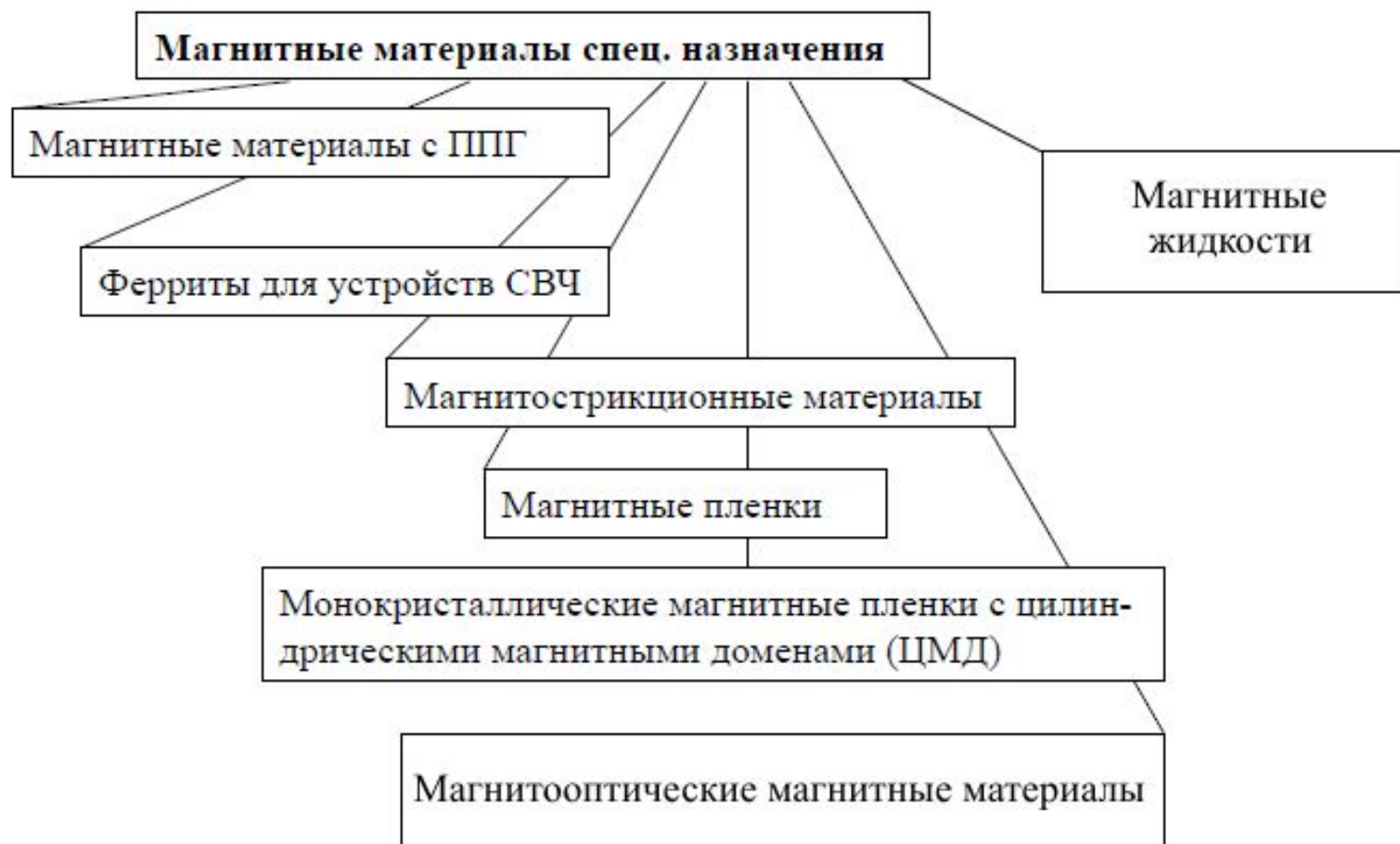


# Магнитные материалы специального назначения

## Классификация магнитных материалов специального назначения

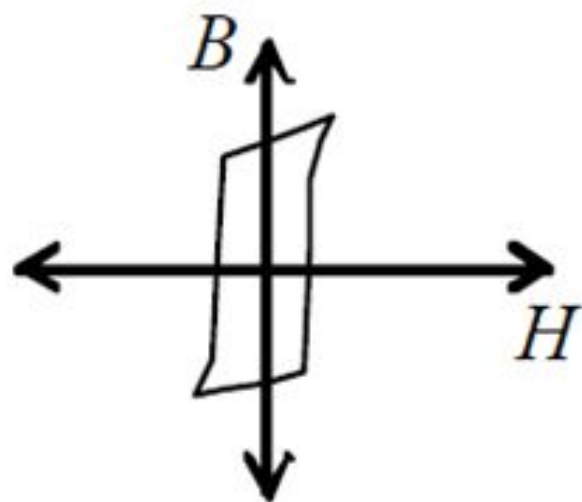


## 1. Материалы с прямоугольной петлей гистерезиса

Данная группа магнитомягких поликристаллических материалов используется в изделиях, принцип действия которых основан на скачкообразном изменении индукции магнитного поля при значениях напряженности внешнего магнитного поля, превышающих коэрцитивную силу магнитного материала.

К таким изделиям относятся магнитные сердечники для запоминающих, логических и переключающих устройств вычислительной техники, автоматики, связи, а также для магнитопроводов трансформаторов. Сердечники, как правило, имеют тороидальную (кольцеобразную) форму. В качестве материалов для изготовления сердечников с ППГ применяют специальные ферриты и ленты микронной толщины из пермаллоя. Ферриты с ППГ относятся к ферритам со структурой шпинели, которыми являются магний–марганцевые ферриты с химической формулой  $(\text{Mg}, \text{Mn})\text{O} \times \text{Fe}_2\text{O}_3$ . Используются также литиевые ферриты  $\text{Li}_2\text{O} \times \text{Fe}_2\text{O}_3$ .

## 1. Материалы с прямоугольной петлей гистерезиса



Предельная петля  
гистерезиса  
материала с ППГ

Обозначение феррита с ППГ складывается из букв ВТ, перед которыми указывается число, обозначающее коэрцитивную силу материала в эрстедах ( $1\text{Э}=79,6\text{ А/м}$ ), например, 7ВТ, 0,12ВТ и так далее. Пермаллои с ППГ представляют собой ленты из железо–никелевых сплавов (50НП, 60НП, 79НП и др.) толщиной около 0,3 мкм. Эти материалы характеризуются высоким значением остаточной индукции, достигающей 0,6...1,4 Т.

