Национальный технический университет Украины

“Киевский политехнический институт”

***Кафедра конструирования и технологии электронных***

***вычислительных средств***

**КУРСОВАЯ РАБОТА**

**на тему:**

“Магнитомягкие материалы. Ферриты”

**Выполнил:**

студент гр.ДК-71 II курса ФЭЛ

Кузин Евгений Андреевич.

**Преподаватель:**

Мирошниченко Анатолий Петрович.

Киев - 1999

**СОДЕРЖАНИЕ**

|  |  |
| --- | --- |
| Введение. Исторический обзор развития магнитомягких материалов.............................................................................................................. |  |
| 1. Основы классификации магнитных материалов............................. |  |
| 1.1. Классификация веществ по магнитным свойствам...................... |  |
| 1.2. Классификация магнитных материалов........................................ |  |
| 1.3. Особенности ферримагнетиков....................................................... |  |
| 2. Сведения о магнитомягких материалах........................................... |  |
| 2.1. Магнитомягкие материалы для постоянных и низкочастотных магнитных полей.............................................................................. |  |
| 2.2. Магнитомягкие высокочастотные материалы ............................ |  |
| 2.3. Ферриты.............................................................................................. |  |
| 2.4. Магнитные материалы специализированного назначения........ |  |
| 3. Применение ферритов......................................................................... |  |
| 3.1. Ферритовые сердечники................................................................... |  |
| 3.2. Запоминающие и переключающиеся цепи.................................... |  |
| 3.3. Принципы действия запоминающих и переключающихся цепей с сердечниками с ППГ...................................................................... |  |
| 3.4. Требования к сердечникам с ППГ. Критерии прямоугольности........................................................................................................... |  |
| 4. Получение ферритов............................................................................ |  |
| 4.1. Основные технологические схемы изготовления ферритов....... |  |
| 4.2. Исходное сырье и материалы, применяемые для изготовления ферритов.................................................................................................... |  |
| 5. Методы испытания ферритов............................................................ |  |
| 5.1. Механические испытания ферритов............................................... |  |
| 5.2. Способы измерения и контроля магнитных свойств ферритовых материалов и изделий из них......................................................... |  |
| 5.2.1. Методы измерения статических свойств ферритовых изделий.............................................................................................................. |  |
| 5.2.2. Методы измерения импульсных свойств ферритовых изделий и способы их автоматизации.......................................................... |  |
| Выводы...................................................................................................... |  |
| Содержание............................................................................................... |  |

**ВВЕДЕНИЕ. ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР РАЗВИТИЯ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

История современных магнитомягких материалов начинается с практического применения переменного электрического тока - изобретения телефона. При увеличении дальности телефонной связи изучались возможности ограничения увеличивающегося затухания телефонных токов. В 1893г Хевисайд предложил использовать катушки с сердечниками из мелких стальных опилок и воска, которые должны были ограничить растущее затухание на линии. В период с 1893 по 1900 г были выяснены основные требования к магнитомягким материалам для техники связи: малые потери, малое искажение передаваемых токов и напряжений, высокая магнитная проницаемость. С изобретением асинхронной машины и развитием однофазной и многофазной систем переменного тока требования к магнитомягким материалам еще более возросли. От них стали требовать больших значений индукции насыщения, малых потерь на гистерезис и вихревые токи, и меньшего старения, чем у использовавшейся в то время низкоуглеродистой стали. В конце прошлого столетия было замечено благоприятное влияние присадки кремния на магнитные свойства чистого железа. Так, например, удельные потери листовой стали снизились примерно в 3 раза. Поэтому в производстве магнитных материалов для электротехники низкоуглеродистая сталь стала заменяться на кремнистую. Снижение индукции насыщения при введении кремния дало толчок к поискам легирующих элементов, которые, наоборот, увеличивали бы индукцию насыщения. Магнитные материалы, образующие большую группу пермаллойных сплавов на железо-никелевой основе, открыл и описал в 1921 г Elmen. К этой работе его побудило именно желание найти сплав с высокой магнитной индукцией. Он хотел обойтись без дефицитного кобальта, влияние которого на увеличение индукции насыщения было открыто им же. К этому периоду относится и первое применение пермаллоя в технике связи при конструировании телеграфного реле. Другой пермаллойный сплав - му-металл, который долго являлся материалом с наибольшей проницаемостью, был разработан в 1927 г в Германии. С этого времени начинается интенсивная и очень успешная работа над улучшением качества металлических магнитных материалов. Для высокочастотных цепей в сердечниках долгое время применялся так называемый феррокарт. Это было торговое название материала, изготовленного из прессованых слоев бумаги и слоев мелкого железного порошка с лаком в качестве связки. В 1928 г в Германии из пентакарбонила железа был изготовлен железный порошок с величиной частиц от 1 до 10 мкм, использованный для изготовления часто применяемых в виде колец и стержней карбонильных сердечников. В 1930 г, в Англии были изготовлены сердечники из порошка пермаллоя, превосходящего по свойствам карбонильные сердечники. Однако такие сердечники могла выпускать лишь страна, для которой вопрос дефицитности сырья не был решающим. Поэтому в других странах усиленно разрабатывались материалы для сердечников из доступного сырья. Такой материал был найден в 1935 г в Японии Х.Масумото и известен по названием альсифер. Он представляет собой сплав на основе железа, легированный кремнием и алюминием. Новые высокие требования электротехники могут быть выполнены только новыми видами магнитных материалов. Систематические экспериментальные исследования металлических материалов, начатые 50-60 лет назад, почти исчерпали свои возможности. Из простых, двойных и более сложных сплавов были использованы самые лучшие. Совершенствовались технологические процессы, были применены плавка и отжиг. Новые свойства материалы получили при термомагнитной обработке, действие которой известно со времени, когда отыскивали средства увеличения индукции насыщения кремнистой стали. В настоящее время наибольшее внимание уделяется ферритам. В 1936 г научные исследования начала лаборатория фирмы Philips. Практический опыт и теоретические знания в области ферромагнетизма, полученные в предыдущих 7 десятилетиях дали возможность вести работу по исследованию ферритов и технологии их производства на совершенно иной основе. Ферриты ведут свое происхождение от магнитного железняка - естественного постоянного магнита, известного на протяжении всей истории культуры человечества. Несмотря на это, в начале развития техники связи отыскивали новые виды магнитных материалов искусственного состава, хотя магнитный железняк благодаря своей малой электропроводности, а следовательно, малым потерям в переменных магнитных полях и казался пригодным для применения. Однако магнитные свойства магнитного железняка в его природном виде не совсем пригодны для технического применения. Чтобы понять, почему идея применения магнитного железняка была отодвинута почти на 30 лет, приведем краткий обзор прежних взглядов и их использования при разработке новых видов магнитных материалов.

Большинство необъяснимых природных явлений в т.ч. и ферромагнетизм, объяснялось прежде проявлением "флюидов". Такое объяснение магнитных явлений в начале XVII столетия давал В.Гильберт. Под влиянием открытия магнитного действия электрического тока, сделанного в 1820 г Эрстедом, А.Ампер в 1822 г для объяснения причины магнетизма предложил теорию молекулярных токов. Однако Ампер не мог объяснить, почему молекулярные токи не нагревают магнитный материал и где возникает напряжение, вызывающее эти токи. Поэтому эта теория потеряла значение. На исходе 19 ст Ewing подтверждает представления Вебера о молекулярных магнитах, по которым каждая молекула и каждый атом имеют собственные магнитные поля. Из большого числа магнитных стрелок, размещенных в пространстве и легко вращающихся вокруг своей оси, он построил модель, на которой можно было снять кривую намагничивания. Этим была подтверждена связь молекулярных магнитов с магнетизмом. При намагничивании модели Ewing наблюдал взаимное влияние магнитных стрелок. В это время он высказывал предположение о взаимодействии молекулярных магнитов. F.Bitter и P.Weiss развили теорию Вебера дальше. Они считали, что группы большого числа согласно ориентированных атомов образуют домены (области) размером нескольких микронов, являющиеся аналогией магнитных стрелок Ewing'а. Эти домены самопроизвольно намагничены до полного насыщения, которое нельзя ни увеличить, ни уменьшить. Для каждого вида магнитного материала имеется определенная величина самопроизвольной (спонтанной) намагниченности и напряженности магнитного поля, при которой домены взаимодействуют между собой так, что изменяется направление вектора спонтанной намагниченности. Чем больше спонтанная намагниченность, тем больше индукция насыщения материала. Чем легче осуществляется действие внешнего поля на домены, тем меньшая напряженность поля необходима для перевода векторов намагничивания доменов из хаотического неупорядоченного состояния в положение, когда они совпадают с направлением этого поля, а следовательно, тем больше будет магнитная проницаемость материала, т.е. величина, выражающая пропорциональность между индукцией и напряженностью поля. На основе этих представлений можно хорошо понять современные взгляды на процесс намагничивания магнитных материалов (см рис.1). В ненамагниченном материале домены ориентированы совершенно хаотически. Отдельные домены образуют друг с другом замкнутые магнитные цепи, так что вне материала не ощущается магнитного эффекта. При воздействии небольшого внешнего поля домены с более выгодной ориентацией относительно направления внешнего магнитного поля увеличивают свои размеры за счет доменов с менее выгодной ориентацией. Выгодным, легким направлением намагничивания является такое направление, при котором ориентированные домены имеют минимальную энергию. Следовательно, это такое направление, при котором домены под влиянием внутреннего размещения атомов в кристаллах, внешних и внутренних механических сил и направляющего действия внешнего магнитного поля имеют минимальное взаимодействие. Изменение размеров доменов на этой стадии намагничивания происходит путем смещения их взаимных границ. Граничная зона носит название стенки Блоха по имени открывшего это явление F.Bloch. Эти изменения обратимы, т.е. при исчезновении внешнего магнитного поля наступает обратное распадение доменов.

При дальнейшем увеличении внешнего магнитного поля до определенного значения рост доменов путем смещения стенок происходит скачком. У поликристаллических материалов при изменении магнитного поля в этой фазе

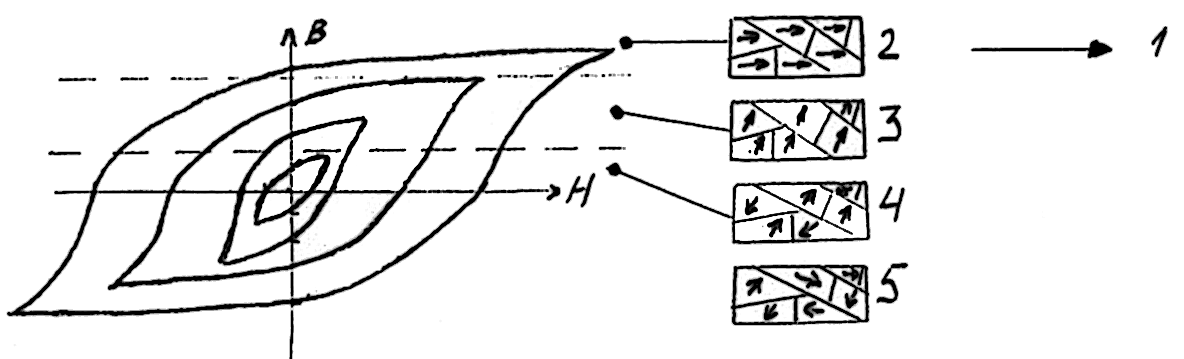


Рис.1 Стадии цикла намагничивания ( Формы петель гистерезиса при различных напряженностях максимального поля). Справа показаны границы доменов и направление векторов их спонтанного намагничивания в том же месте образца в различных стадиях намагничивания.

1-направление внешнего поля; 2-область вращения стенок; 3-область необратимых смещений стенок; 4-область обратимых смещений стенок; 5-размагниченный образец.

образуются вторичные домены, границы которых, так же, как и в исходном состоянии, образуются загрязнениями, включениями и т.п., но объем которых и их размещение совершенно иные, чем в исходном состоянии. Изменения размеров доменов в этой стадии намагничивания необратимы. Смещениям стрелок скачком соответствуют самые крутые части кривой намагничивания. В результате этих изменений кривая намагничивания не получается плавной. Если ее можно было бы подробно снять, то под микроскопом она казалась бы ступенчатой. Под влиянием возрастающего внешнего поля векторы намагничивания доменов поворачиваются в направлении внешнего поля. Эти изменения также обратимы. При уменьшении магнитного поля прежде всего векторы намагничивания доменов поворачиваются в первоначальном направлении. Потом происходят обратимые смещения стенок и, наконец, необратимые смещения стенок, которые наступают уже при изменении направления поля.

Экспериментальная проверка этих идей основывалась на двух предположениях. ступенчастость кривых намагничивания в самой крутой части, возникающая при смещении стенок скачком, при достаточном усилении дожна сопровождаться шумом. Это доказал в 1919 г H.Barkhausen. Другой вывод, который можно экспериментально проверить, подтвердили через 11 лет в 1930 г Н.С. Акулов и F.Bitter. Они исходили из предположения, что на границе доменов, где одно направление намагничивания переходит в другое, возникает магнитное поле рассеяния, в которое должны втягиваться мелкие частицы ферромагнитного материала. Опыт удался на тщательно отшлифованных и специально полированных образцах. При помощи суспензии окиси железа стали видимыми домены и границы между ними. Идея Weiss'a была подтверждена. Однако не были выяснены причины, которые вызывают ориентацию атомов в эти домены.

Электронная теория, возникшая в начале XX ст, была использована Н.Бором для построения модели атома. Вращающиеся электроны в модели атома 1912 г соединяют теорию молекулярных токов Ампера с электронной теорией. Различие между фактическим магнитным моментом магнитных атомов и магнитным моментом, который могли бы вызвать вращающиеся электроны, было объяснено введением спинового магнитного момента самого электрона. Предположение о внутриатомных обменных силах, введенное W.Heisenbеrg'ом, объясняет возникновение доменов. Только те атомы, которые, кроме известных гравитационных, магнитных и электрических сил, связаны этой предполагаемой силой, могут быть магнитными. Интересно, что эти обменные силы могут возникать и у сплавов из немагнитных элементов. Возвратимся опять к магнитному железняку. В то время, когда делались попытки найти хороший магнитный материал для сердечников цепей переменных токов, не были ясны представления о магнетизме элементов и сплавов, а тем более соединений каким является магнитный железняк. Магнетизм связывался с хорошей электропроводностью металлов. Кроме того, работа с металлическими элементами была более удобной. Магнитный железняк был забыт более чем на 20 лет. В то время изучалась атомная структура магнитных элементов и сплавов. При этих работах было объяснено влияние различных легирующих элементов и влияние загрязнений. Изучался магнетизм монокристаллов.

