

Исследования проводящих и сегнетоэлектрических свойств VZT-пленок

© Е.В. Гущина, Б.Р. Бородин, В.А. Шаров, В.В. Осипов, С.И. Павлов, М.А. Яговкина, М.С. Дунаевский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: katgushch@yandex.ru

Поступило в Редакцию 14 февраля 2020 г.
В окончательной редакции 23 мая 2020 г.
Принято к публикации 5 июня 2020 г.

С помощью контактной проводящей сканирующей зондовой микроскопии и микроскопии пьезоотклика исследованы процессы локальной поляризации в тонких пленках $\text{BaTi}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_3$. Установлена связь направления созданных доменов и величины протекающих токов. Найдена величина остаточной поляризации, а с помощью сканирующей зондовой микроскопии измерена петля гистерезиса и определены значения пьезомодуля d_{zz} и значение коэрцитивного поля E_c для этих пленок.

Ключевые слова: тонкие сегнетоэлектрические VZT-пленки, сканирующая зондовая микроскопия, карты распределения токов, сигнал пьезоотклика, петля гистерезиса.

DOI: 10.21883/JTF.2020.12.50137.52-20

Введение

Тонкие сегнетоэлектрические (СЭ) пленки твердых растворов цирконата-титаната бария $\text{Ba}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$ (VZT) являются перспективными материалами для создания различных СВЧ-устройств [1,2]. Например, пленки VZT ($0.35 < x < 0.6$) нашли применение в перестраиваемых микроволновых устройствах [3]. Кроме того, эти материалы вызывают интерес в связи с тем, что введение в твердый раствор более стабильных атомов Zr по сравнению с атомами Ti может приводить к уменьшению СВЧ-потерь и токов утечек в пленках [4]. Также на величины токов утечек могут оказывать влияние кристаллическая структура пленки и свойства границ зерен в поликристаллических пленках [5].

Величина и направление вектора остаточной поляризации являются важными параметрами, определяющими эффективность работы устройств памяти на базе VZT. Процесс переключения поляризации проявляется в гистерезисе зависимости величины поляризации от приложенного к пленке напряжения. Этот гистерезис можно измерить с помощью сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). Так, в работах [6–9] с помощью СЗМ-зонда на верхнем Pt-электроде были измерены свойства и петли гистерезиса сегнетоэлектрических пленок. При исследовании керамических образцов $\text{Ba}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$ ($x = 0.2–0.23$) в сигнале пьезоотклика наблюдалась различная доменная структура. Также установлено, что с увеличением содержания Zr минимальный размер нанодоменов уменьшается, а процесс переключения поляризации становится возможным при более низких прикладываемых электрических полях [6]. Переключение поляризации путем подачи напряжения противоположного знака и последующая регистрация этого переключения с помощью измерения пьезоотклика

и петель гистерезиса с помощью СЗМ были продемонстрированы в работах [6–9]. Однако в работах [4,7] изучались поликристаллические VZT-пленки, в работе [6] — VZT-керамика, а в работе [8] тонкая эпитаксиальная VZT-пленка с добавлением $\text{Ba}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{TiO}_3$. В отличие от керамических и поликристаллических образцов в монокристаллических пленках отсутствуют границы зерен, которые могут являться потенциальными барьерами при переносе заряда и, будучи проводящими, увеличивать токи утечки. Поэтому монокристаллические пленки более предпочтительны для использования в устройствах микроэлектроники [10].

Стоит отметить, что процессы переключения поляризации в VZT-пленках с большими концентрациями циркония ($x = 0.2, 0.35$) и без каких-либо добавок (оксид железа, кальция) методами СЗМ исследованы недостаточно полно. Таким образом, в настоящей работе решались следующие задачи:

- 1) определение состава и ориентации VZT-пленок, установление текстуры (поликристаллические или монокристаллические) пленки, измерение величины остаточной поляризации, диэлектрической проницаемости, диэлектрических потерь;
- 2) исследование процесса переключения СЭ доменов в VZT пленках ($x = 0.2, 0.35$) методами СЗМ;
- 3) выявление взаимосвязи величин протекающих токов с направлением поляризации в этих пленках;
- 4) измерение петель СЭ гистерезиса и определение значений пьезомодуля d_{33} и коэрцитивных полей E_c .

