

06

## Сегнетоэлектрические пленки титаната бария—стронция на подложке полуизолирующего карбида кремния

© А.В. Тумаркин<sup>1</sup>, С.В. Разумов<sup>1</sup>, А.Г. Гагарин<sup>1</sup>, А.А. Одинец<sup>1</sup>,  
А.К. Михайлов<sup>1,2</sup>, И.П. Пронин<sup>3</sup>, В.М. Стожаров<sup>4</sup>,  
С.В. Сенкевич<sup>3</sup>, Н.К. Травин<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“

<sup>2</sup> Дагестанский государственный университет, Республика Дагестан, Махачкала

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>4</sup> Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург

<sup>5</sup> ЗАО „Светлана-Электронприбор“, Санкт-Петербург  
E-mail: avtumarkin@yandex.ru

Поступило в Редакцию 24 ноября 2015 г.

Тонкие слои  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  впервые выращены на подложке полуизолирующего карбида кремния методом высокочастотного магнетронного распыления керамической мишени без использования буферных подслоев. Представлены результаты исследований структуры сегнетоэлектрических пленок и электрофизических характеристик планарных конденсаторов на их основе. Полученные образцы характеризуются высокой нелинейностью и низким уровнем диэлектрических потерь на сверхвысоких частотах.

В настоящее время разработка управляемых электронных компонентов для сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона электромагнитных волн ведется в основном на базе полупроводниковых и ферритовых материалов. Однако возможности современной микроэлектронной полупроводниковой технологии ограничены для применений, требующих повышенных уровней мощности, в связи с возникновением электрической нелинейности емкости, в то время как мощные ферритовые СВЧ-устройства демонстрируют низкое быстродействие и высокое энергопотребление, что ухудшает характеристики приборов на их основе [1].

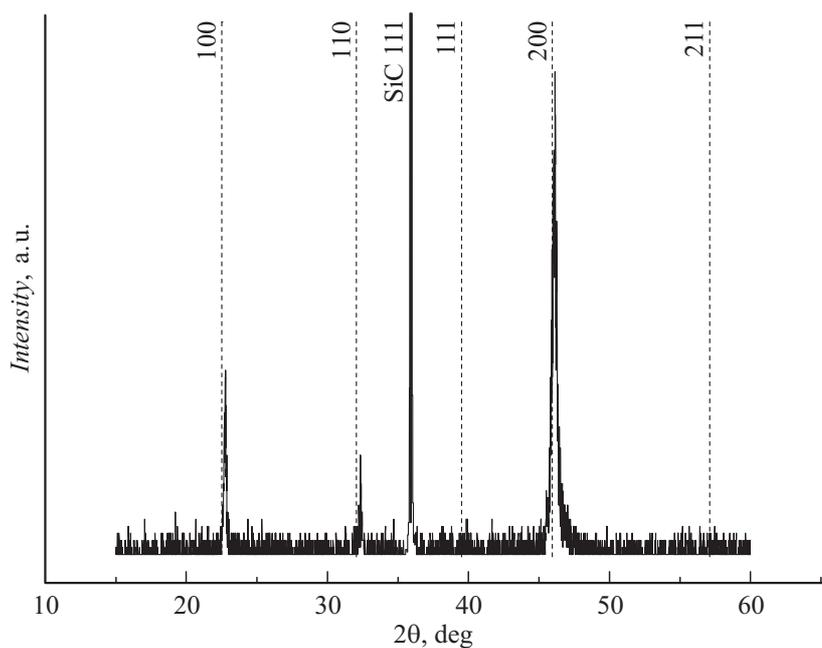
Альтернативной технологией, обеспечивающей высокое быстродействие и рабочую мощность при малом энергопотреблении, а также простоту и дешевизну конструкций элементной базы СВЧ-электроники, является использование планарных конденсаторов на основе пленочных сегнетоэлектрических (СЭ) материалов. В [2] показано, что максимально допустимая мощность СВЧ-сигнала на СЭ-фазовращателе может достигать 6W, тогда как полупроводниковые фазовращатели на полевом транзисторе или на основе варакторов на  $p-n$ -переходе не допускают работы с СВЧ-сигналом, мощность которого превосходит 0.01–0.02 W [3].

