

УДК 538.956, 53.096

СТРУКТУРА, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ $\text{BiFeO}_3/\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6/\text{Pt}(001)/\text{MgO}(001)$

© 2023 г. А. В. Павленко^{1, 2, *}, Я. Ю. Матяш¹, Д. В. Стрюков¹, Н. В. Маломыжева²

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

²Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, пр. Стачки, 194, Ростов-на-Дону, 344090 Россия

*e-mail: antvpr@mail.ru

Поступила в редакцию 14.04.2023 г.

После доработки 07.07.2023 г.

Принята к публикации 07.07.2023 г.

С использованием метода ВЧ-катодного распыления в атмосфере кислорода изготовлена гетероструктура на основе мультиферроика феррита висмута и сегнетоэлектрика ниобата бария-стронция – $\text{BiFeO}_3(1000 \text{ нм})/\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6(1000 \text{ нм})/\text{Pt}(001)/\text{MgO}(001)$, в которой отсутствовали примесные фазы, а среднеквадратичная шероховатость поверхности составляла не более 1% от ее толщины. Установлено, что в гетероструктуре все слои выращены эпитаксиально: SBN-50 получен с формированием ориентационных доменов, развернутых в плоскости сопряжения на $\pm 18.4^\circ$ относительно осей подложки MgO, а слои ВFO и Pt – с ориентацией кристаллографических осей параллельно осям подложки MgO. Показано, что величина сегнетоэлектрической поляризации в материале при $U = 90 \text{ В}$ составляла 59.3 мКл/см^2 , а для описания закономерностей изменения относительной диэлектрической проницаемости (ϵ) гетероструктуры при $t = 25\text{--}250^\circ\text{C}$ достаточно учесть зависимости $\epsilon(t)$ для каждого из слоев. Обсуждаются причины выявленных закономерностей.

Ключевые слова: мультиферроик, диэлектрические характеристики, сегнетоэлектрик, тетрагональная вольфрамовая бронза

DOI: 10.31857/S0002337X23070126, **EDN:** QSGOST

ВВЕДЕНИЕ

Тонкие сегнетоэлектрические (СЭ) пленки привлекают к себе большое внимание благодаря перспективам применения в современных датчиках и сенсорах, устройствах памяти и микроэлектромеханических системах [1]. Для реализации целевых свойств в таких материалах (высокая температурная стабильность, высокие величины диэлектрической проницаемости, пьезо- и пироактивности и т.д.) важно обеспечить низкий ток утечки и низкие диэлектрические потери в широком диапазоне температур, стабильность при многократном переключении поляризации [2]. Характеристики СЭ-пленок, как свидетельствуют результаты экспериментальных исследований российских и зарубежных научных групп, связаны с особенностями их кристаллической структуры и микроструктуры, зависящих от условий получения. Наиболее распространенными методами получения пленок являются молекулярно-лучевая эпитаксия, импульсное лазерное напыление, магнетронное распыление и ВЧ-катодное. Большинство из них является многостадийными –

синтез и кристаллизация пленки проходят отдельными этапами. Развиваемый в России метод ВЧ-катодного распыления [3], в отличие большинства отмеченных выше методов, является одностадийным и с наилучшей стороны зарекомендовал себя при получении кислородсодержащих сегнетоэлектрических и мультиферроидных материалов со структурой типа перовскита [4], тетрагональной вольфрамовой бронзы [5] и фазы Ауривиллиуса. Важным технологическим фактором является синтез и последующее охлаждение пленок в этом случае при высоких давлениях чистого кислорода, что позволяет свести к минимуму причины возникновения кислородных вакансий в изготовленной гетероструктуре. Именно этот метод и был выбран для изготовления объектов в данной работе.

В случае монокристаллических и керамических материалов наиболее распространенным способом целенаправленного (контролируемого) изменения свойств является изменение химического состава [6]. Для изменения же свойств тонких пленок используют осаждение переходных

или буферных слоев, формирование многослойных гетероструктур [7], при этом электростатическая связь на границах раздела начинает играть важную роль [8]. Перспективный набор свойств может быть получен в многослойных структурах на основе компонентов, у которых, с одной стороны, достаточно близкие кристаллические структуры (это позволит формировать границу раздела высокого структурного совершенства), а с другой — существенно отличающиеся свойства. В частности, это может быть реализовано на основе феррита висмута (BiFeO_3 (BFO) — мультиферроик со структурой типа перовскита, температура Кюри (t_C) $\sim 910^\circ\text{C}$, температура Нееля $\sim 370^\circ\text{C}$, спонтанная поляризация ~ 100 мкКл/см²) [8] и ниобата бария-стронция ($(\text{Ba,Sr})\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN) — для конгруэнтного состава коэффициент линейного электрооптического эффекта $r_{33} = 250$ пм/В, пьезоэлектрический коэффициент 0.065 мкКл/(см² °C), $t_C \sim 75^\circ\text{C}$) [9].

Целью данной работы явилось установление закономерностей формирования структуры, диэлектрических и сегнетоэлектрических характеристик двухслойной гетероструктуры $\text{BiFeO}_3/\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$, выращенной на подложке Pt(001)/MgO(001).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Гетероструктуры $\text{BiFeO}_3/\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6/\text{Pt}(001)/\text{MgO}(001)$ с толщинами слоев феррита висмута и ниобата бария-стронция ~ 1000 нм были получены методом ВЧ-катодного распыления на двух установках с использованием технологии прерывистого напыления в соответствии с [10–12]. Давление кислорода при напылении пленок составляло 0.5–0.6 Торр, начальная температура подложки — 400°C . На первой стадии осаждался слой SBN-50 толщиной ~ 1000 нм, при этом образец охлаждался в атмосфере кислорода до температуры $\sim 30^\circ\text{C}$ и только после этого осуществлялось перемещение образца во вторую камеру для осаждения мультиферроика BFO толщиной ~ 1000 нм. В качестве мишеней для распыления использовались керамические диски соответствующего стехиометрического состава диаметром 50 и толщиной 3 мм.

