

# *Полупроводниковая керамика – магнитная ферриты*

## Лекция 18

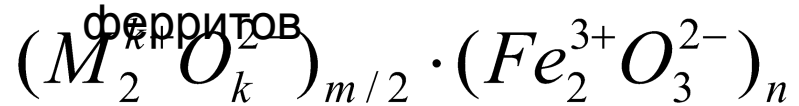
магнетоплюмби  
т



# Общая характеристика ферритов

Ферриты – это оксидные магнитные материалы со структурой ионных кристаллов, относящиеся к классу не полностью скомпенсированных антиферромагнетиков

Состав



где  $M$  – характеризующий металл,  $k$  – его валентность,  $m$  и  $n$  – целые числа

## моноферрит

Немагнитные цинковый  $ZnO \cdot Fe_2O_3$  и кадмиевый

~~остальные~~  $Bi_2O_3$  – имеют невысокие магнитные свойства и редко применяются в технике

## биферриты и

### полиферриты

1 Феррошпинели – ферриты со структурой природного минерала шпинели  $MgAl_2O_4$ .

2 Феррогранаты – ферриты со структурой минерала граната  $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$ .

3 Гексаферриты – ферриты с гексагональной структурой, изоморфной структуре минерала магнетоплюмбита  $PbFe_{7.5}Mn_{3.5}Al_{0.5}Ti_{0.5}O_{19}$ .

4 Ортоферриты – ферриты с ромбически искаженной структурой минерала

~~бразильского~~  $CdNi_2S_3$  шпинели - смешанные сульфиды (селениды) хрома и двухвалентных металлов

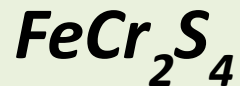
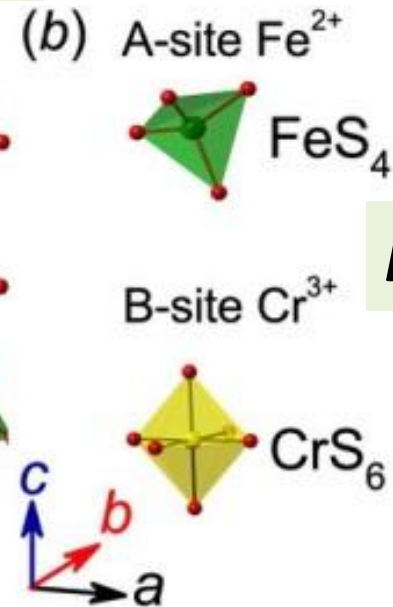
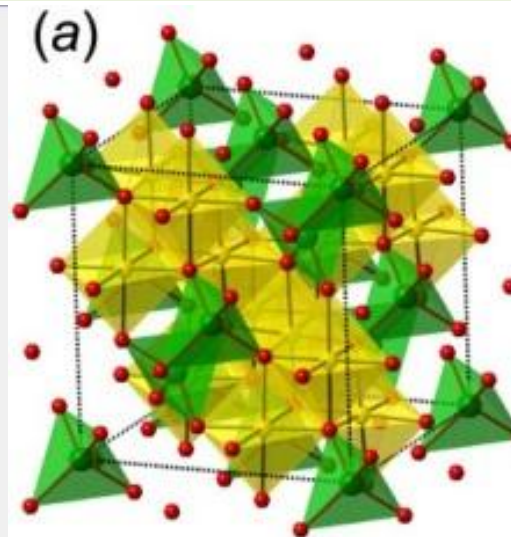
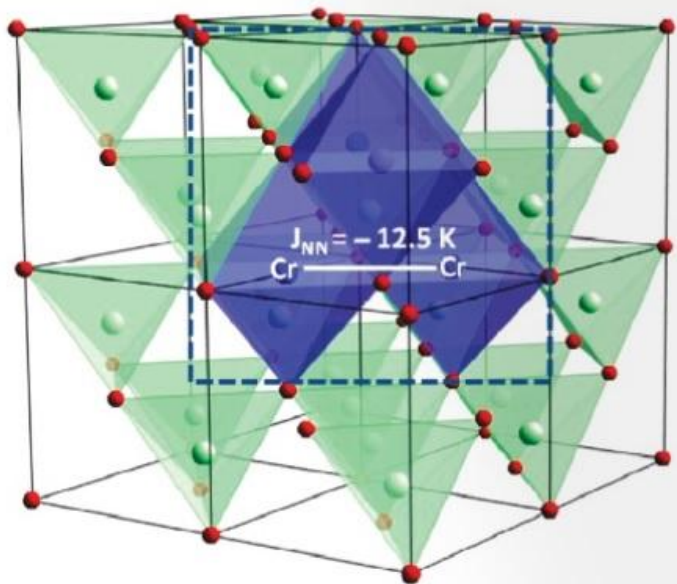
# халькогенидные шпинели

тетрасульфиды дихрома железа и кобальта ( $FeCr_2S_4$  и  $CoCr_2S_4$ ) имеют самые высокие среди магнитных полупроводников температуры магнитного упорядочения (170 и 227 К соответственно)

тетрахалькогениды дихрома-меди ( $CuCr_2X_4$ ,  $X=S, Se$ ) являются ферромагнетиками с  $T_C$  выше комнатной и обладают металлической

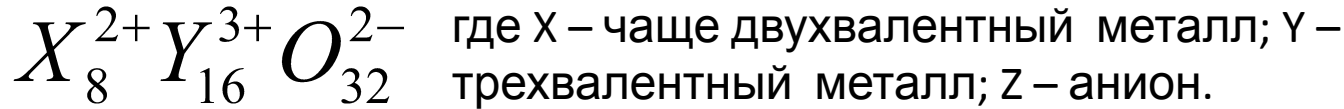
Температура магнитного упорядочения ферромагнетика  $CuCr_2Se_4$  составляет

Соединение  $ZnCr_2Se_4$  является антиферромагнетиком  
На рис.  $Se$  – красный,  $Zn, Cr$  – зеленый и синий

