

Тема 1. Электрорадиоматериалы радиоэлектронных средств

Лекция 3. Магнитные материалы

Вопросы:

- 3.1 Основные параметры магнитных материалов. Классификация материалов по магнитным свойствам
- 3.2 Магнитомягкие и магнитотвердые материалы и области их применения
- 3.3 Ферриты и магнитодиэлектрики.

Литература

1. Петров К.С. Радиоматериалы и радиокомпоненты.

3.1 Основные параметры магнитных материалов. Классификация материалов по магнитным свойствам.

Магнитные материалы, магнетики – материалы, вступающие во взаимодействие с магнитным полем, выражающееся в его изменении, а также в других физических явлениях: изменении физических размеров, температуры, проводимости, возникновению электрического потенциала и т.д.

В основном, магнитные материалы делят на две большие группы - магнитотвердые материалы и магнитомягкие материалы. Однако в настоящее время в связи с успехами в науках, изучающих магнетизм, появились новые большие группы магнитных материалов: магнитострикционные материалы, магнитооптические материалы, термомагнитные материалы.

(*Магнитострикция* - явление, при которой изменение состояния намагниченности тела приводит к изменению его объема и линейных размеров.)

Магнитные свойства материалов определяются следующими основными параметрами:

1. *Напряженностью H* магнитного поля, измеряемого в А/м:

$$\text{Для прямолинейного проводника } H = \frac{I}{2\pi r}; \quad (3.1)$$

$$\text{Для кольцевого проводника } H = N_{\phi} I / \pi d_{CP}, \quad (3.2)$$

здесь I - постоянный ток в проводнике; r - расстояние от проводника до точки, в которой определяется H ; N_{ϕ} - число витков намагничивающей обмотки; $d_{\text{ср}}$ - средний диаметр кольцевого проводника.

2. Намагниченностью (интенсивностью намагничивания) M (А/м)

$$M = m/V, \quad (3.3)$$

где V – объем тела; m - магнитный момент тела.

3. Магнитной восприимчивостью χ_m (безразмерная).

$$\chi_m = M/H \quad (3.4)$$

Характеризует способность вещества изменять свой магнитный момент под действием внешнего магнитного поля ($\chi_m = 0$ – в воздухе).

4. Магнитная индукция B (Тл) –

$$B = \mu_0(H + M), \quad (3.5)$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м = $1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м - магнитная постоянная.

5. Абсолютная магнитная проницаемость μ_a (Гн/м или Тл/А/м)

$$\mu_a = B/H = \mu_0\mu. \quad (3.6)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость (безразмерная).

Перечисленные выше формулы могут быть связаны между собой соотношениями:

$$\mu = \frac{B}{H\mu_0}, \quad (3.7) \quad \mu = 1 + \chi_m. \quad (3.8)$$

По поведению в магнитном поле все материалы делят на группы (основные):

- диамагнетики ($\chi_m < 0, \mu < 1$);
- парамагнетики ($\chi_m > 0, \mu > 1$) (марганец, вольфрам, платина);
- ферромагнетики ($\mu \gg 1$) (железо, кобальт, никель);
- ферримагнетики ($\mu \gg 1$).

Принадлежность к группе определяется строением электронных оболочек атомов.

Магнитные характеристики вещества, во многих отношениях, формально сходны с его диэлектрическими характеристиками. Наведенная магнитная поляризация аналогична наведенной диэлектрической поляризации.

Существуют атомы и молекулы с постоянными магнитными диполями, ряд материалов обладает намагниченностью.

Однако, существуют индивидуальные электрические заряды («+», «-») одного знака, соответствующих магнитных зарядов не существует; все магнитные поля создаются замкнутыми токами.

Установлено, что магнитное поле в телах возбуждается, в основном, электронами, которые вращаются вокруг собственной оси (спин) и вокруг ядра атома. Движение электронов представляет собой электрический ток, а прохождение тока сопровождается возникновением магнитного поля. Электроны при своем движении внутри атомов создают внутриатомные токи, возбуждающие магнитные поля.