1. Образцы и методы

Исследуемые однослойные и многослойные СЭ VZT-пленки: (#1) $\text{BaTi}_{0.65}\text{Zr}_{0.35}\text{O}_3$ (100 nm),

(#2) $\text{BaTi}_{0.65}\text{Zr}_{0.35}\text{O}_3$ (40 nm) / $\text{BaTi}_{0.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_3$ (20 nm) / $\text{BaTi}_{0.65}\text{Zr}_{0.35}\text{O}_3$ (40 nm), (#3) $\text{BaTi}_{0.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_3$ (100 nm) осаждались методом высокочастотного распыления на подложках Si/SrTiO_3 . Электроды SrRuO_3 наносились импульсным лазерным осаждением [9]. Выбор исследуемых образцов был обусловлен следующими обстоятельствами. Известно, что с увеличением концентрации Zr происходит существенное снижение температуры Кюри BZT-пленок [11], что позволяет управлять величиной диэлектрической проницаемости BZT. При концентрации $X_{\text{Zr}} = 0.2$ (#3) температура Кюри выше комнатной, а при $X_{\text{Zr}} = 0.35$ (#1) — близка к комнатной. Это означает, что пьезоэлектрические свойства образца с $X_{\text{Zr}} = 0.35$ могут быть несколько ослаблены за счет присутствия несегнетоэлектрической фазы. Образец с чередующимся составом был добавлен как промежуточный по составу между образцами (#1) и (#3). Кроме того, в работе [12] было показано, что применение пленок с чередующимися по составу слоями позволяет снизить токи утечек.

Для комплексного исследования свойств данных пленок в работе использовались следующие методы и методики:

1. Методы контактной проводящей сканирующей зондовой микроскопии (к-СЗМ) и микроскопии пьезоотклика. Использование определенной конфигурации СЗМ микроскопа для измерения сверхмалых токов позволяет фиксировать токи с точностью до 0.02 pA. С помощью микроскопии пьезоотклика были измерены петли СЭ гистерезиса [13] и определены значения пьезоэлектрического модуля d_{33} . Все зондовые измерения выполнялись с помощью СЗМ-микроскопов „SOLVER P47-PRO“ (NT-MDT) и „NTegra-Aura“. Использовались зонды с проводящим алмазным покрытием DCP-11 (NT-MDT).

2. Рентгенодифракционные исследования проводились на дифрактометре для анализа поликристаллов „D2Phaser“, излучение медное, немонахроматизированное (оборудование федерального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ (Bruker, Германия)).

3. С помощью измерителя иммитанса „E7-20“ проводилось измерение электрической емкости конденсаторного элемента и тангенса диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$) на частоте 10 kHz и измерительном поле 40 mV. Выбор данных параметров обусловлен хорошей воспроизводимостью получаемых результатов, а также тем, что пленка очень тонкая, и при больших полях может произойти пробой. Измеритель работает по методу „вольтметра–амперметра“. При приложении смещающих напряжений от 0 до ± 20 V погрешность измерения составляет 0.5%. Значение диэлектрической проницаемости рассчитывалось по формуле: $\epsilon = (C \cdot d) / (S \cdot \epsilon_0)$, где ϵ — эффективная величина диэлектрической проницаемости, C — емкость плоского конденсатора, d — толщина пленки, S — площадь верхнего электрода, ϵ_0 — диэлектрическая постоянная.

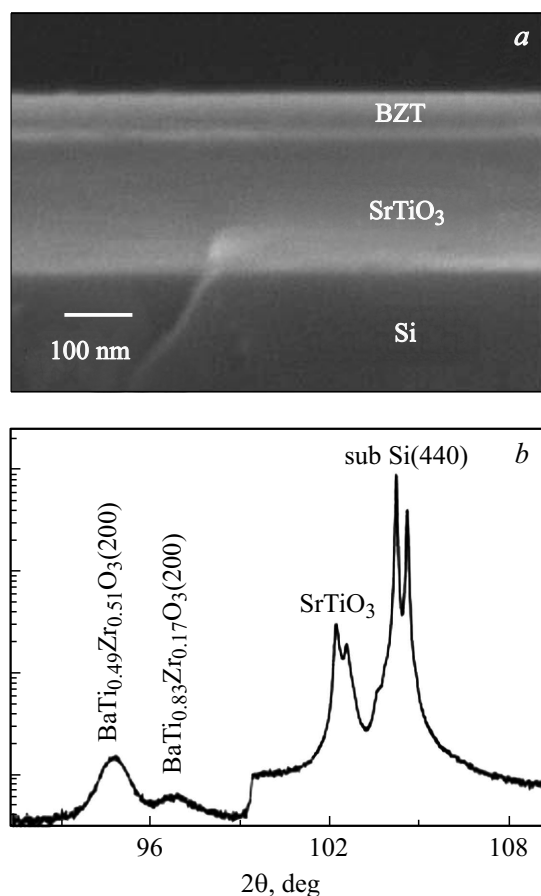


Рис. 1. Образец (#2) $\text{BaTi}_{0.65}\text{Zr}_{0.35}\text{O}_3$ (40 nm) / $\text{BaTi}_{0.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_3$ (20 nm) / $\text{BaTi}_{0.65}\text{Zr}_{0.35}\text{O}_3$ (40 nm): *a* — СЭМ изображение, *b* — рентгеновская дифракционная кривая.