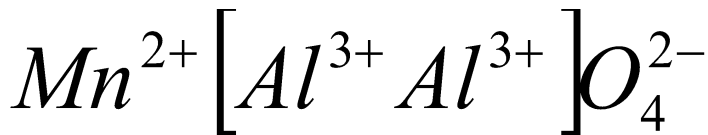
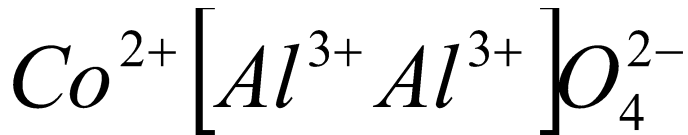
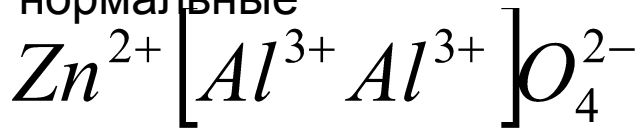


# Структура шпинели

В плотноупакованной решетке шпинели различают два типа пустот: тетраэдрические и октаэдрические.

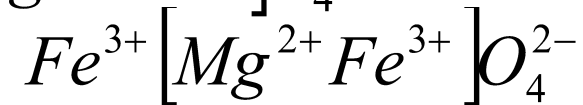
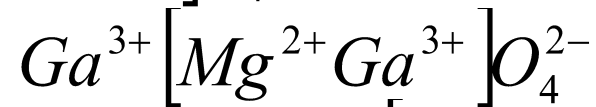
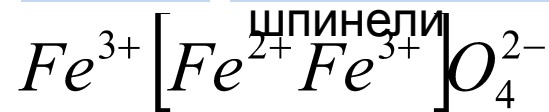


прямые или нормальные



Тип пустот А занят катионами одного сорта, а пустоты В –

$Y[XY]O_4$  обратные (обращенные)



в октаэдрических пустотах половина позиций занята одним металлом, а другая половина – вторым металлом или катионы одного и того же металла разной валентности

Степень обратности характеризуется коэффициентом обратности  $\lambda$  где  $\chi$  - число катионов X, перешедших в октаэдрические позиции  $\lambda = \frac{\chi}{8}$

# Как распределяются катионы в шпинели

факторы, определяющим размещение катионов в решетке шпинели:

- тип (природа) межатомных связей
- диаметр и заряд катиона
- электронная конфигурация катионов (степень заполнения 3d- и 4d-оболочек)
- электростатическое поле решетки

5 групп катионов по склонности к заполнению окта и тетра позиций:

1 Ионы с полностью заполненной d-оболочкой (3d и 4d) имеют тенденцию к образованию ковалентных связей и занятию тетра-позиций: *Cu, Zn, Ag, Cd, Sn*.

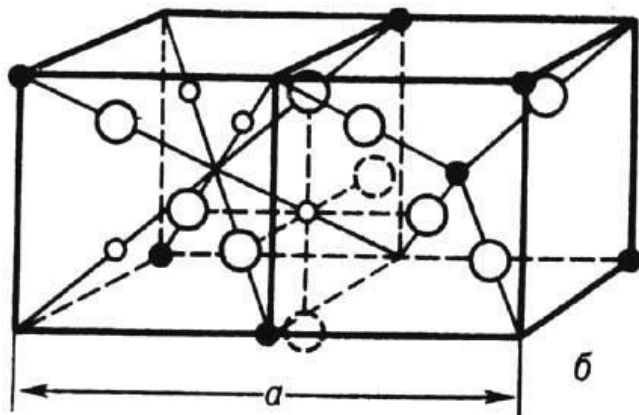
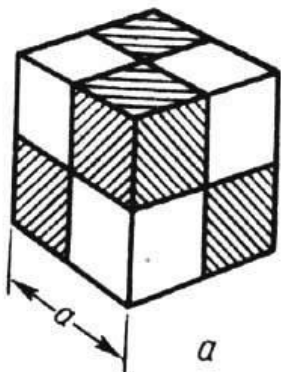
2 Ионы с электронной конфигурацией благородных газов (заполнены K- и L-оболочки) не имеют определенной склонности к занятию кристаллографических позиций (*Li, Al, Mg*). Титан, несмотря на это, стремится занять окта-позиции, вероятно, из-за большого заряда ( $Ti^{4+}$ ) и ионного радиуса.

3 Ионы с наполовину заполненными 3d-оболочками ( $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Co^{4+}$ ) имеют сферическое распределение заряда, могут практически с одинаковой вероятностью занимать окта- и тетра-позиции.

4 Ионы, имеющие 3d<sup>3</sup>- и 3d<sup>8</sup>-конфигурации, чаще всего заполняют октаэдрические кристаллографические позиции ( $Cr^{3+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Mn^{4+}$ ).

5 Остальные ионы переходных металлов могут занимать как тетра-, так и окта-позиции.

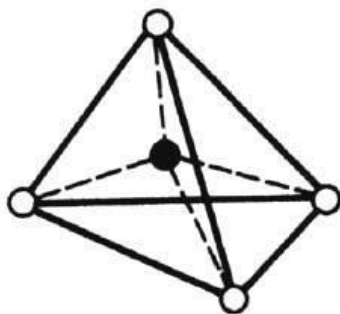
# Феррошпинели – основа для получения ферритов



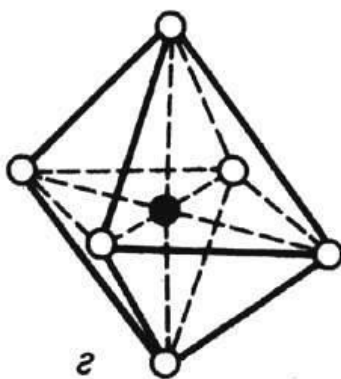
плотнейшая кубическая  
гранецентрированная упаковка  
анионов  $O^{2-}$  с замещением  
катионами  $M^{2+}$  и  $Fe^{3+}$   
1/8 тетраэдрических  
и 1/2 октаэдрических пустот

Л. Неель: кристаллическая  
решетка

шпинели состоит из двух  
подрешеток.  
Одна образована ионами металла в  
тетраэдрических пустотах (подрешетка  
A), другая – ионами металла в  
октаэдрических пустотах (подрешетка B).



