

изменяющих кинетику роста диффузионного  $Nb_3Sn$ -слоя. Можно предполагать, что и легирование бронзовой матрицы будет оказывать подобное влияние на оптимальное количество ниобиевых жил.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] K r u z l i a k J., H u t k a P., K o v a c P., S e t i n a P. // Acta Physica Academiae Hungaricae. 1982. V. 53. N 3-4. P. 425-431.
- [2] R u p p G., S p r i n g e r E., R o t h S. // Cryogenics. 1977. March. P. 141-144.
- [3] S u e n a g a M., L u h m a n T.S., S a m p s o n W.B. // J. of Appl. Phys. 1974. V. 45. N 9. P. 4049-4053.
- [4] S u e n a g a M., T s u c h i j a K., H i g u c h i et al. // Cryogenics. 1985. V. 25. P.123-128.
- [5] K r u z l i a k J., S a v i t s k y E.M., M i k h a i l o v B.P. et al. Proceedings 6th International conference on magnet technology (MT-6). 1977. Bratislava. P. 1099-1104.

Поступило в Редакцию  
27 июля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 22

26 ноября 1990 г.

05.2

© 1990

ОДНОФАЗНЫЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЛЕНКИ  $Pb(Zr,Ti)O_3$ ,  
ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО РАСПЫЛЕНИЯ

С.Х. Е с а я н, О.В. К а н д и д о в а,  
Г.А. В а р д а н я н, Л.П. Г р и г о р я н,  
П.Г. П е т р о с я н

Повышенный интерес к получению и исследованию сегнетоэлектрических пленок в настоящее время связан, в основном, с существенным прогрессом в создании энергонезависимых сегнетоэлектрических запоминающих устройств [1]. В результате начали бурно развиваться и совершенствоваться не только традиционные методы получения пленок (радиочастотное и магнетронное распыление), но и новые технологии, такие как *sol-gel*, *CVD* (*chemical vapor deposition*) и различные комбинированные методы

[2-6]. При этом особое внимание уделяется проблеме нанесения пленок на подложки из кремния, обычно используемые в микроэлектронике.

Одним из наиболее перспективных способов получения совершенных пленок из различных материалов, в том числе ВТСП-пленок [7], в настоящее время считается лазерное распыление, которое обладает рядом ценных преимуществ: легко достижимая идентичность химического состава мишени и пленки; малый размер мишени; высокая скорость напыления.

Несмотря на все эти достоинства, лазерное распыление пока не получило широкого распространения при создании сегнетоэлектрических пленок. Известны лишь результаты нанесения сегнетоэлектрических пленок  $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$  методом лазерного распыления на подложку из сапфира [8]. Однако однофазной (перовскитовой) структуры пленок получить пока не удалось.

В настоящей работе были проведены исследования особенностей лазерного распыления сегнетоэлектрического материала  $Pb(Zr_{0.54}Ti_{0.46})O_3$ , в результате которых были получены однофазные пленки с сегнетоэлектрической структурой типа перовскита на кремниевых подложках.

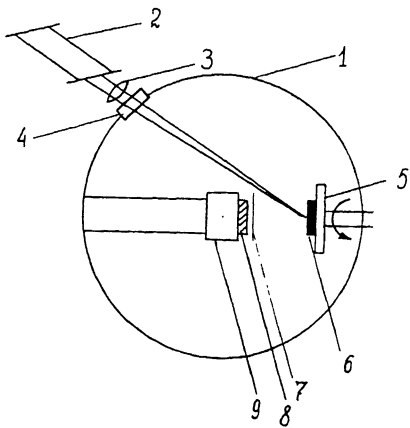
Напыление осуществлялось с помощью установки, блок-схема которой показана на рис. 1. Использовался лазер ЛОТИ-3 с длиной волны 1.06 мкм, работавший в режимах модулированной добротности или свободной генерации. Частота повторения импульсов менялась в пределах от 1 до 10 Гц, а энергия излучения составляла 0.2-0.8 Дж. Лазерное излучение вводилось в вакуумную напылительную камеру и фокусировалось в пятно диаметром 2 мм на круглой мишени из синтезированной сегнетоэлектрической керамики  $Pb(Zr_{0.54}Ti_{0.46})O_3$ , закрепленной на вращающемся столике. Плотность энергии лазерного излучения составляла 7-27 Дж/см<sup>2</sup>. Использовались мишени с диаметром 30 мм и толщиной 2 мм. В качестве подложки использовались стандартные пластины из кремния с ориентацией <111>. Расстояние мишень-подложка составляло 40-50 мм. Температура подложки варьировалась в интервале 300-600 °С. Остаточное давление газа в камере не превышало  $7 \cdot 10^{-4}$  Па. Пленки напылялись в течение 20-45 мин, после чего охлаждались со скоростью 60 град/час.

