

На правах рукописи

Павлова Юлия Валерьевна

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ
НА ОСНОВЕ ТИТАНАТА БАРИЯ-СТРОНЦИЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЙ В
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Специальность: 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2008

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете “ЛЭТИ” им. В.И.Ульянова (Ленина)

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор С.Ф. Карманенко

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор В.П. Афанасьев
кандидат физико-математических наук, доцент В.В. Рычгорский

Ведущая организация – ОАО НИИ “Гириконд”

Защита диссертации состоится “ 18 ” декабря 2008 г. в 15³⁰ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.04 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ” имени В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “ ” ноября 2008 г.

Ученый секретарь совета
по защите докторских
и кандидатских диссертаций

В.А. Мошников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Сегнетоэлектрические материалы на основе твердых растворов титаната бария – стронция (BST) на протяжении более сорока лет исследуются и применяются при разработке сверхвысокочастотных (СВЧ) приборов и устройств. В последние годы интерес к керамике BST проявился в сравнительно новой области – со стороны разработчиков ускорителей заряженных частиц. В настоящее время наиболее перспективны следующие направления применения керамики BST в ускорительной технике:

- фазовращатели и переключатели большой мощности для схем питания линейных ускорителей;
- управляемые ускорительные структуры с диэлектрическим заполнением.

Ускорительные структуры с диэлектрическим заполнением используются при реализации метода ускорения заряженных частиц, в котором применяются кильватерные поля за электронными сгустками, проходящими через диэлектрическую волноведущую структуру. Использование сегнетоэлектрического слоя, нанесенного на внешнюю сторону диэлектрического волновода, обеспечивает возможность электрического управления волновым сопротивлением структуры, что позволяет управлять процессом ускорения частиц. Поскольку в ускорительных устройствах применяются сравнительно большие мощности и напряженности полей (электрическое поле в импульсе до 100 МВ/м), то целесообразно применять керамические сегнетоэлектрики, и в первую очередь керамику $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$.

Основным недостатком промышленно выпускаемой керамики BST являются сравнительно высокие диэлектрические потери материала в СВЧ диапазоне (тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta \sim 10^{-2}$ на частоте $f = 10$ ГГц). Кроме этого, при сравнительно высоком коэффициенте управляемости (коэффициент управляемости n определяется как отношение значений диэлектрической проницаемости, соответствующих разному значению электрического поля) керамика BST обладает большим значением диэлектрического гистерезиса и повышенной для применений в ускорительной технике диэлектрической проницаемостью ($\epsilon > 1000$). Добавки магния, марганца и редкоземельных элементов в состав керамики BST позволяют снизить диэлектрическую проницаемость, диэлектрические потери и гистерезис композитного материала при сохранении требуемого значения управляемости. Однако, комплексные физико-технологические исследования влияния таких факторов как состав и концентрация примесных добавок, микроструктура керамики BST на ее диэлектрические характеристики, электропроводность, управляемость, не проводились.

Таким образом, комплексные исследования керамики BST, направленные на совершенствование технологии изготовления материала с заданными

характеристиками и структур на его основе представляются весьма актуальными.

Целью данной работы явилось комплексное исследование диэлектрических характеристик, управляемости и электропроводности сегнетоэлектрической керамики на основе титаната бария-стронция с различными добавками, предназначенной для применений в электрически управляемых мощных СВЧ устройствах.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие **задачи**:

- исследование влияния магнийсодержащих добавок (MgO , Mg_2TiO_4) на диэлектрические свойства и управляемость сегнетоэлектрической BST керамики в ВЧ – СВЧ диапазонах;
- разработка методик измерений диэлектрических характеристик и управляемости в СВЧ диапазоне (9 – 35 ГГц);
- исследование электропроводности конденсаторных структур на основе сегнетокерамики BST с магнийсодержащими добавками (BST(M));
- разработка конструкций управляемых СВЧ резонаторов на основе слоистых структур, содержащих сегнетокерамику;
- исследование возможности применения в слоистых структурах внутренних металлических электродов, прозрачных для СВЧ поля;
- выбор состава сегнетоэлектрической керамики для применения в ускорительных системах заряженных частиц.

Методы исследования

Диагностика состава и структуры сегнетоэлектрической керамики проводилась с помощью рентгенодифракционного, рентгеноспектрального и микроскопического методов анализа. Определение СВЧ характеристик выполнялось с использованием резонансных методик. Для исследования ВАХ керамических конденсаторов и определения механизмов токов утечки применялся сравнительный анализ с известными теоретическими и экспериментальными зависимостями. Теоретические исследования слоистых диэлектрических структур с внутренними электродами проводились посредством электродинамического анализа. Надежные теоретические и расчетные методы, современное экспериментальное оборудование обеспечили высокую достоверность полученных результатов.

Научная новизна работы

1. Обнаружено, что статические вольт-амперные характеристики (ВАХ) плоскопараллельных конденсаторных структур на основе керамики BST с магнийсодержащими добавками содержат участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

