

## Перспективы использования наноразмерных сегнетоэлектрических гетероструктур в космическом приборостроении

**В. М. Мухортов**, д. ф.-м. н., профессор, [mukhortov1944@mail.ru](mailto:mukhortov1944@mail.ru)  
Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

**В. К. Сысоев**, д. т. н., [SysoevVK@laspace.ru](mailto:SysoevVK@laspace.ru)  
АО «НПО Лавочкина», Химки, Российская Федерация

**С. И. Масычев**, к. ф.-м. н., [simasychev@rambler.ru](mailto:simasychev@rambler.ru)  
Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

**Аннотация.** Обозначены направления наиболее перспективных исследований для последующего масштабного применения наноразмерных сегнетоэлектрических гетероструктур в космическом приборостроении. Показана возможность создания принципиально новых электрически перестраиваемых устройств, в основу которых положен обнаруженный новый эффект, суть которого состоит в том, что в монокристаллических пленках  $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$  существует критическая толщина пленки, при преодолении которой частоты мягкой моды решеточных колебаний отличаются в два раза, температура фазового перехода смещается на 150 К, величина диэлектрической проницаемости различается в 20 раз; коэффициенты диэлектрической нелинейности отличаются в четыре раза. При создании многослойных гетероструктур с толщиной каждого слоя меньше критической возможно появление новых свойств, которые могут послужить основой для разработки электронно-перестраиваемых микроэлектронных устройств принципиально иного, нежели реализованных до сих пор, типа.

**Ключевые слова:** сегнетоэлектрические гетероструктуры, тонкие пленки, отражательные антенны

## Prospects for the Use of Nanoscale Ferroelectric Heterostructures in Space Instrumentation

**V. M. Mukhortov**, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, [mukhortov1944@mail.ru](mailto:mukhortov1944@mail.ru)  
Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation

**V. K. Sysoev**, Dr. Sci. (Engineering), [SysoevVK@laspace.ru](mailto:SysoevVK@laspace.ru)  
NPO Lavochkin, Khimki, Russian Federation

**S. I. Masychnev**, Cand. Sci. (Phys.–Math.), [simasychev@rambler.ru](mailto:simasychev@rambler.ru)  
Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation

**Abstract.** This article outlines the most promising directions for further large-scale application of nanoscale ferroelectric heterostructures in aerospace engineering. The possibility of creating fundamentally new electrically tunable devices based on a newly discovered effect is demonstrated. This effect is characterized by a critical film thickness in monocrystalline  $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$  films, beyond which the frequencies of soft mode lattice vibrations differ by a factor of two, the phase transition temperature shifts by 150 K, and the dielectric permittivity varies by a factor of 20. Additionally, the coefficients of dielectric nonlinearity differ by a factor of four. By creating multilayer heterostructures with a thickness below the critical value for each layer, it is possible to achieve new properties that can serve as the foundation for the development of fundamentally different types of electronically tunable microelectronic devices compared to those implemented so far.

**Keywords:** ferroelectric heterostructures, thin films, reflective antennas

## Введение

Усилия многих научных коллективов направлены на исследование физических аспектов и реализацию электрически перестраиваемой среды на основе тонких сегнетоэлектрических (СЭ) пленок. Это служит основой для разработки принципиально новых электронно-перестраиваемых устройств систем связи и радиолокации. Обоснованное повышенное внимание к указанной тематике обусловлено тем, что требования к системам передачи информационных потоков по радиоканалам связи следующего поколения определяются: во-первых, необходимостью низкой стоимости создания и обеспечения работы системы; во-вторых, потребностью обеспечить скорость передачи данных до сотен гигабайт в секунду. Также имеет место переход к более высоким рабочим частотам (до 300 ГГц). Очевидным шагом также является объединение наземных и космических систем в единую информационную сеть. Это требует уменьшения в сотни раз массогабаритных параметров при увеличении емкости каналов связи во столько же раз. Более того, системы нового поколения должны строиться на основе широкого использования недорогих электрически перестраиваемых устройств. Это позволит привести в сверхскоростные мобильные системы принципы самоорганизации и, в частности, такой важный элемент, как способность системы «самоподстраиваться» к изменению условий связи, компенсировать естественное старение компонентов системы и влияние окружающей среды.

Указанные обстоятельства стимулируют создание универсальных структур, позволяющих использовать их во многих приборах широкого спектра применений. В этой связи актуальна задача исследования и разработки базовых электронно-перестраиваемых функциональных устройств — резонаторов, фильтров, фазовращателей, линий задержки и т. д. «Использование известных управляемых элементов на основе ферритовых и полупроводниковых устройств уже в  $K$ -диапазоне наталкивается на непреодолимые трудности. Ферритовые фазовращатели не устраивают из-за больших времен управления, неприемлемо больших массогабаритных характеристик, высокой цены, больших потерь и энергетических затрат на управление. Полупро-

водниковые устройства чрезвычайно дороги, имеют ограничение по мощности, плохо совмещаются с микрополосковыми линиями (ручная сборка) и требуют высокой энергетики по цепям перестройки» [1]. Как следствие, безальтернативным становится применение устройств на основе тонких СЭ пленок.

Цель работы — обозначить и обосновать перспективы применения наноразмерных гетероструктур в космическом приборостроении. Задачи работы — провести обзор имеющихся к настоящему времени научных заделов и результатов в области наноразмерных сегнетоэлектрических гетероструктур, наметить возможные направления дальнейших исследований, показать преимущества наноразмерных гетероструктур, в частности при разработке электронно-перестраиваемых функциональных устройств.

## Свойства СЭ пленок

СЭ материалы обладают аномально высокой диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon$ )  $\sim 10^2$ – $10^3$ . Различные по физической природе (электрическое, тепловое, механическое) воздействия на СЭ вызывают изменение его  $\epsilon$ . Способность СЭ изменять  $\epsilon$  при воздействии электрического поля составляет физическую основу построения компонент СВЧ-электроники с электрически управляемыми характеристиками. Использование СЭ материалов затрудняли: высокая температурная зависимость  $\epsilon$ , ее дисперсия и высокое значение тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tg } \delta$ ) на СВЧ. Для СЭ пленки это «может быть результатом: а) механического воздействия подложки и металлических покрытий на пленку; б) наличия точечных дефектов, обусловленных процессами синтеза пленки; в) реализации мелкокристаллитного строения пленки» [2].

