

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций**

На правах рукописи

Фараджева Мислимат Пиралиевна

**«Технологии синтеза и свойства
наномодифицированных материалов ВТСП - $Y(Ba_xVe_{1-x})_2Cu_3O_{7-\delta}$ и мультиферроика – $BiFeO_3$ »**

Направление подготовки 03.06.01 Физика и астрономия

Код и наименование

Направленность 03.06.01_05 Физика конденсированного состояния

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Научный руководитель: д.ф.-м.н.,
проф. Приходько Александр Владимирович

Санкт Петербург – 2019

Научно-квалификационная работа выполнена на кафедре экспериментальной физики Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Зав.кафедрой
экспериментальной физики:

– *Апушкинский Евгений Геннадиевич,*
д.ф.-м.н., проф.

Научный руководитель:

– *Приходько Александр Владимирович,*
д.ф.-м.н., проф.

Рецензенты:

– *Иванов Вадим Константинович*
д.ф.-м.н., проф. СПбПУ

– *Насрединов Фарит Сабирович*
д.ф.-м.н., проф. СПбПУ.

– *Ястребов Сергей Гурьевич*
ведущий научный сотрудник, ФГБУН
Физико-технический институт им.
А.Ф.Иоффе РАН, д.ф.-м.н.

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы заключается в разработке конкурентоспособных технологий изготовления наноматериалов и изделий из конструкционной и функциональной нанокерамики для машиностроения, электроники, средств связи, атомной, авиакосмической техники и т.п. По мере уменьшения размера частиц, материалы могут проявить уникальные свойства ввиду возрастающей роли удельной поверхности, которая увеличивается в 10 миллионов раз при изменении размера от сантиметра до нанометра [1]. В некоторых материалах это может привести и к структурным изменениям. Например, получение мультиферроика - феррита висмута в наноструктурированном состоянии позволяет улучшить его магнитные характеристики за счет подавления пространственно-модулированной спиновой циклоиды [2], а сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ улучшить эксплуатационные характеристики этого материала.

Нанопорошки используются как исходное сырье для получения нанокерамики и тонких пленок. Одним из важных этапов синтеза нанокерамики является компактирование нанопорошков необходимой плотности и формы. Высокая удельная поверхность нанопорошков препятствует прессовке и формованию [3-5], а также усложняет процесс спекания, т.е. подобрать такие технологические параметры (температуру, время выдержки, скорость нагрева) которые обеспечат необходимые функциональные свойства конечного продукта. Важно также обеспечить химическую очистку и требуемый фазовый состав готовых изделий. Кроме того уменьшение размера кристаллитов – традиционный способ улучшения каталитической активности материалов, активности в твердофазных реакциях и процессах спекания. Ввиду проявления квантовых эффектов свойства наноматериалов могут значительно отличаться от объемных. Поэтому разработка технологий синтеза и исследование свойств наномодифицированных материалов является важным аспектом индустрии наносистем.

Цель и задачи исследования

Целью научной работы является синтезирование наномодифицированных материалов на основе $Y(Ba_xVe_{1-x})_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $BiFeO_3$ и установление влияния состава образцов $Y(Ba_xVe_{1-x})_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $BiFeO_3$ с разным размером частиц (от 10 нм до 2 мкм) на их электрические, механические и теплофизические свойства.

Научная новизна

Разработана технология синтеза наномодифицированных материалов на основе $Y(Ba_xVe_{1-x})_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $BiFeO_3$. Определены оптимальные технологические параметры их синтеза, при которых можно получить однородные по составу и дисперсности наноматериалы. Показано, что электрические, тепловые и магнитные свойства полученных наномодифицированных материалов отличаются от микрокристаллических и зависят от полидисперсности частиц.

Теоретическая и практическая значимость

Получение высокотехнологичных функциональных материалов с заданными целевыми свойствами и зёрнами нанометрового масштаба позволит решить проблему дальнейшей микроминиатюризации активных элементов, различных устройств и исполнительных механизмов твердотельной электроники и электроэнергетики.

Наноматериалы ВТСП $Y(Ba_xVe_{1-x})_2Cu_3O_{7-\delta}$ могут найти применение в каталитических процессах, где требуются катализаторы на основе носителей, сочетающих высокую поверхность со стойкостью к различным средам при высоких температурах, для создания наноразмерных компонентов электронной техники, в том числе тонкопленочной технологии.

Рекристаллизация этих порошков в результате их нагрева до соответствующих температур позволит получать керамику высокой плотности путем компактирования порошков разной дисперсности.