Рентгендифракционные исследования проводили на многофункциональном рентгеновском комплексе “РИКОР” (гониометр с шагом до 0.001° (Crystal Logic Inc.); рентгеновская трубка БСВ21-Cu (АО “Светлана-Рентген”), сцинтилляционный точечный детектор (ООО ИТЦ “Радикон”)¹.

¹ Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация) (№ 501994).

Для исследования морфологии поверхности гетероструктуры, ее доменной структуры и процессов локального переключения использовался атомно-силовой микроскоп (АСМ) Ntegra Academia (фирма NT-MDT, Россия). Топография образцов была получена в полуконтактном режиме при помощи кремниевого кантилевера NS15/50 (фирма NT-MDT, Россия). Скорость сканирования фрагмента поверхности размером 2×2 мкм с разрешением 300 точек на строку составила 1 Гц. С использованием проводящего кремниевого кантилевера NSG01 с Pt-покрытием (фирма NT-MDT, Россия) в режимах силовой микроскопии пьезоотклика (СМП) и спектроскопии СМП исследовалась доменная структура образца. Обработка и анализ полученных сканов осуществлялись в программе Image Analysis [13].

Для диэлектрических измерений в перпендикулярном к поверхности направлении были сформированы конденсаторные структуры: в качестве нижнего электрода выступал слой платины, в качестве верхнего — сплав Ag–Pd (в дальнейшем — М), осажденный методом магнетронного распыления в атмосфере аргона на установке Emitech SC7620 через маску с диаметром отверстий 90–100 мкм.

Относительную диэлектрическую проницаемость (ϵ) на частоте измерительного электрического поля $f = 10^5$ Гц с амплитудой 40 мВ в диапазоне $25\text{--}250^\circ\text{C}$ измеряли с помощью LCR-метра Agilent 4980A и Linkam THMS600 stage. Измерения динамических петель диэлектрического гистерезиса ($P(U)$) на частоте 1 кГц проведены с помощью TFA-analyzer2000 и аналитической зондовой станции MST4000A. В программе Hysteresis Software для положительной и отрицательной ветвей $P(U)$ рассчитывали остаточную поляризацию (P_r^+ , P_r^-), коэрцитивное напряжение (U_c^+ , U_c^-), максимальную поляризацию (P_{\max}^+ , P_{\max}^-), а также величины $\Delta P_r = |P_r^+| - |P_r^-|$, $\Delta P_{\max} = |P_{\max}^+| - |P_{\max}^-|$ и $\Delta U_c = |U_c^+| - |U_c^-|$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Методом дифракции рентгеновских лучей были получены рентгенограммы образца BFO/SBN-50/Pt/MgO(001), на которых присутствовали только отражения от слоев гетероструктуры, проводящего слоя платины и подложки, что подтверждает отсутствие примесных фаз. На обзорной θ – 2θ рентгенограмме (рис. 1а) присутствовали только отражения от плоскостей семейства (00 l) слоев BFO, SBN-50 и Pt гетероструктуры, а на ϕ -сканах (рис. 1б) — четкие максимумы для каждого из слоев, что доказывает эпитаксиальный рост всех слоев гетероструктуры. Взаим-