## 2. Ферриты для устройств СВЧ

Применяются в диапазоне частот 300 МГц...300 ГГц (длины волн от 1 м до 1 мм).

1. Ферриты со структурой граната используются в метровом диапазоне. Имеют химическую формулу  $R_3Fe_5O_{12}$ , где R – иттрий (Y) или редкоземельный металл (Sm, Pr, Ce, La) с легирующими добавками. Ферриты химического состава  $Y_3Fe_5O_{12}$  носят название железо–иттриевых гранатов.

Используются также ферриты составов  $(Y, Al)_3Fe_5O_{12}$  и  $(Y, Gd, Al, Mn)_3Fe_5O_{12}$ . К поликристаллическим ферритам для устройств СВЧ относятся ферриты марок 90СЧ–Б, 10СЧ–20, 60СЧ–1. Эти ферриты характеризуются значением намагниченности насыщения  $J_s$  достигающей 1,3...3,5 кА/м. Выпускаются также монокристаллические ферриты–гранаты марок 140КГ–1 и 65КГ, где число перед буквенным кодом указывает на величину намагниченности насыщения феррита в кА/м, умноженную на 4л.

## 2. Ферриты для устройств СВЧ

2. Ферриты–шпинели используются в приборах СВЧ сантиметрового диапазона. К ним относятся магний–марганцевые ферриты состава  $(\text{Mg}, \text{Mn})\text{O} \times \text{Fe}_2\text{O}_3$ , а также литий–цинковые ферриты состава  $(\text{Li}, \text{Zn})\text{O} \times \text{Fe}_2\text{O}_3$ . Марки ферритов 10СЧ1, 8СЧ7, значения намагниченности насыщения 4...24 кА/м.

3. Гексаферриты применяют в миллиметровом диапазоне СВЧ. Их химическая формула  $\text{MeFe}_{12}\text{O}_{19}$ , где Me – это Ba или Sr.

Параметрический ряд гексаферритов включает 23 марки этих материалов (04СЧА8...03СЧА), характеризующихся значениями намагниченности насыщения от 8 до 18,3 кА/м.

