

06

## Тонкопленочная структура PZT/SiC на кремниевой подложке: формирование, структурные особенности и диэлектрические свойства

© И.П. Пронин, Е.Ю. Каптелов, С.В. Сенкевич, В.А. Климов,  
Н.А. Феоктистов, А.В. Осипов, С.А. Кукушкин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: Petrovich@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 20 февраля 2008 г.

Получена новая тонкопленочная сегнетоэлектрическая структура на основе системы Pt/PZT/SiC/Si. Основу данной структуры составляет пленка  $Pb(Zr,Ti)O_3$  (PZT), сформированная на тонких (толщиной 90–100 nm) монокристаллических слоях карбида кремния политипов 3C-SiC и 4H-SiC, полученных на кремниевых подложках новым методом твердофазной эпитаксии. Сообщается о методах формирования данной гетеросистемы, ее структурных и диэлектрических характеристиках.

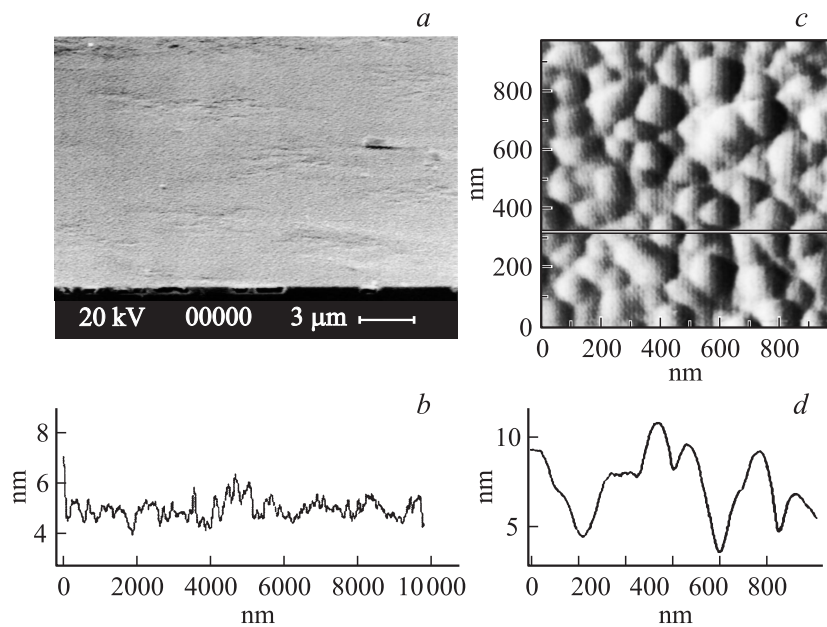
PACS: 77.55.+f, 85.50.Gk, 81.15.Np

Тонкопленочные композиции сегнетоэлектрик/полупроводник представляют интерес, в первую очередь, для создания полевого транзистора, в котором управление проводящим каналом осуществляется переключением поляризации сегнетоэлектрического слоя, расположенного в подзатворной цепи [1–2]. Такого рода энергозависимая сегнетоэлектрическая память на основе системы сегнетоэлектрик/полупроводник (FEFET) выгодно отличается от конденсаторной сегнетоэлектрической памяти с произвольной выборкой (NVFRAM) тем, что при считывании информации, в отличие от структуры NVFRAM, отсутствует необходимость переполаризации сегнетоэлектрического слоя. Поэтому требование к усталостным характеристикам для устройств FEFET оказывается не столь жестким, как для NVFRAM [3]. Изготовление FEFET-структур могло бы привести к качественному скачку в крем-

ниевой технологии энергонезависимой сегнетоэлектрической памяти. Проблема, однако, заключается в том, что при осаждении тонкого слоя сегнетоэлектрика (оптимально использовать пленки PZT, обладающие превосходными сегнетоэлектрическими параметрами) непосредственно на кремниевую подложку происходит взаимная диффузия компонентов пленки и подложки. При диффузии компонентов происходит изменение фазового состава пленки PZT, что ведет к невозможности ее кристаллизации в фазу перовскита [4–5]. Во избежание этого в [6–7] было предложено сформировать FEFET-структуру на основе широкозонного полупроводника SiC в виде массивной подложки или тонкого слоя, сформированного на кремниевой подложке.

