

13 Наноразмерные пленки титаната бария-стронция для устройств микроэлектроники

© В.М. Мухортов, С.В. Бирюков, Ю.И. Головки, С.И. Масычев

Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия
E-mail: mukhortov1944@mail.ru

Поступило в Редакцию 8 апреля 2025 г.
В окончательной редакции 18 мая 2025 г.
Принято к публикации 19 мая 2025 г.

Исследованы температурная зависимость диэлектрической проницаемости и токи утечки наноразмерных тонких пленок титаната бария-стронция. Исследования проводились при подаче напряжения смещения, приложенного к зазору между штырями встречно-штыревого конденсатора на основе указанной пленки. Установлена высокая температурная стабильность наноразмерных тонких пленок титаната бария-стронция при подаче напряжения смещения. Показано, что токи утечки нелинейные и несимметричные относительно прикладываемого напряжения смещения, а их величина позволяет использовать исследованные пленки при реализации устройств микроэлектроники.

Ключевые слова: наноразмерные пленки, сегнетоэлектричество, планарный конденсатор, титанат бария-стронция.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.16.60926.20338

Развитие микроэлектроники стимулирует поиск как новых активных сред, так и дальнейшее улучшение успешно применяемых технологий, используемых для формирования компонентной базы радиоэлектронных устройств и систем на их основе.

Непрерывное условие для массового недорогого производства — это интегральное исполнение устройства, что позволяет реализовать всю конструкцию в едином технологическом цикле. Именно снижение стоимости производимых устройств стимулирует применение интегральной технологии. Совершенствование элементов, образующих компонентную базу интегральных микросхем, состоит прежде всего в снижении габаритных размеров, возможности поверхностного монтажа без наличия каких-либо навесных компонентов, расширении диапазона рабочих частот, повышении термостабильности и радиационной стойкости. Перечисленные тенденции привели к появлению новых элементов компонентной базы — тонкопленочных гетероэпитаксиальных структур. Появление указанных элементов обеспечивается в том числе использованием новых активных сред. Несмотря на то что в последнее время внимание исследователей и разработчиков сфокусировано на таких новых активных средах, как, например, графен и жидкие кристаллы [1,2], исследования возможности применения сегнетоэлектрических материалов в микроэлектронике все так же актуальны [3]. В том числе наноразмерные сегнетоэлектрические пленки по-прежнему представляют научный интерес, поскольку обладают непревзойденными до сих пор характеристиками [4]. Так, жидкие кристаллы не могут обеспечить сопоставимое с тонкими сегнетоэлектрическими пленками высокое быстродействие СВЧ-устройств, в которых они применяются в качестве активной среды, что обусловлено длительно-

стью времени переориентации длинных молекул жидкокристаллического диэлектрика под воздействием электрического поля [5]. К тому же ограничением является эксплуатационная температура устройств с жидкими кристаллами (от -25 до $+55$ °C) [5]. А графен в силу сложности технологического цикла (включая, например, термический отжиг для удаления примесей с поверхности) [6] при формировании образцов для использования их в СВЧ-устройствах уступает наноразмерным сегнетоэлектрическим (СЭ) пленкам в случае массового производства интегральных схем. Для практических применений нужны тонкие сегнетоэлектрические пленки, обладающие при подаче на них напряжения смещения высокой температурной стабильностью в широком интервале температур и минимально возможными (в идеальном варианте) токами утечки. А это требует тщательного изучения проблем термостабильности и характеристик токов утечки в тонких сегнетоэлектрических пленках. Указанные вопросы подробно изучены в [7,8] для тонких сегнетоэлектрических пленок цирконата-титаната свинца, сформированных золь-гель-методом. А проблема термостабилизации многослойных емкостных структур металл/сегнетоэлектрик/металл на основе пленок титаната бария-стронция различного компонентного состава толщиной несколько сотен нанометров детально исследована в [9].

Задача настоящей работы — исследовать зависимость диэлектрической проницаемости от температуры (термостабильность) и оценить величину токов утечки наноразмерных (толщиной менее 50 nm) сегнетоэлектрических пленок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ при подаче на них напряжения смещения. Цель — оценить возможности применения указанных пленок для реализации базовых СВЧ-элементов по результатам поставленной задачи.

