

[Радиоматериалы и радиокомпоненты]

[210303.65 «Бытовая радиоэлектронная аппаратура»

210305.65 «Средства радиоэлектронной борьбы» ]

[ИИБС, кафедра Электроники]

[Преподаватель Останин Борис Павлович]

---

# Радиоматериалы и радиокомпоненты

---

## Раздел 1

### Свойства радиоматериалов.

#### Лекция 4

# МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА РАДИОМАТЕРИАЛОВ

## МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА РАДИОМАТЕРИАЛОВ

Первопричиной магнитных свойств радиоматериалов являются внутренние скрытые формы движения электронов. При орбитальном движении электронов в атомах возникают орбитальные магнитные моменты. У полностью заполненных оболочек он равен нулю. При вращении электронов вокруг своей оси возникают спиновые магнитные моменты. У полностью заполненных оболочек он также равен нулю. Результирующий магнитный момент атома равен сумме орбитального и спинового магнитных моментов.

Любой материал, независимо от того, обладают или не обладают его атомы собственным магнитным моментом, при помещении в магнитное поле, приобретает некоторый магнитный момент  $M$ . Магнитный момент единицы объёма материала называют *намагниченностью*.

$$I_M = \frac{M}{V}$$

Намагниченность пропорциональна напряжённости магнитного поля  $H$ :

$$I_M = k_M H$$

$k_M$  - *магнитная восприимчивость* - безразмерный коэффициент, характеризующий способность материала намагничиваться в магнитном поле.

Намагниченное тело, находясь в магнитном поле, создаёт собственное магнитное поле, которое суммируется с внешним полем. В результате суммарная *магнитная индукция*  $B$ :

$$B = B_0 + B_i = \mu_0 H + \mu_0 I_M = \mu_0 (H + I_M) = \mu_0 H (1 + k_M) = \mu_0 \mu H$$

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Гн/м - *абсолютная магнитная проницаемость вакуума* (у воздуха почти такая же),

$\mu = 1 + k_M$  - *относительная магнитная проницаемость*, показывающая во сколько раз магнитная индукция  $B$  поля в данном веществе больше, чем магнитная индукция  $B_0$  в вакууме.

### *По реакции на внешнее магнитное поле*

- 1. Диамагнетики*
- 2. Парамагнетики*
- 3. Ферромагнетики*
- 4. Антиферромагнетики*
- 5. Ферримагнетики*

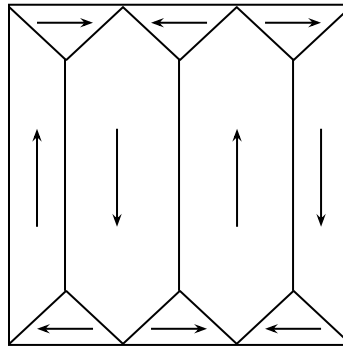
*Диамагнетики* – материалы (золото, серебро, медь, кремний, германий и другие), атомы которых не обладают собственным магнитным моментом. При помещении такого материала в магнитное поле в нём индуцируется магнитный момент, направленный навстречу направлению поля, поэтому магнитная восприимчивость  $k_M$  отрицательна и составляет

$$k_M = -(10^{-6} \dots 10^{-7})$$

**Парамагнетики** – материалы (щелочные и щёлочноземельные металлы, соли железа, кобальта, никеля и другие), атомы которых обладают собственным магнитным моментом. Под действием внешнего поля магнитные моменты атомов ориентируются в направлении поля и усиливают его. Магнитная восприимчивость  $k_M$  парамагнетиков положительна и составляет

$$k_M = (10^{-3} \dots 10^{-6})$$

**Ферромагнетики** – материалы (железо, никель, кобальт и некоторые сплавы), в которых атомы, обладающие собственным магнитным моментом, расположены настолько близко к друг другу, что между ними возникает обменное взаимодействие, приводящее к уменьшению энергии системы взаимодействующих атомов. При таком взаимодействии происходит обмен электронами недостроенных внутренних электронных оболочек атомов, в результате чего магнитные моменты взаимодействующих атомов приобретают одинаковое направление. Атомы с одинаковым (параллельным) направлением магнитных моментов группируются в микроскопические области, называемые *доменами*. Размеры и форма доменов определяются из условия минимума энергии системы. Энергетически выгодна структура с боковыми замыкающими доменами.