**1. ОСНОВЫ КЛАССИФИКАЦИИ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**1.1. Классификация веществ по магнитным свойствам**

По реакции на внешнее магнитное поле и характеру внутреннего магнитного упорядочения все вещества в природе можно подразделить на пять групп: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики. Перечисленным видам магнетиков соответствуют пять различных видов магнитного состояния вещества: диамагнетизм, парамагнетизм, ферромагнетизм, антиферромагнетизм и ферримагнетизм.

К диамагнетикам относят вещества, у которых магнитная восприимчивость отрицательна и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. К диамагнетикам относятся инертные газы, водород, азот, многие жидкости (вода, нефть и ее производные), ряд металлов (медь, серебро, золото, цинк, ртуть, галлий и др.), большинство полупроводников ( кремний, германий, соединения А3В5, А2В6) и органических соединений, щелочно-галоидные кристаллы, неорганические стекла и др. Диамагнетиками являются все вещества с ковалентной химической связью и вещества в сверхпроводящем состоянии.

К парамагнетикам относят вещества с положительной магнитной восприимчивостью, не зависящей от напряженности внешнего магнитного поля.К числу парамагнетиков относят кислород, окись азота, щелочные и щелочноземельные металлы, некоторые переходные металлы, соли железа, кобальта, никеля и редкоземельных элементов.

К ферромагнетикам относят вещества с большой положительной магнитной восприимчивостью (до 106), которая сильно зависит от напряженности магнитного поля и температуры.

Антиферромагнетиками являются вещества, в которых ниже некоторой температуры спонтанно возникает антипараллельная ориентация элементарных магнитных моментов одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки. При нагревании антиферромагнетик испытывает фазовый переход в парамагнитное состояние. Антиферромагнетизм обнаружен у хрома, марганца и ряда редкоземельных элементов (Ce, Nd, Sm, Tm и др.). Типичными антиферромагнетиками являются простейшие химические соединения на основе металлов переходной группы типа окислов, галогенидов, сульфидов, карбонатов и т.п.

К ферримагнетикам относят вещества, магнитные свойства которых обусловлены нескомпенсированным антиферромагнетизмом. Подобно ферромагнетикам они обладают высокой магнитной восприимчивостью, которая существенно зависит от напряженности магнитного поля и температуры. Наряду с этим ферримагнетики характеризуются и рядом существенных отличий от ферромагнитных материалов.

Свойствами ферримагнетиков обладают некоторые упорядоченные металлические сплавы, но, главным образом,- различные оксидные соединения, среди которых наибольший практический интерес представляют ферриты.

**1.2. Классификация магнитных материалов**

Применяемые в электронной технике магнитные материалы подразделяют на две основные группы: *магнитотвердые и магнитомягкие*.В отдельную группу выделяют *материалы специального назначения*.

К *магнитотвердым* относят материалы с большой коэрцитивной силой Нс. Они перемагничиваются лишь в очень сильных магнитных полях и служат для изготовления постоянных магнитов.

К *магнитомягким* относят материалы с малой коэрцитивной силой и высокой магнитной проницаемостью. Они обладают способностью намагничиваться до насыщения в слабых магнитных полях, характеризуются узкой петлей гистерезиса и малыми потерями на перемагничивание. Магнитомягкие материалы используются в основном в качестве различных магнитопроводов: сердечников дросселей, трансформаторов, электромагнитов , магнитных систем электроизмерительных приборов и т. п.

Условно магнитомягкими считают материалы, у которых Нс < 800 А/м, а магнитотвердыми - с Нс > 4 кА/м. Необходимо, однако, отметить, что у лучших магнитомягких материалов коэрцитивная сила может составлять менее 1 А/м, а лучших магнитотвердых материалах ее значение превышает 500 кА/м. По масштабам применения в электронной технике среди материалов специального назначения следует выделить материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), ферриты для устройств сверхвысокочастотного диапазона и магнитострикционные материалы.

Внутри каждой группы деление магнитных материалов по родам и видам отражает различия в их строении и химическом составе, учитывает технологические особенности и некоторые специфические свойства.

Рис.2 Классификация магнитных материалов

Свойства магнитных материалов определяются формой кривой намагничивания и петли гистерезиса. Магнитомягкие материалы применяются для получения больших значений магнитного потока. Величина магнитного потока ограничена магнитным насыщением материала, а потому основным требованием к магнитным материалам сильноточной электротехники и электроники является высокая индукция насыщения. Свойства магнитных материалов зависят от их химического состава, от чистоты используемого исходного сырья и технологии производства. В зависимости от исходного сырья и технологии производства магнитомягкие материалы делятся на три группы: монолитные металлические материалы, порошковые металлические материалы (магнитодиэлектрические) и оксидные магнитные материалы, кратко называемые ферритами.

**1.Монолитные металлические материалы**.

Основными компонентами монолитных металлических магнитомягких материалов является железо с низким содержанием углерода, никель или кобальт. Для цепей техники связи важнейшими из этой группы материалов являются:

а) сплавы и стали с гарантированной малой коэрцитивной силой;

б) листовая сталь с гарантированными потерями при высоких значениях магнитной

индукции;

в) сплавы с гарантированной индукцией насыщения;

г) сплавы и стали с гарантированной высокой проницаемостью;

д) материалы со специальнымы свойствами.

Материалы первой подгруппы предназначены, например, для реле. К ним относятся сталь с минимальным содержанием углерода, низколегированная кремнистая сталь и сплавы железа с никелем.

Вторую подгруппу материалов образует кремнистая сталь, применяемая для сердечников сетевых трансформаторов.

Материалы третьей подгруппы включают в себя сплавы железа с кобальтом.

Материалами с гарантированной проницаемостью являются низкоуглеродистые стали с присадкой 3-4,5% кремния и сплавы на основе никеля.

К подгруппе специальных материалов относятся материалы с прямоугольной петлей гистерезиса, магнитострикционные материалы и т.п.

**2.Порошковые металлические материалы**.

Применение порошковых материалов, т.е. так называемых магнитодиэлектриков, основывается на технических и экономических соображениях. Магнитодиэлектрические сердечники имеют некоторые свойства, которых нельзя достичь у материалов первой группы. Они пригодны для высокочастотной техники. Прокатка листовых материалов толщиной менее 0,05 мм обходится очень дорого, а при толщине 0,03 мм цена таких материалов превышает цену золота.

Для уменьшения потерь на вихревые токи и увеличения стабильности магнитных свойств применяются порошковые магнитные материалы. Увеличение удельного электрического сопротивления достигается здесь изоляцией магнитных зерен друг от друга. Окончательная форма придается изделию прессованием. К этой группе относятся:

а) магнитодиэлектрические сердечники;

б) материалы со специальными свойствами.

В зависимости от исходного сырья магнитодиэлектрические сердечники делятся на сердечники из железных порошковых материалов и сердечники из легированного железа. Основу железных порошковых материалов составляет железо, получаемое обычно карбонильным способом. Легированные материалы представляют собой сплавы железа, и алюминия (альсифер) и сплавы железа и никеля или железа, никеля и молибдена (пермаллой и молибденовый пермаллой).

К специальным порошковым металлическим материалам относятся, например, магнитный порошок для магнитофоной ленты и других магнитных носителей информации.

**3.Оксидные материалы - ферриты.**

Ферриты представляют собой химические соединения, в общем случае имеющие формулу МFe2O4, где М - чаще всего двухвалентный ион металла, например, Cu, Zn, Mg, Ni, Fe, Co и Mn. В отличие от порошковых сердечников ферриты представляют собой монолитные материалы. Магнитомягкие ферриты кристаллизуются в кубической системе и имеют структуру шпинели - минерала состава MgAl2O4. Чаще всего применяются ферриты следующих типов:

MnO\*ZnO x 2Fe2O3 - марганцево-цинковый феррит;

Nio\*ZnO x 2Fe2O3 - никель-цинковый феррит;

MgO\*MnO\*2Fe2O3 - магний-марганцевый феррит.

Ферриты имеют высокое удельное электрическое сопротивление порядка 10-109 Ом\*см и благодаря этому низкие потери на вихревые токи. Индукция насыщения составляет приблизительно 20-25% от индукции насыщения железа.

Ферриты делятся на три подгруппы:

а) ферриты с гарантированными потерями и проницаемостью;

б) ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса;

в) ферриты со специальными свойствами.

Марганец-цинковые ферриты по сравнению с никель-цинковыми имеют меньшие потери. Оба эти вида ферритов относятся к первой подгруппе. Т.к. никель-цинковые ферриты имеют более высокое электрическое сопротивление, то их целесообразно применять в области частот от 500 кГц до 200 МГц и выше, т.е. для цепей высокочастотной техники. Магний-цинковые ферриты предназначены для применения в диапазоне от звуковых частот до нескольких МГц.

Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса бывают никель-цинковыми или магний-марганцевыми. В технике УКВ также применяются магний-марганцевые ферриты, однако соотношение отдельных составных частей в тройной системе отличается от состава магний-марганцевых ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса. Эти ферриты вместе с магнитострикционными материалами относятся к группе материалов со специальными свойствами.

Благодаря своим свойствам, ферриты имеют очень широкий диапазон применения. В настоящее время ферриты применяются в производстве реле,сетевых трансформаторов устройств связи, дросселей, электромеханических преобразователей и резонаторов и т.п. Однако наибольшее распространение ферриты получили в производстве сердечников для катушек (феррокатушек), запоминающих и переключающих цепей и т.п.

**1.3. Особенности ферримагнетиков**

**Строение ферримагнетиков.** Ферримагнетики получили свое название от ферритов, под которыми понимают химические соединения окисла железа Fe2O3 с окислами других металлов. В настоящее время используют сотни различных марок ферритов, отличающихся по химическому составу, кристаллической структуре, магнитным, электрическим и другим свойствам.

Наиболее широкое применение нашли ферриты со структурой природного минерала *шпинели.* Химический состав ферритов-шпинелей отвечает формуле МеFe2O4, где под Ме понимают какой-либо двухвалентный катион. На примере этих соединений рассмотрим наиболее характерные особенности магнитных свойств ферримагнетиков.

Исследования показывают, что наличие или отсутствие магнитных свойств определяется кристаллической структурой материалов и, в частности, расположением ионов двухвалентных металлов и железа между ионами кислорода. Элементарная ячейка шпинели представляет собой куб, в состав которого входит восемь структурных единиц типа МеFe2O4, т.е. 32 иона кислорода, 16 ионов трехвалентного железа и 8 ионов двухвалентного металла. Кислородные ионы расположены по принципу плотной кубической упаковки шаров. При этом возникают междуузлия двух типов: тетраэдрические, образованные окружением четырех ионов, и октаэдрические, образованные окружением шести ионов кислорода. В этих кислородных междуузлиях находятся катионы металлов. Всего в элементарной ячейке шпинели может быть заполнено 8 тетраэдрических промежутков (назовем их позициями типа А) и 16 октаэдрических мест ( позиции типа В).

Структуру, в которой все катионы двухвалентного железа занимают позиции типа А, а катионы трехвалентного железа распределяются в междуузлиях типа В, называют нормальной шпинелью. Учитывая такой характер распределения катионов по кислородным междуузлиям, формулу феррита со структурой нормальной шпинели можно представить в следующем виде:

(Мe2+)[Fe3+Fe3+]O4

где в круглых скобках указаны ионы, занимающие позиции типа А, а в квадратных - ионы в позициях типа В. Стрелками условно показано направление магнитных моментов катионов. В структуре нормальной шпинели кристаллизуются ферриты цинка (ZnFe2O4) и кадмия (CdFe2O4). Как будет показано далее, ферриты со структурой нормальной шпинели немагнитны.

Чаще встречаются ферриты с иным характером распределения катионов по кислородным междуузлиям. Структура, в которой катионы Ме2+ находятся в позициях типа В, а катионы трехвалентного железа поровну распределяются между позициями А и В, получила название обращенной шпинели. Формулу обращенной шпинели с учетом распределения катионов можно записать в виде:

(Fe3+)[Me2+Fe3+]O4

Структуру обращенной шпинели имеют ферриты никеля, кобальта, меди и некоторых других элементов.

Большинство реальных ферритов характеризуется некоторым промежуточным распределением катионов, когда и ионы Ме2+, и ионы трехвалентного железа Fe3+ занимают позиции того и другого типов. Такие структуры называют амфотерной шпинелью. Промежуточному распределению катионов соответствует структурная формула

(Me2+1-x Fe3+x)[Me2+x Fe3+1-x]O4

где параметр х характеризует степень обращенности шпинели. Структуре нормальной и обращенной шпинели отвечают значения х, равные, соответственно, нулю и единице.

**Природа магнитного упорядочения.** В ферритах магнитоактивные катионы находятся достаточно далеко друг от друга, поскольку разделены анионами кислорода, не обладающими магнитным моментом. Поэтому прямое обменное взаимодействие между катионами оказывается очень слабым или отсутствует вообще. Их электронные оболочки практически не перекрываются.

**2. СВЕДЕНИЯ О МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛАХ**

**2.1. Магнитомягкие материалы для постоянных и**

**низкочастотных магнитных полей**

**Основные требования к материалам.** Помимо высокой магнитной проницаемости и малой коэрцитивной силы магнитомягкие материалы должны обладать большой индукцией насыщения, т.е. пропускать максимальный магнитный поток через заданную площадь поперечного сечения магнитопровода. Выполнение этого требования позволяет уменьшить габаритные размеры и массу магнитной системы.

Магнитный материал, используемый в переменных полях, должен иметь возможно меньшие потери на перемагничивание, которые складываются в основном из потерь на гистерезис и вихревые токи.

Для уменьшения потерь на вихревые токи в трансформаторах выбирают магнитомягкие материалы с повышенным удельным сопротивлением. Обычно магнитопроводы собирают из отдельных изолированных друг от друга тонких листов. Широкое применение получили ленточные сердечники, навиваемые из тонкой ленты с межвитковой изоляцией из диэлектрического лака. К листовым и ленточным материалам предъявляется требование высокой пластичности, благодаря которой облегчается процесс изготовления изделий из них.