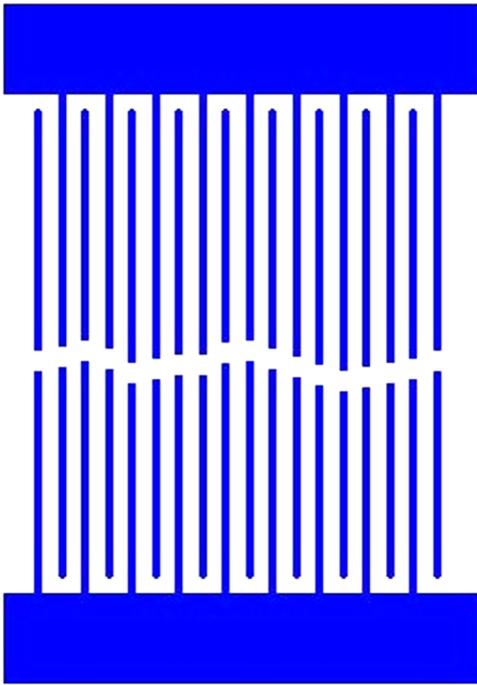


Рис. 1. Топология встречно-штыревого конденсатора.

Объектом исследования были наноразмерные сегнетоэлектрические пленки состава $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (толщиной менее 50 nm) и реализованные на их основе встречно-штыревые конденсаторы, которые являются одним из основных базовых СВЧ-элементов. Используемые в работе пленки толщиной менее 50 nm были получены на технологической установке „ПЛАЗМА-50 СЭ“ распылением стехиометрической мишени состава $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ при использовании асимметричного емкостного высокочастотного (ВЧ) разряда. Осаждение пленки на подложку оксида магния (MgO) толщиной 500 μm проводилось в атмосфере чистого кислорода при давлении 0.45 Torr и температуре 700 °C. Выбор в качестве подложки монокристаллов MgO обусловлен стремлением получить монокристаллические пленки $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ высокого структурного совершенства при эпитаксиальном росте пленок. Неизбежное наличие кристаллитов в формируемых при ВЧ-напылении наноразмерных пленках $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ в случае применения традиционно используемых микроэлектронных подложек (кремний, сапфир, поликор, ситаллы) приводит к существенному росту диэлектрических потерь. Нами использованы коммерчески доступные подложки монокристалла MgO с диэлектрической проницаемостью 9.6. Топология элементов формировалась методом взрывной фотолитографии. Для этого на поверхности пленки была сформирована фоторезистивная маска, на которую методом магнетронного напыления была нанесена алюминиевая пленка толщиной 0.3 μm . На втором этапе формируется основная топология исследуемого устройства с толщиной алюминиевой пленки 2.0 μm .

Планарные конденсаторы играют ключевую роль в разработке большинства базовых элементов, используемых в конструкциях систем и комплексов сверхвысокочастотного диапазона длин волн. Наиболее предпочтительной структурой для реализации планарной емкости является встречно-штыревой конденсатор, топология которого приведена на рис. 1.

Главное преимущество встречно-штыревого конденсатора состоит в том, что он отличается простотой изготовления и обладает большой добротностью.

