

Закключение. В процессе исследований решен комплекс задач, необходимых для изготовления абразивного инструмента с высокими режущими свойствами, связанный с использованием нового порообразующего наполнителя, карбида кремния и легкоплавкой керамической связки.

Изучено влияние состава абразивной массы на прочностные и режущие свойства шлифовальных кругов на легкоплавкой керамической связке из смеси электрокорунда и карбида кремния при обработке легированных сталей. Установлено, что при температуре обжига 1050 °С карбид кремния окисляется незначительно и абразивный инструмент характеризуется высокой режущей способностью при содержании в шихте до 10 масс.% выгорающего органического порообразователя.

Литература

1. Абразивный инструмент: Пат. РФ 2215643 / В. М. Шумячер, В. А. Назаренко, С. А. Крюков, И. В. Дуличенко. – Оpubл. 10.11.2003, Бюл. № 31.
2. Крюков С. А. Технологические принципы проектирования и изготовления шлифовальных кругов путем совершенствования их структурно-механических характеристик: дис. док. техн. наук: 05.02.07 / С. А. Крюков. – Волжский, 2018. – 352 с.

**А. А. Маевский¹, К. Д. Данильченко¹, А. В. Семченко¹, В. В. Сидский¹,
Г. В. Чучева², Д. А. Киселёв², А. А. Бойко³, Л. В. Судник⁴, Н. В. Гапоненко⁵**

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,
г. Гомель, Республика Беларусь,

²Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова
Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация,

³Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого,
г. Гомель, Республика Беларусь,

⁴Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа,
г. Минск, Республика Беларусь,

⁵Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ СОСТАВОВ BST, SBTN, SBT

Введение. Тонкие пленки титаната бария-стронция ((Ba,Sr)TiO₃) (BST) широко применяются в различных областях, включая динамическую оперативную память (DRAM), благодаря своим уникальным диэлектрическим свойствам.

Кроме BST, для приложений в энергонезависимой памяти (NVRAM) существуют альтернативные материалы, такие как слоистые висмутовые оксиды с перовскитоподобной структурой, например, SrBi₂Ta₂O₉ (SBT). Эти материалы демонстрируют отличную устойчивость к усталости, показывая менее 5 % изменений в остаточной поляризации даже после 10¹² циклов переключения, что делает их перспективными кандидатами для использования в FRAM и NVRAM [1–2].

Установление возможности регулирования сегнетоэлектрических свойств плёнок на основе SBT путём изменения стехиометрического соотношения компонентов, выбора материала подложки и настройки параметров синтеза является актуальной научной задачей.

В случае золь-гель метода это включает выбор типа исходных реактивов, особенности гидролиза и температурные режимы обработки [3]. Актуальность исследования также обусловлена перспективами использования этих наноструктур для развития элементной базы современных сенсорно-информационных систем. Они способствуют миниатюризации и улучшению характеристик ячеек энергонезависимой памяти, что открывает новые возможности для повышения эффективности и функциональности электронных устройств.

Целью работы является установление зависимостей свойств тонких пленок и конденсаторных структур на их основе, синтезированных золь-гель методом

1. Измерение вольт-амперных характеристик тонкопленочных сегнетоэлектриков. Приготовление образцов BST осуществлялось на основе ацетата стронция. Для этого в ёмкость добавлялось расчетное количество гидроксида стронция ($\text{Sr}(\text{OH})_2$), после чего добавлялась уксусная кислота для получения ацетата стронция ($\text{Sr}(\text{CH}_3\text{COO})_2$). Раствор подогревали, перемешивали, и при наличии осадка добавляли дополнительное количество уксусной кислоты. После выпаривания объема раствора в два раза, его охлаждали для кристаллизации. Затем добавляли 2-метоксиэтанол и изопропиловый спирт, смешивали и оставляли для гидролиза. Аналогично, для синтеза ацетата бария ($\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) использовали гидроксид бария ($\text{Ba}(\text{OH})_2$), подогревали и перемешивали раствор с уксусной кислотой, после чего проводили выпаривание и добавляли необходимые реактивы для завершения гидролиза. Далее смешивали растворы ацетатов стронция и бария с изопропоксидом титана, оставляя их для гидролиза и затем для окончательного формирования золя. Пленки наносили на подложки методом центрифугирования и подвергали отжигу при 800°C в течение одного часа.