**в**



**г**

Кристаллическая структура ферритов-шпинелей: **а** – схематическое изображение элементарной ячейки шпинельной структуры, разделённой на 8 октантов; **б** – расположение ионов в смежных октантах ячейки; белые кружки – анионы  $O^{2-}$ , образующие остов решётки, чёрные – катионы в октаэдрических и тетраэдрических позициях; **в** – катион в тетраэдрическом окружении; **г** – катион в октаэдрическом окружении

# Нормальная, обратная и смешанная феррошпинели

Простая феррошпинель - в ее состав входит только один двухвалентный ион

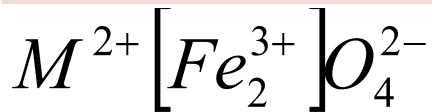
$MFe_2O_4$ , где  $M$  – катион двухвалентного металла (исключение составляет феррит одновалентного лития –  $Li_2O \cdot 5Fe_2O_3$ )

смешанные феррошпинели: твердый раствор двух шпинелей, одна из которых

не обязательно ферромагнитная  
никель-цинковые ( $Ni_{1-x}Zn_xO \cdot Fe_2O_4$ )

марганец-цинковые ( $Mn_{1-x}Zn_xO \cdot Fe_2O_4$ )

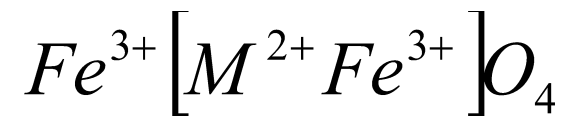
нормальные ферриты-шпинели  $Zn^{2+}[Fe^{3+}Fe^{3+}]O_4$ ,  $Cd^{2+}[Fe^{3+}Fe^{3+}]O_4$  – не ферромагнитны. В нормальных шпинелях все 8 ионов  $M^{2+}$  располагаются в А-узлах, а все 16 ионов  $Fe^{3+}$  – в В-узлах, т.е. их структурная формула имеет вид



Ферриты – обратные шпинели, например,  $Fe^{3+}[Fe^{3+}Fe^{2+}]O_4$  – ферромагнитны

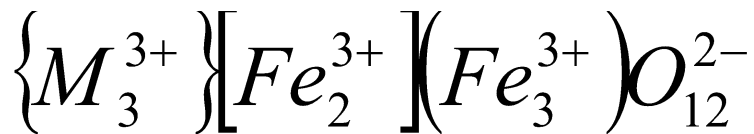
Структуру обратной шпинели имеют ферриты  $Mg$ ,  $Fe$ ,  $Co$ ,  $Ni$ ,  $Li$ ,  $Cu$ . В обратных шпинелях 8 ионов  $Fe^{3+}$  занимают А-узлы, остальные 8 ионов  $Fe^{3+}$  и 8 ионов  $M^{2+}$  находятся в В-узлах, располагаясь в них статистически беспорядочно.

Изменяя скорость охлаждения ферритов, можно получать структуры с различной степенью





# Ферриты со структурой граната

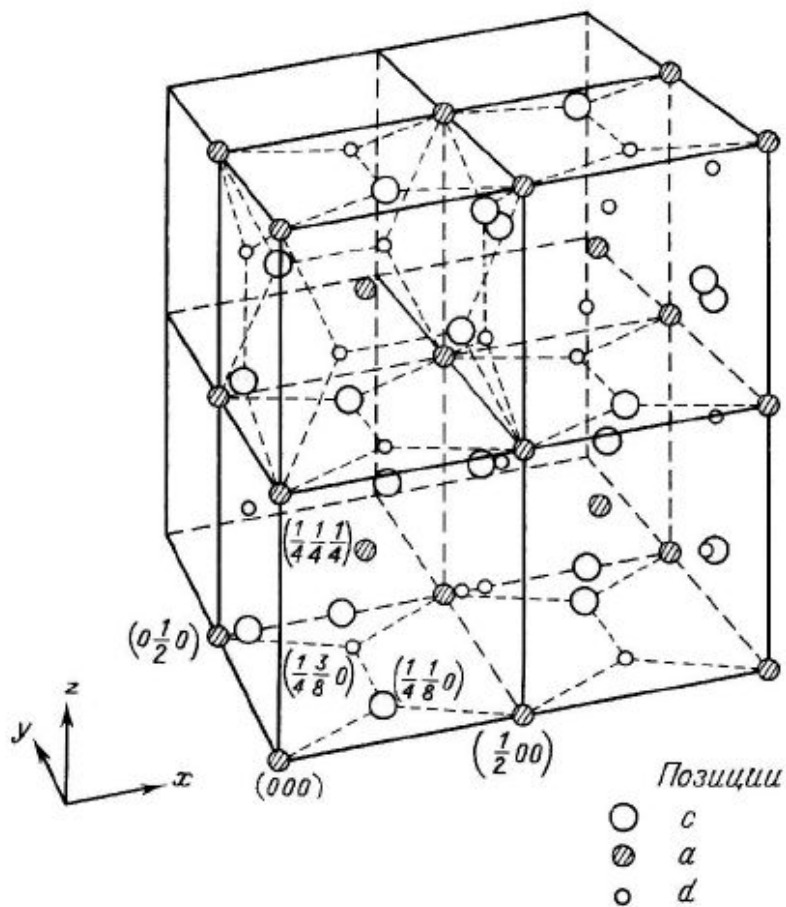


где М – редкоземельный элемент или иттрий, скобки {}, [], () означают соответственно 24с-, 16а-, 24d-позиции

Кристаллическая решетка феррогранатов кубическая объемноцентрированная.

