ЦМД – один из возможных путей развития ЭВМ.

Для генерирования цилиндрических магнитных доменов используются тонкие магнитные пленки феррит-гранатов $R_3Fe_5O_{12}$ и ортоферритов $RFeO_3$. Первые содержат домены с размерами до 1 мкм, что позволяет получить плотность размещения

информации до 10^7 бит/см², вторые обладают рекордно высокими скоростями передвижения до 10^4 м/с.

Ортоферриты $RFeO_3$ – первые материалы, на которых были изучены ЦМД. В настоящее время эти материалы в промышленных ЦМД-устройствах практически не применяются, поскольку диаметр ЦМД ортоферритов порядка $80\div 100$ мкм не позволяет обеспечить высокую плотность записи информации. Однако в ряде случаев ортоферриты, обладающие высокими магнитооптическими параметрами, сохранили свои позиции. Их применяют в виде пластинок, вырезанных определенным образом из монокристалла и доведенных посредством механической полировки до нужной толщины.

Ферриты-гранаты редкоземельных элементов R^{3+} (Gd^{3+} , Tb^{3+} , Dy^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} , Sm^{3+} , Eu^{3+} и иттрия Y^{3+}) имеют кубическую структуру граната с общей формулой $R_3Fe_5O_{12}$. Элементарная ячейка феррит-гранатов содержит 8 молекул $R_3Fe_5O_{12}$; в неё входит 96 ионов O^{2-} , 24 иона R^{3+} и 40 ионов Fe^{3+} . Они содержат домены с диаметром порядка нескольких микрометров, что позволяет получить плотность размещения информации 10^5 бит/см² и даже выше. Однако подвижность доменных границ этой группы материалов ниже, чем у ортоферритов, и приблизительно равна $0,025$ м²/(А·с). Толщина пластинок из ферритов-гранатов должна быть порядка микрометра. Такие тонкие пластины механической обработкой получить нельзя. Поэтому вместо пластин применяют монокристаллические пленки, изготавливаемые эпитаксиальным методом – наращиванием пленки на немагнитной подложке. Кристаллическую структуру и постоянную решетки подложки подбирают в соответствии с требуемой структурой получаемой пленки.

15.6 Магнитные тонкие пленки

Магнитные тонкие пленки (МТП) – поли- или монокристаллический слой ферромагнитного металла, сплава или магнитного окисла (феррита и др.) толщиной от 0,01 до 10 мкм. МТП находят применение в качестве запоминающих элементов в вычислительной технике и индикаторов при физических исследованиях. Металлические пленки получают вакуумным напылением или электролитическим осаждением металла на подложку (сплошным слоем или отдельными «пятнами»), окисные – с помощью химических реакций и другими методами. Толщины МТП сравнимы с равновесными размерами магнитных доменов. Малая толщина магнитных пленок препятствует возникновению в них при перемагничивании значительных токов индукции (вихревых токов). Перечисленные и другие особенности МТП приводят к отличию их физических свойств от свойств массивных образцов магнитных материалов.

У металлических МТП толщиной $\sim 0,1$ мкм намагниченность однородна по толщине и ориентируется в их плоскости.

Изготовленные в магнитном поле, такие пленки обладают значительной магнитной анизотропией, осью лёгкого намагничивания, направленной вдоль поля, и прямоугольной петлей гистерезиса.

Значение коэрцитивной силы H_C (порогового поля перемагничивания) у пленок из пермаллоя ($80\div 82\%$ Ni, остальное Fe) толщиной $0,1\div 10$ мкм составляет $0,2\div 2,0$ А/см.

Важным свойством МТП, применяемых в вычислительной технике, является быстрота их перемагничивания. МТП из пермаллоя способны в импульсных полях ~ 10

А/см перемагничиваться за 10^{-9} с (быстрее других магнитных материалов), скорость перемагничивания здесь уже частично ограничена инерционными свойствами элементарных носителей магнитного момента (спинов).

У МТП обнаружены особенности в ферромагнитном резонансе и в гальваномагнитных свойствах; при перемагничивании МТП за 10^{-9} с в ней возникает инверсия населённостей магнитных ядерных уровней и возможен мазерный эффект.

У металлических МТП толщиной ~ 10 мкм получено особое периодическое распределение намагниченности с частичным её выходом из плоскости плёнки – полосовая доменная структура. Поле, необходимое для её перестройки, составляет у плёнок пермаллоя $10 \div 100$ А/см и уменьшается при нагреве, в частности, световым лучом. МТП из сплава Mn-Vi намагничиваются по нормали к поверхности, диаметр независимо намагничиваемых участков может быть снижен до 1 мкм. Плёнки и более толстые слои окислов редкоземельных металлов прозрачны для видимого света, что важно для изучения процессов их намагничивания и технических применений.

На МТП осуществляют запоминающие и логические устройства, основанные на управлении поворотом намагниченности отдельных плёночных элементов или участков плёнки, на смещении доменных границ, изменении параметров полосовой доменной структуры и т.д. Запись информации и её неразрушающее считывание возможны как посредством подаваемых по проводникам электрических сигналов, так и световым лучом. В распространённых запоминающих устройствах матричного типа используется наличие у МТП с прямоугольной петлей гистерезиса двух устойчивых антипараллельных направлений намагниченности, соответствующих записи «0» и «1» в двоичной системе счисления (1 *бит* информации). Установленное записывающим сигналом направление намагниченности определяет полярность сигнала при считывании и, следовательно, характер записанной информации («0» или «1»). В таких устройствах наряду с одно- и многослойными плоскими МТП применяют цилиндрические, наносимые непосредственно на провода. Плотность записи информации достигает 100 бит/мм^2 . Низкокоэрцитивные МТП применяются также в сочетании со слоями редкоземельных магнитных окислов, ферритов-гранатов и др., толщиной до 100 мкм, в которых могут быть созданы цилиндрические домены с намагниченностью, нормальной к поверхности слоя. На площади 1 мм^2 такой плёнки может расположиться до 600 доменов, что перспективно для дальнейшей миниатюризации и увеличения быстродействия вычислительных машин. Плёнки с полосовой доменной структурой используются для оптической записи изображений, в частности голографической.