

На правах рукописи



Стариков Андрей Юрьевич

**СТРУКТУРА И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
МОНОЗАМЕЩЕННОГО ТИТАНОМ ГЕКСАФЕРРИТА БАРИЯ,  
ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ТВЕРДОФАЗНОГО СИНТЕЗА**

Специальность 1.4.4. Физическая химия

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата химических наук

Челябинск – 2023

Работа выполнена на кафедре материаловедения и физико-химии материалов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель:**

Винник Денис Александрович, доктор химических наук, доцент, профессор РАН, заведующий кафедрой материаловедения и физико-химии материалов ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», директор НИИ «Перспективные материалы и ресурсосберегающие технологии» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

**Официальные оппоненты:**

Вербенко Илья Александрович, доктор физико-математических наук, директор научно-исследовательского института физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»;

Ярошенко Федор Александрович, кандидат химических наук, доцент кафедры химии твердого тела и нанопроцессов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет».

**Ведущая организация:**

Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», Республика Беларусь, г. Минск.

Защита состоится «20» сентября 2023 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.437.03 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243703-d-21229804/starikov-andrey-yurevich>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба отправлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ, Ученый совет университета. Тел.: +7(351)267-91-23, e-mail: sozykinsa@susu.ru.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
к.ф.-м.н., доцент



Созыкин Сергей Анатольевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Неуклонно растущий темп развития технологий ставит перед учёными задачи, для решения которых требуется разработка материалов, обеспечивающих возможность регулирования магнитных и электрических свойств. Такими материалами являются гексагональные ферриты М-типа. Благодаря своему кристаллическому строению эти материалы обладают анизотропией свойств, высокой частотой естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР), высокими значениями диэлектрической проницаемости и магнитной восприимчивости. Помимо этого, замещение части ионов железа различными легирующими элементами предоставляет возможность модифицировать кристаллическую решётку гексагональных ферритов, тем самым позволяя «настраивать» функциональные характеристики материала под конкретные требования для применения в различных отраслях.

Замещение части ионов железа таким легирующим элементом как титан позволяет модифицировать свойства – варьировать значения диэлектрической проницаемости и магнитной восприимчивости, дает возможность регулировать частотный диапазон ферромагнитного резонанса. Кроме того, благодаря своему кристаллическому строению этот материал обладает анизотропией свойств, высокой химической стабильностью, коррозионной стойкостью, что делает возможным применение данного материала в промышленности.

Такой подход, как регулирование свойств материала посредством варьирования состава исходной смеси, сочетающий этапы синтеза замещенного титаном гексаферрита бария  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$  твердофазным методом (с уровнем замещения от 0 до 2,0 и шагом 0,25) и последующего исследования структуры, когда происходит контролируемое изменение анизотропии и модифицирование свойств материала, позволит определить составы с оптимальными для применения в электронике свойствами.

**Цель работы** – изучить структуру и физико-химические свойства монозамещенного титаном гексаферрита бария, полученного методом твердофазного синтеза.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие **задачи**:

- 1) провести теплотехнический расчет, оптимизацию и изготовление высокотемпературной печи с ПИД регулятором температуры с максимальной температурой до 1400 °С;
- 2) выполнить термодинамическое моделирование зависимости фазового состава системы BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> от температуры;
- 3) отработать методику синтеза замещенного титаном гексаферрита бария BaFe<sub>12-x</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>19</sub> твердофазным методом (с уровнем замещения от 0 до 2,0 и шагом 0,25), гарантирующую получение однофазного состава;
- 4) установить зависимости параметров кристаллической структуры от химического состава созданной концентрационной линейки BaFe<sub>12-x</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>19</sub>;
- 5) установить зависимости магнитных свойств созданной концентрационной линейки твердых растворов BaFe<sub>12-x</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>19</sub> от состава.

**Научная новизна:**

- 1) для системы BaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>, опираясь на литературные данные и результаты собственных экспериментов, сформирована термодинамическая модель фазовых равновесий и получены результаты моделирования зависимости фазового состава от температуры;
- 2) отработаны комплексы физико-химических параметров, обеспечивающие получение методом твердофазного синтеза образцов замещенного титаном гексаферрита бария BaFe<sub>12-x</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>19</sub>, где x от 0 до 2,0 с шагом 0,25;

- 3) впервые для созданных концентрационной линейки твердых растворов  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$  установлены зависимости параметров решетки от содержания замещающего элемента – титана;
- 4) впервые для созданных концентрационной линейки твердых растворов  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$  установлены зависимости магнитных свойств (намагниченность насыщения, температура Кюри) от содержания замещающего элемента – титана.

### **Практическая ценность и реализация результатов работы.**

Проведенные в рамках выполнения теплотехнические расчеты позволили провести оптимизацию конструкции печи, что имеет практическую значимость для выполнения экспериментальных научных работ.