Орбиты вращения отдельных электронов в атомах могут находиться в различных положениях друг относительно друга, следовательно, в таких же положениях находятся и создаваемые движущимися электронами магнитные поля. Таким образом, среда, в которой возбуждается магнитное поле, воздействует на него, усиливая или ослабляя это поле.

Материалы, магнитное поле которых ослабляет результирующее поле, называются **диамагнитными**.

Материалы, слабо усиливающие магнитное поле, называются **парамагнитными**.

Материалы, в которых значительно усиливается магнитное поле, называются **ферромагнитными** (железо, никель, кобальт, гадолиний и их сплавы).

При помещении какого-либо тела в магнитное поле каждый элемент объема этого тела приобретает магнитный момент. Если тела обладает ферромагнитными свойствами, то намагниченность может остаться и после устранения внешнего источника магнитного поля.

Явление отставания кривой намагниченности H при многократном перемагничивании называется петлей гистерезиса и показано на рисунке 3.1. Для описания гистерезисных свойств ферромагнитных материалов использу-

ются понятия остаточной индукции B_r и коэрцитивной силы H_c , смысл которых понятен из рисунка.

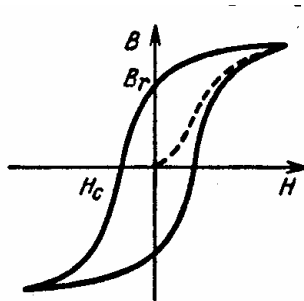


Рисунок 3.1

Назначением магнитных материалов, используемых в радиоэлектронике, является:

- придание особых свойств элементам радиоэлектронных устройств;
- создание устройств, обладающих запасом энергии;
- использование в качестве конструкционных материалов и электромагнитных экранов.

Например,

1. Магнитные материалы используются для усиления (увеличения) магнитного поля в катушках индуктивности, что приводит к увеличению индуктивности. $L = SH\mu / I$ (H - напряженность магнитного поля; S - площадь, охватываемая витками; μ - абсолютная магнитная проницаемость; I - амплитуда электрического тока).

2. В громкоговорителях, для создания движения диффузора, который приводится в движении при взаимодействии переменного поля катушки и постоянного поля магнита и создает колебание воздуха.

3. В электроизмерительных приборах, где поле рамки взаимодействует с постоянным магнитом (полем) и рамка отклоняется на тот или иной угол, фиксирует величину тока, протекающую через обмотку рамки.

4. В магнитных головках магнитофонов, в отклоняющих устройствах и фиксирующих в ЭЛТ, в магнитных усилителях, двигателях, в устройствах памяти, переключающих устройствах и т.д.

3.2 Магнитомягкие и магнитотвердые материалы и области их применения

Деление осуществляется следующим образом. К магнитомягким материалам относят материалы, намагничивающиеся до насыщения и перемагничивающиеся в относительно слабых магнитных полях (напряженностью порядка 8..800 А/м). Данные материалы характеризуются высокой магнитной проницаемостью, низкой коэрцитивной силой, малыми потерями на гистерезис и вихревые токи. Подразделяются на материалы для техники слабых токов (например, пермаллой, пермендюр, смешанные ферриты, феррогранаты) и электротехнические стали. К магнитомягким материалам специального назначения относятся термомагнитные сплавы и магнитострикционные материалы.

Магнитотвердые материалы намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в сравнительно сильных магнитных полях напряженностью в тысячи и десятки тысяч А/м. Характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы, остаточной магнитной индукции, магнитной энергии на участке размагничивания («спинка» петли гистерезиса). В качестве магнитотвердых материалов используются, например, сплавы типа магнико, ални, ви-каллой, некоторые ферриты, соединения редкоземельных элементов с кобальтом.

Применяются магнитомягкие материалы в тех случаях, когда необходимо при наименьшей затрате энергии достичь наибольшей индукции. Из них изготавливаются сердечники для трансформаторов, электромагниты, измерительные приборы.

Рассмотрим свойства магнитомягких материалов более подробно.