Наиболее исследованными как с точки зрения диэлектрических характеристик, так и с точки зрения макетирования управляемых СВЧ-устройств, является твердый раствор на основе титаната бария ( $\text{BaTiO}_3$ , сокращенное обозначение — BST) и титаната стронция ( $\text{SrTiO}_3$ ). Они взаимно растворимы в широком диапазоне концентраций Ba и Sr с общей формулой  $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$  (где  $x$  может изменяться от 1 до 0). BST в виде тонкой пленки

может быть включен в волноведущую структуру или использован как составная часть планарного конденсатора [3].

При использовании в качестве подложки керамического диэлектрика (например, поликора) рост пленок происходит в поликристаллическом состоянии. Сплошность таких пленок достигается при средней толщине в десятки нанометров. Поэтому такие пленки используются толщиной в несколько микрометров, а основными конструктивными элементами являются планарный конденсатор, копланарная или щелевая линии. При создании структур с вертикальными электродами также используются поликристаллические пленки BST. Это связано с тем, что осаждаемый нижний металлический электрод наносится в поликристаллическом состоянии. Однако в последнее время внимание разработчиков электронно перестраиваемых устройств переместилось в сторону использования монокристаллических BST. В первую очередь это связано с уменьшением в них диэлектрических потерь и открывшимися возможностями перехода к наноразмерным пленкам.

Одной из проблем, ограничивающих применение СЭ пленок в управляемых СВЧ-устройствах, являлась сильная дисперсия  $\epsilon$ . Но эта проблема стала менее актуальной по мере совершенствования способов осаждения тонких пленок. Получены пленки, которые характеризует чрезвычайно слабая дисперсия (меньше 5%)  $\epsilon$  монокристаллических пленок BST в интервале 100 МГц–40 ГГц, что свидетельствует об устранении одного из ограничений по использованию пленок в  $K$ -диапазоне и на более высоких частотах [3–8]. Но это требует качественно улучшения технологии осаждения пленок. Переход к монокристаллическим пленкам — это только первый шаг, дальнейшее повышение их структурного совершенства полностью устраняет дисперсию вплоть до терагерцевого диапазона частот [4]. Движение в область наноразмерного состояния СЭ ставит изучение взаимного влияния электрических, зарядовых и деформационных полей на фундаментальные свойства СЭ в ряд наиболее актуальных задач как в научном, так и в практическом планах, поскольку свойства в наноразмерных структурах могут радикально отличаться от гомогенных СЭ и более толстых пленок [6, 7]. Важная роль меха-

нических напряжений в тонких пленках в последнее время убедительно показана во многих экспериментах, объясняющих причины аномально сильного размытия фазового перехода. Для пленок толщиной  $L < 100$  нм роль механических деформаций в формировании СЭ состояния может стать определяющей ввиду развития в системе «пленка плюс подложка» механической неустойчивости, качественно меняющей свойства СЭ [3]. Наноразмерные пленки представляют в этом плане особый интерес, поскольку в них проявляется наиболее ярким образом эффекты взаимодействия пленки и подложки. Атомарно гладкая поверхность позволяет формировать конструкции планарного конденсатора с диэлектрическим зазором меньше 1 мкм, что приводит к снижению управляющих напряжений до величин  $\sim 10$  В и увеличению погонной емкости. Малые диэлектрические зазоры планарного конденсатора позволяют создавать электрические поля, соизмеримые с межатомными и, как следствие, вызывают появление новых свойств в наноразмерных СЭ пленках [3, 6].

### **Фазированные антенные решетки с СЭ фазовращателями**

В системах радиолокации традиционный режим механического сканирования уходит на второй план, уступая место РЛС с фазированной антенной решеткой (ФАР) с электронным сканированием [9]. Разработка новых конструкций малогабаритных сверхскоростных ФАР высокого разрешения, работающих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн, является наиболее актуальной задачей при создании нового поколения телекоммуникационных систем. Имеют место две ключевые проблемы ФАР:

1 — рассеивание мощности, т. к. в микроволновых транзисторных усилителях эффективность передающего модуля обычно меньше 45%, что требует отвода выделенной теплоты, чтобы сохранить работоспособность монолитных интегральных схем на основе арсенида галлия;

2 — массогабаритные характеристики и энергетические затраты на управление неприемлемо велики, их необходимо понизить на несколько порядков для успешного применения в мобильных системах, в том числе космического базирования.

Применение СЭ пленок дает возможность устранить эти проблемы и при этом обеспечить быстрое действие до пикосекунд [10]. Теоретическое обоснование возможностей создания подобных устройств разработано, на наш взгляд, достаточно полно [11, 12].

За рубежом исследования в этом направлении ведут научные центры США, Европы и Китая. Применение СЭ материалов для создания сканирующих ФАР высокого разрешения позволило NASA Glenn Research Center и Argonne National Laboratory создать действующий макет ФАР, состоящей из 2832 элементов (рис. 1, скопирован из работы [11]).