Важным требованием к магнитомягким материалам является обеспечение стабильности их свойств как во времени, так и по отношению к внешним воздействиям, таким, как температура и механические напряжения. Из всех магнитных характеристик наибольшим изменениям в процессе эксплуатации материала подвержены магнитная проницаемость (особенно в слабыз полях) и коэрцитивная сила.

**Железо и низкоуглеродистые стали.** Основным компонентом большинства магнитных материалов является железо. Само по себе железо в элементарном виде представляет собой типичный магнитомягкий материал, магнитные свойства которого существенно зависят от содержания примесей. Среди элементарных ферромагнетиков железо обладает наибольшей индукцией насыщения ( около 2,2 Тл).

Особо чистое железо (электролитическое, карбонильное), содержащее малое количество примесей (менее 0,05%), получают двумя сложными способами.

*Электролитическое железо* изготавливают путем электролиза раствора сернокислого или хлористого железа, причем анодом служит чистое железо, а катодом - пластина мягкой стали. Осажденное на катоде железо (толщина слоя 4-6 мм) после тщательной промывки снимают и измельчают в порошок в шаровых мельницах; подвергают вакуумному отжигу или переплавляют в вакууме.

*Карбонильное железо* получают посредством термического разложения пентакарбонила железа согласно уравнению

Fe(CO)5 = Fe + 5CO

Пентакарбонил железа представляет собой продукт воздействия окиси углерода на железо при температуре около 200°С и давлении примерно 15 МПа. Карбонильное железо имеет вид тонкого порошка, что делает его удобным для изготовления прессованных магнитных сердечников. В карбонильном железе отсутствуют кремний, фосфор и сера, но содержится углерод.

Магнитные свойства различных видов чистого железа приведены в табл.1 ). Примеси относительно слабо влияют на магнитные свойства железа, если их концентрация ниже предела растворимости. Низким пределом растворимости в железе обладают углерод, кислород, азот и сера. Соответственно, эти примеси оказываются и наиболее вредными. При охлаждении металла после термообработки такие примеси из-за ограниченной растворимости выделяются в виде микровключений побочных фаз, которые затрудняют смещение доменных границ в слабом магнитном поле.

Свойства железа зависят не только от содержания примесей, но и от структуры материала, размера зерен, наличия механических напряжений. Из табл.1 видно, что магнитные свойства даже лучших промышленных разновидностей железа далеки от того, чего можно добиться, используя современные технологические методы получения чистых и однородных по структуре материалов.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Магнитная проницаемость | | Коэрцитивная | Индукция | Удельное со- |
| Материал | начальная | максимальная | сила, А/м | насыщения Тл | противление, мкОм•м |
| Технически чистое железо | 250 - 400 | 3500 - 4500 | 50 - 100 | 2,18 | 0,1 |
| Электролитическое железо | 600 | 15000 | 30 | 2,18 | 0,1 |
| Карбонильное железо | 2000 - 3000 | 20000 - 21500 | 6,4 | 2,18 | 0,1 |
| Монокристалл чистейшего железа | >20000 | 1430000 | 0,8 | - | 0,097 |
| Электротехническая сталь | 200 - 600 | 3000 - 8000 | 10 - 65 | 1,95 - 2,02 | 0,25 - 0,6 |
| Низконикелевый пермаллой | 1500 - 4000 | 15000 - 60000 | 5 - 32 | 1,0 - 1,6 | 0,45 - 0,9 |
| Высоконикелевые пермаллои | 7000 - 100000 | 50000 - 300000 | 0,65 - 5 | 0,65 - 1,05 | 0,16 - 0,85 |

Табл.1 Некоторые свойства магнитомягких ферромагнитных материалов.

*Технически чистое железо* обычно содержит небольшое количество примесей углерода, серы, марганца, кремния и других элементов, ухудшающих его магнитные свойства. Вследствие сравнительно низкого удельного сопротивления технически чистое железо используют довольно редко, в основном для изготовления магнитопроводов постоянного магнитного потока.

Обычное техническичистое железо изготавливают рафинированием чугуна в мартеновских печах или в конверторах; оно имеет суммарное содержание примесей 0,08-0,1%

*Кремнистая электротехническая сталь* (по ГОСТу электротехническая тонколистовая) является основным магнитомягким материалом массового потребления. Введением в состав этой стали кремния достигается повышение удельного сопротивления, что вызывает снижение потерь на вихревые токи. Кроме того, наличие в стали кремния способствует выделению углерода в виде графита, а также почти полному раскислению стали за счет химического связывания кислорода в SiO2. Последний в виде шлака выделяется из расплава. В результате легирование кремнием приводит к увеличению магнитной проницаемости, уменьшению коэрцитивной силы и снижению потерь на гистерезис. Положительное влияние кремния на магнитную проницаемость стали обусловлено также уменьшением констант магнитной анизотропии и магнитострикции. У стали с содержанием кремния 6,8% константа магнитной анизотропии в три раза меньше, чем у чистого железа, а значение магнитострикции практически равно нулю. При таком содержании кремния сталь обладает наибольшей магнитной проницаемостью. Однако промышленные марки электротехнической стали содержат не более 5% кремния. Это объясняется тем, что кремний ухудшает механические свойсва стали, придает ей хрупкость и ломкость. Такая сталь непрригодна для штамповки. Кроме того, при введении кремния несколько уменьшается индукция насыщения (примерно 0,05 Тл на 1% Si), так как кремний является немагнитным компонентом. Вместе с тем легирование кремнием повышает стабильность магнитных свойств стали во времени.

Свойства стали значительно улучшаются за счет образования магнитной текстуры при холодной прокатке и последующего отжига в водороде.

При холодной прокатке происходит сильное обжатие материала; возникающие деформации вызывают преимущественную переориентацию кристаллических зерен. Отжиг при температуре 900-1000°С не только снимает внутренние механические напряжения, но и сопровождается интенсивной рекристаллизацией (укрупнением зерен). Получается так называемая ребровая текстура.

*Текстурованная сталь* анизотропна по свойствам: вдоль напрвления прокатки наблюдается существенно более высокая магнитная проницаемость и меньшие потери на гистерезис. Сталь выпускается в виде рулонов, листов и резаной ленты. Она может быть без электроизоляционного покрытия или иметь его. Сталь различных классов предназначается для изготовления магнитных цепей аппаратов, трансформаторов, электричекских машин. Применение ленточных сердечников из текстурованной стали в силовых трансформаторах позволяет уменьшить их массу и габаритные размеры на 20-25%, а в радиотрансформаторах - на 40%.

Листы тонкого проката предназначены в основном для использования в полях повышенной частоты (до 1 кГц). Использование листовых и ленточных сердечников на частотах выше 1 кГц возможно лишь при существенном ограничении магнитной индукции, так , чтобы суммарные потери не превышали допустимого предела. По условиям нагрева и теплоотвода предельно допустимыми принято считать удельные потери 20 Вт/кг.

**Низкокоэрцитивные сплавы.** *Пермаллои* - железоникелевые сплавы, обладающие весьма большой магнитной проницаемостью в области слабых полей и очень маленькой коэрцитивной силой. Пермаллои подразделяют на высоко- и низконикелевые. Высоконикелевые пермаллои содержат 72-80% никеля, а низконикелевые - 40-50% никеля. Магнитные свойства пермаллоев очень чувствительны к внешним механическим напряжениям, зависят от химического состава и наличия инородных примесей в сплаве, а также очень резко изменяются в зависимости от режимов термообработки материала (температуры, скорости нагрева и охлаждения, окружающей среды и т.д.). Термическая обработка высоконикелевых пермаллоев сложнее, чем низконикелевых.

Удельное сопротивление высоконикелевых пермаллоев почти в три раза меньше, чем у низконикелевых, поэтому при повышенных частотах предпочтительнее использовать низконикелевые пермаллои. Кроме того, магнитная проницаемость пермаллоев сильно снижается с увеличением частоты. Это объясняется возникновением в материале заметных вихревых токов из-за небольшого удельного сопротивления.

Диапазон изменения магнитных свойств и удельного сопротивления промышленных марок пермаллоев указан в табл.1. Вследствие различия свойств низконикелевые и высоконикелевые пермаллои имеют несколько различные применения.

Низконикелевые сплавы 45Н и 50Н применяют для изготовления сердечников малогабаритных силовых трансформаторов, дросселей, реле и деталей магнитных цепей, работающих при повышенных индукциях без подмагничивания или с небольшим подмагничиванием. Высоконикелевые сплавы 79НМ, 80НХС, 76НХД используют для изготовления сердечников малогабаритных трансформаторов, реле и магнитных экранов.

Сильная зависимость магнитных свойств пермаллоя от механических напряжений вынуждает принимать специальные меры защиты сердечников, поскольку механические нагрузки неизбежно возникают даже при наложении токовых обмоток. Обычно кольцеобразные ленточные сердечники из пермаллоя помещают в немагнитные защитные каркасы из пластмассы или алюминия. В целях амортизации динамических нагрузок свободное пространство между каркасом и сердечником заполняют каким-либо эластичным веществом.

**2.2. Магнитомягкие высокочастотные материалы**

Под высокочастотными магнитомягкими материалами понимают вещества, которые должны выполнять функции магнетиков при частотах свыше нескольких сотен или тысяч герц. По частотному диапазону применения их в свою очередь можно подразделить на материалы для звуковых, ультразвуковых и низких радиочастот, для высоких радиочастот и для СВЧ.

По физической природе и строению высокочастотные магнитомягкие материалы подразделяют на магнитоэлектрики и ферриты. Кроме того, при звуковых, ультразвуковых и низких радиочастотах можно использовать тонколистовые рулонные холоднокатанные электротехнические стали и пермаллои. Толщина сталей достигает 30-25 мкм, а пермаллой, как мееханически более мягкий сплав, может быть получен толщиной до 2-3 мкм. Основные магнитные свойства таких тонких магнитных материалов близки к свойствам материалов больших толщин, однако они имеют несколько повышенную коэрцитивную силу и высокую стоимость, а технология сборки магнитных цепей из них весьма сложна.

**2.3. Ферриты.**

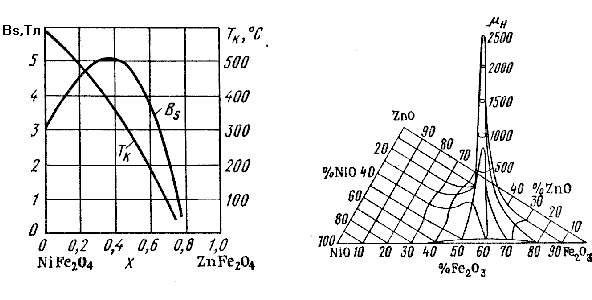
Как отмечалось выше, ферриты представляют собой оксидные магнитные материалы, у которых спонтанная намагниченность доменов обусловлена нескомпенсированным антиферромагнетизмом.

Большое удельное сопротивление, превышающее удельное сопротивление железа в 103-1013 раз, а следовательно, и относительно незначительные потери энергии в области повышеных и высоких частот наряду с достаточно высокими магнитными свойствами обеспечивают ферритам широкое применение в радиоэлектронике.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Номер | Название | Марка ферритов | |
| группы | группы | Ni-Zn | Mn-Zn |
| I | Общего применения | 100НН, 400НН, 400НН1, 600НН, 1000НН, 2000НН | 1000НМ, 1500НМ, 2000НМ, 3000НМ |
| II | Термостабильные | 7ВН, 20ВН, 30ВН, 50ВН, 100ВН, 150ВН | 700НМ, 1000НМ3, 1500НМ1, 1500НМ3, 2000НМ1, 2000НМ3 |
| III | Высокопроницаемые |  | 4000НМ, 6000НМ, 6000НМ1, 10000НМ, 20000НМ |
| IV | Для телевизионной техники |  | 2500НМС1, 3000НМС |
| V | Для импульсных трансформаторов | 300ННИ, 300ННИ1, 350ННИ, 450ННИ, 1000ННИ, 1100ННИ | 1100НМИ |
| VI | Для перестраиваемых контуров | 10ВНП, 35ВНП, 55ВНП, 60ВНП, 65ВНП, 90ВНП, 150ВНП, 200ВНП, 300ВНП |  |
| VII | Для широкополосных трансформаторов | 50ВНС, 90ВНС, 200ВНС, 300ВНС |  |
| VIII | Для магнитных головок | 500НТ, 500НТ1, 1000НТ, 1000НТ1, 2000НТ | 500МТ, 1000МТ, 2000МТ, 5000МТ |
| IX | Для датчиков температуры | 1200НН, 1200НН1, 1200НН2, 1200НН3, 800НН |  |
| X | Для магнитного экранирования | 200ВНРП, 800ВНРП |  |

Табл. 2 Группы и марки магнитомягких ферритов.

**Высокопроницаемые ферриты.** В качестве магнитомягких материалов наиболее широко применяют никель-цинковые и марганец-цинковые ферриты. Они кристаллизуются в структуре шпинели и представляют собой твердые растворы замещения, образованные двумя простыми ферритами, один из которых (NiFe2O4 или MnFe2O4) является ферримагнетиком, а другой (ZnFe2O4) - немагнитен. Основные закономерности изменения магнитных свойств от состава в подобных системах представлены на рис.2 и 3. Чтобы объяснить наблюдаемые закономерности, необходимо принять во внимание, что катионы цинка в структуре шпинели всегда занимают тетраэдрические кислородные междуузлия, а катионы трехвалентного железа могут находиться как в тетра-, так и в октаэдрических промежутках. Состав твердого раствора с учетом распределения



|  |  |
| --- | --- |
| Рис. 3 Зависимость индукции насыщения (при Е=20°С) и температуры Кюри твердых растворов Ni1-xZnxFe2O4 от состава (температура обжига 1320°С) | Рис.4 Зависимость начальной магнитной проницаемости в системе NiO-ZnO-Fe2O3 от состава (температура обжига 1380°С) |

катионов по кислородным междуузлиям можно охарактеризовать следующей формулой:

(Zn2+x Fe3+1-x)[Ni2+1-x Fe3+1+x]O4

где стрелки условно указывают направление магнитных моментов ионов в соответствующих подрешетках. Отсюда видно, что вхождение цинка в кристаллическую решетку сопровождается вытеснением железа в октаэдрические позиции. Соответственно уменьшается намагниченность тетраэдрической (А) подрешетки и снижается степень компенсации магнитных моментов катионов, находящихся в различных подрешетках (А и В). В результате возникает очень интересный эффект: увеличение концентрации немагнитного компонента приводит к увеличению намагниченности насыщения (а следовательно, и Вs) твердого раствора (рис.2). Однако разбавление твердого раствора немагнитным ферритом вызывает ослабление основного обменного взаимодействия типа А-О-В, что выражается в монотонном снижении температуры Кюри (Тк) при увеличении мольной доли ZnFe2O4 в составе феррошпинели. Быстрый спад индукции насыщения в области х > 0,5 объясняется тем, что магнитные моменты небольшого количества ионов в тетраэдрической подрешетке уже не в состоянии ориентировать антипараллельно себе магнитные моменты всех катионов, находящихся в В-подрешетке. Иными словами, обменное взаимодействие типа А-О-В становится настолько слабым, что не может подавить конкурирующее взаимодействие типа В-О-В, которое также является отрицательным и стремится вызвать антипараллельную ориентацию магнитных моментов катионов в В-подрешетке.