Из УДП соответствующих составов изготавливают изделия конструкционной, сверхпроводящей, электро-, сегнето-, пьезо-нанокерамики [3]: торцевых уплотнений для автотракторных двигателей; турбинок для бензонасосов;

фильер, дорнов, калибров, экструзионных матриц для кабельного производства; сегнетокерамических подложек для ИК-датчиков; корпусов СВЧ-смесителей с прецизионными допусками на типоразмеры для систем связи; керамических ВТСП-сквидов; ВТСП-экранов электромагнитных полей и др.

Феррит висмута является перспективным магнитоэлектрическим материалом и на основе этих материалов можно создавать магнитные сенсоры, емкостные электромагниты, элементы магнитной памяти, СВЧ фильтры и другие устройства.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на всероссийских и международных конференциях:

IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, 2018, Санкт-Петербург; 5th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, 2018, Санкт-Петербург; неделя науки СПбПУ Материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций 2018, 2017, 2015 Санкт-Петербург; научная сессия НИЯУ МИФИ, 2015, Москва; "Порядок, беспорядок и свойства оксидов" ОДРО-17, 2014, Ростов-на Дону; XIV Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ (РКТС-14), 2014, Казань; XII International Conference on Nanostructured Materials NANO, 2014, Москва.

Публикации

Опубликованные по теме диссертации 8 печатных работ общим объемом 51 п.л., в том числе авторских 10 п.л., в их числе 6 работ объемом 45-п.л. – в журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, обладают теоретической и практической ценностью.

Представление научного доклада: основные положения

- Синтезированы нанопорошки $Y(Ba_xBe_{1-x})_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $BiFeO_3$ глицин-нитратным методом. Определены оптимальные параметры синтеза однофазных и однородных наноматериалов.
- Проведены исследования температурной зависимости электросопротивления материалов на основе $Y(Ba_xBe_{1-x})_2Cu_3O_{7-\delta}$ в стационарном и наносекундном режимах.
- Проведены исследования диэлектрических, магнитных и тепловых свойств наномодифицированного феррита висмута.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Полный объем работы 105 страниц, включая 43 рисунка, 1 таблицу и список литературы из 95 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и дана ее общая характеристика. Сформулированы цели и задачи работы. Приведены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ имеющихся литературных данных по методам получения наноматериалов и физической природы эффектов возникающих при модификации материалов, полученных как по традиционным технологиям так и по нанотехнологиям, их описания и измерения основных характеристик. Кратко излагаются основные результаты исследований ВТСП и феррита висмута, делается осмысление тех особенностей, которые возникли сейчас в связи с развитием технологий изготовления сверхпроводников и ферроиков и расширением сфер их применения. Известные результаты, данные в первой главе, стали отправной точкой диссертационного исследования и необходимы для дальнейшего изложения.

Вторая глава «Технология изготовления наномодифицированных ВТСП структур и измерение их характеристик».

Методом химической технологии – сжиганием глицин-нитрат-органических прекурсоров автором получены нанопорошки на основе окси-

дов, в том числе сложных, на основе иттрия, бария, бериллия, и меди. Полученные нанопорошки оксидов, образующих соединения $Y(Ba_{1-x}Be_x)_2Cu_3O_{7-\delta}$, имеют размеры частиц $20 \div 50$ нм и низкой насыпной плотностью. Нанопорошки в сухом виде имеют большой насыпной объем. Насыпная плотность для образцов на основе $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, $Y(Ba_{1-0.5}Be_{0.5})_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $YBe_2Cu_3O_{7-\delta}$ составляет: $0,15\text{г/см}^3$, $0,08\text{г/см}^3$ и $0,025\text{г/см}^3$ соответственно

Третья глава «Исследования температурной зависимости электросопротивления наномодифицированных $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ материалов»

Приведены методики исследования температурных зависимостей электросопротивления в стационарном и наносекундном режимах.

Четвертая глава «Технология изготовления наномодифицированного феррита висмута и измерение их характеристик».

Описана технология синтеза нанопорошков на основе $BiFeO_3$ методом сжигания нитрат-органических прекурсоров. Исследованы морфология, структура и фазовый состав полученных материалов.

Пятая глава. «Исследования физических свойств наномодифицированного феррита висмута».

Проведены исследования диэлектрических, тепловых, гравиметрических и магнитных свойств наномодифицированного феррита висмута.

