

УКД 539.23539.216.2

СТРУКТУРА, ДИНАМИКА РЕШЕТКИ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В ДИАПАЗОНЕ 0.1–2.5 ТГц ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК НИОБАТА БАРИЯ-СТРОНЦИЯ

© 2022 г. Д. В. Стрюков^{1, *}, А. А. Мамрашев², В. Д. Анцыгин², К. А. Окопруг²,
Д. Е. Уткин^{3, 4}, О. Н. Шевченко⁴, А. В. Павленко^{1, 5}

¹Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук,
пр. Чехова, 41, Ростов-на-Дону, 344006 Россия

²Институт автоматизации и электрометрии СО Российской академии наук,
пр. Академика Коптюга, 1, Новосибирск, 630090 Россия

³Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО Российской академии наук,
пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090 Россия

⁴Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090 Россия

⁵Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета,
пр. Стачки, 194, Ростов-на-Дону, 344090 Россия

*e-mail: antvpr@mail.ru

Поступила в редакцию 08.07.2021 г.

После доработки 22.09.2021 г.

Принята к публикации 27.09.2021 г.

Исследованы структура, динамика решетки и диэлектрические свойства с использованием методов терагерцовой спектроскопии гетероэпитаксиальных пленок $\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$, выращенных на подложке MgO (001) методом ВЧ-катодного распыления в атмосфере кислорода. Установлено, что пленки являются гетероэпитаксиальными, однородными и характеризуются высоким структурным совершенством. При анализе спектров комбинационного рассеяния от пленки, измеренных при разных температурах в интервале 299–433 К, выявлены связанные с фазовым переходом особенности в поведении отдельных мод при $T \approx 390 (\pm 10)$ К. Показано, что деформация элементарной ячейки как в плоскости сопряжения с подложкой, так и в перпендикулярном к ней направлении может сохраняться и в пленках ниобата бария-стронция толщиной 2.4–2.5 мкм. Предположительно, это является причиной усиления размытия сегнетоэлектрического фазового перехода по данным спектроскопии КРС, а также изменения диэлектрических свойств в терагерцовой области частот.

Ключевые слова: ниобат бария-стронция, сегнетоэлектрик, тонкие пленки, гетероэпитаксия

DOI: 10.31857/S0002337X22010122

ВВЕДЕНИЕ

Кислородсодержащие сегнетоэлектрические и диэлектрические материалы в настоящее время перспективны для развития нового поколения устройств приема, обработки и хранения информации на основе их интеграции с технологиями современной микроэлектроники [1, 2], а также в качестве катализаторов и полифункциональных структур [3]. Растет потребность в устройствах, использующих излучение терагерцового диапазона частот, для применения в различных областях: от медицины и биологии до вычислительной техники и систем коммуникации [4, 5]. Твердые растворы $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN_x) — одни из самых ярких представителей этой группы [6], возникновение спонтанной поляризации в них обусловлено

смещением атомов металлов Ba^{2+} , Sr^{2+} и Nb^{5+} относительно кислородных плоскостей, а неупорядоченность структуры (катионы Ba^{2+} и Sr^{2+} случайным образом заполняют соответствующие позиции [6]) является главной причиной проявления релаксорных свойств.

Высокие величины диэлектрической проницаемости, электрооптического и пироэлектрического коэффициентов делают весьма перспективным применение не только монокристаллов и керамик, но и тонких пленок SBN_x в устройствах микроэлектроники и высокочастотной техники [7]. В частности, SBN — потенциальный кандидат для использования в электрооптических модуляторах, а для их интеграции в современные технологические процессы необходимы именно тон-

кие пленки [8, 9]. Наиболее востребованными подложками в случае отмеченных выше приложений является MgO различных ориентаций. В плоскости сопряжения (001) при выращивании пленок SBN_x при прямом эпитаксиальном росте на подложках MgO (001) величина рассогласования решеток пленка–подложка составляет 1.4–1.8%. При эпитаксиальном росте на подложке MgO (001) пленка Sr_{0.5}Ba_{0.5}Nb₂O₆ (SBN50) (именно этот состав изучается в данной работе) формируется с хорошо ориентированной полярной осью [001] в направлении нормали к плоскости подложки, а в плоскости сопряжения наблюдаются несколько вариантов ориентаций кристаллографического направления [100] SBN относительно направления [100] MgO: 0°, ±18.43°, ±30.96° или же их комбинация [10–12].

В монокристаллах SBN50 размытый фазовый переход из неполярной фазы *P4b2* в полярную *P4bm* происходит при $T \sim 350$ К [6], а в его окрестности наблюдаются аномалии в диэлектрических и поляризационных характеристиках, оптических свойствах (значительно меняется анизотропия), динамике решетки и структурных характеристиках. В тонких пленках эти исследования проводились достаточно редко, однако их важность как в теоретическом плане (например, для понимания закономерностей проявления размерных эффектов), так и в прикладном аспекте (зависимость свойств от температуры), с нашей точки зрения, не вызывает сомнений.