При такой структуре доменов магнитный поток замыкается внутри образца. За его пределами магнитное поле отсутствует. Под воздействием внешнего магнитного поля изменяются размеры и границы доменов, и происходит намагничивание образца, при этом магнитная восприимчивость достигает  $10^5 \dots 10^6$ .

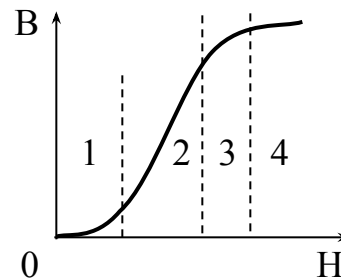
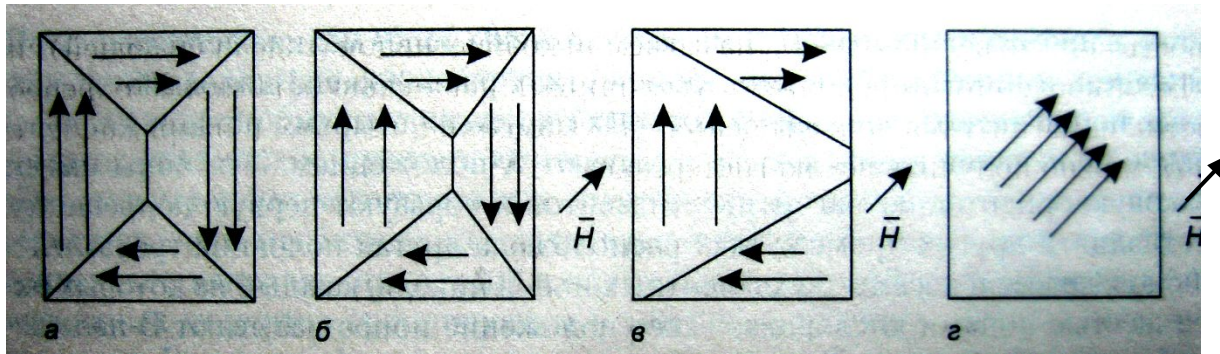


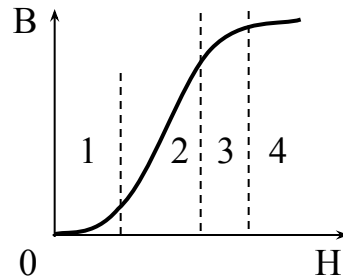
**Антиферромагнетики** – материалы (хром, марганец, и другие), в которых в результате обменного взаимодействия происходит антипараллельная ориентация магнитных моментов атомов, поэтому собственный магнитный момент у них отсутствует. Магнитная восприимчивость положительная и невысокая ( $10^{-3} \dots 10^{-5}$ ).

**Ферримагнетики** – материалы, в которых обменное взаимодействие происходит косвенно, через немагнитные ионы кислорода. В результате такого взаимодействия образуются магнитные моменты, ориентированные в противоположные стороны, но их количество неодинаково, поэтому у ферримагнетиков существует собственный магнитный момент. Подобно ферромагнетикам они обладают высокой магнитной восприимчивостью. Ферримагнетизмом обладают соединения оксида железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) с оксидами других металлов. Примером может служить феррит никеля  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  – соединение  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  с  $\text{NiO}$ .

## Намагничивание ферромагнетиков

Возрастание магнитной индукции обусловлено смещением доменных границ и поворотом магнитных моментов доменов.

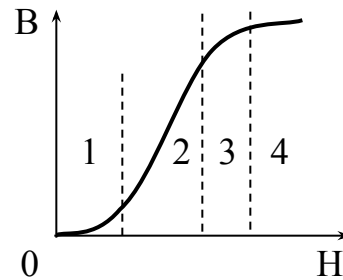




При увеличении напряжённости поля увеличивается объём тех доменов, магнитные моменты которых образуют наименьший угол с направлением внешнего поля, при этом магнитная восприимчивость не меняется, а магнитная индукция возрастает пропорционально напряжённости поля (участок 1). После снятия поля доменные границы возвращаются в исходное положение.