Созданные твердые растворы со структурой магнетоплюмбита с модифицированными свойствами имеют высокую практическую значимость для использования в качестве функциональных материалов для активно развивающейся в нашей стране электроники, в частности СВЧ диапазона. Разработка технологий создания таких материалов, а затем и устройств на их основе, безусловно, окажет содействие обеспечению технологического суверенитета Российской Федерации.

### **На защиту выносятся:**

- 1) изотермические разрезы фазовой диаграммы системы  $\text{BaO-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ , демонстрирующие результаты моделирования зависимости фазового состава данной системы от температуры;
- 2) комплекс физико-химических параметров, обеспечивающий получение монофазных материалов замещенного титаном гексаферрита бария  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$  методом твердофазным синтеза (с уровнем замещения от 0 до 2,0 и шагом 0,25);
- 3) зависимости параметров кристаллической структуры (параметров и объема кристаллической решетки) от химического состава созданной концентрационной линейки твердых растворов  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$ ;

4) зависимости магнитных свойств (намагниченность насыщения, температура Кюри) от химического состава созданной концентрационной линейки твердых растворов  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$ .

**Степень достоверности результатов.** Для обеспечения достоверности результатов применены современные методы и техники анализа структуры, состава и свойств исследуемых образцов, а также специализированное программное обеспечение. Полученные результаты работы соответствуют актуальным теоретическим представлениям и согласуются с имеющимися в литературных источниках данными других исследователей.

**Личный вклад автора.** Вклад автора заключается в успешном решении проблемы определения закономерностей влияния химического состава твёрдых растворов со структурой магнетоплюмбита (гексаферрита бария, в исходной матрице которого атомы железа частично замещены атомами титана) на кристаллическую структуру и свойства. Автором построены модели зависимости фазового состава системы  $\text{BaO-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  от температуры, отработаны комплексы физико-химических параметров, обеспечивающие получение методом твердофазного синтеза образцов гексаферрита бария состава  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$ , где  $x$  принимает значение от 0 до 2,0 с шагом 0,25. В рамках решения задач исследования автором выполнены работы по изучению морфологии, определению химического и фазового составов, расчёту параметров решетки на основе полученных данных рентгенофазового анализа, определению температур фазовых переходов, исследованию магнитных свойств; на основе измеренных изменений структуры и свойств установлению закономерностей их изменения в зависимости от состава.

**Апробация работы.** Материалы диссертационного исследования представлены на следующих конференциях: 1) IV International Baltic Conference on Magnetism (IVCM-2021), 29 сентября – 2 августа 2021 г., Светлогорск, Россия; 2) The XII International Conference on Chemistry for

Young Scientists (MENDELEEV-2021), 6-10 сентября 2021 г., Санкт-Петербург, Россия; 3) IX International Scientific Conference «Actual Problems of Solid State Physics» (APSSP-2021), 22-26 ноября 2021 г., Минск, Беларусь.

**Публикация результатов работы.** Основные результаты диссертационного исследования изложены в 13 печатных работах, из них 7 публикаций в изданиях, индексируемых наукометрическими базами данных Web of Science и Scopus, 1 в Scopus, а также результаты данного исследования доложены и представлены на 3 международных конференциях. Кроме того, соискателем был получен 1 патент на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения, библиографического списка и приложения. Общий объем работы составляет 106 страниц, 28 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 117 наименований.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю доктору химических наук, доценту, профессору РАН Д.А. Виннику за поддержку, консультирование и помощь в работе. За сотрудничество и помощь в работе над диссертационным исследованием, проведении экспериментов и анализе их результатов автор выражает благодарность: доктору химических наук, доценту, Е.А. Трофимову; доктору химических наук Д.А. Жеребцову; кандидату физико-математических наук В.Е. Живулину; доктору физико-математических наук С.В. Труханову; доктору химических наук, профессору В.В. Авдину, коллективу Лаборатории роста кристаллов и НОЦ «Нанотехнологии» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отражены актуальность исследований, сформулирована цель, определены задачи, обоснована научная новизна и практическая значимость исследования, а также представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен аналитический обзор литературных данных о типах, свойствах и применениях ферритов со структурой шпинели, граната и магнетоплюмбита.

Приведен обзор и систематизация результатов получения кристаллов, керамики и порошков гексагональных ферритов. Рассмотрены параметры процессов роста, результаты выращивания кристаллов, синтеза керамики и исследования свойств материалов.

Описаны наиболее востребованные и актуальные применения гексаферритов и твердых растворов на их основе. В частности, показано, что такие материалы имеют широкий спектр применений, например, в технике СВЧ (фильтры, фазовращатели, вентили, генераторы, шумоподавители и др.), элементах солнечных панелей и батарей, магнитопластах и магнитоэластах, устройствах магнитной записи и хранения информации.

Рассмотрены ранее полученные данные по системам  $\text{BaO-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ ,  $\text{BaO-TiO}_2$ ,  $\text{BaO-Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ .

