

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени  
М.В.ЛОМОНОСОВА»

---

Физический факультет

Кафедра магнетизма

**Исследование магнитных свойств металл-замещенного  
гексаферрита бария**

Бакалаврская работа

Студентки 4 курса

Каландия Маргариты Раминовны

Научный руководитель:

д. ф.-м. н. Перов Н.С.

Заведующий кафедрой магнетизма:

д. ф.-м. н. Перов Н.С.

Москва 2016 г.

## Оглавление

<b>Введение</b> .....	3
<b>Глава 1. Бариевые гексаферриты</b> .....	4
1.1 Типы кристаллической структуры.....	4
1.2 Особенности магнитных свойств.....	5
1.3 Методы получения.....	6
1.3.1 Стандартный керамический метод.....	6
1.3.2 Золь-гель метод.....	7
1.3.3 Соосаждение.....	7
1.4 Влияние размеров частиц на магнитные свойства.....	7
1.5 Влияние допирования на магнитные свойства.....	8
<b>Глава 2. Методика измерений и образцы</b> .....	10
2.1 Особенности получения образцов и их состава.....	10
2.2 Магнитные измерения и обработка полученных результатов.....	11
<b>Глава 3. Результаты и их обсуждение</b> .....	13
3.1 Результаты измерений монокристаллов незамещенного гексаферрита бария.....	13
3.2 Результаты измерений порошков незамещенного гексаферрита бария.....	15
3.3 Результаты измерений кристаллов Mn-замещенного гексаферрита бария.....	16
3.4 Результаты измерений порошков Mn-замещенного гексаферрита бария.....	17
3.5 Сравнительный анализ полученных результатов.....	19
<b>Основные результаты</b> .....	22
<b>Список литературы</b> .....	23

## Введение

---

Бариевые гексаферриты известны в промышленности с 1952 года под названием феррооксдюры [1.1-1.3]. Благодаря своим свойствам, таким как сравнительно высокие значения намагниченности насыщения и коэрцитивной силы, бариевые гексаферриты занимают прочную позицию в сфере производства постоянных магнитов [2], конкурируя в этой области с такими соединениями, как неодим-железо-бор, самарий-кобальт и альнико (русское название ЮНДК). Достоинством является высокая химическая стабильность [3.1-3.6] и стойкость к коррозии, что делает ферритовые магниты экологически безопасными и годными к применению практически без ограничений во времени. Бариевые гексаферриты характеризуются низкими значениями электропроводности, что позволяет применять такие материалы при наличии высокочастотных полей (до сотен МГц). Относительно простая технология изготовления и дешевые составляющие делают ферритовые магниты доступными. Методика получения бариевых гексаферритов постоянно совершенствуется. Сравнительно недавно был разработан метод высокотемпературного твердофазного синтеза, значительно повышающий производительность синтеза бариевых гексаферритов.

*Целью* данной работы является исследование магнитных свойств бариевых гексаферритов, полученных методом высокотемпературного твердофазного синтеза, и изучение зависимостей магнитных свойств бариевых гексаферритов от их морфологии и от состава.

# Глава 1. Бариевые гексаферриты

---

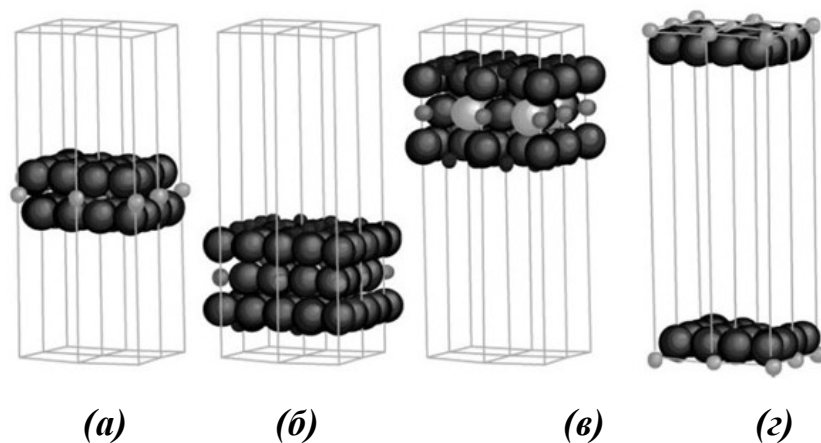
## 1.1 Типы кристаллической структуры

Феррит бария, имеющий химическую формулу  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ , является магнитотвёрдым веществом, обладает структурой, аналогичной природному минералу магнетоплюмбиту. Кристаллическая структура магнетоплюмбита характеризуется пространственной группой  $R\bar{6}3/mmc$ .

По структуре и составу ферриты бария делятся на несколько основных типов [4.1]:

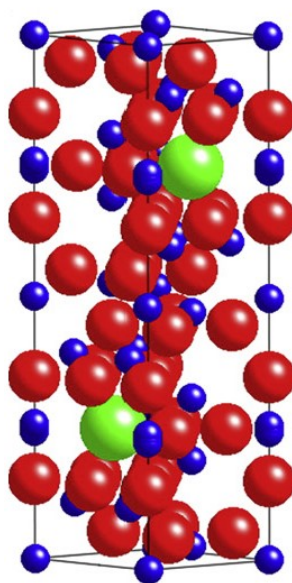
- М-тип (ферриты  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ), рассматриваемый в данной работе;
- Y-тип (ферриты  $\text{Ba}_2\text{Me}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ );
- Z-тип (ферриты  $\text{Ba}_3\text{Me}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ );
- W-тип (ферриты  $\text{BaMe}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ );
- X-тип (ферриты  $\text{Ba}_2\text{Me}_2\text{Fe}_{28}\text{O}_{46}$ );
- U-типа (ферриты  $\text{Ba}_4\text{Me}_2\text{Fe}_{36}\text{O}_{60}$ ).