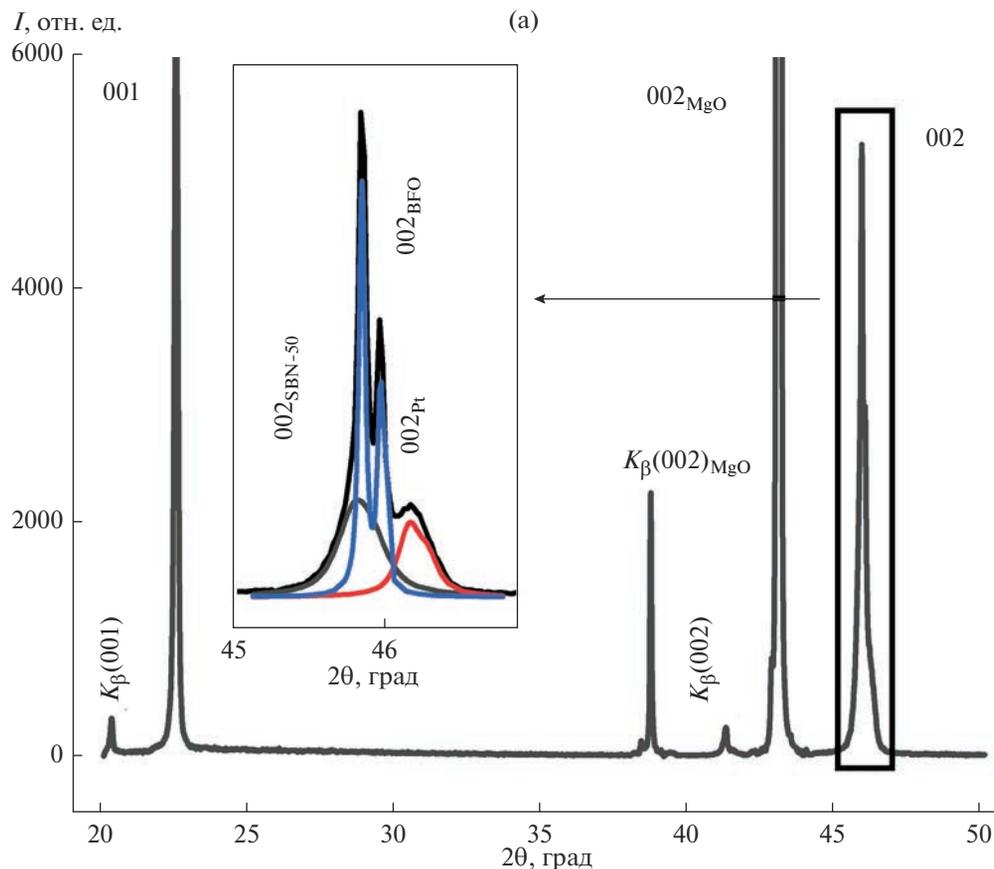


Рис. 1. θ - 2θ -рентгенограмма (а) и φ -сканирование рефлексов 221 (SBN-50), 113 (BFO), 113 (Pt) и 113 (MgO) (б) для гетероструктуры BFO/SBN-50/Pt/MgO; на вставке изображена прецизионная θ - 2θ -рентгенограмма рефлекса 002 с разложением на компоненты рассеяния.

ное расположение максимумов на φ -сканах слоев гетероструктуры и подложки указывает на то, что слой SBN-50 получен с формированием ориентационных доменов, развернутых в плоскости сопряжения на $\pm 18.4^\circ$ относительно осей подложки, а слои BFO и Pt получены с ориентацией кристаллографических осей параллельно осям подложки. При прецизионной съемке рефлексов 00 l (вставка на рис. 1а) видно, что рентгенограммы для гетероструктуры BFO/SBN-50/Pt/MgO представляют из себя суперпозицию отражений от слоев SBN-50, BFO и Pt. Из положений максимумов компонент, соответствующих рассеянию каждым из слоев, в тетрагональном приближении были рассчитаны параметры элементарных ячеек: $c_{\text{BFO}} = 3.957 \text{ \AA}$, $a_{\text{BFO}} = b_{\text{BFO}} = 3.96 \text{ \AA}$; $c_{\text{SBN}} = 3.961 \text{ \AA}$, $a_{\text{SBN}} = b_{\text{SBN}} = 12.41 \text{ \AA}$; $c_{\text{Pt}} = 3.937 \text{ \AA}$, $a_{\text{Pt}} = b_{\text{Pt}} = 3.90 \text{ \AA}$. Для тонких пленок BFO зачастую наблюдают моноклинную или ромбоэдрическую структуры, в которых присутствует небольшой наклон кристаллографических осей, однако в нашем случае не обнаружено признаков отклонения углов α , β и γ от 90° . Параметры элементарных ячеек c в направлении

нормали к поверхности подложки определены с погрешностью в 0.002 \AA , а параметры a в плоскости сопряжения – с погрешностью в 0.02 \AA . Параметры решетки объемного BFO составляют: $a = 3.962 \text{ \AA}$, $\alpha = 89.45^\circ$, а объемного SBN-50: $a = 12.47 \text{ \AA}$, $c = 3.940 \text{ \AA}$. Сравнивая полученные параметры решетки слоя BFO с параметрами объемного материала видно, что в пленке практически отсутствует деформация элементарной ячейки. При этом в слое SBN-50 в плоскости сопряжения деформация элементарной ячейки также незначительная, а в перпендикулярном направлении достигает 0.4%.

АСМ-изображения поверхности двухслойной гетероструктуры и однослойной пленки SBN-50 (рассматривалась для сопоставления) приведены на рис. 2. Видно, что поверхность BFO/SBN-50/Pt/MgO (рис. 2а) представлена четко различимыми ростовыми блоками преимущественно прямоугольной и трапециевидной форм, средний размер которых достигает $\sim 180 \text{ нм}$. Поверхность же пленки SBN-50/MgO (рис. 2б) состоит из довольно больших сросшихся между собой ро-

