

УДК 537.9
DOI: 10.7868/S25000640220404

НАНОРАЗМЕРНЫЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЛЕНКИ – НОВАЯ АКТИВНАЯ СРЕДА ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

© 2022 г. В.М. Мухортов¹, Ю.И. Головкин¹, С.В. Бирюков¹, С.И. Масычев¹,
А.В. Павленко¹, Д.В. Стрюков¹, С.П. Зинченко¹, А.П. Ковтун¹, Г.Н. Толмачев¹

Аннотация. Приведены результаты междисциплинарных исследований сегнетоэлектрических гетероструктур, полученных по принципиально новой технологии, разработанной в лаборатории физики тонких сегнетоэлектрических пленок Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН). Получаемые по этой технологии гетероструктуры сложных оксидов по структурному совершенству и диэлектрическим свойствам значительно превосходят лучшие зарубежные образцы. Комплексное исследование гетероструктур сложных оксидов (методы рентгендифракционного анализа, исследования диэлектрических характеристик, исследования генерации второй гармоники, спектроскопия комбинационного рассеяния света, высокоразрешающая электронная микроскопия) позволило выявить основные особенности применения такой новой активной среды в микроэлектронике СВЧ, оптическом диапазоне, в устройствах на поверхностных акустических волнах, в микродатчиках, а также разработать и создать в ЮНЦ РАН опытные образцы. Установлена область оптимальных толщин пленок для применения в управляющих устройствах СВЧ-диапазона – между 25 и 50 нм. Эта область характеризуется максимальным коэффициентом управляемости и минимальными диэлектрическими потерями. Более того, методы рентгеноструктурного анализа позволяют однозначно определить механизм роста пленок и установить ожидаемый коэффициент управляемости.

Разработанный в ЮНЦ РАН микродатчик на основе наноразмерных сегнетоэлектрических гетероструктур с пороговой чувствительностью $\Delta I/I \approx 10^{-9} \dots 10^{-10}$, работающий в диапазоне частот $10^{-4} \dots 10^7$ Гц, позволит создать системы диагностики сложных механических систем в минимальные сроки. При использовании в устройстве на поверхностных акустических волнах в качестве активного элемента тонкой сегнетоэлектрической пленки можно вдвое повысить рабочую частоту преобразователя за счет формирования в пленке периодической доменной структуры, представляющей собой фотонный кристалл. Путем изменения внешнего поляризующего напряжения на электродах пленки можно создавать преобразователи с электрически регулируемым коэффициентом электромеханической связи.

Ключевые слова: тонкие пленки, сегнетоэлектрические гетероструктуры, микроэлектромеханические системы, высокоразрешающая электронная микроскопия, рентгендифракционный анализ, планарные электроды, комбинационное рассеяние, генерации второй гармоники, фазовращатель, микродатчик.

NANOSCALE FERROELECTRIC FILM – A NEW ACTIVE MEDIUM FOR MICROELECTRONICS

V.M. Mukhortov¹, Yu.I. Golovko¹, S.V. Biryukov¹, S.I. Masyshev¹,
A.V. Pavlenko¹, D.V. Stryukov¹, S.P. Zinchenko¹, A.P. Kovtun¹, G.N. Tolmachev¹

Abstract. The results of interdisciplinary studies of ferroelectric heterostructures obtained using a fundamentally new technology developed in the Laboratory of Physics of Thin Ferroelectric Films of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (SSC RAS) are presented. The heterostructures of complex oxides obtained by this technology significantly exceed the best foreign samples in terms of

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: mukhortov1944@mail.ru

structural perfection and dielectric properties. A comprehensive study of the heterostructures of complex oxides (methods of X-ray diffraction analysis, studies of dielectric characteristics, studies of second harmonic generation, raman spectroscopy, high-resolution electron microscopy) allowed us to identify the main features of the use of such a new active medium in microwave microelectronics, optical range, in devices on surface acoustic waves, in micro-sensors, as well as to develop and create prototypes at the SSC RAS. The region of the most optimal film thicknesses for use in microwave control devices is between 25 and 50 nm. This area is characterized by a maximum controllability coefficient and minimal dielectric losses. Moreover, the methods of X-ray diffraction analysis make it possible to unambiguously determine the mechanism of film growth and establish the expected controllability coefficient.

A micro-sensor developed at the SSC RAS based on nanoscale ferroelectric heterostructures with a threshold sensitivity of $\Delta I/I \approx 10^{-9} \dots 10^{-10}$ and operating in the frequency range $10^{-4} \dots 10^7$ Hz will make it possible to create diagnostic systems for complex mechanical systems in the shortest possible time. It is shown that when using a thin ferroelectric film as an active element in a device on surface acoustic waves, it is possible to double the operating frequency of the converter due to the formation of a periodic domain structure in the film, which is a photonic crystal. By changing the external polarizing voltage on the film electrodes, converters with an electrically adjustable electromechanical coupling coefficient can be created.

Keywords: thin films, ferroelectric heterostructures, microelectromechanical systems, high-resolution electron microscopy, X-ray diffraction analysis, planar electrodes, Raman scattering, second harmonic generation, phase shifter, microsensor.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования сегнетоэлектрического состояния в тонких пленках проводятся в Южном научном центре Российской академии наук (ЮНЦ РАН) с 2004 г. сотрудниками лаборатории физики тонких сегнетоэлектрических пленок под руководством В.М. Мухортова. Лаборатория после организации ЮНЦ РАН была переведена в полном составе из Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук. Результаты исследований сегнетоэлектрических гетероструктур изложены в двух монографиях, 230 научных статьях в престижных отечественных и зарубежных журналах, в 150 докладах на международных и отечественных конференциях. Проведена внешняя экспертиза качества наноразмерных сегнетоэлектрических пленок путем исследований их в лучших зарубежных и отечественных лабораториях. В настоящей статье мы приводим, на наш взгляд, наиболее важные результаты исследования сегнетоэлектрических гетероструктур, которые могут послужить основой для новой микроэлектроники – сегнетоэлектроники.