Известно, что для планарных СЭ-конденсаторов фактором, ограничивающим рабочую мощность, является перегрев рабочей области конденсатора [4]. В связи с этим в данной работе рассматривается возможность создания сегнетоэлектрических СВЧ-устройств на базе пленок твердого раствора титаната бария–стронция (BST) на подложках полуизолирующего карбида кремния (SiC). Интеграция этих материалов может привести к радикальному увеличению рабочих мощностей СВЧ-устройства за счет высокой теплопроводности карбида кремния (на порядок большей, чем у широко используемого на СВЧ монокристаллического оксида алюминия, и уступающей лишь алмазу). Основными достоинствами таких устройств будут являться простота технологии изготовления элементов, высокие уровни допустимой рабочей мощности и высокая радиационная стойкость.

В опубликованных ранее немногочисленных работах [5,6] описаны попытки получения пленок BST на подложках SiC. Однако в работе [5] исследуются пленки BST на полупроводниковом карбиде кремния, а в работе [6] приводятся экспериментальные данные для диэлектрических потерь в емкостных структурах ( $\tan \delta$ ) в низкочастотном диапазоне 1–100 kHz ( $\tan \delta$  лежит в пределах 0.01–0.025). Эти данные не позволяют сделать вывод о применимости полученных пленок в СВЧ-диапазоне.

Целью данной работы являлось получение, исследование структуры и высокочастотных диэлектрических свойств тонких слоев  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  в параэлектрическом состоянии, выращенных *in situ* методом ВЧ магнетронного распыления керамической мишени на подложке карбида кремния с целью их дальнейшего применения в составе мощных нелинейных элементов сверхвысокочастотного диапазона.

Подложки полуизолирующего карбида кремния политапа 6H (6H-SiC) качества „epiready“ диаметром 3” изготавливались из монокри-

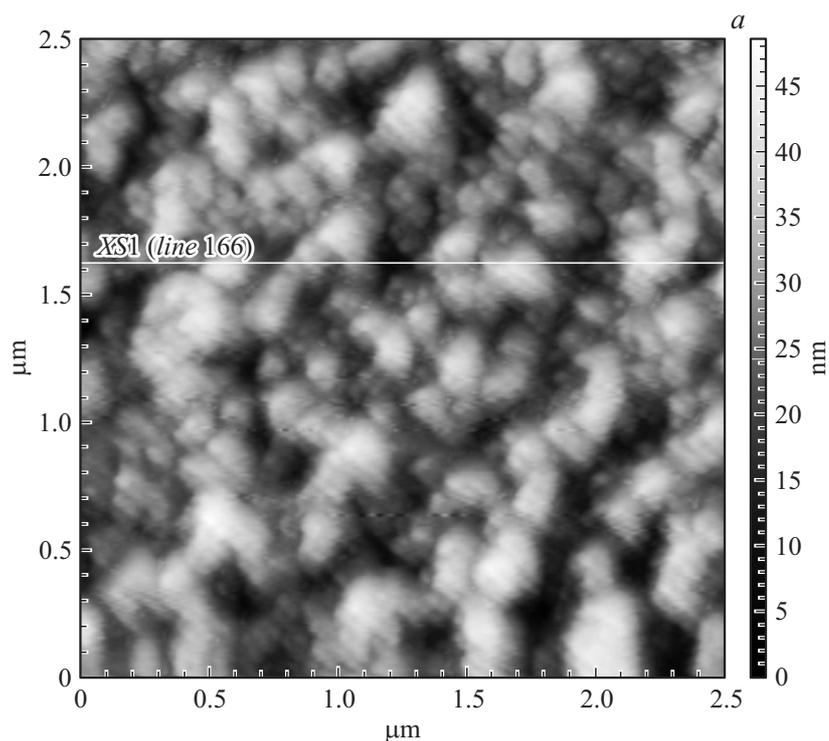


**Рис. 1.** Рентгеновская дифрактограмма от тонкой пленки BST, выращенной на подложке карбида кремния.

сталлических слитков, выращенных методом газофазного транспорта и осаждения [7–9] на установках, реализованных на площадке ЗАО „Светлана-Электронприбор“ [10].