Конденсаторы этого типа реализованы нами на основе пленок состава $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ наноразмерной толщины. Пленки осаждались на подложки оксида магния методом, изложенным выше. Толщина пленки 21 nm. Встречно-штыревые конденсаторы имели следующие размеры: ширина зазора 1.38 μm , ширина штыря 2 μm , длина штыря 310 μm . Структурное совершенство пленок, параметры элементарной ячейки в направлении нормали к плоскости подложки и вдоль плоскости подложки, а также эпитаксиальные соотношения между пленкой и подложкой при разных механизмах роста устанавливались рентгенографированием на дифрактометре ДРОН-4-07 (съемка симметричных и асимметричных брэгговских отражений). На рентгенограмме обзорного сканирования пленки в интервале углов 2θ от 20 до 140 deg обнаруживаются только рефлексы типа 00l пленки (рис. 2) и подложки, что свидетельствует об ориентации оси [001] пленки параллельно оси [001] подложки. Объемный образец $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ (BST) имеет тетрагональную симметрию элементарной ячейки с параметрами решетки $a = 0.398$ nm, $c = 0.399$ nm. Параметр элементарной ячейки в направлении, перпендикулярном подложке, в гетероструктуре MgO/ $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ равен $c = 0.3988$ nm. Параметр элементарной ячейки в плоскости подложки для $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ равен $a_{0.8} = 0.4001$ nm, т.е. он больше, чем параметр по нормали к подложке. Это позволяет утверждать, что на монокристаллическую пленку в гетероструктуре MgO/ $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ действуют

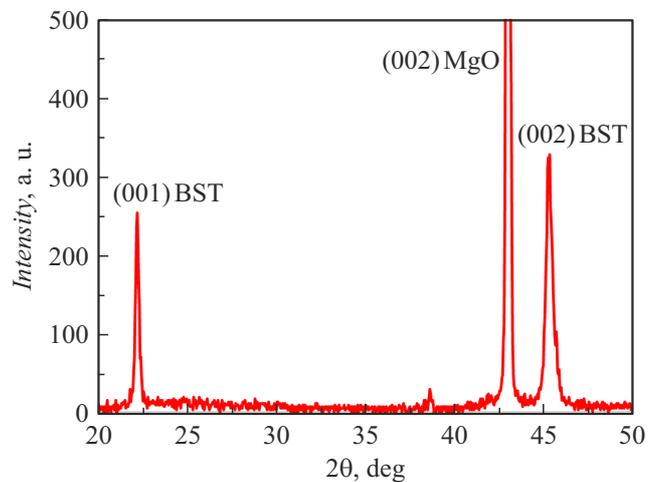


Рис. 2. Фрагмент рентгенограммы в области рефлексов 001 и 002 гетероструктуры MgO/BST.

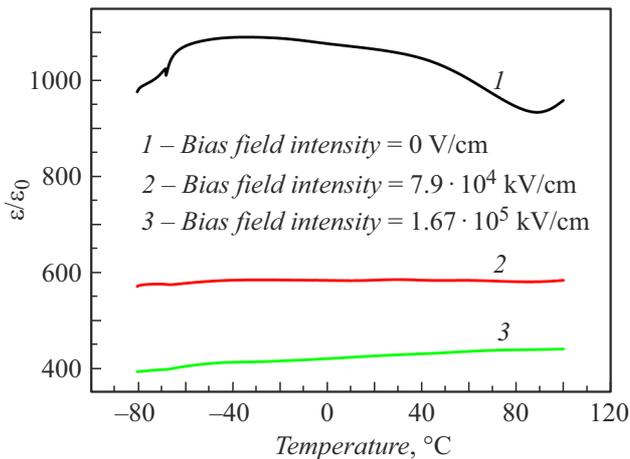


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости пленки от температуры.

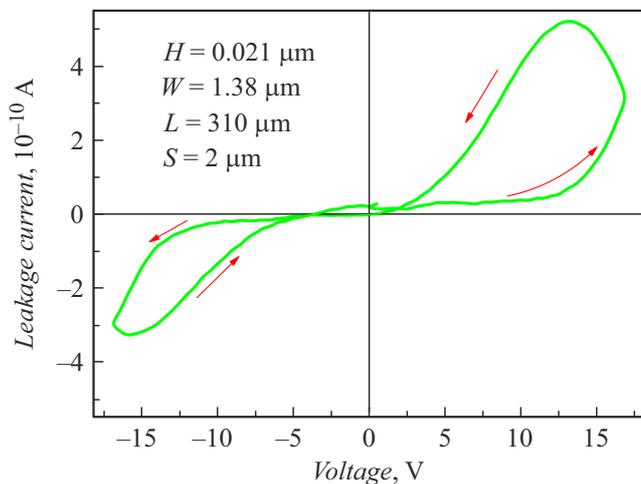


Рис. 4. Зависимость токов утечки для встречно-штыревого конденсатора.