Исследования, направленные на выяснение особенностей проявления сегнетоэлектрического состояния в пленках, стимулируются возможностями применения в электронно-управляемых устройствах сверхвысокочастотного диапазона, в оптических сверхбыстрых аналоговых модуляторах, в различных преобразователях физических величин

в электрический сигнал, в долговременной памяти, включая многобитовую для искусственного интеллекта.

Движение в область наноразмерного состояния сегнетоэлектриков ставит изучение взаимного влияния электрических, зарядовых и деформационных полей на фундаментальные свойства сегнетоэлектриков в ряд наиболее актуальных задач в научном и практическом плане, поскольку свойства в наноразмерных структурах могут радикально отличаться от свойств гомогенных сегнетоэлектриков. Решение такой задачи даст огромный экономический эффект, который можно показать на одном примере – проблеме создания сканирующих фазированных антенных решеток высокого разрешения (САРВР). Применение наноразмерных сегнетоэлектриков позволит впервые сформировать зеркало антенны из однотипных чипов, включающих элементы пространственного возбуждения излучения и интегрированные фазовращатели на единой подложке. Данное решение позволит снизить количество управляющих сигналов до $2N$ для решетки из N элементов (вместо N^2 в существующих аналогах); уменьшить в сотни раз энергетические затраты на управление; обеспечить быстроедействие до единиц пикосекунд; снизить массогабаритные характеристики в тысячи раз и во столько же раз уменьшить стоимость таких антенн. Новая САРВР будет использоваться не только в системах управления вооружением, но и в радиолокации широкого назначения: авиационных

и наземных системах наблюдения и информационного обеспечения, управления воздушным движением, системах связи, радиопеленгации и радиовидения высокого разрешения, то есть иметь чрезвычайно обширный рынок сбыта. Особо отметим, что уже сейчас указанная САРВР может стать альтернативой существующих аналогов, превосходя их по всем вышеперечисленным параметрам, и будет несомненно востребована в Вооруженных силах Российской Федерации для организации и развертывания своей локальной сотовой сети на поле боя (для этого формируются военные подразделения, оснащенные мобильными ретрансляторами и антеннами сотовой связи, они могут оперативно развернуть сеть там, где ее не было, и предоставить устойчивую и защищенную связь), а также для реализации так называемых РЛС (радиолокационные станции) поля боя – наземной разведки, предназначенных для обнаружения личного состава и боевой техники противника. РЛС наземной разведки могут обнаруживать и низколетящие воздушные цели – вертолеты, беспилотные летательные аппараты – на дальностях от 5 до 30–60 км. Обладая высокими характеристиками, САРВР позволит развернуть защищенные средства связи и автоматизации, видео-конференцсвязи, помехозащищенной спутниковой связи, а также организовать работу коммутационного оборудования и передачу сигналов боевого управления по различным каналам.

Бурное развитие микроэлектроники обеспечило решение проблем создания анализирующих подсистем при существенном отставании сенсорных, базирующихся в основном на старых традиционных технологических методах и являющихся узким местом в создании новых диагностирующих комплексов. Причиной этой диспропорции является построение сенсоров на основе индивидуальных конструктивных решений. Микроэлектромеханические системы (МЭМС) в значительной мере снимают эти различия, так как становится возможным использовать единые технологические методы в области как расчета, так и изготовления сенсорных систем. Количество принципов, на которых формируются датчики преобразования физических величин в электрические на основе МЭМС, сводится к двум конструкциям: тонкой консольной или заземленной по концам балке и мембране. На базе этих конструкций создаются различные акселерометры, датчики давления, температуры, гироскопы и т.д. Преобразование физических величин в электри-

ческие проводится посредством измерения деформации чувствительного элемента под действием внешнего физического воздействия. Для этого используется тензорезистивное или емкостное детектирование. Оба этих способа имеют серьезные недостатки. Пороговая чувствительность этих двух способов преобразования к относительной деформации приблизительно равна $\Delta l/l \approx 5 \cdot 10^{-7}$. Использование сегнетоэлектрических пленок позволяет качественно расширить возможности МЭМС, так как чувствительность к динамической деформации датчиков, основанных на этой новой среде, возрастает до $10^{-9} \dots 10^{-10}$, и функционирование подобных преобразователей не требует источников стабилизированного напряжения, так как они являются сенсорами генераторного типа. При этом открываются перспективы для создания устройств следующего поколения МЭМС, например тепловизоров высокого разрешения на основе пирозлектрического эффекта, акустических фазированных антенных решеток, генераторов энергии, микронасосов, газоанализаторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Междисциплинарные исследования наноразмерных сегнетоэлектрических гетероструктур стали возможными благодаря тому, что в лаборатории разработан принципиально новый способ их создания [1]. Суть его – не стремиться к уменьшению неравновесности системы осаждения, как обычно делается при существующих способах осаждения тонких пленок, а наоборот, еще более усилить ее до развития эффектов самоорганизации, приводящих к образованию в высокочастотном сильноточном γ -разряде устойчивого плазменного кристалла. При его взаимодействии с поверхностью подложки происходит образование монокристаллической гетероструктуры с атомарно-гладкой поверхностью. Этот способ был реализован на разработанной нами технологической установке «Плазма 50 СЭ», которая изготавливается в обществе с ограниченной ответственностью научно-производственной фирме «ЭЛИТЕХ» (г. Воронеж, Россия). Получаемые на данной установке гетероструктуры сложных оксидов по структурному совершенству и диэлектрическим свойствам значительно превосходят лучшие зарубежные образцы.