В области более сильных полей смещение доменных границ носит необратимый характер (участок 2).

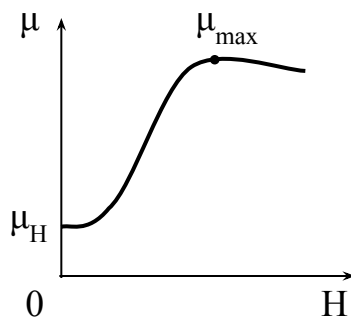
При дальнейшем увеличении напряжённости поля начинает работать второй механизм намагничивания – происходит поворот магнитных доменов в направлении поля. (участок 3).

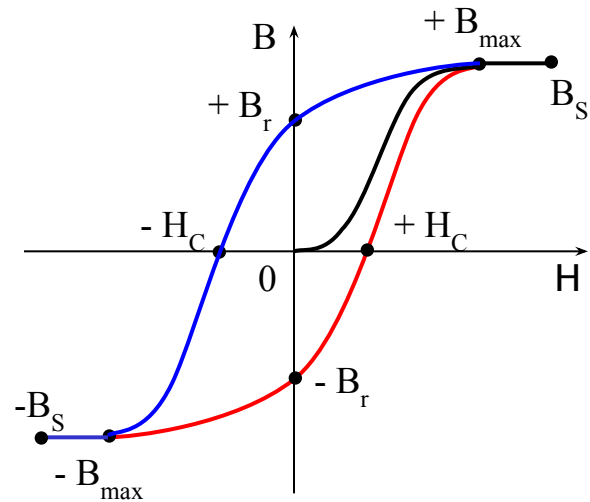


Когда все магнитные моменты доменов оказываются сориентированными вдоль поля, наступает техническое насыщение намагниченности (участок 4). Некоторое увеличение индукции на участке насыщения вызвано слагаемым  $\mu_0 H$  и увеличением намагниченности самого домена.

Используя кривую намагничивания, можно построить график

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$$





$B_r$  – остаточная индукция

$H_C$  – коэрцитивная (задерживающая) сила

$B_S$  – индукция насыщения

## Магнитная анизотропия

В монокристаллах ферромагнетиков существуют направления лёгкого и трудного намагничивания. Это явление называют *магнитной анизотропией*. Например, у железа имеющего структуру объёмно центрированного куба, направления лёгкого намагничивания совпадают с рёбрами куба. Направления трудного намагничивания совпадают с диагоналями куба. Направления среднего намагничивания совпадают с диагоналями граней куба.

## Магнитострикция

*Магнитострикция* – явление изменения размеров ферромагнетиков при их намагничивании. Магнитострикцию оценивают коэффициентом относительной деформации материала в направлении магнитного поля:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l}$$

Численное значение коэффициента магнитострикции  $\lambda$  зависит от типа структуры, кристаллографического направления, напряжённости магнитного поля и температуры. Магнитострикция может быть как положительной, так и отрицательной, то есть размеры образца в направлении поля при намагничивании могут, как увеличиваться, так и уменьшаться. Например, у монокристалла железа, намагниченного в направлении ребра куба, линейные размеры уменьшаются, а при намагничивании вдоль диагонали куба увеличиваются.



## Потери в магнитных материалах

*Потери на перемагничивание* обусловлены необратимым смещением границ доменов. Потери пропорциональны площади петли гистерезиса и частоте переменного магнитного поля. Мощность потерь на гистерезис

$$P_G = \eta B_{\max} f^n V$$

$\eta$  - коэффициент, зависящий от свойств материала;

$B_{\max}$  - максимальная индукция в цикле перемагничивания;

$n = 1,6 \dots 2,0$  - показатель степени, зависящий от  $B_{\max}$ ;

$f$  - частота;

$V$  - объём образца.