В данном исследовании был использован титан в качестве легирующего элемента. Анализ найденного небольшого количества литературных источников свидетельствует о том, что замещение части ионов железа ионами титана позволяет оптимизировать свойства конечного материала, что делает его привлекательным для применения в СВЧ-технике.

**Во второй главе** диссертационного исследования представлен тепловой расчет высокотемпературной установки для синтеза керамических материалов в атмосфере воздуха при широком диапазоне



температур. Тепловой расчет включает в себя составление теплового баланса, который связывает приход и расход тепла. Расчет теплового баланса позволил определить технико-экономические показатели работы установки.

Третья глава посвящена описанию использованного для исследований оборудования, моделированию температурных и концентрационных диапазонов существования фаз со структурой магнетоплюмбита в системе  $\text{BaO-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ , обсуждению результатов синтеза экспериментальных образцов и изучению их состава, структуры и свойств.

На основе имеющихся термодинамических характеристик посредством программного комплекса FactSage было осуществлено моделирование фазовых равновесий в системе  $\text{BaO-Fe}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ , построены изотермические разрезы фазовой диаграммы этой системы (при температурах 500, 1000, 1100, 1350, 1400 °C). Разрез фазовой диаграммы системы  $\text{BaO-TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$  для температуры 1350°C приведен на рис. 1.

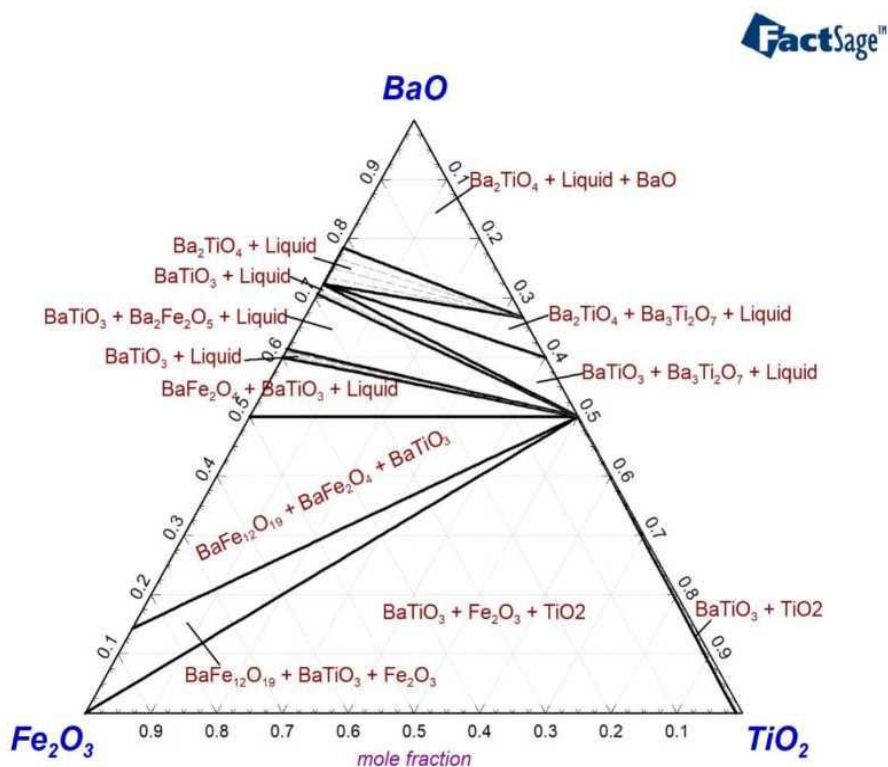


Рисунок 1 – Изотермический разрез фазовой диаграммы системы  $\text{BaO-TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$  для температуры 1350 °C

Анализ полученных данных позволил выполнить предварительную оценку интервала температур, который обеспечивает синтез монофазы гексаферрита бария со структурой магнетоплюмбита. Результаты предварительных экспериментов позволили уточнить необходимое значение температуры.

Исходя из выбранной температуры синтеза, которая составила 1350 °С, была изготовлена высокотемпературная установка, а именно, трубчатая печь сопротивления с карбидкремниевыми нагревателями, управление которой осуществляли с помощью ПИД регулятора. Отработан метод синтеза замещенного титаном гексаферрита бария  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$  (с уровнем замещения  $x$  от 0 до 2,0 и шагом 0,25), гарантирующий получение однофазного материала. Получен ряд образцов замещенного титаном гексаферрита бария, пригодных для исследования структуры и свойств.

Для исследования фазового состава был использован метод рентгеновской порошковой дифрактометрии. Экспериментальные измерения были произведены на дифрактометре Rigaku Ultima IV. Диапазон углов составлял от 15 до 65°, скорость съемки – 2 °/мин. В качестве источника излучения использовали медное излучение  $\text{CuK}_\alpha$ , подвергнутое предварительной фильтрации. Для измерений порошкообразный образец помещали на монокристаллический кремниевый держатель. Полученные дифрактограммы показаны на рисунке 2.