2. Исследования гетероструктуры $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ (BST) на (001) MgO осуществляли с помощью вы-

сокоразрешающей электронной микроскопии [2], которая позволяет напрямую визуализировать атомное строение сегнетоэлектрической пленки и границы раздела пленка – подложка. Работа проводилась на электронном микроскопе Tescan G230ST и FEI Titan 80-300 с широкоугловым детектором темного поля в просвечивающем-растровом режиме (HAADF STEM) при ускоряющем напряжении 300 кВ. Установлено, что пленки BST толщиной 1,5–1100 нм растут в монокристаллическом состоянии по слоевому механизму Франка – Ван дер Мерве с атомарно-гладкой поверхностью; образование посторонних фаз за счет химических реакций на границе раздела пленка – подложка не обнаружено; релаксация напряжений за счет различия параметров решетки BST и MgO происходит посредством образования дислокаций несоответствия с векторами Бюргерса типа a BST $\langle 100 \rangle$; в пленках до 12 нм дислокации несоответствия расположены выше границы раздела, а с увеличением толщины расстояние между дислокациями уменьшается, они опускаются на границу раздела и образуют регулярную дислокационную сетку с периодом следования 3,6 нм при отсутствии пронизывающих дислокаций в основной толщине пленки. Расчетный период следования дислокаций несоответствия с учетом параметров решеток для объемных материалов BST и MgO составляет 3,75 нм. На основе метода анализа геометрической фазы показано, что пленки толщиной 6–12 нм на MgO испытывают растягивающие напряжения, а при увеличении толщины – сжимающие. Таким образом, процессы релаксации деформации, определяющие степень механической разгрузки наноразмерной пленки BST, прежде всего связаны с генерацией в ней дислокаций несоответствия и физически отвечают наличию скольжения пленки по поверхности подложки без отрыва от нее.

3. С помощью методов рентгендифракционного (ДРОН-4-07) анализа (Θ – 2Θ -сканирования, 2Θ – ω -сканирования, ϕ -сканирования, метода скользящего падения рентгеновского пучка, съемки в симметричной и асимметричной брэгговской геометрии) установлено, что интенсивности рентгеновских дифракционных максимумов в пленках начиная с толщины 5 нм позволяли осуществлять полный рентгеноструктурный анализ [3]. Этот факт свидетельствует о высоком структурном совершенстве создаваемых гетероструктур. Для определения параметров ячейки пленки в плоскости подложки

(a и b) мы использовали по крайней мере четыре отражения: (204), (-204), (304), (-304) для параметра a и эквивалентный набор отражений (с перестановками между h - и k -индексом) для определения параметра b . Параметры решетки a и b рассчитывались в орторомбическом приближении. В пленках $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ на подложках (001)MgO сохраняется параллельная ориентация кристаллографических осей пленок и подложки, мозаичность (вертикальная разориентировка пленок) меньше $0,5^\circ$, а азимутальная разориентировка менее $1,0^\circ$. Установлено, что в монокристаллических гетероструктурах $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ с толщиной от 6 до 950 нм существует критическая толщина пленок $h_{cr} \sim 70$ нм, ниже которой в пленках присутствуют сжимающие напряжения, а выше – растягивающие. Из температурной зависимости параметров решетки в пленках при толщине как меньше, так и выше критической имеют место два фазовых перехода [4]. При наличии в пленках растягивающих напряжений (параметр вдоль нормали к подложке меньше параметра в плоскости подложки) происходят фазовые переходы второго рода из параэлектрической тетрагональной фазы в сегнетоэлектрическую aa -фазу и далее в r -фазу. При сжимающих напряжениях в пленках (параметр вдоль нормали к подложке больше параметра в плоскости подложки) происходят фазовые переходы второго рода из параэлектрической тетрагональной фазы в сегнетоэлектрическую c -фазу и далее в r -фазу. При толщине более 40 нм происходит возникновение нового механизма создания внутреннего деформационного поля за счет разницы в коэффициентах теплового расширения пленки и подложки, а также существенного вклада спонтанной деформации, возникающей при фазовом переходе. Такие пленки находятся в состоянии высоких деформационных полей сжатия, поэтому диэлектрическая проницаемость уменьшается. Рентгендифракционное исследование пленок при комнатной температуре выявило наличие особенностей в зависимости параметров элементарной ячейки пленки от ее толщины. Установлено, что параметры элементарной ячейки изменяются непрерывно и имеют два плато. В области толщин менее 40 нм параметры решетки незначительно изменяются при увеличении толщины пленки, причем параметры a и b (то есть в плоскости подложки) больше, чем параметр c (вдоль нормали к плоскости подложки), то есть в пленках присутствуют растягивающие напряжения в плоскости подложки.

В области толщин пленок ~40–100 нм происходит изменение параметров решетки, причем параметр решетки c вдоль нормали к подложке увеличивается и становится большим по сравнению с параметрами a и b в плоскости подложки, которые уменьшаются. При толщинах пленок более 100 нм параметры решетки пленки слабо зависят от толщины. При этом параметр c больше, а параметры a и b меньше соответствующих параметров массивного материала, что свидетельствует о том, что даже для очень толстых пленок отсутствует релаксация параметров ячейки к объемному состоянию. В толстых пленках присутствуют сжимающие напряжения в плоскости подложки.