***Потери обусловленные вихревыми токами.*** Вихревые токи возникают в плоскости, перпендикулярной магнитному полю

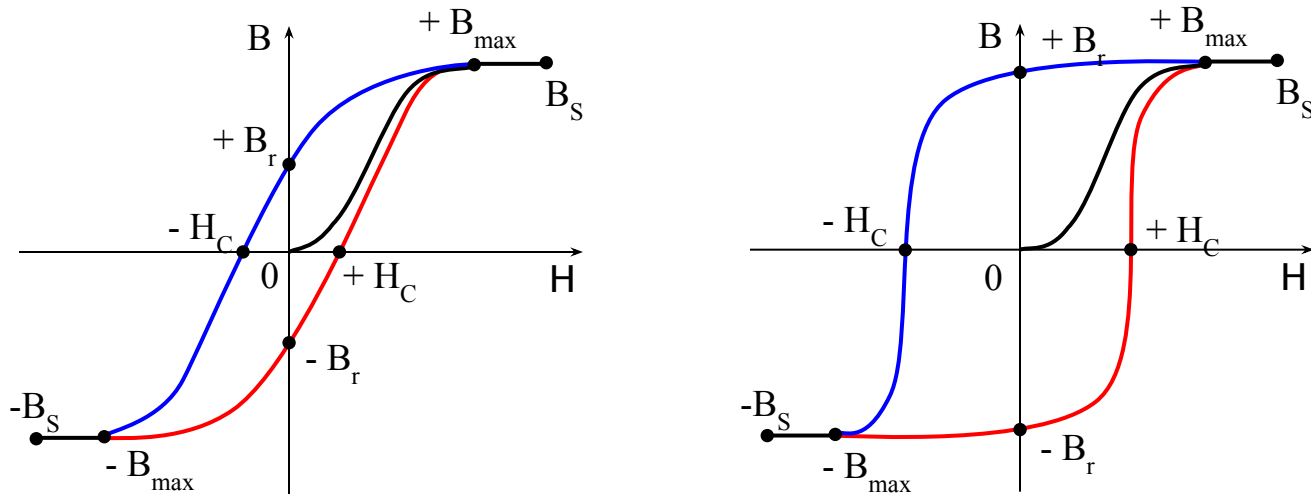
$$P_B = \xi f^2 B_{\max} V$$

$\xi$  - коэффициент, зависящий от удельной проводимости, формы и размеров поперечного сечения материала.

Для уменьшения потерь на вихревые токи в трансформаторах применяют сердечники из тонких листов ферромагнитных материалов, изолированных друг от друга и обладающих высоким удельным электрическим сопротивлением.

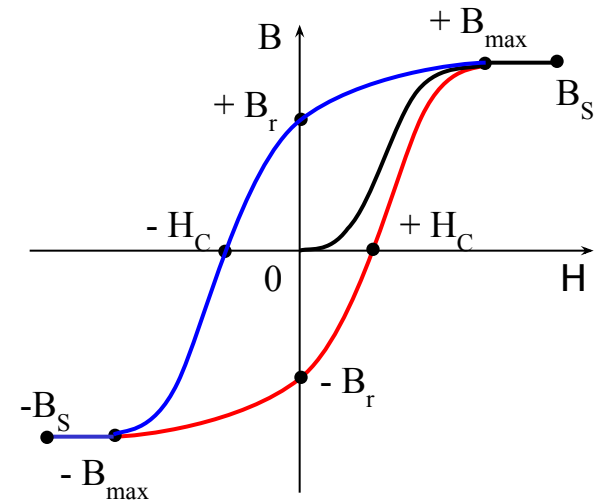
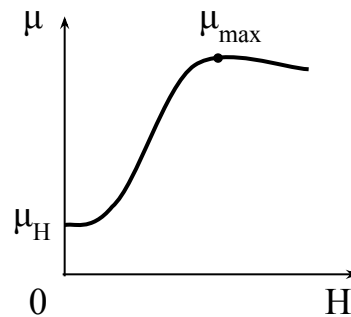
## Магнитомягкие материалы

*Магнитомягкие материалы* – те, которые имеют малую коэрцитивную силу  $H_C$  (условно  $H_C < 800$  А/м) и высокую магнитную проницаемость  $\mu$ . У них узкая петля гистерезиса и малые потери на перемагничивание. Используются в основном в качестве сердечников трансформаторов, дросселей, электромагнитов и др. Такими материалами являются низкоуглеродистые стали, карбонильное железо, пермаллой и альсиферы.