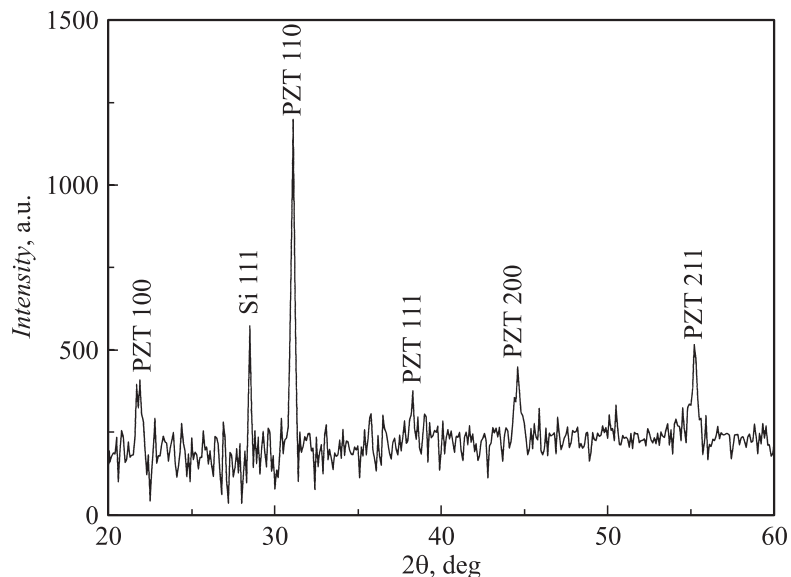
Карбид кремния обладает огромными преимуществами перед другими материалами прежде всего потому, что он химически инертен по отношению ко многим химическим реагентам при температурах вплоть до 1000°C. Более того, карбид кремния устойчив к воздействию радиации, а также сохраняет электрофизические параметры при повышенных температурах. Это делает его незаменимым при использовании в приборах, работающих в условиях повышенной радиации и космоса. Отметим также, что носители заряда в карбиде кремния имеют высокую подвижность [7]. Недавно [8–9] был развит новый метод получения пленок карбида кремния на кремнии — твердофазной эпитаксии и получены высококачественные монокристаллические пленки политипов 3C-SiC и 4H-SiC. Особенность выращивания слоев SiC на Si этим методом заключается в том, что в приповерхностном слое кремния, непосредственно в процессе роста пленки, специальным образом вводятся поры, которые приводят к релаксации избыточной упругой энергии, возникающей из-за разницы параметров решеток SiC и Si. Целью настоящей работы являлось создание и исследование структур Pt/PZT/SiC/Si и Pt/PZT/Pt/SiC/Si на базе тонких пленок SiC, выращенных методом твердофазной эпитаксии.

Для приготовления FEFET-структуры использовались монокристаллические слои 4H-SiC толщиной  $\sim 90\text{--}100\text{ nm}$ , выращенные на  $\langle 111 \rangle$  ориентированных кремниевых пластинах. На рис. 1, *a* представлена электронная микрофотография поверхности подложки с пленкой карбида кремния, а на рис. 1, *b* профиль этой же поверхности, снятый с помощью сканирующего зондового микроскопа типа „Смена“. Из этих данных следует, что шероховатость поверхности не превышает  $\pm 0.5\text{ nm}$  (рис. 1, *b*).