Объекты, и методы исследования

Объекты исследования - наномодифицированные материалы $Y(Ba_xBe_{1-x})_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $BiFeO_3$

Методы исследования:

Морфология: Сканирующий электронный микроскоп LEO- 1450 с микронным анализатором ISYS с системой EDX (Carl-Zeiss SMT AG, Германия. 2000г.)*;

Структура и фазовый состав: дифрактометр «PANalytical Empyrean series 2»**;

Дифференциальный термический анализ (ДТА): прибор синхронного термического анализа STA 449 F3 JUPITER**

Теплоемкость –дифференциальный сканирующий калориметр DSC 204 F1 Phoenix® (фирмы NETZSCH)*

Электрические свойства: стандартный 4х зондовый метод**, импульсная методика при наносекундных длительностях напряжений***

Магнитные свойства****: магнитометр Lake shore model 7407.

*Аналитический центр коллективного пользования Дагестанского научного центра Российской академии наук (АЦКП ДНЦ РАН)

**НОЦ «Нанотехнологии» Дагестанского государственного университета

*** Кафедра экспериментальной физики СПбПУ

****Кафедра магнетизма МГУ

Результаты и их обсуждение

Методом химической технологии – сжиганием глицин-нитрат-органических прекурсоров автором получены нанопорошки на основе оксидов, в том числе сложных, на основе иттрия, бария, бериллия, и меди. Полученные нанопорошки оксидов, образующих соединения $Y(Ba_{1-x}Be_x)_2Cu_3O_{7-\delta}$, имеют размеры частиц $20 \div 50$ нм и низкой насыпной плотностью. Нанопорошки в сухом виде имеют большой насыпной объем. Насыпная плотность для образцов на основе $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, $Y(Ba_{1-0.5}Be_{0.5})_2Cu_3O_{7-\delta}$ и $YBe_2Cu_3O_{7-\delta}$ составляет: $0,15\text{г/см}^3$, $0,08\text{г/см}^3$ и $0,025\text{г/см}^3$ соответственно.

Исследования структуры, полученных образцов наномодифицированных материалов, проводились на дифрактометре PANalytical Empyrean series 2, морфология этого порошка, исследовалась на сканирующем зондовом микроскопе LEO-1450 с EDX-анализатором INCA Energy.

Морфология полученных нанопорошков представлены на рисунке 1.

Термообработка синтезированных нанопорошков при различных параметрах (значение максимальной температуры, скорость нагревания и время вы-

держки) позволяет управлять степенью рекристаллизации частиц и изменением кислородной стехиометрии. Это дает возможность получать порошки различной дисперсности.

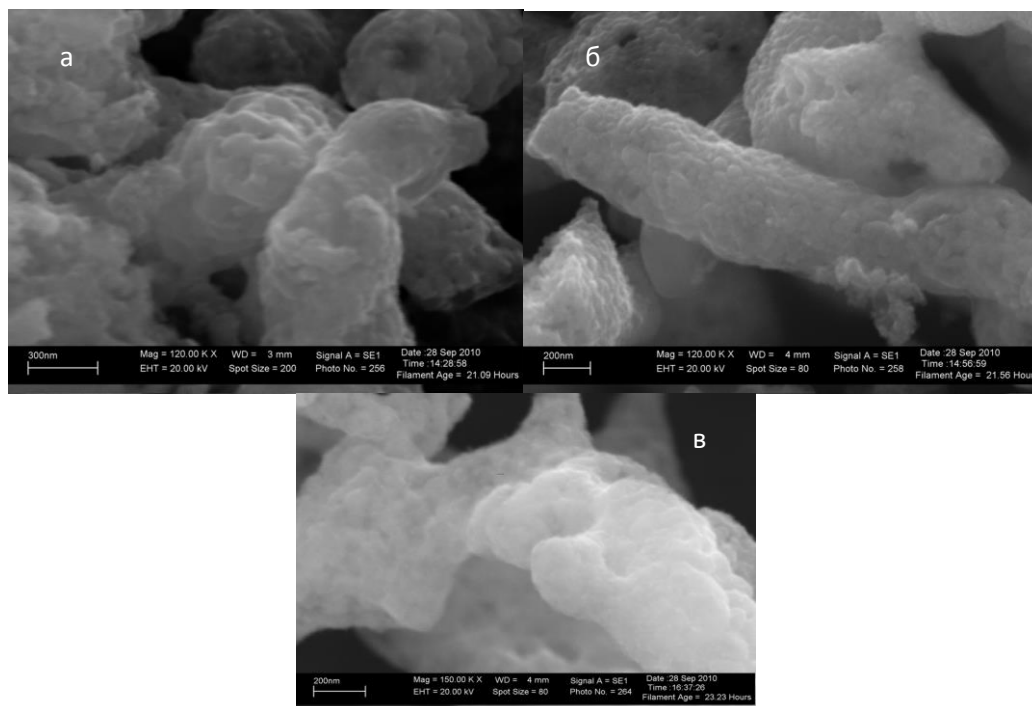


Рис.1 SEM изображения нанопорошка состава: а) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$
б) $\text{Y}(\text{Ba}_{0,5}\text{Be}_{0,5})_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ в) $\text{YBe}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

