

06;11;12

©1995

## ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ПЛЕНКИ $\text{SrTiO}_3$ НА САПФИРЕ С ПОДСЛОЕМ ДИОКСИДА ЦЕРИЯ

*Е.К.Гольман, В.Е.Логинов, А.М.Прудан, С.В.Разумов*

Получение многослойных покрытий: пленка титаната стронция (STO) — металл или высокотемпературный сверхпроводник, на сапфире открывает возможность создания волноведущих структур СВЧ с электрическим способом управления фазовой скоростью электромагнитных волн, коэффициентом передачи и т. д. [1]. Диэлектрические свойства STO чувствительны к его структуре, содержанию примесей, наличию механических деформаций и напряжений [2]. Эти особенности STO предъявляют жесткие требования к технологии синтеза пленок: частичное или полное исключение диффузии атомов вещества подложки в пленку, уменьшение кристаллографического рассогласования решеток и механических деформаций в пленке из-за различия температурных коэффициентов линейного расширения. Известные методы получения пленок STO предполагают проведение длительного высокотемпературного отжига в атмосфере кислорода, способствующего диффузии атомов из подложки в пленку [3,4]. Снижение этого эффекта возможно при использовании буферного слоя, отделяющего пленку STO от подложки. Диоксид церия, монокристалл которого имеет кубическую симметрию с постоянной решетки  $a = 5.420 \text{ \AA}$ , хорошо согласуется по кристаллографическим параметрам как с  $r$ -срезом сапфира, так и с титанатом стронция ( $a = 3.904 \text{ \AA}$ ) [5-8]. Кроме того, диоксид церия имеет значение температурного коэффициента линейного расширения (TKI), лежащее между TKI сапфира и TKI титаната стронция:  $\text{CeO}_2\text{-TKI} = 8.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ;  $\text{SrTiO}_3\text{-TKI} = 9.4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TKI} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  ( $T = 300 \text{ K}$ ). Таким образом, диоксид церия может быть использован в качестве буферного слоя между пленкой STO и сапфиром.

В предлагаемой работе получены пленки диоксида церия и титаната стронция методом ВЧ-магнетронного распыления стехиометричных мишеней *ex situ* и исследованы их свойства.

Напыление пленок  $\text{CeO}_2$  проводилось на установке Leybold Z-400, позволяющей получать предельное давление остаточных газов порядка  $5 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$  с помощью турбомо-

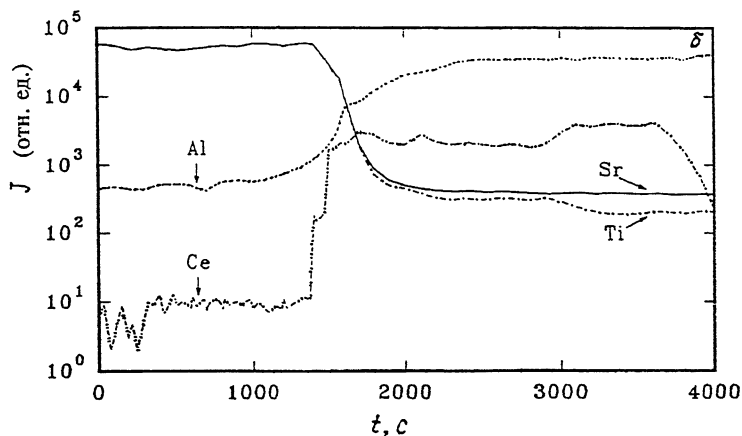
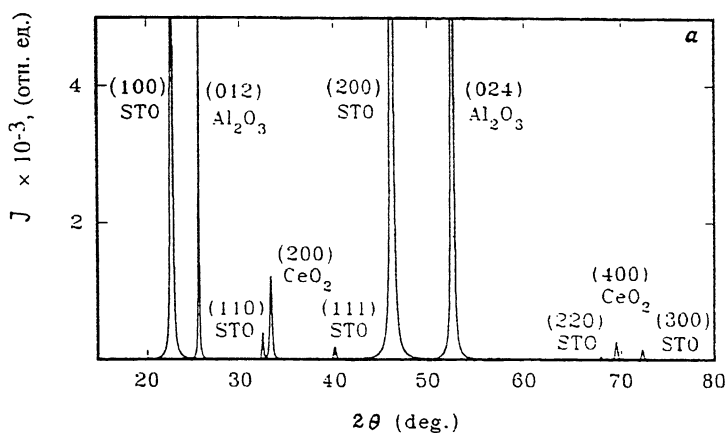


Рис. 1. Рентгенограмма (а) и элементный состав по толщине структуры (б)  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2/\text{SrTiO}_3$ .