Удельное сопротивление подложек карбида кремния, измеренное бесконтактным методом, не превышало  $2.7 \cdot 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ , типичное значение потерь на частоте 6 GHz составляло  $\tan \delta \sim 10^{-4}$  [11], шероховатость поверхности — менее 1 nm.

Тонкие пленки BST на подложках карбида кремния были получены высокочастотным магнетронным распылением керамической мишени состава  $\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3$ . Выбор состава с высоким содержанием атомов стронция был связан с необходимостью получения тонких пленок в параэлектрическом состоянии с низкими значениями диэлектрических потерь на СВЧ [12]. Осаждение пленок проводилось непосредственно на подложки полужолирующего карбида кремния, без использова-



**Рис. 2.** Морфология поверхности пленки BST на карбиде кремния.

ния буферных подслоев. Перед процессом осаждения проводилось предраспыление мишени в стороне от подложкодержателя в течение 30 min с целью очистки поверхности. Расстояние мишень–подложка составляло 25 mm. Контроль температуры осуществлялся с помощью термопары, размещенной под подложкодержателем. Температура подложек ( $T_{sub}$ ) составляла 850°C. Выбор столь высокой температуры осаждения был продиктован необходимостью получения пленок BST без включений вторичных фаз полтитанатов [13]. В качестве рабочего газа использовался кислород при давлении 2 Pa, оптимальном с точки зрения как скорости осаждения тонкой пленки, так и условия окисления распыленных атомов и кристаллизации фазы перовскита [14].

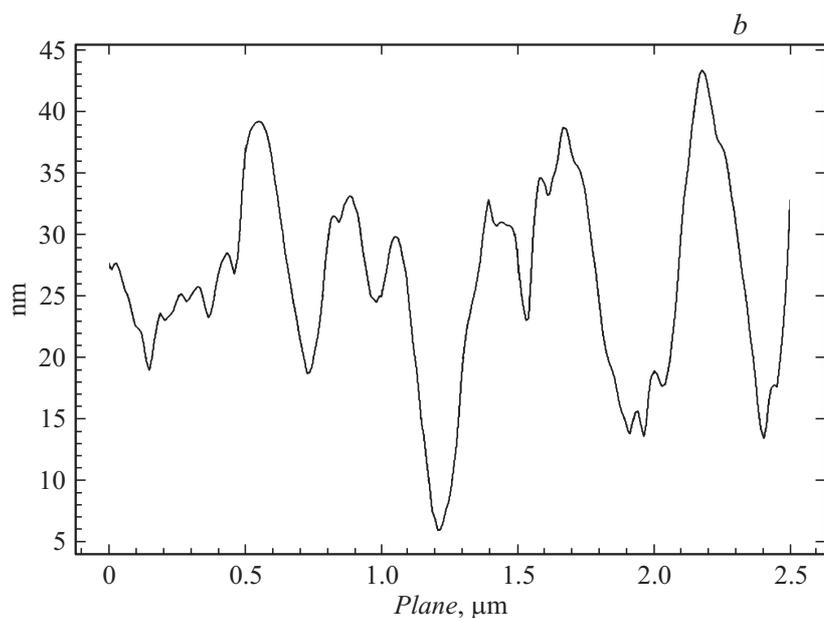
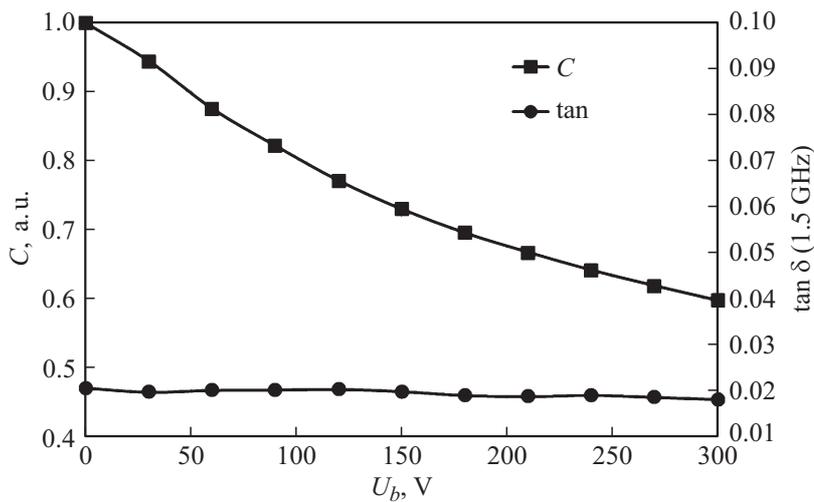