2. Установлена корреляция между электропроводностью и диэлектрическим гистерезисом керамики BST с магнийсодержащими добавками.
3. Экспериментально установлено, что добавка ортотитаната магния, который является линейным диэлектриком, в количестве 3 – 80 % в состав сегнетоэлектрической керамики BST приводит к увеличению коэффициента управляемости композитного материала.
4. Показано, что применение комплексной добавки, включающей оксид магния MgO и ортотитанат магния Mg_2TiO_4 , позволяет регулировать диэлектрические свойства сегнетоэлектрической керамики и удовлетворить техническим требованиям, предъявляемым к материалу в ускорительной технике.
5. Экспериментально установлено, что зависимость коэффициента управляемости керамики BST(M) от напряженности электрического поля в диапазоне напряженностей полей $E = 2 - 9$ В/мкм имеет линейный характер.
6. Обоснована возможность применения в управляемых СВЧ резонаторах внутренних металлических электродов, прозрачных для СВЧ поля.
7. Разработаны конструкции управляемых СВЧ резонаторов, содержащих сегнетоэлектрическую керамику, и определены наиболее перспективные конструкции с точки зрения практических применений.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Определен состав сегнетокерамики, который удовлетворяет требованиям к материалам, применяемым в ускорительной технике.
2. Показано, что введение в сегнетоэлектрическую керамику $Ba_{0.55}Sr_{0.45}TiO_3$ добавки ортотитаната магния (Mg_2TiO_4) с концентрацией 3 – 80 вес. % приводит к увеличению коэффициента управляемости от 12 до 20 % и уменьшению эффективной диэлектрической проницаемости от 900 до 200.
3. Определены контактные сопротивления структур $Cu/Ba_{0.55}Sr_{0.45}TiO_3/Cu$ и $Cu/Ba_{0.60}Sr_{0.40}TiO_3/Cu$, которые составили 10^5 Ом·м² и 10^4 Ом·м² соответственно. В структурах $Au/Ba_{0.55}Sr_{0.45}TiO_3/Au$ контактное сопротивление практически отсутствует.
4. Разработаны и испытаны различные конструкции управляемых СВЧ резонаторов с частичным заполнением диэлектрическим материалом для диапазонов частот 9 – 12 и 25 – 35 ГГц.
5. Обнаружено различие в коэффициентах управляемости волноведущих сегнетоэлектрических структур при параллельной и перпендикулярной ориентации векторов управляющего электрического поля относительно электрической компоненты СВЧ поля.

6. Экспериментально подтверждено, что платиновые пленки толщиной 50 нм являются «электродинамически прозрачными» на частоте 10 ГГц и могут использоваться в качестве внутренних управляющих электродов.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Уменьшение значения dl/dU на участке отрицательного дифференциального сопротивления статической вольт-амперной характеристики обуславливает уменьшение диэлектрического гистерезиса вольт-фарадной характеристике конденсаторов на основе сегнетоэлектрической керамики титаната бария-стронция (с относительным содержанием бария 45 – 60 %) с магнийсодержащими добавками (3 – 80 вес. %).
2. Наилучшее сочетание коэффициента управляемости и диэлектрических потерь в структурах на основе сегнетоэлектрической керамики BST достигается при использовании комплексной магнийсодержащей добавки в виде оксида (MgO) и ортотитаната (Mg_2TiO_4) магния.
3. Сегнетоэлектрическая керамика $Ba_{0.55}Sr_{0.45}TiO_3$, включающая 25 вес. % комплексной магнийсодержащей добавки, является наиболее пригодным материалом для применений в управляемых ускорительных структурах с диэлектрическим заполнением.
4. В качестве внутренних управляющих электродов в волноведущих диэлектрических структурах могут использоваться металлические пленки платины толщиной 50 нм, которые не вносят существенных потерь в распространение электромагнитной волны. При указанной толщине достигается компромисс между временем переключения и электродинамическими потерями.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы использовались в исследованиях следующих организаций: ОАО «Гирikonд», ООО «Керамика», лаборатории «Пульс» СПбГЭТУ «ЛЭТИ», лаборатории микроэлектроники и физики материалов университета г. Оулу (Финляндия), Корейского института науки и техники (KIST, г. Сеул), Университет г. Йель (США), компании “Euclid TechLab” и “Omega P” (США).

Результаты работы реализованы в следующих проектах и грантах:

- в проекте Министерства Образования Российской Федерации «Разработка элементной базы и устройств СВЧ радиоэлектроники на основе сегнетоэлектрических пленок» (код проекта: 208.05.05.012);
- Проект международного научно-технического центра (МНТЦ – 2896) «Исследование планарных слоистых структур на основе сегнетоэлектрических пленок с целью применения в радиоэлектронных устройствах миллиметрового диапазона длин волн» (01 января 2005 г. – 30 июня 2007);
- Проект Корейского института науки и техники (KIST – AA134/2004) “Управляемые пленочные компоненты на основе сегнетоэлектрических пленок» (2005 – 2007).

- В грантах правительства США «Перспективные устройства электроники на основе управляемых диэлектрических элементов для систем связи и локации» (“Next generation electronics based on tunable dielectric components for communication and radar systems”) совместно с государственной лабораторией NREL (США) (№ ААТ-3-33627-01) (2003 – 2007).

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- 7th International Symposium on Integrated Ferroelectrics (ISIF 2005), Shanghai, China, April 17-20, 2005
- International Conference on Electroceramics (ICE 2005), KIST, Seoul, Korea, June 12-16, 2005
- IV Международная научно-техническая конференция, INTERMATIC, МИРЭА, Москва, 2006
- VI Международная научно-техническая конференция, INTERMATIC, МИРЭА, Москва, 2007
- XI Международная конференция Физика диэлектриков (Диэлектрики – 2008), Санкт-Петербург, 3 – 7 июня 2008 г.
- XVII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков, Санкт-Петербург, 9 – 14 июня 2008 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, из них 3 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 5 докладов в материалах международных и всероссийских конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 102 наименования. Основная часть работы изложена на 81 странице машинописного текста. Работа содержит 44 рисунка и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обоснована актуальность работы, определены цели и задачи исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер.

В главе обобщены литературные данные об основных свойствах сегнетоэлектрической керамики. Проведен обзор работ, посвященных механизмам

электропроводности в сегнетоэлектриках.

Рассмотрены перспективные направления применения сегнетоэлектрической керамики в ускорительной технике. Приведены требования к параметрам сегнетокерамики для возможности ее применения в ускорительной технике: $\epsilon \sim 500-600$, $n \sim 1.2-1.3$ (при $E = 4-5$ В/мкм), $\text{tg}\delta \leq 0.005$ ($f = 10$ ГГц).