Лабораторные испытания показали, что выбранное направление удовлетворяет требованиям к ФАР с наносекундным быстродействием нового поколения для обеспечения широкополосной связи с искусственными спутниками Земли (ИСЗ) в диа-

пазоне частот от 25,5 до 27,5 ГГц для передачи на Землю данных, полученных в космосе [11]. Предложенная в [12] конструкция и принцип действия отражательной ФАР обладает целым рядом преимуществ по сравнению с существующими аналогами, но у нее есть существенный недостаток, препятствующий ее широкомасштабному внедрению в системы связи с ИСЗ. Конструктивно используемые в этой антенне ФВ представляют собой связанные микрополосковые линии размером четверть длины волны, напыленные на тонкой СЭ пленке (рис. 1, в). В то время как типичный ФВ на монолитных СВЧ интегральных схемах (ММИС) Ka-диапазона имеет от 8 до 10 дБ вносимых потерь, СЭ устройства демонстрируют прямые потери 4,5 дБ. Теоретически возможны вносимые потери, приближающиеся к 3 дБ. Однако требуемые напряжения смещения (до 400 В, чтобы обеспечить фазовый сдвиг в  $360^\circ$ ) в предложенной конструкции

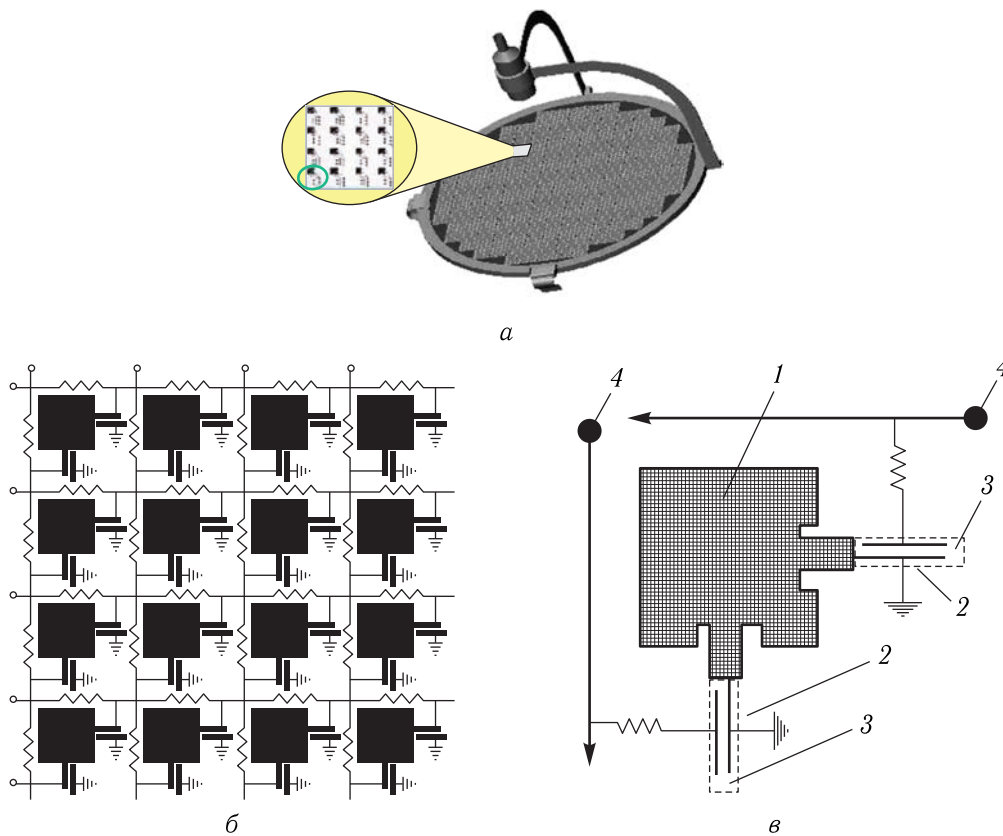


Рис. 1. Отражательная ФАР на основе сегнетоэлектрических фазовращателей (а), фрагмент отражательной ФАР на основе сегнетоэлектрических фазовращателей (б), планарный элемент отражательной ФАР (в): 1 — микрополосковый элемент; 2 — фазовращатель; 3 — пленка BST; 4 — точки подачи напряжения смещения

неприемлемо велики. Препятствием к улучшению характеристик указанной ФАР на настоящий момент является неспособность NASA получать тонкие СЭ пленки наноразмерной толщины с высоким структурным совершенством.

## Экспериментальная часть

Все известные к настоящему времени практические результаты, достигнутые зарубежными исследовательскими центрами в реализации СЭ устройств, были получены на гетероструктурах с толщиной СЭ пленки не менее 0,5 мкм (см., в частности, [11–14]), поскольку используемая ими технология не позволяла перейти к наноразмерным СЭ пленкам.

## Объекты исследования

Объектами исследования являются наноразмерные СЭ гетероструктуры. В основе способа создания гетероструктур на основе СЭ пленок BST разработанный в ЮНЦ РАН «метод высокочастотного (ВЧ) распыления, принципиальное отличие которого от известных аналогов в росте монокристаллических пленок из дисперсной фазы оксида, образующейся в плазме ВЧ-разряда при распылении керамической мишени стехиометрического состава на кластерном уровне» [6, 15]. Эта технология позволила получать наноразмерные СЭ гетероструктуры с атомарно-гладкой поверхностью и при отсутствии переходного слоя, что позволяет создавать планарные топологии электродов с диэлектрическим зазором 0,1 мкм и, как следствие, снизить управляющие напряжения на порядок.

Эксперименты, проведенные в ЮНЦ РАН, показали, что в наноразмерных СЭ гетероструктурах, особенно в многослойных, возникают важные для практического использования новые свойства, не свойственные пленкам с толщиной ~ мкм [3–8, 16–24].

## Методы

С целью выяснения влияния механизмов роста на физические свойства элементарной ячейки пленок BST и выявления особенностей проявления СЭ

состояния изготовлены несколько серий гетероструктур. «Структурное совершенство пленок, параметры элементарной ячейки, а также эпитаксиальные соотношения между пленкой и подложкой при разных механизмах роста устанавливались рентгенографированием на дифрактометре ДРОН-4-07 (Cu  $K_{\alpha}$ -излучение,  $\Theta$ - $2\Theta$ -метод, съемка симметричных и асимметричных брэгговских отражений), методами электронной и атомно-силовой микроскопии (AFM) и методами спектроскопии комбинационного рассеяния света» [25].

