

05;12

## Буферные слои для роста $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ пленок на кремнии

© С.В. Разумов, А.В. Тумаркин

С.-Петербургский государственный электротехнический университет  
E-mail: thinfilm@eltech.ru

Поступило в Редакцию 28 февраля 2001 г.

Приведены результаты исследований структурных характеристик буферных пленок  $SrTiO_3$ ,  $NdGaO_3$  и  $CeO_2$ , полученных ионно-плазменным распылением на кремниевых подложках. Показано, что фазовый состав и внутренние напряжения в пленках строго зависят от температуры осаждения. Определены технологические условия роста преимущественно ориентированных пленок  $SrTiO_3$ ,  $NdGaO_3$  и  $CeO_2$ . Структурное качество полученных буферных пленок достаточно для дальнейшего роста высококачественных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  на кремниевых подложках.

Сегодня пленки высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП)  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (YBCO) являются перспективным материалом как для сверхвысокочастотных (СВЧ) применений, так и для применений на постоянном токе. К настоящему времени на основе YBCO пленок уже разработаны и используются такие приборы, как фазовращатели, фильтры, ограничители тока [1–4]. При этом технические характеристики ВТСП приборов не уступают полупроводниковым аналогам, а в некоторых случаях превосходят их. Однако на сегодняшний день ВТСП приборы не нашли широкого применения в промышленности главным образом из-за сложной технологии изготовления и дорогостоящего материала подложек.

Для более широкого использования ВТСП материалов в технике необходимо разработать технологию роста и обработки ВТСП пленок, совместимую с технологией полупроводников. Один из путей достижения данной цели — использование для роста ВТСП пленок подложек, применяемых в полупроводниковой технологии, и, в частности, кремния.

Сегодня YBCO пленки, выращенные непосредственно на кремнии, имеют сравнительно низкую температуру перехода в сверхпроводящее состояние ( $T_c$ ), что может быть объяснено химическим взаимодействием

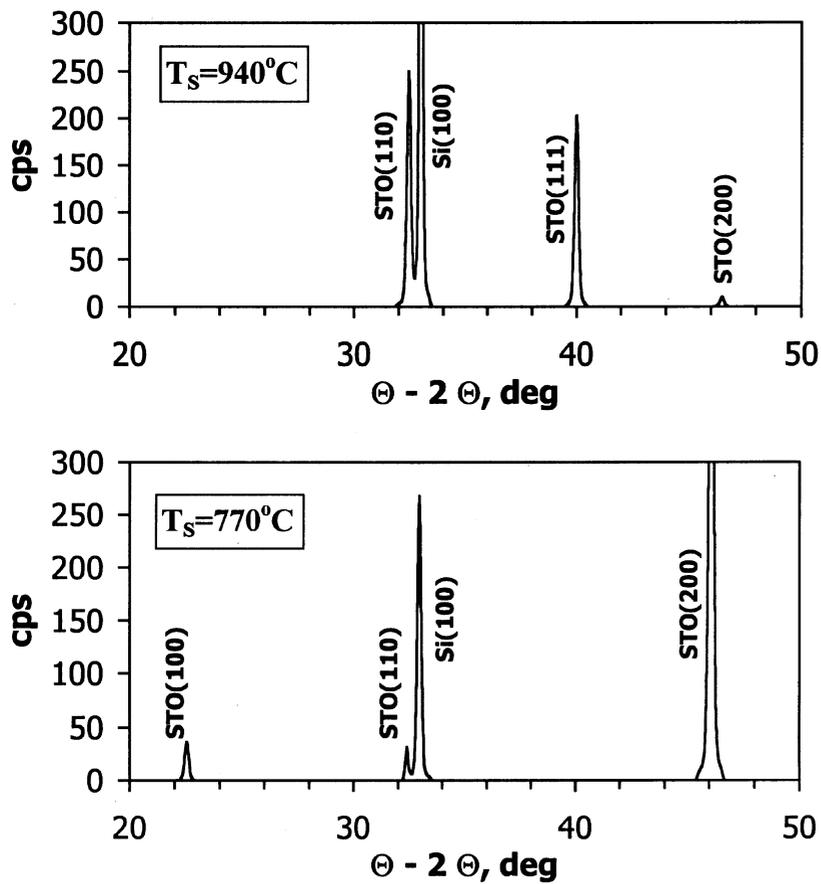
материалов пленки и подложки при высоких температурах осаждения, необходимых для получения качественных YBCO пленок. Для того чтобы избежать этого взаимодействия, необходимо использовать буферные слои, которые служат барьером для диффузии кислорода и обеспечивают структурное соответствие кристаллических решеток пленки и подложки. С точки зрения структурного соответствия решетке YBCO наиболее перспективными материалами буферных слоев являются пленки  $SrTiO_3$ ,  $NdGaO_3$  и  $CeO_2$ . Первые два материала широко используются как подложки для роста высококачественных YBCO пленок [1,4]. Несоответствие параметров кристаллических решеток  $SrTiO_3$ ,  $NdGaO_3$  и YBCO составляет 0.5 и 0.04% соответственно [5]. Пленки буферного слоя  $CeO_2$  позволяют выращивать *c*-ориентированные пленки YBCO высокого структурного и электрофизического совершенства на подложках сапфира [6,7]. Несоответствие параметров кристаллических решеток  $CeO_2$  и YBCO составляет 0.7% [5].