На основе анализа литературы формулируется цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе приведено описание технологии изготовления сегнетоэлектрической керамики на основе титаната бария-стронция с добавками оксида магния (MgO), ортотитаната магния (Mg_2TiO_4) и комплексной магнийсодержащей добавки, включающей и MgO и Mg_2TiO_4 . Синтез керамики проводился в лаборатории ОАО «Гириконд» под руководством Е.А. Ненашевой.

Описана технология нанесения медных, золотых и платиновых электродов методом магнетронного распыления. Приведены результаты исследования микроструктуры и состава сегнетоэлектрической керамики.

Для синтеза керамики использовались BaTiO_3 (HPBT-1) и SrTiO_3 (HST-1) (Fuji Titanium Industry Co., Japan) с отношением Ba/Ti и Sr/Ti 0.996 моль и магнийсодержащие добавки в различных соотношениях, которые подвергались смешиванию и помолу в вибрационной мельнице в течение трех часов. Исследовалась сегнетоэлектрическая керамика с соотношением Ba и Sr 45/55 вес. % (BST-1), 50/50 вес. % (BST-2), 55/45 вес. % (BST-3), 60/40 вес. % (BST-4). Магнийсодержащие добавки вводились в количестве 3 – 80 вес. % (сверх 100% по отношению к BST). Образцы необходимой формы и размеров (тестовые образцы в виде дисков, пластины, трубки, кольца) изготавливались гидравлическим прессованием, в качестве связки использовался 10 % раствор поливинилового спирта. Подготовленные образцы спекались на воздухе при температуре 1350 – 1540°C в камерной электропечи до нулевого водопоглощения и пористости материала не более 5%.

На рис. 1 приведены электронные микрофотографии для образцов $\text{Ba}_{0.55}\text{Sr}_{0.45}\text{TiO}_3$ с добавкой MgO (20 вес.%) (рис. 1 а) и $\text{Ba}_{0.60}\text{Sr}_{0.40}\text{TiO}_3$ с добавками MgO (10 вес.%) и Mg_2TiO_4 (35 вес.%) (рис. 1 б).

Анализ элементного состава проводился с помощью рентгеноспектрального микроанализатора JSM-6460LV JEOL (таблица 1).

Результаты рентгеноспектрального анализа показывают, что композитная керамика BST(M) имеет гетерофазную структуру, состоящую из основной фазы, твердого раствора BST, и фаз с содержанием магния.

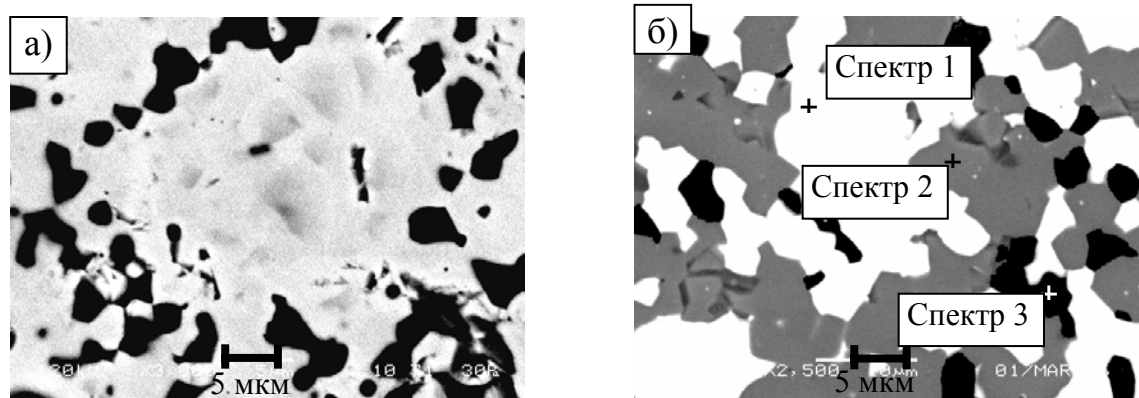


Рис. 1. Микрофотографии сегнетоэлектрической керамики $\text{Ba}_{0.55}\text{Sr}_{0.45}\text{TiO}_3$ с добавкой MgO (20 вес.%) (а); $\text{Ba}_{0.60}\text{Sr}_{0.40}\text{TiO}_3$ с комплексной магнийсодержащей добавкой (10 вес.% MgO + 35 вес.% Mg_2TiO_4) (б).

Таблица 1.

Содержание элементов в ат. % в точках Спектр 1 – 3 на рис 1 б.

Обозначение	Фаза	Mg	Ti	Sr	Ba	O	Всего
Спектр 1	BST	0.14	22.62	21.85	32.23	23.16	100.00
Спектр 2	Mg_2TiO_4	29.66	27.47	1.39	2.99	38.49	100.00
Спектр 3	MgO	59.89	0.19	0.26	0.06	39.60	100.00

В структуре (BST+MgO) добавка MgO имеет вид отдельных включений округлой формы (рис. 1 а). Все образцы сегнетокерамики с комплексной магнийсодержащей добавкой ($\text{MgO} + \text{Mg}_2\text{TiO}_4$) (рис. 1 б) имели три фазы: наиболее светлый цвет (Спектр 1) соответствует основной перовскитной фазе BST, темный цвет имеют включения оксида магния (Спектр 3), а серый цвет имеет Mg_2TiO_4 (Спектр 2) со структурой шпинели. В структуре (BST+MgO+ Mg_2TiO_4) фаза MgO сцепляет кристаллиты фазы Mg_2TiO_4 , удлиняя кристаллические агрегаты из магнийсодержащих несегнетоэлектрических кристаллических фаз и, способствуя тем самым формированию из них так называемого «каркаса» или сетки, ячейки которой заполняет сегнетоэлектрик BST (рис. 1 б). Это явление особенно выражено при повышенных концентрациях магнийсодержащих добавок.