Полученные пленки имели толщину от 1 до 2 мкм в зависимости от режима напыления и были черного цвета. После напыления проводился термический отжиг пленок в печи на воздухе при температурах 600-800 °С в течение 5-12 час. Скорость нагрева и охлаждения составляла 50 град/час. В результате отжига цвет пленок изменялся, они приобретали светло-желтый или светло-зеленый оттенок.

Были проведены исследования химического состава пленок с помощью рентгеновского микроанализа, кристаллическая структура исследовалась рентгенодифракционным методом. Изучались как отожженные, так и неотожженные пленки.

Анализ состава показал, что лазерное распыление дает практически полную идентичность составов мишени и подложки независимо

Рис. 1. Блок-схема установки лазерного распыления: 1 - напылительная вакуумная камера, 2 - лазер ЛОТИ-3, 3 - фокусирующая линза, 4 - кварцевое окно, 5 - вращающийся столик, 6 - мишень, 7 - маска, 8 - подложка, 9 - нагреватель подложки.



от изменения температуры подложки и плотности лазерного излучения в указанных выше пределах. Оказалось, что пленки, полученные в режиме свободной генерации лазера (с длительностью импульса около 1 мкс) при температуре подложки 400 °С, были аморфными с включениями перовскитовой (сегнетоэлектрической) фазы (рис. 2, а). После отжига (700 °С, 6 час) эти пленки целиком переходили в перовскитовую структуру (рис. 2, б). Повышение температуры подложки до 600 °С при напылении приводило к добавлению включений со структурой пироклора (несегнетоэлектрической) к аморфной и перовскитовой фазам пленки (рис. 2, в). При этом оказалось, что отжиг не устраняет пироклорной компоненты (рис. 2, г).

Такой интересный факт, по-видимому, связан со следующим. При лазерном распылении некоторые, довольно большие, частицы вещества мишени переносятся на подложку, сохраняя свою структуру (перовскитовую), а другие, более мелкие, формируют аморфную структуру пленки. При температуре подложки ~500–600 °С, которая, вероятно, соответствует температуре фазового перехода из аморфной в пироклорную фазу, появляется примесь пироклорной фазы. В ходе дальнейшего отжига пленки, содержащие только аморфную и перовскитовую структуру, судя по всему, не проходят через фазу пироклора, а образуют сегнетоэлектрическую фазу в силу существования зародышей перовскитовой фазы. Температура полного фазового перехода аморфная–перовскитовая фаза составляет ~700 °С.

Тот факт, что отжиг при 700 °С не приводит к устранению пироклорной фазы в пленке (полученной при температурах подложки 500–600 °С), позволяет сделать вывод об устойчивости пироклорной структуры и значительно более высокой температуре фазового перехода из фазы пироклора в фазу перовскита.

Следует отметить, что при использовании режима модулированной добротности лазера не удалось получить однофазной перовскитовой структуры ни при каких температурах подложки и последующем отжиге (рис. 2, д).