## Результаты

В [4] «экспериментальными данными для анализа послужили спектры пропускания и отражения подложки MgO ( $10 \times 10 \times 0,5$  мм) и гетероструктур BST/MgO (с толщинами пленок BST 36 и 800 нм), измеренные при комнатной температуре на субмиллиметровом ЛОВ-спектрометре (в диапазоне  $8\text{--}24$  см $^{-1}$ ) и инфракрасном фурье-спектрометре Bruker IFS-113v ( $25\text{--}1000$  см $^{-1}$ ). Использовались гетероструктуры BST/MgO, диэлектрические свойства которых уже исследовались импедансным методом на радиочастотах [5]. Коэффициент отражения гетероструктур измерялся при нормальном падении излучения со стороны пленки». Полученные результаты показали отсутствие дисперсии  $\varepsilon(\nu)$  пленок BST толщиной 36 нм вплоть до частот терагерцевого диапазона частот (0,7 ТГц).

Обеспечение температурной стабильности управляемых СВЧ-устройств на основе BST — одна из главных задач. Эксперименты показали, что в рабочем температурном интервале (150–400 К) она не хуже 1% [6]. В ходе экспериментов для измерения  $\varepsilon$  использовались планарные конденсаторы, которые представляли собой встречно-штыревую структуру с алюминиевыми электродами (рис. 2). Реальные геометрические размеры планарного конденсатора для вычисления  $\varepsilon$  после литографического процесса определялись по методике, изложенной в [3] и [26]. Результаты измерений топологии электродов и значения емкости использовались для расчета величины диэлектрической проницаемости по формулам, приведенным в [27] и [28].

Слоевой механизм роста с атомарно-гладкой поверхностью был подтвержден в [5, 6]. Структурное



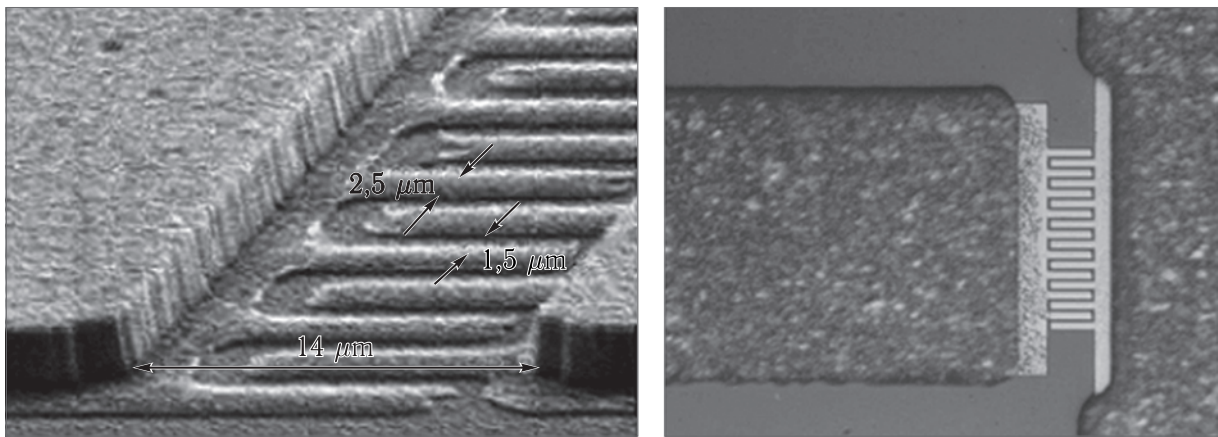


Рис. 2. Полученные на растровом микроскопе микрофотографии топологии планарных электродов конденсатора встречно-штыревого типа

совершенство пленок установлено рентгенографированием на дифрактометре ДРОН-4. Интенсивность рентгеновских дифракционных максимумов от пленок, толщина которых превышает 5 нм, достаточна для надежного определения как параметров элементарной ячейки пленки, так и ориентационных соотношений между пленкой и подложкой [3, 8, 10].

Рентгенодифракционные исследования пленок, выполненные при комнатной температуре, выявили наличие особенностей в зависимости параметров элементарной ячейки от толщины пленки. Для выяснения причин такого поведения параметра элементарной ячейки в области наноразмерных толщин было проведено исследование границы раздела пленки-

подложки с помощью электронных микроскопов Tescnai G230ST и FEI Titan 80-300 с использованием широкоугольного детектора темного поля в просвечивающе-растровом режиме (HAADF STEM) при ускоряющем напряжении 300 кВ. Для получения электронно-микроскопических изображений структуры пленок BST и границы раздела BST–MgO были изготовлены поперечные срезы и образцы в «плане» методами механической шлифовки и ионного утонения на установке Gatan PIPS model 691 с энергией ионов аргона 4,5–5 кэВ. Результаты приведены на рис. 3.

Исследование структуры на атомном уровне с помощью электронной микроскопии высокого разрешения выявило также наличие азимутальной

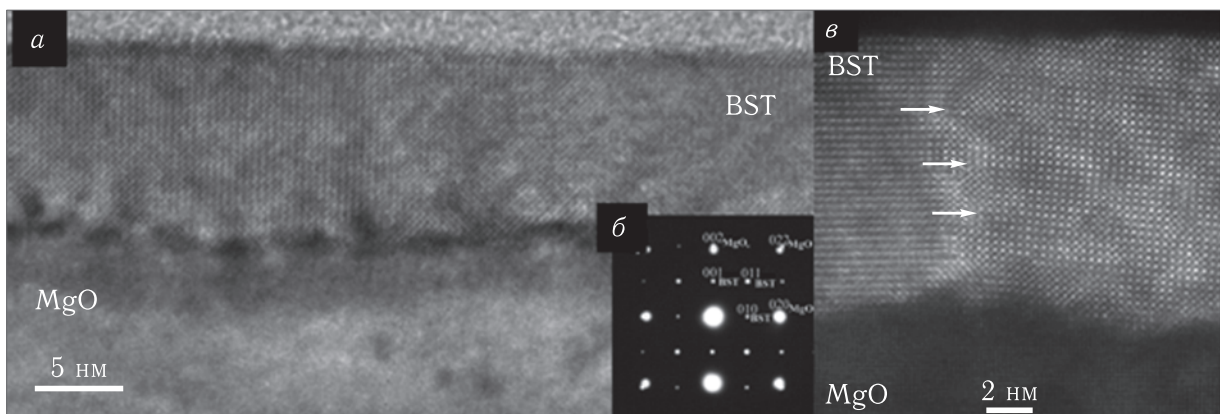


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения гетероструктуры BST–MgO: *a* — изображение пленки толщиной 12 нм при малом увеличении; *б* — характерная дифракционная картина с осью зоны [100]; *в* — STEM-изображение с атомным разрешением, свидетельствующее о локальной разориентировке вокруг участков вертикальной оси