В третьей главе приведены результаты исследований электрофизических свойств сегнетоэлектрической керамики на основе титаната бария-стронция с магнийсодержащими добавками на высоких частотах, температурные зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, вольтамперные характеристики. Измеряемые образцы

представляли собой плоскопараллельные конденсаторные структуры толщиной 0.1 – 0.7 мм.

На рис. 2 представлены вольт-фарадные и статические вольт-амперные характеристики образцов №12 (BST-1+20 вес. % комплексной магнийсодержащей добавки) и №19 (BST-3+15 вес. % комплексной магнийсодержащей добавки). На ВАХ образцов керамики BST(M) в общем случае можно выде-

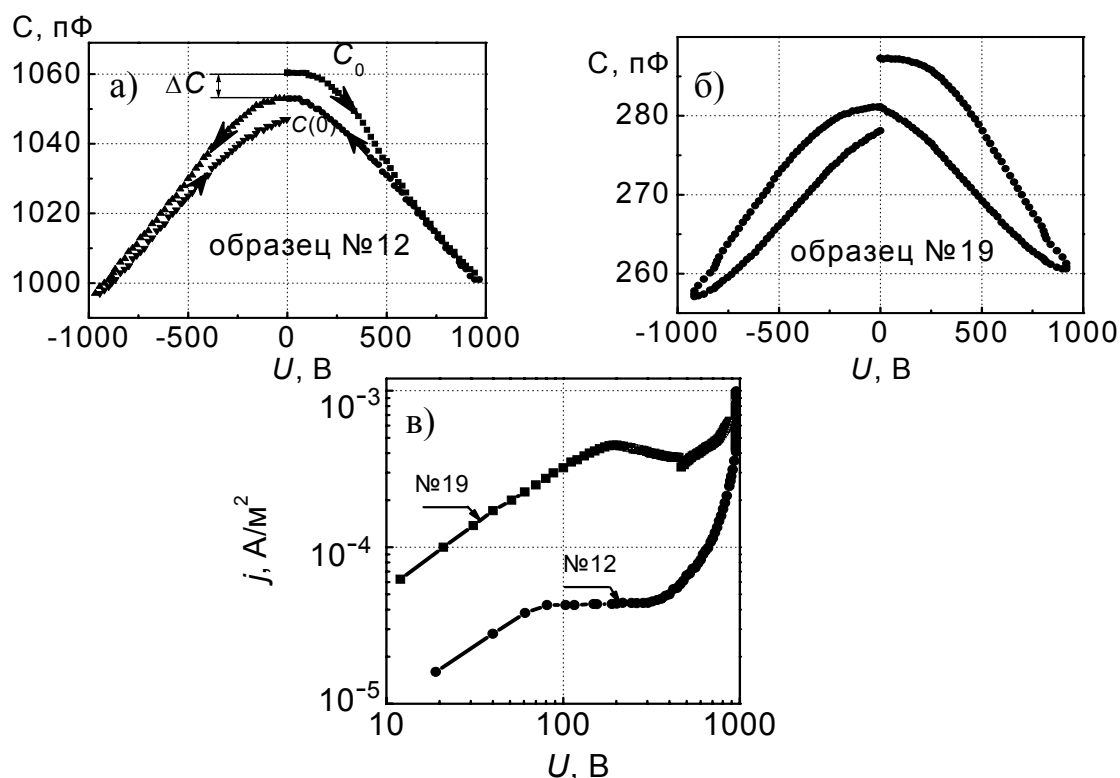


Рис. 2. Вольт-фарадные (а, б) и статические вольт-амперные (в) характеристики образцов №12 (BST-1+20 вес. % комплексной магнийсодержащей добавки) и №19 (BST-3+15 вес. % комплексной магнийсодержащей добавки)

лить четыре участка (рис. 2): 1) участок омической проводимости; 2) горизонтальный участок ВАХ, либо участок отрицательного дифференциального сопротивления; 3) участок экспоненциального возрастания тока; 4) и участок вертикального роста тока. Значения сопротивления, вычисленные по участкам, соответствующим закону Ома, составляли $R = (4 \cdot 10^{10} - 10^{11})$ Ом. Бóльшим омическим сопротивлением обладают образцы с большей концентрацией магнийсодержащей добавки. Высокое сопротивление, характерное для горизонтальных участков на ВАХ керамики BST(M) определяется межфазными границами.

Второй участок зависимостей тока от напряжения $I(U)$ с отрицательным дифференциальным сопротивлением соответствует механизму туннелирования Нордхейма-Фаулера:

$$j \sim E^2 \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*}(q\varphi)^{3/2}}{3q\hbar E}\right).$$

Участок экспоненциального возрастания силы тока соответствует эмиссии Френкеля-Пула $j \sim E \exp\left(-\frac{q(\varphi - \sqrt{qE/\pi\epsilon})}{kT}\right)$. Четвертый участок резкого

возрастания силы тока в диэлектриках связывают с режимом предельного заполнения глубоких ловушек (ПЗЛ). Почти вертикальный рост тока, сопровождающий заполнение отдельной группы моноэнергетических уровней прилипания, является одним из наиболее ярких проявлений теории инжекционных токов в диэлектриках. Участок вертикального роста тока наблюдался не на всех образцах BST(M).

Экспериментально установлено (рис. 2), что сегнетоэлектрическая керамика на основе твердого раствора титаната бария-стронция (относительное содержание бария 45 – 60 %) с магнийсодержащими добавками (10 – 60 вес. %) – BST(M), имеющая на статических ВАХ при комнатной температуре отрицательное дифференциальное сопротивление (ОДС) отличается высоким значением гистерезиса вольт-фарадной характеристики в параэлектрической фазе (2 – 5 %); если значение $dI/dU \sim 0$ (горизонтальный участок на ВАХ), то гистерезис, как правило, минимален и составляет доли процента.

На рис. 3 представлены результаты исследования влияния добавок MgO и Mg₂TiO₄ на эффективную диэлектрическую проницаемость и коэффициент управляемости сегнетоэлектрической керамики BST.