В дипломной работе рассматриваются бариевые гексаферриты М-типа. Кристаллическая структура гексаферрита М-типа может быть представлена комбинацией двух типов блоков: шпинельных блоков S (с осью  $\{111\}$ , направленной вдоль оси с кристаллической решётки) и гексагональных блоков R. Блок S состоит из двух слоёв атомов кислорода, содержащих 8 ионов кислорода и 6 ионов железа (рис. 1а). Блок R состоит из трёх кислородных слоёв и содержит 11 ионов кислорода, 6 ионов железа и один ион  $\text{M}^{2+}$  (рис. 1б). Блоки чередуются в структуре по типу  $\text{SRS}^*\text{R}^*$ , где  $\text{S}^*$  и  $\text{R}^*$  блоки повернуты на  $180^\circ$  относительно оси с (рис. 1в, 1г).



*Рис. 1 (а-блок S, б-блок R, в-блок S\*, з-блок R\*)*

В целом структуру элементарной ячейки феррооксидюра можно представить следующим образом:



*Рис. 2 Кристаллическая структура гексаферрита М-типа (красные-атомы кислорода, синие-атомы железа, зеленые-атомы бария)*

## 1.2 Особенности магнитных свойств

Магнитные свойства феррооксидюра обусловлены наличием магнитных моментов атомов железа. Взаимодействие между ними может быть как ферромагнитным, так и антиферромагнитным, и осуществляется опосредованно через ионы кислорода.

Все гексаферриты содержат, по меньшей мере, один крупный ион металла  $2^+$  (обычно  $Ba^{2+}$  или  $Sr^{2+}$ ), наличие которого вызывает небольшое возмущение в решетке из-за различия в размерах, и отвечает за кристаллографическую анизотропию гексаферрита. Преимущественно легкая ось намагничивания бариевых гексаферритов направлена вдоль оси  $c$ . Магнитные свойства меняются при изменении направления выравнивания – намагниченность быстрее выходит на насыщение при наименьших приложенных магнитных полях, а коэрцитивная сила достигает наиболее высоких значений в полях, приложенных параллельно оси  $c$ , относительно значений, полученных в полях, приложенных перпендикулярно этой легкой оси намагничивания [4.2]. Интересно отметить, что авторы работы [4.3] обнаружили, что температура Кюри также изменяется и наиболее высока в полях, приложенных в направлении оси  $c$ .

## **1.4 Методы получения**

На данный момент существуют различные методы получения ферритов бария. Основываясь на результатах исследований в этой области, следует отметить, что синтез оказывает значительное влияние на свойства готового образца. В данном разделе будут рассмотрены наиболее часто используемые методы.

### **1.4.1 Стандартный керамический метод**

Одним из наиболее популярных и доступных методов синтеза бариевых гексаферритов является керамический метод. Он состоит в одновременном механическом перемешивании реагентов и их измельчении с последующей термической обработкой. Термообработку при керамическом синтезе проводят максимальной с точки зрения термодинамики температуре с целью ускорения диффузных процессов. К достоинствам метода относится простота его исполнения, а существенным недостатком является значительная неоднородность исходной смеси. При перемешивании реагентов в ступке получают частицы размером около 5 мкм.

При использовании шаровых мельниц можно получить частицы размером несколько долей микрометра. Из-за неоднородности реакционной смеси часто проводят многократное чередование операций помола и термообработки, что существенно увеличивает время, необходимое для проведения синтеза.

#### **1.4.2 Золь-гель метод**

Технология этого метода синтеза основана на термическом разложении гомогенных твердых прекурсоров в сильнонеравновесных условиях. Одним из возможных методов получения промежуточных гомогенных твердых фаз является превращение в аморфный гель исходного гомогенного жидкого раствора.

Таким методом синтеза воспользовались авторы статьи [5]. Некоторое количество Fe растворили в отфильтрованной воде и перемешивали в течение нескольких секунд, чтобы сформировать золь. Затем полученный золь сушили при 100 °C в течение 24 часов для образования геля. После этого он был преобразован в ксерогель. Для разложения органических веществ и солей ксерогель прокачивали сначала при 500 °C в течение 1 часа при скорости нагрева 1 °C в минуту. Затем нагрев происходил со скоростью 1 °C до температуры 1000 °C, при которой ксерогель оставался в течение 1 часа, после чего его вынимали из печи.

#### **1.4.3 Соосаждение**

Данный метод заключается в соосаждении солей с основанием, в результате чего появляется осадок, содержащий компоненты гексаферрита, смешанные на ионном уровне.

#### **1.4.4 Высокотемпературный твердофазный синтез**

В качестве перспективного метода синтеза рассматривается возможность получения ферритов в реакциях горения. Так наночастицы, легированного алюминием  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ , были получены при горении системы содержащей нитраты кобальта, железа и алюминия с

глицином, в качестве топлива [13a]. Нанокристаллические образцы феррита состава  $Mn_xMg_{0.5-x}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  ( $x = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ ) синтезированы в процессе горения в системе содержащей глицин в качестве топлива и нитраты металлов в качестве окислителей. Результаты показали, что нанокристаллические Mn-Mg-Zn ферриты имеют средний размер частиц 40 нм. Параметр решетки линейно возрастает с увеличением содержания Mn. Магнитные измерения показывают, что коэрцитивная сила уменьшается, а намагниченность возрастает с увеличением содержания Mn [14a].

Для получения магнитных материалов значительный интерес могут представлять твердофазные системы, содержащие соли неорганических кислот и пероксидные соединения щелочных металлов, в которых, после инициирования тепловым источником, развивается фронт горения (самораспространяющегося взаимодействия - СРВ).