Цель данной работы – исследование фазового состава, кристаллической структуры, динамики решетки (при $T = 290–440$ К) и диэлектрических свойств (при $f = 0.1–2.5$ ТГц) гетероэпитаксиальных пленок SBN50, выращенных методом катодного ВЧ-распыления на подложке MgO (001).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Газоразрядное ВЧ-напыление пленки Sr_{0.5}Ba_{0.5}Nb₂O₆ на подложку MgO (001) проводилось на установке “Плазма-50-СЭ” по технологии [13]. Структурное совершенство пленок, параметры элементарной ячейки, а также ориентационные соотношения между пленкой и подложкой устанавливались рентгенографически на многофункциональном рентгеновском комплексе РИКОР (CuK_α-излучение).

Изображения пленки в поперечном сечении были получены методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе SU8220 (Hitachi, Япония). Подготовка образцов включала механическую шлифовку поперечного скола с зерном 0.1 мкм и осаждение на поверхность слоя

золота толщиной ~10 нм магнетронным способом на установке Q150T ES (Quorum, Англия). Для фиксации и предотвращения разрушения поперечного скола образца при шлифовке использовалась эпоксидная смола (Allied, США).

Измерения спектров комбинационного рассеяния света (КРС) проводились на стенде, состоящем из микроскопа Orthoplan (Leitz) и многоканального спектрометра SP2500i (Princeton Instruments). Для возбуждения КРС использовалось излучение твердотельного лазера Excelsior (Spectra Physics) с $\lambda = 532.1$ нм с мощностью излучения на образце ~20 мВт. Спектры были откалиброваны по спектру неоновой лампы, точность калибровки ~1 см⁻¹, спектральное разрешение 2.5 см⁻¹. Измерены спектры КРС для двух поляризационных условий: *VV* и *VH*, поляризация падающего излучения параллельна одной из сторон стекла. Образец устанавливался в прокачанной азотной оптический криостат THMS350V (Linkam) для проведения измерений при разных температурах.

Исследования диэлектрической проницаемости пленок при комнатной температуре в диапазоне частот $f = 0.1–2.5$ ТГц были выполнены методом импульсной широкополосной терагерцовой спектроскопии. Проанализированы две серии терагерцовых импульсов: сигнального E_{sam} (т.е. в присутствии образца) и опорного E_{ref} (т.е. полученного без образца). Отношение спектров сигнального и опорного импульсов представляло собой комплексный спектр пропускания $H = E_{sam}/E_{ref}$. На его основе рассчитан показатель преломления $\tilde{n} = n + ik$ с применением модели распространения терагерцового излучения в структуре пленка–подложка по аналогии с [14]. Компоненты комплексной диэлектрической проницаемости $\tilde{\epsilon} = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ выражены через комплексный показатель преломления: $\epsilon_1 = n^2 - k^2$, $\epsilon_2 = 2nk$. В расчетах использовались спектрально зависимые показатель преломления и коэффициент поглощения MgO из [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ изображения гетероструктуры SBN50/MgO(001) в поперечном сечении, полученном на СЭМ при различных увеличениях, показал, что пленка является достаточно однородной, при этом граница раздела пленка/подложка четкая, каверн и иных макроскопических дефектов, возникающих при росте пленок, не фиксировалось. Анализ профиля пленки в различных местах показал, что ее верхняя граница имеет волнистость, а толщина составляет от 2.41 до 2.55 мкм.