**Низкоуглеродистые стали** – сплавы железа, включающие 0,8...4,8 % кремния. Введение кремния повышает удельное электрическое сопротивление стали и снижает потери на вихревые токи. Чем больше кремния, тем лучше магнитные характеристики, однако при этом увеличивается хрупкость материала. Толщина листов 0,05...1,0 мм.

$$\begin{aligned} \mu_H &= 300 \dots 900, \\ \mu_{max} &= (2 \dots 35) \cdot 10^3, \\ H_C &= 10 \dots 30 \text{ А/м}. \end{aligned}$$



**Карбонильное железо** получают путём термического разложения пентакарбонила железа  $\text{Fe}(\text{CO})_5$ . Получается порошок, состоящий из частиц чистого железа и оксида углерода, имеющих сферическую форму диаметром 1...8 мкм. Путём прессования из этого порошка изготавливают высокочастотные сердечники.

$$\begin{aligned}\mu_{\text{H}} &= (2,5 \dots 3) \cdot 10^3, \\ \mu_{\text{max}} &= 20 \cdot 10^3, \\ H_{\text{C}} &= 4,5 \dots 6,3 \text{ А/м}.\end{aligned}$$

**Пермаллои** – пластические железоникелевые сплавы с содержанием никеля 45...80 %. Чем выше содержание никеля, тем больше  $\mu$  и меньше  $H_C$ . Пермаллои имеют высокую пластичность и легко прокатываются в тонкие листы – до 1 мкм. Для улучшения характеристик в пермаллои добавляют молибден, хром, кремний и медь.

$$\begin{aligned}\mu_H &= (2...14) \cdot 10^3, \\ \mu_{max} &= (50...270) \cdot 10^3, \\ H_C &= 2...16 \text{ А/м.}\end{aligned}$$

**Алсиферы** – хрупкие нековкие сплавы, содержащие 5...15 % алюминия, 9...10 % кремния, остальное – железо. Из них изготавливают литые сердечники, работающие на частотах до 50 кГц.

$$\begin{aligned}\mu_{\text{H}} &= (6...7) \cdot 10^3, \\ \mu_{\text{max}} &= (30...35) \cdot 10^3, \\ H_{\text{C}} &= 2,2 \text{ А/м}.\end{aligned}$$

**Ферриты** – соединения оксида железа( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) с оксидами других металлов ( $\text{ZnO}$ ,  $\text{NiO}$  и др.). Ферриты получают из порошковой смеси этих оксидов. Основным достоинством ферритов является сочетание высоких магнитных параметров с большим электрическим сопротивлением, что уменьшает потери в области высоких частот.

*Марганцево-цинковые* ферриты имеют

$$\mu_{\text{H}} = (1 \dots 6) \cdot 10^3,$$

$$H_{\text{C}} = 12 \dots 80 \text{ А/м},$$

граничная частота до 1,6 МГц.

*Никель-цинковые* ферриты имеют

$$\mu_{\text{H}} = 10 \dots 150,$$

$$H_{\text{C}} = 560 \dots 800 \text{ А/м},$$

граничная частота до 250 МГц.



Из приведённых примеров видно, что чем меньше начальная магнитная проницаемость феррита, тем выше граничная частота.

В устройствах автоматики, вычислительной техники, аппаратуре телефонной связи широкое применение находят ферриты с прямоугольной петлёй гистерезиса. Такие сердечники имеют два устойчивых состояния, соответствующих различным направлениям остаточной магнитной индукции, что позволяет использовать их в качестве элементов для хранения и переработки двоичной информации.