Установлено, что достаточно высокая температура, которая достигается во фронте СРВ, перестройка кристаллических решеток реагирующих веществ, образование новых кристаллических структур, а также выделение кислорода способствуют образованию этих оксидов в весьма реакционном состоянии с малыми размерами частиц. Обращает на себя внимание и тот факт, что температуры во фронте горения явно ниже температур плавления образующихся оксидов, что препятствует образованию сплавленных конгломератов. Образующийся  $Na_2SO_4$  играет роль реагента для покрытия поверхности частиц и также препятствует агрегации и диффузионному спеканию частиц.

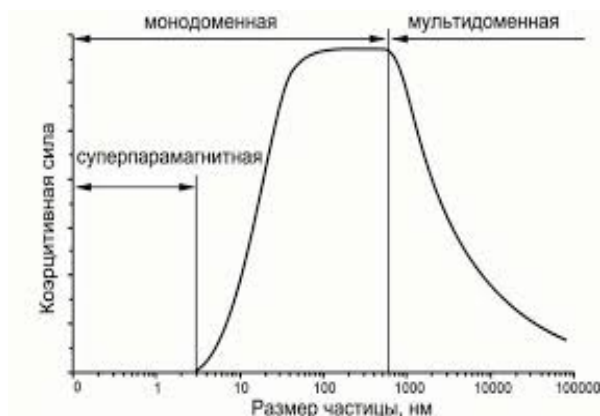
Аналогичный метод был использован нашими коллегами под руководством Д.А.Винника из Челябинска [15a].

### **1.5 Влияние размеров частиц на магнитные свойства**

При повышении температуры и времени спекания образцы становятся более плотными, имеют больше магнитных моментов на единицу объема, в них уменьшается количество примесей, и, следовательно,



достигают наибольших значений намагниченности насыщения. Но при подобной термической обработке уплотнение приводит к *росту зерен*, что делает кристаллиты многодоменными и, следовательно, ведет к снижению значений коэрцитивной силы [6]. Максимальная коэрцитивная сила у ферромагнетиков наблюдается для систем однодоменных частиц. Теоретическая зависимость представлена на графике (рис. 3).



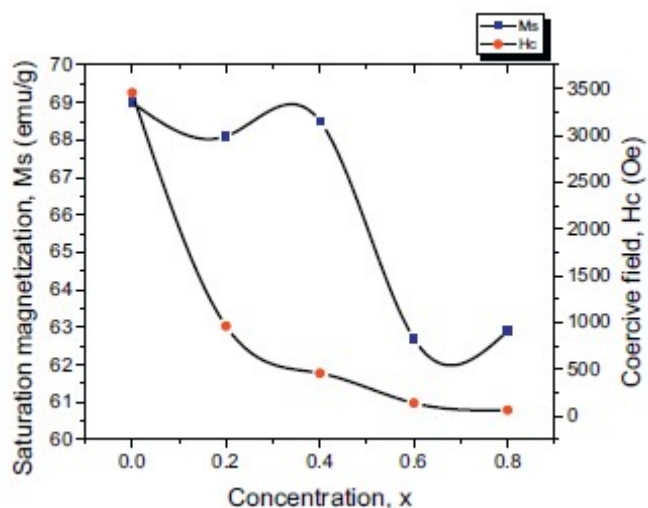
**Рис. 3 Теоретическая зависимость коэрцитивной силы от размера частицы [7]**

Таким образом, оптимизация магнитных свойств гексаферритов зависит от исходного материала и условий синтеза [8].

### **1.6 Влияние допирования на магнитные свойства**

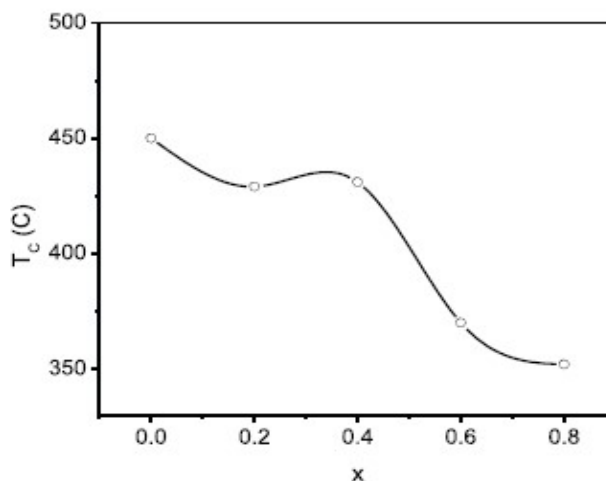
Для достижения управления магнитными свойствами бариевых гексаферритов используют замещение атомов железа в составе на атомы различных элементов.

Авторами статьи [9] были получены образцы с химической формулой  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Cu}_x\text{O}_{19}$ . На основе полученных результатов (рис. 4) был сделан вывод о снижении намагниченности насыщения коэрцитивной силы с ростом концентрации допирующего вещества. Резкое падение коэрцитивной силы для  $x=0.4$  и  $x=0.8$ , по мнению авторов, может быть связано со значительным снижением анизотропии поля в результате замещения.



*Рис. 4* Зависимости намагниченности насыщения и коэрцитивной силы от концентрации  $Si$

Авторами статьи были проведены низкотемпературные измерения. На основе представленных результатов (рис. 5) был сделан вывод об относительно небольшом изменении температуры Кюри в области низких концентраций  $Si$  в составе образцов (вплоть до  $x=0,4$ ). Быстрое падение температуры Кюри отмечено в области высоких концентраций  $Si$



*Рис. 5* Зависимость температуры Кюри от концентрации  $Si$

Таким образом, представляет интерес исследование поведение вариевых ферритов при замещении атомов железа различными элементами с целью поиска материалов с новыми заданными свойствами. В настоящей работе были исследованы образцы ферритов бария с замещением атомами марганца.