2. Обсуждение результатов

С помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) были определены толщины получаемых BZT-слоев. На рис. 1, *a* приведено СЭМ изображение для образца (#2). Можно наблюдать следующие слои: подложка Si, буферный слой SrTiO_3 (толщиной 300 nm) и составной BZT-слой. СЭМ изображения BZT-пленок не выявляют зерен или их границ. Данные рентгеновской дифрактометрии указывают на то, что слои BZT ориентированы по плоскости (100), что отличается от ориентации подложки, в то время как буферный слой имеет ту же ориентацию, что и подложка Si (110) (рис. 1, *b*). Состав BZT в отношении концентраций Ti и Zr по данным дифрактометрии отвечает заявленным значениям. К сожалению, применяемая в настоящей работе установка не позволяет точно измерить упругие микронапряжения в исследуемых образцах из-за недостаточной степени монохроматичности излучения. Наблюдаемое уширение максимумов, отвечающих слоям BZT, обусловлено в основном малой наноразмерной толщиной исследуемых пленок (в образце (#2) толщины слоев составляют 40 nm $\text{BaTi}_{0.65}\text{Zr}_{0.35}\text{O}_3$, 20 nm

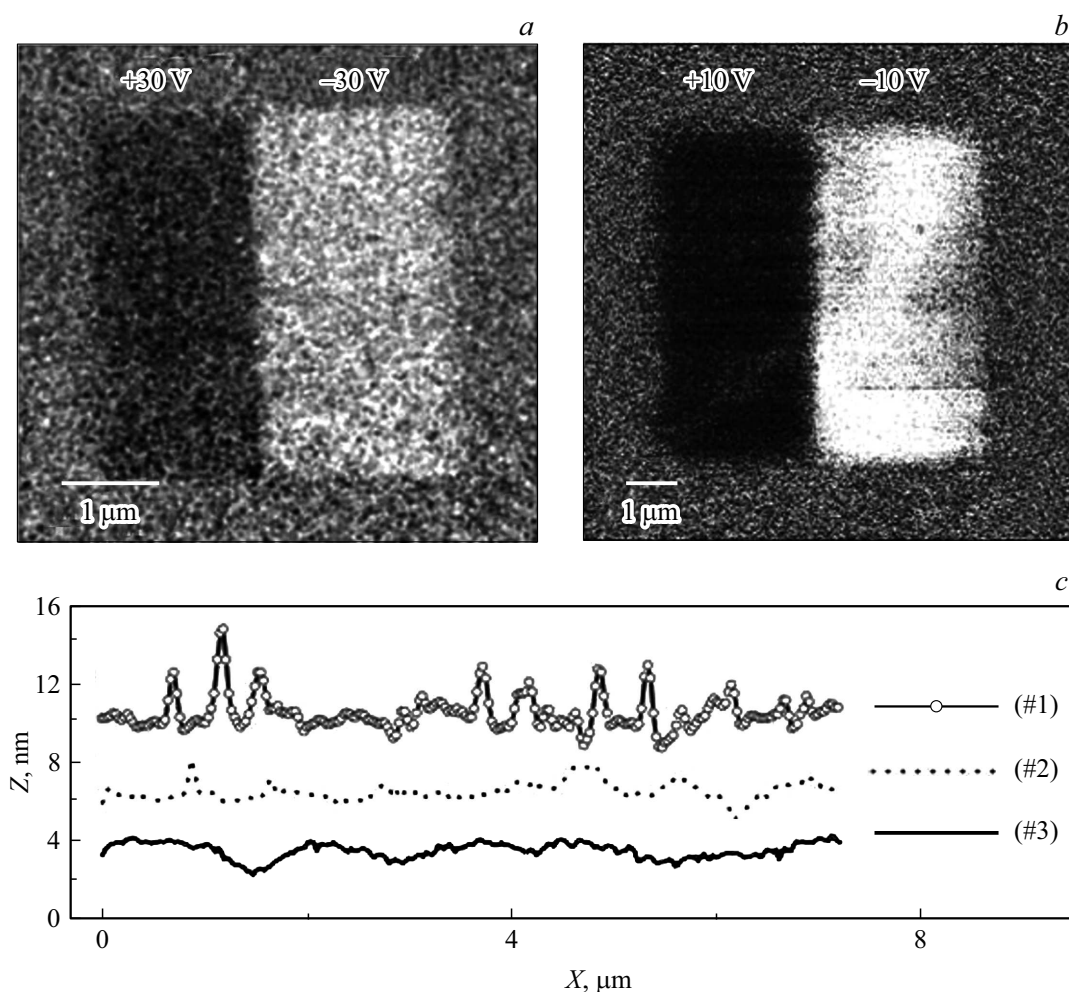


Рис. 2. *a* — распределение сигнала пьезоотклика для образца (#3); *b* — карта протекания токов для образца (#1). К темной области подавалось +10 V, к светлой — -10 V; *c* — усредненные профили рельефа для всех образцов.

$\text{BaTi}_{0.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_3$ и 40 nm $\text{BaTi}_{0.65}\text{Zr}_{0.35}\text{O}_3$). Отчетливо видно, как различаются уширения пиков для тонкого 100 nm слоя BZT, буфера SrTiO_3 (толщина 300 nm) и подложки, которая оценивается как бесконечный кристалл. Толщины слоев, образующих пленку, согласовывались с данными СЭМ (рис. 1, *a*), а не с дифракционными данными (из-за нехватки монохроматичности излучения). Видно, что данные рентгеновской дифрактометрии и СЭМ согласуются, это позволяет нам предположить, что вклад микронапряжений в уширение линий не является существенным.