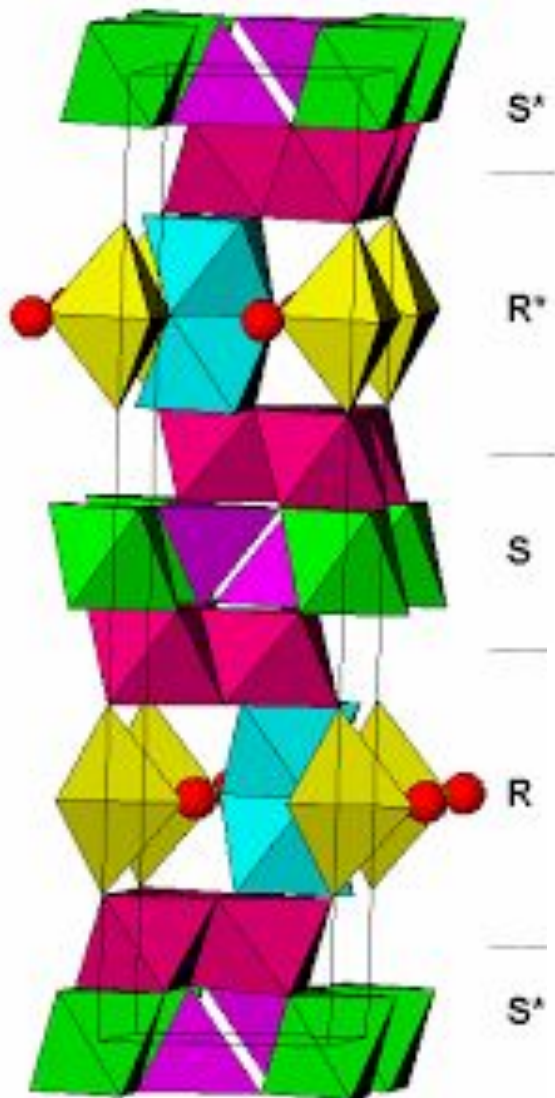
Ионы кислорода  $O^{2-}$  образуют немагнитную матрицу с катионными позициями трех типов: тетраэдрические (24d), октаэдрические (16а) и додекаэдрические (24с).

радиус редкоземельного иона (додекаэдрического) не должен превышать 0.114 нм





# Гексаферриты



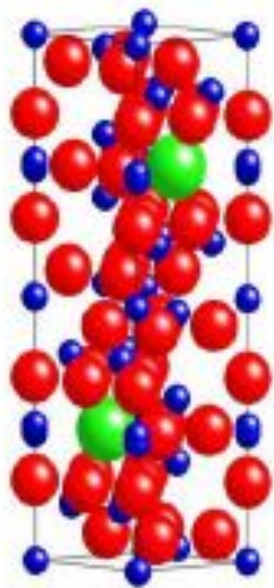
Гексаферрит типа М

Обозначение	Химическая формула	Структура элементарной ячейки	Количество слоев кислорода
M	$BaFe_{12}O_{19}$	RSR*S*	10
W (M+S)	$BaMe_2Fe_{16}O_{27}$	RSSR*S*S*	14
Y	$Ba_2Me_2Fe_{12}O_{22}$	3 (ST)	18
Z (M+Y)	$Ba_3Me_2Fe_{24}O_{41}$	RSTSR*S*T*S*	22
X (2M+S)	$Ba_2Me_2Fe_{28}O_{46}$	3(RSR*S*S*)	36
U (2M+Y)	$Ba_4Me_{12}Fe_{36}O_{60}$	RSR*S*T*S*	16

Гексагональная структура природного минерала

магнетоплюмбита

$MFe_{12}O_{19}$  где M – ион  $Ba^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$  или  $Co^{2+}$

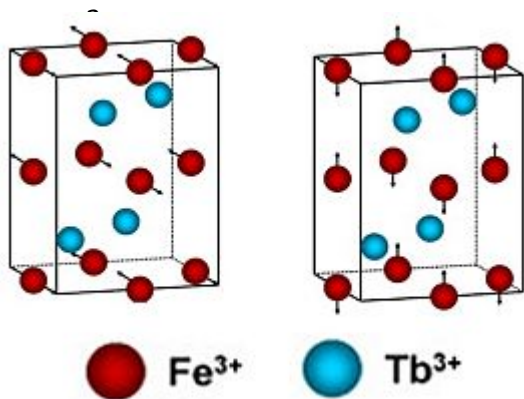
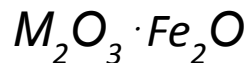


три типа катионных позиций:  
тетраэдрические, октаэдрические и гексаэдрические



Гексаферриты представляют в виде усложненной шпинели, состоящей из шпинельных (S) и гексагональных (H) блоков

# Ортоферриты



Имеют орторомбическую кристаллическую решетку и являются искаженной модификацией структуры типа перовскита –  $CaTiO_3$

Искажение кубической структуры связано с нарушением размерных соотношений ионов и особенностями их электронной конфигурации

ортоферрит гадолиния обладает ферромагнитными свойствами

# Технология получения ферритов

## Сырьевые компоненты. Оксиды железа

**Вюстит** имеет кубическую решетку и никогда не соответствует составу  $FeO$ , так как обладает нестехиометрией по кислороду. Магнитными свойствами вюстит не обладает и в технологии ферритов не применяется.

**Магнетит**  $Fe_3O_4$  – имеет структуру обращенной шпинели. Проявляет слабые свойства ферримагнетизма. Магнетит встречается в природе. Легко окисляется кислородом воздуха, поэтому при получении феррита необходима равновесная атмосфера в интервале 400–1400 °С, которая может быть создана, например, смесью  $CO_2$  и  $CO$ .

**Гематит**  $Fe_2O_3$ . Известны четыре кристаллических модификации гематита:  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  и  $\beta$ . Две последние при 110 °С переходят в  $\alpha$ - $Fe_2O_3$  ( $\beta$  – на поверхности частиц), поэтому в технологии ферритов не используются.