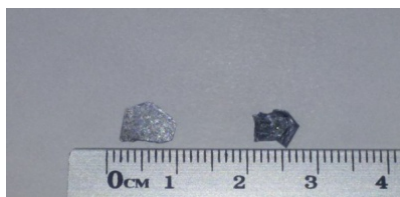
## Глава 2. Методика измерений и образцы

---

### 2.1 Особенности получения образцов и их состава

Все исследованные в дипломной работе образцы были изготовлены в Южно-Уральском государственном университете *методом высокотемпературного твердофазного синтеза*. Всего было исследовано четыре серии образцов.

Первая серия образцов представляет собой пять монокристаллов незамещённого бариевого гексаферрита, два из которых представлены на фотографии (рис. 6). Монокристаллы этой серии обладают единым составом, отличаются формой и линейными размерами.



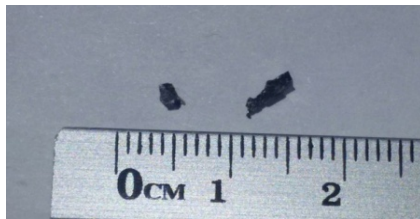
*Рис. 6 Монокристаллы незамещенного гексаферрита бария*

Вторая серия образцов представляет собой порошки незамещенного бариевого гексаферрита (рис. 7), полученные путём перемалывания исходного образца в течение 4, 15 и 18 часов в шаровой мельнице. Образцы этой серии отличаются друг от друга временем обработки и, следовательно, размерами частиц, составляющих порошки.



*Рис. 7 Порошок незамещенного гексаферрита бария*

Третья серия образцов представляет собой кристаллы бариевого гексаферрита, допированного Mn с различной степенью замещения. Два типичных кристалла представлены на фотографии (рис. 8). Концентрация Mn в составе образцов менялась в диапазоне от 1% до 4%.



*Рис 8 Кристаллы гексаферрита бария,  
допированноо Mn*

Четвёртая серия образцов-порошки бариевого гексаферрита, допированного Mn, один из которых представлен на фотографии (рис. 9). Концентрация Mn в составе менялась в диапазоне от 2% до 8%.



*Рис 9 Кристаллы гексаферрита бария,  
допированноо Mn*

## **2.2 Магнитные измерения и обработка полученных результатов**

Для проведения измерений порошкообразные образцы запаивались в пластиковые пакетики. Взвешивание образцов проводилось на аналитических весах RADWAG XA 52/X, имеющих погрешность 0.06 мг, то есть ошибка определения массы не превышала 1%.

Все измерения были проведены на вибрационном магнетометре VSM Lake Shore 7407 в диапазоне полей до 16 кЭ.

Все образцы измерялись в одном режиме по полю, удовлетворяющем требованиям точности измерения коэрцитивной силы.

Максимальная погрешность значений намагниченности насыщения, связанная с неточностью измерения массы образца, составляет 0.7 [ед.СГСМ/г].

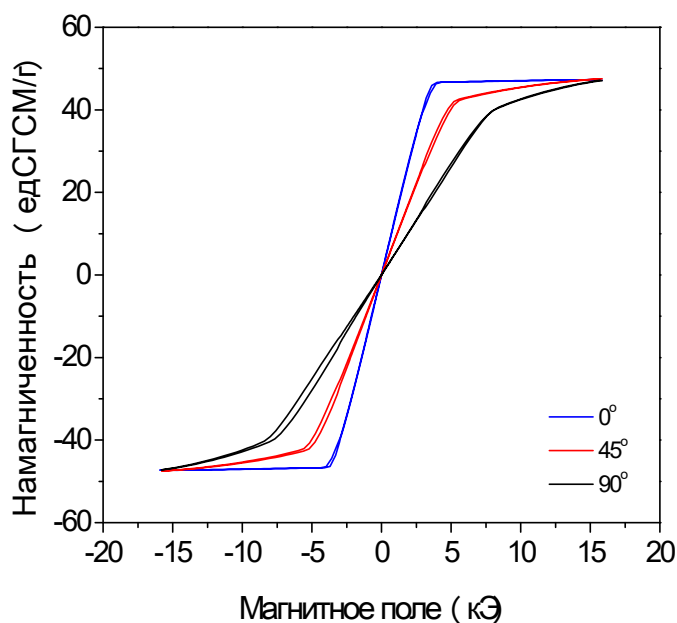
При проведении измерений пластиковые капсулы закреплялись на кварцевом держателе с помощью фум-ленты. Магнитный вклад от держателя и ленты был незначительным (при 16 кЭ этот сигнал составлял порядка  $190 \cdot 10^{-6}$  ед.СГСМ, что составляет менее 0,001% от сигнала образца), по сравнению с полезным сигналом от образца бариевого гексаферрита.

При поиске ориентации легких осей монокристаллов измерения проводились при повороте кристалла на 15 градусов. Ориентация легкой оси определялась по минимальному значению полю насыщения полевой зависимости магнитного момента.