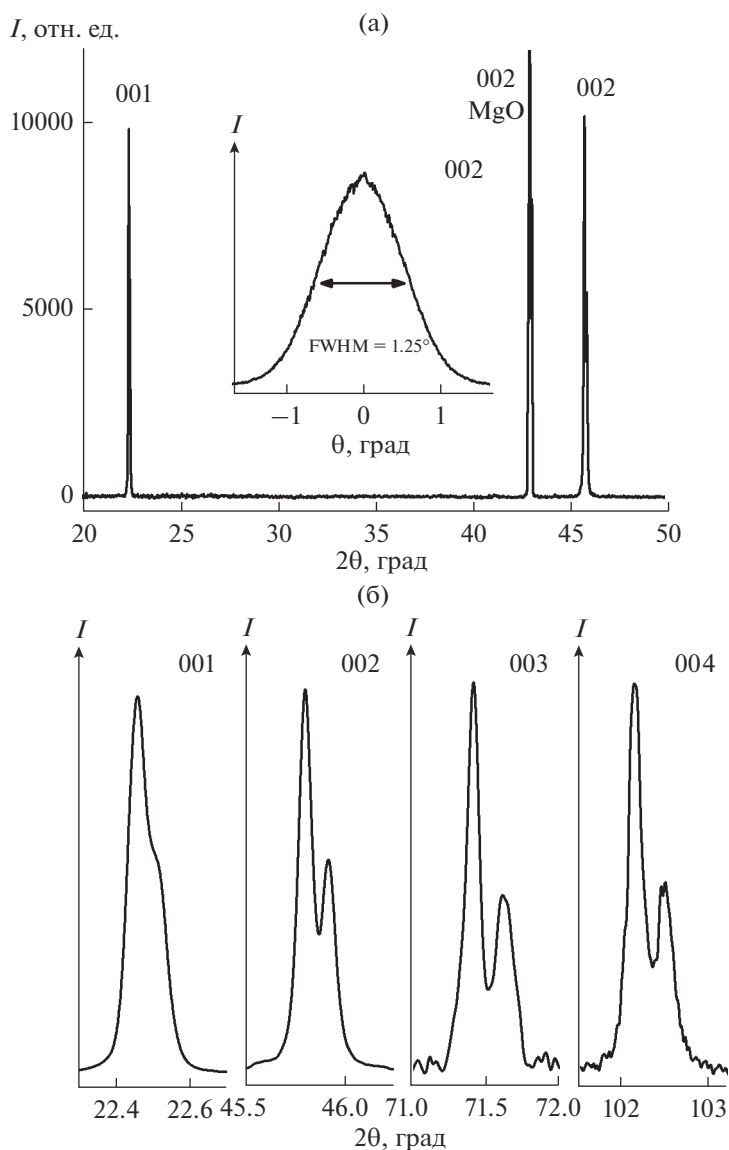


Рис. 1. Рентгенограмма θ - 2θ -сканирования исследованной пленки, на вставке – рентгенограмма θ -сканирования отражения 002 (а); рентгенограммы прецизионного θ - 2θ -сканирования отражений пленки 001 (б).

Проведенные рентгендифракционные исследования гетероструктуры SBN50/MgO (001), включающие θ - 2θ -съемки (рис. 1) и ϕ -сканирование отражений 221, 311 пленки и 113 подложки (рис. 2), во-первых, подтвердили отсутствие примесных фаз, во-вторых, позволили сделать вывод о сонаправленности кристаллографических осей [001] пленки и подложки. Полученный набор отражений при ϕ -сканировании пленки соответствует сосуществованию только двух ориентационных доменов с эпитаксиальными соотношениями $[001], [010], [100]_{\text{SBN}} \parallel [001], [310], [\bar{1}30]_{\text{MgO}}$ и $[001], [010], [100]_{\text{SBN}} \parallel [001], [3\bar{1}0], [130]_{\text{MgO}}$, симметрично расположенных относительно кристалло-

графических осей подложки. Для каждого ориентационного домена угол в плоскости сопряжения между кристаллографическими осями [100] и [010] γ равен 90° . Полученный поворот кристаллографических осей пленки составляет $\pm 18.43^\circ$ относительно осей подложки. Он, вероятнее всего, обусловлен тем, что в элементарной ячейке ниобата бария-стронция имеется по 4 кислородных октаэдра (NbO_6), повернутых на $+18.43^\circ$ и -18.43° относительно кристаллографической оси [001], по которым и идет сопряжение с подложкой.

Прецизионная θ - 2θ -съемка отражений 001 пленки выявила расщепление рефлексов, соответствующее $\text{CuK}_{\alpha 1}$ - и $\text{CuK}_{\alpha 2}$ -излучениям рентге-

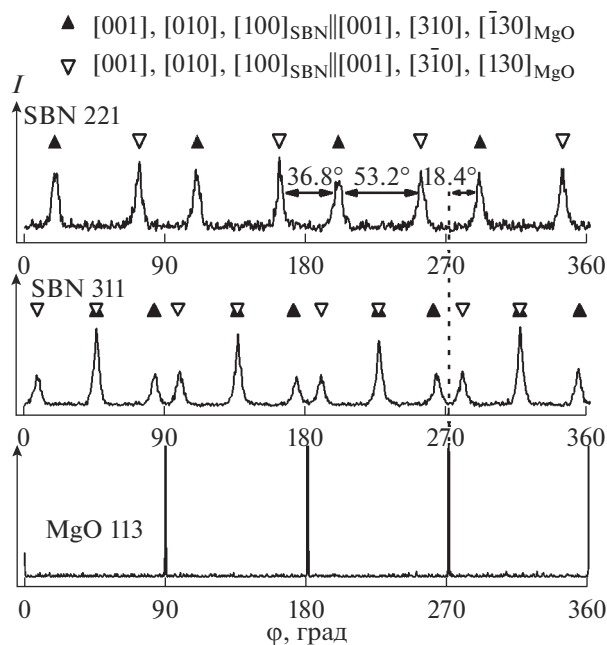


Рис. 2. Рентгенограммы ϕ -сканирования отражений 221, 311 пленки и 113 подложки.