Основным сырьем для ферритов служит  $\alpha$ - $Fe_2O_3$ . Она имеет ромбоэдрическую решетку (изотипную корунду), парамагнитна.

Модификация  $\gamma$ - $Fe_2O_3$  имеет дефектную структуру кубической шпинели с катионными вакансиями, обладает антиферримагнитными свойствами (как и  $\delta$ - $Fe_2O_3$ ); всегда присутствует в сырье совместно с  $\alpha$ - $Fe_2O_3$  и играет большую роль в синтезе ферритов.

$\gamma$ - $Fe_2O_3$  – метастабильная фаза и при нагревании она легко переходит в магнетит.

# Технология получения ферритов

Сырьевые компоненты. Оксиды марганца

*Манганозит*  $MnO$  имеет кубическую решетку (подобно вюстити). При нагревании в разных условиях образует высшие оксиды  $Mn_3O_4$ ,  $Mn_2O_3$ . Разложения  $MnO$  до 1700 °С практически не наблюдается

*Гаусманит*  $Mn_3O_4$  – наиболее устойчивая форма, в которую переходят все высшие и низшие оксиды марганца. Оксид имеет три полиморфные модификации. Для образования феррита важны две из них:  $\beta$  со структурой деформированной шпинели и  $\gamma$ -кубическая. Переход  $\beta$  в  $\gamma$  модификацию  $Mn_3O_4$  происходит при 1160–1170 °С.  $Mn_2O_3$  переходит в  $Mn_3O_4$  при температуре выше 925 °С. Промышленность не выпускает  $Mn_3O_4$

*Курнакит*  $Mn_2O_3$  имеет также несколько кристаллических модификаций и в производстве применения не имеет.

в качестве исходного компонента используют  $MnCO_3$

Исходным сырьем для изготовления магнитной керамики являются оксиды или гидроксиды соответствующих металлов, либо их соли в виде карбонатов, нитратов и оксалатов.

решающее значение имеет чистота сы  
рья

# Синтез ферритов

- 1) из порошков оксидов твердофазный
- 2) путем термического разложения
- 3) из гидроксидов или карбонатов солей, полученных соосаждением

## твердофазн

чистые  
тонкоизмельченны  
е

прессуют в брикеты

обжигают в  
окислительной

брикеты дробят,  
измельчают,  
добавляют

формируют

изделия

обжигают

## разложени

смешивают  
кристалло-

при 300–320°C  
соли

прокаливают  
при

повторно

бри

обжиг при 900–1000 °C

измельчают,  
добавляют

формируют

изделия

## соосажден

осаждают смесь гидрокси  
дов

Осадок промывают,  
фильтруют  
и сушат

брикетирую

прокаливают при 500–1000°

брикеты дробят и  
измельчают,

добавляя  
формируют изде

лия

# Синтез гексаферритов

## получение

оксид железа (III), карбонат стронция и стеклообразующая добавка, растворимая в воде ( $H_3BO_3$ ,  $Bi_2O_3$ , или  $SiO_2$ )

доводят до плавления в течение 2 часов при температуре 1200–1500 °С

закаливают расплав раскаткой между металлическими пластинами

из аморфного порошка формуют

нагревают брикет до температуры, на 100 °С меньше конечной за 1 час

в течение часа доводят до температуры обжига 550–1250 °С

термообработка 2

травление 10% раствором органической кислоты (уксусной  $CH_3COOH$ ) при 80 °С для выделения наночастиц гексаферрита

осадок декантируют в магнитном поле, промывают и высушивают при 70 °С

добавляют

пластификаторы  
формуют

изделия

# Формование изделий

три основных способа формования:

- полусухое прессование при малом содержании пластификатора (до 10 мас.%)
- пластичное формование (протяжка, трамбовка) при содержании пластификатора до 20 мас.%

В качестве пластификатора обычно применяют растворы органических полимеров (поливиниловый спирт, эфиры целлюлозы и др.) или нагретых до плавления твердых пластификаторов (парафин, искусственный воск).

Отклонение от равномерного распределения пластификатора может привести к появлению в изделиях дефектов: трещин, неравномерной усадки, пониженной прочности и в итоге к снижению магнитных характеристик.

## **Метод вырубki изделий из прокатанной ферритовой**

**ленты** - гибкая эластичная лента с высокой плотностью (достигается подбором связующих компонентов, например, каучук) и условиями прокатки гранулированного ферритового порошка или тестообразной ферритовой массы.

Высота сердечников при вырубке определяется толщиной прокатанной ферритовой ленты.



# Термообработка

сушку или выжигание пластификатора со спеканием керамики не совмещать!



приводит к разрушению

Для удаления пластификатора изделие помещают в порошковую засыпку из талька или глинозема медленном нагревании пластификатор в расплавленном состоянии переходит в засыпку температуру поднимают до 120 °С – парафин испаряется  
Окончательно пластификатор удаляют при температуре около 180 °С

Обжиг при 1000–1400°С в печах с карбидо-кремниевыми нагревателями  
Изделия с подсыпкой глинозема устанавливают на шамотные подставки или на бомзы из феррита того же состава создают соответствующую газовую среду  
Mn-Zn ферриты 1200–1400 °С в слабоокислительной среде  
Mn-Zn ферриты 1250–1400 °С в контролируемой атмосфере

# Mn – Zn ферриты

до 1000 °С – твердые растворы  $Fe_2O_3$  и  $Mn_2O_3$ ;

свыше 1000 °С – структуру типа шпинели  $MnFe_2O_4$

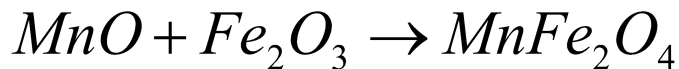
при охлаждении в интервале 900–1000 °С происходит окисление марганца  $Mn^{2+} \rightarrow Mn^{3+}$

может происходить даже в отсутствие кислорода и быть следствием электронных переходов между ионами Mn и