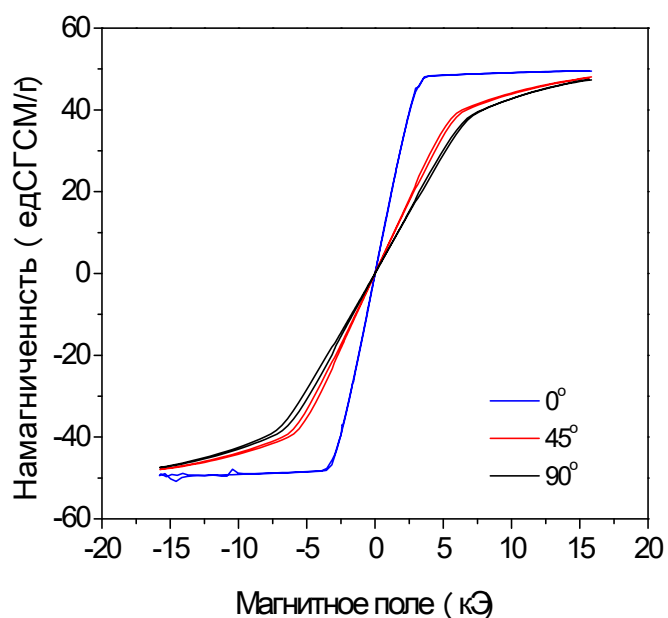
## Глава 3. Результаты и их обсуждение

### 3.1 Результаты измерений монокристаллов незамещенного гексаферрита бария

Для всех образцов были проведены измерения полевых зависимостей магнитного момента из которых вычислялись зависимости удельной намагниченности (путем деления на массу образца). как уже отмечалось выше, ориентация легкой оси определялась с точностью до 15 градусов с помощью измерения семейства кривых намагничивания при повороте образца на такой угол. За ориентацию легкой оси выбиралась такая ориентация образца, при которой поле насыщения было минимальным. На графике (рис. 10 а, б) представлены типичные зависимости намагниченности от магнитного поля для двух монокристаллов из серии исследованных образцов. Зависимости для остальных образцов этой серии аналогичны.



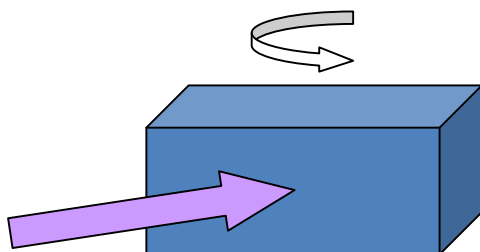
(а)



(б)

*Рис. 10 Типичные петли гистерезиса для двух монокристаллов*

Все исследованные монокристаллы характеризуются сравнительно малыми значениями коэрцитивной силы. Намагниченность насыщения не значительно меняется от образца к образцу, оставаясь в пределах погрешности. Измерения проводились с учетом ориентации монокристаллов в магнитном поле. По результатам измерений можно сделать вывод об анизотропности исследованных образцов. При совпадении внешнего магнитного поля с осью лёгкого намагничивания достигается максимум намагниченности в наименьших полях (рис. 11).



*Рис. 11 Модель для демонстрации направления оси лёгкого намагничивания относительно образца*

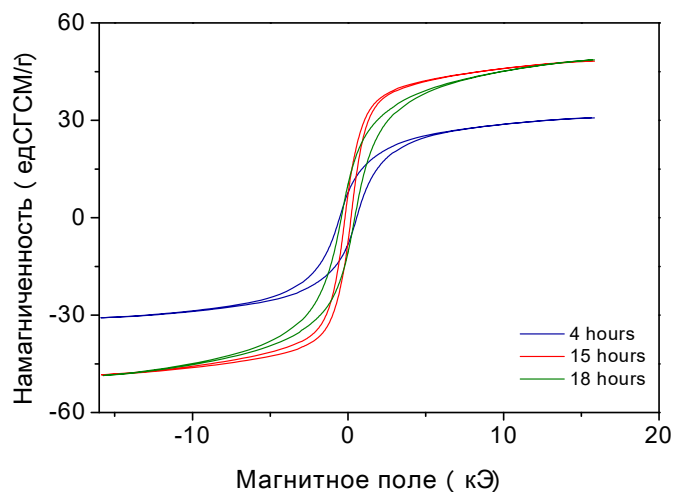
Трудная ось намагничивания повернута на 90 градусов относительно лёгкой. Результаты при повороте на 45 градусов варьируются для различных монокристаллов, возможно, из-за различной формы образцов (табл. 1)

Масса кристалла, mg	Угол поворота	Hc, Oe	Is, emu/g
210,86	0	8	48
	45	10	49
	90	26	-
127,27	0	36	-
	45	16	47
	90	16	48
179,25	0	12	48
	45	12	45
	90	21	-
208,31	0	6	47
	45	8	43
	90	12	-
188,77	0	6	49
	45	10	-
	90	12	-

*Табл. 1 Значения магнитостатических параметров для монокристаллов незамещенного БГФ*

### 3.2 Результаты измерений магнитных свойств порошков незамещенного гексаферрита бария

Измерения на порошковых образцах проводились при ориентации магнитного поля в плоскости пакетика с образцом. Тем самым минимизировалось влияние размагничивающего поля. Типичный результат, полученный на таких образцах представлен на (рис. 12).



*Рис. 12 Петли гистерезиса для порошков незамещенного гексаферрита бария для различных значений времени обработки*

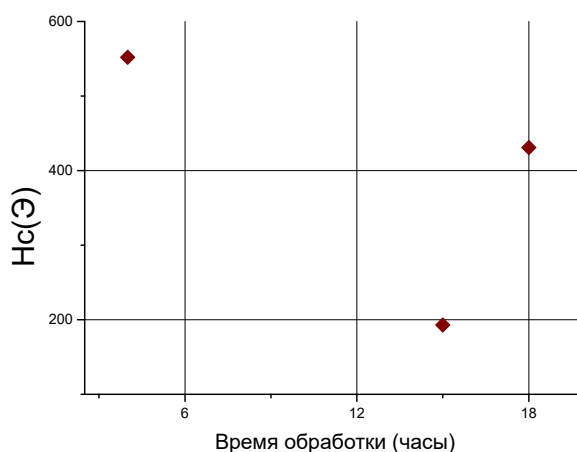
Намагниченность насыщения и коэрцитивная сила меняются при измельчении, и эти изменения сильно зависят от времени обработки. Был проведен сравнительный анализ численных значений магнитостатических параметров исследованных монокристаллов и порошков незамещенного гексаферрита бария (табл. 2).