Ослабление обменного взаимодействия между катионами при увеличении содержания немагнитного компонента приводит к уменьшению констант кристаллографической анизотропии и магнитострикции. Благодаря этому облегчается перемагничивание ферримагнетика в слабых полях, т.е. возрастает начальная магнитная проницаемость. Наглядное представление о зависимости начальной магнитной проницаемости от состава твердой фазы дает рис.3. Максимальному значению проницаемости отвечает точка в треугольнике составов с ориентировочными координатами 50% Fe2O3, 15% NiO и 35% ZnO. Этой точке соответствует твердый раствор Ni1-xZnxFe2O4 с х≈0,7. Из сопоставления рис.2 и 3 можно сделать вывод, что ферриты с высокой начальной магнитной проницаемостью должны обладать невысокой температурой Кюри. Аналогичные закономерности наблюдаются для марганец-цинковых ферритов.

Значения начальной магнитной проницаемости и коэрцитивной силы определяются не только составом материала, но и его структурой. Препятствиями, мешающими свободному перемещению доменных границ при воздействии на феррит слабого магнитного поля, являются микроскопические поры, включения побочных фаз, участки с дефектной кристаллической решеткой и др. Устранение этих структурных барьеров, также затрудняющих процесс намагничивания, позволяет существенно повысить магнитную проницаемость материала. Большое влияние на значение начальной магнитной проницаемости ферритов оказывает размер кристаллических зерен. Марганец-цинковые ферриты с крупнозернистой структурой могут обладать начальной магнитной проницаемостью до 20000. Это значение близко к начальной магнитной проницаемости лучших марок пермаллоя.

**Магнитные свойства.** Для ферритов, используемых в переменных полях, кроме начальной магнитной проницаемости одной из важнейших характеристик является тангенс угла потерь tgδ. Благодаря низкой проводимости составляющая потерь на вихревые токи в ферритах практически мала и ею можно пренебречь. В слабых магнитных полях незначительными оказываются и потери на гистерезис. Поэтому значение tgδ в ферритах на высоких частотах в основном определяется магнитными потерями, обусловленными релаксациооными и резонансными явлениями. Для оценки допустимого частотного диапазона, в котором может использоваться данный материал, вводят понятие критической частоты fкр. Обычно под fкр понимают такую частоту, при которой tgδ достигает значения 0,1.

Инерционность смещения доменных границ, проявляющихся на высоких частотах, приводит не только к росту магнитных потерь, но и к снижению магнитной проницаемости ферритов. Частоту fгр, при которой начальная магнитная проницаемость уменьшается до 0,7 от ее значения в постоянном магнитном поле, называют *граничной*. Как правило, fкр < fгр. Для сравнительной оценки качества магнитомягких ферритов при заданных значениях H и f удобной характеристикой является относительный тангенс угла потерь, под которым понимают отношение tgδ/μн.

Сравнение магнитных свойств ферритов с одинаковой начальной магнитной проницаемостью показывает, что в области частот до 1 МГц марганец-цинковые ферриты имеют существенно меньший относительный тангенс угла потерь, чем никель-цинковые ферриты. Это объясняется очень малыми потерями на гистерезис у марганец-цинковых ферритов в слабых полях. Дополнительным преимуществом высокопроницаемых марганец-цинковых ферритов является повышенная индукция насыщения и более высокая температура Кюри. В то же время никель-цинковые ферриты обладают более высоким удельным сопротивлением и лучшими частотными свойствами.

В ферритах, как и в ферромагнетиках, реверсивная магнитная проницаемость может существенно изменяться под влиянием напряженности постоянного подмагничивающего поля, причем у высокопроницаемых ферритов эта зависимость выражена более резко, чем у высокочастотных ферритов с небольшой начальной магнитной проницаемостью.

Магнитные свойства ферритов зависят от механических напряжений, которые могут возникать при нанесении обмотки, креплении изделий и по другим причинам. Чтобы не было ухудшения магнитных характеристик, ферриты следует оберегать от механических нагрузок.

**Электрические свойства**. По электрическим свойствам ферриты относятся к классу полупроводников или даже диэлектриков. Их электропроводность обусловлена процессами электронного обмена между ионами переменной валентности("прыжковый" механизм). Электроны, учавствующие в обмене, можно рассматривать как носители заряда, концентрация которых практически не зависит от температуры. Вместе с тем, при повышении температуры экспоненциально увеличивается вероятность перескока электронов между ионами переменной валентности, т.е. возрастает подвижность носителей заряда. Поэтому температурное изменение удельной проводимости и удельного сопротивления ферритов с достаточной для практических целей точностью можно описать следующими формулами:

γ = γ0 exp [-Э0/(kT)] ; ρ = ρ0 exp [Э0/(kT)]

где γ0 и ρ0 - постоянные величины для данного материала; Э0 - энергия активации электропроводности.

Среди многих факторов, влияющих на электрическое сопротивление ферритов, основным является концентрация в них ионов двухвалентного железа Fe2+. Под влиянием теплового движения слабосвязанные электроны перескакивают от ионов железа Fe2+ к ионам Fe3+ и понижают валентность последних. С увеличением концентрации двухвалентных ионов железа линейно возрастает проводимость материала и одновременно уменьшается энергия активации Э0. Отсюда следует, что при сближении ионов переменной валентности понижается высота энергетических барьеров , которые должны преодолевать электроны при переходе от одного иона к соседнему. У ферритов-шпинелей энергия активации электропроводности обычно лежит в пределах от 0,1 до 0,5 эВ. Наибольшей концентрацией ионов двухвалентного железа и, соответственно, наименьшим удельным сопротивлением обладает магнетит Fe3O4 (феррит железа), у которого ρ=5•10-5 Ом•м. В то же время в феррогранатах концентрация ионов Fe2+ ничтожно мала, потому их удельное сопротивление может достигать высоких значений (до 109 Ом•м).

Экспериментально установлено, что присутствие в ферритах-шпинелях определенного количества ионов двухвалентного железа приводит к ослаблению анизотропии и магнитострикции; это благоприятно отражается на значении начальной магнитной проницаемости. Отсюда вытекает следующая закономерность: ферриты с высокой магнитной проницаемостью, как правило, обладают невысоким удельным сопротивлением.

Для ферритов характерна относительно большая диэлектрическая проницаемость, которая зависит от частоты и состава материала. С повышением частоты диэлектрическая проницаемость ферритов падает. Так, никель-цинковый феррит с начальной проницаемостью 200 на частоте 1 кГц имеет ε = 400, а на частоте 10 МГц ε = 15. Наиболее высокое значение ε присуще марганец-цинковым ферритам, у которых она достигает сотен или тысяч.

Большое влияние на поляризационные свойства ферритов оказывают ионы переменной валентности. С увеличением их концентрации наблюдается возрастание диэлектрической проницаемости материала.

**2.4. Магнитные материалы специализированного назначения**

**Ферриты и металлические сплавы с ППГ.** Магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ) находят широкое применение в устройствах автоматики, вычислительной техники, в аппаратуре телеграфной связи. Сердечники из материала с ППГ имеют два устойчивых магнитных состояния, соответствующих различным направлениям остаточной магнитной индукции. Именно благодаря этой особенности их можно использовать в качестве элементов для хранения и переработки двоичной информации. Запись и считывание информации осуществляются переключением сердечника из одного магнитного состояния в другое с помощью импульсов тока, создающих требуемую напряженность магнитного поля.

Двоичные элементы на магнитных сердечниках с ППГ характеризуются высокой надежностью, малыми габаритами, низкой стоимостью, относительной стабильностью характеристик. Они обладают практически неограниченным сроком службы, сохраняют записанную информацию при отключенных источниках питания.

К материалам и изделиям этого типа предъявляют ряд специфических требований, а для их характеристики привлекают некоторые дополнительные параметры. Основным из таких параметров является коэффициент прямоугольности петли гистерезиса Кпу, представляющий собой отношение остаточной индукции Вr к максимальной индукции Вmax:

Кпу = Вr/Вmax

Для определенности Вmax измеряют при Hmax = 5Hc. Желательно, чтобы Кпу был возможно ближе к единице. Для обеспечения быстрого перемагничивания сердечников они должны иметь небольшой коэффициент переключения Sq, численно равный количеству электричества на единицу толщины сердечника, которое необходимо для перемагничивания его из одного состояния остаточной индукции в противоположное состояние максимальной индукции.

Кроме того, материалы с ППГ должны обеспечивать малое время перемагничивания, возможно большую температурную стабильность магнитных характеристик, а следовательно, иметь высокую температуру Кюри и некоторые другие свойства.

Ферриты с ППГ в практике распространены шире, чем металлические тонкие ленты. Это объясняется тем, что технология изготовления сердечников наиболее проста и экономична. Свойства ферритовых сердечников приведены в табл.2.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал или сердечник | Hc,  A/м | Br,  Тл | Кпу,  (не менее) | Sq,  мкКл/м | Тк, °С | Примечание |
| Ферриты различных марок | 10-1200 | 0,15-0,25 | 0,9 | 25-55 | 110-630 | Имеется свыше 25 различных марок |
| Микронные сердечники из пермаллоев (толщины ленты от 2 до 10 мкм) | 8-50 | 0,6-1,5 | 0,85-0,9 | 25-100 | 300-630 | Сплавы 50НП, 65Н, 79НМ, 34НКПМ |

Табл.3 Свойства сердечников и материалов с ППГ.

Ферритам свойственна спонтанная прямоугольность петли гистерезиса, т.е. специфическая форма петли реализуется при выборе определенного химического состава и условий спекания феррита, а не является результатом какой-либо специальной обработки материала, приводящей к образованию текстуры (например, механических воздействий или обработки в сильном магнитном поле).

Из ферритов с ППГ наиболее широкое применение находят магний-марганцевые и литиевые феррошпинели. Установлено, что прямокгольная петля гистерезиса характерна для материалов с достаточно сильной магнитной кристаллографической анизотропией и слабо выраженной магнитострикцией. В этом случае процессы перемагничивания происходят главным образом за счет необратимого смещения доменных границ. Сохранение большой остаточной намагниченности после снятия внешнего поля объясняется локализацией доменных границ на микронеоднородностях структуры. Такими неоднородностями могут быть области с разной степенью обращенности шпинели, вакансии и связанные с ними комплексы, междуузельные атомы и др. Например, в магний-марганцевых ферритах спонтанная прямоугольность петли гистерезиса обусловлена тетрагональными искажениями кристаллической решетки за счет ионов Mn3+, образующихся при определенных условиях синтеза.

При использовании ферритов следует учитывать изменение их свойств от температуры. Так, при возрастании температуры от -20 до +60°С у ферритов различных марок коэрцитивная сила уменьшается в 1,5-2 раза, остаточная индукция - на 15-30%, коэффициент прямоугольности - на 5-35%.

В зависимости от особенности устройств, в которых применяются ферриты с ППГ, требования, предъявляемые к ним, могут существенно различаться. Так, ферриты, предназначенные для коммутационных и логических элемнтов схем автоматического управления, должны иметь малую коэрцитивную силу (10-20 А/м). Наоборот, материалы, используемые в устройствах хранения дискретной информвции, должны иметь повышенное значение коэрцитивной силы (100-300 А/м).

В запоминающих устройствах ЭВМ применяют либо кольцевые ферритовые сердечники малого размера (имеются сердечники с наружным диаметром 0,3-0,4 мм), либо многоотверстные ферритовые платы в которых область вокруг каждого отверстия выполняет функции отдельного сердечника. При использовании сердечников достигается более высокое быстродействие, однако возникают технологические трудности при прошивке таких сердечников проводниками и сборке матриц.

**Ферриты для устройств СВЧ.** Диапазон СВЧ соответствует длинам волн от 1м до 1мм. В аппаратуре и приборах, где используются электромагнитные волны диапазона СВЧ, необходимо управлять этими колебаниями: переключать поток энергии с одного направления на другое, изменять фазу колебаний, поворачивать полоскость поляризации волны, частично или полностью поглощать мощность потока.

Электромагнитные волны могут распространяться в пространстве, заполненном диэлектриком, а от металлов они почти полностью отражаются. Поэтому металлические поверхности используют для напрвления волн, их концентрации или рассеяния. Электромагнитная энергия СВЧ чаще всего передается по волноводам, представляющим собой трубы. В качестве твердых материалов для управления потоком энергии в волноводах используют ферриты СВЧ и некоторые немагнитные активные диэлектрики. Магнитными характеристиками первых можно управлять с помощью внешнего магнитного поля, электрическими свойствами вторых - за счет внешнего электрического поля.

Практическое применение ферритов СВЧ основано на: а) магнитооптическом эффекте Фарадея; б) эффекте ферромагнитного резонанса; в) изменении внешним магнитным полем значения магнитной проницаемости феррита.

*Магнитооптический эффект Фарадея* заключается в повороте плоскости поляризации высокочастотных колебаний в намагниченном за счет внешнего поля феррите. При этом могут быть получены различные углы поворота плоскости поляризации, а следовательно, и коммутирование энергии в разные каналы.