При введении в сегнетокерамику Ba_{0.55}Sr_{0.45}TiO₃ добавки в виде MgO (3 – 80 вес. %) диэлектрическая проницаемость плавно уменьшается с 900 до 100 (рис. 3а). Коэффициент управляемости при этом сохраняется на уровне 9 – 11% (рис. 3б).

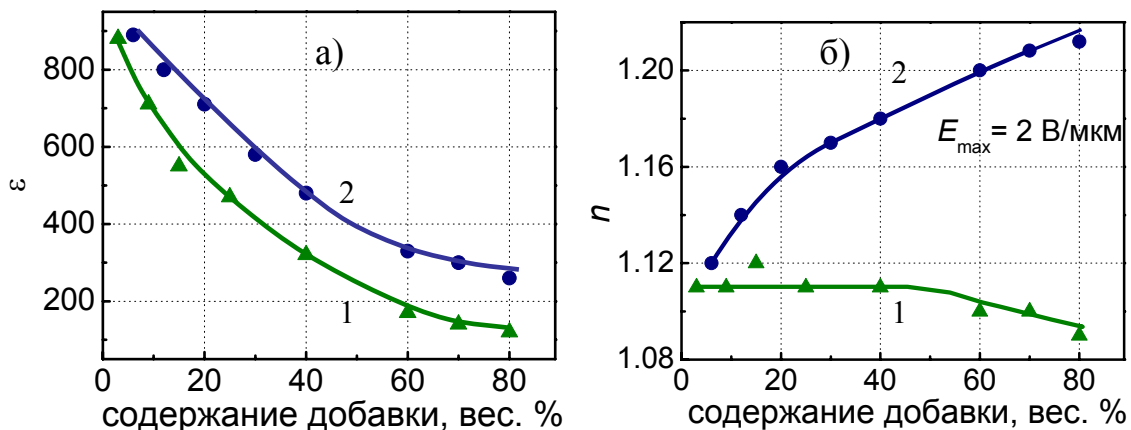


Рис. 3. Зависимости эффективной диэлектрической проницаемости ϵ (а) и коэффициента управляемости n (б) от концентрации добавки MgO (1) и Mg₂TiO₄ (2) для сегнетокерамики Ba_{0.55}Sr_{0.45}TiO₃.

Если в таком же количестве в сегнетокерамику вводится добавка титаната магния (Mg_2TiO_4), диэлектрическая проницаемость уменьшается от 900 до 200, коэффициент управляемости увеличивается с 12 до 20 %. Этот научный факт отмечается – при введении в соединение добавки с линейными диэлектрическими характеристиками и низкой диэлектрической проницаемостью коэффициент управляемости увеличивается.

Существуют предположения, объясняющие возможность роста коэффициента управляемости при введении в сегнетоэлектрик линейной добавки¹. Эти предположения основываются на том, что в BST(M) керамике формируется каркас из кристаллитов ортотитаната магния цилиндрической формы. Образующаяся сетка парциальных емкостей основной перовскитной фазы становится более развитой при увеличении содержания добавки. Дополнительные межгранульные емкости и их включение в схему протекания ВЧ токов приводят к понижению общей емкости конденсаторной структуры под действием внешнего поля. Однако, вследствие уменьшения размера зерен основной фазы с высокой ϵ напряженность поля внутри увеличивается, что приводит к повышению управляемости.

Сильное влияние на характеристики керамики BST(M) оказывает технология изготовления и способ введения добавки магния. Ортотитанат магния Mg_2TiO_4 и ранее применялся в качестве добавки в керамику BST, но при этом наблюдалось снижение коэффициента управляемости сегнетокерамики.

В работе проводились измерения коэффициента управляемости от напряженности поля сегнетокерамики для разных толщин, результаты которых представлены на рис. 4. Коэффициент управляемости имеет линейную зависимость от напряженности поля при значениях напряженности от 2 до 9

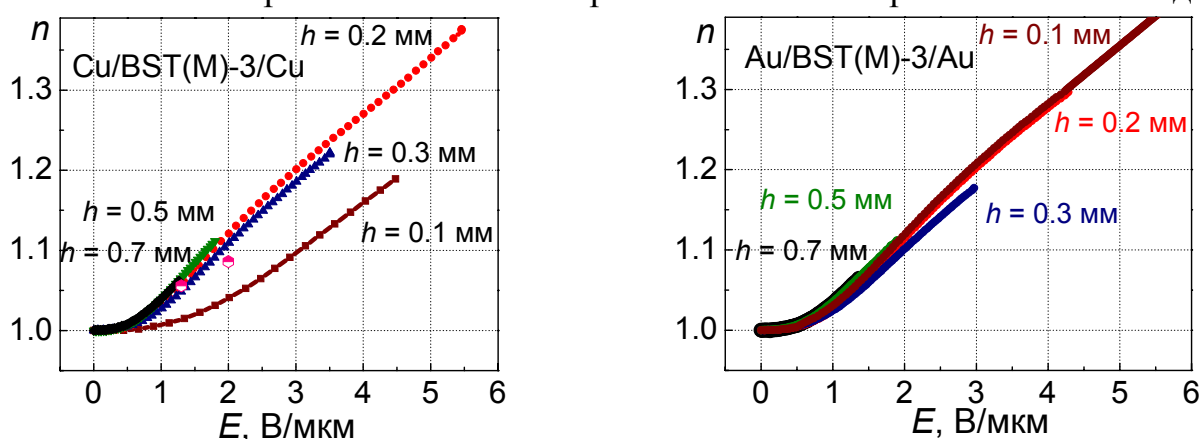


Рис. 4. Зависимости коэффициента управляемости от напряженности поля для МДМ структур на основе керамики BST(M)-3 разной толщины с медными и золотыми электродами

¹ Sherman, V. O. Ferroelectric-dielectric tunable composites / V. O. Sherman, A. K. Tagantsev, N. Setter // J. Appl. Phys. – 2006. – V. 99. – P. 0174104-1–0174104-10.