	Нс, Э	Ms, едСГСМ/г
Монокристалл	8	48
Порошок	193	42

*Табл. 2 Экспериментально полученные значения магнитостатических параметров для монокристаллов и порошков*



Коэрцитивная сила у порошков значительно больше, чем у кристаллов. Максимальная коэрцитивная сила у ферромагнетиков наблюдается для систем однодоменных частиц. Теоретическая зависимость представлена на графике (рис. 3). При больших размерах кристалла его магнитный момент распадается на отдельные домены, что приводит к падению коэрцитивной силы по мере увеличения размеров. Но при 18-часовой обработке в проведенном эксперименте наблюдается увеличение коэрцитивной силы (рис 13), что, возможно, связано с возрастанием доли дефектов при измельчении образцов.

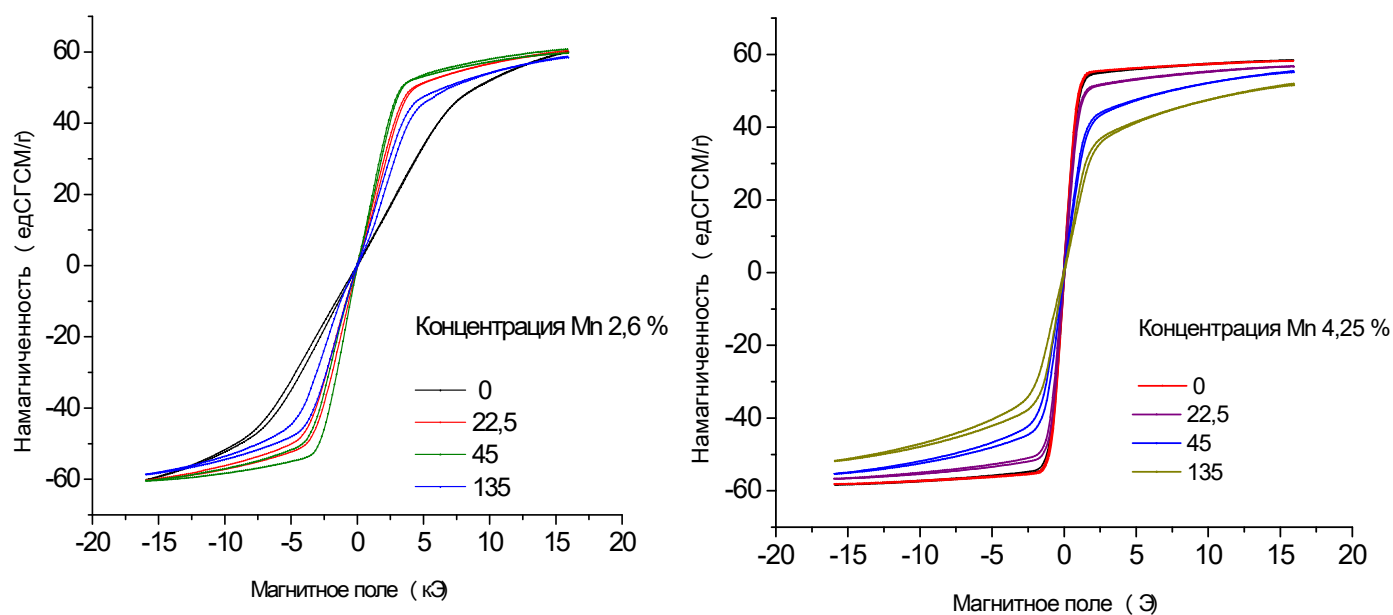


*Рис. 13 Зависимость коэрцитивной силы от времени обработки порошков*

### **3.3 Магнитные свойства кристаллов Mn-замещенного гексаферритов бария**

Для получения заданных параметров свойств ферритов используют замещение атомов бария различными элементами. В дипломной работе была исследована серия образцов с увеличением степени замещения железа марганцем. По информации от изготовителя, была изменена технология синтеза, в частности, речь шла о повышении температуры.

Представлены типичные петли гистерезиса для указанных значений концентрации Mn в кристаллах, полученных методом твердофазного синтеза (рис. 14).



**Рис. 14 Типичные петли гистерезиса для кристаллов  
Mn-замещенного гексаферрита бария**

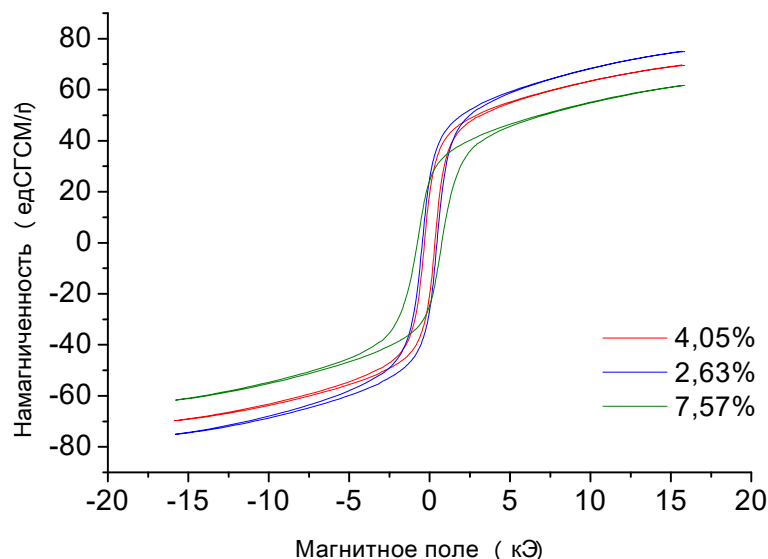
Измерения проводились с учетом ориентации кристаллов в магнитном поле. Результаты свидетельствуют об анизотропности исследуемых образцов. По представленным численным значениям магнитостатических параметров (табл. 3) можно сделать вывод о немонотонном характере изменения намагниченности насыщения и коэрцитивной силы, что, предположительно, связано с неоднородностью свойств по объёму образца, получаемого в результате синтеза.