## **2. Ферриты для устройств СВЧ**

Ферриты для устройств СВЧ применяются в радиоэлектронике для изготовления волноводов, фазовращателей, преобразователей частоты, модуляторов, усилителей, экранов для защиты от СВЧ полей. Обладают высокой чувствительностью к управляющему магнитному полю, высоким удельным электрическим сопротивлением, малыми электромагнитными потерями, высокой температурой Кюри.

### **3. Магнитострикционные материалы**

Магнитострикционные материалы изменяют размеры при намагничивании и размагничивании и используются в технике преобразования электрических колебаний в акустические и наоборот (энергию электромагнитного поля в механическую и обратно) при изготовлении излучателей и устройств приема звука и ультразвука.

Сердечник магнитострикционного преобразователя – это пакет тонких пластин, скрепленных специальными стяжками.

### 3. Магнитострикционные материалы

В настоящее время разработаны эффективные магнитострикционные материалы. К таким материалам относятся Fe–Co сплавы марок 49К2Ф, 65К, Ni–Co сплавы (ниокси), Fe–Al сплавы (алфер).

Для работы на повышенных частотах (до 600 кГц) наиболее пригодны магнитострикционные ферриты, обладающие высоким электрическим сопротивлением. К ним относится феррит никеля  $\text{NiO} \times \text{Fe}_2\text{O}_3$  марки 21СПА, ферриты марок 601С, 602С, 607С, выпускаемые в виде трубок и стержней длиной 3...50 мм и диаметром 3...5 мм. Перспективные магнитострикционные материалы – интерметаллиды типа  $\text{RFe}_2$ , где R – Y, Tb (тербий), Dy (диспрозий), например  $\text{Tb}_{0,27}\text{Dy}_{0,73}\text{Fe}_2$ .



#### **4. Магнитные пленки**

В качестве материала для тонких магнитных пленок толщиной 0,1...1 мкм применяется пермаллой марки 80Н, нанесенный методами катодного или ионно-плазменного распыления в постоянном магнитном поле на подложку, изготовленную из специального стекла или алюминия. В тонких пленках, изготовленных таким образом, магнитные домены укладываются в плоскости пленки вдоль направления легкого намагничивания пленки, совпадающего с направлением внешнего подмагничивающего поля.

#### 4. Магнитные пленки

Таким образом, пленка приобретает одноосную магнитную анизотропию с осью легкого намагничивания  $L$ , параллельно которой устанавливаются векторы намагниченности  $J_s$  отдельных доменов в пленке (рисунок 1).

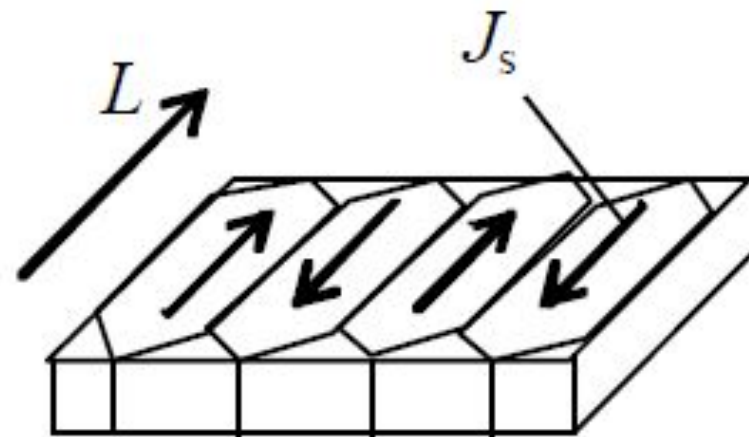


Рисунок 1. Расположение доменов в плоскости тонкой магнитной пленки

#### 4. Магнитные пленки

Ось трудного намагничивания  $T$  пленки лежит в плоскости пленки и составляет угол  $90^\circ$  с направлением легкого намагничивания, как это показано на рисунке 2а. Форма петли гистерезиса, полученной при циклическом перемагничивании тонкой магнитной пленки, зависит от направления перемагничивающего магнитного поля. В направлении оси  $L$  пленка характеризуется прямоугольной петлей гистерезиса (рисунок 2б). Это обстоятельство позволяет использовать тонкие магнитные пленки в качестве запоминающих элементов.

#### 4. Магнитные пленки

При перемагничивании в направлении оси  $T$  тонкая магнитная пленка характеризуется очень узкой петлей гистерезиса, что свидетельствует о практически полном размагничивании пленки после выключения внешнего магнитного поля (рисунок 2в).

