МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1. Классификация магнитных материалов

Магнитные материалы подразделяют на магнитомягкие, магнитотвердые и материалы специализированного назначения.

К магнитомягким относят материалы с малой коэрцетивной силой (Нс < 800 А/м) и высокой магнитной проницаемостью. Они намагничиваются до насыщения в любых магнитных полях, обладают узкой петлей гистерезиса и малыми потерями на перемагничивание. Их используют в качестве сердечников дросселей, трансформаторов, электромагнитов и т.п.

К магнитотвердым относят материалы с большой коэрцитивной силой (Нс > 4кА/м). Они перемагничиваются в очень сильных магнитных полях и служат в основном для изготовления постоянных магнитов.

Среди материалов специализированного назначения в радиоэлектронике применяются материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), ферриты для устройств сверхвысокочастотного диапазона и магнитострикционные материалы.

2. Магнитомягкие материалы для постоянных и низкочастотных магнитных полей

Магнитомягкие материалы должны обладать высокой магнитной проницаемостью, малой коэрцитивной силой, большой индукцией насыщения, малыми потерями на перемагничивание. Магнитные свойства материалов должны мало зависеть от механических напряжений, в результате действия которых сильно меняется μнач , μмакс, Нс. Магнитные свойства после механической обработки восстанавливают термообработкой(обжигом). В некоторых случаях важными являются температурная и временная стабильность, линейность кривой намагничивания и др.

Этим требованием наиболее полно удовлетворяют железо и его сплавы. Железо - это типичный магнитомягкий материал, магнитные свойства которого существенно зависят от содержания примесей, структуры (особенно величины зерна - чем крупнее зерна, тем выше магнитные свойства).

Вследствие низкого удельного сопротивления железо используют для изготовления изделий, которые работают в постоянных магнитных полях. Технически чистое железо применяется для получения почти всех ферромагнитных сплавов.

Сталь электротехническая является основным магнитомягким материалом и представляет собой сплавы железа и кремния (до 4,5%). Добавки кремния повышают удельное сопротивление, увеличивают μн и μmax, уменьшают Нс, потери на гистерезис, константы магнитной анизотропии и магнитострикции, повышают стабильность магнитных свойств во времени, но вместе с тем увеличивают хрупкость и твердость стали. Свойства стали значительно улучшаются в результате образования магнитной текстуры при ее холодной прокатке и последующем отжиге в водороде. Вдоль направления прокатки наблюдается более высокое значение магнитной проницаемости и меньше потери на гистерезис. Текстурированные стали используются при изготовлении ленточных сердечников.

В этом случае магнитный поток полностью проходит вдоль направления легкого намагничивания. Сталь выпускается в виде рулонов, листов и резанной ленты толщиной 0,05 - 1 мкм. Тонкий прокат применяется в полях повышенной частоты (до 1 кГц). С уменьшением толщины уменьшаются потери на вихревые токи, однако возрастает коэрцитивная сила и увеличиваются потери на гистерезис.

Пермаллои - железоникелевые сплавы, обладающие большой магнитной проницаемостью в области слабых полей и очень маленькой коэрцитивной силой. Высоконикелевые пермаллои содержат 72 - 80% никеля, а низконикелевые - 40 - 50% никеля. С увеличением содержания никеля возрастает магнитная проницаемость, однако повышаются удельные потери и уменьшается индукция насыщения. Низконикелевые пермаллои имеют μн = (1.5 - 4)⋅103, μмакс = (15 - 40)⋅103, Hc = 8 -32 A/м, Bm = 1 - 1.5 Tл, а высоконикелевые - μн = (1 - 4)⋅104, μмакс = (7 - 35)⋅104, Hc = 0.4 - 4.8 A/м, Bm = 0.5 - 1 Tл.

Большие значения μн и μмакс пермаллоя объясняются небольшими величинами магнитной апизотропии и магнитострикции. Это облегчает поворот магнитных моментов из направления легкого намагничивания в направлении поля и не вызывает механических напряжений, которые затрудняют смещение доменных границ под воздействием слабого поля. Магнитная проницаемость пермаллоев сильно снижается с увеличением частоты(из-за влияния вихревых токов) и напряженности подмагничивающего (постоянного) поля. Для увеличения удельного сопротивления, улучшения магнитных характеристик и их стабильности в диапазоне напряженностей магнитного поля и температур, повышения механической прочности и обрабатываемости в пермаллой добавляют легирующие элементы - молибден, хром, кремний, марганец, медь.