разориентировки отдельных участков пленки на величину  $0,6^\circ$ . На рис. 3, в приведено STEM-изображение с атомным разрешением границы раздела двух разориентированных участков пленки. Основной причиной такой разориентации, по-видимому, является качество полировки поверхности MgO, связанное с изменением рельефа подложки, как видно из рис. 3, в. Для визуализации дислокаций был использован метод непрямого разрешения решетки с помощью картин муара. Муаровый узор наблюдался при наложении решеток двух кристаллов, MgO и BST. Расчет картин муара и фильтрация изображений высокого разрешения позволили установить, что наблюдаемый муаровый узор является параллельным, т. е. образованным за счет разницы периодов решеток MgO и BST, и позволяет визуализировать дислокации.

На рис. 4 «представлены изображения границы раздела для пленок толщинами 6 нм и 12 нм с характерным контрастом в местах расположения ядер

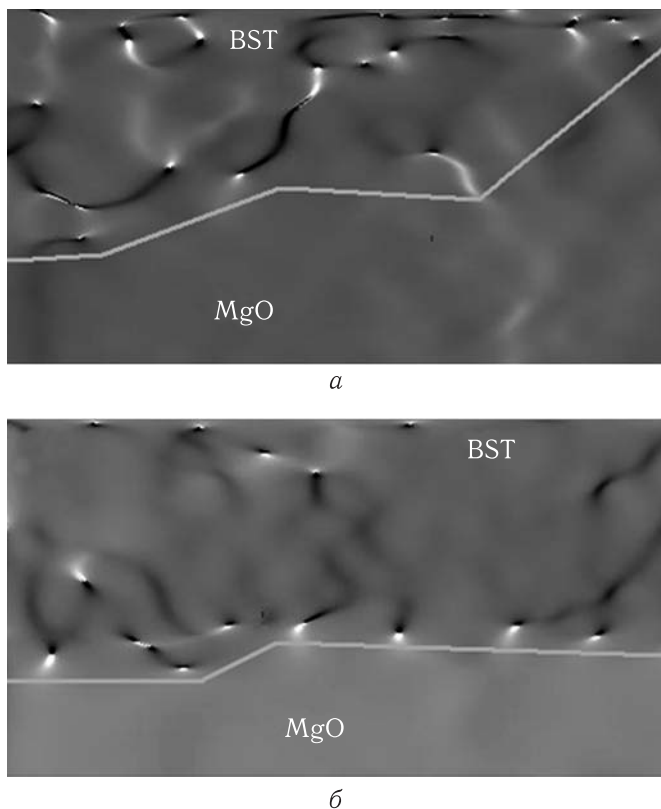


Рис. 4. Карта распределения межплоскостных расстояний, полученная методом геометрической фазы для пленки 6 нм (а) и 12 нм (б)

дислокаций. Видно, что величина межплоскостных расстояний  $d$  для пленки толщиной 12 нм уменьшается по сравнению с величиной  $d$  для пленки толщиной 6 нм, но пленка по-прежнему остается тетрагонально искаженной в плоскости границы раздела. Период появления на границе характерного черно-белого контраста для пленки толщиной 12 нм почти в два раза меньше периода, наблюдаемого для пленки толщиной 6 нм, и составляет 5–6 нм, что свидетельствует о релаксации напряжений в пленках с увеличением их толщины за счет появления экстроплоскостей. Таким образом, процессы релаксации деформации, определяющие степень механической разгрузки наноразмерной пленки BST, прежде всего связаны с генерацией в ней дислокаций несоответствия и физически отвечающие наличию скольжения пленки по поверхности подложки без отрыва от нее.

Понимание этих эффектов крайне важно, когда осуществляется попытка вырастить BST-пленки с оптимальной микроструктурой для получения максимальной диэлектрической управляемости. Однако присутствие дислокаций создает неоднородное распределение поляризации по толщине пленки» [29].

Степень напряжения в пленке должна сказываться на диэлектрических характеристиках. Это проверено на пленке, на которой методами обратной фотолитографии были сформированы планарные встречно-штыревые электроды (рис. 2) с 440 штырями.

Изменения емкости от внешнего напряжения частотой 0,05 Гц для пленок различной толщины приведены в [6]. Установлена релаксация существенной части напряжений, что привело к возрастанию коэффициента управляемости. Перестраиваемые конденсаторы в планарном исполнении имеют преимущество перед конденсаторами других типов, поскольку у планарных конденсаторов оба проводника расположены на верхней стороне подложки, т. е. у них используется только один металлизированный слой. Конденсаторы такого типа, если они входят в состав микрополоскового узла, изготавливаются в едином технологическом цикле с этим узлом и не требуют для своего производства дополнительных операций. Использование планарного конденсатора с диэлектрическим зазором порядка

1 мкм потребовало применение методов взрывной литографии. Однако использование ее при толщине электрода более 2 мкм затруднительно, поскольку происходит неравномерное протравливание фоторезиста. Поэтому при изготовлении планарной структуры в ЮНЦ РАН использовались электроды сложной конфигурации, как показано на микрофотографиях рис. 2. На приведенных фотографиях хорошо видна конструкция электродов.

При проведении литографии даже по относительно тонким электродам (меньше 0,2 мкм) в диэлектрическом зазоре трудно удалить весь фоторезист. Это хорошо видно на рис. 5, а. Дополнительная плазмохимическая обработка в кислороде в течение 12 мин позволяет его убрать (рис. 5, б). Для определения толщины пленки, проводилось травление сегнетоэлектрической пленки. В результате образовалась ступенька BST-MgO. Затем

с помощью зондового микроскопа определялась высота этой ступеньки, она и являлась толщиной пленки (рис. 5, в). Более точный способ контроля толщины непосредственно в процессе нанесения пленки BST осуществляется методами оптической эллипсометрии.