Технически чистое железо – содержит небольшие примеси углерода (<0,1%), серы, марганца, кремния и др., ухудшающие свойства.

$$\mu_{\max} = 4000; H_c = 8 \text{ А/м}; B_r = 1,65 \text{ Тл.}$$

Благодаря низкому удельному сопротивлению ($\rho = 10^{-5} \text{ Ом*см}$) используется редко, только для магнитопроводов, работающих при постоянном токе. Низ-

коуглеродистая электротехническая листовая сталь. Содержит 0,04% углерода и не свыше 0,6% других примесей. $\mu_{\max} = 3500..4500$; $H_c = 64..968$ А/м.

Пермаллой. Сплав $Fe - Ni$. Легированные хромом, молибденом, кремнием, медью. Обладают высокими относительной магнитной проницаемостью μ , удельным электрическим сопротивлением ρ , остаточной индукцией B_r и малой коэрцитивной силой H_c . Делятся на:

- высоконикелевый сплав (до 72 – 80% Ni), μ_{\max} до 45000, $B_r = 1,5$ Тл, $\rho = 45 \cdot 10^{-6}$ Ом*см;
- низконикелевый сплав (до 40 – 50% Ni), μ_{\max} до 150000, $B_r = 75$ Тл, $\rho = 9 \cdot 10^{-6}$ Ом*см.

Различия в свойствах материалов определяют и области их применения. Так, высоконикелевые сплавы используются при работе на постоянном токе, низконикелевые в переменных полях повышенной частоты. Изделия из пермаллоя очень чувствительны к механическим воздействиям (ударам, изгибам и т.д.), поэтому они транспортируются в специальной таре.

Применение:

Марки 45Н и 50Н. $B_r = 1,5$ Тл используются в качестве магнитопроводов дросселей, реле, трансформаторов (силовых) и цепей, работают без постоянного или с малым подмагничиванием.

Марки 50НП, 60НП, 34НКМП с повышенным или высоким μ , обладают кристаллографической текстурой и ППГ при $B_r = 1,5..1,3$ Тл. Используются в качестве сердечников магнитных устройств и коммутирующих дросселей, а также сердечников для вычислительных машин.

Марка 50 НХС (легированные хромом и кремнием) с повышением μ и возрастает удельное электрическое сопротивление ρ при $B_r = 1$ Тл. Используются для магнитов, работающих без постоянного или с небольшим подмагничиванием.

Марки 79НМ, 80 НХС, 76 НХД – (повышенная температурная стабильность). С высоким μ в слабых полях при $B_r = 0,65..0,75$ Тл. Используется для

сердечников малогабаритных трансформаторов, дросселей, реле, импульсных трансформаторов, магнитных усилителей и магнитных экранов.

Пермендюр. Сплав $Fe - Co$ (50%) – ванадий (1,8%). Введение кобальта позволяет увеличить при намагничивании суммарно магнитный момент в единице объема. Легирование ванадием улучшает технологические свойства: легче обрабатывается в холодном состоянии. Обладает высокой индукцией насыщения $B_r = 2,45$ Тл. При наличии сильного постоянного поля обладает высокой и стабильной $\mu_{обр}$.

Недостатки: высокая стоимость и низкое электрическое сопротивление $\rho = 18 \cdot 10^{-6}$ Ом*см.

Использование: сердечники в измерительных приборах, работающие с подмагничиванием, в магнитных осциллографах, в динамических громкоговорителях.

Перминвар (железоникелевокобальтовые сплавы) (25% Co , 45% Ni) имеет постоянное значение μ и малые потери на гистерезис в слабых полях. В слабых полях материал обладает настолько узкой петлей гистерезиса, что она сливается в одну линию. По мере увеличения поля петля расширяется. Перминвары обладают большой амплитудной стабильностью и значительной магнитной нестабильностью.

Магнитотвердые материалы применяются для изготовления

- постоянных магнитов;
- материалов для записи и длительного хранения информации.