*Ферромагнитный резонанс* наблюдается при совпадении частоты внешнего возбуждающего поля с собственной частотой прецессии спинов электронов. Собственная частота прецессии зависит от магнитного состояния образца, а потому ее можно изменять с помощью постоянного подмагничивающего (управляющего) поля Н\_. При резонансе резко возрастает поглощение энергии электромагнитной волны, распространяющейся в волноводе в обратном направлении; для волны прямого направления поглощение оказывается значительно меньшим. В результате получается высокочастотный вентиль. Рассмотренный эффект наиболее сильно проявляется в том случае, когда напряженности переменного возбуждающего поля и постоянного подмагничивающего полей взаимно перпендикулярны.

Если частоту внешнего поля поддерживать постоянной, а изменять напряженность подмагничивающего поля Н\_, то вентильные свойства феррита будут проявляться в довольно узком интервале напряженностей постоянного поля ΔН\_, называемом шириной линии ферромагнитного резонанса. Чем меньше значение ΔН\_, тем сильнее поглощение электромагнитной энергии, что благоприятно сказывается на характеристиках ряда СВЧ-устройств (антенные переключатели и циркуляторы, служащие для распределения энергии между отдельными волноводами; фазовращатели; фильтры; модуляторы; ограничители мощности и др.).

Помимо достижения узкой линии резонанса к ферритам СВЧ предъявляют ряд специфических требований. Основными из них являются:

1) высокая чувствительность материала к управляющему полю (возможность управления относительно слабым внешним полем);

2) высокое удельное объемное сопротивление (106-108 Ом•м) и возможно меньший тангенс угла диэлектрических потерь (10-3 - 10-4), а также возможно меньшее значение магнитных потерь вне области резонанса, обеспечивающее малое затухание в феррите;

3) температурная стабильность свойств и возможно более высокое значение точки Кюри. В отдельных случаях к ферриту предъявляют и другие требования, которые могут быть даже противоречивыми. Большинство требований удовлетворяется при использовании магний-марганцевых ферритов с большим содержанием окиси магния.

Для некоторых целей применяют литий-цинковые и никель-цинковые ферриты и ферриты сложного состава (полиферриты).

Конфигурация и размеры ферритового изделия, с одной стороны, определяются принципом действия прибора, а с другой, зависят от свойств самого материала. В различных приборах СВЧ применяемые ферритовые вкладыши имеют форму прямоугольной пластины, равностороннего треугольника, кольца, диска или сферы. При определенной геометрии вкладыша обеспечивается наилучшее согласование его с волноводом, т.е. получается минимальное отражение электромагнитной волны от феррита. Для изготовления вкладышей используются как поликристаллические материалы, так и монокристаллы ферритов. Последние характеризуются более узкой шириной линии ферромагнитного резонанса.

**Магнитострикционные ферриты.** Магнитострикционными называют магнитные материалы, применение которых основано на явлении магнитострикции и магнитоупругом эффекте, т.е. изменении размеров тела в магнитном поле и изменении магнитных свойств материала под влиянием механических воздействий.

Среди магнитострикциооных материалов можно отметить как чистые металлы, так сплавы и различные ферриты. Ферриты являются магнитострикционными материалами для высоких частот.

В эксплуатационных условиях в большинстве случаев магнитное состояние сердечника магнитострикционного преобразователя определяется одновременным воздействием переменного и постоянного подмагнич,вающих полей. Если Выполняется соотношение Bm << B\_, то между амплитудами переменного магнитного поля и механических колебаний существует линейная зависимость. Таким образом, магнитострикционные колебания небольшой амплитуды в намагниченной (магнитно-поляризованной) среде по своему внешнему проявлению аналогичны пьезоэлектрическим. Поэтому их иногда называют пьезомагнитными.

Широкое применение в магнитострикционных устройствах находит ферритовая керамика. По сравнению с никелем и металлическими сплавами, магнитострикционные свойства которых также выражены довольно сильно, магнитострикционные ферриты имеют ряд преимуществ. Благодаря высокому удельному сопротивлению в них пренебрежимо малы потери на вихревые токи, поэтому отпадает необходимость расслаивать материал на отдельные пластины. В отличие от металлических сплавов ферриты не подвержены действию химически агрессивных сред. С помощью керамической технологии можно изготовить преобразователи практически любых форм и размеров.

По составу магнитострикционная керамика представляет собой либо чистый феррит никеля (NiFe2O4), либо твердые растворы на его основе.

Из магнитострикционных материалов изготавливают сердечники электромеханических преобразователей (излучателей и приемников) для электроакустики и ультразвуковой техники, сердечники электромеханических и магнитострикционных фильтров и резонаторов, линий задержки. Их используют также в качестве чувствительных элементов магнитоупругих преобразователей, применяемых в устройствах автоматики и измерительной техники.

**3. Применение ферритов.**

Магнитомягкие ферриты с начальной магнитной проницаемостью 400 - 20000 в слабых полях во многих случаях эффективно заменяют листовые ферромагнитные материалы - пермаллой и электротехническую сталь. В средних и сильных магнитных полях замена листовых ферромагнетиков ферритами нецелесообразна, поскольку у ферритов меньше индукция насыщения.

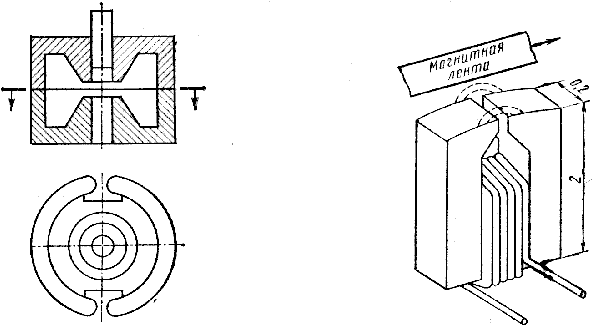
В табл.4 дана характеристика некоторых распространенных марок ферритов, выпускаемых в промышленном масштабе.

Магнитомягкие ферриты широко применяются в качестве сердечников контурных катушек постоянной и переменной индуктивностей, фильтров в аппаратуре радио- и проводной связи, сердечников импульсных и широкополосных трансформаторов, трансформаторов развертки телевизоров, магнитных модуляторов и усилителей. Из них изготавливают также стержневые магнитные антенны, индуктивные линии задержки и другие детали и узлы электронной аппаратуры.

Наиболее часто применяют ферритовые сердечники с замкнутой магнитной цепью. Такие магнитопроводы бывают либо монолитными, в виде единого тела (например, кольцевой сердечник), либо составными - из двух хорошо пришлифованных друг к другу частей, зазор между которыми по возможности мал. Составные магнитопроводы распространены шире монолитных, так как намотка проволоки на последние вызывает определенные трудности. В качестве примера на рис.4 показана конструкция составного сердечника закрытого (броневого) типа. Он состоит из двух одинаковых чашек и стержня-подстроечника, входящего в центральное отверстие. Перемещением подстроечника можно регулировать индуктивность катушки.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка | μн | (tgδ/μн) 106 при f, МГц | μmax | Hc,  A/м | Br, Тл | fкр, МГц | fгр, МГц | Тк, °С (не ниже) | ρ, Ом•м | Примечание |
| 20000НМ | 15000 | 25(0,01) | 35000 | 0,24 | 0,11 | 0,01 | 0,1 | 110 | 0,001 |  |
| 6000НМ | 4800-8000 | 40(0,02) | 10000 | 8 | 0,11 | 0,02 | 0,5 | 130 | 0,1 | Общее |
| 1000НМ | 800-1200 | 15(0,1) | 1800 | 28 | 0,11 | 1,0 | 5 | 200 | 0.5 |  |
| 1000НН | 800-1200 | 85(0,1) | 3000 | 24 | 0,1 | 0,4 | 3 | 110 | 10 |  |
| 600НН | 500-800 | 25(0,1) | 1500 | 40 | 0,12 | 1,2 | 5 | 110 | 100 |  |
| 2000НМ1 | 1700-2500 | 15(0,1) | 3500 | 25 | 0,12 | 0,5 | 1,5 | 200 | 5 | Термостабильн. |
| 700НМ1 | 550-850 | 8(3) | 1800 | 25 | 0,05 | 5 | 8 | 200 | 4 | для аппаратуры |
| 100ВЧ | 80-120 | 135(18) | 280 | 300 | 0,15 | 35 | 80 | 400 | 105 | с повыш. требо- |
| 20ВЧ2 | 16-24 | 280(30) | 45 | 1000 | 0,1 | 120 | 300 | 450 | 106 | ваниями |
| 300НН | 280-350 | 170(4) | 600 | 80 | 0,13 | 5 | 20 | 120 | 106 | Для конт. перес. |
| 9ВЧ | 9-13 | 850(150) | 30 | 1500 | 0,06 | 250 | 600 | 500 | 107 | подмагничиван. |
| 200ВЧ | 180-220 | 90(10) | 360 | 70 | 0,11 | 20 | - | 360 | 103 | Для широкопо- |
| 50ВЧ3 | 45-65 | 120(30) | 200 | 100 | 0,14 | 85 | - | 480 | 104 | лосных трансф. |

Табл.4 Свойства некоторых ферритов.



|  |  |
| --- | --- |
| Рис.5 Конструкция броневого ферритового сердечника. | Рис.6 Общий вид магнитной видеоголовки (указаны приблизительные размеры в мм) |

Монокристаллы магнитомягких ферритов находят довольно широкое применение при изготовлении магнитных головок записи и воспроизведения звукового и видеодиапазонов в магнитофонах. По сравнениюс металлическими ферритовые головки обладают высоким удельным сопротивлением (что важно для уменьшения потерь) и большей твердостью. Из-за высокой скорости движения магнитной ленты при видеозаписи к материалу головки предъявляются повышенные требования в отношении износоустойчивости.

Конструкция головки для магнитной записи показана на рис.5. Сердечник головки состоит из двух половин, склеенных стеклом, между которыми создается рабочий зазор 0,5-0,7 мкм. Такие сердечники изготавливают из монокристаллов марганец-цинковых ферритов, выращиваемых газоплазменным методом Вернейля.

**3.1 Ферритовые сердечники**

Современные устройства связи используют много деталей с ферритовыми сердечниками. Ферриты удовлетворяют серьезным требованиям, предъявляемым к современным элементам устройств связи, а также находят себе другие применения. Это, например, ферритовые антенны, однонаправленные изоляторы волноводов, модуляторы микроволн и т.д. Возможность изготовления ферритов различного состава увеличивает возможности их применения, благодаря чему ферриты перешагнули границы области применения, для которой они были первоначально разработаны, и стали применяться в технике ЭВМ, в технике регулирования измерений, а также в атомной технике.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Час-тота, Гц | 10 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 1010 |
| При-мене-ние  10  9  8  7  6  5  1  4  3  2 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Сер-деч-ники  Нели-нейные цепи  Броневые сердечники Mn-Zn Ni-Zn  150-100 100-50 50-20 20-10  Серд  Е  300-200 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Табл.5 Применение ферритовых сердечников, обеспечивающих достижение добротности не менее 100.

1 - телеграф 2 - телефон 3 - телефонная несущая 4 - звукозапись

Радио, радиолокация: 5 - ДВ 6 - СВ 7 - КВ1 8 - КВ2 9 - УКВ 10 - СВЧ.

**3.2. Запоминающие и переключающиеся цепи**

Успехи в развитии магнитомягких материалов в 60-е годы содействовали быстрому развитию математических машин и позволили осуществить новые конструкции электронных телефонных станций. Элементы, в которых эти материалы используются совместно с полупроводниковыми диодами или транзисторами, почти вытеснили менее надежные, имеющие большие габариты и менее экономичные детали, какими являются электронные лампы и реле. При проектированиикрупных машин для обработки информации нельзя обойтись без этих элементов.

Для указанных устройств обычно применяются металлические и ферритовые магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса. В некоторых запоминающих цепях, кроме этих материалов, применяются и другие.

**3.3. Принципы действия запоминающих и переключающихся цепей с сердечниками с прямоугольной петлей гистерезиса**

Толчок развитию запоминающих устройств на основе магнитных материалов дали постоянно повышающиеся к ЭВМ. По принципу действия элементы запоминающих устройств делятся на две группы. Первые требуют постоянного обновления поступающей информации. Так работают запоминающие устройства, основанные на принципе линии задержки. Вторые длительно сохраняют записанную информацию. У магнитных запоминающих устройств этой группы носителем информации является остаточная индукция магнитного материала. Эти устройства также делятся на два типа. У первого магнитный материал перемещается относительно катушки, применяемой для записи или чтения. Информацию можно получить только в определенный момент, а именно тогда, когда запись проходит как раз под считывающей катушкой. У второго типа, т.е. статических устройств магнитной памяти и других подобных им усройств, запись и чтение производятся перемагничиванием неподвижного ферромагнитного материала. Информацию можно получить в любой момент времени. Запоминающие устройства осуществляют запись информации с помощью двух возможных состояний запоминающего элемента, чаще всего обозначаемых индексами 0 и 1.

Магнитные переключающиеся цепи всегда имеют электрический выход, т.е. обмотку из провода с определенным сопротивлением. Переключение осуществляется изменением индуктивности или же изменением взаимосвязи у трансформатора, а поэтому может применяться только при переменном или импульсном напряжении и непригодно для постоянного тока.

Чтобы обосновать требования к магнитным материалам этих цепей, опишем кратко работу матричного магнитного запоминающего устройства, матричного переключающего устройства и устройства магнитной памяти, основанного на принципе односердечникового магнитного усилителя, где чаще всего применяются ферритовые сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса.

Запись информации в статические устролйства магнитной памяти заключается в перемагничивании тороидального сердечника из одного состояния в обратное. Два возможных состояния запоминающего элемента требуют представления информвции в бинарном (двоичном) виде, а поэтому необходимо значительное количество сердечников. Металлические сердечники дороги и имеют большие размеры, а поэтому развитие запоминающих устройств большой емкости стало возможно лишь после появления ферритов с ППГ. Рассмотрим принцип действия устройства на одном сердечнике (рис. 6). Через записывающую обмотку А проходит положительный токовый импульс, который намагничивает сердечник до насыщения. После исчезновения импульса сердечник будет находиться в состоянии индукции Вr, что соответствует записи 1. Состоянию 0 соответствует намагничивание в обратном направлении. Если теперь через обмотку В пройдет другой импульс отрицательной полярности, то сердечник перемагничивается из состояния 1 в состояние 0 и в выходной обмотке С индуцируется импульс напряжения. Если сердечник намагничен в отрицательном направлении, т.е. находится в состоянии 0, то считывающий импульс в обмотке В не вызовет перемагничивания сердечника.