Таким образом, в настоящей работе впервые методом лазерного распыления были получены однофазные пленки  $Pb(Zr, Ti)O_3$  со структурой перовскита на кремниевой подложке. Было показано, что для снижения температуры синтеза, а это является актуальной

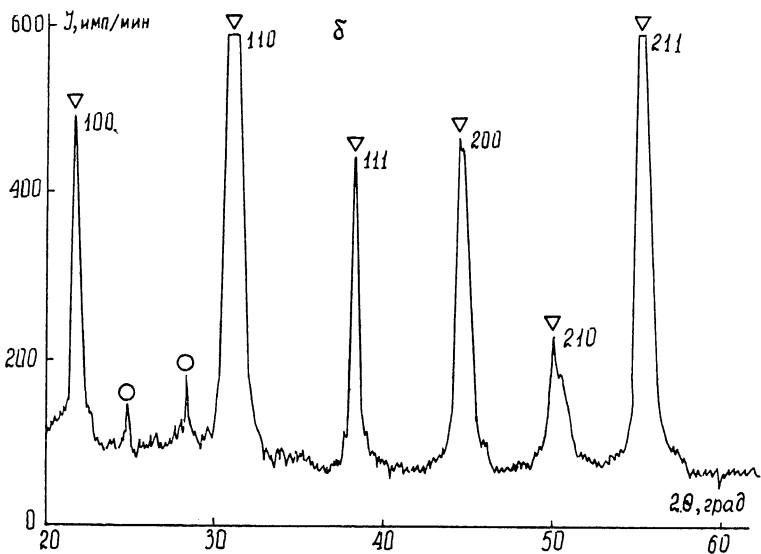
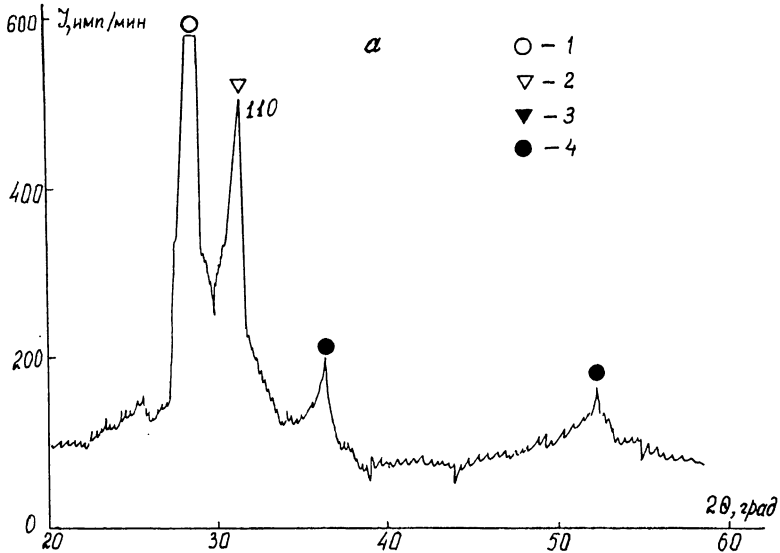


Рис. 2. Рентгенограммы пленок из  $Pb(Zr, Ti)O_3$ , полученных в режиме свободной генерации лазера при температурах подложки 400 °C (а - до отжига, б - после отжига) и 600 °C (в - до отжига, г - после отжига) и в режиме модулированной добротности лазера (д - после отжига). Пики соответствуют: 1 - подложке ( $SrTiO_3$ ), 2 - перовскиту, 3 - пироклору, 4 - неизвестной фазе.