Путем компактирования порошков различной дисперсности, в том числе, наноразмерных можно получать керамические материалы в два этапа: синтез (в виде нанопорошка) и спекание, со свойствами материалов, получаемых по обычной керамической технологии в четыре и более этапов. Компактированием порошков различной дисперсности получены керамические материалы $\text{Y}(\text{Ba}_{1-x}\text{Be}_x)_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, различной плотности. При добавлении нанопорошка образцы при спекании уплотняются. Эти керамические материалы могут быть использованы в качестве мишеней для магнетронного распыления. Разработанная методика приводит к существенному снижению энергозатрат при получении керамических материалов предложенным способом за счет снижения температуры синтеза и спекания, а также за счет снижения

числа этапов изготовления соответствующих материалов, в отличие от обычного метода керамической технологии.

Приведены методики исследования температурных зависимостей электросопротивления в стационарном и наносекундном режимах.

Для оценки транспортных характеристик образцов проводились исследования температурных зависимостей сопротивления $R(T)$ в области сверхпроводящего фазового перехода в наносекундном интервале длительностей приложенного напряжения, по методике, описанной в работе [6]. На рис. 2 представлены температурные зависимости сопротивления образцов $R(T)$ в области перехода в сверхпроводящее состояние для образцов с различным содержанием нанопорошка (0 – 100 %), при длительности импульса приложенного напряжения 5 нс. Результаты измерений представлены в относительных единицах, где R_0 – значение сопротивления при $T = 100$ К.

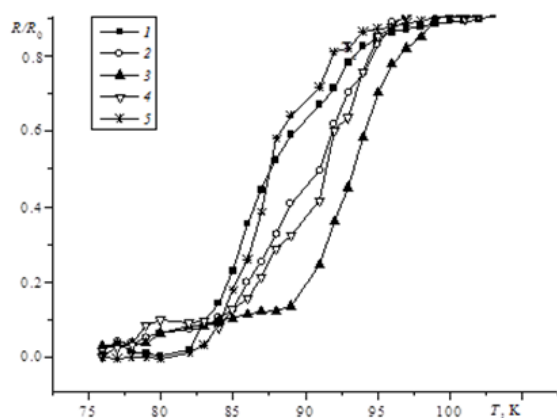


Рис. 2 Температурная зависимость сопротивления образцов $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ в области сверхпроводящего перехода для различных концентраций введенного нанопорошка, %: 0 (1), 10 (2), 20 (3), 30 (4), 100 (5)

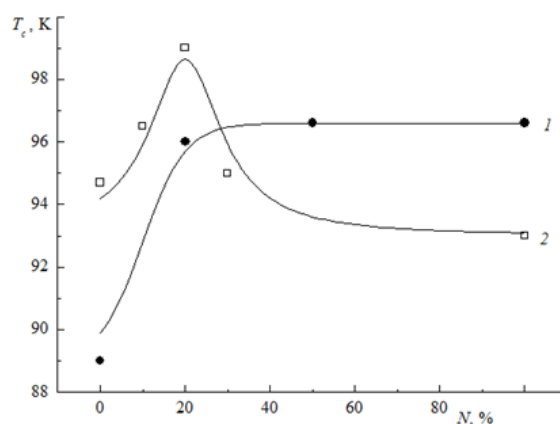


Рис. 3 Зависимости критической температуры перехода образцов в сверхпроводящее состояние от концентрации нанопорошка в статическом (1 [7]) и наносекундном (2) режимах; данные получены для керамики (1) и для смеси порошков (2)

На рисунке 3 приведены зависимости величины T_c от концентрации нанопорошка (N , %) в стационарном режиме (кривая 1, [7]) и в наносекундном (кривая 2). Значения T_c для чисто микрокристаллических образцов ($N = 0\%$) в стационарном и наносекундном режимах различаются, так как в первом случае авторы работы [7] исследовали керамику $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, получен-

ную методом твердофазного спекания, тогда как во втором [8] – смесь порошков.

