

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южный федеральный университет»*

На правах рукописи



Алшоех Абир

**Синтез и физические свойства наноструктурированного
мультиферроика $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$**

2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы (физико-математические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Ростов-на-Дону

2026

Работа выполнена в Международном исследовательском институте интеллектуальных материалов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Абдулвахидов Камалудин Гаджиевич
(Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», доцент)

Официальные оппоненты: **Юрасов Юрий Игоревич**, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук».

Мардасова Ирина Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», Институт перспективного машиностроения «Ростсельмаш».

Защита диссертации состоится **11 сентября 2026 г. в 15:00** на заседании диссертационного совета **ЮФУ801.01.15** по физико-математическим наукам (*специальность 2.6.6*) при Южном федеральном университете в здании Центра Наукоемкого Приборостроения ЮФУ по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 26Б.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ЮФУ имени Ю. А. Жданова по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж и на сайте: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1356203/>

Автореферат разослан

« ____ » _____ 2026 года

Отзывы на автореферат (с указанием даты, а также **полных** фамилии, имени, отчества, ученой степени со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail) с заверенной подписью рецензента и печатью учреждения просим направлять в **2 экз.** учёному секретарю диссертационного совета ЮФУ801.01.15 при ЮФУ по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. А. Сладкова, 178/24, МИИ ИМ ЮФУ, а также в формате pdf – на e-mail: oeopolzhentsev@sfedu.ru.

Учёный секретарь
диссертационного совета
ЮФУ801.01.15, к. ф.-м. н.



Положенцев Олег Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Растущие требования к функциональным материалам явились побудительной мотивацией для исследователей к изучению не только легированных монокристаллов, но и таких сложных составов, как керамические твердые растворы и композиты. Если твердые растворы представляют собой составы с гомо- или гетеровалентным замещением катионов и известны более 80 лет, то технология композитов – это новое и относительно молодое направление физического материаловедения. Отличительной особенностью композитов от твердых растворов является то, что первые выступают как одно соединение, а вторые – это совокупность двух и более гетерофазных соединений – компонентов, между которыми существует четкая физическая (фазовая) граница. Среди твердых растворов можно выделить таких, которые обладают сегнетоэлектрическими и магнитными свойствами. Такие составы принято называть мультиферроиками (МФ), и они делятся на два типа. В МФ-I – типа сегнетоэлектричество и магнетизм имеют разные источники и разные температуры проявления экстремальных свойств. К таким твердым растворам МФ-I типа относится, например BiFeO_3 , допированный различными ионами. В МФ-II типа (несобственные) поляризация (зарядовое упорядочение) возникает вследствие магнитного (спинового) упорядочения. МФ демонстрируют сосуществование более одного ферроического порядка в однофазном материале [1], а в основе их физических свойств лежат перекрестные взаимодействия между магнитным, электрическим и упругим порядками. Это приводит к уникальным физическим явлениям и потенциально новым функциональным возможностям устройств [2].

В последнее время активно изучаются композиты, компоненты которых представляют (анти)сегнетоэлектрики и (анти)ферромагнетики, которым характерны очень интересные физические свойства. Функциональные свойства таких материалов основаны на опосредованном воздействии одной фазы на

другую через их границы, а «движущей силой» такого воздействия может выступать магнитная или электрическая стрикция. В то же время существуют композиты, одной из компонент которых выступает МФ, а другая компонента является (анти)сегнетоэлектриком. В таких композитах магнитная подсистема МФ может влиять на электрическую подсистему опосредованно, что в конечном итоге может влиять на (анти)сегнетоэлектрическую компоненту композита. Композиты характеризуются физическими свойствами, которыми не обладает каждое из составляющих соединений по отдельности. В первом приближении можно предположить, что в композитах не происходит взаимного проникновения структурных элементов (атомов) разных фаз, то есть кристаллическая структура и симметрия каждой фазы сохраняются при образовании композита.

В данной работе в качестве МФ и одной из компонент композита $\text{SmFeO}_3/\text{NaNbO}_3$ выступает ортоферрит SmFeO_3 , который относится к редкоземельным ортоферритам перовскитовой структуры, а вторая компонента представляет собой перовскитовой структуры антисегнетоэлектрик – NaNbO_3 . Первая компонента является антиферромагнетиком со слабым скошенным ферромагнетизмом [3], а вторая компонента относится к антисегнетоэлектрикам и имеет шесть известных на сегодняшний день фазовых переходов (ФП) [4,5]. Стоит отметить, что наиболее интересные свойства таких композитов проявляются вблизи температур магнитного и (анти)сегнетоэлектрического ФП, а варьировать эти температуры, а значит и физические свойства, можно путем наноструктурирования методом «сверху - вниз» или изменением их концентраций. В отдельности каждая компонента данного композита $(1-x)\text{SmFeO}_3-x\text{NaNbO}_3$ хорошо изучена. В то же время в литературе отсутствуют сведения об этом композите, и данная работа является первой работой, восполняющей этот пробел. Это все определяет **актуальность темы** данной диссертационной работы.

Объектом исследования являются целевые физические свойства композитов, состоящих из редкоземельного мультиферроика и

антисегнетоэлектрика. **Предметом исследования** в рамках изучаемого объекта служит размерная и концентрационная зависимости физических свойств композитов $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$.

Степень разработанности темы исследования. Легированный SmFeO_3 , твердые растворы и композиты наноструктурного масштаба на его основе изучаются давно, однако в литературе отсутствуют работы по изучению композита SmFeO_3 в композиции с антисегнетоэлектриком NaNbO_3 . Поэтому в данная диссертация является первой работой, посвященной изучению физических свойств композита $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$ как макроскопического, так нанометрового масштабов.

Целью данной работы являлось выявление корреляции физических свойств и концентраций компонентов с размерами частиц мультиферроиков - композитов $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$, предварительно синтезированных твердофазным методом и наноструктурированных методом «сверху-вниз» с помощью наковален Бриджмена. В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие междисциплинарные **задачи**:

- синтезировать ортоферрит SmFeO_3 ;
- синтезировать антисегнетоэлектрик NaNbO_3 ;
- получить композиты $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$ с шагом концентраций $x = 0.1, 0.2$;
- провести фазовый анализ композитов $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$;
- провести рентгендифрактометрические измерения композитов $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$;
- провести электронную микроскопию составов;
- провести диэлектрические измерения $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$;
- получить наноструктурированные образцы $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$ методом механической активации в наковальнях Бриджмена;
- провести магнитные измерения композитов $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$;
- провести оптические измерения $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$;

- провести измерения ИК-спектров $(1-x)\text{SmFeO}_3-x\text{NaNbO}_3$;
- провести калориметрические измерения $(1-x)\text{SmFeO}_3-x\text{NaNbO}_3$;
- провести измерения среднеквадратичных статических смещений ионов SmFeO_3 и NaNbO_3 .

Методы диссертационного исследования. Исследуемые в данной работе $(1-x)\text{SmFeO}_3-x\text{NaNbO}_3$ получены методом твердофазного синтеза. Наноструктурирование осуществлялось методом механического силового воздействия. Кристаллическую структуру и морфологию образцов изучали методами рентгеновской дифракции и электронной микроскопии. Динамические свойства кристаллической решетки изучали методами оптической и ИК-спектроскопии, а диссипативные свойства - методами диэлектрической, импедансной спектроскопии, а также по петлям магнитного гистерезиса.