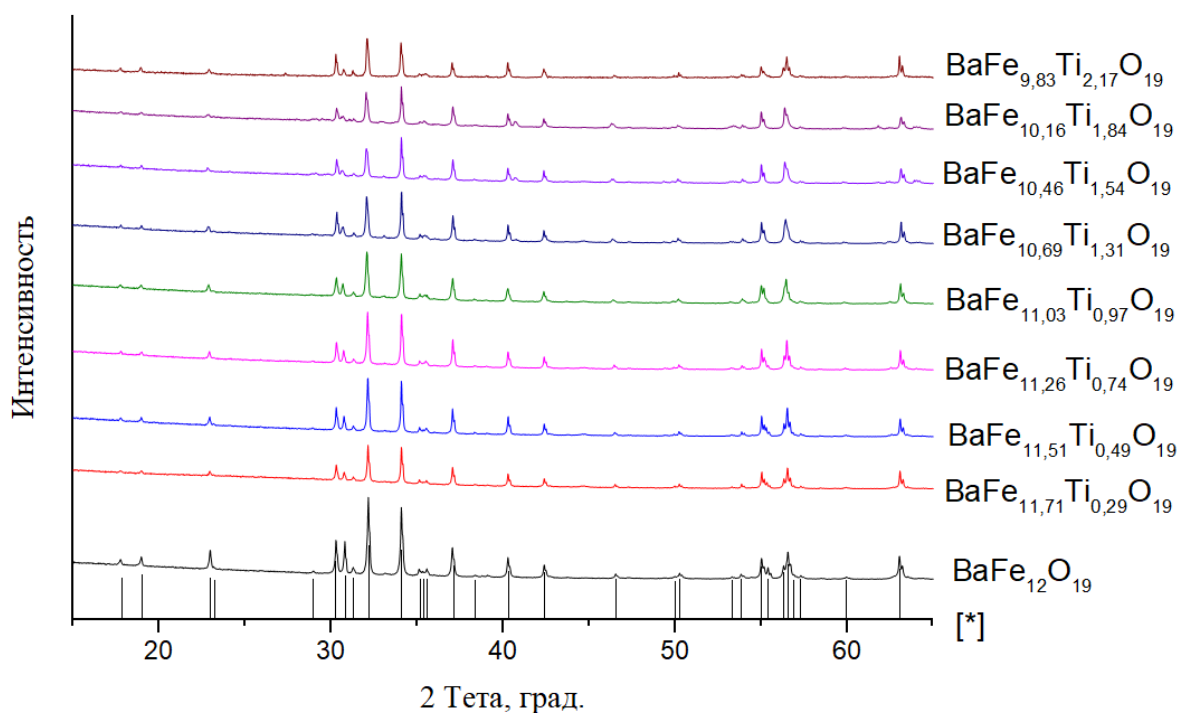


Рисунок 2 – Дифрактограммы образцов гексаферрита бария, замещенного титаном  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$  (штрихграммой обозначены литературные данные [1])

Все дифракционные пики соответствуют структуре магнетоплюмбита, что доказывает образование твердого раствора  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$ .

По результатам рентгенографических данных был проведен расчет параметров кристаллической ячейки (табл. 1)

Таблица 1 – Параметры кристаллической решетки образцов  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$

| № | Брутто формула                                     | a, Å      | c, Å        | V, Å <sup>3</sup> |
|---|--|-----------|-------------|-------------------|
| 0 | $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$                    | 5,8895(4) | 23,2190(11) | 697,49(9)         |
| 1 | $\text{BaFe}_{11,71}\text{Ti}_{0,29}\text{O}_{19}$ | 5,8905(4) | 23,2161(9)  | 697,44(7)         |
| 2 | $\text{BaFe}_{11,51}\text{Ti}_{0,49}\text{O}_{19}$ | 5,8900(2) | 23,2448(14) | 698,37(5)         |
| 3 | $\text{BaFe}_{11,26}\text{Ti}_{0,74}\text{O}_{19}$ | 5,8883(4) | 23,2648(13) | 698,56(8)         |
| 4 | $\text{BaFe}_{11,03}\text{Ti}_{0,97}\text{O}_{19}$ | 5,8871(3) | 23,2902(12) | 699,57(7)         |
| 5 | $\text{BaFe}_{10,69}\text{Ti}_{1,31}\text{O}_{19}$ | 5,8853(4) | 23,322(13)  | 699,88(9)         |
| 6 | $\text{BaFe}_{10,46}\text{Ti}_{1,54}\text{O}_{19}$ | 5,8841(3) | 23,3417(12) | 699,79(7)         |
| 7 | $\text{BaFe}_{10,16}\text{Ti}_{1,84}\text{O}_{19}$ | 5,8830(4) | 23,3476(13) | 699,79(8)         |
| 8 | $\text{BaFe}_{9,83}\text{Ti}_{2,17}\text{O}_{19}$  | 5,8820(5) | 23,3650(13) | 700,06(10)        |