**Рис. 1.** Морфология и профиль поверхности пленки SiC (*a*, *b*) и сформированной на ней пленки PZT (*c*, *d*).

Осаждение слоя PZT непосредственно на монокристаллическую SiC/Si подложку не привело к формированию фазы перовскита (образовывалась паразитная фаза пирохлора). Для получения перовскитовой фазы мы использовали буферные слои диоксида титана TiO<sub>2</sub>. Известно [10], что кислородные октаэдры с ионами титана могут служить центрами кристаллизации фазы перовскита; это приводит к понижению температуры отжига и, соответственно, к росту вероятности образования перовскитовой фазы в пленке PZT. Более того, мы предполагали, что в процессе формирования структуры подслоя TiO<sub>2</sub>, который осаждался в одном цикле с PZT, может раствориться в PZT пленке. Было обнаружено, что образование перовскитовой фазы зависит от толщины подслоя TiO<sub>2</sub>. Так, при температуре отжига 530°C и толщине TiO<sub>2</sub> ≈ 10 nm пленка PZT толщиной 300 nm сохраняла

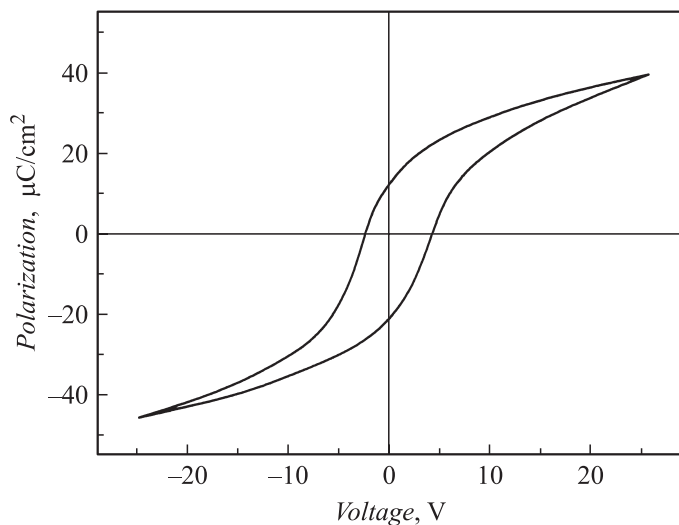


**Рис. 2.** Дифрактограмма поликристаллической пленки PZT (толщина — 300 nm), сформированной на подложке SiC/Si.

низкотемпературную пироклорную структуру и полностью переходила в перовскитовую фазу лишь при толщине подслоя  $\approx 20$  nm (рис. 2).

Соотношение амплитуд рефлексов на рентгенограмме, а также морфология поверхности полученных подобным методом гетероструктур (рис. 1, *c*) указывают на поликристаллический характер перовскитовых пленок PZT и на отсутствие какой-либо выраженной текстуры. Размер перовскитовых зерен не превышал 50–100 nm (рис. 1, *c*). Пленки отличались достаточно высокой гладкостью, шероховатость поверхности не превышала  $\pm 3$  nm и определялась рельефом отдельных зерен (рис. 1, *d*). Профили поперечного среза многослойной структуры, снятые с помощью сканирующей электронной микроскопии, также свидетельствовали о высокой гладкости поверхности PZT слоев.

Для создания конденсаторных структур типа Pt/PZT/Pt/SiC на кремниевой подложке также потребовалось вводить буферный слой  $\text{TiO}_2$  между SiC и нижним платиновым электродом. Это позволяло обеспе-



**Рис. 3.** Петля диэлектрического гистерезиса, полученная на конденсаторной структуре Pt/PZT/Pt/SiC/Si. Частота — 50 Hz.

чить хорошую адгезию нижнего платинового электрода к карбиду кремния. Однако в такой структуре, по сравнению со структурой Pt/PZT/SiC, происходило увеличение шероховатости сегнетоэлектрического слоя с  $\pm 3$  nm до  $\pm 6$ – $8$  nm. Мы связываем подобное изменение шероховатости с рекристаллизацией нижнего платинового электрода, осаждение которого проводилось методом лазерной абляции. Толщина платиновых электродов, как нижних, так и верхних, составляла 60–80 nm. Размер верхних контактных площадок составлял  $\approx 300 \times 300 \mu\text{m}^2$ .