Материалы диссертации соответствуют следующим пунктам **паспорта научной специальности 2.6.6. «Нанотехнологии и наноматериалы» (отрасль науки – физико-математические)**:

1. Методы получения наноматериалов, композитных структур, структур пониженной размерности, приборов и интегральных устройств на их основе;
5. Электронный транспорт в наноматериалах и композитных структурах;
6. Оптические и фотоэлектрические явления в наноматериалах и композитных структурах;
7. Магнитные свойства наноматериалов и композитных структур;
12. Методы исследования наноматериалов и композитных структур.

Научная новизна. Основные результаты экспериментальных исследований композитов $(1-x)\text{SmFeO}_3-x\text{NaNbO}_3$ получены автором впервые и заключаются в следующем:

1. Показана возможность управления физическими свойствами композита $(1-x)\text{SmFeO}_3-x\text{NaNbO}_3$ как изменением концентраций компонентов, так и наноструктурированием их методом «сверху-вниз».

2. Обнаружено, что в концентрационной точке $x = 0.7$ структурные параметры кристаллических решеток фаз композита имеют локальные экстремумы, а углы наклона θ и поворота φ кислородных октаэдров SmFeO_3 имеют максимальные значения.
3. Показано, что размер областей когерентного рассеяния D композита $0.2\text{SmFeO}_3\text{-}0.8\text{NaNbO}_3$, равное 94 нм, является вторым критическим размером, для которого характерно максимальное значение коэрцитивного поля.
4. Показано, что температуры, соответствующие спиновой реориентации T_{SR} и компенсации T_{comp} зависят как от концентраций компонентов, так и от размеров частиц композитов $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$.
5. Пики, соответствующие полосам поглощения ИК-спектров компонентов наноструктурированных композитов $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$, смещаются в область больших волновых чисел, по сравнению с пиками поглощения компонентов макроскопических композитов.
6. Значения среднеквадратичных смещений SmFeO_3 вдоль направления оси c в два раза отличаются от остальных направлений.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные в работе результаты развивают и дополняют представления о физических свойствах композитов с антиферромагнитными и антисегнетоэлектрическими фазами и могут быть использованы для усовершенствования технологии их синтеза, управления целевыми физическими свойствами и получения практических устройств на их основе.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Наноструктурированным композитам $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$ характерна особая концентрационная точка $x = 0.7$, выше которой линейные параметры элементарных ячеек фаз SmFeO_3 и NaNbO_3 в зависимости от давления наноструктурирования растут или уменьшаются. Плотность дислокаций

самариевой фазы с ростом концентрации и давления наноструктурирования растет, а плотность ниобатной фазы при этом уменьшается, что обусловлено полиморфным переходом между ее сегнетоэлектрической и антисегнетоэлектрической фазами.

2. В концентрационной области $x = 0.3 - 0.7$ электрическая емкость объема кристаллитов наноструктурированных композитов $(1-x)\text{SmFeO}_3-x\text{NaNbO}_3$ больше электрической емкости границ кристаллитов и начало спада частотно-независимой области комплексного импеданса не зависит ни от размеров частиц, ни от концентрации ниобатной фазы. Средний размер кристаллитов композита $0.2\text{SmFeO}_3-0.8\text{NaNbO}_3$, равный 94 нм, представляет собой второй критический размер, которому характерны минимальное значение обменной энергии и максимальное значение коэрцитивного поля.

3. Установлено, что для каждой компоненты композитов $(1-x)\text{SmFeO}_3-x\text{NaNbO}_3$, наноструктурированных методом «сверху-вниз», характерно увеличение ширины запрещенной зоны вследствие изменения положения краев валентной полосы и полосы проводимости, а также рост волновых чисел, соответствующих колебательным модам.

Достоверность и надежность полученных результатов. Основные результаты и выводы были сделаны на основе экспериментальных данных, полученных на оборудовании мирового уровня и надежных методик обработки и повторяемости результатов и опубликованы в научных изданиях первого и второго квартиля, индексируемых в международных базах данных Scopus, Web of Science, а также ВАК.

Апробация основных результатов. Полученные результаты были представлены на международных и всероссийских симпозиумах и конференциях:

1. International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA2023), Surabaya, Indonesia, October 3-8, 2023: Abstracts & Schedule.- Rostov-on-Don; Taganrog : Southern Federal University Press, 2023. – P.

- 33–34 <https://phenma2023.sfedu.ru/files/PHENMA2023Abstracts&ScheduleSurabayaIndonesiaOct2023.pdf>.
2. International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA2023), Surabaya, Indonesia, October 3-8, 2023: Abstracts & Schedule.- Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press, 2023. – P. 34-35 <https://phenma2023.sfedu.ru/files/PHENMA2023Abstracts&ScheduleSurabayaIndonesiaOct2023.pdf>.
 3. International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA2024), Indore, India, November 6-11, 2024: Abstracts & Schedule.- Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press, 2024. – P. 33-34 <https://cloud.mail.ru/public/8yoA/QjnfPCVr>.
 4. Международный семинар по физике сегнетоэластиков: материалы 11(16) международного семинара (г. Воронеж, 15-19 сентября 2025 г.). - Воронеж: ФГБОУ ВО “Воронежский государственный технический университет”, 2025. – 82-83 с.
 5. International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA2025), Kitakyushu, Japan, September 27-30, 2025: Abstracts & Schedule.- Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press, 2025. – P. 33-34 <https://phenma2025.sfedu.ru/files/ABSTRACTSPHENMA2025Japan.pdf>.
 6. International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA2025), Kitakyushu, Japan, September 27-30, 2025: Abstracts & Schedule.- Rostov-on-Don; Taganrog : Southern Federal University Press, 2025. – P. 34 <https://phenma2025.sfedu.ru/files/ABSTRACTSPHENMA2025Japan.pdf>.
 7. International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications” (PHENMA2025), Kitakyushu, Japan, September 27-30, 2025: Abstracts & Schedule.- Rostov-on-Don; Taganrog : Southern Federal University Press, 2025. – P. 34-35 <https://phenma2025.sfedu.ru/files/ABSTRACTSPHENMA2025Japan.pdf>.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 7 тезисах и 4 статьях в рецензируемых журналах, список которых приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в получении образцов, проведении исследований, обработке результатов, а также написании статей. Обсуждение результатов проводилось совместно с научным руководителем. В работах по теме диссертации, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора составляет не менее 50%.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованной литературы и 3 приложений. Объем диссертации составляет 153 страницы, в том числе 34 рисунка, 3 приложения, 11 таблиц, 13 страниц списка литературы и 3 страницы списка авторских публикаций, обозначенных литерой А.

Основное содержание работы

Во введении диссертации сформулированы цель, задачи и актуальность исследования. Показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов работы, публикациях, структуре и объеме и о личном вкладе.

Первая глава представляет собой аналитический обзор литературы, использованной при написании диссертации. Приведены сведения об основных физических свойствах SmFeO_3 в виде монокристаллов, твердых растворов и композитов на его основе. Рассмотрены вопросы практического применения составов в композиции с SmFeO_3 . В данной главе приведены основные сведения о физических свойствах антисегнетоэлектрика NaNbO_3 , твердых растворах и композитах на его основе.