4. Наблюдаемые особенности изменения деформационных полей в гетероструктурах BST – MgO с пленками различной толщины подтверждаются данными спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) [5]. Для получения спектров КРС использовали поляризованное излучение аргонового лазера ($\lambda=514,5$ нм) спектрометра Horiba Jobin Yvon T64000 и спектрометр/микроскоп Renishaw InViaReflex с NExT-фильтром, позволяющим записывать спектры в диапазоне от 10 см^{-1} и выше. Спектры регистрировали по схеме обратного рассеяния с помощью оптического микроскопа Leica, диаметр лазерного пучка на образце составлял порядка 1–2 мкм. Образцы располагали таким образом, чтобы кристаллографические оси подложки MgO были строго параллельны соответствующим осям лабораторной системы координат. Для проведения температурных измерений использовали криостат Linkam FDCS 196 и печь LinkamTS 1500. Отметим, что в монокристалле MgO не наблюдается эффект КРС первого порядка, что позволяет получать спектр КРС исключительно от исследуемой пленки BST.

Наблюдаемое в спектрах комбинационного рассеяния света резкое понижение частоты и передемпфированный характер $E(\text{TO})$ мягкой моды свидетельствуют о резком уменьшении двумерных напряжений в пленках при $h < h_c$. На основе анализа правила отбора и поляризационных характеристик спектров КРС показано, что пленки BST-0,8 с толщинами более 50 нм при комнатной температуре являются c -доменными и находятся в тетрагональной c -фазе, пленки с толщинами менее 50 нм являются a -доменными и находятся в орторомбической aa -фазе. На основе анализа поляризационных характеристик спектров КРС выявлено, что

пленки $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ с толщинами более 50 нм являются c -доменными и находятся в тетрагональной c -фазе при комнатной температуре. Температурные исследования поляризованных спектров КРС первого порядка показали, что температура фазового перехода из параэлектрической фазы в сегнетоэлектрическую фазу зависит от толщины нелинейным образом и определяется величиной и знаком двумерных напряжений.

Исследование поляризованных спектров комбинационного рассеяния пленки титаната бария – стронция на подложке (001) MgO во внешнем электрическом поле, приложенном перпендикулярно направлению спонтанной поляризации, показало, что частичная деполяризация, наблюдающаяся в спектрах, свидетельствует об индуцированном полем понижении симметрии кристаллической решетки до моноклинной Pm с появлением компонент поляризации $\mathbf{P}$ ($P_1, 0, P_2$). Во внешнем электрическом поле мягкая мода E симметрии тетрагональной фазы расщепляется на A' и A'' моды, которые активны в разных геометриях рассеяния, что согласуется с понижением симметрии до моноклинной. Приложение внешнего поля приводит к наклону вектора поляризации, так что в моноклинной фазе появляется отличная от нуля компонента поляризации вдоль направления приложения поля.

Важно подчеркнуть, что при снятии электрического поля поляризационные характеристики спектров КРС в зазоре между электродами полностью восстанавливаются и соответствуют c -доменному состоянию. Отметим, что гистерезисные явления при увеличении и уменьшении внешнего напряжения не наблюдались.

5. Исследования генерации второй гармоники на пленках $\text{Ba}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{TiO}_3$ толщиной от 6–300 Å показали возможность 90-градусного переключения спонтанной поляризации за время меньше 0,5 наносекунд [6]. Этот результат по прямому измерению времен переключения поляризации в наноразмерных пленках впервые продемонстрировал, что в пленках до 6 нм нет физических ограничений для существования спонтанной поляризации и ее переключения под действием внешнего поля. Тот факт, что гетероструктуры сегнетоэлектриков на диэлектрических подложках с планарной топологией управляющих электродов хорошо сопрягаются с микрополосковыми СВЧ-устройствами, и практически полное отсутствие гистерезисных явлений при переключении позволяют делать вполне

оптимистический прогноз о возможности создания сверхскоростных оптических модуляторов для оптических волоконных линий на частоты по крайней мере до 200 ГГц.

6. Для исследования диэлектрических характеристик эпитаксиальных пленок, выращенных по слоевому механизму роста, на их поверхность наносили планарные электроды методами контактной фотолитографии и ионно-лучевого распыления алюминия с подслоем ванадия [7]. Планарные электроды представляли собой встречно-штыревую структуру из 440 штырей с диэлектрическим зазором между штырями 0,8 мкм при длине штыря 130 мкм с алюминиевыми электродами толщиной ~0,3 мкм. Для вычисления диэлектрической проницаемости определяли реальные геометрические размеры планарного конденсатора после литографического процесса на микроскопе Leitz Latimet. Емкость, проводимость и токи утечки планарных конденсаторов измеряли на измерителе параметров полупроводникового прибора Keithley 4200SCS на частоте 1 МГц при помощи зондовой станции PM-5 MicroTec. Установлено, что на зависимости диэлектрической проницаемости от толщины присутствуют два максимума – вблизи 35 нм и более размытый вблизи 15 нм. Коэффициент управляемости является важной характеристикой с точки зрения применения, который определяется из соотношения $K = \epsilon(E_{\text{упр}} = 0) / \epsilon(E_{\text{упр}} \neq 0)$, где $E_{\text{упр}}$ – управляющее электрическое поле. Он достигает максимального значения при толщинах, соответствующих максимальному значению диэлектрической проницаемости на функциональной зависимости $\epsilon = \epsilon(L)$, то есть в той области толщин, где присутствуют растягивающие напряжения в плоскости подложки.

Изменение емкости от внешнего напряжения частотой 0,05 Гц для пленок различной толщины показало, что диэлектрическая перестройка пленок возрастает с увеличением толщины. Учитывая, что при переходе от 6 нм к толщине пленок 12 нм расстояние между дислокациями уменьшается в 2 раза, можно связать увеличение коэффициента перестройки K с релаксацией внутреннего деформационного поля. Действительно, при толщине пленки в 6 нм расстояние между дислокациями равно 11–14 нм, а для толщины 12 нм, соответственно, 5–6 нм, при этом коэффициент управляемости возрастает с 1,03 до 1,2 соответственно. При толщине пленки 32 нм наблюдается релаксация напряжений,

что приводит к возрастанию коэффициента управляемости до 2,3.