Рис. 2 (продолжение).

После осаждения сегнетоэлектрического слоя образцы охлаждались в кислороде при атмосферном давлении со скоростью  $2\text{--}3^\circ\text{C}/\text{min}$ . Толщина слоев составляла порядка  $1\ \mu\text{m}$ . На поверхности пленок BST формировались верхние электроды из меди толщиной  $1\ \mu\text{m}$  с адгезионным подслоем хрома. Геометрия электродов соответствовала конструкции планарного конденсатора [15]. Ширина зазора конденсатора составляла  $5\ \mu\text{m}$ , длина —  $800\ \mu\text{m}$ .

Фазовый анализ сформированных пленок BST проводился с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-7; микроструктура и морфология поверхности изучались с использованием атомно-силового микроскопа „Смена“ (НТ-МДТ). СВЧ-характеристики — управляемость, рассчитанная как соотношение емкостей при нулевом ( $E_0$ ) и максимальном ( $E_{\text{max}}$ ) приложенном поле,  $n = C(E = 0)/C(E_{\text{max}})$ , и диэлектрические потери  $\tan \delta$  измерялись на частоте  $1.5\ \text{GHz}$  при комнатной температуре. Напряжение смещения  $U_b$ , прикладываемое к конденсаторам, варьи-



**Рис. 3.** Вольт-фарадная характеристика и потери BST планарного конденсатора на карбиде кремния.

валось в диапазоне 0–300 В, что соответствовало напряженности поля в сегнетоэлектрической пленке  $E \approx 0\text{--}60 \text{ V}/\mu\text{m}$ .

Рентгеновская дифрактограмма от тонкой пленки BST, выращенной на подложке карбида кремния, свидетельствует о хорошо сформированной перовскитовой структуре с ярко выраженной (100)-текстурой роста (рис. 1). На графике пунктиром отмечены положения пиков для объемного материала. Видно, что дифракционные максимумы для тонкой пленки сдвинуты в область больших значений углов  $\theta$ . Для поликристаллических многокомпонентных пленок такой сдвиг соответствует отклонению компонентного состава от стехиометрии распыляемой мишени в сторону обеднения тяжелым компонентом — барием (Ba). Пониженное содержание бария при температурах осаждения выше  $800^\circ\text{C}$  объясняется его реиспарением с поверхности, что связано с повышенной летучестью комплексов Ba–O [13]. В нашем случае, исходя из параметра ячейки  $a \cong 3.93 \text{ nm}$ , состав пленки соответствовал  $\text{Ba}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{TiO}_3$ .

Исследования морфологии поверхности сегнетоэлектрического слоя показали, что средняя шероховатость поверхности составляет 20 nm

(рис. 2). Размер перовскитовых зерен варьировался в диапазоне 100–300 nm. Данные значения размеров кристаллитов типичны для пленок BST, выращенных ионно-плазменным осаждением при низких давлениях рабочего газа, соответствующих скоростям осаждения  $\approx 4$  nm/min [13].