Концентрация Mn (%)	Ms, едСГСМ/г	Hc, Э
1,00	58	24
1,20	63	37
1,30	65	36
1,50	65	34
2,50	63	42
2,60	50	39
2,90	46	66
3,00	53	52
3,10	63	32
3,90	40	56
4,20	45	35
4,25	55	33

**Табл.3  
Магнитостатические  
параметры для Mn-  
замещенных кристаллов**

### 3.4 Результаты измерений порошков Mn-замещенного гексаферрита бария

Представлены типичные петли гистерезиса для трех образцов из серии порошков, допированных Mn (рис. 15).



*Рис. 15 Типичные петли гистерезиса для Mn-замещенных порошков*

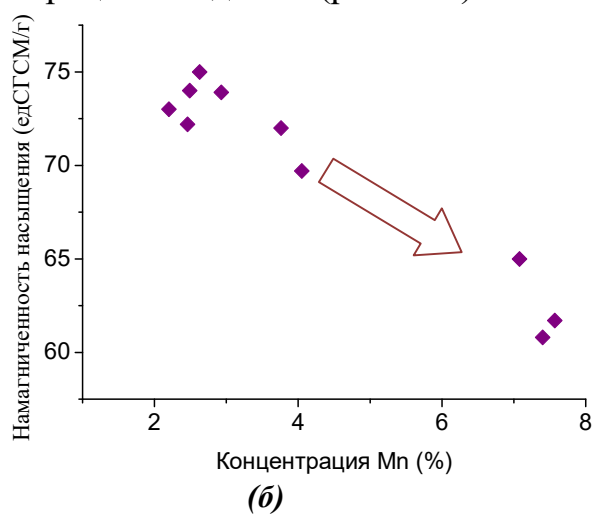
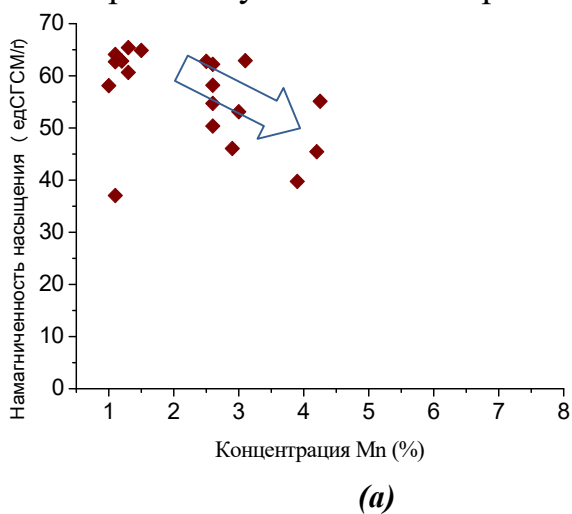
Концентрация Mn в составе указана. Как и в случае незамещенных гексаферритов бария, заметно увеличение коэрцитивной силы, причем это увеличение больше, чем для незамещенных бариевых гексаферритов. По представленным численным значениям магнитостатических параметров (табл. 4) можно сделать вывод о монотонном характере зависимостей намагниченности насыщения и коэрцитивной силы от концентрации Mn в составе порошков. Такой характер зависимостей, предположительно, объясняется тем, что в процессе перемалывания и перемешивания порошков свойства по объёму выравниваются.

Концентрация Mn (%)	Ms, едСГСМ/г	He, Э
2,20	73	500
2,46	72	293
2,49	74	316
2,63	75	452
2,93	74	417
3,76	72	388
4,05	70	327
7,08	65	352
7,40	61	622
7,57	62	759

**Табл. 4**  
**Магнитоэлектрические**  
**параметры для Mn-**  
**замещенных порошков**

### 3. 5 Сравнительный анализ

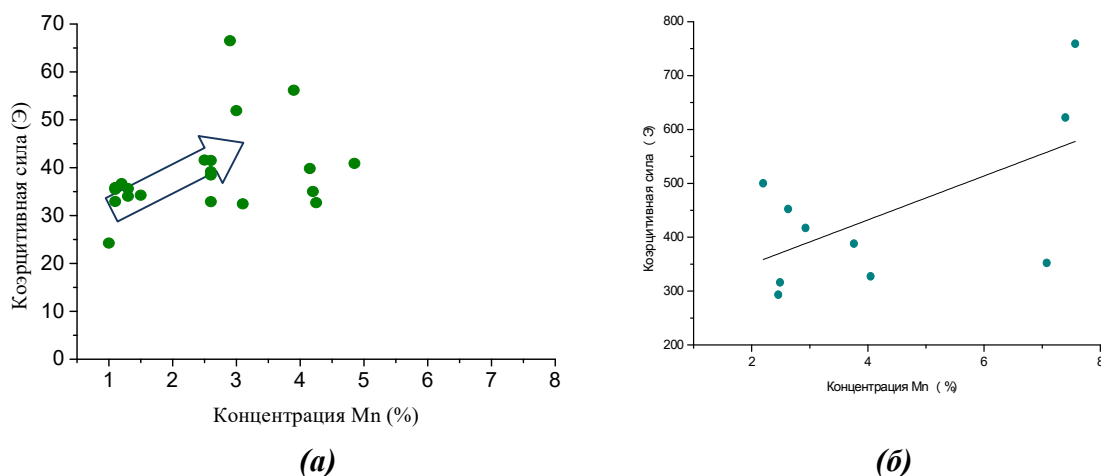
Был проведен сравнительный анализ результатов измерений кристаллов и порошков, допированных Mn. Намагниченность насыщения кристаллов с ростом концентрации Mn до 4% в составе имеет тенденцию к незначительному снижению (рис. 16а). Намагниченность насыщения порошков уменьшается с ростом концентрации Mn до 8% (рис. 16б).