Приготовление образцов SBT и SBTN включало отдельный гидролиз хлоридов стронция (SrCl_2), висмута (BiCl_3), тантала (TaCl_5) и ниобия (NbCl_5). Каждый компонент растворяли в толуоле, что позволяло избежать проблем, связанных с разными скоростями гидролиза, и обрабатывали ультразвуком для достижения однородности растворов. После этого растворы очищали центрифугированием и фильтрованием, а затем оставляли для созревания при комнатной температуре. Для нанесения пленок использовали метод центрифугирования на подложки из монокристаллического кремния с платиновым подслоем. Начальная скорость центрифугирования составляла 500 об/мин, которую затем увеличивали до 700–900 об/мин для равномерного распределения золя. После нанесения пленок проводили поэтапную термообработку при температурах 100 – 150°C , 200 – 250°C и 300 – 350°C для удаления растворителей и улучшения поликонденсации, а финальный отжиг осуществляли на воздухе при 650°C в течение 30–120 минут, после чего при 730°C в течение 30–60 минут для формирования перовскитной структуры. Таким образом, с использованием золь-гель метода получили высококачественные пленки BST, SBT и SBTN с контролируемой толщиной и однородностью, что обеспечило оптимальные условия для исследования их вольт-амперных характеристик.

На рисунке 1 представлена вольт-амперная характеристика (ВАХ) трех типов сегнетоэлектрических пленок: BST (титанат бария-стронция), SBT (танталат висмута-стронция) и SBTN (танталат-ниобат висмута-стронция с добавлением ниобия).

График демонстрирует зависимость плотности тока (I) от приложенного напряжения (U) в диапазоне от 0 до 6 В для всех исследуемых образцов. Кривая ВАХ для пленки BST, обозначенная черными квадратами, свидетельствует о наибольшей проводимости пленки BST среди всех исследуемых материалов. С увеличением приложенного напряжения плотность тока растет почти линейно в диапазоне от 0 до 6 В. Это указывает на относительно высокую проводимость и низкое сопротивление данного материала, что может быть связано с его кристаллической структурой и составом. Высокая проводимость может быть обусловлена эффективным движением зарядов в структуре материала и меньшим количеством ловушек для носителей заряда.

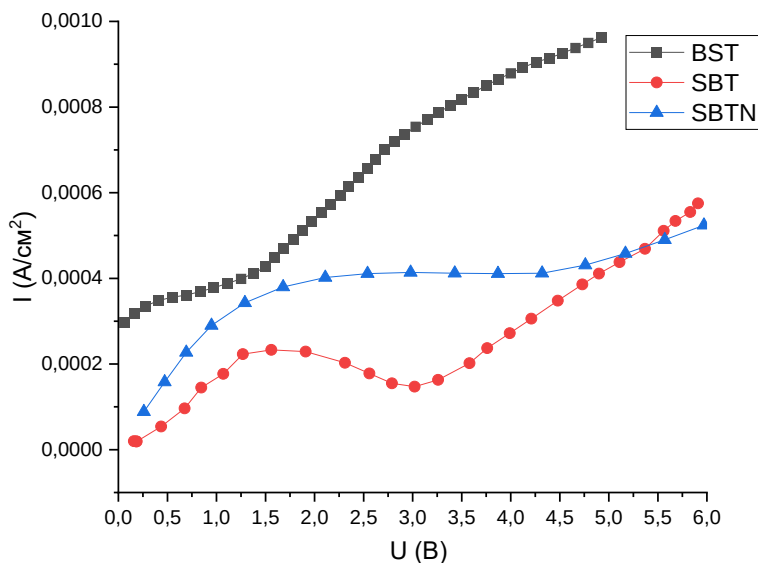


Рисунок 1 – Вольт-амперная характеристика BST (титанат бария-стронция), SBT (танталат висмута-стронция) и SBTN (танталат-ниобат висмута-стронция)

Кривая ВАХ для пленки SBT, обозначенная красными кругами, демонстрирует менее резкий рост плотности тока по сравнению с BST. В начальном диапазоне напряжений (от 0 до 2 В) наблюдается относительно пологий рост, после чего с увеличением напряжения до 6 В кривая становится более крутой. Это указывает на наличие барьера для проводимости, который преодолевается при увеличении напряжения. Вероятно, пленка SBT имеет более сложную структуру с большим количеством ловушек для носителей заряда, что объясняет ее более низкую проводимость по сравнению с BST.