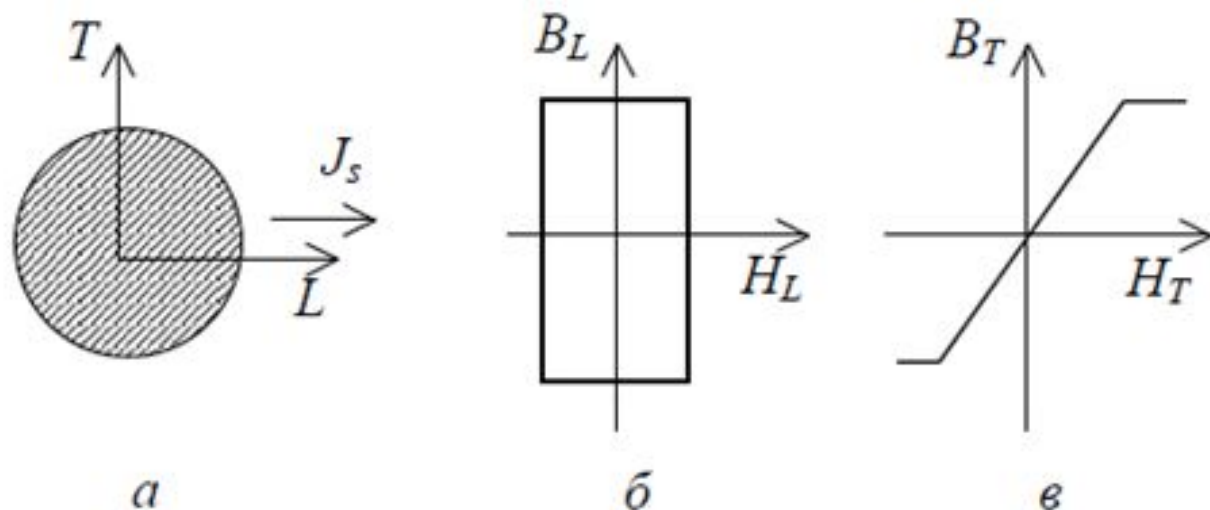


Рисунок 2. Направления легкого  $L$  и трудного  $T$  намагничивания в тонкой магнитной пленке -  $a$ ; вид петли гистерезиса:  $б$  - в направлении легкого намагничивания;  $в$  - в направлении трудного намагничивания

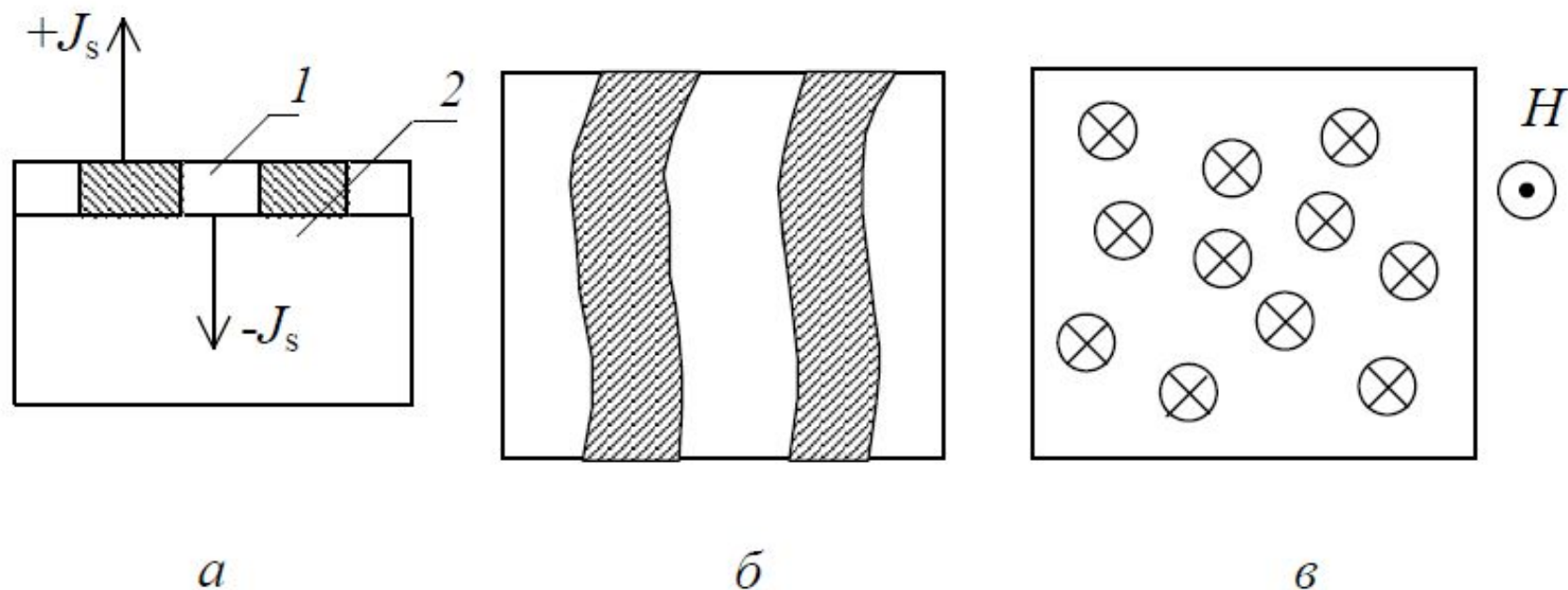
## 5. Магнитные пленки с цилиндрическими магнитными доменами (ЦМД)