новской трубки. Из полученных рентгенограмм определены параметры элементарной ячейки пленки в направлении нормали к подложке: $c = 0.3961$ нм с точностью до ± 0.0001 нм. Были получены θ - 2θ -рентгенограммы отражений hkl в асимметричной геометрии съемки, из анализа которых установлено равенство для двух ориентационных доменов пленки параметров элементарных ячеек в плоскости сопряжения с подложкой. Отсутствие сдвига максимума рентгеновских отражений при повороте по ϕ на 90° свидетельствует о равенстве параметров элементарной ячейки a и b для обоих ориентационных доменов и отсутствии наклона оси $[001]$ пленки в пределах точности эксперимента (т.е. $\alpha = \beta = 90^\circ$). Параметры элементарных ячеек обоих доменов равны $a = b = 1.241$ нм с точностью до 0.001 нм. Таким образом, получаем тетрагональную элементарную ячейку для каждого ориентационного домена со следующими эпитаксиальными соотношениями: $[001], [010], [100]_{\text{SBN}} \parallel [001], [310], [\bar{1}30]_{\text{MgO}}$ и $[001], [010], [100]_{\text{SBN}} \parallel [001], [3\bar{1}0], [130]_{\text{MgO}}$. Из сравнения параметров элементарной ячейки пленки с параметрами мишени ($a = b = 1.246$ нм, $c = 0.3944$ нм) определены величины однородных деформаций в пленке ($\epsilon = (a - a_0)/a_0$, где a_0 – параметр решетки объемного материала), вызванных осаждением на подложку MgO. Так, деформация в плоскости сопряжения $\epsilon_{11} = -4.3 \times 10^{-3}$, а деформация в пер-

пендикулярном направлении $\epsilon_{33} = 4.6 \times 10^{-3}$, относительное изменение объема $V/V_0 = 0.996$, где V_0 – объем элементарной ячейки объемного материала.

Степень совершенства пленки определена по разориентировке кристаллографических осей, определенных из кривых качания (вставка на рис. 1а) и ϕ -сканирований (рис. 2). Вертикальная разориентировка – 1.25° , азимутальная – 4° . Анализ полуширин отражений $00l$ позволил установить из построения Вильямсона–Холла, что размеры областей когерентного рассеяния D больше 200 нм и не вносят вклад в уширение рентгеновской линии, а следовательно, уширение связано только с микродеформациями в направлении нормали к поверхности подложки $\epsilon = \Delta c/c = 0.0006$.

На рис. 3 представлены спектры КРС пленки SBN50 при $T = 299$ – 433 К. Согласно правилам отбора для КРС существуют 135 колебательных мод (3×45), включая 3 акустические моды. Из пяти неприводимых представлений A_1, A_2, B_1, B_2 и E только A_2 является неактивным в КРС- и в ИК-спектрах. Моды симметрии B активны в КРС, а моды A_1 и E активны и в КРС, и в ИК. Однако соответствующие линии, наблюдаемые в экспериментальных спектрах кристаллов SBN x , достаточно широки, а их количество значительно меньше числа теоретически предсказанных мод [16]. Это связывается в первую очередь с катионной неупорядоченностью в структуре тетрагональных вольфрамовых бронз и, как следствие, с нарушением правил отбора по волновому вектору в центре зоны Бриллюэна. Также для мод с близкими частотами возможно их вырождение в одну полосу, что вносит дополнительный вклад в уширение КРС-спектра. Это существенно осложняет анализ спектров. Учитывая это, для выявления изменений в температурных зависимостях были изучены несколько параметров спектров: позиция и ширина основного пика при ~ 640 см^{-1} (спектры IV) и эффективное соотношение интенсивностей пиков при ~ 220 и ~ 640 см^{-1} . Параметры пика при ~ 640 см^{-1} линейно меняются с температурой и не выявляют каких-либо значимых особенностей. Соотношение $I(220)/I(640)$ в районе 378 К демонстрирует небольшой излом. Для определения особенностей, которые могли бы позволить выявить фазовый переход, который, по данным [10], сильно размыт и происходит в окрестности 373 – 473 К, был использован нецентрированный метод главных компонент.

На рис. 4 показаны первые три главные компоненты для двух поляризационных условий и температурные зависимости амплитудных мно-