Введение наночастиц других элементов в керамику $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, как правило, снижает критическую температуру перехода в сверхпроводящее состояние T_c [9,10], тогда как для наших наноструктурированных материалов значение T_c увеличивается. Это можно объяснить тем, что в исследуемых нами структурах нанодисперсный порошок выступает в качестве связующего, образуя сеть слабых связей джозефсоновского типа в микрокристаллическом ВТСП. Нанодисперсный наполнитель, располагаясь между микрочастицами ВТСП, обеспечивает формирование сверхпроводящего перколяционного кластера в неоднородной среде.

Добавление бериллия в соединение $Y(Ba_{1-x}Be_x)_2Cu_3O_{7-\delta}$ приводит к снижению абсолютного значения электросопротивления и увеличению температуры спекания.

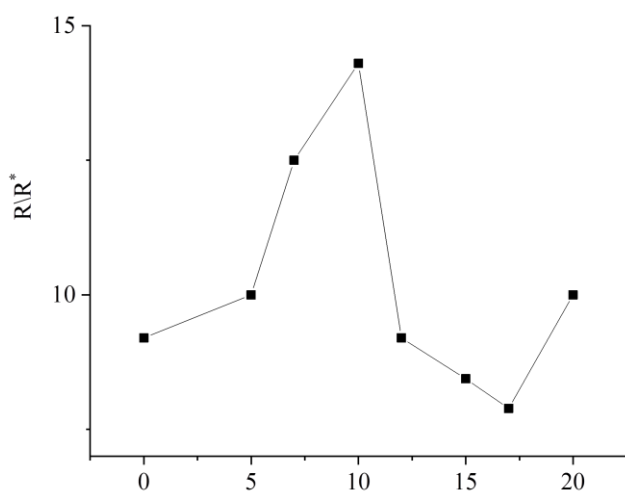
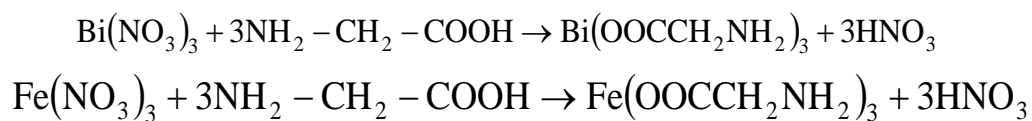


Рис.4 Зависимость сопротивления наномодифицированных образцов YBCO- УМН при комнатной температуре

Наносекундные исследования образцов ВТСП YBCO модифицированных углеродными многослойными нанотрубками не привело к изменению параметров сверхпроводящего перехода, однако начиная с 20% содержания нанотрубок резко увеличивается значение сопротивления (рис.4).

Нанопорошки на основе $BiFeO_3$ синтезированы автором методом сжигания нитрат-органических прекурсоров. При получении этого материала, эквимольные количества $Bi(NO_3)_3$ и $Fe(NO_3)_3$ смешиваются в определенных соотношениях и получается водный раствор нитратов соответствующего со-

единения. В полученный раствор добавляется азотная кислота и глицин в количестве, рассчитанном по окислительно-восстановительной реакции:



В результате многократных проб был получен положительный результат - однородный по составу и дисперсности нанопорошок соединения BiFeO_3 при соблюдении следующих технологических параметров. Раствор выпаривается до плотности в пределах $1,14 \div 1,16$. Полученный раствор нагревается со скоростью $10 \div 30$ град/мин. Температура вспышки $150 \div 200^\circ\text{C}$; температура горения $500 \div 600^\circ\text{C}$.

При других технологических режимах синтезированный нанопорошок содержал побочные фазы такие как Bi_2O_3 - β ; Bi_2O_3 , Fe_3O_4 . На чистоту, однородность и дисперсность конечного продукта оказывало влияние как скорость нагрева прекурсора, так и температура вспышки.

На рисунке 5 приведены дифрактограмма и фазовая диаграмма синтезированного нанопорошка феррита висмута. Как видно из этого рисунка, при получении нанопорошка по вышеуказанной технологии, образуется преимущественно одна (см. вставку на рис.5) фаза феррита висмута BiFeO_3 . Однако при 28° есть не распознанный дифрактометром пик, который исчезает при термообработке нанопорошка в течение 1 часа при 600°C . Повышение температуры приводит к появлению побочных фаз и пик при 28° идентифицируется как муллит $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$.

Согласно результатам исследования размеры частиц составляют в среднем ≥ 35 нм. Полученный порошок обладает ферромагнитными свойствами, поскольку размеры его частиц меньше 62 нм, что является результатом разрушения спиновой циклоиды. Проявление ферромагнетизма также связано с наличием оксида железа Fe_2O_3 в аморфном состоянии, так как на магнитное поле реагирует вся масса порошка. Рыжий цвет синтезированного порошка также может свидетельствовать о наличии Fe_2O_3 .