Вторая глава в основном посвящена получению SmFeO_3 , NaNbO_3 и композитов $(1-x)\text{SmFeO}_3-x\text{NaNbO}_3$ твердофазным методом, описаны методика

наноструктурирования, измерительная аппаратура и методы исследования их структуры, оптических, импедансных и ИК– спектров, магнитных свойств.

В третьей главе в разделе 3.1 проведено подробное рентгендифрактометрическое исследование полученных композитов для различных концентраций x , проведено уточнение методом полнопрофильного анализа Ритвельда, результаты которых приведены в Приложении 1. На рисунке 1(*a*) приведены соответствующие дифрактограммы композитов. Выделенный угловой интервал (рисунок 1(*б*)) характеризует изменения брэгговских профилей при изменении x .

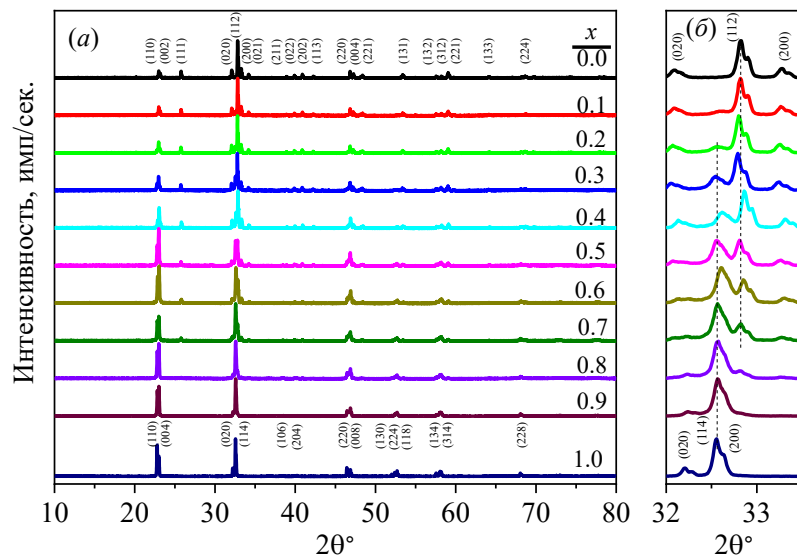


Рисунок 1 – Дифракционные профили составов $(1-x)\text{SmFeO}_3-x\text{NaNbO}_3$ (*a*) и выделенный фрагмент (*б*)

На рисунке 2 приведены концентрационные зависимости параметров элементарных ячеек фаз стартовых композитов $(1-x)\text{SmFeO}_3-x\text{NaNbO}_3$. Им характерно немонотонное поведение в зависимости от x .

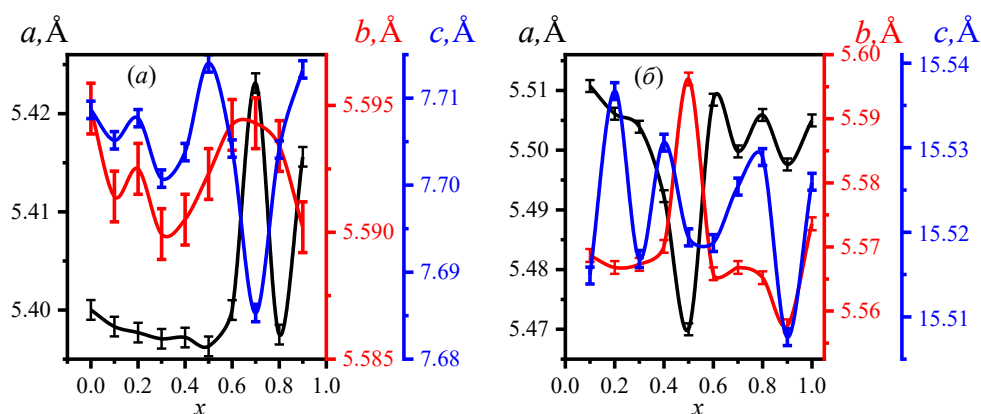


Рисунок 2 – Зависимости параметров элементарных ячеек SmFeO_3 (a) и NaNbO_3 (б) от x

В разделе 3.2 представлены кристаллохимические аспекты, где изучено возможное опосредованное воздействие одного компонента композита на другой. Обнаружено, что изменение концентрации x приводит к изменениям длин связей, угла наклона θ , угла поворота φ октаэдров и, следовательно, физических свойств композитов. На рисунке 3 приведено модельное представление кристаллических структур фаз композита. Изображения были смоделированы с использованием программного пакета Vesta.

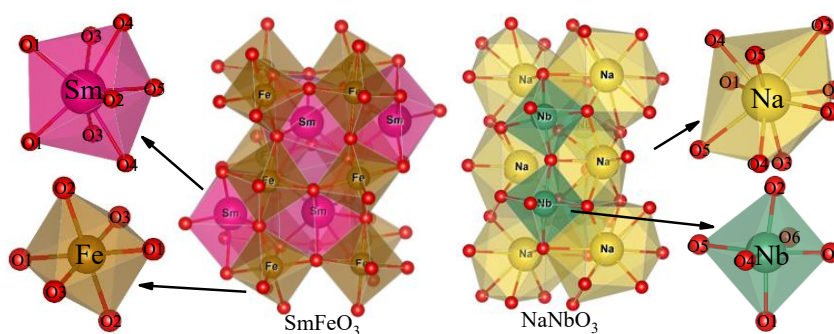


Рисунок 3 – Модельное представление кристаллических структур и кислородных октаэдров $\text{FeO}_6/\text{NbO}_6$ и додекаэдров/тетрадекаэдров $\text{SmO}_8/\text{NaO}_9$

Сопоставление концентрационных зависимостей параметров решетки SmFeO_3 и NaNbO_3 с углами наклонов, поворотов и длинами связей кислородных октаэдров показало, что при $x = 0.7$ для SmFeO_3 наблюдаются максимальные значения углов

$\theta = 15.136$ и $\varphi = 11.378$. Для этой же концентрации параметр a имеет максимальное значение, а длины связей Fe-O₁, Fe-O₃ максимальны, а связь Fe-O₂ минимальна, а значения этих же углов NaNbO₃ изменяются немонотонно.

Далее в диссертации приведены рентгеновские дифрактограммы макроскопических и наноструктурированных композитов с шагом концентрации $x = 0.1$. Часть этих дифрактограмм представлена на рисунке 4. Во всех случаях для них наблюдается сдвиг брэгговских пиков по оси 2θ (рисунки 1 и 4), что обусловлено структурными дефектами, которые генерируются при наноструктурировании порошковых образцов и размерным эффектом. Здесь же в диссертации приведены зависимости линейных параметров элементарных ячеек каждой из фаз композита как от концентрации x , так и от давления (наноструктурирования) механоактивации, и обнаружены различия в поведении параметров элементарных ячеек фаз композита до и после наноструктурирования.