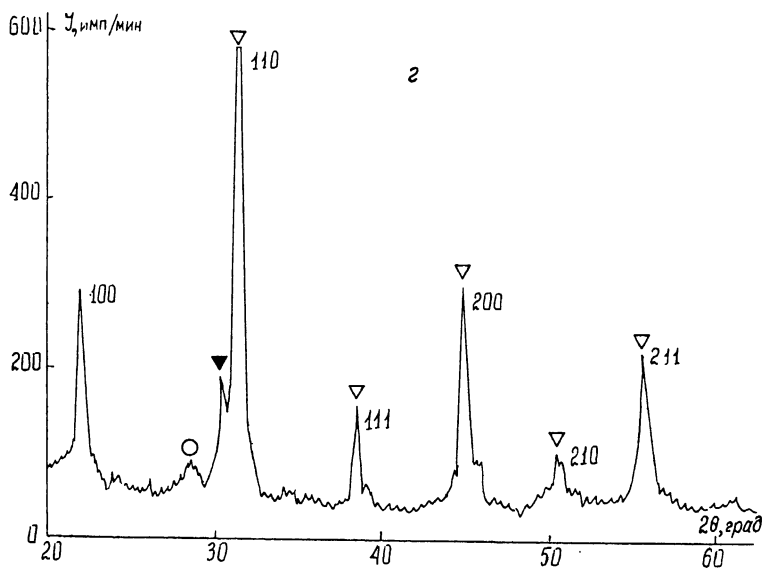
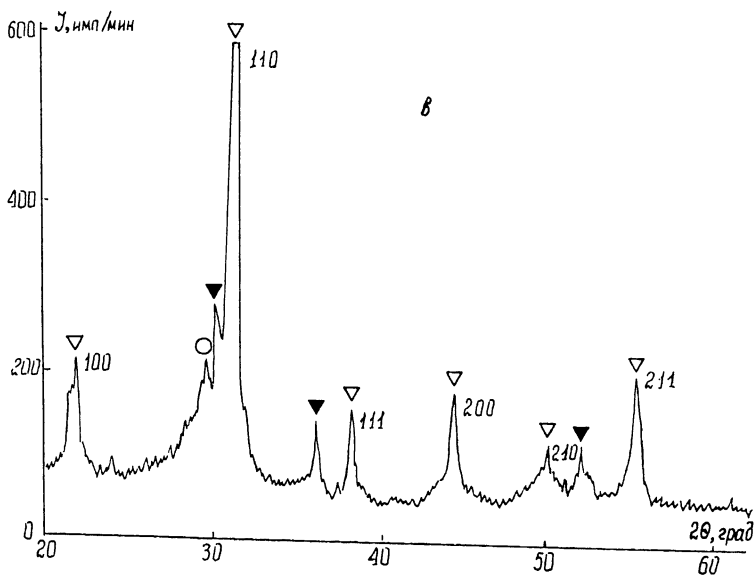


Рис. 2 (продолжение).

задачей при изготовлении сегнетоэлектрических устройств микро-электроники, следует добиваться такого режима напыления, при котором в полученной пленке отсутствуют включения пироклорной фазы. Несмотря на то что для окончательного выяснения качества этих пленок следует провести диэлектрические измерения (такие работы планируются в ближайшем будущем), полученные результаты

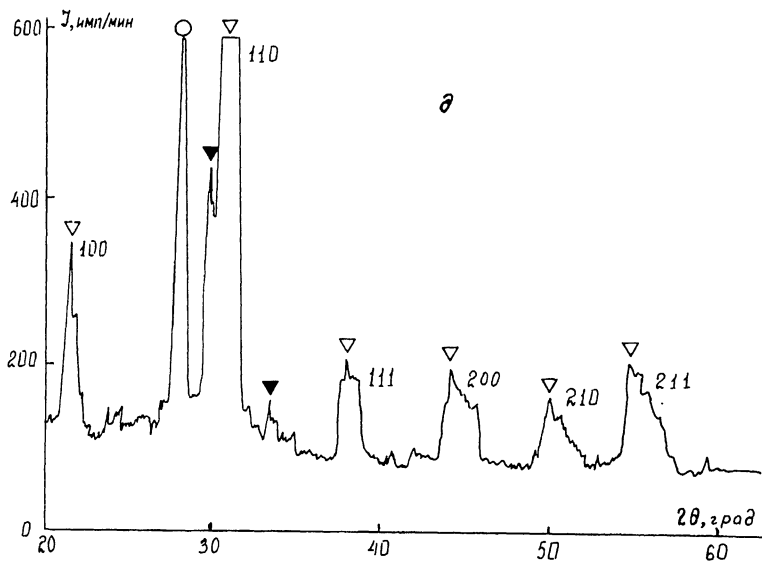


Рис. 2 (продолжение).