Кривая ВАХ для пленки SBTN, обозначенная синими треугольниками, имеет схожую форму с кривой SBT, но с несколько более высокой проводимостью. В начальном диапазоне напряжений (от 0 до 2 В) рост плотности тока также незначительный, однако, после 2 В, наблюдается более крутой рост плотности тока, чем у SBT. Это может свидетельствовать о том, что добавление ниобия в состав SBTN приводит к улучшению проводимости по сравнению с SBT, возможно за счет создания дополнительных путей для движения зарядов или уменьшения числа ловушек для носителей заряда.

Сравнивая вольт-амперные характеристики (ВАХ) всех трех материалов, можно сделать вывод, что пленка BST обладает наибольшей проводимостью. Пленки SBT и SBTN, несмотря на более низкую проводимость, могут быть более подходящими для приложений, где важна высокая диэлектрическая проницаемость или другие специфические свойства сегнетоэлектриков, поскольку увеличение проводимости в сегнетоэлектрических пленках может ухудшать их свойства и ограничивать применение в FRAM-памяти.

Заключение. В ходе проведенных исследований золь-гель методом были синтезированы сегнетоэлектрические пленки титаната бария-стронция (BST), танталата висмута-стронция (SBT) и танталата-ниобата висмута-стронция (SBTN) с контролируемым составом и толщиной. Измерены их вольт-амперные и другие характеристики, которые продемонстрировали различия в проводимости и электрическом поведении пленок: пленка BST имеет наибольшую проводимость, тогда как пленки SBT и SBTN, обладают свойствами, полезными для сегнетоэлектрических приложений, требующих высокой диэлектрической проницаемости. Добавление ниобия в состав SBTN увеличило его проводимость по сравнению с SBT, что указывает на возможность целенаправленной модификации электрических свойств сегнетоэлектрических пленок путем изменения их состава.

Увеличение доли Nb приводит к возрастанию ёмкостей структур, росту значения коэффициента переключения, при этом для всех структур коэффициент переключения крайне низок. Образцы являются достаточно термостабильными, изменение ёмкости при нагревании составило не более 2 пФ. C_{max} в зависимости от частоты изменялась не более чем на 5 пФ, значения $tg\delta$ не превышает 0,055.

Работа выполнена при частичной поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № T23РНФ-147) и Российского научного фонда (проект № 23-49-10014, <https://rscf.ru/project/23-49-10014/>).

Литература

1. Nanoscale Piezoelectric Properties and Phase Separation in Pure and La-Doped BiFeO₃ Films Prepared by Sol-Gel Method / A. V. Semchenko [et al.] // Materials. – 2021. – Т. 14, №. 7. – С. 1694.
2. Нанокompозитные материалы, содержащие комплексы редкоземельных элементов, для применения в солнечной энергетике / В. Е. Гайшун [и др.] // Проблемы физики математики и техники. – 2023 –. № 4(57). – С. 48–52.
3. Synthesis and Study of High-Performance Ferroelectric Materials for Advanced Non-Volatile Memory Devices / S. Khakhomov [et al.] // 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT), Astrakhan, Russian Federation, 2023. – P. 1–4.

**В. В. Малютина-Бронская¹, А. Д. Замковец², Л. В. Баран²,
А. С. Кузьмицкая¹, И. Ю. Фролов¹**

¹Государственное научно-производственное объединение
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,
г. Минск, Республика Беларусь,

²Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь,

³Белорусский государственный университет,
г. Минск, Республика Беларусь

ОПТИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАНУЛИРОВАННЫХ НАНОСТРУКТУР СЕРЕБРА

Введение. Развитие современной науки и техники сопровождается высоким спросом на функциональные материалы нового поколения [1]. Среди таких материалов важное место занимают плазмонные наноструктуры, характеризующиеся наличием полос поверхностного плазмонного резонанса поглощения (ППРП) в видимом и ближнем ИК диапазонах [2]. Полосы ППРП чрезвычайно чувствительны к форме и размеру наночастиц, а также к диэлектрическим свойствам окружающей среды, что находит свое применение при разработке новых типов сенсоров [3, 4]. Способность плазмонных наноструктур значительно усиливать локальные поля вблизи поверхности металлической наночастицы используется при создании субстратов для ГКР, оптимизации характеристик светодиодов, фотоприемников и фотовольтаических ячеек [5–7]. Несмотря на имеющееся большое количество публикаций по плазмонике, вопросы установления взаимосвязи морфологии плазмонных структур с их оптическими и электрофизическими свойствами изучены пока недостаточно. Вместе с тем, такие исследования могут быть полезными при разработке новых функциональных оптоэлектронных элементов, в которых эффекты ближнего поля используются для управления фотоэлектрическими и оптическими характеристиками.