Пермаллой очень чувствителен к механическим воздействиям, поэтому при изготовлении деталей из него необходимо избегать ударов, рихтовки и т.п. После всех механических операций производят термообработку в вакууме или в атмосфере водорода.

Пермаллой используется для изготовления магнитных экранов, сердечников малогабаритных и импульсных трансформаторов, сердечников катушек индуктивности, головок аппаратуры магнитной записи.

Альсиферы - тройные сплавы железа с кремнием и алюминием. Оптимальный состав альсифера 9.5% Si, 5.6 % Al, остальное Fe. Такой сплав отличается твердостью и хрупкостью. Свойства альсифера (μн = 3500, μмакс = 117000, Hc = 1.8 A/м) не уступают свойствам высоконикелевого пермаллоя. Изделия из альсифера - магнитные экраны, корпуса приборов и т.п. изготавливаются методом литья с толщиной стенок не менее 2 - 3 мм в виду хрупкости сплава. Его можно размалывать в порошок и использовать для изготовления высокочастотных прессованных сердечников.

3. Ферриты и магнитодиэлектрики

Ферриты - химические соединения окиси железа Fe2О3 с оксидами одного или нескольких двухвалентных металлов, имеющих общую формулу МеО⋅Fe2O3, где Ме - двухвалентный металл. Феррит может быть магнитным, если на месте Ме стоит ион марганца, никеля, магния, меди и некоторые другие металлы, и немагнитным - если стоит ион цинка.

Ферриты получают в виде керамики и монокристаллов. Ферритовая керамика не содержит стекловидной фазы. Изделия из ферритов получают методом спекания спрессованной массы порошкообразных окислов металлов. Ферриты являются твердыми и хрупкими материалами и допускают только шлифовку и полировку.

Технические ферриты представляют собой раствор магнитного и немагнитного ферритов. Ферриты для радиочастот делятся на две группы: никель-цинковые (NiO-ZnO-Fe2O3) и марганец-цинковый (MnO-ZnO-Fe2O3). Цинковые ферриты добавляют в магнитные ферриты для увеличения магнитной проницаемости и уменьшения коэрцитивной силы, но это приводит к снижению температурной стабильности магнитных свойств.

Значения величин μн и Hc определяется составом и структурой материала. Микроскопические поры, участки с дефектной кристаллической решеткой и др. мешают свободному перемещению доменных границ и являются причиной уменьшения магнитной проницаемости. С увеличением размера кристаллических зерен возрастает μн.

В слабых переменных магнитных полях ферриты обладают незначительными потерями на вихревые токи и гистерезис. Поэтому значение тангенса угла потерь tgδ на высоких частотах в основном определяется магнитными потерями, обусловленными релаксационными и резонансными явлениями. Частота, при которой начинается резкое возрастание tgδ называется критической fкр. Обычно fкр - это частота, при которой tgδ = 0.1.

Инерционность смещения доменных границ, которая проявляется на высоких частотах приводит также к снижению магнитной проницаемости ферритов. Частоту fгр , при которой μн уменьшается до 0.7 от ее значения в постоянном магнитном поле называют граничной. Как правило, fкр < fгр.

Марганец - цинковые ферриты в области частот до 1 МГц обладают лучшими магнитными свойствами, чем никель - цинковые. У них меньший относительный тангенс угла потерь - tgδ/μн, более высокая индукция насыщения и температура Кюри. Однако никель-цинковые ферриты обладают более высоким удельным сопротивлением и лучшими частотными свойствами. Чем больше μн, тем при более низких частотах наблюдается ее снижение. Ферриты с большим значением μэфф обладают большим значением tgδ и меньшим fкр .

Во избежание ухудшения магнитных характеристик, ферриты следует оберегать от механических нагрузок.

Маркировка магнито-мягких ферритов следующая. На первом месте стоит численное значение μн, следующее за ним буквы Н и В означают соответственно низкочастотный (fкр = 0.1-50МГц) или высокочастотный (fкр = 50 - 600МГц) материал, стоящая далее буква М означает марганец-цинковый, большая Н - никель-цинковый, литий - цинковый и т.д. ферриты. Буква С означает, что феррит применяется в области сильных полей, Н - контурах, перестраиваемых подмагничиванием.