Таким образом, область оптимальных толщин пленок для применения в управляющих устройствах СВЧ-диапазона находится между 25 и 50 нм. Эта область характеризуется максимальным коэффициентом управляемости и минимальными диэлектрическими потерями [8]. Более того, методы рентгеноструктурного анализа позволяют однозначно определить механизм роста пленок и установить ожидаемый коэффициент управляемости.

7. На протяжении более пяти десятилетий развитие современных компьютеров при неизменности их архитектуры на основе принципа фон Неймана приводила к экспоненциальному повышению их производительности. Однако в настоящее время этот экспоненциальный рост практически остановился. Это связано как с невозможностью уменьшения размеров активных элементов в силу физических ограничений, так и с трудностями по преодолению «узкого места фон Неймана» – транспортировки данных между памятью и процессором. Более того, в рамках этого принципа невозможно обрабатывать и читать информацию одновременно. Это приводит к низкой энергоэффективности при обработке больших объемов данных. Сегнетоэлектрические материалы с электрически переключаемой поляризацией имеют большие перспективы для энергонезависимых с малым потреблением энергии ячеек памяти. Чтобы удовлетворить растущие требования к вычислительной плотности и функциональности электроники следующего поколения, стало ясно, что необходимо преодолеть внутреннюю бистабильность сегнетоэлектриков, чтобы создать детерминированную многоуровневую поляризацию. Для удовлетворения требований электроники следующего поколения, связанных с реализацией в одном нейроморфном чипе (основном элементе аппаратного искусственного интеллекта) энергонезависимой памяти и логических вычислений, необходимы сегнетоэлектрические гетероструктуры, в которых полевое воздействие по известному протоколу приводило бы к нескольким устойчивым состояниям. Установлено, что для преодоления присущего сегнетоэлектрикам биполярного состояния (без ущерба для других важных свойств) необходимо создавать пленочные гетероструктуры со сложной доменной структурой с элементами самоорганизации при внешнем полевым воздействии. Это позволяет реализовать

энергонезависимые многобитовые запоминающие устройства с доступом к уровням памяти при специальном протоколе приложенного внешнего электрического поля. На примере гетероструктур Si + BST (*I*-слой) + сегнетоэлектрический *F*-слой (различной симметрии) + Al, в которых BST (толщиной 2–40 нм) выполняет роль регулятора сложности доменного строения, показана возможность выбора любого желаемого промежуточного значения поляризации посредством управления путем переключения за счет конкуренции между упругой и электростатической энергиями при различном по амплитуде внешнем полевым воздействии [9].

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

1. Анализ технических параметров электронно-управляемых СВЧ-устройств, достигнутых на сегодняшний день, показывает, что основными тенденциями их развития являются: повышение мощности входного высокочастотного сигнала, улучшение качества согласования, расширение полосы рабочих частот, увеличение динамического диапазона изменения управляемых параметров, обеспечение требуемого уровня подавления высших и комбинационных гармонических составляющих, применение цифровых методов для дискретного изменения управляемых параметров, повышение быстродействия, уменьшение массогабаритных показателей и интегральная микроминиатюризация. Использование известных управляемых элементов на основе ферритовых и полупроводниковых устройств в К-диапазоне наталкивается на непреодолимые трудности. Ферритовые фазовращатели не устраивают из-за слишком большого времени управления, неприемлемых при современных требованиях массогабаритных характеристик, высокой цены, больших потерь и энергетических затрат на управление. Полупроводниковые устройства чрезвычайно дороги, имеют ограничение по мощности, плохо совмещаются с микрополосковыми линиями (ручная сборка) и требуют высокой энергетики по цепям перестройки.

Использование гетероструктур с сегнетоэлектрическими пленками (ГСЭП) в электронно-перестраиваемых устройствах позволяет получить новое качество по сравнению с аналогами. Открывается возможность электронного управления диэлектрической проницаемостью при управля-

ющем напряжении меньше 20 В при токе $\sim 10^{-9}$ А, что на несколько порядков меньше по сравнению с ферритовыми управляющими устройствами или устройствами на основе полупроводников. Планарная технология создания волноведущих структур открывает возможность создания целого класса электронно-перестраиваемых устройств, таких как фазовращатели, перестраиваемые фильтры, линии задержки, оптические модуляторы, параметрические усилители, которые хорошо вписываются в уже развитую технологию СВЧ-интегральных схем. Использование пленочных сегнетоэлектриков с наноразмерными толщинами позволяет уменьшить зависимость диэлектрической проницаемости от температуры до нескольких процентов. Открывается возможность использования одной ГСЭП в различных диапазонах электромагнитного излучения путем изменения только топологии волноведущих электродов, причем физические ограничения активного элемента лежат в области сотен ТГц.

Наиболее простой структурой для реализации сегнетоэлектрических фазовращателей на основе положительной фазосдвигающей линии на частотах свыше 25 ГГц является структура управляемой копланарной линии передачи. Условно топологию фазовращателя на основе копланарной линии можно разбить на три основных части: вход – выход, управляемая копланарная линия, трансформатор сопротивления. Проектирование входа и выхода состоит в приближении волнового сопротивления к 50 Ом и возможности размещения в центральном полоске планарных конденсаторов, необходимых для развязки входа и выхода с цепью подачи управляющего напряжения. Отрезок копланарной линии содержит три основных параметра оптимизации: w – ширину центрального проводника, g – зазор между центральным проводником и землей, L – длину линии. Коэффициент перестройки для тонкой пленки сегнетоэлектрика определяется соотношением $(\epsilon_0 - \epsilon_{\max})/\epsilon_0 \cdot 100\%$, где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость пленки при нулевом напряжении смещения, $\epsilon_{\max}$ – диэлектрическая проницаемость пленки при максимальном напряжении смещения.