Для того чтобы детально исследовать процессы переполаризации указанных СЭ пленок, в настоящей работе применялся метод контактной СЭМ [5,7,13]. Эксперимент состоял из двух стадий:

1) „поляризация“ — проводящий СЭМ-зонд приводится в контакт с поверхностью образца и к нему прикладывается положительное ($U_+ = +10$ и $+30$ V) либо отрицательное ($U_- = -10$ и -30 V) напряжение. При этом переключение поляризации BZT-пленки в некоторой области под зондом. На этой стадии созда-

вались протяженные поляризованные области размером $4 \times 2 \mu\text{m}$;

2) „визуализация поляризованных областей“ — выполнялось сканирование области большей площади ($6 \times 6 \mu\text{m}$), при этом на зонд подавалось малое напряжение (2 V) и регистрировался ток, протекающий сквозь пленку, либо сигнал пьезоэлектрического отклика (рис. 2, *a*).

На рис. 2, *a* представлена карта распределения сигнала пьезоотклика для образца (#3). Обнаружено, что переполаризовать данный образец возможно только при подаче существенных напряжений (± 30 V). В неполяризованных областях величина сигнала пьезоотклика мала, что может быть обусловлено тем, что поляризация в этих областях направлена вдоль поверхности.

На рис. 2, *b* представлена карта распределения токов в поляризованных областях для образца (#1). Для образца (#2) наблюдалось аналогичное распределение токов. Видно, что ток течет равномерно по всей поляризованной области, границ зерен не выявлено. Это указывает на отсутствие дополнительных каналов для