Рис.7 Чтение и запись на магнитный сердечник

Выходное напряжение в обмотке С будет незначительным. Основанные на этом принципе устройства памяти имеют тот недостаток, что при считывании снимается первоначальная запись и информацию необходимо снова записывать. Существенными достоинствами такого устройства являются доступность информации в любой момент, очень малое время записи (порядка наносекунд) и сохранение информации без потребления энергии.

Практические магнитные матричные устройства памяти работают по принципу совпадения импульсов в двух обмотках. Такую схему иллюстрирует рис.8. Все обмотки имеют только один виток, а сердечники надеты в местах пересечения проводов А и В. Через провода А и В проходят импульсы тока такой величины, чтобы импульс тока в одном проводе не мог перемагнитить сердечник, а суммарный импульс тока в двух проводах перемагничивал его. При записи 1 через определенные провода А и В пройдут токи величиной Im/2, которые намагничивают только тот сердечник, в котором их действие складывается. Состояние остальных сердечников не изменяется.

Рис.8 Матричное запоминающее устройство

При чтении информации, записанной в сердечнике, в провода А и В подается импульс тока -Im/2, т.е. такой же, как для записи 0. Во всех сердечниках возникает магнитное поле с напряженностью -Hm/2, за исключением пересечения проводов А и В, где возникает суммарное поле с напряженностью Hm. Если при этом сердечник имел положительную остаточную индукцию, то он перемагничивается и в выходной обмотке С индуцируется импульс.

Сердечники запоминающих элементов не имеют идеально прямоугольной петли гистерезиса, а поэтому небольшой выходной импульс возникает и в сердечниках с состоянием 0. При большом числе сердечников в запоминающем устройстве важно, чтобы эти нежелательные импульсы оставались достаточно малыми и их можно было отличить от полезного сигнала. На записанную информацию повторное намагничивание половинными импульсами обратной полярности не должно оказывать влияния.

Трудно устранить нежелательные импульсы при чтении информации. Считывающая обмотка проходит через сердечники в попеременном направлении, чтобы нежелательные сигналы всех обмоток по возможности компенсировали друг друга. Это предполагает полную идентичность сердечников. При изготовлении отдельные сердечники получаются различными, а поэтому их необходимо сортировать. Для построения матрицы запоминающего устройства применяются только сердечники, имеющие различия лишь в очень узких допусках. Хорошие результаты получаются при дифференцировании импульсов по длительности. У большинства типов сердечников вредный импульс значительно короче импульса, вызванного перемагничиванием. Поэтому выходное напряжение считывается лишь после окончания вредного импульса, благодаря чему их различие достигает отношения около 200:1. Этот метод называется методом задержки считывания. Свойства запоминающего устройства улучшают и другие многочисленные меры, как, например, считывающие импульсы различной длительности, заканчивающиеся в один и тот же момент. Нежелательный сигнал одного ряда исчезает раньше, чем приходит импульс в другой ряд, и только половина сердечников оказывает влияние на выходной сигнал. Самый простой способ дифференциации - дифференциация по максимальному значению. Различие при этом достигает соотношения до 30:1.

Чтобы сердечники могли управляться малыми токами при одновитковой обмотке, необходимы сердечники с возможно меньшими размерами и коэрцитивной силой. Для записи информации сердечник намагничивается полем, превышающим коэрцитивную силу приблизительно в 2 раза. Скорость, с которой информация может быть занесена в матрицу и считана с нее, зависит от времени от начала токового импульса, намагничивающего сердечник, до снижения выходного напряжения до совершенно незначительной величины, т.к. перемагничивание крутыми токовыми импульсами происходит не мгновенно и длительность его для различных материалов различна.

Указаный тип запоминающих устройств работает с так называемым координатным выбором. Выбор сердечника производится подачей тока в провода обеих координат. Считывающая обмотка проходит через все сердечники и импульсы в ней складываются. При адресном выборе каждый столбец сердечника имеет самостоятельный выход, и при чтении в выбранный ряд (адрес) вводится полный ток для перемагничивания. После считвания информация тотчас обновляется. Одна и та же обмотка служит и для чтения и для записи. Через каждый сердечник проходят только два провода. Адресный выбор информации позволяет применять и менее качественные сердечники, в чем состоит его преимущество, т.к. для перемагничивания сердечников можно ввести больший токовый импульс, чем возникающий при совпадении двух импульсов величиной Im/2. Наоборот, сердечники, не лежащие на выбранном адресе, не намагничиваютя вообще и не создают помех. Применение одной обмотки для лвух целей требует переключения, а следовательно, большего количества переключающих элементов цепи. Этого можно избежать сдваиванием проводов столбцов. Отдельные конструкции запоминающих устройств отличаются друг от друга в деталях, а поэтому оптимальные рабочие параметры должны определяться в зависимости от сердечников и схемы, применяемой в рассматриваемом случае.

Систему сердечников в матричной схеме можно использовать также для переключения.

Рис.9 Магнитный матричный переключатель

Ее выгоды особенно отчетливы при большом числе переключающихся цепей. Такая переключающаяся схема заменяет большое число электронных ламп и требует меньше места и энергии. Пример переключающейся схемы приведен на рис.9. Сердечники, образующие матрицу, имеют обмотки Х и Y с несколькими витками. Кроме того, на каждом из них есть выходная обмотка. В исходном состоянии через обмотки одной линии проходит ток, в 2 раза больший тока, необходимого для насыщения. В поперечной обмотке тока нет. Если выбранный сердечник должен дать на выходе импульс, то ток в проводе Y прерывается, а в провод Х подается достаточно сильный токовый импульс. В результате происходит перемагничивание сердечника, находящегося на пересечении проводов Х и Y. Другие схемы переключающихся устройств используют постоянное подмагничивание всех сердечников другой обмотки; выходной импульс вызывается совпадением токов в проводах Х и Y. Выходы переключающейся схемы подходят к отдельным обмоткам матричного запоминающего устройства. Как и у запоминающих устройств, здесь необходимо ограничить влияние

Рис.10 Схема магнитного усилителя с одним сердечником.

вредных сигналов. Требование к прямоугольности сигналов у переключающихся цепей менее жесткие.

Тороидальные сердечники из материалов с ППГ широко применяются в магнитных логических цепях, которые заменяют электромеханические реле. Эти бесконтактные цепи значительно надежнее, не требуют ухода, могут работать гораздо быстрее, после заливки компаундом стойки к коррозионной атмосфере и сотрясениям, а срок службы их почти не ограничен. Единственным недостатком являтся цена, которая выше, чем цена реле. Магнитные логические цепи оправдали себя в устройствах, в которых основным требованием является надежность работы. Они применяются в промышленности для управления приводами, транспортерами, для сигнализации, в цифровой технике и в машинах для обработки информации.

Основным элементом таких схем является магнитный усилитель по схеме Рамея. Усиление невелико, оно только дает возможность управлять одним выходным сигналом несколькими управляющими цепями.

Основная схема однополупериодного магнитного усилителя Рамея приведена на рис.10. Сердечник с ППГ имеет две обмотки: рабочую и управляющую. Работу усилителя лучше всего рассмотреть отдельно в два полупериода. В персвом полупериоде (рабочем) ток проводит выпрямитель D2, благодаря чему сердечник насыщается.

В последующем управляющем полупериоде выпрямитель в цепи нагрузки не проводит тока, а во входной цепи проходит ток, определяемый разностью напряжений, который перемагничивает сердечник из состояния насыщения в обратном направлении. В следующем рабочем полупериоде сердечник намагничивается опять, и, как только он насытится, в остаток полупериода через нагрузку проходит полный ток. Если на входе нет напряжения, то сердечник всегда перемагничивается из одного состояния насыщения в обратное и через нагрузку проходит лишь незначительный намагничивающий ток. При полном входном напряжении, которое может быть переменным или постоянным, а также иметь форму отдельного импульса, сердечник все время остается насыщенным и через нагрузку в течение всего рабочего полупериода проходит полный ток. Усилитель Рамея сохраняет величину импульса напряжения, т.е. сердечник играет роль памяти. Выход запаздывает за входом всегда на один полупериод питающего напряжения. Каскадным включением нескольких таких усилителей получается переключающаяся линия задержки. При кольцевом соединении двух таких усилителей получается переключающаяся цепь. Усилитель с двумя и более параллельными входами служит в качестве суммирующего элемента. К материалу сердечников логических цепей предъявляются высокие требования. Это прежде всего большая относительная остаточная индукция, чтобы случайные импульсы помех не могли исказить записанную информацию. Кроме того, необходима как можно меньшая коэрцитивная сила, чтобы усиление было максимальным. Т.к. цепь нагружена с отбором мощности, индукция должна быть как можно большей.

На рис.11 показана цепь для логического перемножения. Напряжение на выходе будет только в том случае, если будет напряжение на всех трех входах А, В и С. Эта цепь заменяет последовательное соединение трех реле. Совместно с подобной цепью для логического суммирования и вычитания она позволяет составить произвольную сложную релейную схему. Основные схемы в качестве самостоятельных единиц встраиваются в виде коробки с многополюсным разъемом. Они вставляются в шкаф так же, как и электронные лампы и образуют, таким образом релейную схему.

Рис.11 Схема цепи логического перемножения

Логические цепи могут быть составлены также из обычных магнитных усилителей с обратной связью. Такая схема при данной частоте питающего напряжения более медленная. Для цепей управления приводами в промышленности в большинстве случаев применяется частота 50 или 400 Гц, а в счетных машинах - до 1 МГц. Для увеличения скорости применяются логические цепи с ферритовыми сердечниками, основанные на принципе совпадения.

**3.4. Требования к сердечникам с ППГ. критерии прямоугольности**

Требования к свойствам магнитных сердечников с ППГ, вытекающие из рассмотрения описанных устройств с их применением, можно сформулировать следующим образом:

1. Высокая индукция насыщения Bs, которая должна достигаться при малой напряженности магнитного поля. Это требование особенно важно для мощных устройств.

2. Малая коэрцитивная сила Hc, а следовательно, малая энергия, необходимая для перемагничивания сердечника.

3. Относительная остаточная индукция, выражаемая формулой b = Br/Bm должна быть как можно ближе к единице. Эта величина непостоянна и достигает максимума при определенном значении напряженности магнитного поля, которое также должно быть как можно меньше.

4. Коэффициент прямоугольности Rs = B(-0,5 Hm)/Bm должен быть как можно ближе к единице. Он определяется измерением индукции при напряженности Hm и -0,5Hm (рис). Коэффициент Rs также зависит от Hm и выражает прямоугольность точнее, чем относительная остаточная индукция, т.к. зависит от формы петли гистерезиса во II координатной четверти. Этот коэффициент применяется при использовании сердечников запоминающих устройств с записью по принципу совпадения. Типичная зависимость коэффициента прямоугольности Rs от напряженности поля Hm показана на рис.12

Рис.12 Типичная зависимость Rs от Hm

5. Малое время перемагничивания - это время, в течение которого наведенное напряжение уменьшается до 10% максимального значения.

6. Как можно большее удельное электрическое сопротивление. У металлических сердечников, кроме того, необходима достаточно малая толщина пластин. Величина удельного сопротивления и толщина пластин определяют потери на вихревые токи, а следовательно6 и максимальную рабочую частоту. Кроме того, они влияют на время перемагничивания.

Важность отдельных критериев сильно зависит от применения сердечников и различна для различных случаев. Необходимо отметить, что параметры пп 1-5 зависят как от формы токовых импульсов, так и от формы сердечника.

**4. Получение ферритов.**

Ферриты получают в виде керамики и монокристаллов. Благодаря невысокой стоимости и относительной простоте технологического цикла керамические материалы занимают ведущее место среди высокочастотных

магнетиков.

При изготовлении ферритовой керамики в качестве исходного сырья наиболее часто используют окислы соответствующих металлов. Общая технологическая схема производства ферритов во многом аналогична схеме производства радиокерамики. Однако при получении материалов с заданными магнитными свойствами предъявляются более жесткие требования к исходному сырью в отношении его химической чистоты, степени дисперсности и химической активности. В отличие от электрорадиокерамики ферритовая керамика совершенно не содержит стекловидной фазы; все процессы массопереноса при синтезе соединения и спекания изделий происходят лишь за счет диффузии в твердой фазе.

Исходные окислы подвергают тщательному измельчению и перемешиванию в шаровых или вибрационных мельницах тонкого помола, а затем после брикетирования или гранулирования массы осуществляют предварительный обжиг с целью ферритизации продукта, т.е. образования феррита из окислов. Ферритизованный продукт вновь измельчают и полученный таким образом ферритовый порошок идет на формовку изделий. Предварительно его пластифицируют, причем в качестве пластификатора обычно используют водный раствор поливинилового спирта.

Формование изделий наиболее часто осуществляют методом прессования в стальных пресс-формах. Высокой производительностью формовки отличается также метод горячего литья под давлением. В этом случае в качестве пластифицирующего и связующего веществ применяют парафин.

Отформованные изделия подвергают спеканию при температуре 1100-1400°С в контролируемой газовой среде. Контроль газовой среды особенно необходим на стадии охлаждения, чтобы предотвратить выделение побочных фаз. Наибольшей чувствительностью к изменению давления кислорода характеризуются ферриты марганца и твердые растворы на их основе. В процессе спекания завершаются химические реакции в твердой фазе, устраняется пористость, фиксируется форма изделий. За счет процесса рекристаллизации материал приобретает определенную зеренную структуру, которая существенно влияет на магнитные свойства керамики.

Ферриты являются твердыми и хрупкими материалами, не позволяющими производить обработку резанием и допускающим только шлифовку и полировку. Для этих видов механической обработки широко используют порошки карбида кремния и абразивные инструменты из синтетических алмазов.

Рассмотрим подробнее три наиболее распространенные технологические схемы производства ферритов.

**4.1. Основные технологические схемы изготовления ферритов**

Ферритовые изделия должны строго соответствовать требуемым магнитным и электрическим свойствам, геометрической форме и размерам. При этом должны быть использованы наиболее простые технологические схемы при минимальных затратах сырья, оборудования и энергии. Выход годных изделий должен быть максимальным для выбранной технологической схемы.

В основе технологии изготовления ферритов лежат технологические приемы, свойственные производству керамических изделий и изделий порошковой металлургии. Поэтому большая часть отдельных операций технологической схемы изготовления ферритов заимствована из технологической схемы изготовления керамических изделий и изделий порошковой металлургии.