Расчет показывает, что наименьшие потери достигаются при ширине центрального полоска 22 мкм, а наибольшие – при ширине 4 мкм, при согласовании фазосдвигающей линии на 50 Ом. Но при этом относительный фазовый сдвиг для линии с шириной центрального полоска 22 мкм будет

меньше из-за меньшей индуктивности линии, чем для 4 мкм. В то же время вносимые потери ведут себя противоположным образом. Такая зависимость определяется главным образом качеством металла центрального полоска. Управление фазовым сдвигом линии или изменение диэлектрической проницаемости пленки осуществляется постоянным напряжением между центральным проводником и землей. Управляющее напряжение подается через развязывающее устройство, которое выполняется в едином цикле формирования топологии фазосдвигающей линии на поверхности сегнетоэлектрической пленки. Токи утечки при управляющем напряжении до 35 В планарных конденсаторов не превышают величины $1,2 \times 10^{-10}$ А, и это является большим преимуществом сегнетоэлектрических материалов по сравнению с альтернативными.

Для пленки толщиной 18 нм в полосе частот от 12 до 13 ГГц максимальный уровень вносимых потерь не превышает 4 дБ (при коэффициенте стоячей волны менее 2). В указанной полосе частот максимальный дифференциальный фазовый сдвиг при общей длине 10,7 мм и максимальном управляющем напряжении 30 В достигает 260° . Коэффициент качества фазовращателя превышает 60 град./дБ.

Для реализации фазовращателя на основе наноразмерной пленки $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$, представляющего собой периодически нагруженную сегнетоэлектрическими планарными конденсаторами линию передачи, емкость конденсаторов $C_{\text{вар}}$, нагружающих линию, выбирают такой, чтобы волновое сопротивление при их подключении снизилось до значения, близкого к 50 Ом. Цепь состоит из 14 идентичных секций, предусматривающих подключение шунтирующих сегнетоэлектрических конденсаторов, и двух оконечных секций, позволяющих подключить устройство к 50-омному СВЧ-тракту. Поскольку фазовая скорость в нагруженной варакторами линии является функцией напряжения смещения, приложенного к конденсаторам, которые подключены параллельно, то необходимо только одно управляющее напряжение. Цепь управления рассеивает очень низкую мощность, поскольку величина напряжения смещения не превышает 30 В, а токи управления меньше 10^{-9} А.

Такой фазовращатель пригоден для массового монолитного производства и востребован с точки зрения интегрального исполнения, поскольку процесс его изготовления совместим со стандартной технологией производства СВЧ монолитных ин-

тегральных схем. Кроме того, распределенный характер реактивных элементов цепи делает ее менее чувствительной к небольшим изменениям свойств перестраиваемой емкости, снижая требования к технологическим допускам и упрощая проектирование.

Предварительные исследования показали, что физических и технологических ограничений для создания на основе наноразмерных пленок $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ электронно-перестраиваемых устройств миллиметрового диапазона длин волн нет. Следует особо подчеркнуть отсутствие дисперсии диэлектрической проницаемости пленок $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ вплоть до частот терагерцового диапазона. Конкретная реализация таких устройств возможна при проведении одновременно фундаментальных и прикладных исследований (включая опытно-конструкторские работы) по оптимизации реальных конструкций.

2. Поверхностные акустические волны (ПАВ) широко применяются в современной микроэлектронике для создания фильтров, линий задержки, резонаторов и т.д. При этом очевидно, что с развитием систем связи постоянно требуется повышение рабочих частот устройств. В традиционных элементах, использующих ПАВ, повышение центральной частоты рабочей полосы частот достигается двумя способами – использованием звукопроводящей подложки с более высоким значением скорости звука и уменьшением геометрических размеров (ширины зазора и электрода) излучающего и приемного встречно-штыревого преобразователя. Оба эти способа имеют свои естественные ограничения (фиксированная скорость звука в подложке и большие технологические трудности получения литографическим методом зазоров малой ширины). Установлено, что при использовании в устройстве на поверхностных акустических волнах в качестве активного элемента тонкой сегнетоэлектрической пленки можно вдвое повысить рабочую частоту преобразователя за счет формирования в пленке периодической доменной структуры, представляющей собой фотонный кристалл. Периодически наполяризованные преобразователи, работающие в режиме второй брэгговской гармоник, обеспечивают возбуждение распространяющейся моды на частотах, вдвое превышающих частоту обычного преобразователя. Путем изменения внешнего поляризующего напряжения на электродах пленки

можно создавать преобразователи с электрически регулируемым коэффициентом электромеханической связи [10].

3. Исходя из факта, что военные машины (корабли, самолеты и наземные транспортные средства), а также инфраструктура как гражданского, так и военного назначения находятся в эксплуатации уже многие годы, следует признать, что происходит неизбежное их старение. Как ожидается, многие системы, которые были построены двадцать или тридцать лет тому назад, не будут заменены в ближайшем будущем системами нового поколения. Снижение вероятности техногенных катастроф при их дальнейшей эксплуатации возможно только при наличии систем контроля, адекватно отображающих как целостность конструкций, так и безопасный срок эксплуатации. Такой мониторинг позволит устранить дорогой и непомерно частый необоснованный ремонт. Все это служит необходимым обоснованием для постановки исследований по интегральной диагностике, связывающей в единый комплекс технологические, методологические и математические задачи, направленные на создание систем по обнаружению механических повреждений, предсказания их изменения и диагностирования в реальном времени. В связи с развитием персональных электронно-вычислительных машин, систем усилителей, плат сбора данных аналого-цифровых преобразователей на основе современной электроники основная проблема контроля переместилась в область разработки широкополосных датчиков.