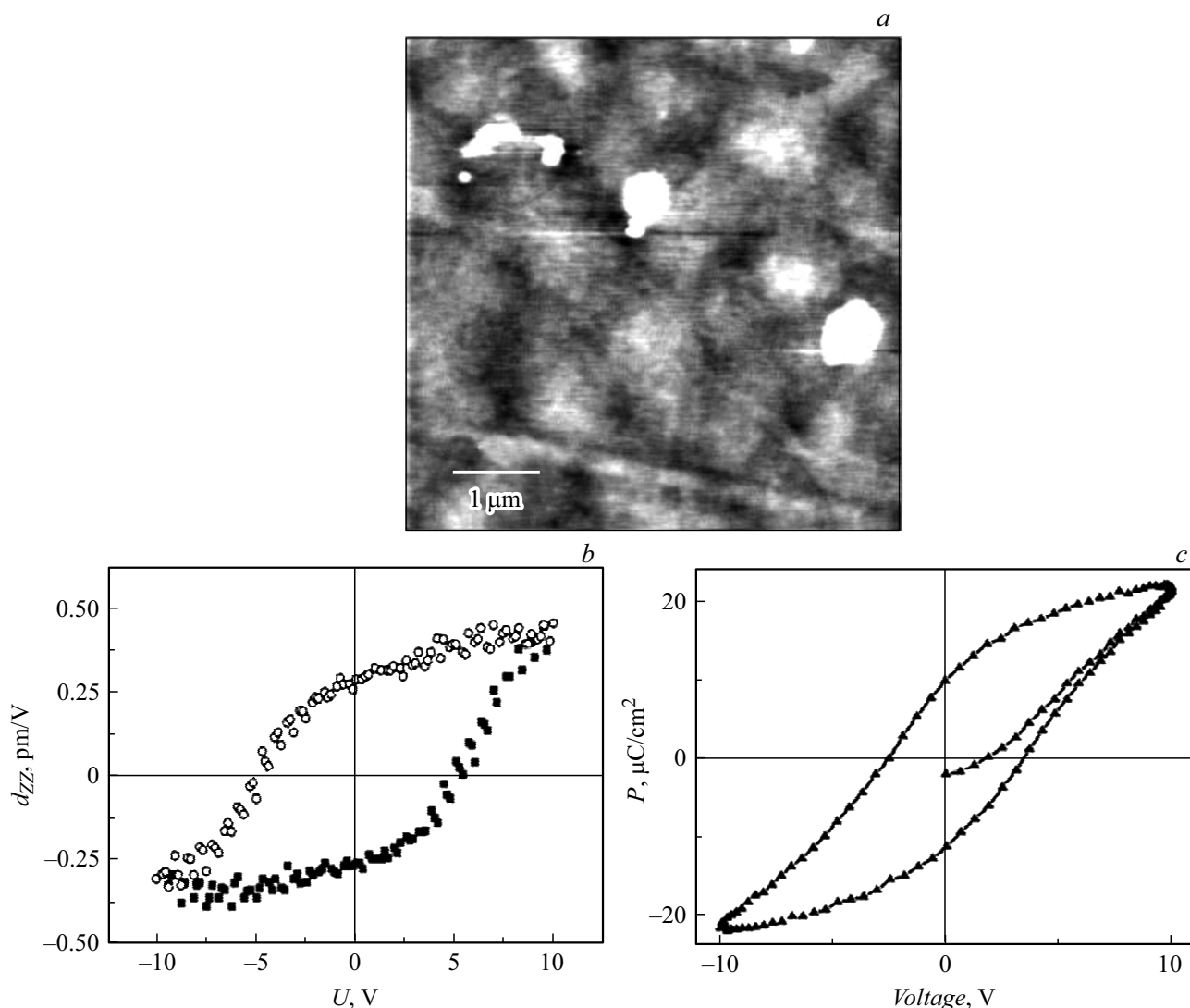


Рис. 3. Образец (#3) $\text{BaTi}_{0.8}\text{Zr}_{0.2}\text{O}_3$: *a* — СЗМ топография; *b* — петля гистерезиса, измеренная с помощью СЗМ, *c* — петля гистерезиса, измеренная с помощью метода Сойера–Тауэра с электрода размером $200 \times 200 \mu\text{m}$.

токов утечек, которыми обычно являются межзеренные границы [5,14].

В „темных“ областях на рис. 2, *a, b* вектор поляризации направлен от зонда в подложку (направление „сверху вниз“). В „светлых“ областях вектор поляризации направлен из подложки в зонд (направление „снизу вверх“). Экспериментально было установлено, что созданные поляризованные области могут сохраняться длительное время. В исследуемых пленках время жизни поляризованных областей составляло более 8 h. Временная стабильность переполаризованных областей является важной характеристикой СЭ пленок, на базе которых может быть построена ячейка сегнетоэлектрической памяти.

Стоит отметить, что значение протекающих токов для образца (#1) в областях, которые поляризованы „снизу вверх“, составляет $I_+ = 0.04 \text{ pA}$, а для состояния „сверху вниз“ $I_- = 0.06 \text{ pA}$. Также обнаружено, что отноше-

ние токов между направлениями „снизу вверх“ и „сверху вниз“ I_+/I_- различно для каждого образца. Так, для образцов (#1) и (#3) эта величина составляет $I_+/I_- = 1.5$, а для образца (#2) $I_+/I_- = 2$. То есть проводимость в тонких ВЗТ-пленках зависит от направления поляризации по отношению к приложенному внешнему полю. Этот эффект ранее наблюдался в PZT-пленках [14]. Объяснение различий в величине токов может заключаться в перезарядке ловушечных центров, которые расположены в объеме пленки. В качестве таких центров также могут выступать кислородные вакансии [14]. Кроме того, установлено, что токи в ВЗТ-пленках не являются емкостными переходными токами, которые были ранее обнаружены в PZT-пленках [14]. Надо отметить, что измерения токов в работе проводились с помощью СЗМ-зонда, площадь контактной области составляла $\sim 100 \text{ nm}^2$, поэтому характерная величина плотностей протекающих токов в исследуемых образцах составляет