В/мкм. Для образцов толщиной 0.1 мм с медными электродами управляемость снижается, что является результатом влияния приэлектродных слоев.

Для оценки влияния приэлектродных слоев на свойства структур Me/BSM/Me проведены измерения ВАХ и ВФХ образцов различной толщины. Получено значение удельной электропроводности керамики BST(M)-3 $\sigma = (3.2 \pm 0.4) \cdot 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Сопротивление единицы площади контактов для структур Cu/BST(M)-3/Cu составило $10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$. Расчетное значение толщины поверхностного слоя в предположении его однородности – 20 мкм. Для структур Au/BST(M)-3/Au контактное сопротивление пренебрежимо мало.

Четвертая глава посвящена СВЧ измерениям. Описаны разработанные методики определения параметров сегнетоэлектрической керамики в СВЧ диапазоне (9 – 12 и 25 – 35 ГГц). В основу методик измерений был положен резонансный метод, обеспечивающий наибольшую точность в СВЧ диапазоне. Сводные данные по результатам измерений BST(M) керамики различного состава с 25 вес. % комплексной магнийсодержащей добавки приведены в таблице 2. Состав BST(M)-3 удовлетворяет требованиям к материалу, предназначенному для применения в ускорительной технике.

Таблица 2.

Параметры сегнетоэлектрической керамики BST(M)

Состав BST(M)	BaTiO ₃ /SrTiO ₃	ϵ	n (при $E=2\text{В/мкм}$)	n (при $E=4\text{В/мкм}$)	$\text{tg}\delta$ ($f=10\text{ГГц}$)
BST(M)-1	45/55	420	1.04	1.06	0.003
BST(M)-2	50/50	530	1.08	1.11	0.004
BST(M)-3	55/45	550	1.13	1.27	0.005
BST(M)-4	60/40	600	1.16	1.38	0.008

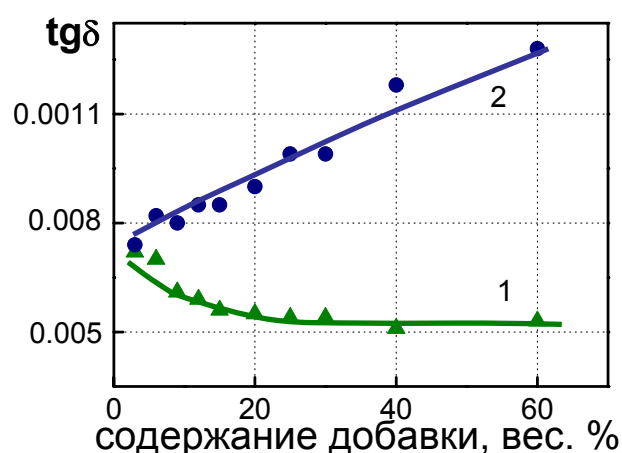


Рис. 5. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от концентрации добавки MgO (1) и Mg_2TiO_4 (2) при $f=10 \text{ ГГц}$ (сегнетокерамика $\text{Ba}_{0.55}\text{Sr}_{0.45}\text{TiO}_3$).

Добавка MgO приводит к уменьшению потерь (рис. 5). При этом коэффициент управляемости уменьшается или остается постоянным (рис. 3). При введении добавки Mg_2TiO_4 потери увеличивается, коэффициент управляемости существенно растет. Введение комплексной магнийсодержащей добавки, включающую как MgO, так Mg_2TiO_4 в регули-

руемых пропорциях, позволяет управлять параметрами сегнетоэлектрика (ϵ , n , $\text{tg}\delta$) в широких пределах. Были разработаны управляемые резонаторы на основе частично заполненных резонаторов для диапазонов 9 – 12 и 25 – 35 ГГц.

Применялись два типа резонаторов. В одном из них (рис. 6 а,б) пластина сегнетокерамики располагалась на внешней поверхности резонатора (по широкой стенке), на которой формировалась встречно-штыревая топология из пленки меди (толщиной $\sim 2 - 3$ мкм). Встречно-штыревая система электродов позволяет достаточно легко создавать электрическое поле в сегнетоэлектрике, но это поле не будет однородным по всему объему сегнетоэлектрика, что приводит к снижению коэффициента управляемости.

В структуре с внутренним «электродинамически прозрачным» электродом (рис. 6 в) смещающее поле создается перпендикулярно плоскости сегнетоэлектрика с помощью двух, параллельно расположенных электродов, что позволяет добиться однородности смещающего поля по всему объему сегнетоэлектрика. Верхний электрод обычно заземляется, в то время как на