По электрическим свойствам ферриты относятся к полупроводникам с электронной проводимостью. Их электропроводность обусловлена слабосвязанными электронами, которые принадлежат ионам железа или другим катионам переменной валентности. Такие электроны под влиянием теплового движения могут переходить от иона Fe2+ к иону Fe3+, который превращается в двухвалентный ион Fe2+ и сохраняет это свойство некоторое время. С увеличением концентрации ионов Fe2+ возрастает удельная проводимость и уменьшается энергия активации Э0. Рост температуры сопровождается резким повышением проводимости из-за увеличения числа перемещающихся электронов.

σ=σ0 exp [-Э0/кТ],

где σ0 - постоянная величина для данного материала;

Э0 - энергия активации электропроводности (Э0 = 0.1 - 0.5 ЭВ).

Концентрация двухвалентных ионов Fe2+ зависит от состава феррита и режима его обжига. Для снижения концентрации Fe2+ вводят различные добавки .

Процессы поляризации ферритов и диэлектрические потери определяются дрейфом слабосвязанных электронов под действием электрического поля. С ростом частоты поля уменьшается число электронов, которые участвует в дрейфе, и уменьшается расстояние, на которое они смещаются, и соответственно снижается поляризованность. Например на частотах ниже 1000 Гц у марганец-цинковых ферритов величина ε ~ 100000, а с увеличением частоты ε резко падает до значения порядка 100. Частотные характеристики диэлектрических потерь имеют максимум.

Магнитомягкие ферриты применяются в качестве сердечников контурных катушек постоянной и переменной индуктивности, сердечников импульсных трансформаторов, трансформаторов развертки телевизоров, магнитных модуляторов и усилителей. Из них изготавливают стержневые магнитные антенны, индуктивные линии задержки и др. Монокристаллы магнитомягких ферритов применяются при изготовлении магнитных головок записи и воспроизведения сигнала звукового и видеодиапазонов в магнитофонах, т.к. они обладают высоким удельным сопротивлением (что важно для уменьшения потерь) и большей твердостью по сравнению с металлическими.

Магнитодиэлектрики - это композиционные магнитомягкие материалы, состоящие из ферромагнетика и диэлектрика, применяемого в качестве связующего электроизоляционного материала. Основа должна обладать высокими магнитными свойствами, а связка - способностью образовывать между зернами сплошную электроизоляционную пленку одинаковой толщины. В качестве основы применяют карбонильное железо, альсифер, молибденовый пермаллой. Изолирующей связкой служат фенолформоальдегидные смолы, полистирол, стекло и др.

Суммарные потери мощности в магнитодиэлектрике определяются потерями на вихревые токи, последействие, гистерезис и диэлектрическими потерями. С уменьшением размера частиц ферромагнетика потери снижаются, особенно обусловленные вихревыми токами.

Магнитная проницаемость магнитодиэлектриков (μн = 10 - 250) ниже магнитной проницаемости монолитных ферромагнетиков. Это связанно с тем, что изолированные друг от друга ферромагнитные частицы создают внутреннее поле, направленное навстречу внешнему, и слабо выражен механизм намагничивания за счет смещения доменных границ, определяющий значение μн.

Из-за сильного влияния размагничивающего фактора магнитодиэлектрики имеют близкую к линейной зависимость индукции от напряженности магнитного поля и характеризуются незначительными потерями на гистерезис.

Достоинства магнитодиэлектриков: малые удельные потери энергии, слабая зависимость параметров от температуры, времени и напряженности магнитного поля, постоянство магнитной проницаемости в диапазоне частот, а недостаток - сравнительно малая начальная магнитная проницаемость.

Прессованные сердечники из магнитодиэлектриков применяются в катушках индуктивности контуров радиоприемных устройств, генераторов, фильтров и т.д.

Сердечники на основе карбонильного железа обладают высокой стабильностью, малыми потерями, положительным температурным коэффициентом магнитной проницаемости и могут использоваться в широком диапазоне частот. Карбонильное железо получается посредством термического разложения пентакарбоната железа в виде тонкого порошка, что удобно для изготовления прессованных магнитных сердечников. В карбонильном железе отсутствует кремний, фосфор, сера, но содержится углерод.

Промышленность выпускает два класса карбонильного железа: Р (марки Р-10, Р-20, Р-100) - для радиоаппаратуры и Пс - для проводной связи. Цифры указывают максимальную рабочую частоту в МГц.