$\sim 10^{-2}$ A/cm². Величины плотностей токов, измеренных в работе [15] для BaTiO₃-пленок в низкопроводящем состоянии, составляют $\sim 10^{-1}$ A/cm². То есть добавление Zr позволяет на порядок снизить токи утечки в BZT-структурах. Стоит отметить, что характерные величины токов, протекающих в образцах (#1)–(#3), отличались несильно ($I_{\#1} \approx 0.04\text{--}0.06$ pA, $I_{\#2,3} \approx 0.04\text{--}0.08$ pA).

Важным параметром исследуемых образцов является их гладкость. Наиболее гладким является образец (#2), его шероховатость (RMS) составляет 0.2 nm, для образца (#3) RMS = 0.3 nm, для образца (#1) RMS ~ 1 nm (рис. 2, b). Возможность роста достаточно гладких пленок открывает возможности для технологических применений тонких BZT-пленок в наноустройствах. Стоит отметить, что зернистость и шероховатость получаемых слоев BZT в зависимости от концентрации Zr исследовалась в ряде работ [16–18]. Так, в работе [16] средняя шероховатость образцов составляла 4 nm и зависимость от концентрации Zr_x ($x = 0.05, 0.15, 0.25$) являлась нелинейной функцией и достигала наибольшего значения 4.5 nm при $x = 0.15$. Уменьшение RMS при дальнейшем увеличении концентрации Zr связывалось с образованием более плотноупакованных и меньших по размеру зерен, а также с появлением фазы ZrO₂. Аналогичная нелинейная зависимость RMS(x) была обнаружена в работе [18]. Характерные значения шероховатости в работе [18] составляли 4–5 nm, что было обусловлено увеличением постоянной решетки с увеличением концентрации Zr, что приводило к уменьшению рассогласования решеток пленки и подложки, в результате чего вырастали большие по размеру зерна. Стоит отметить, что полученные в настоящей работе пленки гораздо более гладкие и обладают меньшей шероховатостью по сравнению с вышеперечисленными.

Измерение петель гистерезиса выполнялось в соответствии с методом, описанным в работе [13]. Для подачи коротких импульсов напряжения и регистрации сигнала пьезоэлектрического отклика пленки на это приложенное напряжение использовался специальный шаблон для растровой СЗМ литографии [13]. На рис. 3, a представлена СЗМ топография (образец (#3)), в центре которой была измерена петля гистерезиса локального пьезоэлектрического отклика (рис. 3, b). Из данных рис. 3, b можно определить: а) коэффициент $d_{zz} \sim 1$ pm/V, б) величину коэрцитивного поля $E_c = U_c/d$, где U_c — это коэрцитивное напряжение (около 5 V), а d — толщина пленки (100 nm). Величина измеренного коэффициента d_{zz} оказалась более чем на порядок ниже, чем характерные значения пьезомодуля в пленке BaTiO₃ ($d_{zz} \sim 50$ pm/V) [19]. Стоит отметить, что измеряемое СЗМ зондом значение d_{zz} оказывается в несколько раз заниженным, а E_c завышенным из-за эффекта падения потенциала в приконтактной области зонд–поверхность. Кроме того, при концентрациях Zr_x > 0.2 пленка BZT может (за счет понижения температуры Кюри) частично находиться в несегнетоэлектрической кубической фазе, что существенно снизит пьезоэлектрические

свойства. Стоит отметить, что характерные значения d_{zz} в образцах (#1, #3) и (#2) отличались не сильно ($d_{zz\#1} \sim 0.5$ pm/V, $d_{zz\#2} \sim 1$ pm/V).

Измеренная в настоящей работе величина E_c составляет $3 \cdot 10^5$ V/cm и характерна для всех трех исследованных пленок. Это значение в несколько раз выше, чем для схожих по составу BZT-пленок $E_c = 0.5 \cdot 10^5$ [20] и $0.9 \cdot 10^5$ V/cm [21]. Авторы отмечают, что эта величина может быть связана с закреплением доменов микроструктурой и дефектами в пленке, а также зависеть от материала и ориентации подложки [22]. Стоит отметить, что измеренные с помощью СЗМ значения E_c и d_{zz} могут несколько отличаться от реальных значений. Это обусловлено следующим обстоятельством. При СЗМ измерениях приложенное к пленке напряжение распределено неравномерно. В области точечного контакта зонда с поверхностью возникает небольшая область, в которой может падать значительная часть (до 80%) приложенного потенциала. Это приводит к тому, что измеренное значение E_c оказывается завышенным в 5 раз, а значение d_{zz} заниженным в 5 раз по сравнению с реальными величинами.