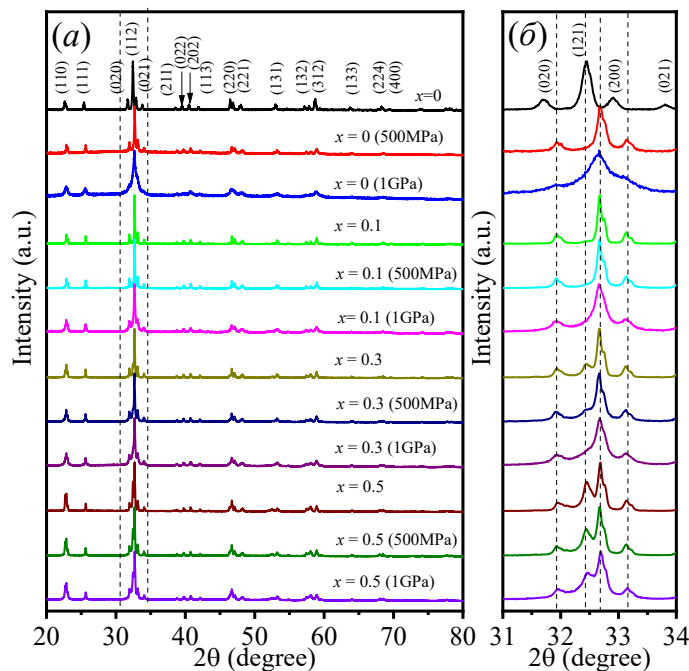


Рисунок 4 – Дифракционные картины составов $(1-x)\text{SmFeO}_3-x\text{NaNbO}_3$ ($x = 0.0, 0.1, 0.3, 0.5$) до и после наноструктурирования (a) и их выделенные части (б)

Далее рассмотрена зависимость размеров областей когерентного рассеяния D и микродеформаций ζ параметров, характеризующих структурное состояние и совершенство кристаллической решетки. Проведена оценка плотности дислокаций каждой фазы по данным D , для чего использована формула:

$$\rho_D = 3n/D^2 \quad (1)$$

где $n = 1$ при условии, что границы зерен представляют собой трехмерная сетка дислокаций. Результаты вычислений приведены в таблице 1.

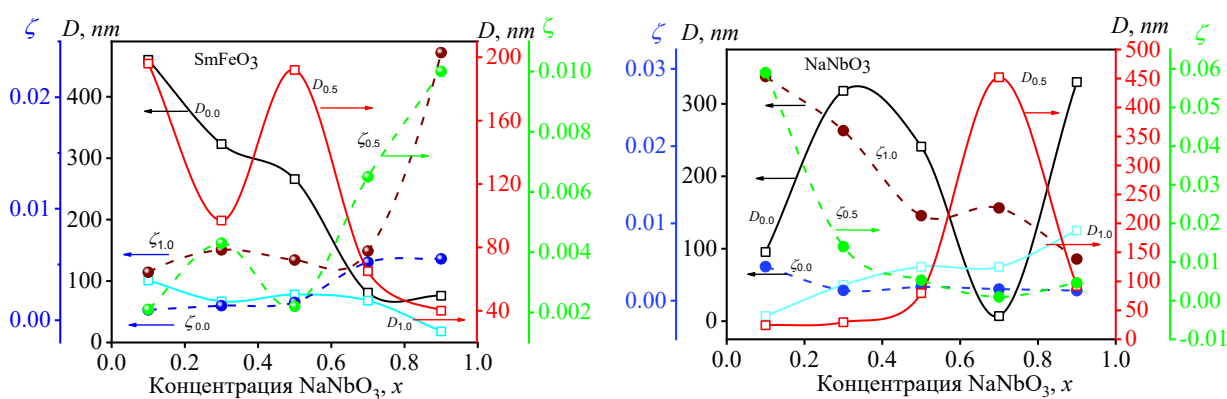


Рисунок 5 – Зависимость размеров областей когерентного рассеяния D и микродеформаций ζ SmFeO_3 (а) и NaNbO_3 (б) от концентрации x и давления механоактивации

Таблица 1 – Плотность дислокаций фаз композита $(1-x)\text{SmFeO}_3-x\text{NaNbO}_3$

SmFeO_3				NaNbO_3		
$(1-x)\text{SFO}-x\text{NNbO}$	$\rho_{0.0} \times 10^9, \text{см}^{-2}$	$\rho_{0.5} \times 10^9, \text{см}^{-2}$	$\rho_{1.0} \times 10^9, \text{см}^{-2}$	$\rho_{0.0} \times 10^9, \text{см}^{-2}$	$\rho_{0.5} \times 10^9, \text{см}^{-2}$	$\rho_{1.0} \times 10^{10}, \text{см}^{-2}$
0.9SFO-0.1NNbO	1.4	7	29	33	520	140
0.7SFO-0.3NNbO	2.8	31	66	2.9	350	82
0.5SFO-0.5NNbO	4.2	8.1	49	5.1	48	20
0.3SFO-0.7NNbO	4.5	71	64	4.8	1.4	25
0.1SFO-0.9NNbO	5.1	180	920	2.7	35	4.8

Как видно из таблицы 1, плотность дислокаций $\rho_{0.0}$ с ростом x монотонно растет только у ферромагнитной фазы SmFeO_3 , а для антисегнетоэлектрической фазы NaNbO_3 характерно ее немонотонное уменьшение. Механоактивация при давлениях 0.5 и 1.0 ГПа приводит к еще большему росту ρ SmFeO_3 , а для NaNbO_3 при этих же давлениях ρ уменьшается, уменьшаются и микродеформации ζ . Здесь

также выделяется точка $x = 0.7$, где концентрация дислокаций после механоактивации при 0.5 ГПа становится минимальной. На основании результатов рентгеноструктурного и кристаллохимического анализа было сформулировано **первое научное положение**, выносимое на защиту.

В подразделе 3.3 и в Приложении 2 представлены диэлектрические спектры SmFeO_3 , NaNbO_3 и композитов, измеренные в интервале температур от -160 до 600 °C. По спектрам обнаружены температуры, соответствующие спин-ориентационным переходам T_{SR1} , T_{SR2} и спинового переключения T_{SSW} SmFeO_3 (рисунок 6(a)). Размытый максимум релаксорного поведения $\varepsilon'(T)$, наблюдаемый в окрестности 100 °C, обусловлен максвелл-вагнеровской поляризацией.