В нашей лаборатории разработан микродатчик генераторного типа и созданы его опытные партии со следующими параметрами: чувствительность к относительной деформации 10^{-10} , динамический диапазон деформации 150 dB, емкость ≈ 800 пФ, диапазон частот $10^{-2} \dots 10^{-9}$ Гц, рабочие температуры $-190 \dots +200$ °C, размеры $0,5 \times 1 \times 0,01$ мм, масса не более 10^{-3} г. Срок службы подобного преобразователя составляет не менее 25 лет.

Кроме применения датчика в качестве преобразователя сигнала акустической эмиссии также возможна его эксплуатация как датчика вибрации для отслеживания «здоровья машин», где он может использоваться как контактный микрофон. Благодаря широкой полосе частот открывается возможность сравнивать сигнатуру вибраций нормально работающего оборудования и оборудования, требующего профилактического ремонта, и предупреждать

операторов оборудования о появлении изменений в тестовом сигнале. Диапазон применения при регистрации вибраций в профилактическом обслуживании весьма широк – от крупных машин с вращающимися деталями, например машин электростанций, до прецизионных станков при контроле степени их износа. Эмиссионный акустический сигнал, возникающий при появлении трещины, например, в силовой переборке, преобразуется в электрический сигнал с помощью двух линеек (сформированных из микродатчиков), расположенных в разных частях переборки. Координаты начала трещины и траекторию ее движения можно определить методами пассивной эхолокации по разности фаз, приходящей на каждый элемент линейки, акустической волны от устья трещины. Аналогичным образом решается задача определения координат пулевого пробоя жизненно важных для самолета зон.

При использовании большого количества датчиков возникают трудности с идентификацией обрабатываемым центром источника информации. Они преодолены созданием в линейке преобразователей дополнительных ячеек со специально сформированным направлением спонтанной поляризации – это формирует код линейки, который идентифицирует источник информации. Малая масса, большой динамический диапазон, высокие частоты позволяют применять датчики для адекватной диагностики взрывов, ударов, воздействия снарядов на объект, что принципиально невозможно при использовании других датчиков.

Неразрушающие системы диагностики, используемые в настоящее время в промышленности: акустическая тензометрия, многочастотная акустическая голография, ультразвуковая дефектоскопия, магнитно-акустическая тензометрия, рентгенография, использование длинноволновых ультразвуковых релеевских волн и т.д., – хорошо себя зарекомендовали при контроле на стадии изготовления отдельных узлов в заводских условиях и являются непригодными для осмотра и обслуживания больших и сложных по конструкции систем. Более того, они не способны дать характеристику работоспособности системы в целом, оценивать техническое состояние и сигнализировать о необходимости вмешательства человека. Все это стимулирует создание принципиально новых диагностических комплексов как составной части сложной системы, способных определять момент возникновения и степень повреждения при эксплуатации и выдавать рекомендации опе-

ратору о возможности дальнейшей работы сложной системы. Вполне очевидно, что в этом случае необходима разработка новых подходов для непрерывного мониторинга функционирования сложной системы. Коренным вопросом при создании таких систем является наличие первичных полифункциональных сенсоров нового поколения. Разработанный в ЮНЦ РАН микродатчик на основе наноразмерных сегнетоэлектрических гетероструктур с пороговой чувствительностью $\Delta f/f \approx 10^{-9} \dots 10^{-10}$, работающий в диапазоне частот $10^{-4} \dots 10^7$ Гц, позволит создать системы диагностики сложных механических систем в минимальные сроки.

Таким образом, исследование сегнетоэлектрических гетероструктур показало, что примененная авторами технология существенно превосходит зарубежные разработки. В ходе многолетней работы установлено, что в наноразмерных гетероструктурах наблюдается максимальное проявление деформационной и доменной инженерии, что со-

провождается возникновением новых свойств, на базе которых возможна реализация принципиально новых приборов функциональной микроэлектроники. Выявленная зависимость внутренних механических напряжений в пленках от их толщины позволяет управлять параметрами разрабатываемых устройств новым, недостижимым для объемных материалов способом. Использование гетероструктур с тонкими сегнетоэлектрическими пленками и реализация на их основе фотонных и фононных кристаллов позволяют надеяться на разработку СВЧ-устройств и преобразователей на ПАВ нового поколения. Малые геометрические размеры пленочных элементов обеспечивают возможность создания различных преобразователей с высокой граничной рабочей частотой. Установленная зависимость электрофизических свойств пленок как от электрических, так и от упругих механических напряжений может являться основой для энергонезависимых многобитовых устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухортов В.М., Юзюк Ю.И. 2008. *Гетероструктуры на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок: получение, свойства и применение*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 224 с.
2. Мухортов В.М., Головки Ю.И., Маматов А.А., Жигалина О.М., Кускова А.Н., Чувилин А.Л. 2010. Влияние внутренних деформационных полей на управляемость наноразмерных сегнетоэлектрических пленок в планарном конденсаторе. *ЖТФ*. 80(3): 77–82.
3. Мухортов В.М., Головки Ю.И., Бирюков С.В., Анохин А., Юзюк Ю.И. 2016. Влияние механизмов роста на деформацию элементарной ячейки и переключение поляризации в гетероструктурах титаната бария-стронция на оксиде магния. *ЖТФ*. 86(1): 93–98.
4. Анохин А.С., Разумная А.Г., Юзюк Ю.И., Головки Ю.И., Мухортов В.М. 2016. Фазовые переходы в пленках титаната бария-стронция на подложках MgO различной ориентации. *ФТТ*. 58(10): 1956–1963.
5. Анохин А.С., Головки Ю.И., Мухортов В.М., Стрюков Д.В. 2019. Структура и динамика решетки двухслойных гетероструктур титаната бария-стронция и слоистого титаната висмута разной толщины на подложке оксида магния. *ФТТ*. 61(11): 2178–2182. doi: 10.21883/FTT.2019.11.48425.489
6. Mishina E., Grishunin K., Bilyk V., Sherstyuk N., Sigov A., Mukhortov V., Ovchinnikov A., Kimel A. 2018. Ultrafast polarization switching of (BaSr)TiO₃ thin film by a single-period terahertz pulse in a vicinity of phase transition. *Ferroelectrics*. 532(1): 199–207. doi: 10.1080/00150193.2018.1499405
7. Стрюков Д.В., Мухортов В.М., Головки Ю.И., Бирюков С.В. 2018. Особенности сегнетоэлектрического состояния в двухслойных гетероструктурах на основе титаната бария-стронция. *ФТТ*. 60(1): 113–117. doi: 10.21883/FTT.2018.01.45297.186