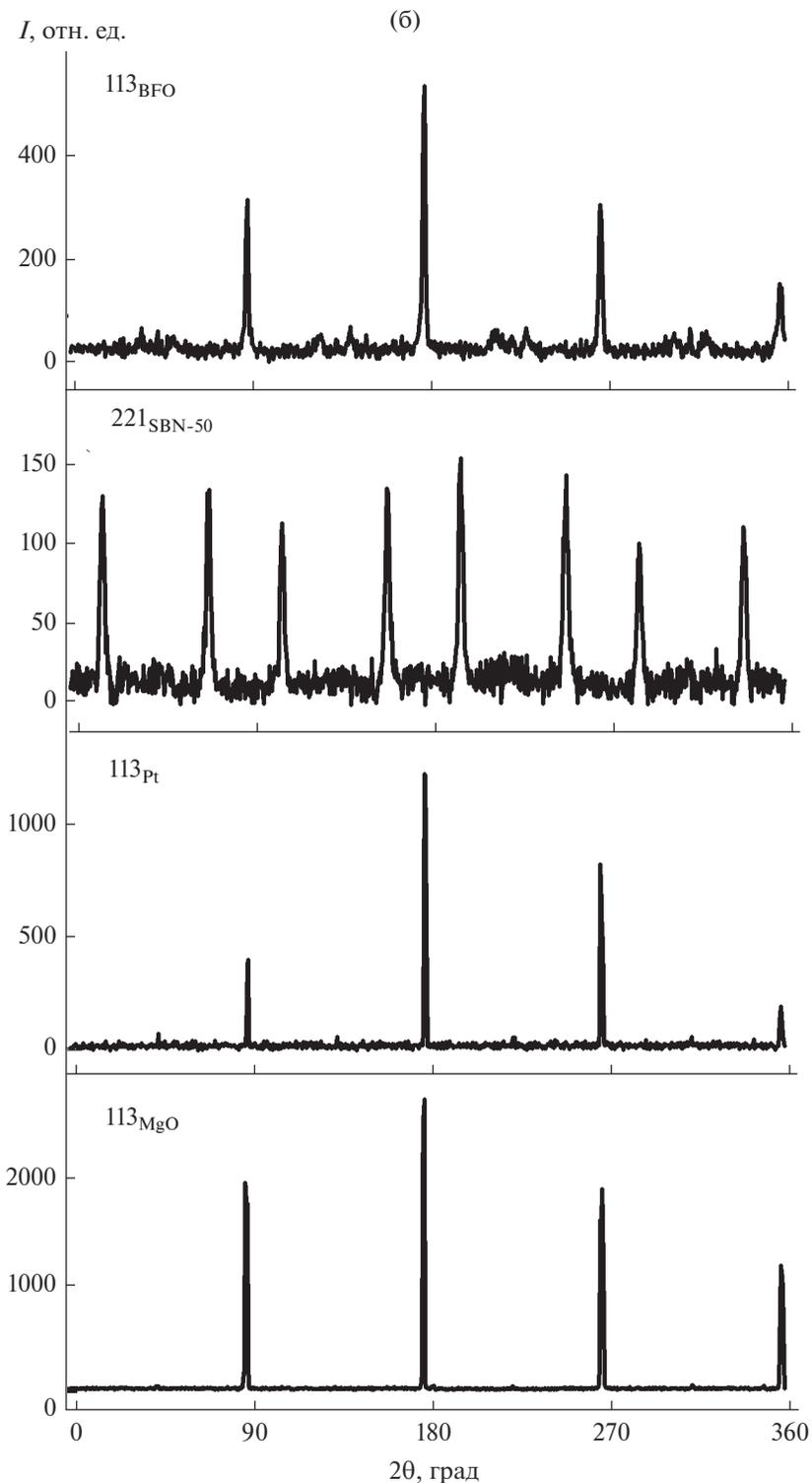


Рис. 1. Окончание

стовых блоков, средний размер которых составляет ~200 нм. Стоит отметить, что рельеф двухслойной гетероструктуры более развит по сравнению с однослойной пленкой, что может быть связано не только с особенностями синтеза ма-

териалов в тонкопленочном состоянии, но и с влиянием первого слоя SBN-50 в гетероструктуре BFO/SBN-50/Pt/MgO. Анализ морфологии поверхности BFO/SBN-50/Pt/MgO показал, что значение среднеквадратичной шероховатости

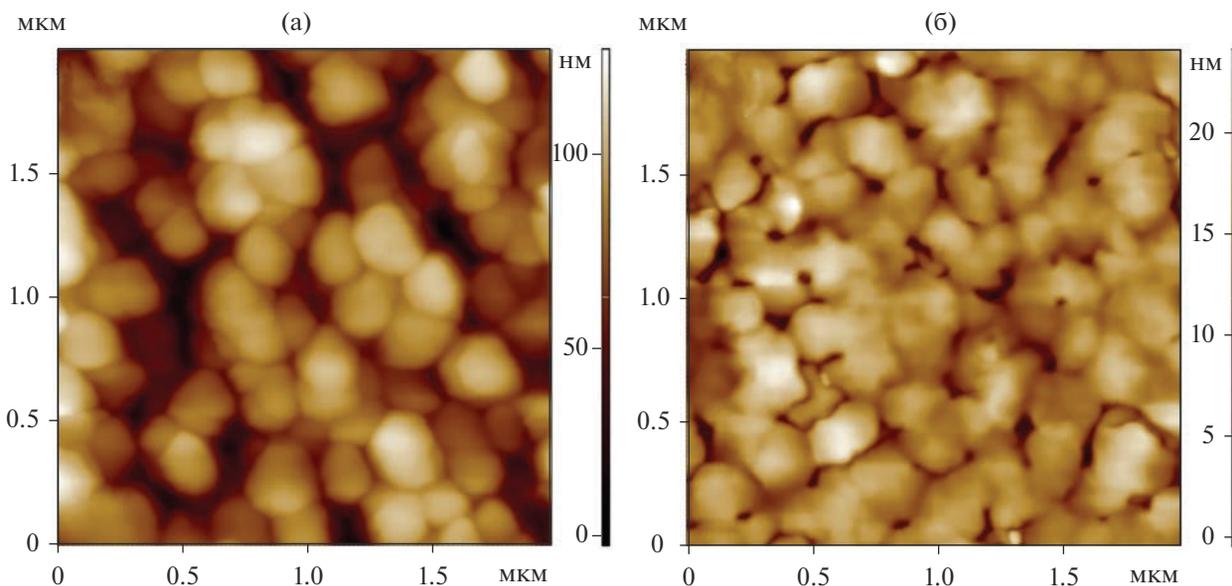


Рис. 2. АСМ-изображения топографии поверхности гетероструктуры BFO/SBN-50 (а) и однослойной пленки SBN-50 (б).