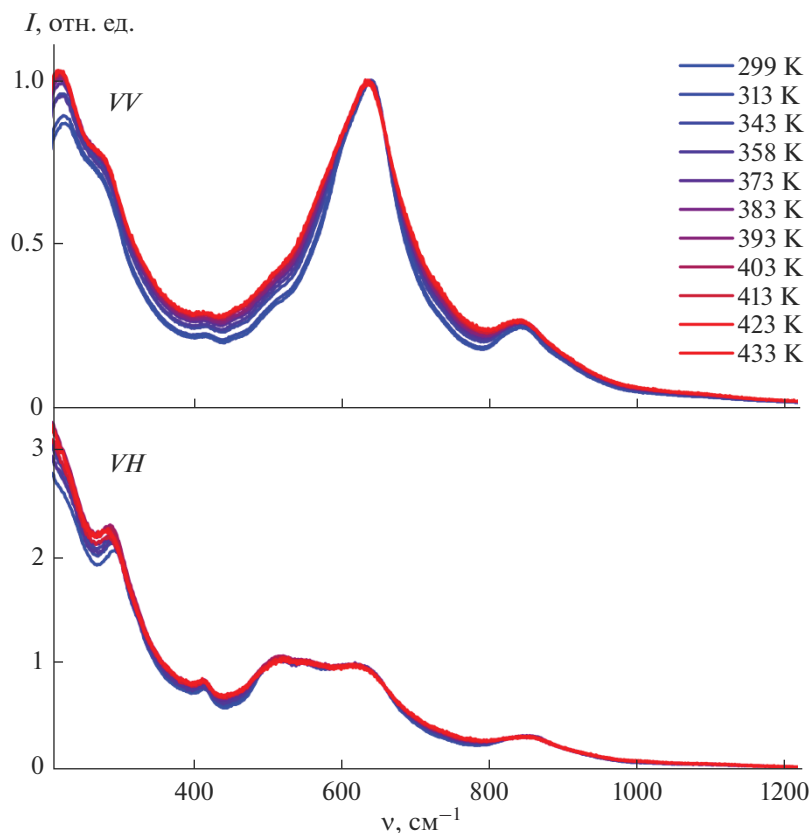


Рис. 3. Спектры КРС для пленки SBN в поляризационных условиях VV и VH при разных температурах.

жителей. Первая компонента приблизительно соответствует усредненному спектру, вторая отражает наиболее значимую вариацию в спектрах, а третья — эффекты следующего порядка. Температурная зависимость для главных компонент в VH -поляризационных условиях показывает большой разброс, который не позволяет выявить каких-либо изменений. Для второй компоненты РС2 в VV -поляризации, отвечающей за наиболее значимые вариации в спектрах КРС, хорошо разрешимы два пика: при ~ 620 и ~ 640 см^{-1} , соответствующие TO -модам октаэдров NbO_6 (см. рис. 4а). Также наблюдается заметная нелинейность в зависимости амплитуды компоненты РС2 от температуры с отклонением в районе 390 К. В связи с этим была предпринята попытка выявить особенности температурного поведения полосы при 600 см^{-1} с помощью разложения на два контура Лоренца.

На рис. 5 показаны температурные зависимости параметров этих двух контуров. Большинство параметров демонстрируют линейную зависимость, что согласуется с первичным анализом пика при 640 см^{-1} как целого (рис. 4). Для пика при ~ 620 см^{-1} угадывается излом в районе 396 К. Аналогичное поведение прослеживается для интен-

сивностей этих пиков. Хотя для всех трех параметров выявляются разные температуры особенностей на температурных зависимостях, большой разброс точек вполне допускает коррелированные изменения этих параметров. Более того, переход размыт, что дополнительно усложняет выявление его температуры. Исследование вариации спектров КРС, измеренных при разных температурах, указывает на особенность температурной зависимости при $T \approx 390 (\pm 10)$ К, которая соответствует температуре фазового перехода в SBN50, наблюдаемого с помощью других экспериментальных методик [17–20].

Результаты измерений комплексной диэлектрической проницаемости пленок SBN50 методом широкополосной импульсной терагерцовой спектроскопии при комнатной температуре представлены на рис. 6. Расчеты выполнены для подложки MgO толщиной 560 $\mu\text{м}$ и пленки SBN50 толщиной от 2.41 до 2.55 $\mu\text{м}$ (именно неточность определения толщины пленки главным образом определяла ошибку в расчетах). Измеренные диэлектрические терагерцовые свойства пленок SBN50 по величинам и характеру дисперсии качественно хорошо согласуются с расчетами диэлектриче-