однозначно свидетельствуют в пользу метода лазерного распыления, как перспективного для получения сегнетоэлектрических пленок.

В заключение авторы выражают благодарность Н.Н. Зайцевой за проведение рентгеновского анализа и Л.В. Заруцкой за приготовление керамических мишеней, В.В. Леманову и И.П. Пронину за полезное обсуждение.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Scott J.E., Pas de Araujo C.A. // Science. 1989. V. 246. P. 1400-1405.
- [2] Adachi M., Matsuzaki T., Yamada T., Shiosaki T., Kawabata A. // Jap. J. Appl. Phys. 1987. V. 26. N 4. P. 550-553.
- [3] Свиридов Е.В., Мухортов В.М., Дудкевич В.П., Фесенко Е.Г. // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 5. С. 959-961.
- [4] Sreenivas K., Sayer M. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 3. P. 1484-1493.
- [5] Багинский И.Л., Косцов Э.Г. // Автометрия. 1988. В. 4. С. 88-96.
- [6] Budd K.D., Dey S.K., Payne D.A. // Br. Ceram. Proc. 1985. V. 36. P. 107-121.
- [7] Science and Technology of Thin Film Superconductors / Ed. by Mc Connell R.D., Wolf S.W. New-York: Plenum Press, 1989. P. 557.

[8] O t s u b o S., M e a d a T., M i n a m i k a w a T., Y o m e n z a n a Y., M o r i m o t o A., S h i m i z u T. // Jap. J. Appl. Phys. 1990. V. 29. N 1. P. L133-L134.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию  
25 сентября 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 22

26 ноября 1990 г.

04

© 1990

## МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ В ТОКАМАКАХ ПО РЕФРАКЦИИ ОБЫКНОВЕННОЙ ВОЛНЫ

Д.Л. Г р е к о в, О.С. П а в л и ч е н к о

1. Важнейшими задачами диагностики плазмы в термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы являются измерение профиля плотности электронов  $n_e(r)$  и профиля полоидального поля. Метод однохордовой многочастотной рефлектометрии обыкновенной волной для определения профиля плотности в экспериментальном токамаке-реакторе ИТЭР обсуждался и был признан перспективным [1, 2]. Этот метод был предложен в [3], к настоящему времени детально разработан и с успехом применяется на токамаках (см., например, [4]).

Измерение профиля полоидального поля  $B_p(r)$  является более сложной задачей. К настоящему времени данные о  $B_p(r)$  получены с использованием эффекта фарадеевского вращения плоскости поляризации проходящей через плазму обыкновенной волны [5, 6]. В работе предложен метод измерения  $B_p(r)$  по рефракции обыкновенной волны в диапазоне частот, используемых для рефлектометрических измерений.

2. Рассмотрим распространение электромагнитных волн с частотой  $\omega \sim \omega_{pe} \sim \omega_{ce}$  в плазме токамака с параметрами ИТЭРа (здесь  $\omega_{pe} = (4\pi n_e e^2 / m_e)^{1/2}$ ,  $\omega_{ce} = eB / m_e c$ ,  $B$  - модуль удерживающего магнитного поля). Для оценок будем брать  $n_e(0) = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $B(0) = 5 \text{ Т}$ , большой  $R_0$  и малый  $a$  радиусы тора  $R_0 = 6 \text{ м}$ ,  $a = 2.2 \text{ м}$ , полный ток в плазме  $J = 22 \text{ МА}$ ;  $\omega_{pe}(0) = 5.7 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_{ce}(0) = 8.8 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ , длина волны  $\lambda_{\nu} \sim 0.3 \div 1 \text{ см}$  значительно меньше размеров плазмы и масштабов неоднородности параметров плазмы и магнитного поля. Поэтому мы можем использовать приближение геометрической оптики.