Для того чтобы определить величину остаточной поляризации, были проведены измерения петель диэлектрического гистерезиса $P-V$ (рис. 3, c) с макроскопического электрода размером 200×200 μm. Измерения проводились стандартным методом Соьера–Тауэра с амплитудой синусоидального напряжения 10 V и частотой сигнала 64 Hz. Величина остаточной поляризации составила $P_r = 10$ μC/cm², что согласуется с характерными значениями остаточной поляризации в BZT-пленках [23,24]. Петля гистерезиса не выходит на насыщение при напряжениях до 10 V, что указывает на то, что при этом не все домены перевернулись. Это согласуется с представленными выше СЗМ данными, в которых показано, что полностью переключить поляризацию возможно подачей напряжения около 30 V. Величины остаточной поляризации для разной полярности согласуются с симметричной величиной сигнала пьезоотклика для разных полярностей, измеренного с помощью СЗМ. Зависимость величины остаточной поляризации от температуры оценивалась авторами работы [23]. Величина P_r составила от 22 до 15 μC/cm² в диапазоне температур 300–400 K. Это изменение связывается с изменением внутренней структуры пленки и переходом ее от ромбической к кубической. В работе [24] изучалась зависимость величины P_r от количества Zr. Показано, что с увеличением концентрации Zr от $x = 0$ до 0.35 происходит уменьшение величины остаточной поляризации с 8 до 5 μC/cm². Такую зависимость авторы связывают с изменением размеров зерен. Чем больше размер зерен, тем больше доменные стенки и тем легче их переключить под действием внешнего электрического поля. Кроме того, авторы считают, что боковые механические взаимодействия между пленкой и подложкой приводят к двумерному эффекту зажима сегнетоэлектрических диполей, что также уменьшает

величину P_r . Надо отметить, что для исследованных пленок с концентрацией $Zr_{x=0.35}$ величина остаточной поляризации составила $P_r = 15 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, а для составной пленки — сравнимое с представленным на рис. 3, с. Таким образом, небольшие различия в величинах P_r могут быть связаны и с материалом подложки, и с ориентацией пленок, и с размером зерен.

С помощью измерителя иммитанса „E7-20“ были исследованы диэлектрические свойства BZT-пленок. Измерительное напряжение составляло 40 mV. Измеренная на частоте 10 kHz величина диэлектрической проницаемости составила $\epsilon \approx 120$, а тангенса диэлектрических потерь $\text{tg } \delta \sim 0.02$. Измеренные значения величины диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь сопоставимы с измеренными в работах [16,17,22,24].

Заключение

Таким образом, в работе показано, что BZT-пленки ($x = 0.2, 0.35$) могут быть выращены монокристаллическими с достаточно гладкой поверхностью. RMS-шероховатость для образца (#2) с чередующимися слоями BZT20/BZT35/BZT20 составляет 0.2 nm, для образца (#3) ($Zr_{x=0.2}$) $\text{RMS} = 0.3 \text{ nm}$, для образца (#1) ($Zr_{x=0.35}$) $\text{RMS} \sim 1 \text{ nm}$. На образце (#2) с чередующимися слоями наблюдаются крупные зерна шириной порядка $0.5 \mu\text{m}$ и высотой 1–2 nm. Величины измеряемых токов в исследуемых образцах достаточно малы ($\sim 0.06 \text{ pA}$), что свидетельствует о малых по сравнению с BaTiO_3 утечках. Токи, протекающие вдоль областей, поляризованных „снизу вверх“ меньше, чем „сверху вниз“ и отличаются в 1.5 раза для однослойных образцов (#1) и (#3) и в 2 раза для гетероструктурного образца (#2). Отсутствие межзеренных границ указывает на отсутствие каналов для дополнительных утечек тока. Об этом же свидетельствует малая величина измеряемого тангенса диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta \sim 0.02$). Малая характерная величина коэффициента пьезомодуля $d_{zz} \sim 1 \text{ pm/V}$ указывает на возможное ослабление пьезоэлектрических свойств за счет снижения температуры Кюри при увеличении концентрации Zr и появления несегнетоэлектрической фазы.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-32-00092_мол-а. Измерения методом сканирующей электронной микроскопии и рентгнотракторные измерения выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.621.21.0013 от 28.08.2017, идентификатор проекта RFMEFI62117X0018)