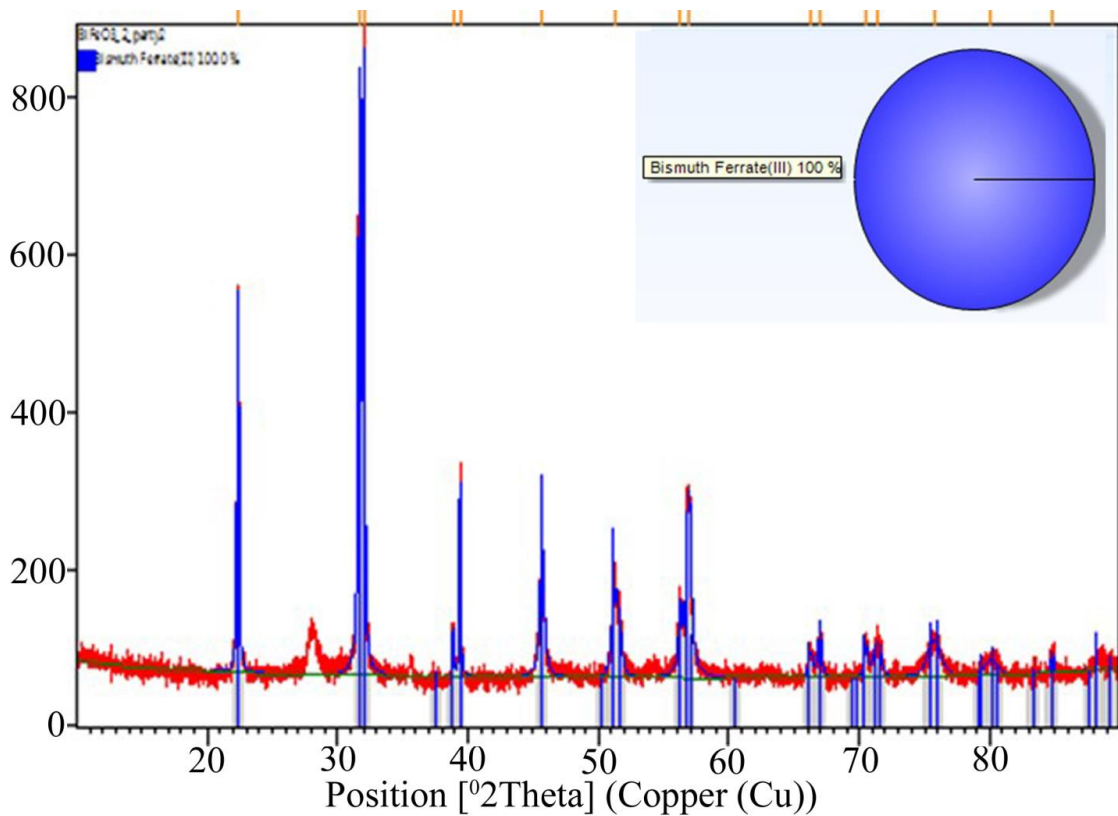


Рис.5 Дифрактограммы и результаты фазового анализа синтезированного образца.

На рисунке 6 приведены результаты температурной и частотной зависимостей относительной электроемкости (отнесенной к электроемкости при 200°С, где значение электроемкости на любой частоте еще оставалось постоянным) и потерь, полученные при нагревании. Как видно из рисунка 6, для нанокристаллического образца наблюдается явная частотная дисперсия электроемкости с возрастанием и уходом максимума в область высоких значений частоты и температуры соответственно. Выражение, описывающее связь электроемкости с частотой, представляется в виде:

$$C/C_{200} = 1,875 - 0,296 \exp(-\omega/2.25) \quad (1)$$

Согласно (1) максимальное изменение этой зависимости приходится на частоту 2,25кГц. После значения $C/C_{200} = 1,77$ зависимость переходит в состояние насыщения при частотах до 10кГц с тенденцией уменьшения этого значения при частотах 50-100 кГц как показали последующие измерения.

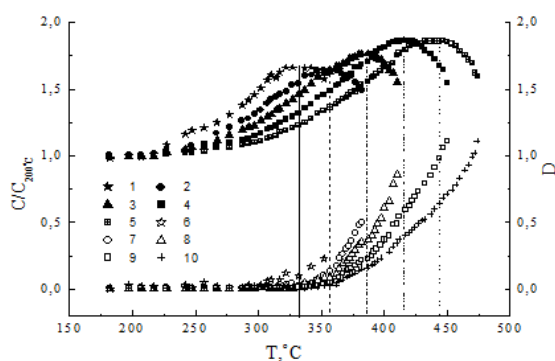


Рис.6 Температурная зависимость относительной емкости (1- 500Гц, 2-1кГц, 3- 2кГц, 4- 5 кГц, 5- 10кГц) и потерь (6- 500Гц, 7-1кГц, 8- 2кГц, 9- 5 кГц, 10- 10кГц) для нанокристаллического образца.