лекулярного насоса. Керамическая мишень диоксида церия диаметром 76 мм распылялась в атмосфере чистого кислорода при давлении  $P_1 = 3.6$  Па. Время предварительного распыления, на закрытую заслонку составляло 15–20 мин, температура подложки ( $r$ -срез сапфира)  $T_1 = 650^\circ\text{C}$ , время напыления 2 ч. Полученные пленки при толщине 700–800 Å имели текстурированную структуру с ориентацией  $[100]$  к поверхности подложки.

Пленки STO осаждались в атмосфере смеси  $\text{Ar}+30\%\text{O}_2$  при давлении  $P_2 = 3.6$  Па; материал мишени — стехиоме-

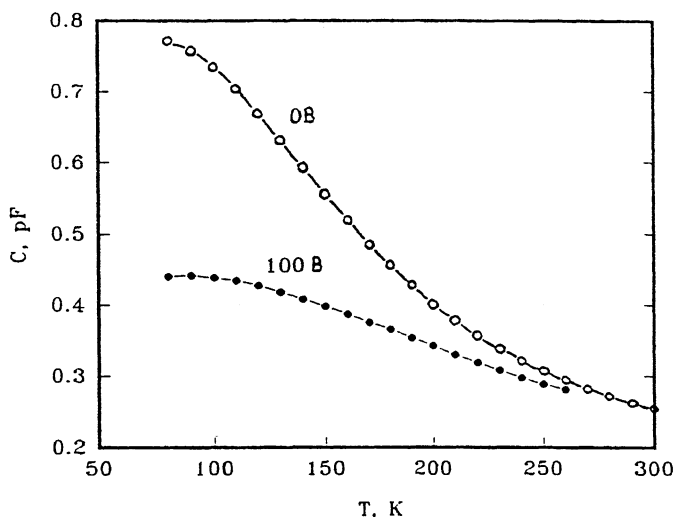


Рис. 2. Температурные зависимости емкости планарного конденсатора на основе структуры  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2/\text{SrTiO}_3$ .

тричный титанат стронция в виде керамического диска диаметром 76 мм. Использование турбомолекулярного насоса с азотной ловушкой в установке УКР-77-III позволяло обеспечить предельное давление остаточных газов  $\sim 10^{-3}$  Па. Температура подложки (сапфир с подслоем  $\text{CeO}_2$ ) в процессе напыления поддерживалась на уровне  $T_s = 750^\circ\text{C}$ . Скорость осаждения пленок STO составляла  $\approx 30 \text{ \AA}/\text{мин}$ . В данной работе в отличие от известных методов получения пленок STO [9,10] дополнительный отжиг в кислороде не проводился.

Рентгенограммы снимались дифрактометром "Geigerflex" серии D/maх — RC Rigaku на  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ ) излучении с монохроматором. Полученные рентгенограммы (рис. 1, а) показали наличие текстуры с преимущественной ориентацией  $[200]$ . На рис. 1, б приведены профили распределения основных элементов по толщине структуры  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2/\text{SrTiO}_3$ , полученные методом вторичной нейтральной масс-спектрометрии. Видно, что наличие буферного слоя  $\text{CeO}_2$  приводит к существенному снижению содержания атомов Al в пленке STO. Морфология поверхности пленок STO оценивалась с помощью растрового электронного микроскопа. Анализ фотографий поверхности при увеличении в  $2 \cdot 10^4$  не обнаружил четко обозначенных границ кристаллитов.

Для исследования диэлектрических свойств пленок STO были изготовлены конденсаторы планарной конструкции с медными пленочными электродами со следующими характерными геометрическими размерами: толщина пленки STO  $h = 1$  мкм; ширина зазора между планарными электродами  $s = 11$  мкм; длина зазора  $l = 0.26$  мм. На рис. 2 приведены зависимости емкости конденсатора от температуры при двух значениях постоянного напряжения, приложенного к конденсатору ( $U = 100$  В и  $U = 0$  В), полученные на частоте  $f = 1$  МГц. На основе измерений зависимостей  $C(T)$  в диапазоне температур (77–300) К проведено сравнение диэлектрических характеристик пленочного и объемного монокристаллического титаната стронция. Сопоставление осуществлялось путем сравнения характерных констант феноменологической теории сегнетоэлектриков, основу которой составляет следующее разложение свободной энергии ( $F$ ) сегнетоэлектрика в ряд по степеням поляризации ( $P$ ):

$$F = F_0 + \frac{1}{2} \frac{T - T_c}{\epsilon_0 C_k} P^2 + \frac{1}{4} b P^4,$$