Альсифер обладает невысокой стоимостью. Его температурный коэффициент магнитной проницаемости зависит от содержания алюминия и кремния и может быть положительным, отрицательным или равным нулю.

4. Магнитные материалы специального назначения

К магнитным материалам специального назначения относят магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса, СВЧ ферриты, магнитострикционные материалы.

Магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ) находят широкое применение в устройствах автоматики, аппаратуре связи. Сердечники из материала с ППГ имеют два устойчивых магнитных состояния, которые соответствуют различным направлениям магнитной индукции. Это свойство используется для хранения и переработки двоичной информации.

Материалы с ППГ характеризуются коэффициентом прямоугольности kпу петли гистерезиса.

kпу = Br/Bmax .

Большим значением kпу обладают железоникелевые и железокобальтовые сплавы, легированные медью и некоторыми другими металлами. Эти сплавы обладают кристаллографической или магнитной текстурой. Наиболее высокую прямоугольность (до 0,98) имеют железоникелькобальтовые сердечники из лент микронной толщины.

Более широко распространены ферриты с ППГ, сердечники из которых более технологичны и дешевле. Прямоугольность петли гистерезиса достигается выбором определенного химического состава и условиями спекания феррита. Для сердечников с ППГ чаще применяются магний-марганцевые и литиевые ферриты.

Ферромагниты для устройств СВЧ используются в диапазоне длин волн от 1м до 1 мм. Электромагнитная энергия на таких частотах передается по волноводам, коаксиальным и полосковым линиям передачи. Ферритовый сердечник - вкладыш, помещенный внутрь волновода, изменяет структуру поля и скорость распространения волны. На этих частотах в ферритах используется магнитооптический эффект Фарадея, эффект ферромагнитного резонанса и зависимость магнитной проницаемости от величины внешнего поля.

Магнитооптический эффект Фарадея заключается в повороте плоскости поляризации высокочастотных колебаний в феррите за счет внешнего поля. Это позволяет изменять угол поворота плоскости поляризации и направлять энергию в разные каналы.

Ферромагнитный резонанс наблюдается при совпадении частоты внешнего поля с собственно частотой прецессии электронов, которой можно управлять с помощью постоянного подмагничивающего поля. При резонансе, волна распространяющаяся в прямом направлении, проходит без затухания, а в обратном - с затуханием. В результате получается высокочастотный вентиль. Это явление используется в антенных переключателях, в фазовращателях, модуляторах и т.д.

Для каждого диапазона длин волн используется определенная разновидность феррита. Например, для диапазона длин волн 0,8 - 2 см используются некоторые никель-цинковые ферриты, для диапазона 5 см и более используют ферриты с добавками хрома (феррохроматы) или алюминия (ферроалюмиты); феррогранат используется в диапазоне волн несколько десятков сантиметров.

Ферриты СВЧ маркируются буквами СЧ, впереди которых стоит цифра, указывающая длину волны в см. Цифра после букв СЧ указывает различие по свойствам.

В магнитострикционных материалах используется явление магнитострикции и магнитоупругий эффект - изменение магнитных свойств материала под влиянием механических воздействий. К магнитострикционным материалам относится никель, пермендюр (сплавы FeCo), альферы (сплавы FeAl), никелевый и никель-кобальтовые ферриты и др. Магнитострикционные ферриты имеют малые потери на вихревые токи по сравнению с никелем и металлическими сплавами, не подвержены действию химических агрессивных сред.

С помощью керамической технологии можно изготовить преобразователи любых форм и размеров. Магнитострикционные материалы применяются для изготовления сердечников электромеханических преобразователей для электроакустической и ультразвуковой технике, сердечника электромеханических и магнитострикционных фильтров, резонаторов и линий задержек.

5. Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые материалы обладают высокой коэрцитивной силой и большой площадью петли гистерезиса.

Магнитотвердые материалы по способу изготовления подразделяются на следующие группы:

литые сплавы на основе Fe-Ni-Al и Fe-Ni-Al-Co, легированные медью, титаном, ниобием и др. элементами;

порошковые материалы, из которых постоянные магниты, получают прессованием порошков с последующей термообработкой;

прочие магнитные материалы (например, сплавы на основе редкоземельных металлов, устаревшие материалы, пластически деформируемые сплавы, эластичные магниты и др.).