**Рис 16 Зависимость намагниченности насыщения от концентрации Mn**  
**(а-кристаллы, б-порошки)**

По графику зависимости для порошков можно сделать вывод о слабом изменении намагниченности насыщения в диапазоне концентраций Mn от 2 до 4 %, что подтверждает немонотонный характер зависимости для кристаллов, в которых концентрация Mn менялась в пределах от 1 до 4%. Для кристаллов наблюдается большой разброс при переходе от образца к образцу, что указывает на неоднородность результатов синтеза. Для порошков, полученных перемешиванием, этот разброс уменьшается.

Представлены зависимости коэрцитивной силы от концентрации Mn. Для кристаллов наблюдается тенденция к росту коэрцитивной силы с увеличением концентрации Mn в составе (рис. 17а). Для порошков также наблюдается тенденция к возрастанию коэрцитивной силы с увеличением концентрации Mn (рис. 17б).



**Рис. 17** Зависимость коэрцитивной силы от концентрации Mn  
(а-кристаллы, б-порошки)

Значительный разброс для порошков в данном случае объясняется тем, что для каждого порошка стоило подбирать свой оптимальный режим размола. Сравнительный анализ показал, что для идентичных значений концентрации Mn в составе коэрцитивная сила порошков больше, чем коэрцитивная сила кристаллов.

## Основные результаты

---

-Исследованные образцы бариевых гексаферритов, синтезированных методом высокотемпературного твердофазного синтеза, обладают заметной неоднородностью свойств по объёму.

-В работе показано, что при измельчении порошков в шаровых мельницах их свойства зависят от длительности обработки. Требуется поиск оптимальных режимов, так как наблюдается немонотонная зависимость от времени обработки.

-Было обнаружено, что с увеличением содержания Mn до 8% намагниченность насыщения падает, а коэрцитивная сила возрастает.

## Список литературы (в процессе)

- 1.1 J. Smit, H.P.J. Wijn, Ferrite, Philips Tech. Lib., Eindhoven, 1960.
- 1.2 H. Su, H.W. Zhang, X.L. Tang, B.Y. Liu, J. Phys. 152 (2009) 012064.
- 1.3 J.J. Went, W. Ratheneagu, W. Gortere, W.V. Osterhougt, Philips Rechn. Rev. 13 (1951/52) 194.
- 2.1 Gutfleisch O., Willard M. A., Brück E., Chen C. H., Sankar S. G., Liu J. P. "Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient". Adv. Mater., 23 (2011) 821-842.
1. Shengping Ruan, Baokun Xu, Hui Suo, Fengqing Wu, Siqing Xiang, Muyu Zhao, J. Magn. Magn. Mater. 212 (2000) 176.
2. H.S. Cho, S.S. Kim, IEEE Trans. Magn. 53 (1999) 151.
3. S. Sugimoto, S. Kondo, K. Okayama, et al., IEEE Trans. Magn. 35 (3) (1999) 154. H.S. Cho, S.S. Kim, IEEE Trans. Magn. 53 (1999) 151.
4. P. Campbell, Permanent Magnet Materials and Their Application, Cambridge University Press, Cambridge (, 1994.
5. H. Stablein, in: E.P. Wohlfarth (Ed.), Ferromagnetic Materials: a Handbook on the Properties of Magnetically Ordered Substances, 1982. Amsterdam: North-Holland, p. 441 (Chapter 7).
6. O. Kubo, E. Ogawa, J. Magn. Magn. Mater. 134 (1994) 376.
7. C.L. Dube, S.C. Kashyap, D.K. Pandya, D.C. Dube, J. Phys. Status Solidi A 206 (2009) 2627.
8. Robert C. Pullar. "Hexagonal ferrites: A review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics". Progress in Materials Science, 57 (2012) 1191- 1334.
9. Smit J, Wijn HPJ. In: Ferrites, Philips Technical Library, Eindhoven; 1959.
10. Belov KP, Koroleva LI, Levitin RZ, Jergin YV, Pedko AV. Phys Staus Solidi 1965;12:219.
- 11.

- 13a. N. M. Deraz. Production, Physicochemical Characterization and Magnetic Behavior of Nanocrystalline Al-Doped Co/Fe System // *Int. J. Electrochem. Sci.*, 7 (2012) 4596 – 4607 C.
- 14a. H. Mohseni, H. Shokrollahi, Ibrahim Sharifi, Kh. Gheisari Magnetic and structural studies of the Mn-doped Mg–Zn ferrite nanoparticles synthesized by the glycine nitrate process//*Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 324, Issue 22, November 2012, Pages 3741–3747
- 15a. D. A. Vinnik, D. A. Zherebtsov, L. S. Mashkovtseva, S. Nemrava, M. Bischoff, N. S. Perov, A. S. Semisalova, I. V. Krivtsov, L. I. Isaenko, G. G. Mikhailov, and R. Niewa, “Growth, structural and magnetic characterization of al-substituted barium hexaferrite single crystals,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 615, pp. 1043–1046, 2014