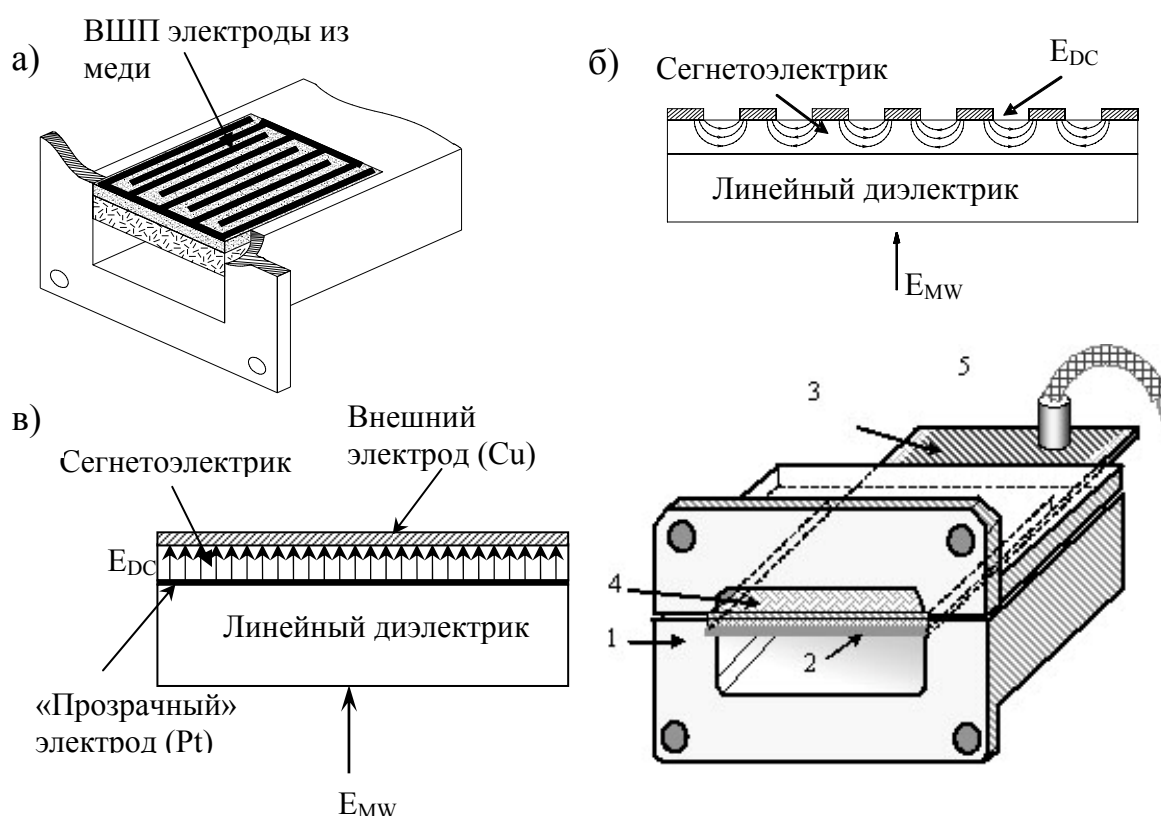


Рис. 6. Конструкции частично-заполненного управляемого резонатора с внешними встречно-штыревыми электродами (а, б); с внутренним «электродинамически прозрачным» электродом (в, г); 1 – металлический корпус резонатора, 2 – пластина линейной керамики, покрытая «прозрачным» электродом (3); 4 – внешний медный электрод; 5 – внешний электрический вывод

нижний электрод подается смещающее напряжение.

Толщина внутреннего («электродинамически прозрачного») электрода должна быть значительно меньше скин-слоя. При уменьшении толщины возрастает время переключения. Проведенный электродинамический анализ показал, что компромисс между временем переключения и электродинамическими потерями достигается при толщине внутреннего «электродинамически прозрачного» электрода 50 нм. Это подтверждено экспериментально.

На рис. 7 показаны зависимости коэффициента отражения S_{11} от частоты при напряженностях электрического поля $E = 0, 1.5$ и 2 В/мкм для прямоугольного частично-заполненного управляемого резонатора с «электродинамически прозрачным» электродом. Сдвиг резонансной частоты составил 85 МГц при приложении поля 2 В/мкм. Для резонатора с перпендикулярной ориентацией векторов управляющего электрического поля относительно электрической компоненты СВЧ поля были получены значения управляемости n на уровне 1.13 – 1.16 в диапазоне напряженностей полей 4 – 5 В/мкм, тогда как для резонатора с параллельной ориентацией – значение управляемости n составило 1.25 – 1.28 В/мкм.

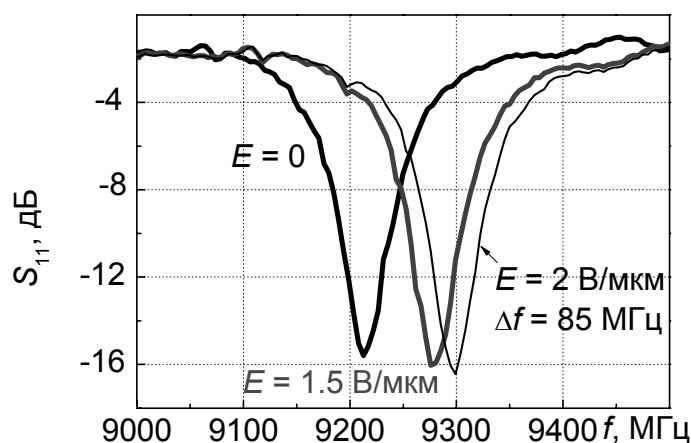


Рис. 7. Зависимости коэффициента отражения S_{11} от частоты при $E = 0, 1.5, 2$ В/мкм для управляемого резонатора с внутренним «электродинамически прозрачным» электродом (на основе сегнетокерамики BST(M)-3).

сильноточного электронного сгустка к сгустку высоких энергий, но малого заряда. Сильноточные электронные сгустки генерируют в ускорительной структуре электромагнитные поля с амплитудой продольной компоненты электрического поля до 100 МВ/м, которая используется для ускорения следующего слаботочного сгустка.

Возможность оперативной подстройки частоты волновода (а тем самым фазовой скорости ускоряющей волны) выгодно отличает структуры с

Работы по применению сегнетокерамики в ускорительной технике проводились совместно с ОАО «Гириконд», лабораторией компании TechLab Concept и Йельским университетом (США). Одно из направлений связано с управляемыми ускорительными структурами с диэлектрическим заполнением, в которых реализуется метод кильватерного ускорения заряженных частиц. Кильватерное ускорение предполагает систему передачи энергии от

сегнетокерамическим заполнением и открывает широкие возможности их использования в системах, требующих жесткой синхронизации «волна-пучок».