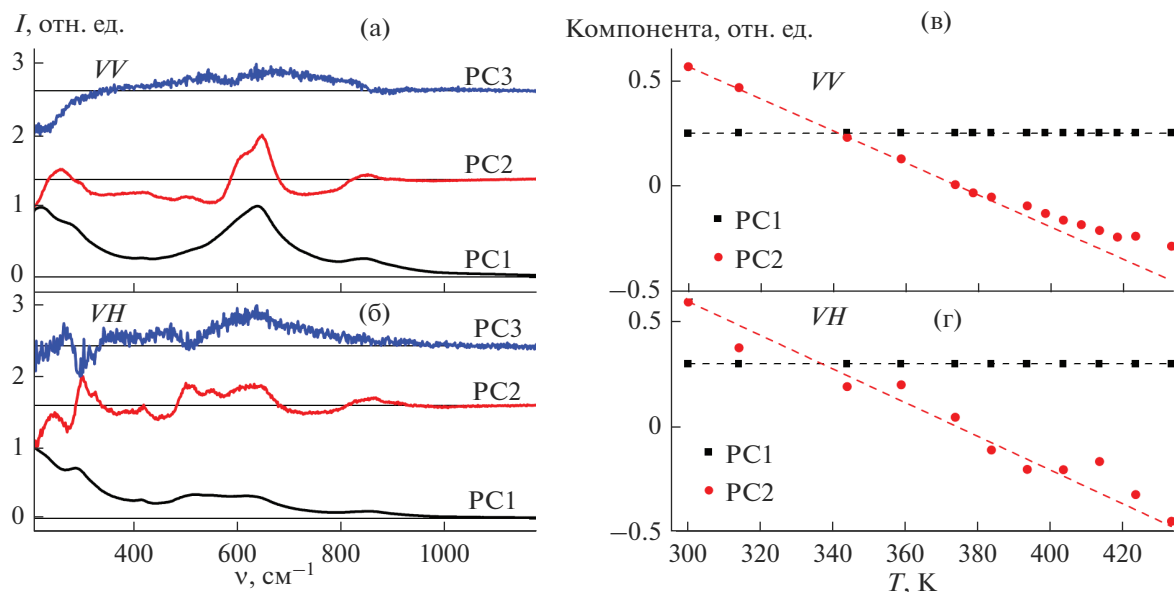


Рис. 4. Главные компоненты для выборки спектров, измеренных при разных температурах: а, б – спектральные представления главных компонент; в, г – температурные зависимости амплитудных множителей первых двух главных компонент: *VV*-поляризация (а, в), *VH*-поляризация (б, г).

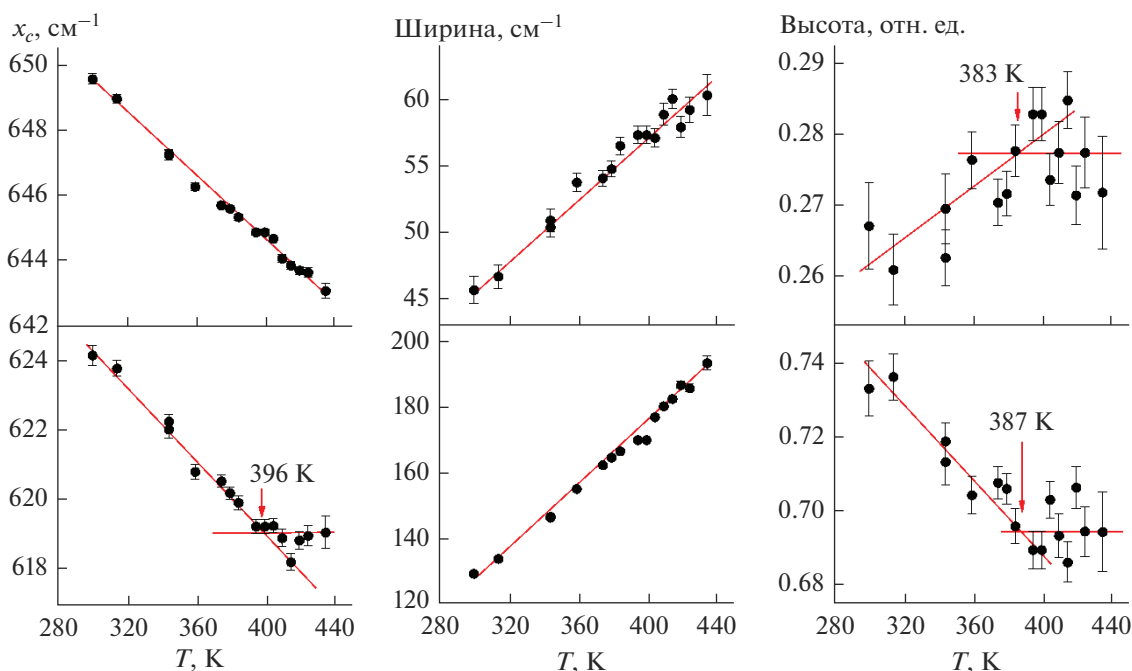


Рис. 5. Температурные зависимости параметров лоренцианов, использованных при описании полосы при $\sim 640 \text{ см}^{-1}$ (красные линии построены для наглядности, стрелки указывают на возможное пересечение двух линейных режимов).

ской проницаемости, полученной для монокристаллов SBN35 [20] и SBN61 [21] при анализе данных ИК-отражения. В монокристаллах наблюдались фоновые моды на частотах ~ 45 , ~ 72 и $\sim 100 \text{ см}^{-1}$. Для пленок в спектре мнимой части

диэлектрической проницаемости ϵ_2 наблюдается более размытый максимум на частоте 1.1 ТГц (37 см^{-1}) и рост ϵ_2 на высоких частотах до 2.5 ТГц (83 см^{-1}). Вероятнее всего, именно в окрестности этих частот целесообразно изучать влияние внеш-