Fe приводит к распаду шпинели на немагнитные фазы  $Mn_2O_3$  и

$Fe_2O_3$

- при правильно подобранной среде

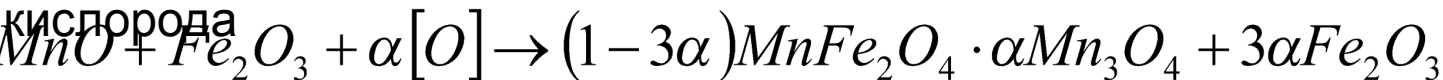


- с недостатком кислорода



- при небольшом избытке

кислорода



- при дальнейшем избытке кислорода шпинель распадается

чтобы получать структуру типа шпинели, необходимо при охлаждении поддерживать равновесное для нее парциальное давление кислорода

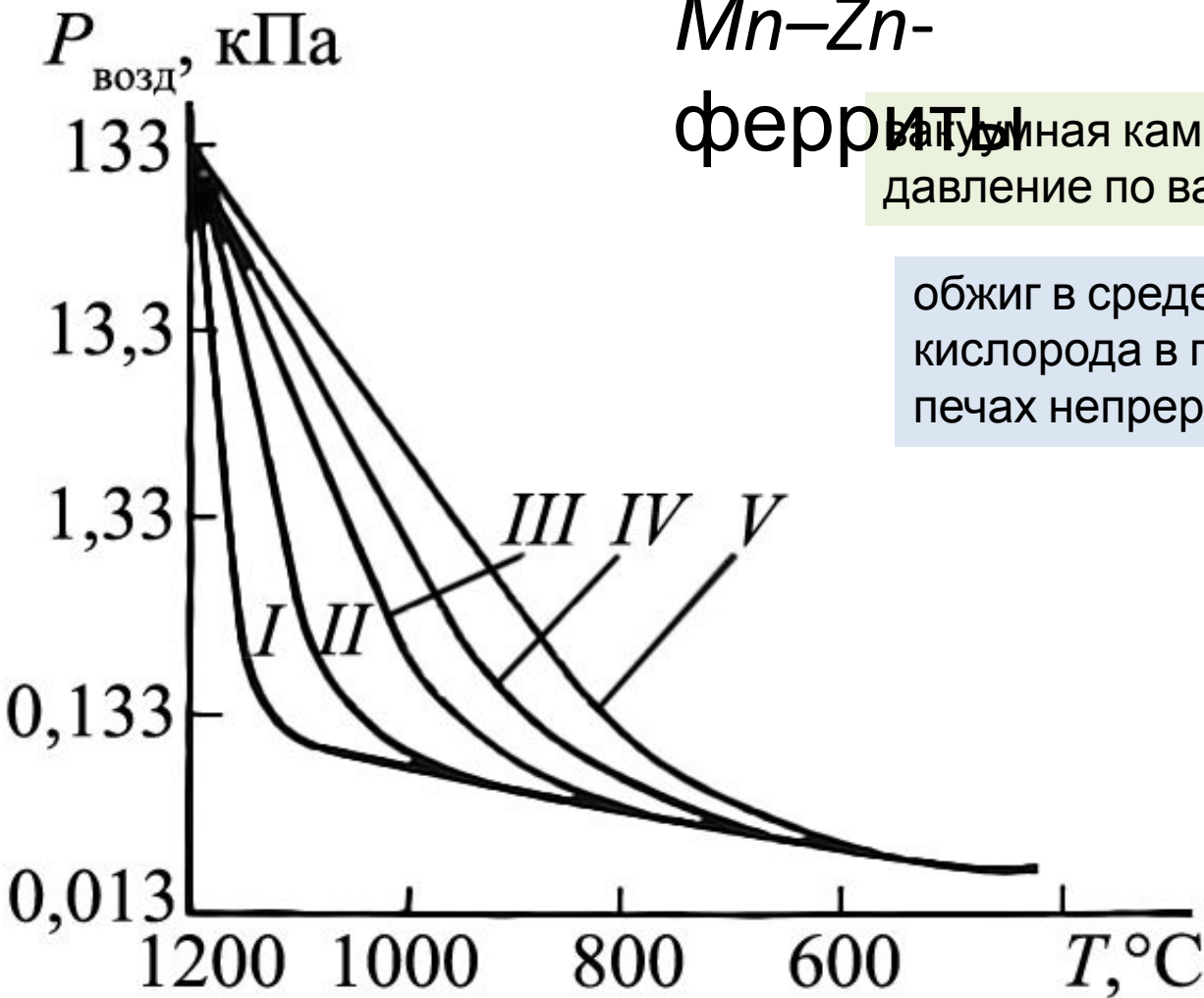
# Mn-Zn-

## ферриты

вакуумная камера, в которой снижается давление по вакуумной программе

обжиг в среде из смеси азота и кислорода в герметичных туннельных печах непрерывного действия