Емкость планарных конденсаторов вышеописанной геометрии, сформированных на основе пленок BST на карбиде кремния, при комнатной температуре и нулевом напряжении смещения составляла 0.5 pF, что соответствует диэлектрической проницаемости пленки BST  $\epsilon \cong 500$ . Зависимость емкости конденсатора от приложенного напряжения демонстрирует высокую степень управляемости под действием внешнего поля (рис. 3). СВЧ-измерения показали управляемость  $n \cong 1.7$  при приложении поля  $60$  V/ $\mu$ m, при этом диэлектрические потери не превышают 2% на частоте 1.5 GHz.

В результате проведенных исследований показано, что пленки BST, выращенные непосредственно на полуизолирующем карбиде кремния, проявляют хорошо сформированную кристаллическую структуру перовскита без включений вторичных фаз, что оказывает положительное влияние на их электрофизические свойства, в частности на нелинейность и уровень диэлектрических потерь. Сравнение полученных данных с аналогичными параметрами для тонких СЭ-слоев на подложках широко используемого оксида алюминия показало, что тонкие пленки BST на подложках полуизолирующего карбида кремния могут быть перспективными для создания на их основе мощных СВЧ управляемых элементов.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда в рамках проекта № 15-19-10049.

## Список литературы

- [1] *Gevorgian S.* // IEEE Microwave Magazine. 2009. V. 10. Iss. 5. Art. N 5185529. P. 93–98.
- [2] *Вендик О.Г.* // ФТТ. 2009. V. 51. С. 1441.
- [3] *Вендик О.Г., Парнес М.Д.* Антенны с электрическим сканированием. Введение в теорию / Под ред. Л.Д. Бахраха. М.: Сайнс-Пресс, 2002. 232 с.
- [4] *Soldatenkov O., Samoiloa T., Ivanov A., Kozzyrev A., Ginley D., Kaydanova T.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 232901.
- [5] *Jae-Sang Lee, Yeong-Deuk Jo, Jung-Hyuk Koh et al.* // J. Korean Phys. Soc. 2010. V. 57. N 6. P. 1889–1892.

- [6] *Lirong Song, Ying Chen, Genshui Wang et al.* // J. Am. Ceram. Soc. 2014. V. 97 (10). P. 3048–3051.
- [7] *Tairov Yu.M., Tsvetkov V.F.* // J. Cryst. Growth. 1978. V. 43. P. 209–212.
- [8] *Mokhov E.N., Shulpina I.L., Tregubova A.S., Vodakov Yu.A.* // Cryst. Res. Technol. 1981. V. 16. P. 879–890.
- [9] *Karpov S.Yu., Makarov Yu.N., Mokhov E.N., Ramm M.G., Ramm M.S., Roenkov A.D., Talalaev R.A., Vodakov Yu.A.* // J. Cryst. Growth. 1997. V. 173. P. 408–416.
- [10] *Вьюгинов В.Н., Травин Н.К., Венедиктов О.В., Коровкина М.М., Цацульников А.Ф., Лундин В.В.* // Сб. ст. IV Всероссийской конференции „Электроника и микроэлектроника СВЧ“. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, 2015. С. 79–81.
- [11] *Вьюгинов В.Н., Уланова Т.А., Григорьев А.Д.* // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2013. N 3. С. 80–87.
- [12] *Тумаркин А.В., Тепина Е.Р., Ненашева Е.А., Картенко Н.Ф., Козырев А.Б.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 6. С. 53–58.
- [13] *Тумаркин А.В., Альмяшев В.И., Разумов С.В., Гайдуков М.М., Гагарин А.Г., Алтынников А.Г., Козырев А.Б.* // ФТТ. 2015. Т. 3. С. 540–551.
- [14] *Вольяс В.А., Козырев А.Б.* // ЖЭТФ. 2011. Т. 140. В. 1 (7). С. 196–204.
- [15] *Козырев А.Б., Гайдуков М.М., Гагарин А.Г., Алтынников А.Г., Разумов С.В., Тумаркин А.В.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 13. С. 1–7.