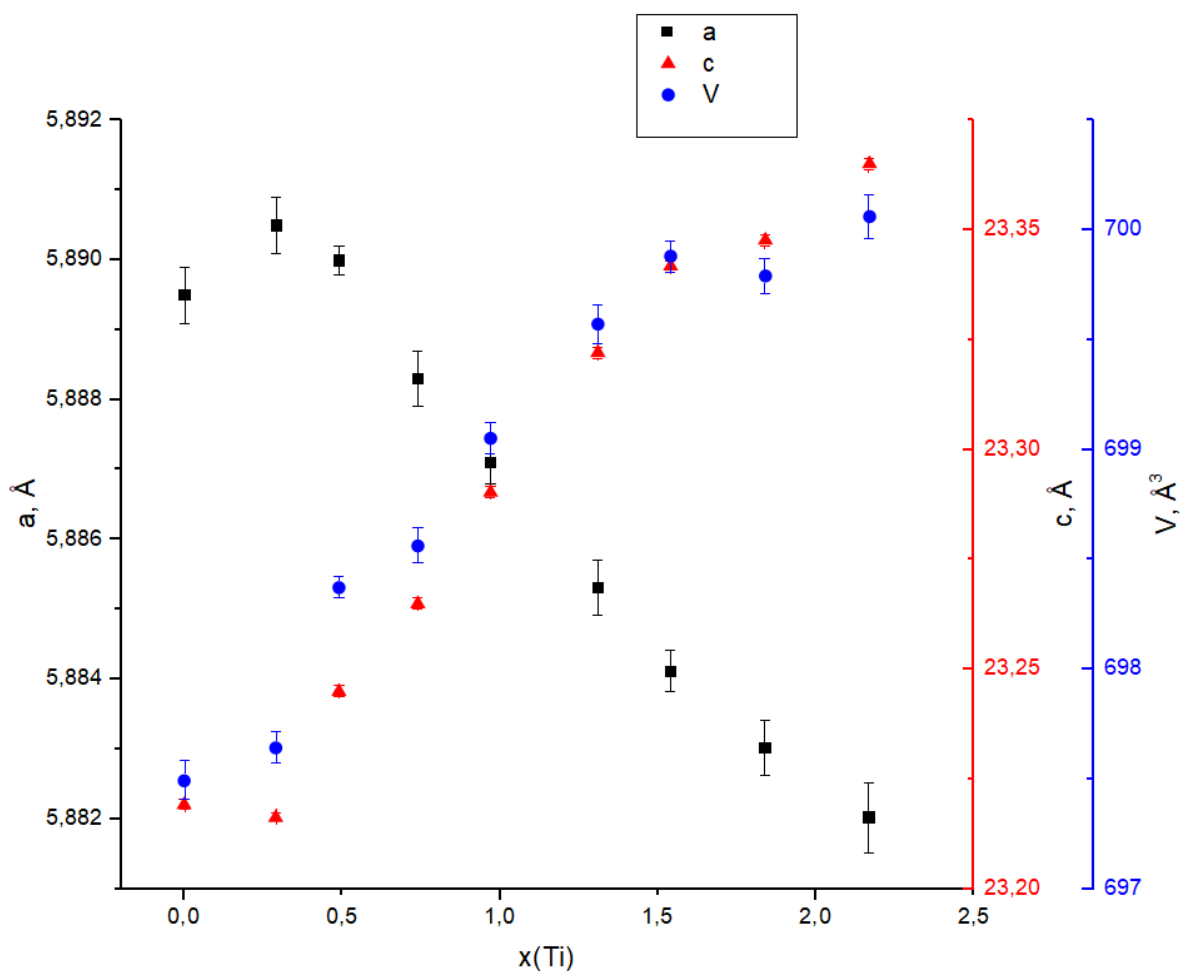


Рисунок 3 – Зависимость параметров кристаллической решетки от степени замещения титаном в гексаферрите бария  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$

На основе результатов расчетов параметров кристаллической решетки была получена зависимость влияния степени замещения на эти параметры. При гетеровалентном замещении  $\text{Fe}^{3+}$  в  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  на  $\text{Ti}^{4+}$  некоторое количество железа должно перейти в  $\text{Fe}^{2+}$  либо должны образоваться вакансии для сохранения электронейтральности.