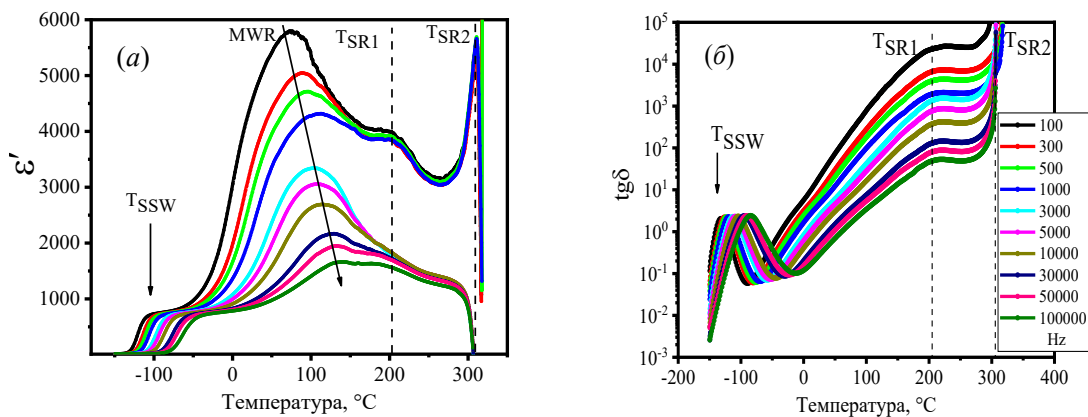


Рисунок 6 – Температурные зависимости ε' (a) и $\text{tg}\delta$ (б) SmFeO_3

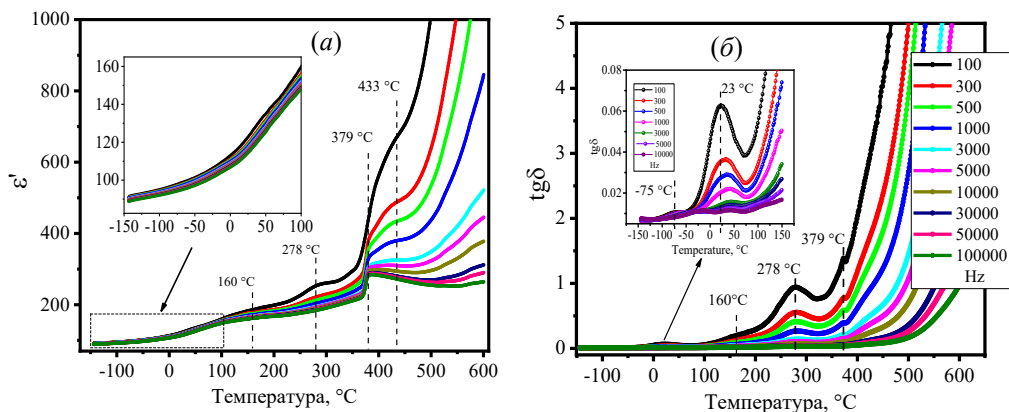


Рисунок 7 – Температурные зависимости ε' (a) и $\text{tg}\delta$ (б) NaNbO_3

Далее изучено поведение зависимости $\varepsilon'(T)$ и $\varepsilon''(T)$ ($\text{tg}\delta(T)$) антисегнетоэлектрика NaNbO_3 , а соответствующие графики приведены на

рисунке 7. Аномалия зависимости $\varepsilon'(T)$ при $T \sim 160$ °С обусловлена переходом в несоразмерную фазу, а в окрестности 278 °С наблюдается размытый максимум. При дальнейшем росте температуры мы сталкиваемся еще с двумя аномалиями, которым соответствуют температуры 379 и 433 °С. Температура $T = 379$ °С соответствует ФП орторомбической $Pbma$ (P) фазы в орторомбическую $Pnmm$ (R) фазу. Слабая аномалия при $T = 433$ °С возможно обусловлена ФП из орторомбической $Pnmm$ (S) фазы в орторомбическую $Pnmm$ (R) фазу. На зависимости $\text{tg}\delta(T)$ видны еще два дополнительных максимума: первый – при $T = -75$ °С, а второй – при $T \sim 23$ °С (см. рис.7(b)). Максимум при $T = -75$ °С соответствует переходу из СЭ ромбоэдрической $F3c$ (N) фазы в АСЭ орторомбическую $Pbma$ (P) фазу, который при прямом переходе наблюдается при более низких температурах. Максимум при 23 °С, скорее всего, соответствует переходу между этими фазами.

На рисунке 8 приведены температурно-частотные зависимости ε' и ε'' композита $0.5\text{SmFeO}_3\text{-}0.5\text{NaNbO}_3$. Как видно из рисунка 8(a), начиная с -150 °С, на зависимости $\varepsilon'(T)$ наблюдается резкий скачок, который, в зависимости от частот, завершается в окрестности примерно $T = -100$ °С. На этой же зависимости в окрестности температуры $T = -20$ °С наблюдается дополнительная аномалия - небольшой излом, соответствующий ФП «порядок – беспорядок» NaNbO_3 (см. вставку рис. 8(a)). Аномалия на зависимости $\varepsilon''(T)$, начинающаяся с $T = -150$ °С, имеет релаксороподобный колоколообразный вид с центром при $T \sim -100$ °С и завершающаяся при $T \sim 25$ °С (рисунок 8(b)). Эта аномалия, возможно, обусловлена антипараллельным упорядочиванием магнитных моментов Sm^{3+} и Fe^{3+} . При $T \sim 292$ °С наблюдается пик, который соответствует температуре $T_{\text{SR}2}$.

Таким образом, на зависимостях $\varepsilon'(T)$ и $\varepsilon''(T)$ $0.5\text{SmFeO}_3\text{-}0.5\text{NaNbO}_3$ заметны аномалии, соответствующие ФП и SmFeO_3 , и NaNbO_3 .

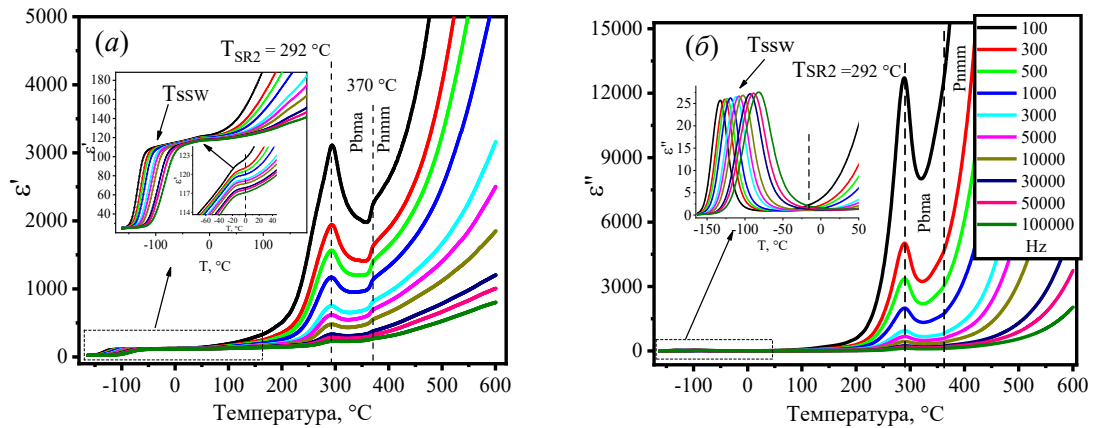


Рисунок 8 – Температурно – частотная зависимости ε' (а) и ε'' (б) композита $0.5\text{SmFeO}_3\text{-}0.5\text{NaNbO}_3$

Иногда вместо диэлектрической спектроскопии удобнее переходить на импедансную спектроскопию, которая является релаксационным методом, позволяющим оценивать не только характер релаксации, но и электрические сопротивление и емкость как границ зерен (R_{gb} , C_{gb}), так и объемной части зерен (R_g , C_g) исследуемого образца. В подразделе 3.4 и Приложении 3 рассмотрено влияние механоактивации на частотную зависимость реальной $Z'(\omega)$, мнимой $Z''(\omega)$ частей, а также диаграммы Найквиста спектров импеданса SmFeO_3 , NaNbO_3 и композитов. На рисунке 9 приведены частотные зависимости $Z'(\omega)$, $Z''(\omega)$, а также диаграммы Найквиста спектров импеданса $0.5\text{SmFeO}_3\text{-}0.5\text{NaNbO}_3$ до и после наноструктурирования. Для оценки вкладов электрических сопротивлений и емкостей как границ, так и объемной части зерен, были построены эквивалентные схемы, соответствующие образцам до и после наноструктурирования с использованием программного пакета EIS Spectrum Analyzer. На рисунке 10 приведены экспериментальные и теоретические кривые $Z''(Z')$, а также температурная зависимость подгоночных параметров составов $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$: (а, б, в, а', б', в') – $x = 0.3$; (г, д, е, г', д', е') – $x = 0.5$. Было обнаружено, что в зависимости от x и давления наноструктурирования емкости границ C_{gb} и объемной части кристаллитов C_g растут с температурой по exp, за исключением

некоторых температурных интервалов, где наблюдается линейный характер их роста.