Сравнение СЭ пленок зарубежных научных центров с образцами, полученными в ЮНЦ РАН, показали существенное преимущество нашей технологии за счет более высокого структурного совершенства СЭ пленок. В основном экспериментальные данные по СВЧ-устройствам на основе BST, приведенные в зарубежных источниках, относятся к поликристаллическим пленкам, которым свойственны высокие потери, обусловленные межкристаллитными прослойками. Как показывают эксперименты, проведенные в ЮНЦ РАН, переход к монокристаллическим пленкам позволяет снизить tg δ

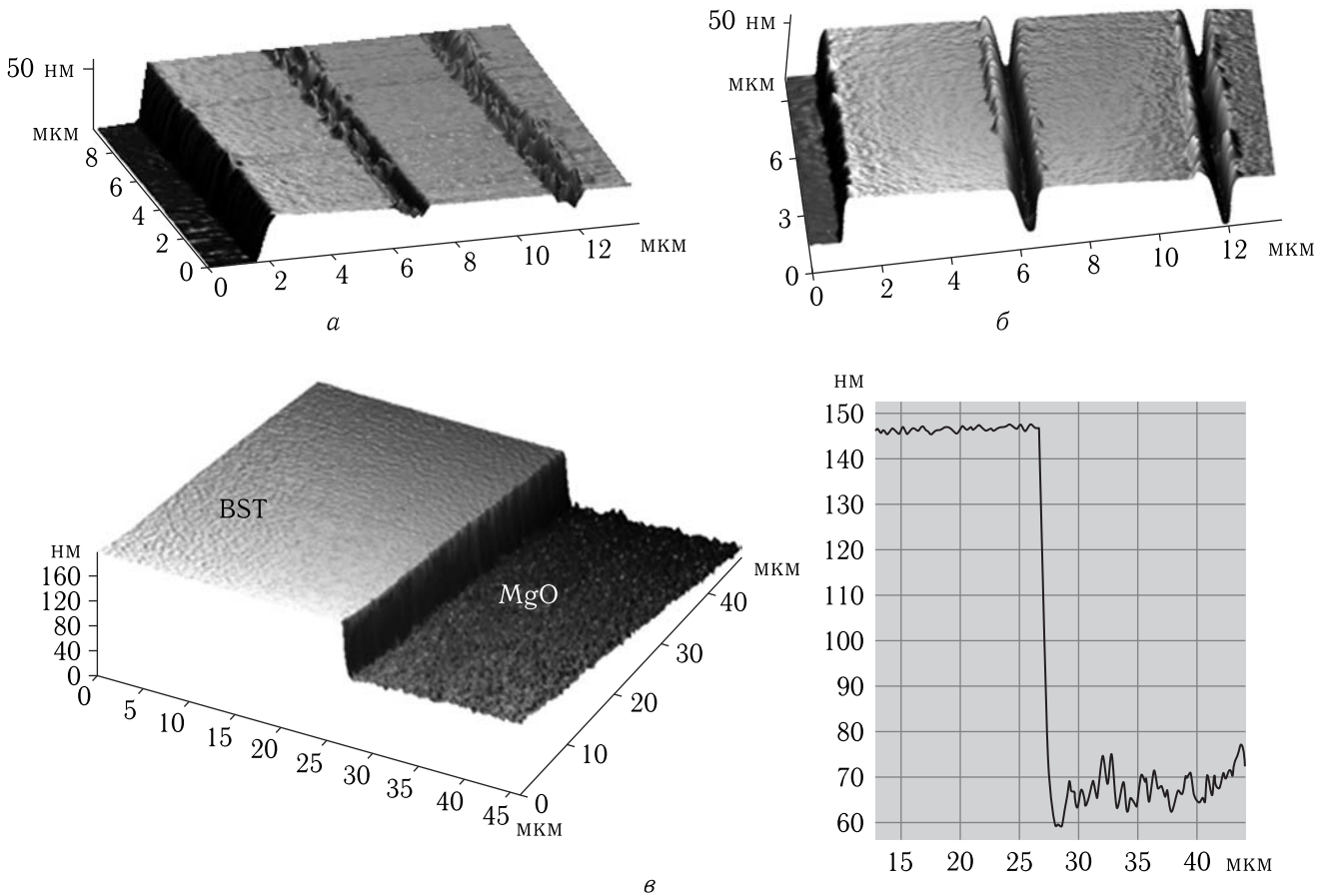


Рис. 5. Микрофотографии до (а) и после (б) удаления фоторезиста. Ступенька BST на MgO после частичного травления BST и профилограмма ступеньки (в)



в СВЧ-диапазоне на порядок и достичь величины  $\text{tg } \delta \approx 0,001$  на частотах  $\sim 1\text{--}30$  ГГц. Планарная технология создания волноведущих структур в сочетании с наноразмерными СЭ пленками открывает возможность создания целого класса электрически перестраиваемых устройств. В ЮНЦ РАН впервые созданы гетероструктуры с толщиной пленок 18–40 нм, на которых разработаны электронно-перестраиваемые фазовращатели и фильтры при управляющем напряжении 10–40 В [5, 8, 29]. Экспериментально показано, что технология создания гетероструктур обладает высокой воспроизводимостью — 99% на площади  $(25 \times 25)$  мм<sup>2</sup> против 40% у зарубежных аналогов.

В основу этих устройств положен новый эффект, суть которого состоит в том, что в монокристаллических BST с уменьшением толщины наблюдаются размерные эффекты, проявляющиеся в наличии критической толщины (70 нм), разделяющей два качественно и количественно различающихся СЭ состояния. Установлено, что при толщинах больше критической и меньше критической различны внутренние механические напряжения (в одном случае — растяжение, в другом — сжатие), частоты мягкой моды решеточных колебаний отличаются в два раза, температура фазового перехода смещается на 150 К, величина диэлектрической проницаемости различается в 20 раз, коэффициенты диэлектрической нелинейности отличаются в четыре раза. Установление связи между деформацией решетки и динамикой колебательного спектра напряженной решетки проводилось методами спектроскопии комбинационного рассеяния света.