Для определения точек фазового перехода 2-го рода был выполнен анализ замещенного титаном гексаферрита бария методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Результаты измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Температура Кюри для замещенного титаном гексаферрита бария

| № | Брутто формула                                     | Температура Кюри, °С |
|---|--|----------------------|
| 1 | $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$                    | 454,8                |
| 2 | $\text{BaFe}_{11,71}\text{Ti}_{0,29}\text{O}_{19}$ | 428,0                |
| 3 | $\text{BaFe}_{11,51}\text{Ti}_{0,49}\text{O}_{19}$ | 405,5                |
| 4 | $\text{BaFe}_{11,26}\text{Ti}_{0,74}\text{O}_{19}$ | 382,0                |
| 5 | $\text{BaFe}_{11,03}\text{Ti}_{0,97}\text{O}_{19}$ | 362,0                |
| 6 | $\text{BaFe}_{10,69}\text{Ti}_{1,31}\text{O}_{19}$ | 351,0                |
| 7 | $\text{BaFe}_{10,46}\text{Ti}_{1,54}\text{O}_{19}$ | -                    |
| 8 | $\text{BaFe}_{10,16}\text{Ti}_{1,84}\text{O}_{19}$ | -                    |
| 9 | $\text{BaFe}_{9,83}\text{Ti}_{2,17}\text{O}_{19}$  | -                    |

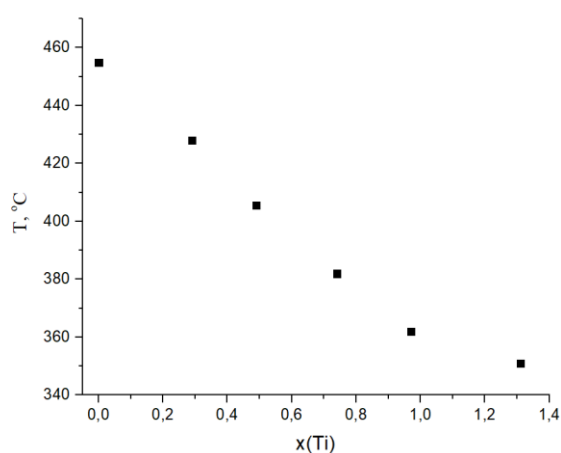


Рисунок 4 – Зависимость температуры Кюри от степени замещения титаном в гексаферрите бария

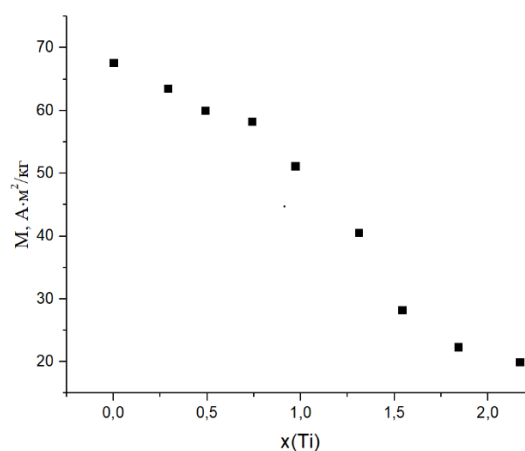


Рисунок 5 – Зависимость намагниченности при 1 Тл от степени замещения титаном в гексаферрите бария

При определении точек фазового перехода была обнаружена зависимость их положения от степени замещения титаном. Изломы, связанные с переходами, сравнительно невелики, что можно связать с ослаблением межобменного взаимодействия [2-5]. Также допирование гексаферрита бария катионами титана приводит к контролируемому изменению магнитных свойств соединения и делает его перспективным для микроволновых применений.

Уменьшение значений намагниченности насыщения в феррите бария с увеличением степени замещения титаном может быть связано с тем, что

$Ti^{4+}$  занимает место  $Fe^{3+}$  в кристаллической решетке, что может привести к уменьшению величины магнитного момента феррита бария и соответственно уменьшению намагниченности насыщения. Кроме того, увеличение степени замещения титаном может вызывать увеличение дефектов в структуре феррита бария, что также может привести к снижению значения намагниченности [6, 7].

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен теплотехнический расчет теплового баланса высокотемпературной установки, который позволил оценить технико-экономические показатели её работы. Выполнена оптимизация и изготовление высокотемпературной печи с ПИД регулятором температуры с максимальной температурой до 1400 °С.
2. Сформирована термодинамическая модель фазовых равновесий системы  $BaO-Fe_2O_3-TiO_2$ . Исходя из результатов моделирования зависимости фазового состава от температуры была выполнена предварительная оценка температур синтеза, при которых возможно образование фазы гексаферрита бария. На основании полученных данных оптимальной температурой синтеза была выбрана температура 1350 °С.
3. Получен концентрационный ряд образцов твердых растворов замещенного титаном гексаферрита бария  $BaFe_{12-x}Ti_xO_{19}$  твердофазным методом (с уровнем замещения от 0 до 2,0 и шагом 0,25), пригодных для исследования структуры и свойств, что подтверждают данные элементного и рентгенофазового анализа.
4. Установлены зависимости параметров кристаллической структуры от химического состава созданной концентрационной линейки  $BaFe_{12-x}Ti_xO_{19}$ . При гетеровалентном замещении  $Fe^{3+}$  в  $BaFe_{12}O_{19}$  на  $Ti^{4+}$  некоторое количество железа должно перейти в  $Fe^{2+}$ , либо должны образоваться вакансии в подрешетке переходного металла для сохранения электронейтральности.