Необратимые процесс намагничивания не превосходят долей процента. Однако тряска и удары вызывают значительное изменение свойств. После нескольких тысяч ударов остаточная индукция B_r снижает на 2..3%, затем мало меняется. Вибрация не вызывает изменений больше чем на 1%.

3.3 Ферриты и магнитодиэлектрики

Ферриты относят к классу ферромагнетиков и представляют собой соединения оксида железа с оксидами других металлов. Наибольшее распространение получили никель-цинковые и марганцево-цинковые ферриты.

Изготовление ферритов во многом напоминает изготовление керамики. Сначала изготавливают ферритовый порошок из смеси окислов. Далее добавляется пластификатор (5..10% всей массы) для облегчения формования (парафин, глицерин, поливиниловый спирт). Производится формовка деталей и обжиг в печи.

По структуре различают:

- одинарные (моноферриты) – магнетит $FeO - Fe_2O_3$;
- двойные ферриты (биферриты) – никельцинковый $(Ni_a + Zn_b)Fe_2O_4$;
- многокомпонентные (полиферриты) $(Ca_a + Ni_b + Zn_c)Fe_iO_4$.

Моноферриты имеют невысокую относительную магнитную проницаемость ($\mu < 10$) и только некоторые материалы имеют большее значение данного показателя, например моноферрит марганца ($\mu \sim 250$). Однако такие значения достигаются с трудом и редко воспроизводятся при повторном изготовлении.

Биферриты – твердые растворы феррита, марганца или никеля с антиферромагнетиком цинка или кадмия. Полиферриты – различные твердые растворы нескольких ферритов: литий – цинковые, никель – цинковые, медно – кадмиевые и т.д. Наибольшее распространение получили:

- никельцинковые;
- литийцинковые;
- марганцевоцинковые;
- магниймарганцевые.

Магнитная проницаемость ферритов достигает 5-6, тангенс потерь близок к диэлектрикам, сочетание свойств обусловило широкое применение в РЭА.

Основные параметры ферритов:

1. Высокое до $10^7 \dots 10^8$ Ом•м удельное электрическое сопротивление.
2. Электродинамические свойства ферритов зависят от частоты, но изменяются в различных пределах. В диапазоне СВЧ на сантиметровых волнах величина относительной магнитной проницаемости приближенно равна единице.
3. Рабочий диапазон частот ферритов - от 20МГц до 150ГГц. Для работы на разных частотах используются различные материалы.

Применение: 1. В диапазоне СВЧ наблюдается резонансное поглощение. Явление применяется для построения аттенюаторов, быстродействующих переключателей.

2. Использование явления Фарадея, наблюдаемого в ферритах при подмагничивании постоянным магнитным полем, позволяет применять ферриты для построения вентильных устройств в дециметровом диапазоне волн, а также управляемых модуляторов в инфракрасном диапазоне.

3. Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса получили широкое распространение в вычислительной технике, в устройствах автоматического управления в качестве элементов, обладающих устойчивым состоянием, которое характеризуется двумя значениями остаточной индукции B_r . Информация представляется в двойной системе счисления.

Магнитодиэлектрики – это материалы, формируемые из размельченного ферромагнетина с применением связующих диэлектрических компонентов.

Необходимость в разработке магнитодиэлектрических материалов обусловлена возможностью расширения степеней управления электромагнитным полем, возбуждаемым антеннами.

Основой для магнитодиэлектриков является никкоэрцитивный ферромагнетик. Его свойства в значительной степени зависят от выбранного материала или сплава.

Наибольшее распространение получили:

- альсифер (сплав $Al+Si+Fe$, μ порядка нескольких сотен. Особенностью является отрицательный коэффициент температурной стабильности, что позволяет использовать данный материал для температурной компенсации);
- карбонильное железо (применяется для изготовления броневых сердечников, подстроечных сердечников, гладких и резьбовых тороидов. Рабочий диапазон частот 30..60 МГц);
- пермаллой (используются для изготовления тороидальных, цилиндрических и броневых сердечников катушек, дросселей, трансформаторов);
- магнетит.