В области толщин пленок 20–50 нм  $\epsilon$  может достигать величины 4000 (у зарубежных аналогов на порядок ниже, см., например, [13, 14]) при значениях диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta \sim 0,002$ , коэффициент управляемости 2,5 при напряженности управляющего поля  $10^7$  в/м, собственная добротность компонентов, реализованных на основе наноразмерных СЭ пленок,  $\sim 100$ . В физическом плане полученные результаты соответствуют представлениям о появлении резких изменений постоянной решетки, обусловленных развитием сегнето-упругой неустойчивости и рождением дислокаций несоответствия, приводящих к частичной механической разгрузке пленки [30, 31].

При создании многослойных гетероструктур с толщиной каждого слоя меньше критической возможно появление новых свойств [15–24], которые могут послужить основой для разработки устройств принципиально иного, нежели реализованных до сих пор, типа, в частности малогабаритных перестраиваемых гетеродинов с низким фазовым шумом, необходимых для высокой скорости передачи информации, и с низким уровнем модуляционных ошибок в схемах высокого уровня; миниатюрных перестраиваемых СВЧ-устройств с быстрой перестройкой частоты и фазы для следующего поколения технических средств радиосвязи, изготавливаемых по технологиям, обеспечивающим массовое производство и совместимость с существующими линиями передачи; ФАР высокого разрешения с формированием зеркала антенны из СВЧ-чипов, включающих элементы пространственного возбуждения излучения и приема, совместимые с СЭ ФВ, изготовленными по интегральной технологии на единой подложке.

## Выводы

1. Разработана технология получения СЭ гетероструктур с атомарно-гладкой поверхностью и при отсутствии переходного слоя. Это позволяет создавать на СЭ гетероструктурах планарные топологии электродов с диэлектрическим зазором 0,1 мкм.

2. Впервые удалось добиться для одной системы «пленка–подложка» напряжений как сжатия, так и растяжения в СЭ монокристаллической пленке.

3. В состоянии растяжения (область нанометровой толщины) обнаружено аномальное изменение свойств СЭ гетероструктуры: понижение частоты мягкой моды, а значит, повышение  $\epsilon$ ; увеличение коэффициента управляемости под действием внешнего поля; повышение частоты, с которой начинается дисперсия  $\epsilon$  до 0,7 ТГц.

4. Экспериментально подтверждена возможность применения наноразмерных СЭ гетероструктур в электрически перестраиваемых СВЧ-устройствах в диапазоне 1–40 ГГц.

5. Отработаны технологические приемы создания электрически перестраиваемых устройств в микрополосковом варианте на гетероструктуре без удаления СЭ слоя по всей поверхности.

6. Экспериментально показано, что технология создания СЭ гетероструктур обладает высокой воспроизводимостью: 99% на площади  $25 \times 25$  мм<sup>2</sup> против 40% у зарубежных аналогов.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ЮНЦ РАН по проекту № 122020100294-9.

## Список литературы

1. Мухортов В.М., Головки Ю.И., Бирюков С.В., Масычев С.И., Павленко А.В., Стрюков Д.В., Зинченко С.П., Ковтун А.П., Толмачев Г.Н. Наноразмерные сегнетоэлектрические пленки — новая активная среда для микроэлектроники // Наука Юга России, 2022, т. 18, № 4, С. 33–43.
2. Прудан А.М. Многослойные структуры на эффекте сильного поля в сегнетоэлектрических пленках: автореф. дисс... д-ра техн. наук: 05.27.01. С.-Петерб. гос. электротехн. ун-т. Санкт-Петербург, 2002. 32 с.
3. Маматов А.А., Зеленчук П.А., Головки Ю.И., Бирюков С.В., Масычев С.И., Мухортов В.М. Гетероструктуры на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок: получение, свойства и применение // Нанотехника, 2007, № 3 (11), С. 59–71.
4. Командин Г.А., Волков А.А., Спектор И.Е., Воротилов К.А., Мухортов В.М. Терагерцевые диэлектрические спектры тонких пленок (Ba, Sr)TiO<sub>3</sub> // Физика твердого тела, 2009, т. 51, вып. 7. С. 1280–1283.
5. Мухортов В.М., Масычев С.И., Головки Ю.И., Мухортов В.С. Применение наноразмерных пленок титаната бария–стронция для перестраиваемых СВЧ-устройств // Журнал технической физики, 2006, т. 76, вып. 10. С. 106–109.
6. Мухортов В.М., Юзюк Ю.И. Гетероструктуры на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок: получение, свойства и применение. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. 224 с.
7. Воротилов К.А., Мухортов В.М., Сигов А.С. Интегрированные сегнетоэлектрические устройства / Под ред. чл.-корр. РАН А.С.Сигова. М.: Энергоатомиздат, 2011. 175 с.
8. Мухортов В.М., Масычев С.И., Головки Ю.И., Мухортов В.С. Фазовращатель на щелевой линии, нагруженной варакторами на основе наноразмерных пленок титаната бария–стронция // Радиотехника и электроника, 2007, т. 52, № 11. С. 1402–1406.
9. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электрическим сканированием. Введение в теорию / Под ред. Л.Д.Бахраха. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2002. 232 с.
10. Головки Ю.И., Мухортов В.М., Юзюк Ю.И., Јаполин Р.Е., Dkhil В. Структурные фазовые переходы в наноразмерных сегнетоэлектрических пленках титаната бария–стронция // Физика твердого тела, 2008, т. 50, вып. 3. С. 467–471.
11. Romanofsky R. Advances in Scanning Reflectarray Antennas Based on Thin Ferroelectric Film Phase Shifters // Proc. IEEE, Special Issue on Technical Advances in Deep Space Communications and Tracking, Oct. 2007, vol. 95, № 10, P. 1968–1975.
12. Romanofsky R., Bernhard J., Van Keuls F., Miranda F., Washington G., Canedy C. K-band Phased Array Antennas Based on Ba<sub>0.60</sub>Sr<sub>0.40</sub>TiO<sub>3</sub> Thin Film Phase Shifters // IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique, December 2000, vol. 48, № 12. P. 2504–2510.
13. Jingtian Liu, Shuming Chen, Hui Huang, Ke Xiao, Xiaowen Chen. Silicon-based on-chip four-channel phased-array radar transmitter with ferroelectric thin film at 100 GHz // The Journal of Engineering, 2019, vol. 2019, Iss. 19. P. 6231–6234.
14. Cure D., Weller T., Price T., Van Keuls F. and Miranda F.A. Low Profile Tunable Dipole Antenna Using Barium Strontium Titanate Varactors // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, March 2014, vol. 62, № 03. P. 121–137.
15. Стрюков Д.В. Структурные особенности многослойных пленок сегнетоэлектриков (Ba, Sr)TiO<sub>3</sub>, (Sr, Ba)Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> и мультиферроика BiFeO<sub>3</sub>: дисс... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 2018. 112 с.
16. Pavlov D.P., Garif'yanov N.N., Bannikov M.I., Salikhov T.M., Mukhortov V.M., Mamin R.F. Properties of the interface of Ba<sub>0.8</sub>Sr<sub>0.2</sub>TiO<sub>3</sub>/LaMnO<sub>3</sub> heterostructure // Ferroelectrics, 2021, vol. 575, Iss. 1. P. 123–129.
17. Pavlov D.P., Batalov R.I., Leontyev A.V., Zharkov D.K., Migachev S.A., Lunev I.V., Mukhortov V.M., Shaposhnikova T.S., Mamin R.F. Investigation of the barium strontium titanate films on the silicon substrate // Ferroelectrics, April 2021, vol. 575, P. 117–122.