1. Наиболее распространены одноосные ферриты–гранаты состава  $R_3Fe_5O_{12}$ , где символ R означает элемент Y или редкоземельные металлы Sm, Eu, Ho (гольмий), Er (эрбий). Коэрцитивная сила этих материалов составляет около 24 А/м. В эпитаксиальных пленках ферритов–гранатов удалось получить ЦМД с диаметром около 1 мкм.

2. Второй вид материалов – это ортоферриты с химической формулой  $RFeO_3$ , где R, как и в предыдущем случае, означает иттрий или редкоземельные металлы. Диаметр ЦМД, полученных в эпитаксиальных пленках на основе ортоферритов, составляет около 10 мкм. Поэтому из–за больших размеров доменов ортоферриты считаются менее перспективными материалами для изготовления устройств на ЦМД.

## 5. Магнитные пленки с цилиндрическими магнитными доменами (ЦМД)

3. Для изготовления монокристаллических пленок с ЦМД применяют также гексаферриты  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  и феррошпинели  $\text{Mg}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ . В качестве подложек используются пластинки, вырезанные из монокристаллов немагнитного галлий–гадолиниевого граната состава  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ . Этот материал характеризуется параметром кристаллической решетки, очень близким к параметру решетки феррита–граната. Эффект возникновения ЦМД удалось наблюдать также в аморфных пленках состава  $\text{GdCo}$  и  $\text{GdFe}$ , полученных напылением на стеклянные и кварцевые подложки. Это открывает новые возможности в развитии техники устройств на ЦМД из-за меньшей стоимости их изготовления.



Магнитные домены в монокристаллических пленках: *a* - структура монокристаллической пленки (поперечный разрез); *б* - полосовые магнитные домены (вид сверху); *в* - возникновение цилиндрических магнитных доменов под влиянием внешнего магнитного поля  $H$

*1* - магнитная пленка, *2* - монокристаллическая немагнитная подложка,  $J_s$  - направление намагниченности доменов

## **6. Магнитооптические магнитные материалы специального назначения**

Магнитооптические магнитные материалы способны вращать плоскость поляризации света, прошедшего через образец или отраженного от него, используются для управления световыми потоками (в лазерной технике и оптоэлектронике). Ферриты–гранаты (например  $(YFe)_3Fe_5O_{12}$ ), ферриты–шпинели, ортоферриты и другие применяют в устройствах, предназначенных для пространственно–временной модуляции света. Непрозрачные магнитные материалы на основе интерметаллических соединений, например, на основе  $MnFe$ ,  $MnAs$  служат в качестве запоминающей среды в магнитооптических запоминающих устройствах.



## **7. Жидкие магнитные материалы специального назначения**

Жидкие магнитные материалы (магнитные жидкости) – однородная взвесь мелких ( $10^{-3} - 10^{-1}$  мкм) ферромагнитных частиц в воде, керосине, фторуглеводородах, сложных эфирах, жидких металлах. Применяются для визуализации структуры постоянных магнитных полей и доменной структуры ферромагнетиков, в качестве рабочей среды магнитоуправляемых поляризационных светофильтров, а также при создании гидромеханических преобразователей и излучателей звука; управляемое контрастирование полых органов, локальное повышение температуры.