## *Магнитодиэлектрики*

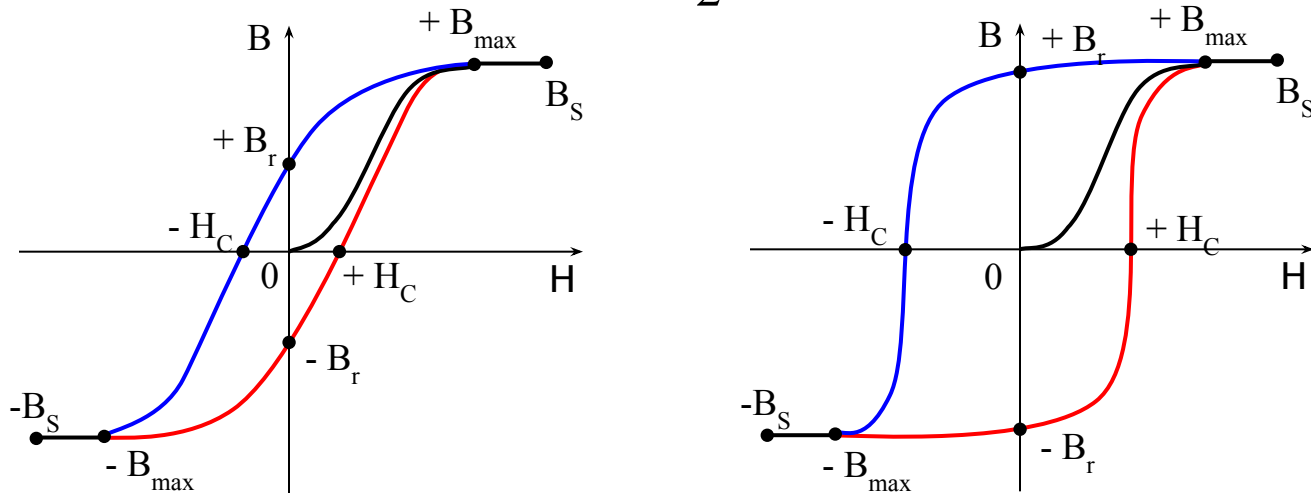
**Магнитодиэлектрики** – композиционные материалы, состоящие из мелкодисперсных частиц магнитомягкого материала (карбонильное железо, альсифер, некоторые сорта пермаллоя), соединённых друг с другом каким-либо органическим или неорганическим диэлектриком (эпоксидные и бакелитовые смолы, полистирол, жидкое стекло и др.). Диэлектрик соединяет частицы магнитомягкого материала, одновременно изолируя их друг от друга, благодаря чему повышается удельное электрическое сопротивление магнитодиэлектрика. Это резко снижает потери на вихревые токи и позволяет использовать магнитодиэлектрик на частотах до 100 МГц.

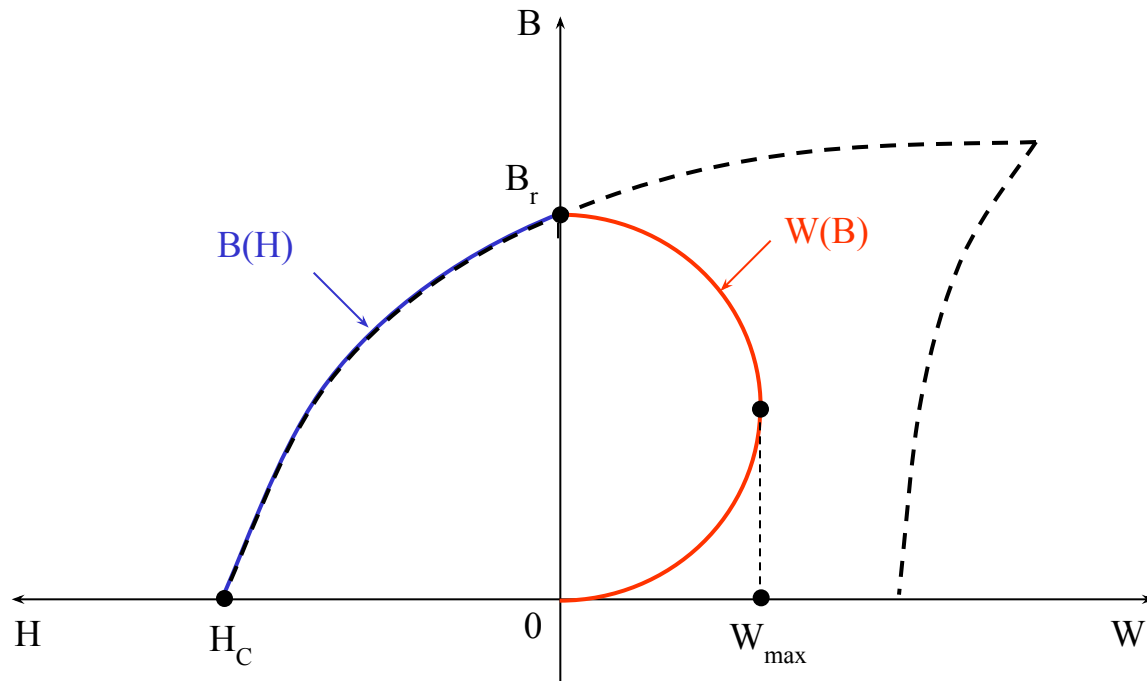
Магнитные характеристики магнитодиэлектриков несколько хуже, чем у ферритов, но зато более стабильны. Производство изделий из магнитодиэлектриков значительно проще, чем из ферритов.