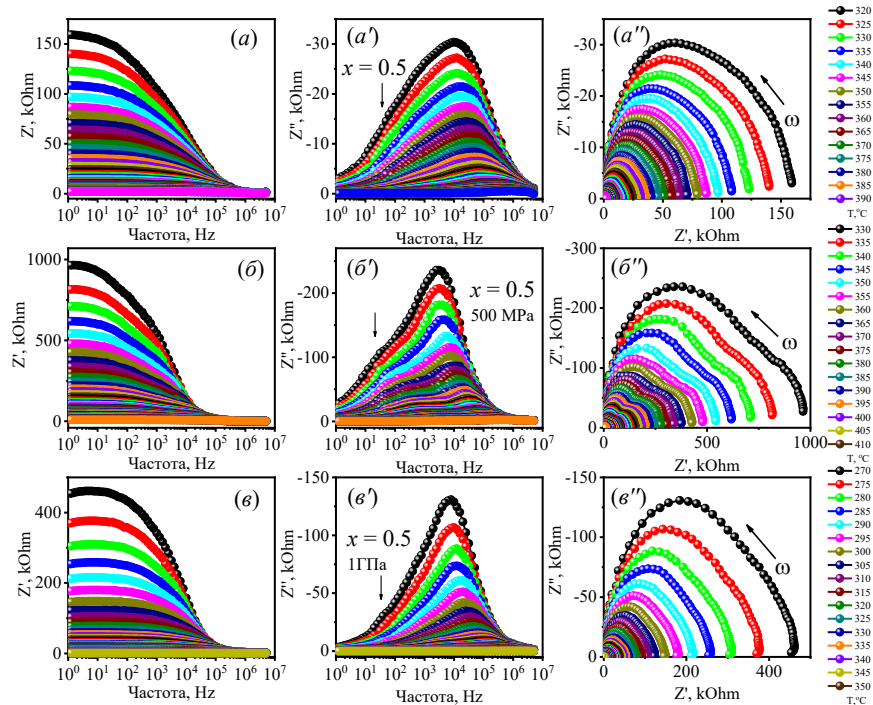


Рисунок 9 – Частотная зависимость $Z'(\omega)$, $Z''(\omega)$, а также диаграммы Найквиста спектров импеданса $0.5\text{SmFeO}_3\text{-}0.5\text{NaNbO}_3$ до (a, a', a'') и после наноструктурирования (500 МПа) ($б, б', б''$) и (1 ГПа) ($в, в', в''$)

В подразделе 3.5 изучены магнитные свойства композитов $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$, используя модель случайной магнитной анизотропии, согласно которой ориентация магнитных моментов наноструктур носит случайных (стохастический) характер с неоднородным распределением намагниченности. Для них справедливо то, что магнитный порядок сохраняется для длин $2R_L \gg 2R_C$, где $2R_L$ - размеры стохастических доменов, а $2R_C$ – размеры областей когерентного рассеяния D . К таким структурам применим закон приближения намагниченности к насыщению (ЗПН).

Магнитные петли мультiferроика SmFeO_3 и соответствующих композитов приведены на рисунке 11(a), из которого видно, что петли гистерезиса не насыщаются в пределах экспериментальных значений магнитных полей. Далее на

рисунке 11(б) представлена аппроксимация ЗПН для каждого композита. Для корректного определения параметров петель мы воспользовались формулой:

$$M = M_s \left(1 - \frac{1}{15} \frac{H_a^2}{H^{\frac{1}{2}}(H^{\frac{3}{2}} + H_R^{\frac{3}{2}})} \right) + \chi H \quad (2)$$

где M_s – намагниченность насыщения, H_a – поле локальной магнитной анизотропии, H_R – обменное поле и χH – высокополевого парамагнитный отклик.

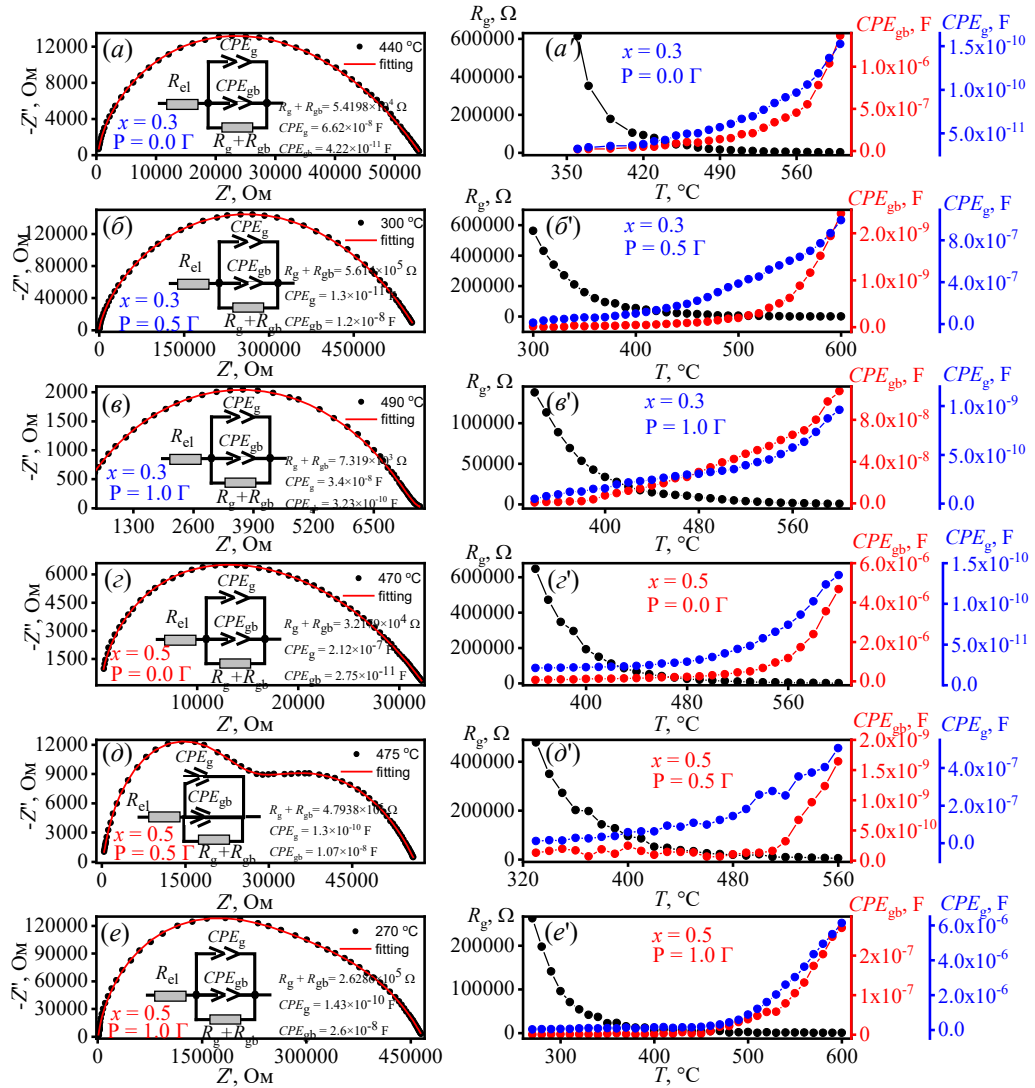


Рисунок 10 – Экспериментальные и теоретические кривые $Z''(Z')$ (а, б, в, г, д, е), а также температурная зависимость подгоночных параметров (а', б', в', г', д', е')