1150–1200°C: 0.65–20  
КПа  
200 °C: 0.27–0.027  
КПа



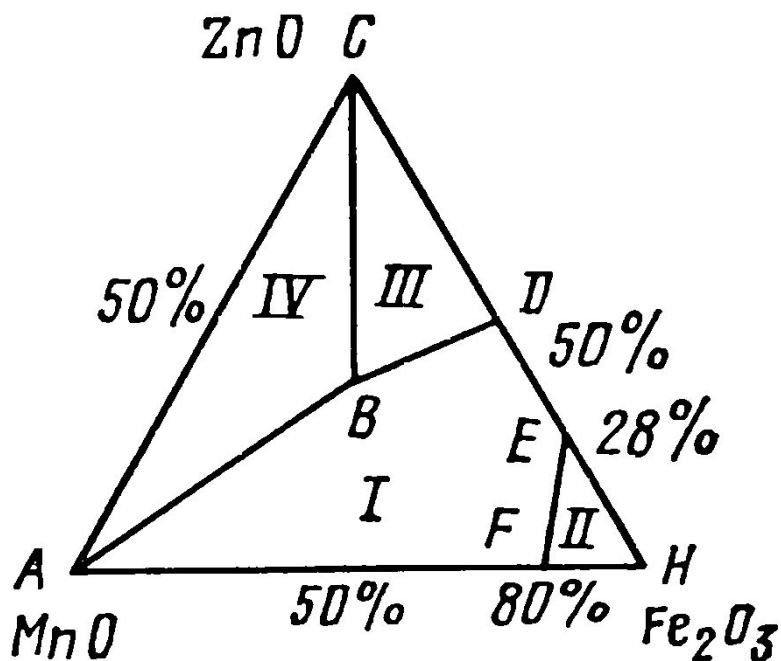
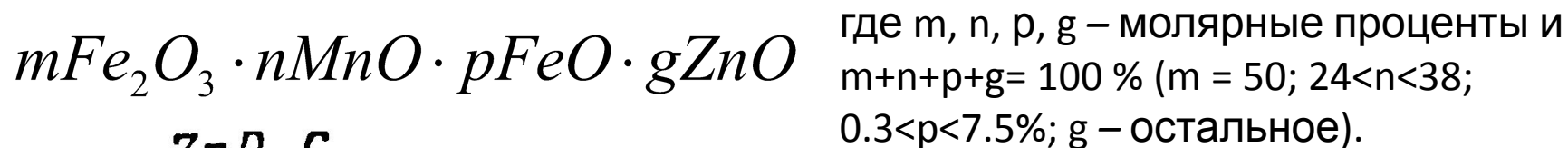
Типовые программы давления воздуха в печи в зависимости от температуры при охлаждении изделий из Mn-Zn ферритов

Смесь  $\text{CO}_2$ -CO в данном случае не подходит

# Mn-Zn-ферриты

- сохранение марганца в шпинели в двухвалентном состоянии;
- соблюдение стехиометрического соотношения двух- и трех-валентных ионов железа;
- определенное содержание железа в феррите при содержании  $Fe_2O_3$  до 50% магнитная проницаемость возрастает, проходит через максимум, а затем падает

Условия синтеза должны обеспечивать соотношение:



Промышленные марки ферритов имеют 52–54 мол. %  $Fe_2O_3$

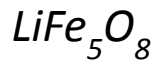
# Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса

твердые растворы в системе  $MgO-MnO-Fe_2O_3$  с введением добавок оксидов  $Mn, Li, Cu, Co$

Для ферритов с ППГ необходимо, чтобы в исходном материале была высокая магнитно-кристаллическая анизотропия и концентрация локальных неоднородностей и искажений кристаллической решетки, определяющих специфический характер перемещения граничных слоев доменов  
усадка феррита при спекании (более 8–10 %)

Промышленное распространение получили две химические системы ферритов со структурой шпинели:  $Mg-Mn$  и  $Li-Na$

Лучшими свойствами обладают составы ферритов, для которых характерен недостаток  $Fe^{3+}$  и избыток двухвалентных металлов  $Mg$  и  $Mn$  по отношению к стехиометрическому составу

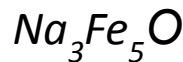
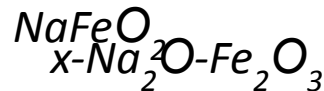


в окта- и тетраэдрических позициях  $Li^+$  и  $Fe^{3+}$ , валентность отличается на две единицы, увеличение кристаллической анизотропии



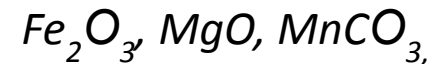
низкая

ортоферрит



9

исходные компоненты:



$Li_2CO_3$   
0.5–0.8% лимонной

3–5% ПВО 10%-ной

концентрации, сушка до 150–180 °

Спекание изделий при 1100–1250°

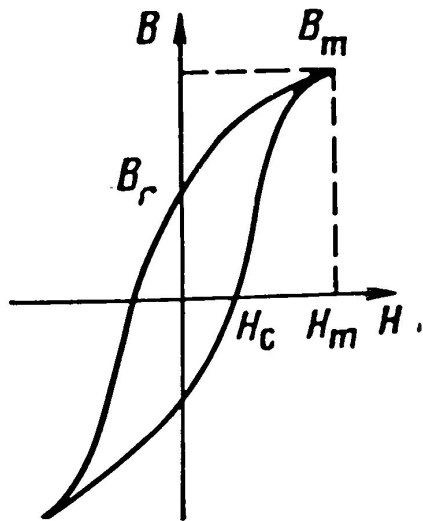
С в окислительной среде

моноферри прямоугольность ПГ

# Свойства промышленных ферритов

Магнитомягкая  
керамика  
 $\text{NiO-ZnO-Fe}_2\text{O}_3$

$\text{NiO-MnO-Fe}_2\text{O}_3$



Округлая петля  
магнитного  
гистерезиса  
 $B_r/B_m = 0.3 \div 0.6$

Применяют в  
импульсных  
трансформаторах

применяются в радиочастотном диапазоне и в слабых полях, где справедлив эмпирический закон Рэлея:

$$\mu = \mu_H (1 + \alpha_H H)$$

где  $\mu_H$  – начальная магнитная проницаемость,  $\alpha_H$  – коэффициент амплитудной нестабильности в области линейного участка зависимости  $\mu$  от  $H$ . В слабых полях  $\mu$  возрастает линейно с  $H$

наибольшая магнитная проницаемость

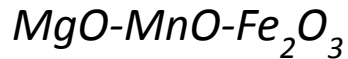
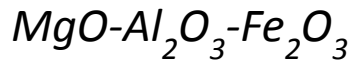
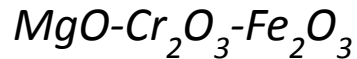
# *Свойства некоторых промышленных ферритов с округлой петлей гистерезиса*