Изменение диэлектрической проницаемости волноведущей системы позволяет в реальном времени регулировать фазовые соотношения волна-сгусток и обеспечить оптимальные энергетические условия для ускорения. В рамках данной работы были исследованы цилиндрические волноводы с двойной стенкой из высокодобротного диэлектрика и BST(M) сегнетоэлектрической керамики (на внешней поверхности). Испытания структур на частоте 11.42 ГГц показали полную пригодность разработанного материала и технологии изготовления двойных диэлектрических трубок для использования в ускорительных структурах с диэлектрическим заполнением. Была показана возможность управления резонансной частотой в прототипе двухслойной диэлектрической ускорительной структуры (компания TechLab Concept, USA)

Другая возможность применения сегнетоэлектрической керамики – это фазовращатели и переключатели высокой мощности, которые обеспечивают независимое согласование каждой секции ускорительной структуры с СВЧ источником в линейных ускорителях. Согласующее устройство (тюнер) может быть сконструировано как комбинация двух фазовращателей с полным отражением, и направленного ответвителя. В качестве активного элемента тюнера используются кольца сегнетоэлектрической керамики диаметром 102 мм, высотой 20 мм и толщиной стенки 2 – 3 мм. Такие кольца были изготовлены из керамики типа BST(M)-3, нанесены золотые электроды и проведены испытания, показавшие их удовлетворительные характеристики в согласующих устройствах линейных коллайдеров (Аргонская лаборатория, США, TechLab Concept).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показано, что введение линейной диэлектрической добавки Mg_2TiO_4 в состав керамики BST приводит к снижению величины эффективной диэлектрической проницаемости и возрастанию коэффициента управляемости композитной керамики.
2. На статических вольтамперных характеристиках плоскопараллельных конденсаторных структур на основе керамики BST(M) впервые обнаружены участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС), которые можно объяснить туннелированием носителей (механизм Нордхейма-Фаулера).
3. Определена удельная электропроводность наиболее пригодной для применений в ускорительной технике сегнетокерамики $Ba_{0.55}Sr_{0.45}TiO_3 +$

25 вес. % комплексной магнийсодержащей добавки): $\sigma = (3.2 \pm 0.4) \cdot 10^{-10}$ Ом⁻¹ м⁻¹ при T=300 К.

4. Разработана конструкция СВЧ резонатора с частичным заполнением диэлектриком, в которой применяются «электродинамически прозрачные» внутренние электроды. Металлические пленки платины толщиной 50 нм являются «электродинамически прозрачными» для СВЧ поля, но вместе с этим они служат электродами для управляющего электрического поля.
5. Выбран тип сегнетоэлектрической керамики BST(M)-3 (Ba_{0.55}Sr_{0.45}TiO₃ + 25 вес % комплексной магнийсодержащей добавки), который удовлетворяет требованиям ускорительной техники.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Дедык, А. И. Вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики керамических материалов на основе титаната бария-стронция / А. И. Дедык, А. Д. Канарейкин, Е. А. Ненашева, Ю. В. Павлова, С. Ф. Карманенко // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76. – Вып. 9. – С. 59–64.
2. Dedyk, A. I. Tunability and leakage currents of (Ba,Sr)TiO₃ ferroelectric ceramics with various additives (Управляемость и токи утечки сегнетоэлектрической керамики (Ba,Sr)TiO₃) с различными добавками / A. I. Dedyk, E. A. Nenasheva, A. D. Kanareykin, Ju. V. Pavlova, O. V. Sinjukova, S. F. Karmanenko // Journal of Electroceramics. – 2006. – V. 17. – N 2-4. – P. 433–437.
3. Kang, Chong-Yun. The investigation of dielectric characteristics of (Ba,Sr)TiO₃ thin films in millimeter wavelength range (Исследование диэлектрических характеристик тонких пленок (Ba,Sr)TiO₃ в миллиметровом диапазоне длин волн) / Chong-Yun Kang, S.F. Karmanenko, I.G. Mironenko, A.A. Semenov, A.I. Dedyk, A.A. Ivanov, P.Ju. Beljavski, U.V. Pavlova // Integrated ferroelectrics. – 2006. – Vol. 86. – P. 131–140.

В других изданиях:

4. Павлова, Ю. В. Влияние приэлектродных слоев на свойства структур металл/сегнетоэлектрик/металл на основе керамики титаната бария-стронция / Ю. В. Павлова, Е. А. Ненашева, С. Ф. Карманенко, А. И. Дедык // Материалы IV Международной научно-технической конференции, INTERMATIC-2006, МИРЭА, Москва, 24 - 28 октября 2006 г. – С. 132–134.

5. Ненашева, Е. А., Электрофизические свойства нелинейной керамики BST для применений в ускорительной технике / Е. А. Ненашева, А. Д. Канарейкин, А. И. Дедык, Ю. В. Павлова // Материалы XI Международной конференции Физика диэлектриков (Диэлектрики – 2008), Санкт-Петербург, 3 – 7 июня 2008 г. – Т. 1. – С. 83–84.
6. Канарейкин, А. Д. Электрически управляемые компоненты на основе керамики BST-Mg для применений в ускорительной технике / А. Д. Канарейкин, Е. А. Ненашева, А. И. Дедык, Ю. В. Павлова // Материалы XVII Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков, Санкт-Петербург, 9 – 14 июня 2008 г. – С. 227–228.
7. Ненашева, Е. А. Диэлектрические свойства и электропроводность композитной керамики BST-Mg / Е. А. Ненашева, А. И. Дедык, А. Д. Канарейкин, Ю. В. Павлова, С. Ф. Карманенко // Материалы XVII Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков, Санкт-Петербург, 9 – 14 июня 2008 г. – С. 301.
8. Никитин, А. А. «Электродинамически-прозрачный» электрод в управляемых слоистых сегнетоэлектрических структурах / А. А. Никитин, Ю. В. Павлова, А. А. Семенов, С. Ф. Карманенко // Материалы XVII Всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков, Санкт-Петербург, 9 – 14 июня 2008 г. – С. 228–229.