## *Магнитотвёрдые материалы*

*Магнитотвёрдые материалы* имеют большие коэрцитивную силу и остаточную индукцию. Площадь петли гистерезиса у них значительно больше, чем у магнитомягких материалов, следовательно они трудно намагничиваются. Будучи намагничёнными, они могут долго сохранять магнитную энергию. Используются в основном для изготовления постоянных магнитов. Влияние магнитной энергии в воздушном зазоре магнита

$$W = \frac{BH}{2}$$





$W_{max}$  определяет наилучшее использование магнита и поэтому является наилучшей характеристикой, определяющей качество материала.

$$W = \frac{BH}{2}$$

## *По составу и способу получения*

1. Литые высококоэрцитивные сплавы
2. Металлокерамические и металлопластические магниты
3. Магнитотвёрдые ферриты
4. Сплавы на основе редкоземельных металлов
5. Материалы для магнитной записи информации

**Литые высококоэрцитивные сплавы** – железо-никель-алюминиевые и железо-никель-кобальт-алюминиевые сплавы, легируемые медью никелем, титаном и необием.

$$W_{max} = 36 \text{ кДж/м},$$
$$H_C = 110 \text{ кА/м}.$$

**Металлокерамические и металлопластические магниты** создаются методами порошковой металлургии.

Металлокерамические магниты получают прессованием порошка из измельчённых тонкодисперсных магнитных сплавов, и последующего спекания при высокой температуре. Из-за пористости материалов их магнитная энергия на 10...20 % ниже, чем у литых сплавов.

Металлопластические магниты получают из порошка магниевого сплава, смешанного с порошком диэлектрика. Порошок прессуется и нагревается до 120...180 °С для полимеризации диэлектрика. Из-за того, что около 30 % объёма занимает неферромагнитный связующий диэлектрический материал, их магнитная энергия на 40...60 % меньше, чем у литых сплавов.

***Магнитотвёрдые ферриты*** – бариевый феррит и кобальтовый феррит.

$$W_{max} = 12 \text{ кДж/м}$$

***Сплавы на основе редкоземельных металлов*** ещё недостаточно изучены и освоены в техническом отношении, но весьма перспективны. Известны сплавы самария и празеодима с кобальтом. Недостатками этих сплавов являются их высокая хрупкость и значительная стоимость.

$$W_{max} = 80 \text{ кДж/м.}$$

***Материалы для магнитной записи информации*** – тонкие плёнки из нержавеющей сталей и ленты на пластмассовой основе с порошковым рабочим слоем. В технике магнитной записи наибольшее распространение получили полимерные ленты с нанесённым слоем магнитного лака, состоящего из магнитного порошка, связующего вещества, летучего растворителя и различных добавок, уменьшающих абразивность рабочего слоя.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Укажите, что является первопричиной магнитных свойств радиоматериалов.
2. Укажите отличие орбитального магнитного момента от спинового магнитного момента.
3. Поясните, что называют намагниченностью.
4. Поясните, что называют магнитной восприимчивостью.
5. Укажите, как подразделяются материалы по реакции на внешнее магнитное поле.
6. Поясните явление магнитной анизотропии.
7. Поясните явление магнитострикции.
8. Укажите причины потерь в магнитных материалах.
9. Укажите классификацию магнитных материалов.