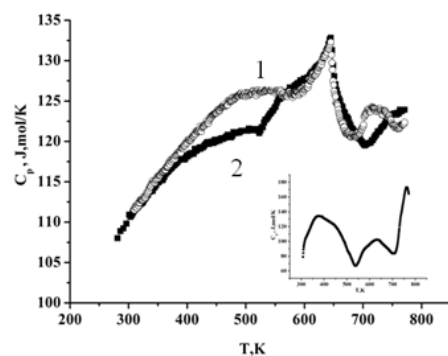


Рис.7 Температурная зависимость теплоемкости мультiferроика BiFeO_3 : 1 – нанокристаллический (700°C), 2 – микрокристаллический, на вставке синтезированный нанокристаллический

На рисунке 7 представлены результаты экспериментальных исследований теплоемкости C_p nano и микрокристаллического мультiferроиков BiFeO_3 в области температур 140–800 К. На вставке – теплоемкость холоднопрессованного образца из исходного нанокристаллического порошка. Как видно из рисунка, на температурной зависимости теплоемкости у всех исследованных образцов наблюдаются аномалии при температуре антиферромагнитного фазового перехода $T_N = 643$ К. Теплоемкость нанокристаллического феррита висмута в области температур 350–570 К заметно больше, чем у микрокристаллического образца. На температурных зависимостях теплоемкости нанокристаллического феррита висмута (выше T_N) наблюдаются также характерные для фазового перехода аномалии с максимумами в области температуры $T \approx 750$ К для холоднопрессованного образца (вставка на рис. 7) и $T \approx 725$ К после его прокаливании при $T \approx 1000$ К. Причем максимум теплоемкости после термообработки образца существенно снижается и размывается, смещаясь в область низких температур.

Результаты первичного исследования дифференциально-термического анализа (ДТА) исходного нанопорошка не выявили наличия в нем фазы кроме BiFeO_3 . Они свидетельствуют о существовании в нем связанной влаги,

которая исчезает после первого прогрева. Обнаруживается аномалия соответствующая ферромагнитному фазовому переходу в области 480°C . В процессе второго и третьего этапов ДТА наблюдается зарождение центров кристаллизации фазы $\text{Vi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ и переход из α - в γ - фазу соединения $\text{Vi}_{25}\text{FeO}_{39}$, что согласуется с фазовой диаграммой системы $\text{Vi}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Магнитные свойства нанокристаллического образца зависят от размеров кристаллитов и содержания побочной фазы. На рисунке 8 приведены петли магнитного гистерезиса синтезированного нанопорошка феррита висмута и термообработанного при 600°C . В исходном, синтезированном нанопорошке содержится гидратированный оксид железа (маггемит ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)) при термообработке (600°C) который переходит в гематит ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$).

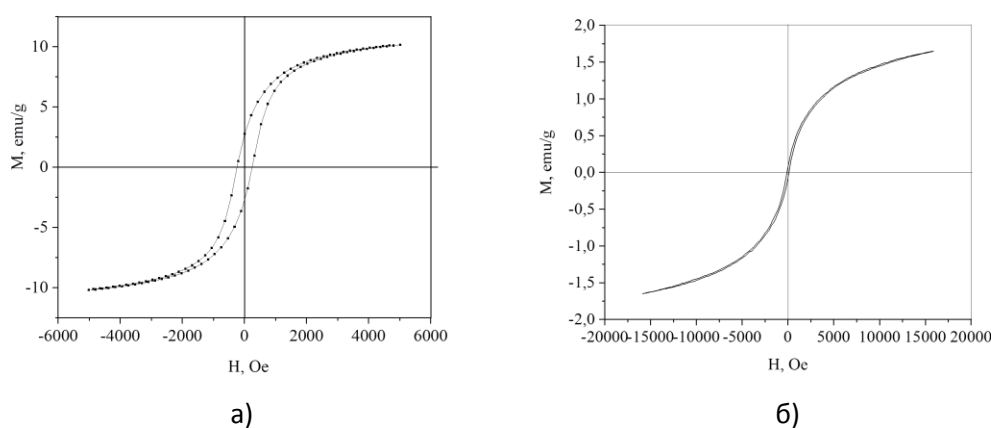


Рис. 8 Петли магнитного гистерезиса: а) синтезированного нанопорошка феррита висмута б) термообработанного при 600°C .