двумерные растягивающие напряжения. Эпитаксиальный рост всех исследованных пленок доказан результатами ϕ -сканирования асимметричных рефлексов 113 и 103 пленки и рефлексов 113 подложки. Для гетероструктуры $\text{MgO}/\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ было характерно параллельное расположение осей пленки и подложки в плоскости сопряжения, т. е. $[100]\text{BST}||[100]\text{MgO}$, $[010]\text{BST}||[010]\text{MgO}$ и $[001]\text{BST}||[001]\text{MgO}$. Вертикальная и азимутальная разориентировки пленок составляли менее 0.4° .

Исследованы температурные характеристики пленок, а также зависимость плотности токов утечки от величины напряжения смещения, подаваемого на встречно-штыревой конденсатор.

Измерения вольт-фарадных характеристик проводились с помощью измерительного комплекса на базе прецизионного LCR-метра „Agilent 4980A“. Для проведения температурных измерений держатель образцов

помещался в термостат с возможностью как нагрева, так и подачи паров азота из сосуда Дьюара.

Наличие дисперсии диэлектрических характеристик тонких сегнетоэлектрических пленок может свидетельствовать об их невысоком качестве. В [10] доказано практически полное отсутствие дисперсии диэлектрической проницаемости ϵ' и незначительная (по крайней мере, в СВЧ-диапазоне) дисперсия диэлектрических потерь ϵ'' тонких пленок $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ наноразмерной толщины вплоть до частот терагерцевого диапазона. Это позволяет нам экстраполировать результаты емкостных измерений для сформированных структур, выполненные в низкочастотной области, на СВЧ-диапазон, по крайней мере до частот W-диапазона. Величина диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) для пленок с наноразмерной толщиной, согласно результатам работы [10], в СВЧ-диапазоне не превышает 0.01.

Как следует из результатов, приведенных на рис. 3, измерения зависимости диэлектрических характеристик изучаемых структур от температуры показали высокую температурную стабильность при подаче напряжения смещения для наноразмерных пленок $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$, находящихся в сегнетоэлектрической фазе.

Исчерпывающее объяснение феномена термостабильности для вариконда на основе двух тонких слоев титаната бария-стронция различного компонентного состава дано в [9]. Особенностью исследованного в [9] вариконда является использование пленок (толщина составляла 200–600 nm) $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ с переменным по толщине составом (изменение x). Такие пленки можно рассматривать как многослойную композицию с различными температурами фазового перехода каждого слоя. Безоговорочная интерпретация полученных нами экспериментальных результатов, свидетельствующих о стабильном температурном поведении диэлектрической проницаемости исследуемой гетероструктуры на основе наноразмерных пленок при подаче напряжения смещения, пока не сформулирована и очевидно требует более основательного исследования физических аспектов этого феномена. Особенность исследованной нами гетероструктуры — „размытость“ фазового перехода для пленок $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ наноразмерной толщины, причиной которого являются размерные эффекты и особенности внутренних механических напряжений. В окрестности точки фазового перехода система максимально неустойчива в отношении внешних воздействий. При „размытости“ или при удалении от точки фазового перехода устойчивость системы возрастает. Подача напряжения смещения на СЭ-пленку вызывает изменение частоты „мягкой моды“, что приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости пленки. Диэлектрическая проницаемость пленки максимальна вблизи точки фазового перехода (температуры Кюри) из сегнетоэлектрического состояния в параэлектрическое. Но именно в окрестности этой точки имеет место максимальная неустойчивость при внешних воздействиях. Таким образом, уменьшение диэлектрической проницаемости, которое имеет место

при подаче напряжения смещения, переводит систему в состояние с большей устойчивостью, в том числе в отношении изменения температуры. А это и есть термостабильность — способность сохранять неизменными физические свойства при изменении температуры.

Токи утечки встречно-штыревых конденсаторов измерялись на измерителе параметров полупроводникового прибора Keithley 4200SCS при помощи зондовой станции РМ-5 MicroTec.