По применению магнитотвердые материалы подразделяют на материалы, применяемые для изготовления постоянных магнитов и для длительного хранения информации (например, для звукозаписи).

Для получения высокой коэрцитивной силы в магнитном материале, необходимо затруднить процесс перемагничивания. Это достигается в материалах с большим количеством внутренних механических напряжений, дефектов кристаллической структуры и высокой магнитострикции, которые препятствуют смещению доменных границ. Кроме того большая коэрцетивная сила возникает в материале из однодоменных частиц, разделенных немагнитной фазой. Такие структуры получаются после определенной термообработки.

Магнитные свойства магнитотвердых материалов зависят от кристаллографической и магнитной текстур. Магнитная текстура создается путем охлаждения высококоэрцетивных сплавов в сильном магнитном поле. При этом сильно магнитная фаза ориентируется осями легкого намагничивания вдоль направления поля. Кристаллографическую текстуру создают методом направленной кристаллизации сплава, залитого в форму, при особых условиях охлаждения. Литые сплавы тверды и хрупки. После литья их можно подвергать только шлифовке.

Для получения магнитов со строго выдержанными размерами используют методы порошковой металлургии. Магниты из порошковых материалов подразделяют на металлокерамические, металлопластические, оксидные и из микропорошков.

Металлокерамические магниты получают прессованием металлических порошков без связывающего материала и спеканием их при высокой температуре. По магнитным свойствам они немного уступают литым, но дороже последних.

Металлопластические магниты изготавливают прессованием металлических порошков вместе с изолирующей связкой и подвергают нагреву до невысокой температуры, необходимой для полимеризации связывающего вещества. Имеют пониженные магнитные свойства, но обладают большим электрическим сопротивлением, малой плотностью и относительно дешевы. Оксидные магниты чаще всего изготавливают на основе ферритов бария и кобальта.

Магниты из феррита бария имеют высокую коэрцитивную силу, но малую остаточную индукцию, обладают большим удельным электрическим сопротивлением, дешевы, обладают высокой твердостью и хрупкостью и большой зависимостью магнитных свойств от температуры.

Кобальтовые магниты характеризуются большой температурной стабильностью, однако их стоимость выше, чем бариевых.

Сплавы на основе редкоземельных металлов представляют собой интерметаллические соединения редкоземельного элемента (самария, церия и др.) с кобальтом. Они обладают наивысшими магнитными свойствами, полученными в настоящее время. Требуют защиты от окисления.

К числу магнитотвердых материалов относятся магнитные ленты для видео-звукозаписи, для записи, хранения, ввода информации в ЭВМ и магнитные диски. Материалы для магнитной записи должны обладать высокой коэрцитивной силой, высокой остаточной намагниченностью, стабильностью параметров при изменении температуры.

Большинство магнитных лент изготавливают на основе полиэтилентерефталата (лавсана), обладающего высокой механической прочностью. На поверхность основы наносят магнитный порошок, однодоменные частицы которого имеют вытянутую игольчатую форму длиной около 1 мкм при диаметре порядка 0,1 мкм и ориентированы вдоль направления поля при записи. Чем равномерней толщина магнитного слоя и мельче частицы, тем меньше шумовой фон при воспроизведении записи.

В качестве магнитного слоя используют оксиды γ - Fe2O3, CrO2, чистое железо или ферромагнитные сплавы. Ленты на основе CrO2 обладают большой коэрцитивной силой и повышенной чувствительностью на высоких частотах. Использование магнитного слоя из чередующихся окислов γ - Fe2O3 и CrO2 улучшают воспроизводимость низкочастотной части спектра. Наилучшими магнитными свойствами обладают ленты с рабочим слоем из мельчайших частиц химически чистого железа или ферромагнитных сплавов.

Литература

1. Суриков В.С. – Основы электродинамики – М. "Протон" - 2000 г.
2. Карков И.С. – Физика элементарных частиц. – М. – 1999 г.
3. Синджанов И.К. Электродинамика – М. 1998 г.
4. Электротехнические материалы. Справочник / В.Б. Березин, Н.С. Прохоров, А.М. Хайкин. - М.: Энергоатомиздат, 1993. - 504с.
5. Рычина Т.А., Зеленский А.В. Устройства функциональной электроники и электрорадиоэлементы . - М.: Радио и связь, 1999. - 352с.