Изучение тепловых, электрических и магнитных свойств образцов из нано- и микропорошков обнаружили их существенное различие, которое может быть связано как с различием дисперсности частиц, так и с состоянием границ между этими частицами.

Заключение

Предложенные новые технологии получения иттриевых высокотемпературных сверхпроводников и мультиферроиков позволяют получать мате-

риалы с устойчивыми свойствами пригодные для использования как в сильноточной электротехнике, так в слаботочной электронике.

Результаты проведенного в диссертации исследования свидетельствуют, что:

- возможны технологии получения наномодифицированных иттриевых сверхпроводников с улучшенными устойчивыми механическими и электрическими свойствами в отличие от микрокристаллических материалов;
- в структурах, состоящих из микрокристаллического порошка $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ и нанопорошка того же состава, наблюдается повышение критической температуры перехода T_c в сверхпроводящее состояние и сужение сверхпроводящего перехода при концентрации нанопорошка около 20 %, а путем добавления нанопорошка в различной концентрации появляется возможность управления критической температурой и шириной перехода в сверхпроводящее состояние.
- существует технология одноэтапного получения чистого однородного по дисперсности нанокристаллического порошка на основе феррита висмута со строгой стехиометрией, и однородности полученного материала;
- температурные и частотные зависимости диэлектрических свойств образцов, изготовленных путем холодного прессования полученного порошка, существенно отличаются от свойств микрокристаллического феррита висмута, изготовленного по обычной керамической технологии;
- результаты исследований показывают, что теплоемкость нанокристаллического феррита висмута в области температур 350–570 К заметно больше, чем у микрокристаллического образца. Избыточную теплоемкость в области температур 350–570 К можно интерпретировать как аномалию Шоттки для трехуровневых состояний. Остаточная намагниченность и коэрцитивная сила нанопорошка BiFeO_3 уменьшается по мере термической обработки.

Список цитированной литературы

1. Ярославцев, А.Б. Наноматериалы: свойства и перспективные приложения [Электронный ресурс]/ Ярославцев А.Б., Иванов В.К., Федоров П.П. и др. // Издательство: Научный мир.- 2014.- режим доступа: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_1922996#441
2. Пятаков, А.П. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики./А.П. Пятаков, А.К. Звездин //УФН. – 2012. –Т.182, № 6. –С. 593-611.
3. Хасанов, О. Л., Научные основы сухого компактирования ультрадисперсных порошков в технологии изготовления нанокерамики: дис. ... д-ра тех. наук: 05.17.11/ Хасанов Олег Леонидович. – Томск, 2003.-360с.
4. Андриевский, Р.А., Наноструктурные материалы/ Р.А. Андриевский, В.А. Рагуля– М.: Издательский центр «Академия», 2005, - 192с.
5. Гусев, А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства./ А.И. Гусев.- Екатеринбург: УрО РАН, 1998. -200 с
6. Приходько, А.В. Коньков О.И. Модификация структуры и протекание тока в массиве углеродных однослойных нанотрубок // Физика твердого тела. 2014. Т. 56. № 7. С. 1411–1414.
7. Гаджимагомедов, С.Х. Керамические материалы на основе $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, полученные из нанопорошков / С.Х. Гаджимагомедов, Д.К.Палчаев, М.Х. Рабаданов, Ж.Х. Мурлиева, Н.С. Шабанов, Н.А. Палчаев, Э.К. Мурлиев, Р.М. Эмиров // Письма в Журнал технической физики. –2016. –Т. 42. – № 1. – С. 9–16.
8. Фараджева, М.П. Особенности проводимости наномодифицированных ВТСП- структур/ М.П.Фараджева, А.В. Приходько, О.И. Коньков // Научно-технические ведомости СПбПУ. Физико-математические науки. – 2018. –Т.11. – №4. – С.7-14
9. Kofu, M. Zn and Ni doping effects on the low-energy spin excitations in $La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$ / M. Kofu, H. Kimura, K. Hirota // Phys. Rev. B.– 2005. – V.72. – P.64502.

10.Ullmann, B. Aspects of substitution of magnetic ions Fe, Ni and Gd in YBCO-HTSC/ B. Ullmann, R. Wördenweber, K. Heinemann, H. C. Freyhardt // Phys. C Supercond.– 1990.– V.170.– P.71–79.

Аспирант

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a horizontal stroke at the end, set against a light pink background.

Фараджева М.П.