Измерения токов утечки проводились при величине максимального управляющего напряжения 20 В. Токи утечки не превышают величины $5 \cdot 10^{-10}$ А, а их максимальная плотность не более $4 \cdot 10^{-5}$ А/см².

Как следует из результатов, представленных на рис. 4, токи утечки в рабочем диапазоне смещений $V = 1-20$ В нелинейные и несимметричные относительно прикладываемого напряжения смещения. Установленная экспериментально зависимость имеет „гистерезисный“ характер.

Как показали представленные в настоящей работе результаты, термостабильность и величина токов утечки наноразмерных пленок титаната бария-стронция позволяют использовать их для реализации базовых элементов СВЧ-диапазона, которые могут быть успешно использованы при разработке микроволновых устройств и систем в интегральном исполнении.

Финансирование работы

Публикация подготовлена в рамках реализации госзадания ЮНЦ РАН на 2025 г. (номер госрегистрации 125011400232-3).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L. Shao, J. Zhang, I.D. Rukhlenko, W. Zhu, *Chin. Opt. Lett.*, **20** (10), 103601 (2022). DOI: 10.3788/COL202220.103601
- [2] *Antenna and array technologies for future wireless ecosystems*, ed. by Y.J. Guo, R.W. Ziolkowski (John Wiley & Sons, Hoboken, 2022). DOI: 10.1002/9781119813910
- [3] R. Platonov, A. Altynnikov, A. Komlev, A. Sosunov, A.V. Kozyrev, *Crystals*, **11**, 585 (2021). DOI: 0.3390/cryst11060585
- [4] В.М. Мухортов, Ю.И. Головки, С.В. Бирюков, С.И. Масычев, А.В. Павленко, Д.В. Стрюков, С.П. Зинченко, А.П. Ковтуц, Г.Н. Толмачев, *Наука Юга России*, **18** (4), 33 (2022). DOI: 10.7868/S25000640220404
- [5] В.Р. Анпилогов, В.В. Денисенко, И.В. Зимин, Ю.В. Кривошеев, Ю.Н. Чекушкин, А.В. Шишлов, *Первая миля. Спутниковые телекоммуникации*, № 3 (80) 16 (2019). DOI: 10.22184/2070-8963.2019.80.3.16.27
- [6] M.R. Gasper, R.C. Toonen, N.C. Varaljay, R.R. Romanofsky, F.A. Miranda, *IEEE Trans. Nanotechnol.*, **18**, 879 (2019). DOI: 10.1109/TNANO.2019.293541
- [7] Ю.В. Подгорный, К.А. Воротилов, А.С. Сигов, *ФТТ*, **54** (5), 859 (2012). [Yu.V. Podgornyi, K.A. Vorotilov, A.S. Sigov, *Phys. Solid State*, **54** (5), 911 (2012). DOI: 10.1134/S1063783412050332].
- [8] Ю.В. Подгорный, К.А. Воротилов, А.С. Сигов, *ФТТ*, **60** (3), 431 (2018). DOI: 10.21883/ФТТ.2018.03.45539.02D [Yu.V. Podgornyi, K.A. Vorotilov, A.S. Sigov, *Phys. Solid State*, **60** (3), 433 (2018). DOI: 10.1134/S1063783418030253].
- [9] М.М. Гайдуков, А.В. Тумаркин, А.Г. Гагарин, А.Б. Козырев, *Письма в ЖТФ*, **40** (8), 37 (2014). [M.M. Gaidukov, A.V. Tumarkin, A.G. Gagarin, A.B. Kozyrev, *Tech. Phys. Lett.*, **40** (4), 337 (2014). DOI: 10.1134/S1063785014040191].
- [10] Г.А. Командин, А.А. Волков, И.Е. Спектор, К.А. Воротилов, В.М. Мухортов, *ФТТ*, **51** (7), 1280 (2009). [G.A. Komandin, A.A. Volkov, I.E. Spektor, K.A. Vorotilov, V.M. Mukhortov, *Phys. Solid State*, **51** (7), 1351 (2009). DOI: 10.1134/S1063783409070087].