(RMS) поверхности – около 20 нм, что составляет менее 3% от толщины слоя BFO в двухслойной гетероструктуре. Для SBN-50 значение среднеквадратичной шероховатости составляет ~ 6 нм.

Сегнетоэлектрические свойства в BFO/SBN-50/Pt/MgO проявились при измерении как локального пьезоотклика с использованием методов АСМ (рис. 3), так и петль диэлектрического гистерезиса (рис. 4а). Видно, что сигнал амплитуды пьезоотклика принимает положительные значения, что может указывать на самопроизвольную поляризацию пленки BFO, которая направлена к подложке. Сигнал фазы (рис. 3б) достигает 86° и распределен неравномерно по поверхности: встречаются контрастные темные и светлые области, которые обусловлены не только доменами с различным направлением поляризации, но и особенностями топографии поверхности. Однако в пределах одного ростового блока изменение фазы достигало 60° , что позволяет говорить о присутствии в нем разноориентированных доменов. В то же время распределение фазы латерального пьезоотклика не превышали 3.4° .

Как видно из рис. 3в, 3г, зависимости кривых СМП, свидетельствующие о локальном переключении поляризации в образце, смещены в сторону отрицательных значений напряжений, а петля фазы вертикального пьезоотклика асимметрична. Отметим, что это имело место только в двухслойной структуре и не наблюдалось в однослойных пленках SBN-50 и BFO. Отмеченные особенности проявились при анализе зависимостей $P(U)$: если при $U < 10$ В петли имели вытянутую симметричную форму, то по мере увеличения амплитуды

петля диэлектрического гистерезиса расширялась и становилась асимметричной. Насыщение зависимости $P(U)$ наблюдается при $U = 85\text{--}90$ В, а при $U > 100$ В происходит электрический пробой образца. Максимальная величина поляризации составляла ~ 59.3 мкКл/см², что соответствует промежуточному значению между таковыми для SBN-50 и BFO. Из рис. 4б видно, что если для положительной и отрицательной ветвей зависимости $P(U)$ максимальная поляризация была практически одинаковой ($\Delta P_{\max} \sim 0$), то ΔP_r и ΔU_c изменялись немонотонно и меняли знак при $U = 30$ В. При $U \geq 45$ В величина ΔU_c составляет 8.2 В и практически не изменяется, а ΔP_r достигает величины -11.8 мкКл/см² и далее по мере роста U линейно изменяется до -3.4 мкКл/см². Учитывая, что, с одной стороны, величина коэрцитивного поля (E_c) в SBN-50 значительно ниже, чем в BFO ($E_c^{\text{SBN}} \sim 28$ кВ/см, $E_c^{\text{BFO}} = 195$ кВ/см), а с другой – $\epsilon_{\text{SBN}} = 620$ и $\epsilon_{\text{BFO}} = 210$ (рис. 5), наблюдаемое обусловлено именно разностью диэлектрических и СЭ-параметров слоев. Вследствие этого прикладываемое электрическое напряжение по мере роста сложным образом перераспределяется между слоями BFO и SBN-50, что создает сложную картину процесса переключения поляризации в гетероструктуре M/BFO/SBN-50/Pt/MgO. В дальнейших работах мы планируем осуществить более детальные как теоретические, так и экспериментальные исследования процесса переключения поляризации в гетероструктурах данного типа, в т.ч. и при различной последовательности слоев.