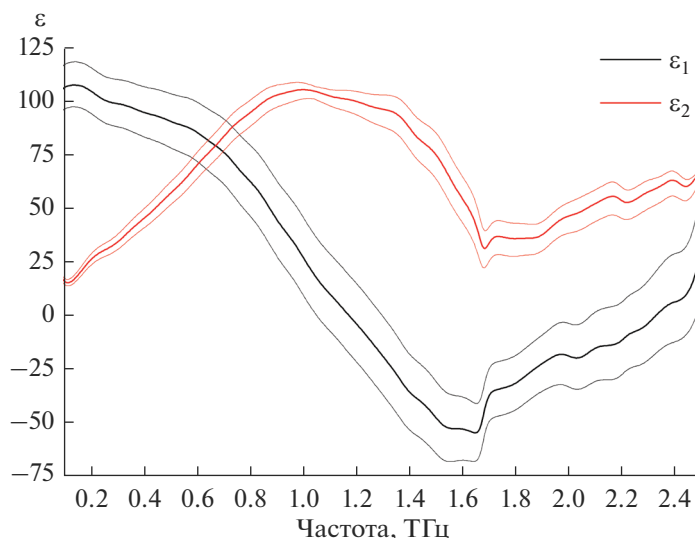


Рис. 6. Действительная ϵ_1 и мнимая ϵ_2 части диэлектрической проницаемости пленки SBN при комнатной температуре в терагерцовой области спектра (диапазон ошибок обозначен тонкими линиями).

них воздействий на диэлектрические свойства в терагерцовой области, что планируется в дальнейшем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным рентгенодифракционного анализа и СЭМ установлено, что полученные пленки SBN50 характеризуются высокими однородностью и структурным совершенством, при этом в них формируется только один тип равноценных ориентационных доменов с эпитаксиальными соотношениями $[001], [010], [100]_{\text{SBN}} \parallel [001], [310], [\bar{1}30]_{\text{MgO}}$ и $[001], [010], [100]_{\text{SBN}} \parallel [001], [3\bar{1}0], [130]_{\text{MgO}}$. Отметим, что ожидаемой в достаточно толстых пленках полной релаксации параметров элементарной ячейки пленки к объемным значениям не наблюдается — сохраняются сжимающие деформации элементарной ячейки в плоскости сопряжения с подложкой и растягивающие в перпендикулярном направлении.

При исследованиях спектров КРС пленки SBN50 в интервале $200\text{--}1200\text{ см}^{-1}$ обнаружена особенность на температурной зависимости при $T \approx 390 (\pm 10)\text{ К}$, что может соответствовать размытому фазовому переходу. В случае SBNx наиболее интенсивные линии спектра связаны с колебаниями системы Nb—O, а менее интенсивные линии с частотами преимущественно до 200 см^{-1} соответствуют движению катионов Ba^{2+} и Sr^{2+} . Присутствие в пятиугольных каналах атомов с разными массами может приводить к расщеплению колебаний, которые, согласно [20, 21], реги-

стрируются ниже 150 см^{-1} . Вероятнее всего, анализ именно этого частотного диапазона позволит в дальнейшем более детально изучить область фазового перехода в тонких пленках ниобатов бария-стронция.

Изменения диэлектрических свойств в терагерцовой области частот и усиление размытия фазового перехода в пленке SBN50 по данным спектроскопии КРС, в том числе с применением при обработке спектров нецентрированного метода главных компонент, обусловлены выявленной деформацией элементарной ячейки.

Полученные результаты целесообразно учитывать при разработке функциональных элементов на основе гетероструктур SBN50/MgO (001).

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят Н.А. Николаева за помощь в проведении терагерцовых и СЭМ-исследований.

Работа выполнена в рамках реализации гос. задания ЮНЦ РАН на 2022 г. и гранта Президента РФ № МК-678.2020.2.

Измерения терагерцовых диэлектрических свойств и спектров КРС выполнены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта гос. задания № 121032400052-6 с использованием оборудования ЦКП “Оптика и спектроскопия” ИАиЭ СО РАН.