5. Установлены зависимости магнитных свойств от химического состава созданной концентрационной линейки  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$ . Замещение титаном вызывает резкое изменение значений температуры Кюри. Монотонное снижение значений температуры Кюри от 454,8 до 351 °С вызвано изменениями состава с  $x = 0$  до 2. Как правило, снижение температуры Кюри при легировании является распространенным эффектом в твердых растворах на основе  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  из-за ослабления межобменного взаимодействия. При комнатной температуре намагниченность в поле 6 Тл составляет  $\sim 74,83 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{кг}$  для  $x = 0$ , а для  $x = 2,0 \sim 29,22 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{кг}$ . Допирование гексаферрита бария катионами титана приводит к контролируемому изменению магнитных свойств соединения и делает его перспективным для микроволновых применений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Townes, W.D. The crystal structure and refinement of ferrimagnetic barium ferrite  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  / W.D. Townes, J.H. Fang, A.J. Perrotta // *Z. Kristallogr.* –1967. – V. 125. – P. 437.
2. Kimura, T. Magnetic control of ferroelectric polarization / T. Kimura, T. Goto, H. Shintani, et al. // *Nature.* – 2003. – V. 426, № 6962. – P. 55–58.
3. Mallick, K.K. Dielectric properties of M-type barium hexaferrite prepared by co-precipitation / K.K. Mallick, P. Shepherd, R.J. Green // *J. Eur. Ceram. Soc.* – 2007. – V. 27, № 4. – P. 2045–2052.
4. Yin, L. Preparation and microwave-absorbing property of  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  nanoparticles and  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Fe}_3\text{C}/\text{CNTs}$  composites / L. Yin, T. Chen, S. Liu, Y. Gao, B. Wu, Y. Wei, G. Li, X. Jian, X. Zhang // *RSC Adv.* – 2015. – V. 5, № 111. – P. 91665–91669.
5. He, H. Improved microwave absorption and electromagnetic properties of  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ -poly(vinylidene fluoride) composites by incorporating reduced graphene oxides / H. He, F. Luo, N. Qian, N. Wang // *J. Appl. Phys.* – 2015. – V. 117, № 8. – P. 85502.

6. Vinnik, D.A. Effect of titanium substitution and temperature variation on structure and magnetic state of barium hexaferrites / D.A. Vinnik, V.E. Zhivulin, D.A. Uchaev et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – V. 859. – Article № 158365.
7. Vinnik, D.A. Changes in the structure, magnetization, and resistivity of  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$  / D.A. Vinnik, A.Yu. Starikov, V.E. Zhivulin et al. // *ACS Applied Electronic Materials*. – 2021. – V. 3, is. 4. – P. 1583–1593.

### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, индексируемых в базах данных *Scopus* и/или *Web of Science*:**

1. Klygach, D.S. Measurment of permittivity and permeability of barium hexaferrite / D.S. Klygach, M.G. Vakhitov, D.A. Vinnik, A.V. Bezborodov, S.A. Gudkova, V.E. Zhivulin, D.A. Zherebtsov, C.P. SakthiDharan, S.V. Trukhanov, A.V. Trukhanov, **A.Yu. Starikov** // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2018. – V. 465. – P. 290–294 (5 с./1 с., Scopus/WoS).
2. Trukhanov, A.V. Influence of the charge ordering and quantum effects in heterovalent substituted hexaferrites on their microwave characteristics / A.V. Trukhanov, M.A. Almessiere, A. Baykal, S.V. Trukhanov, Y. Slimani, D.A. Vinnik, V.E. Zhivulin, **A.Y. Starikov**, D.S. Klygach, M.G. Vakhitov, T.I. Zubar, D.I. Tishkevich, E.L. Trukhanova, M. Zdorovets // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – V. 788. – P. 1193–1202 (10 с./1 с., Scopus/WoS).
3. Zezyulina, P.A. Study of the static and microwave magnetic properties of nanostructured  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$  / P.A. Zezyulina, D.A. Petrov, K.N. Rozanov, D.A. Vinnik, S.S. Maklakov, V.E. Zhivulin, **A.Y. Starikov**, D.P. Sherstyuk, S. Shannigrahi // *Coatings*. – 2020. – V. 10, № 8. – Article № 0789. – 10 p. (10 с./1 с., Scopus/WoS).