Диэлектрические свойства полученных конденсаторных структур показали, что при частоте измерения 200 kHz величина диэлектрической проницаемости выровнялась в диапазоне 700–800, а диэлектрические потери составляли 2–3%. Вид петли диэлектрического гистерезиса, снятой на частоте 50 Hz, свидетельствует о том, что структура может выдерживать приложение очень сильных электрических полей (не менее 500 kV/cm), а величина остаточной поляризации достигала  $\approx 18$ – $20 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  (рис. 3). Характер петли диэлектрического гистерезиса указывает на наличие в пленке внутреннего поля смещения

( $\approx 20$  kV/cm), вектор которого направлен в сторону свободной поверхности. Подобная ориентация вектора внутреннего поля может быть связана с недостатком свинца и, соответственно, образованием вакансий свинца в перовскитовой структуре. Причинами нехватки свинца, по всей видимости, являлись использование стехиометрической мишени и высокая температура отжига ( $560^\circ$ ), приводящая к усиленному испарению оксида свинца с поверхности пленки. Полученный результат подтверждает ранее высказанные в [11] предположения, что образование внутреннего электрического поля и его ориентация в тонких пленках PZT определяются преимущественным содержанием в пленке кислородных вакансий или вакансий свинца.

Таким образом, в настоящей работе показана принципиальная возможность формирования нового типа тонкопленочных структур на основе сегнетоэлектрика PZT и полупроводника SiC, сформированных на кремниевой подложке. Подобные структуры могут стать основой для создания полевого транзистора с сегнетоэлектрическим затвором и организации устройств энергонезависимой памяти. Конденсаторная структура, сформированная на подложке SiC/Si, может быть основой и для иного типа структур, в частности, мембранных устройств, работающих в сложных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта НШ-5169.2006.2 и госконтракта ФАНИ № 02.513.11.3332, грантов РФФИ (№ 06-03-32467 и 07-08-00542), компании „Созвездие Водолея“ (проект „Кристалл“), Фонда поддержки науки и образования.

## Список литературы

- [1] *Wu S.-Y.* // IEEE Trans. Electron. Dev. 1974. Ed-21 (8), P. 499.
- [2] *Wu S.-Y.* // Ferroelectrics. 1976. V. 11. P. 379.
- [3] *Dawber M., Rabe K.M., Scott J.F.* // Review of Modern Physics. 2005. V. 77. P. 1083.
- [4] *Kim T.W., Yoon Y.S., Yoon S.S., Lee J.Y.* // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. P. 2676.
- [5] *Wright W., Francis I.F.* // J. Mater. Res. 1993. V. 8. P. 1712.
- [6] *Mou D., Linnros J., Peterson C.S., Rao K.V.* // J. Appl. Phys. 1998. V. 84. N 10. P. 5785.
- [7] *Ko S.-M., Khartsev S.I., Zetterlink C.-M., Grishin A.M., Ostling M.* // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. P. 895.
- [8] *Кужушкин С.А., Осипов А.В.* // ФГТ. 2008. Т. 50. № 7. С. 1188.

- [9] Кукушкин С.А., Осипов А.В., Феоктистов Н.А. // Заявка на патент РФ № 2007129834, приоритет 03.08.2007.
- [10] *Willems G.J., Wouters D.I., Maes H.E.* // Integr. Ferroelectrics. 1997. V. 15. P. 293.
- [11] *Afanasjev V.P., Petrov A.A., Pronin I.P., Tarakanov E.A., Pankrashkin A.V., Kaptelev E.Yu* and J. Graul. // J. Phys.: Condensed Matter. 2001. V. 13. P. 8755.