Можно выделить три наиболее распространенные технологические схемы изготовления изготовления ферритов, основанных на:

1) механическом смешивании исходных веществ в виде окислов и солей металлов в количествах, соответствующих химическому составу получаемого феррита;

2) термическом разложении соответствующих солей металлов;

3) совместном осаждении соответствующих солей металлов или их гидратов

окислов.

**Технологическая схема получения ферритов на основе механического смешивания окислов и солей.** Исходными веществами для изготовления ферритов по этой технологической схеме являются окислы металлов, взятые в соотношении, отвечающем химической формуле получаемого феррита. Иногда часть окислов может быть заменена углекислыми солями одноименного с окислом металла. Такая замена не оказывает влияния на характер отдельных операций и общая схема процесса остается неизменной. Иногда эту технологическую схему называют окисной или керамической.

Кратко охарактеризуем каждую из операций технологической схемы. **Анализ исходных окислов и солей** производится для определения их физико-химических характеристик: качественного и количественного содержания примесей, величины и формы частиц порошкообразных окислов и солей, активности компонентов.

Анализ исходных солей (окислов)

Расчет химического состава и взвешивание

Растворение и

смешение

Перемешивание и помол

Растворение

Сушка смеси

Фильтрование

Обезвоживание

(нагрев)

Брикетирование (гранулирование)

Осаждение

Помол и смешение

Термическое разложение солей

Промывание

Брикетирование (гранулирование)

Контроль чистоты отмывки

Контроль чистоты отмывки

Контроль чистоты отмывки

Предварительный обжиг шихты

Вторичный помол и перемешивание

Сушка шихты

Введение пластификатора

Приготовление пресспорошка (шликера)

Формование изделий

Высокотемпературное спекание

Контроль и разбраковка

Рис.13 Основные технологические схемы изготовления ферритов.

Для получения заданного феррита исходная смесь должна содержать определенные количества составляющих ее окислов и солей. Для этого производят **расчет весовых значений окислов и солей и их взвешивание.**

Для получения однородной по химическому составу и размеру частиц смеси взвешенные в необходимых пропорциях исходные окислы и соли перемешивают и размалывают механическим путем. **Помол и перемешивание смеси** производят в виде сухих порошков (сухой помол), либо в какой-нибудь жидкости (мокрый помол).

При мокром помоле после окончания операции полученную смесь подвергают **сушке** до полного удаления влаги.

После перемешивания и помола смесь (иногда ее называют шихтой) **брикетируют и гранулируют.** Цель этих операций - придать шихте более компактную форму ( в виде цилиндрических брикетов, сферических гранул, таблеток) и обеспечить более полное, качественное протекание реакций, которые происходят на последующей стадии технологического процесса - **стадии предварительного обжига.**

Брикеты, гранулы или просто порошок, прошедшие операцию предварительного обжига, поступают на **вторичный помол и перемешивание.** Цель этой операции в общем та же, что и первого перемешивания и помола. Однако в этом случае процесс помола должен преобладать над процессом перемешивания, т.к. плотность и размер шихты после предварительного обжига значительно больше, чем в случае исходных окислов и солей.

**Сушка шихты после вторичного помола и перемешивания** (если эта технологическая операция производилась в какой-либо жидкости) аналогична сушке смеси после смешивания и помола исходных порошков.

Операция формования служит для придания полуфабрикату изделия необходимой формы. Для улучшения формования приготовляют пресспорошок (для шликерного литья - шликеры) - смесь порошка ферритовой шихты и связующих веществ, способствующих получению пластических свойств. Для этого в порошок вводят различные связки, способствующие сцеплению отдельных частиц и позволяющие формовать изделия достаточно прочные для проведения последующих операций.

Отформованные изделия проходят **высокотемпературное спекание.** Цель этой операции - получение ферритовых элементов с определенными магнитными и электрическими параметрами.

Спеченые изделия (ферриты) подвергают **контролю**, в т.ч. по внешнему виду (на отсутствие трещин, раковин, и т.д.); по геометрическим размерам (на соответствие чертежу); определению магнитных, электрических и физико-механических характеристик (на соответствие техническим условиям). По результатам контроля изделия разделяют на годные и бракованные.

**Технологическая схема, основанная на термическом разложении солей.** Эта технологическая схема имеет много общих операций с предыдущей. Отметим лишь те операции, которые ее отличают.

Термическое разложение солей связано с тем, что в качестве исходных веществ применяют растворимые сернокислые, азотнокислые, солянокислые соли металлов, соответствующих составу ферритов. Каждую соль грубо измельчают до размера частиц 1-2 мм и перемешивают. Затем соли помещают в соответствующий сосуд вместе с водой (в соответствии 1л воды на каждые 5 кг соли), нагревают смесь до кипения и после полного испарения воды подвергают окончательному обезвоживанию с целью удаления кристаллизационной воды путем дальнейшего нагрева смеси солей до 300°С. Процесс обезвоживания достаточно продолжителен (до 24 ч в зависимости от природы используемых солей). Следующей операцией является **термическое разложение солей** - прокаливание смеси при 900-1000°С в керамических сосудах (тиглях) до полного удаления газов - продуктов разложения. Длительность этой операции - 3-5 ч.

Следует отметить, что в случае термического разложения солей можно совместить операции прокаливания солей и предварительного обжига, в этом случае отпадает необходимость в брикетировании и гранулировании.

**Технологическая схема, основанная на совместном осаждении углекислых солей.**  Эта схема так же, как и предыдущая, имеет много общего с керамической схемой изготовления ферритов. Рассмотрим отличительные операции этой схемы. Соли смешивают и растворяют в дистиллированной воде. Растворы солей и осадителя после фильтрации постепенно сливают при непрерывном перемешивании, иногда нагревая смесь для ускорения процесса осаждения. Полученный осадок несколько раз промывают в воде или слабом растворе осадителя для удаления растворимых примесей. Чистоту отмывки контролируют на содержание определенных ионов (например, при растворении сернокислых солей осуществляется контроль на полноту отмывки от ионов SO4).

**Преимущества и недостатки различных технологических схем.** К преимуществам изготовления ферритов механическим смешиванием окислов и солей (керамический способ) можно отнести: возможность точного соблюдения заданного химического состава; отсуствие отходов и связанной с этим переработки меньших количеств сырья; отсутствие вредных выделений; простоту технологической схемы.

**Недостатки керамического способа** - необходимость тщательного измельчения и смешивания исходных солей и окислов для получения однородной химической смеси.

Преимущества остальных рассмотренных схем изготовления ферритов являются: получение очень однородных по химическому составу смесей, практически не нуждающиеся в дальнейшем перемешивании; получение высокой химической активности шихты. К недостаткам этих схем относятся: трудности, связанные с точным соблюдением химического состава ферритов из-за возможности потерь отдельных компонентов при растворении и осаждении ввиду различной растворимости исходных солей; необходимость переработки больших количеств исходных веществ; выделение отходов, загрязняющих воздух или сточные воды.

**4.2. Исходное сырье и материалы, применяемые для изготовления ферритов**

Ферриты получают при высокотемпературной обработке смеси окислов, вступающих между собой в реакцию в твердой фазе. Происходящая при этом взаимная диффузия ионов металлов приводит к образованию соединений типа МеFe2O4 или боле сложных типов в зависимости от природы феррита. Для взаимной диффузии ионов необходим контакт между отдельными частицами окислов (именно окислов, т.к. при разложении солей образуются также окислы, которые участвуют непосредственно в образовании феррита). Все факторы, приводящие к увеличению скорости взаимной диффузии ионов при нагревании смеси порошков, способствуют ускорению образования ферритов. К числу таких факторов относятся, например, величина частиц реагирующих веществ, взаимный контакт, и т.п.

Выпускаемые промышленностью окислы и соли, используемые для производства ферритов, различаются по их квалификации, например "Ч" - чистые, "ЧДА" - чистые для анализа, "ХЧ" - химически чистые и др. Эти окислы отличаются по степени частоты, т.е. количественному содержанию примесей. Например, никель углекислый (NiCO3), квалификации "ЧДА", выпускаемый промышленностью по ГОСТ 4466-48 содержит следующие примеси (в %): вещества, нерастворимые в соляной кислоте - 0,01; хлориды - 0,005; сульфиты - 0,01; железо - 0,001; кобальт - 0,05; цинк - 0,05; щелочные и щелочноземельные металлы (в виде сульфатов) - 0,4. В той же соли, но квалификации "Ч" содержание примесей больше. Кроме того, может измениться и качественный состав примесей.

Исходные вещества различаются также по размеру и форме частиц, удельной поверхности, активности. При этом сырье отличается по качественному содержанию примесей и содержанию влаги (влажности) как в различных партиях, так и в различных упаковках одной партии. Поэтому при производстве ферритов исходные материалы усредняют: перемешивают разные партии сырья и разные упаковки одной партии. Содержание основного вещества определяют на усредненных партиях сырья.

Реакция в твердой фазе (при нагреве порошков) протекает неодинаково в окислах, очищенных от примесей, и содержащих примеси. Установлено, что наличие некоторых примесей, как правило, способствует процессам, протекающим при реакции в твеердой фазе. Однако очень важно для каждого вида феррита определить допустимый качественный и количественный состав примесей, который позволит полусать одинаковые по характеристикам ферриты на различных партиях исходного сырья. От этого в большой степени зависят повторяемость и воспроизводимость технологического процесса получения ферритов.

Критерии оценки качества исходного сырья для производства ферритов должны быть установлены и по другим физико-химическим параметрам. До сих пор, однако, такие критерии для исходных веществ не выработаны. Поэтому возникает необходимость в подборе исходного сырья экспериментальным путем: изготовлением пробных партий ферритов из различных партий сырья и соответствующей корректировки технологических процессов.

Окись железа является основной составляющей частью всех ферритов. Ее физико-химические характеристики оказывают определяющее влияние на характеристики ферритовых элементов. Окись железа имеет три модификации: α - Fe2O3 - парамагнитная, γ и δ - Fe2O3 - обе ферромагнитные. Из них δ - Fe2O3 сохраняется лишь при низкой температуре и при нагреве до 110°С переходит в α - Fe2O3. Температурный интервал γ - Fe2O3 различен для разного состояния γ - Fe2O3 и свойств примесей. Обычно промышленная окись железа содержит смесь α - Fe2O3 и γ - Fe2O3, при этом наиболее активной составляющей является γ - Fe2O3. Чем выше ее содержание, тем активнее ферритовая шихта. Поэтому при производстве ферритов важно знать соотношение этих модификаций Fe2O3 в исходной окиси железа.

Процентное содержание их можно регулировать с помощью магнитного разделения γ и α модификаций, учитывая, что γ - Fe2O3 - магнитна, а α - Fe2O3 - немагнитна.

Активность исходной порошкообразной окиси железа зависит от формы и размера ее частиц. Наибольшей активностью обладает окись железа с "игольчатой" формой частиц, наименьшей - с "кубической". Чем мельче размер частиц порошка окиси железа, тем, как правило, выше активность. Т.к. удельная поверхность порошка обратно пропорциональна размеру его частиц, то активность окиси железа растет с увеличением удельной поверхности.

Физико-химические характеристики окиси железа (и других окислов) существенно зависят от способа получения ее из различных солей и других химических соединений.

Так, активность окиси железа, полученной из различных солей (сульфата, карбоната, оксалата, соли Мора), наибольшая у оксалата и наименьшая у сульфата.

Температура разложения солей, из которых получают исходные материалы для производства ферритов, также оказывают значительное влияние на физико-химические характеристики порошков. Так, например, разложение карбоната железа квалификации "ЧДА" при различных температурах (200, 400, 600, 800 и 100°С) в течение 4 часов снижает значение удельной поверхности (увеличивает средний размер частиц), получаемой Fe2O3. Окись железа с оптимальными свойствами, пригодными для производства ферритов получается при прокалке в интервале 400-650°С.

Окислы других металлов, используемые для получения ферритов, тоже имеют разлиные физико-химические характеристики, а также количественное и качественное содержание примесей. Характер влияния этих различий на свойства ферритов аналогичен влиянию окиси железа. Однако степень этого влияния меньше и зависит от относительного содержания окисла в феррите.

Таким образом, для получения ферритов с повторяющимися свойствами необходимо при выборе сырья осуществлять контроль по количественному содержанию основного вещества, качественному и количественному содержанию примесей и физико-химическим характеристикам порошков.

Многие вопросы конкретной стандартизации тех или иных параметров исходных веществ для производства ферритов еще не ясны и находятся в стадии экспериментального и теоретического изучения.

**5. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ ФЕРРИТОВ**

**5.1.** **Механические испытания ферритов.**

Целью механических испытаний ферритов является изучение деформаций образцов материалов при механических воздействиях и определение величины механических напряжений, вызывающих разрушение образцов*. Механические свойства материалов* - способность материалов сопротивляться деформированию и разрушению в сочетании со способностью упруго и пластически деформироваться под действием внешних механических сил.

Измерение механических характеристик различных материалов, в т.ч. и ферритов, имеет большое практическое значение, т.к. при конструировании, сборке и эксплуатации различных аппаратов, приборов, волноводов и других устройств, детали, изготовленные из феррита, могут подвергаться механическим усилиям, хотя иногда и кратковременным, но значительным по величине.

Создание напряженного состояния во время испытаний должно по возможности соответствовать тем условиям, в которых находятся детали или образцы при эксплуатации. Поэтому испытания материалов подразделяются сообразно видам нагружения, которым подвергаются образцы в процессе использования.

**Основные виды испытаний ферритов** следующие: 1) статические испытания на растяжение, сжатие, изгиб, кручение; 2) динамические испытания нп ударную прочность (вязкость); 3) испытания на твердость; 4) определение упругих постоянных динамическим способом.