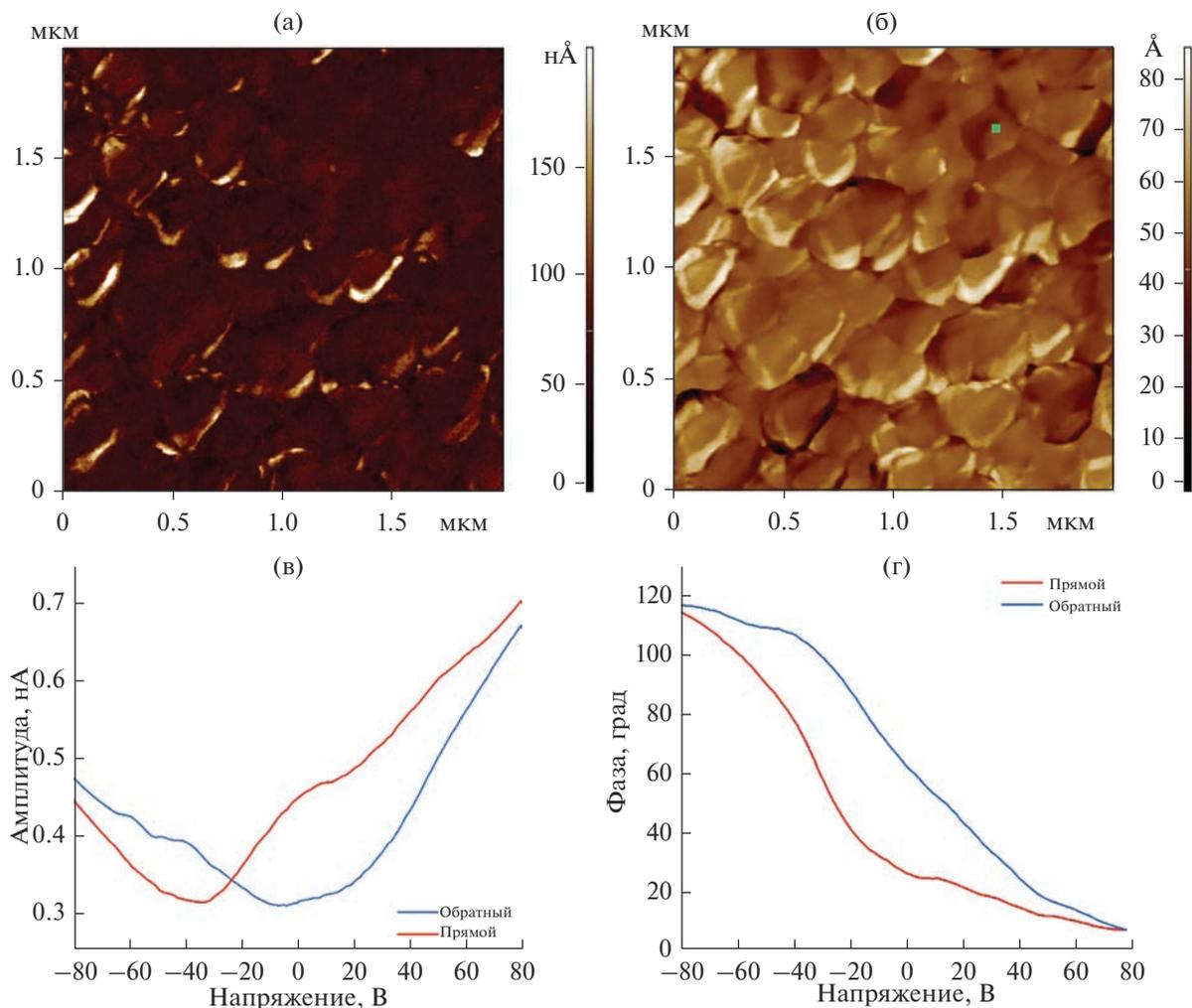


Рис. 3. Сигналы амплитуды Mag (а) и фазы Phase (б) вертикального пьезоотклика гетероструктуры ВFO/SBN-50, снятые в режиме СМП при амплитуде возбуждающего напряжения 3 В и частоте 107.88 кГц; кривые СМП-спектроскопии: зависимости амплитуды (в) и фазы (г) от напряжения смещения, полученные при амплитуде возбуждающего напряжения 5 В и частоте 101 кГц в точке, отмеченной зеленым квадратиком на рисунке (б).

На рис. 5 приведены температурные зависимости ϵ для структур М/ВFO/SBN-50/Pt/MgO и взятых для сравнения – М/SBN-50/Pt/MgO и М/ВFO/Pt/MgO. В интервале 25–250°C как значения ϵ , так и характер изменения ϵ от t для SBN-50 и ВFO существенно отличаются. Если в ВFO по мере роста температуры ϵ возрастает с 218 (при $t = 25^\circ\text{C}$) до 354 (при $t = 250^\circ\text{C}$), то в SBN-50 на зависимости $\epsilon(t)$ формируется максимум при $t_{\text{max}} = 150^\circ\text{C}$, связанный с фазовым переходом из СЭ в параэлектрическую (ПЭ) фазу, минимальное значение ϵ составляет 620 (при $t = 25^\circ\text{C}$), а максимальное – 2945 (при $t = t_{\text{max}}$). Для двухслойной структуры наблюдается монотонный рост ϵ с 280 до 588, а в окрестности фазового перехода в слое SBN-50 лишь угадывается слабая аномалия, что может быть обусловлено следующим.

При измерении в слабых полях исследуемый образец, с учетом различий диэлектрических характеристик слоев (рис. 5а) и их низкой электропроводности, необходимо рассматривать как двухслойный конденсатор с эффективной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{\text{ВFO/SBN}}$

$$\epsilon_{\text{ВFO/SBN}} = \frac{\epsilon_{\text{SBN}}\epsilon_{\text{ВFO}}}{\theta_{\text{SBN}}\epsilon_{\text{ВFO}} + \theta_{\text{ВFO}}\epsilon_{\text{SBN}}}, \quad (1)$$

где ϵ_{SBN} , $\epsilon_{\text{ВFO}}$, θ_{SBN} , $\theta_{\text{ВFO}}$ – диэлектрические проницаемости и объемные концентрации SBN-50 и ВFO соответственно; $\theta_{\text{SBN}} + \theta_{\text{ВFO}} = 1$.

С учетом (1), используя зависимости $\epsilon(t)$ для пленок SBN-50 и ВFO, были проведены расчеты $\epsilon(t)$ двухслойной структуры ВFO/SBN-50 при различных объемных концентрациях слоев (рис. 5б). Хорошо видно, что по мере роста $\theta_{\text{ВFO}}$ максимум