составов $(1-x)\text{SmFeO}_3-x\text{NaNbO}_3$: (а, б, в, а', б', в') $x = 0.3$;

(г, д, е, г', д', е') $x = 0.5$

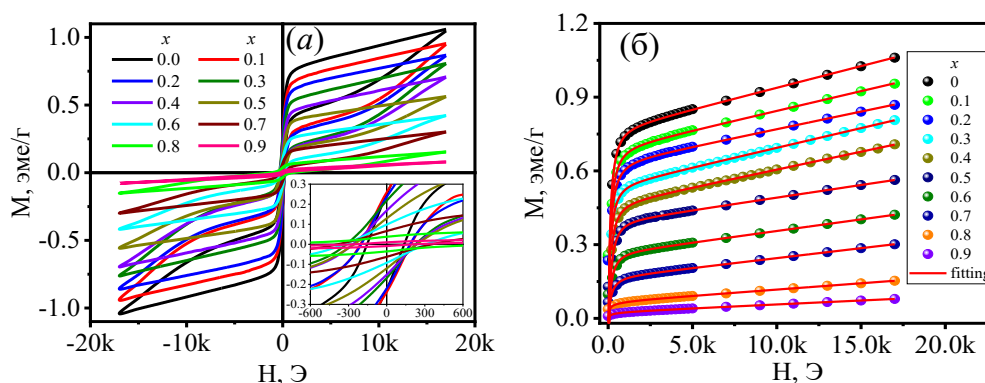


Рисунок 11 – Петли магнитного гистерезиса $(1-x)\text{SmFeO}_3-x\text{NaNbO}_3$ (а) и аппроксимация закона приближения намагниченности к насыщению (б)

Сравнительная оценка размеров D , коэрцитивного поля H_c и энергии анизотропии A показало, что размер $D = 94$ нм, при котором H_c и A имеют максимальные значения, является вторым критическим размером D_{cr2} и соответствует композиту при $x = 0.8$. На основании результатов изучения импедансной спектроскопии и магнитных измерений сформулировано **второе научное положение**, выносимое на защиту.

В главе 4 рассмотрены динамические свойства кристаллической решетки композитов $(1-x)\text{SmFeO}_3-x\text{NaNbO}_3$. Приведены результаты изучения ширины запрещенной зоны компонентов композитов, находящихся в макро- и наносостояниях. Отмечается слабая зависимость E_g макроскопического SmFeO_3 от давления наноструктурирования. В то же время с ростом концентрации NaNbO_3 E_g феррита самария в составе композита растет от 2.16 до 2.57 эВ, а с увеличением давления механоактивации композита E_g SmFeO_3 растет до 3.05 эВ. Оказалось, что E_g NaNbO_3 , равная 3.55 эВ до наноструктурирования, при уменьшении его концентрации в композите до $x = 0.3$ E_g уменьшается до 2.15 эВ. При наноструктурировании под давлением 1 ГПа E_g становится равным 3.66 эВ, а в составе композита с уменьшением концентрации до $x = 0.1$ E_g также уменьшается коррелированно.

Так как наноструктурирование методом «сверху–вниз» создает структурные дефекты, представляло интерес изучение влияния таких дефектов и размеров частиц на колебательный спектр составов. В разделе 4.2 представлены результаты изучения ИК – спектров компонентов и композита $0.5\text{SmFeO}_3\text{-}0.5\text{NaNbO}_3$. Обнаружено, что мода колебаний, обусловленная связями Nb–O тетраэдра наноструктурированного NaNbO_3 , смещается в область меньших частот, а остальные моды – в область больших частот. Это поведение характерно и для изгибных колебаний компонентов композита.

Далее в работе из рентгенодифрактометрических данных рассчитаны среднеквадратичные смещения ($\bar{U}^2$) наноструктурированных SmFeO_3 и NaNbO_3 по формуле:

$$\bar{U}^2 = (3a^2/4\pi^2(h^2+k^2+l^2))\ln[I_{\text{старт}}/I_{\text{деф}}] \quad (3)$$

Так как составы имеют некубическую сингонию, расчет $\bar{U}^2$ велся для трех главных кристаллографических осей каждого образца. Оказалось, что у SmFeO_3 $\bar{U}^2$ вдоль направления оси c в два раза отличается от остальных направлений, что говорит об анизотропии этого параметра. В то же время, вдоль главных кристаллографических осей a и b NaNbO_3 величины $\bar{U}^2$ незначительны и мало различаются.

На основании результатов, полученных в данной главе, сформулировано **третье научное положение**, выносимое на защиту.

В **заключении** приведены основные научные результаты и выводы:

1. В диссертационной работе на основе анализа литературы показана возможность управления физическими свойствами композитов как на основе ортоферрита самария SmFeO_3 , так и антисегнетоэлектрика NaNbO_3 изменением концентрации фаз.

2. В диссертационной работе впервые методом механической активации предварительно синтезированных порошков получены нанометрового масштаба композиты $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$.

3. С помощью рентгеновской спектроскопии изучена локальная атомная структура композитов $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$.

4. Методами диэлектрической и импедансной спектроскопии изучены соответствующие спектры в широком (от азотных температур до 600°C) диапазоне температур, и показана зависимость этих свойств как от концентрации, так и от давления механоактивации (наноструктурирования) композитов.

5. Показано, что температуры, соответствующие спиновой реориентации T_{SR} и компенсации T_{comp} зависят как от концентраций компонентов, так и от размеров частиц композитов $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$.

6. Показано, что в концентрационной точке $x = 0.7$ структурные параметры кристаллических решеток фаз композита $0.3\text{SmFeO}_3\text{-}0.7\text{NaNbO}_3$ имеют локальные экстремумы, а углы наклона θ и поворота ϕ кислородных октаэдров SmFeO_3 имеют максимальные значения.

7. Обнаружено, что размеры областей когерентного рассеяния $D_{0.0}$ макроскопического SmFeO_3 уменьшаются с ростом x , а микродеформации $\zeta_{0.0}$ растут при этом незначительно. У NaNbO_3 параметр $\zeta_{0.0}$ менее зависим от x , чем $D_{0.0}$. У наноструктурированных составов $D_{0.5}$ SmFeO_3 и NaNbO_3 более зависимы от x , чем $D_{1.0}$.

8. С ростом концентрации x и давления наноструктурирования плотность дислокаций SmFeO_3 -компоненты растет, а у NaNbO_3 -компоненты уменьшается.