8. Mukhortov V.M., Golovko Yu.I., Zelenchuk P.A., Yuzyuk Yu.I. 2009. Barium-strontium titanate based ferroelectric heterostructures. *Integrated Ferroelectrics*. 107(1): 83–91. doi: 10.1080/10584580903324733
9. Мухортов В.М., Головки Ю.И., Павленко А.В., Стрюков Д.В., Бирюков С.В., Ковтун А.П., Зинченко С.П. 2018. Особенности эффекта поля в структуре металл-сегнетоэлектрик-полупроводник при использовании многослойных сегнетоэлектрических пленок с различными структурными типами. *ФТТ*. 60(9): 1741–1747. doi: 10.21883/FTT.2018.09.46392.014
10. Бирюков С.В., Головки Ю.И., Масычев С.И., Мухортов В.М. 2016. Преобразователи поверхностных акустических волн с электрически регулируемой чувствительностью. *Наука Юга России*. 12(1): 11–15.

REFERENCES

1. Mukhortov V.M., Yuzyuk Yu.I. 2008. *Geterostruktury na osnove nanorazmernykh segnetoelektricheskikh plenok: poluchenie, svoystva i primeneniye*. [Heterostructures based on nanoscale ferroelectric films: production, properties and application]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 224 p. (In Russian).
2. Mukhortov V.M., Golovko Yu.I., Mamatov A.A., Zhigalina O.M., Kuskova A.N., Chuvilin A.L. 2010. Effect of internal deformation fields on the controllability of nanodimensional ferroelectric films in a planar capacitor. *Technical Physics*. 55(3): 395–399. doi: 10.1134/S1063784210030102
3. Mukhortov V.M., Golovko Yu.I., Biryukov S.V., Anokhin A., Yuzyuk Yu.I. 2016. Effect of growth mechanisms on the deformation of a unit cell and polarization reversal in barium-strontium titanate heterostructures on magnesium oxide. *Technical Physics*. 61(1): 91–96. doi: 10.1134/S106378421601014X

4. Anokhin A.S., Razumnaya A.G., Yuzyuk Yu.I., Golovko Yu.I., Mukhortov V.M. 2016. Phase transitions in barium–strontium titanate films on MgO substrates with various orientations. *Phys. Solid State*. 58(10): 2027–2034. doi: 10.1134/S1063783416100048
5. Anokhin A.S., Golovko Yu.I., Mukhortov V.M., Stryukov D.V. 2019. Lattice structure and dynamics of two-layer heterostructures of barium–strontium titanate and layered bismuth titanate of various thicknesses on a magnesium oxide substrate. *Phys. Solid State*. 61(11): 2155–2159. doi: 10.1134/S1063783419110039
6. Mishina E., Grishunin K., Bilyk V., Sherstyuk N., Sigov A., Mukhortov V., Ovchinnikov A., Kimel A. 2018. Ultrafast polarization switching of (BaSr)TiO₃ thin film by a single-period terahertz pulse in a vicinity of phase transition. *Ferroelectrics*. 532(1): 199–207. doi: 10.1080/00150193.2018.1499405
7. Stryukov D.V., Mukhortov V.M., Golovko Yu.I., Biryukov S.V. 2018. Specific features of the ferroelectric state in two-layer barium strontium titanate-based heterostructures. *Phys. Solid State*. 60(1): 115–119. doi: 10.1134/S1063783418010250
8. Mukhortov V.M., Golovko Yu.I., Zelenchuk P.A., Yuzyuk Yu.I. 2009. Barium-strontium titanate based ferroelectric heterostructures. *Integrated Ferroelectrics*. 107(1): 83–91. doi: 10.1080/10584580903324733
9. Mukhortov V.M., Golovko Yu.I., Pavlenko A.V., Stryukov D.V., Biryukov S.V., Kovtun A.P., Zinchenko S.P. 2018. The field effect in a metal–ferroelectric–semiconductor system of multilayer ferroelectric films with various structure types. *Phys. Solid State*. 60(9): 1786–1792. doi: 10.1134/S1063783418090202
10. Biryukov S.V., Golovko Yu.I., Masyshev S.I., Mukhortov V.M. 2016. [Surface acoustic wave converters with electrically adjustable sensitivity]. *Nauka Yuga Rossii*. 12(1): 11–15. (In Russian).

Поступила 28.10.2022