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] О.Г. Вендик. ФТТ, **51** (7), 1441 (2009). [O.G. Vendik. Phys. Solid State, **51** (7), 1529 (2009).]
- [2] S. Gevorgian. Ferroelectrics in microwave devices, circuits and systems. (Springer, London, 2009), p. 396.
- [3] T. Maiti, R. Guo, A.S. Bhalla. Appl. Phys. Lett. **89**, 122909 (2006).
- [4] W.S. Choi, B.S. Jang, D-G. Lim, J. Yi, B. Hong. J. Crystal Growth, **237-239**, 438 (2002).
- [5] Л.А. Делимова, Е.В. Гущина, Н.В. Зайцева, Д.С. Серегин, К.А. Воротилов, А.С. Сигов. ФТТ, **60** (3), 547 (2018). [L.A. Delimova, E.V. Gushchina, N.Z. Zaitseva, D.S. Seregin, K.A. Vorotilov, A.S. Sigov. Phys. Solid State, **60** (3), 553 (2018)].
- [6] J. Qiana, P. Hu, Ch. Liu, J. Jiang, Zh. Dan, J. Ma, Y. Lin, Ce-Wen Nan, Y. Shen. Science Bulletin, **63** (6), 356 (2018).
- [7] M. Kumari, D.G.B. Diestra, R. Katiyar, J. Shah, R.K. Kotnala, R. Chatterjee. J. Appl. Phys., **121**, 034101 (2017).
- [8] Q.R. Lin, D.Y. Wang, B.C. Luo, R. Ding, D.L. Lorenzen, S. Li. Appl. Surf. Sci., **331** 477 (2015).
- [9] D. Wu, Ph. Sciau, S. Schamm, F. Gloux, M.V. Fernandez. J. Phys. D: Appl. Phys., **40**, 4701 (2007).
- [10] V.V. Shvartsman, D.C. Lupascu. J. Am. Ceram. Soc., **95**, 1 (2012).
- [11] S.J. Kuang, X.G. Tang, L.Y. Li, Y.P. Jiang, Q.X. Liu. Scripta Mater., **61**, 68 (2009).
- [12] W.F. Qin, J. Xiong, J. Zhu, J.L. Tang, W.J. Jie, Y. Zhang, Y.R. Li. J. Mater. Sci., **43**, 409 (2008).
- [13] А.В. Анкудинов, А.Н. Титков. ФТТ, **47** (6), 1110 (2005). [A.V. Ankudinov, A.N. Titkov. Phys. Solid State, **47** (6), 1148 (2005).]
- [14] Л.А. Делимова, Е.В. Гущина, В.С. Юфев, И.В. Грехов. ФТТ, **56** (12), 2366 (2014). [L.A. Delimova, E.V. Gushchina, V.S. Yuferev, I.V. Grekhov. Phys. Solid State, **56** (12), 2451 (2014).]
- [15] Ch.H. Jung, S.Ih. Woo. Thin Solid Films, **519**, 3291 (2011).
- [16] F.M. Pontes, M.T. Escote, C.C. Escudeiro, E.R. Leite, E. Londo. J. Appl. Phys., **96** (8), 4386 (2004).
- [17] T.B. Wu, C.M. Wu, M.L. Chen. Appl. Phys. Lett., **69** (18), 2659 (1996).
- [18] J.Z. Xin, C.W. Leung, H.L.W. Chan. Thin Solid Films, **519**, 6313 (2011).
- [19] V. Thery, Al. Bayart, J-F. Blach, P. Roussel, S. Saitzeka. Appl. Surf. Sci., **351**, 480 (2015).
- [20] W.J. Jie, J. Zhu, W.F. Qin, X.H. Wei, J. Xiong, Y. Zhang, A. Bhalla, Y.R. Li. J. Phys. D: Appl. Phys., **40**, 2854 (2007).
- [21] A.R.E. James, C. Prakash. Appl. Phys. Lett., **84**, 1165 (2004).
- [22] X.G. Tang, Q.X. Liu, Y.P. Jiang. J. Appl. Phys., **100**, 114105 (2006).
- [23] F. Guo, X. Wu, Qingshan Lu, Sh. Zhao. Ceramics International, **44**, 2803 (2018).
- [24] J. Zhai, X. Yao, J. Shen, L. Zhang, H. Chen. J. Phys. D: Appl. Phys., **37**, 748 (2004).