9. Подбирая давления наноструктурирования, можно управлять частотным интервалом частотно-независимой реальной составляющей $Z'(\omega)$ и пиковой частотой мнимой составляющей $Z''(\omega)$ комплексного сопротивления Z^* композитов $(1-x)\text{SmFeO}_3\text{-}x\text{NaNbO}_3$.

10. Впервые обнаружено, что минимальное значение D , равное 94 нм, имеет композит $0.2\text{SmFeO}_3\text{-}0.8\text{NaNbO}_3$, для которого также характерны минимальное значение обменной энергии A и максимальное значение коэрцитивного поля H_c .

11. Для индивидуального SmFeO_3 наблюдается слабая зависимость ширины запрещенной зоны E_g от давления наноструктурирования, а в составе композита SmFeO_3 имеет E_g , равную 3.05 эВ. При наноструктурировании под давлением 1 ГПа E_g становится равным 3.66 эВ.

12. У NaNbO_3 с уменьшением его концентрации в композите до $x = 0.3$ ширина запрещенной зоны уменьшается от 3.55 эВ до 2.15 эВ.

13. Пики, соответствующие полосам поглощения ИК спектров компонентов наноструктурированных композитов $(1-x)\text{SmFeO}_3-x\text{NaNbO}_3$, смещаются в область больших волновых чисел по сравнению с пиками поглощения компонентов макроскопических композитов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

Статьи в научных изданиях, входящих в *Scopus*, *Web of Science*, *RSCI*

A1. Structure, electrophysical and magnetic properties of $(1 - x)\text{SmFeO}_3 - x\text{NaNbO}_3$ composites / A. Alshoeikh, Zh. Li, K. Abdulvakhidov [et al.] // *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. – 2024. – Vol. 130, No. 4. – P. 235. – DOI 10.1007/s00339-024-07385-y. – EDN MPMYPU. K1.

A2. Controlling the structure, dissipative, and optical properties of $(1-x)\text{SmFeO}_3 - x\text{NaNbO}_3$ via top-down nanostructuring / A. Alshoeikh, K. Abdulvakhidov, Li. Zhengyou [et al.] // *Ceramics International*. – 2025. – Vol. 51, No. 14. – P. 19156-19179. – DOI 10.1016/j.ceramint.2025.02.094. K1

A3. Crystal structure, thermodynamic and dielectric properties of the $\text{SmFeO}_3 - \text{NaNbO}_3$ composite / S. N. Kallaev, Sh. P. Faradzhev, A. R. Bilalov [et al.] // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2026. – Vol. 37, No. 8. – P. 583. – DOI 10.1007/s10854-026-16980-z. K1

Статьи в журналах, индексируемых в РИНЦ

A4. Структура, диэлектрические спектры и статические искажения композита $0.5\text{SmFeO}_3 - 0.5\text{NaNbO}_3$ / А. Алшоех, Б. К. Абдулвахидов, К. Г. Абдулвахидов // *Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки*. – 2025. – Т. 40, № 4(251). – С. 56-66. – DOI 10.21779/2542-0321-2025-40-4-56-66. K3.

Публикации в сборниках трудов конференций

A5. Dielectric Properties of $x\text{SmFeO}_3 - (1 - x)\text{NaNbO}_3$ Composites / A. Alshoeikh, B. Abdulvakhidov, Zh. Li [et al.] // 2023 International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA 2023), Surabaya, Indonesia, October 3–8, 2023 : Abstracts & Schedule / Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, Southern Federal University, National Kaohsiung University of Science and Technology. – Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press, 2023. – P. 33-34. – EDN CDQTGR.

A6. Synthesis and Physical Properties of $x\text{SmFeO}_3 - (1 - x)\text{NaNbO}_3$ Composites / A. Alshoeikh, Zh. Li, B. Abdulvakhidov, K. Abdulvakhidov // 2023 International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA 2023), Surabaya, Indonesia, October 3–8, 2023 : Abstracts & Schedule / Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, Southern Federal University, National Kaohsiung University of Science and Technology. – Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press, 2023. – P. 34-35. – EDN XCCUXS.

A7. Law of Approach to Saturation (LAS) for $(1 - x)\text{SmFeO}_3 - x\text{NaNbO}_3$ Composites / A. Alshoeikh, Zh. Li, K. Abdulvakhidov, B. Abdulvakhidov // 2024 International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA 2024),

Indore, India, November 6-11, 2024 : Abstracts & Schedule / Institute of Engineering & Technology Devi Ahilya University Indore, Southern Federal University, National Kaohsiung University of Science and Technology. – Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press, 2024. – P. 33-34. – EDN CTBYPX.

A8. Структура и импедансные спектры наноструктурированного $(1-x)\text{SmFeO}_3-x\text{NaNbO}_3$ / А. Алшоех, К. Абдулвахидов // 11(16) международный семинар по физике сегнетоэластиков : материалы 11(16) международного семинара, (г. Воронеж, 15-19 сентября 2025 г.). – Воронеж: ВГТУ, 2025. – С. 78-79. – EDN YBDLPE.

A9. Structural Study of Nanostructured $(1 - x)\text{SmFeO}_3 - x\text{NaNbO}_3$ / A. Alshoeckh, K. Abdulvakhidov, A. Kochetov, B. Kulbuzhev // 2025 International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA 2025), Kitakyushu, Japan, September 27-30, 2025 : Abstracts & Schedule / Kyushu Institute of Technology, Korea Maritime and Ocean University, Southern Federal University, National Kaohsiung University of Science and Technology. – Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press, 2025. – P. 34-35

A10. Synthesis and Electrical Properties of Mechanically Activated $x\text{SmFeO}_3 - (1 - x)\text{NaNbO}_3$ Composites / A. Alshoeckh, K. Abdulvakhidov // 2025 International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA 2025), Kitakyushu, Japan, September 27-30, 2025 : Abstracts & Schedule / Kyushu Institute of Technology, Korea Maritime and Ocean University, Southern Federal University, National Kaohsiung University of Science and Technology. – Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press, 2025. – P. 33-34.

A11. Synthesis, Optical and Magnetic Properties of Mechanically Activated $x\text{SmFeO}_3 - (1 - x)\text{NaNbO}_3$ Composites / A. Alshoeckh, K. Abdulvakhidov // 2025 International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA 2025), Kitakyushu, Japan, September 27-30, 2025 : Abstracts & Schedule / Kyushu Institute of Technology, Korea Maritime and Ocean University, Southern Federal University, National Kaohsiung University of Science and Technology. – Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press, 2025. – P. 34.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schmid, H. Multi-ferroic magnetoelectrics / H. Schmid // *Ferroelectrics*. -1994.- V.162.- P. 317.
2. Звездин, А.К. Фазовые переходы и гигантский магнитоэлектрический эффект в мультиферроиках / А.К.Звездин, А.П. Пятаков // *УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК*. - 2004. - Т. 174.- С. 465-470.
3. Уайт, Р. Обзор последних работ по магнитным и спектроскопическим свойствам редкоземельных ортоферритов/ Р. Уайт// *УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК*. - 1971.- Т. 103.- . 4 – С.593-607
4. Смоленский, Г.А. Физика сегнетоэлектрических явлений /Г.А. Смоленский. - Л.:Наука,1985.- С.396.
5. Megaw, H. The seven phases of sodium niobate/ Helen D. Megaw// *Ferroelectrics* 1974.- V. 7.-P. 87-89 <http://dx.doi.org/10.1080/00150197408237956>