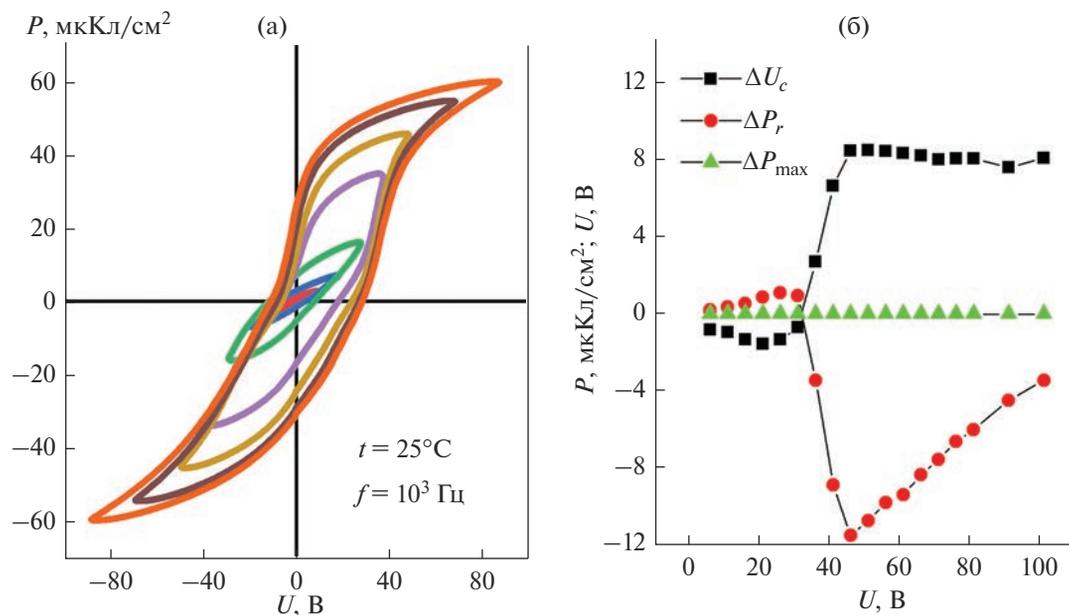


Рис. 4. Зависимости $P(U)$ (а) и $\Delta P_r(U)$, $\Delta P_{\max}(U)$ и $\Delta U_c(U)$ (б) для гетероструктуры М/ВFO/SBN-50/Pt/MgO.

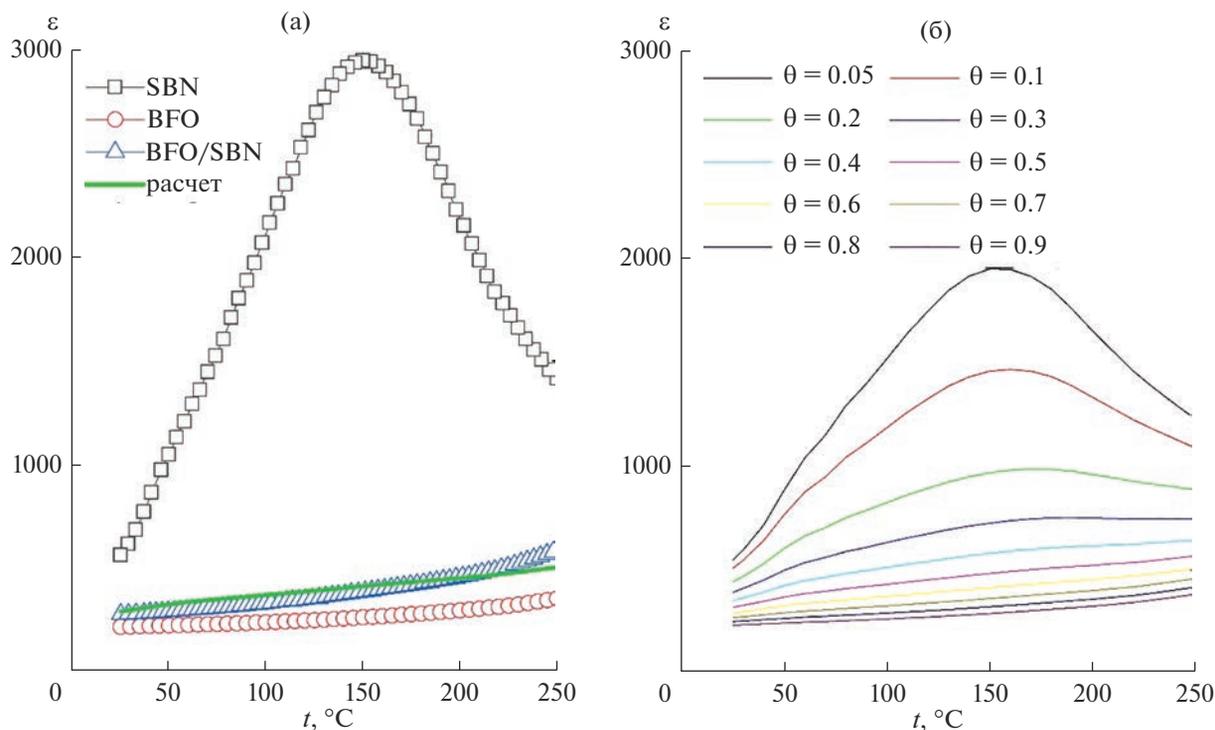


Рис. 5. Зависимости $\epsilon(t)$ для гетероструктур М/SBN-50/Pt/MgO, М/ВFO/Pt/MgO и М/ВFO/SBN-50/Pt/MgO в интервале температур 25–250 $^\circ\text{C}$ на частоте 10^5 Гц (измерения проводились в режиме нагрева со скоростью 3 $^\circ\text{C}/\text{мин}$) (а); рассчитанные в соответствии с (1) зависимости $\epsilon(t)$ для двухслойного диэлектрика ВFO/SBN-50 (б).

на $\epsilon(t)$, соответствующий области СЭ \rightarrow ПЭ-фазового перехода в SBN-50, уширяется, смещается в высокотемпературную область, а при $\theta_{\text{BFO}} > 0.4$ ис-

чезает. Удовлетворительная аппроксимация получается при $\theta_{\text{BFO}} \sim 0.5$ (рис. 5а). Отметим, что максимум на $\epsilon(t)$ для двухслойной структуры в

этом случае не соответствует температуре фазовых превращений в каком-либо из слоев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием метода ВЧ-катодного распыления в атмосфере кислорода изготовлены гетероструктуры ВFO/SBN-50/Pt/MgO(001), в которых отсутствовали примесные фазы, а все слои выращены эпитаксиально. В слое ВFO деформация элементарной ячейки практически отсутствовала, в слое SBN-50 в плоскости сопряжения была незначительной, а в перпендикулярном направлении составляла 0.4%.