Необходимо отметить, что при испытаниях образцов из ферритов наблюдается большой разброс результатов. Этот разброс в первую очередь объясняется различными технологическими факторами (различным давлением при прессовании, различием температуры обжига, наличием микротрещин, неоднородной зернистостью и т.п.)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Система феррита | Марка фер-рита | t,°C | Прочность, кг/см2 | | | | Модуль Юнга, Е×10-6 кг/см2 | Ударная прочность, а×10-2 | | Удельный вес, г/см3 | По-ристость, % | ТК  ЛР,  ×106 |
|  |  |  | раст. | сж. | изгиб | круч. |  | пов. | об. |  |  |  |
|  |  | -100 | 265 | 1800 | 550 | 190 |  |  |  |  |  |  |
|  | 10ВЧ1 | -50 | 210 | 2200 | 475 | 170 | 1,17-1,45 | 2,9 | 29,0 | 4,2-4,5 | - | - |
|  |  | +20 | 150 | 2600 | 380 | 155 |  |  |  |  |  |  |
| Высоко- |  | +100 | 115 | 3300 | 330 | 150 |  |  |  |  |  |  |
| частотные |  | -100 | 120 | 250 | 235 | 205 |  |  |  |  |  |  |
| никель- | 20ВЧ | -50 | 95 | 1000 | 190 | 170 | 0,45-0,55 | 2,95 | 22,3 | 3-3,2 | 34,5- | 5,8-6,5 |
| цинковые |  | +20 | 70 | 1050 | 150 | 140 |  |  |  |  | 42,0 |  |
| и др. |  | +100 | 65 | 1150 | 110 | 115 |  |  |  |  |  |  |
|  |  | -100 | 150 | 1300 | 300 | 220 |  |  |  |  |  |  |
|  | 50ВЧ2 | -50 | 125 | 1400 | 265 | 190 | 0,5-0,6 | 2,1 | 21,0 | 3,2-3,5 | 25-35 | 5,0-5,5 |
|  |  | +20 | 95 | 1550 | 210 | 155 |  |  |  |  |  |  |
|  |  | +100 | 70 | 1650 | 200 | 135 |  |  |  |  |  |  |
|  |  | -100 | 225 | 1400 | 395 | 346 |  |  |  |  |  |  |
|  | 1000НМ3 | -50 | 180 | 1600 | 345 | 260 | 0,9-1,1 | 2,37 | 23,2 | 3,8-4,2 | 12-20 | 9-9,8 |
|  |  | +20 | 120 | 1680 | 300 | 200 |  |  |  |  |  |  |
| Марганец- |  | +100 | 100 | 2500 | 265 | 180 |  |  |  |  |  |  |
| цинковые |  | -100 | 290 | 1450 | 535 | 290 |  |  |  |  |  |  |
|  | 2000НМ1 | -50 | 230 | 1500 | 490 | 215 | 0,8-0,95 | 2,54 | 23,7 | 3,8-4,1 | 9-15 | 9-11 |
|  |  | +20 | 160 | 1600 | 450 | 170 |  |  |  |  |  |  |
|  |  | +100 | 130 | 2000 | 410 | 150 |  |  |  |  |  |  |
|  |  | -100 | - | 3750 | 1350 | 495 |  |  |  |  |  |  |
|  | 1БИ | -50 | 290 | 2750 | 1000 | 450 | 1,1-1,5 | 2,3 | 23,0 | 4,4-4,7 | - | - |
|  |  | +20 | 260 | 2300 | 660 | 440 |  |  |  |  |  |  |
|  |  | +100 | 240 | 2250 | 585 | 505 |  |  |  |  |  |  |
|  |  | -100 | - | 3250 | 1150 | 710 |  |  |  |  |  |  |
| Бариевые | 2БА | -50 | 310 | 2350 | 1000 | 690 | 1,65-1,9 | 2,6 | 26 | 4,7-1,9 | - | - |
|  |  | +20 | 250 | 1950 | 750 | 490 |  |  |  |  |  |  |
|  |  | +100 | 240 | 2000 | 600 | 575 |  |  |  |  |  |  |
|  |  | -100 | - | - | 875 | - |  |  |  |  |  |  |
|  | 3БА | -50 | 420 | 2900 | 840 | 670 | 1,8-2,0 | 3,0 | 30,4 | 4,8-5,0 | - | - |
|  |  | +20 | 310 | 2200 | 770 | 490 |  |  |  |  |  |  |
|  |  | +100 | 265 | 2000 | 720 | 610 |  |  |  |  |  |  |
| Никель- | 55НН | +20 | 150 | 1100 | 315 | - | 1,7-1,72 | 1,8 | 10,5 | 4,9-5,3 | - | 5,7-6,5 |
| цинковые | 200НН2 | +20 | 160 | 1530 | 270 | - | 1,0-1,3 | 1,8 | 10,8 | 4,8-5,1 | - | 7,8-8,1 |
|  | 45НН | +20 | 76 | 1340 | 165 | - | 1,2-1,35 | 1,65 | 9,4 | 4,4-4,9 | - | 5,7-6,4 |

Табл.6 Сводная таблица механических характеристик некоторых марок ферритов

**5.2. Способы измерения и контроля магнитных свойств ферритовых материалов и изделий из них**

Все возрастающее разнообразие применяемых в автоматике, телемеханике и вычислительной технике ферритовых элементов вызывают необходимость усовершенствования старых и изыскания новых методов измерений их магнитных и механических свойств. Некоторые методы являются общими для большинства ферромагнитных материалов; к ним относятся большая часть испытаний на постоянном токе. По мере же появления новых областей использования магнитных элементов увеличивается разновидность самих элементов и методов их испытаний, разрабатываются специфические измерительные устройства. Причем методы испытаний приближены к условиям работы элемента в конкретном устройстве, а параметры отражают специфику поведения ферритовых материалов в каких-либо особых условиях.

**5.2.1. Методы измерения статических свойств ферритовых изделий**

Статические характеристики ферритовых элементов определяются в постоянных и близких к постоянным полях. При испытании ферритового образца на постоянном токе происходит очень медленный переход сердечника из одного магнитного состояния в другое, и перемагничивание протекает по статической петле гистерезиса. Параметры статической петли гистерезиса определяются баллистическим, магнитометрическим методами, методом осциллографирования петли гистерезиса и импульсного считывания.

**Баллистический метод.** Баллистический метод успешно применяется для определения статических петель гистерезиса любых магнитных материалов. Блок-схема баллистической установки приведена на рис.14. Процесс изменения индукции при изменении внешнего намагничивающего поля (т.е. снятие петли гистерезиса) определяется по отклонению рамки баллистического гальванометра. Угол отклонения пропорционален количеству электричества, протекающего через рамку гальванометра. Зная этот угол, можно определить изменение индукции образца при данном значении напряженности, или изменение напряженности поля пи изменении коэрцитивной силы.

Рис.14 Блок-схема баллистической установки

А-амперметр, R-реостат, Р-переключатель БГ-баллистический гальванометр

W1 и W2 - намагничивающая и измерительная обмотки измеряемого образца.

Баллистический метод позволяет строить по отдельным точкам петлю гистерезиса ферромагнитных материалов при различных напряженностях внешнего магнитного поля и определять соответствующие статические параметры образцов с точностью до 1-3 %. Основными недостатками этого метода являются большая трудоемкость, невозможность непрерывного произведения измерений и автоматизации этого процесса.

**Магнитометрический метод.** Для определения магнитых характеристик на постоянном токе в технике широко применяется также магнитометрический метод. В его основу положен эффект воздействия исследуемого образца на стрелку магнитометра. По углу отклонения магнитной стрелки прибора измеряется магнитный момент образца. Магнитометрический метод позволяет определить основную кривую намагничивания, петлю гистерезиса, магнитный момент, магнитную восприимчивость исследуемых образцов.

**Метод осциллографирования петли гистерезиса.** Этот метод основан на непосредственном визуальном наблюдении петли гистерезиса на экране осциллографа. Подобного рода приборы условно разделены на ферротестеры (проводят грубую качественную оценку параметров путем сопоставления на экране петли гистерезиса испытуемого образца с эталонной) и феррографы, гистерографы, петлескопы (для количественной оценки).

Рис.15 Блок-схема установки для осциллографического наблюдения петли

гистерезиса ферритов.

R - реостат, W1 и W2 - намагничивающая и измерительная обмотки образца,

С - емкость.

При таком методе измерения статических параметров ферромагнтных образцов внешнее магнитное поле не является постоянным. Однако частота изменения поля такова, что с некоторой погрешностью создаваемое поле можно приравнивать к постоянному.

К достоинствам метода осциллографирования можно отнести оперативность оценки свойств отдельных малогабаритных сердечников путем наблюдения как частных, так и предельных петель гистерезиса.

На рис.15 приведена блок-схема установки с использованием электронного осциллографа.

**Метод импульсного считывания.** Метод заключается в том, что в испытываемом образце создается поочередно поток от напряженности поля постоянного тока и поток "считывания" от импульсного тока, направленный навстречу. При этом поле импульса должно быть достаточным для перемагничивания по предельной петле гистерезиса. Сигнал с измерительой обмотки подается на импульсный милливольтметр.

Рис.16 Блок-схема установки для определения статических характеристик ферритов

импульсным методом.

А - амперметр, R1 - реостат, ГИТ - генератор импульсного тока, МВ -

милливольтметр, R2 - сопротивление.

Точки восходящего участка петли гистерезиса получаются последовательным увеличением намагниченности постоянного поля и фиксацией соответствующего сигнала.

Чувствительность этого метода на несколько порядков выще баллистического. Однако погрешность измерений выше и составляет величину порядка 5-10 %.

К достоинствам этого метода следует отнести возможость автоматизации автоматизации измерения статических характеристик ферритов.

Блок-схема установки для измерения статических характеристик ферритов методом импульсного считывания приведена на рис.16.

**5.2.2** **Методы измерения импульсных свойств ферритовых изделий и способы их автоматизации**

Методы испытаний магнитомягких ферритов в импульсных полях определены ГОСТ 12635-67 "Методы испытаний в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц" и ГОСТ 12636-67 "Методы испытаний в диапазоне частот от 1 до 200 МГц". При этом в диапазоне частот от 1 до 200 МГц измеряют, как правило, в слабых полях, следующие параметры: начальную магнитную проницаемость μн, тангенс угла диэлектрических потерь δ, температурный коээффициент начальной магнитной проницаемости ТКμ, а в диапазоне выше 200 МГц - параматры СВЧ, т.е. ширину резонансной кривой, напряженность резонансного поля.

Для измерения tgδ и ТКμ резонансным и индукционным методами используют различные стандартные приборы и установки: низкочастотный измеритель индуктивности ЭМ18-2 (с рабочей частотой до 10 кГц), установку для измерения индуктивности и сопротивления УИМ-1 (с диапазоном частот от 10 кГц до 1 МГц), установки для испытания магнитных материалов УИММ-2 и УИММ-3 (с диапазоном частот от 20 кГц до 1 МГц), измеритель добротности Е9-4 ( с диапазоном частот от 50 кГц до 35 МГц).

Испытания на частотах свыше 200 МГц проводятся на ферритах, применеяемых для устройств СВЧ диапазона. Методы и аппаратура для испытания в СВЧ диапазоне отличается повышенной сложностью и трудны для упрощенного описания. Поэтому ограничимся лишь указанием нормативных документов, определяющих методики испытания образцов в СВЧ диапазоне: ГОСТ 12637-67 и нормаль НПО.707.006.

Рассмотренные выше методы измерения магнитных характеристик в постоянном и переменном магнитных полях имеют ряд общих недостатков:

а) сложность и длительность измерений и вычислений;

б) необходимость испытания образцов определенной формы и размеров и нанеснения многовитковых обмоток.

Объемы же производства и специфики использования изделий из магнитомягких ферритов требуют проведения массового контроля их магнитных параметров. Проведение такого контроля невозможно без применения автоматических средств измерения.

Рассмотрим кратко автоматические средства для измерения характеристик магнитомягких ферритов.

Для измерения магнитной проницаемости, потерь, температурной стабильности, коэрцитивной силы и остаточной индукции магнитомягких материалов применяются автоматические установки. В качестве намагничивающей и измерительной обмоток в этих установках служит раздвоенная игла, которая обеспечивает одновременно его намагничивание и снятие сигнала с выходной обмотки. Если при этом обеспечивается автоматическая подача образцов на измерительный столик, автоматическое опускание и подъем иглы, то такое устройство обеспечивает быстрый автоматический контроль параметров всех изготовляемых деталей. В таком устройстве величина измеряемого параметра не расчитывается, а выводится в необходимых единицах измерения на цифровой прибор с одновременной автоматической записью его на ленту печатающего устройства. Необходимые импульсные программы поступают автоматически с соответствующего блока.

**ВЫВОДЫ**

Ферриты и изделия из них начиная с момента их изобретения нашли наиболее широкое применение в радиоэлектронике и вычислительной технике среди других магнитомягких материалов. Кроме того, что ферритовые изделия в большинстве случаев могут эффективно заменить изделия из других материалов, они обладают рядом уникальных физико-химических, магнитных и электрических свойств, не присущих ни одному другому материалу.

Применение ферритовых изделий в вычислительной технике позволило значительно ускорить процесс вычислений благодаря возможности значительной миниатюризации запоминающих устройств и устройств переключения.

Несмотря на значительный прогресс в области производства интегральных схем высокой степени миниатюризации и связанное с этим некоторое падение интереса к ферритовым сердечникам как к устройствам памяти, изделия подобного рода все еще находят довольно широкое применение в устройствах управления различными процессами и контроля выпускаемых изделий в промышленности.

С другой стороны, прогресс в области производства интегральных схем и производство автоматов на их основе позволило значительно улучшить контроль качества при производстве ферритов, что в свою очередь позволило выпускать ферритовые изделия с более точными характеристиками.

Применение ферритовых сердечников в радиоэлектронной аппаратуре в качестве сердечников катушек и основ для магнитных головок воспроизводящей и записывающей аппаратуры на данный момент является наиболее обширным. По своим характеристикам ферритовые сердечники не имеют аналогов по соотношению цена/качество среди других материалов и применяются в очень широком диапазоне приборов: от любительской техники до высокоточных промышленных аппаратов.

**литературA.**

1. З.Фактор и др. Магнитомягкие материалы. М.: Энергия, 1964 — 312 с.

2. Э.А.Бабич и др. Технология производства ферритовых изделий. М.: Высшая школа, 1978, 1978 — 224 с.

3. В.А.Злобин и др. Ферритовые материалы. Л.: Энергия, 1970 --112 с.

4. В.В.Пасынков, В.С.Сорокин. Материалы электронной техники, М.: Высшая школа, 1986 — 367 с.

5. Ю.В.Корицкий и др. Справочник по электротехническим материалам. Т.3, Л.: Энергоатомиздат, 1988 — 728 с.