где  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Фм<sup>-1</sup>,  $C_k$ ,  $T_c$  — константа и температура Кюри соответственно;  $b$  — константа диэлектрической нелинейности ( $b = \text{const}(T)$ ). При воздействии слабых электрических полей слагаемые в выражении с показателем степени  $n \geq 4$  играют исчезающе малую роль. В этом случае температурная зависимость малосигнальной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon(T)$ ) описывается законом Кюри-Вейса. Для монокристаллических объемных образцов отклонение экспериментальных зависимостей ( $\epsilon(T)$ ) от закона Кюри-Вейса наблюдается при температурах  $T \leq 100$  К. Для исследованных пленок это отклонение обнаружено при  $T \leq 150$  К. Значения параметров функции Кюри-Вейса и константы диэлектрической нелинейности при  $T > 150$  К близки к соответствующим значениям для объемных монокристаллов SrTiO<sub>3</sub>:

пленка STO:

$$C_k = (9.0 \pm 1.5) \cdot 10^4 \text{ К}; \quad T_c = (42 \pm 12) \text{ К};$$

$$b = (8.1 \pm 0.6) \cdot 10^9 \text{ м}^5 / \text{Cl}^2 \text{ F};$$

монокристалл STO:

$$C_k = 9.4 \cdot 10^4 \text{ К}; \quad T_c = 37 \text{ К};$$

$$b = 8.9 \cdot 10^9 \text{ м}^5 / \text{Cl}^2 \text{ F} \quad [^{11}].$$

Измерения активной составляющей проводимости конденсатора показали, что в области  $T > 150$  К тангенс угла диэлектрических потерь не превышает значения, равного  $3 \cdot 10^{-3}$ . При температуре ниже 150 К диэлектрические потери плавно возрастают до значения  $10^{-2}$  при  $T = 78$  К. Таким образом, пленки  $\text{SrTiO}_3$  на сапфире с буферным слоем  $\text{CeO}_2$  имеют структурные и диэлектрические характеристики, сравнимые в области  $T > 150$  К с характеристиками объемного монокристаллического титаната стронция, и могут быть использованы в электрически управляемых устройствах.

Авторы выражают благодарность О.Г. Вендику за внимание к работе и обсуждение результатов, В.С. Стрыканову за помощь в экспериментальном исследовании структуры и состава пленок. Работа выполнена при поддержке Государственной программы "Высокотемпературная сверхпроводимость" в рамках проектов "Фактор" и "Подслой".

#### Список литературы

- [1] *Сегнетоэлектрики в технике СВЧ* / Под ред. О.Г. Вендика. М.: Сов. радио, 1979. 272 с. с ил.
- [2] Vendik O.G., Mironenko I.G., Ter-Martirosyan L.T. // *Ferroelectrics*. 1993. V. 144. N 1-4. P. 33-43.
- [3] Gerblinder J., Meizner H. // *J. Appl. Phys.* 1990. V. 67. P. 7453.
- [4] Балашова Е.В., Гольцман Б.М., Ефимов Т.П. и др. // *ФТТ*. 1993. Т. 35. В. 2. С. 442-445.
- [5] Атаев Б.М., Камилев И.К., Рабаданов М.Х. // *Письма в ЖТФ*. 1990. Т. 16. В. 15-16. С. 61-65.
- [6] Wu X.D., Dye R.C., Muenchausen R.E. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1991. V. 58. P. 2165-2167.
- [7] Hollmann E.K., Zaitsev A.G., Loginov V.E. et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1993. V. 26. P. 504-505.
- [8] Merchant P., Jacowitz R.D., Tibbs K. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1992. V. 60. P. 763.
- [9] Neung-Ho Cho, Seung-Hee Nam, Ho-Gi Kim // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1992. V. 10. P. 87-91.
- [10] Seung-Hee Nam, Ho-Gi Kim // *J. Appl. Phys.* 1992. V. 72. P. 2895-2899.
- [11] Борисовский К.Е., Прудан А.М. // *ФТТ*. 1989. Т. 31. В. 8. С. 53-56.

Санкт-Петербургский  
государственный  
университет

Поступило в Редакцию  
31 июля 1995 г.