18. *Pavlov D.P., Garigyanov N.N., Zagidullin R.R., Leontyev A.V., Salikhov T.M., Mukhortov V.M., Kabanova V.V., Mamin R.F.* Investigation of an effect of electric field applied to ferroelectric film upon conductivity of quasi-two dimensional electron gas at the  $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3/\text{LaMnO}_3$  interface // *Ferroelectrics*, 2020, vol. 560, P. 33–37.
19. *Зинченко С.П., Стрюков Д.В., Павленко А.В., Мухортов В.М.* Влияние подслоя  $\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.8}\text{TiO}_3$  на структуру и электрофизические характеристики пленок цирконата–титаната свинца на подложке Si(001) // *Письма в ЖТФ*, 2020, т. 46, вып. 23. С. 41–44.
20. *Анохин А.С., Бирюков С.В., Головки Ю.И., Мухортов В.М.* Структурные и электрические характеристики двухслойных тонких пленок  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}/(\text{Ba},\text{Sr})\text{TiO}_3$ , осажденных на кремниевую подложку методом высокочастотного распыления при повышенных давлениях кислорода // *Физика твердого тела*, 2019, т. 61, вып. 2. С. 278–283.
21. *Анохин А.С., Головки Ю.И., Мухортов В.М., Стрюков Д.В.* Структура и динамика решетки двухслойных гетероструктур титаната бария–стронция и слоистого титаната висмута разной толщины на подложке оксида магния // *Физика твердого тела*, 2019, т. 61, вып. 11. С. 218–223.
22. *Elena Mishina, Kirill Grishunin, Vladislav Bilyk, Natalia Sherstyuk, Alexander Sigov, Vladimir Mukhortov, Andrey Ovchinnikov and Alexey Kimel.* Ultrafast polarization switching of  $(\text{BaSr})\text{TiO}_3$  thin film by a single-period terahertz pulse in a vicinity of phase transition // *Ferroelectrics*, 2018, vol. 532. P. 199–207.
23. *Павленко А.В., Стрюков Д.В., Мухортов В.М., Бирюков С.В.* Структура и релаксация поляризованного состояния в тонких пленках  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$  на подложке (001)Si // *Журнал технической физики*, 2018, т. 88, вып. 3. С. 418–421.
24. *Мухортов В.М., Головки Ю.И., Павленко А.В., Стрюков Д.В., Бирюков С.В., Ковтун А.П., Зинченко С.П.* Особенности эффекта поля в структуре металл–сегнетоэлектрик–полупроводник при использовании многослойных сегнетоэлектрических пленок с различными структурными типами // *Физика твердого тела*, 2018, вып. 9. С. 1741–1749.
25. *Мухортов В.М., Головки Ю.И., Маматов А.А., Жигалина О.М., Кускова А.Н.* Особенности структуры в наноразмерных эпитаксиальных пленках титаната бария–стронция // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*, 2007, т. 7, № 1. С. 24–29.
26. *Юзюк Ю.И.* Механизмы структурных фазовых переходов и особенности динамики кристаллической решетки сегнетоэлектриков по данным спектроскопии комбинационного рассеяния света: дисс... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07. Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 2013, 380 с.
27. *Вендик О.Г., Зубко С.П., Никольский М.А.* Моделирование и расчет емкости планарного конденсатора, содержащего тонкий слой сегнетоэлектрика // *Журнал технической физики*, 1999, т. 69, вып. 4. С. 1–6.
28. *Мухортов В.М., Бирюков С.В., Маматов А.А., Масычев С.И.* Модифицированные соотношения для расчета диэлектрической проницаемости наноразмерных пленок титаната бария–стронция // *Журнал технической физики*, 2016, т. 86, вып. 8. С. 102–106.
29. *Мухортов В.М., Масычев С.И., Маматов А.А., Мухортов В.М.* Электрически перестраиваемый фотонный кристалл на основе копланарного волновода с наноразмерной сегнетоэлектрической пленкой // *Письма в ЖТФ*, 2013, т. 39, вып. 20. С. 70–76.
30. *Alpay S.P., Misirlioglu I.B., Sharma A. et al.* Structural characteristics of ferroelectric phase transformations in single-domain epitaxial film // *Journal of applied physics*, 2004. vol. 95, № 12. P. 8118–8123.
31. *Feizhou He, Wells B.O., Ban Z.-G., Alpay S.P. et al.* Structural phase transition in epitaxial perovskite films // *Phys. Rev. B*, December 2004, vol. 70. 235405.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 04.05.2023  
Дата принятия рукописи  
в печать 01.08.2023