4. Vinnik, D.A. Influence of titanium substitution on structure, magnetic and electric properties of barium hexaferrites  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$  / D.A. Vinnik, V.E. Zhivulin, **A.Yu. Starikov**, S.A. Gudkova, E.A. Trofimov, A.V. Trukhanov, S.V. Trukhanov, V.A. Turchenko, V.V. Matveev, E. Lahderanta, E. Fadeev, T.I. Zubar, M.V. Zdorovets, A.L. Kozlovsky // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2020. – V. 498. – Article № 166117. – 9 p. (9 c./2 c., Scopus/WoS).
5. Vinnik, D.A. Structure and magnetodielectric properties of titanium substituted barium hexaferrites / D.A. Vinnik, **A.Y. Starikov**, V.E. Zhivulin, K.A. Astapovich, V.A. Turchenko, T.I. Zubar, S.V. Trukhanov, J. Kohout, T. Kmjec, O. Yakovenko, L. Matzui, A.S.B. Sombra, D. Zhou, R.B. Jotania, C. Singh, A.V. Trukhanov // *Ceramics International*. – 2021. – V. 47, № 12. – P. 17293–17306 (14 c./2 c., Scopus/WoS).
6. Trukhanov, S.V. Exploration of crystal structure, magnetic and dielectric properties of titanium-barium hexaferrites / S.V. Trukhanov, T.I. Zubar, V.A. Turchenko, A.V. Trukhanov, T. Kmjec, J. Kohout, L. Matzui, O. Yakovenko, D.A. Vinnik, **A.Y. Starikov**, V.E. Zhivulin, A.S.B. Sombra, D. Zhou, R.B. Jotania, C. Singh, A.V. Trukhanov // *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*. – 2021. – V. 272. – Article № 115345. – 11 p. (11 c./2 c., Scopus).
7. Vinnik, D.A. Effect of titanium substitution and temperature variation on structure and magnetic state of barium hexaferrites / D.A. Vinnik, V.E. Zhivulin, D.A. Uchaev, S.A. Gudkova, D.E. Zhivulin, **A.Y. Starikov**, S.V. Trukhanov, V.A. Turchenko, T.I. Zubar, T.P. Gavrilova, R.M. Eremina, E. Fadeev, E. Lahderanta, A.S.B. Sombra, D. Zhou, R.B. Jotania, C. Singh, A.V. Trukhanov // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – V. 859. – Article № 158365. – 9 p. (9 c./1 c., Scopus/WoS).
8. Vinnik, D.A. Changes in the structure, magnetization, and resistivity of  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$  / D.A. Vinnik, **A.Yu. Starikov**, V.E. Zhivulin, K.A. Astapovich, V.A. Turchenko, T.I. Zubar, S.V. Trukhanov, J. Kohout, T. Kmjec, O. Yakovenko, L. Matzui, A.S.B. Sombra, D. Zhou, R.B. Jotania,

C. Singh, Y. Yang, A.V. Trukhanov // ACS Applied Electronic Materials. – 2021. – V. 3, is. 4. – P. 1583–1593. (11 с./2 с., Scopus/WoS).

#### **Патенты и программы:**

9. Патент 2764763 Российская Федерация, МПК C01F 11/00, C01G 49/00, C04B 35/26, C04B 35/626, C04B 35/64. Способ получения замещенного титаном гексаферрита бария / **А.Ю. Стариков**, К.П. Павлова, И.А. Солизода, Д.П. Шерстюк. – № 2021110770; заявл. 16.04.21; опубл. 21.01.22, Бюл. № 3. – 12 с.

#### **Другие публикации:**

10. Starikov, A.Yu. Investigation of the electrophysical properties of titanium-substituted barium hexaferrite in the high-frequency range / **A.Yu. Starikov**, D.S. Klygach, M.G. Vakhitov, V.E. Zhivulin, D.A. Vinnik // Book of Abstracts IX International Scientific Conference «Actual Problems of Solid State Physics». – Minsk: SPMRC NASB, 2021. – P. 164 (1 с./0,5 с.).
11. Vinnik, D.A. Investigation of the properties of titanium substituted barium hexaferrite / D.A. Vinnik, V.E. Zhivulin, D.A. Uchaev, S.A. Gudkova, **A.Yu. Starikov**, S.V. Trukhanov, V.A. Turchenko, T.I. Zubar, A.V. Trukhanov // Book of abstracts XII International Conference on Chemistry for Young Scientists. – St. Petersburg: SPBU, 2021. – P. 334 (1 с./0,5 с.).
12. Starikov, A. Investigation of the properties of titanium substituted barium hexaferrite / **A. Starikov**, D. Klygach, V. Zhivulin, D. Vinnik // Book of Abstracts IV International Baltic Conference on Magnetism. – Kaliningrad: IKBFU, 2021. – P. 200 (1 с./0,5 с.).
13. Винник, Д.А. Твердофазный синтез частично замещенного титаном гексаферрита бария  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Ti}_x\text{O}_{19}$  / Д.А. Винник, Д.С. Клыгач, А.С. Чернуха, В.Е. Живулин, Д.М. Галимов, **А.Ю. Стариков**, А.В. Резвый, М.Е. Семёнов, М.Г. Вахитов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallurgy. – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 28-33 (6 с./3 с.).

Стариков Андрей Юрьевич

СТРУКТУРА И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
МОНОЗАМЕЩЕННОГО ТИТАНОМ ГЕКСАФЕРРИТА БАРИЯ,  
ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ТВЕРДОФАЗНОГО СИНТЕЗА

Специальность 1.4.4. Физическая химия

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата химических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 10.07.2023. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 0,93. Тираж 150 экз. Заказ 261/258.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.