Тип феррита	$\mu_n$ при $T=20^\circ\text{C}$	$\mu_{\max}$	$B, \text{ Тл при } H_m=800 \text{ А/м } T=20^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	Область применения
Ni-Zn	100 ÷ 2000	7000	0.25 ÷ 0.44	$10 \div 10^8$	Антенны, индуктивные элементы, трансформаторы
Ni-Zn	9 ÷ 50	170	0.15 ÷ 0.30	$10^4 \div 10^6$	Фильтры, линии задержки. Высокочастотные сумматоры мощности
Ni-Zn	1100 ÷ 1700	4600	0.16 ÷ 0.20	$10 \div 10^2$	Датчики температур систем пожарной сигнализации
Mn-Zn	3000	6500	0.37	0.5	Элементы запоминающих устройств
Mn-Zn	2000 ÷ 10000	—	0.27 ÷ 0.37	$0.1 \div 10^3$	Магнитные головки



# феррогранаты

$Y_3Fe_5O_{12}$  с различными добавками



Для СВЧ-диапазона

$\mu_{max}$  – максимальная магнитная проницаемость,

$B$  – магнитная индукция, Тл(Гс)

$B_r$  – остаточная магнитная индукция, Тл(Гс)

$H_m$  – напряженность магнитного поля, А/м (Э).

## Материалы с

наличие двух устойчивых положений остаточной индукции  $+B_r$  и  $-B_r$  на петле гистерезиса при высоком соотношении  $B_r/B_m$ .

Тип феррита	$B_m$ , Тл при $H_m = 80$ А/м	$B_r$ , Тл	$\rho$ , Ом·м	Область применения
Mg-Mn-Ca	-	0.19 ÷ 0.27	2.103	Переключающие, запоминающие, логические элементы и устройства
Li-Na	-	0.20 ÷ 0.32	1.106	
Mg-Mn	-	0.16 ÷ 0.23	5.104	
Ni-Zn-Cu	0.21 ÷ 0.39	0.15 ÷ 0.22	1.105	

# Магнитожесткие ферриты на основе гексаферритов

	Марка	$H_{Aэфф}$ (кЭ) ±5%	$\Delta H$ (кЭ)	$f_{кр}$ (ГГц) ±10%	$\epsilon'$ ±6%	$tg\delta_\epsilon \cdot 10^4$	$T_c$ (°C)	$H_c$ (кЭ)	$\rho$ (г/см <sup>3</sup> )
$BaO \cdot 6Fe_2O_3$	06СЧА3В	14.0	≤2.5	60	18.0	≤10	350	0.8	5.00
	05СЧА4В	15.8	≤1.5	60	19.0	≤8	450	0.6	5.20
	04СЧА12В	24.0	≤2.0	75	18.0	≤8	320	1.5	5.00
	03СЧА2В	31.0	≤2.5	90	17.0	≤10	260	2.0	4.95
	03СЧАВ	35.0	≤1.5	110	16.0	≤10	220	3.0	4.90
$SrO \cdot 6Fe_2O_3$									

$H_a$  – амплитудное значение переменного магнитного поля, А/м (Э)

$f_{кр}$  – частота, при которой тангенс угла магнитных потерь материала равен 0.1,

$H_c$  – коэрцитивная сила, А/м (Э).

ГОСТ 19693-74 Материалы магнитные. Термины и определения,

ГОСТ 19880-74 Электротехника. Основные понятия. Термины и определения.

Области применения магнитной керамики: радиоэлектроника, радиотехника, телевизионные устройства, радиолокационные приборы, радиорелейные системы связи, элементы памяти в компьютерах, постоянные магниты

# Оксидные терморезисторы

нелинейная зависимость электрического сопротивления материала от температуры окружающей среды

применение в регулирующей, следящей, автоматической и другой электронной аппаратуре

могут обладать как положительным (позисторы) так и отрицательным температурным коэффициентом сопротивления

позисто

$\rho$   
с ростом температуры  
растёт сопротивление

термисто

$\rho$   
с ростом температуры  
сопротивление падает

$BaTiO_3$

- низкотемпературные (предназначенные для работы при температурах ниже  $-100^\circ\text{C}$ ),
- среднетемпературные (от  $-100$  до  $237^\circ\text{C}$ )
- высокотемпературные (выше  $300^\circ\text{C}$ )

от  $625$  до  $1025^\circ$

С

# *Требования к материалам терморезисторов*

- в промышленных терморезисторах необходимо обеспечить чисто электронную (дырочную) проводимость и исключить ионную. Наличие ионной составляющей приводит к нестабильности в работе на постоянном токе;
- неизменность химического и фазового состава в рабочем диапазоне температур;
- наименьший разброс в значениях проводимости  $\sigma$  и энергии активации  $\Delta E$  в условиях серийного производства. Не меньшее значение имеет малая чувствительность свойств к случайным и технологическим примесям;
- воспроизводимость свойств и возможность изменения номинала в широком диапазоне численных значений за счет изменения процентного соотношения компонентов;
- во многих случаях иметь возможно большее значение энергии активации  $\Delta E$ ; возможность серийного производства разных форм и размеров терморезистивных изделий (стержни, диски, шайбы, бусинки, пластины и т.д.);
- достаточная механическая прочность;
- терморезисторы должны иметь хороший омический контакт с материалом контактных слоев. Материал контактной площадки не должен образовывать переходных зон, дающих выпрямляющий эффект. Сопротивление ТР не должно зависеть от направления тока.

# Технология терморезисторов

переработка шихт исходных компонентов производится в этиловом спирте 24 часа  
Для получения пресс-порошка применяют распылительную сушку предварительный синтез при 600–700 °С медно-марганцевые системы спекаются при 900–1000 °С, никель-марганцевые – при 1240–1280 °С,  $MnO-NiO-CoO$  при 1300–1320 °С

от 2.5 до 5 изделий металлизуют серебряной пастой с последующим ее вжиганием

Скорость охлаждения после нанесения контактного слоя влияет на электрические характеристики изделия: ускорение охлаждения понижает электросопротивление

удельная теплота испарения этилового спирта в 2.6 раза меньше, чем у воды

пневматические форсунки при давлении сжатого воздуха 0.1–0.2 МПа