Подготовка образцов и СЭМ-исследования выполнены при поддержке гранта Минобрнауки FSUS-2020-0029 на оборудовании ЦКП “ВТАН НГУ” и ЦКП “Наноструктуры” ИФП СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воротилов К.А., Мухортов В.М., Сизов А.С.* Интегрированные сегнетоэлектрики. М.: Энергоатомиздат, 2011. 175 с.
2. *Martin L.W., Rappe A.M.* Thin-Film Ferroelectric Materials and Their Applications // *Nat. Rev. Mater.* 2016. V. 2. P. 16087.
3. *Kaimieva O.S., Buyanova E.S., Petrov S.A., Tarakin N.V.* Bismuth- and Iron-Substituted Lanthanum Manganite: Synthesis and Structure // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2019. V. 64. № 4. P. 423.
4. *Mittleman D.M.* Perspective: Terahertz Science and Technology // *J. Appl. Phys.* 2017. V. 122. P. 230901.
5. *Tonouchi M.* Cutting-Edge Terahertz Technology // *Nat. Photonics.* 2007. V. 1. P. 97–105.
6. *Кузьминов Ю.С.* Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением. М.: Наука, 1982. 400 с.
7. *Kanno I.* Piezoelectric MEMS: Ferroelectric Thin Films for MEMS Applications // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2018. V. 57. № 4. P. 040101-1–040101-9.
8. *Cuniot-Ponsard M., Desvignes J.M., Bellemain A., Bridou F.* Simultaneous Characterization of the Electro-Optic, Converse-Piezoelectric, and Electroabsorptive Effects in Epitaxial (Sr,Ba)Nb₂O₆ Thin Films // *J. Appl. Phys.* 2011. V. 109. P. 014107.
9. *Gupta S., Sharma S., Ahmad T., Kaushik A.S., Jha P.K., Gupta V., Tomar M.* Demonstration of Efficient SBN Thin Film Based Miniaturized Mach Zehnder EO Modulator // *Mater. Chem. Phys.* 2021. V. 262. P. 124300.
10. *Pavlenko A.V., Zakharchenko I.N., Kudryavtsev Yu.A., Kiseleva L.I., Alikhadzhiev S.Kh.* Structural Characteristics of Thin Sr_{0.5}Ba_{0.5}Nb₂O₆ Films in the Temperature Range 20–500°C // *Inorg. Mater.* 2020. V. 56. № 11. P. 1188–1192. <https://doi.org/10.1134/S0020168520100118>
11. *Стрюков Д.В., Павленко А.В.* Деформация элементарной ячейки при прерывистом напылении пленок ниобата бария-стронция // *ПЖТФ.* 2019. Т. 45. № 23. С. 23–25. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2019.23.48714.17988>
12. *Willmott P.R., Herger R., Patterson B.D., Windiks R.* Experimental and Theoretical Study of the Strong Dependence of the Microstructural Properties of Sr_xBa_{1-x}Nb₂O₆ Thin Films as a Function of Their Composition // *Phys. Rev. B.* 2005. V. 71. № 14. P. 144114-1–144114-8. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.144114>
13. *Pavlenko A.V., Zinchenko S.P., Stryukov D.V., Fedorenko A.G., Nazarenko A.V.* Effect of Substrate Bias on the Crystal Structure and Morphology of Barium Strontium Niobate Films Grown by RF Cathode Sputtering // *Inorg. Mater.* 2021. V. 57. № 4. P. 377–382. <https://doi.org/10.1134/S0020168521040117>
14. *Анцыгин В.Д., Мамрашев А.А.* Диэлектрические и оптические свойства пленок ниобата-бария-стронция в области 0.2–1.3 ТГц // *Автометрия.* 2017. Т. 53. № 6. С. 92–96.
15. *Grischkowsky D., Keiding S.* THz Time-Domain Spectroscopy of High Tc Substrates // *Appl. Phys. Lett.* 1990. V. 57. № 10. P. 1055–1057. <https://doi.org/10.1063/1.104280>
16. *Amzallag E., Chang T.S., Pantell R.H., Feigelson R.S.* Raman Scattering by Sr_xBa_{1-x}Nb₂O₆ // *J. Appl. Phys.* 1971. V. 42. № 8. P. 3254–3256.
17. *Pugachev A.M., Zaytseva I.V., Malinovsky V.K., Surovtsev N.V., Ivleva L.I., Lykov P.A.* Studying the Nonlinear Optical Response from Local Polar Inhomogeneities in Strontium Barium Niobate Crystals of Different Chemical Composition // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2018. V. 82. № 3. P. 261–265. <https://doi.org/10.3103/S1062873818030206>
18. *Zaytseva I.V., Pugachev A.M., Surovtsev N.V., Ivleva L.I., Lykov P.A.* Optical Investigations of Fluctuation of Order Parameter in THz Range in Sr_xBa_{1-x}Nb₂O₆ Crystals with Different Chemical Compositions // *Ferroelectrics.* 2020. V. 560. № 1. P. 102–109. <https://doi.org/10.1080/00150193.2020.1722890>
19. *Pugachev A.M., Zaytseva I.V., Malinovsky V.K., Surovtsev N.V., Ivleva L.I., Lykov P.A.* Dependence of Acoustic Anomalies on Chemical Composition in Strontium Barium Niobate Crystals (from Conventional Ferroelectric to Relaxor) Probed by Brillouin Light Scattering // *Ferroelectrics.* 2019. V. 542. № 1. P. 21–27. <https://doi.org/10.1080/00150193.2019.1574657>
20. *Buixaderas E., Gregora I., Hlinka J., Dec J., Lukasiewicz T.* Raman and IR Phonons in Ferroelectric Sr_{0.35}Ba_{0.65}Nb₂O_{6,04} Single Crystals // *Phase Transitions.* 2013. V. 86. № 2–3. P. 217–229. <https://doi.org/10.1080/01411594.2012.715296>
21. *Buixaderas E., Savinov M., Kempa M., Veljko S., Kamba S., Petzelt J., Pankrath R., Kapphan S.* Infrared and Dielectric Spectroscopy of the Relaxor Ferroelectric Sr_{0.61}Ba_{0.39}Nb₂O₆ // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2005. V. 17. № 4. P. 653–666. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/17/4/008>