Показано, что поверхность ВFO/SBN-50/Pt/MgO характеризуется развитым рельефом со средним размером ростовых блоков ~180 нм и RMS ~20 нм, при этом закономерностей в ориентации ростовых блоков осаждаемого последним ВFO не наблюдалось.

При комнатной температуре насыщенные петли диэлектрического гистерезиса для гетероструктуры М/ВFO(1000 нм)/SBN-50(1000 нм)/Pt/MgO формировались при $U = 90$ В с $P_{\max} \sim 59.3$ мкКл/см². Экспериментально выявлен сложный характер зависимости $P(U)$ от амплитуды электрического напряжения, что обусловлено значительным различием диэлектрических и сегнетоэлектрических слоев ВFO и SBN-50.

При исследовании в интервале 25–250°С диэлектрических свойств гетероструктуры М/ВFO/SBN-50/Pt/MgO установлено, что по мере роста температуры величина $\epsilon(f = 10^5$ Гц) материала увеличивается с 280 до 588. Показано, что отсутствие аномалий на зависимости $\epsilon(t)$ в М/ВFO/SBN-50/Pt/MgO в окрестности перехода слоя SBN-50 из СЭ- в ПЭ-фазу может быть объяснено представлением исследуемого материала в виде двухслойного конденсатора с диэлектрическими параметрами слоев, соответствующих однослойным структурам М/ВFO/Pt/MgO и М/SBN-50/Pt/MgO.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках ГП МД-483.2022.1.2, при поддержке научного проекта № Г30110/22-01-ЭП в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, ГЗ ЮНЦ РАН по проекту № 122020100294-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воротилов К.А., Мухортов В.М., Сигов А.С. Интегрированные сегнетоэлектрики. М.: Энергоатомиздат, 2011. 175 с.

2. Гриценко В.А., Исламов Д.Р. Физика диэлектрических пленок: механизмы транспорта заряда и физические основы приборов памяти. Новосибирск: Параллель, 2017. 352 с.
3. Мухортов В.М., Головки Ю.И., Толмачев Г.Н. Создание наноразмерных монокристаллических пленок сложных оксидов путем трехмерного упорядочения атом-кластер-кристалл // Вестн. Южного науч. центра РАН. 2006. Т. 2. № 1. С. 30.
4. Зинченко С.П., Стрюков Д.В., Павленко А.В., Мухортов В.М. Влияние подслоя $Va_{0.2}Sr_{0.8}TiO_3$ на структуру и электрофизические характеристики пленок цирконата-титаната свинца на подложке Si(001) // ПЖТФ. 2020. Т. 46. Вып. 23. С. 41–44. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.23.50348.18476>
5. Стрюков Д.В., Мухортов В.М., Головки Ю.И., Бирюков С.В. Особенности сегнетоэлектрического состояния в двухслойных гетероструктурах на основе титаната бария-стронция // ФТТ. 2018. Т. 60. № 1. С. 113–117. <https://doi.org/10.21883/FTT.2018.01.45297.186>
6. Вербенко И.А., Глазунова Е.В., Дудкина С.И., Резниченко Л.А. Экологически чистые интеллектуальные материалы с особыми электрическими и магнитными свойствами. Пути поиска: модифицирование (Т. 1). Ростов н/Д.: Фонд науки и образования, 2020. 328 с.
7. Физика сегнетоэлектриков: современный взгляд / Под ред. Рабе К.М. и др. пер. с англ. 4-е изд., электрон. М.: Лаборатория знаний, 2020. 443 с.
8. Okatan M.B., Misirlioglu I.B., Alpay S.P. Contribution of Space Charges to the Polarization of Ferroelectric Superlattices and its Effect on Dielectric Properties // Phys. Rev. B. 2010. V. 82. P. 094115.
9. Кузьминов Ю.С. Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением. М.: Наука, 1982. 400 с.
10. Павленко А.В., Стрюков Д.В., Кубрин С.П. Фазовый состав и структура пленки $BiFeO_3$, выращенной на подложке MgO(001) методом ВЧ-катодного распыления в атмосфере O_2 // ФТТ. 2022. Т. 64. Вып. 2. С. 218–222. <https://doi.org/10.21883/FTT.2022.02.51932.215>
11. Павленко А.В., Захарченко И.Н., Кудрявцев Ю.А., Киселева Л.И., Алихаджиев С.Х. Структурные характеристики тонких пленок $Sr_{0.5}Ba_{0.5}Nb_2O_6$ в интервале температур 20–500°С // Неорган. материалы. 2020. Т. 56. № 11. С. 1252–1256. <https://doi.org/10.31857/S0002337X20100115>
12. Павленко А.В., Стрюков Д.В., Кудрявцев Ю.А., Матяш Я.Ю., Маломыжева Н.В. Получение, особенности структуры, элементный состав и диэлектрические свойства двухслойной структуры на основе тонких пленок мультиферроика $BiFeO_3$ и сегнетоэлектрика $(Sr, Ba)Nb_2O_6$ // ФТТ. 2022. Т. 64. Вып. 12. С. 1954–1959. <https://doi.org/10.21883/FTT.2022.12.53648.439>
13. Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electro-mechanical Phenomena at the Nanoscale / Eds. Kalinin S.V., Gruverman A.V. 1. N.Y.: Springer, 2007. P. 173–214