Согласно предыдущим исследованиям, существует строгая корреляция между структурным качеством YBCO пленки и фазовым составом буферного слоя [7–9]. Что касается сапфировых подложек, однофазная пленка буферного слоя является одним из необходимых условий для получения преимущественно ориентированных YBCO пленок с высокими электрофизическими характеристиками [7]. Можно ожидать, что для получения YBCO пленок с приемлемыми для приборных применений свойствами на подложках кремния фазовый состав и внутренние напряжения в пленках буферных слоев будут играть первостепенную роль.

В настоящей работе исследуются структурные характеристики пленок  $SrTiO_3$ ,  $NdGaO_3$  и  $CeO_2$  на кремниевых подложках для определения технологических условий получения однофазных пленок буферных слоев с минимальными внутренними напряжениями.

Пленки были получены методом ионно-плазменного распыления керамических мишеней на установке LEYBOLD Z-400. В качестве подложек использовался кремний размером  $10 \times 10$  мм ориентации (*h00*). Рабочее давление кислорода составляло 10 Па. Температура подложки ( $T_s$ ), измеряемая термопарой, изменялась в диапазоне от 750 до 950°C. Мощность разряда поддерживалась на уровне 120 W. Время осаждения пленок составляло 2 h. По окончании процесса осаждения пленка охлаждалась в атмосфере кислорода со скоростью 2–3°C/min.

Структура полученных пленок исследовалась методом рентгеновской дифрактометрии (монохроматизированным  $CuK\alpha$  излучением) на



**Рис. 1.** Зависимость фазового состава пленок  $\text{SrTiO}_3$  на кремнии от температуры осаждения.

установке "Geigerflex" Rigaku-D/max. Установлена корреляция между температурой осаждения пленок и их фазовым составом. Обнаружено также, что межплоскостные расстояния  $d(h00)$  уменьшаются с увеличением температуры синтеза для всех исследуемых материалов.

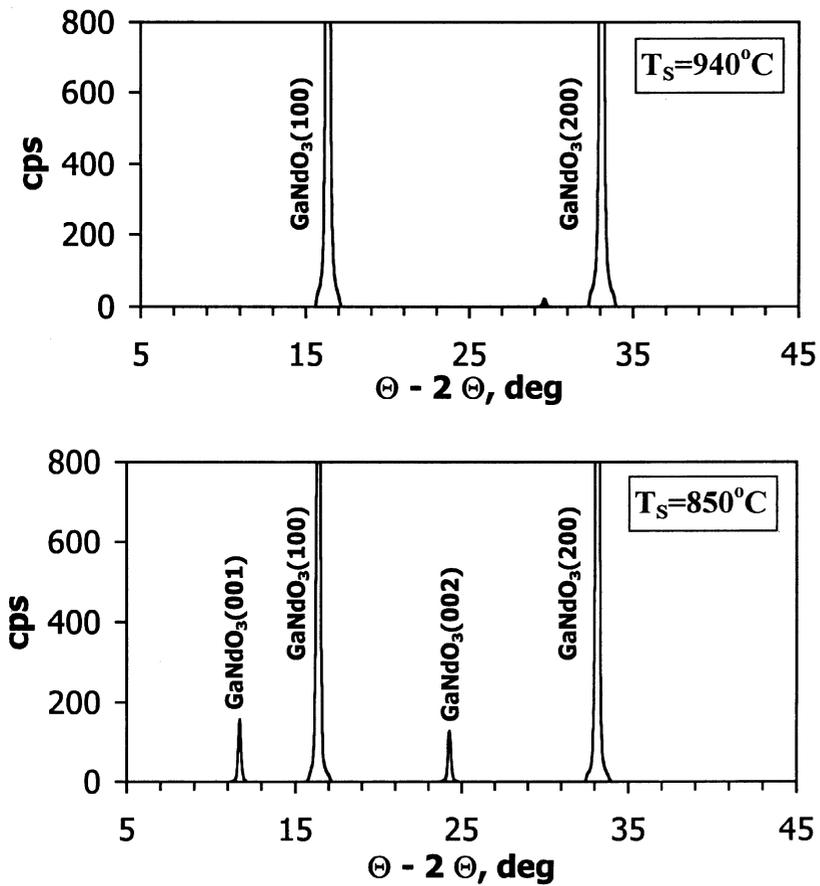
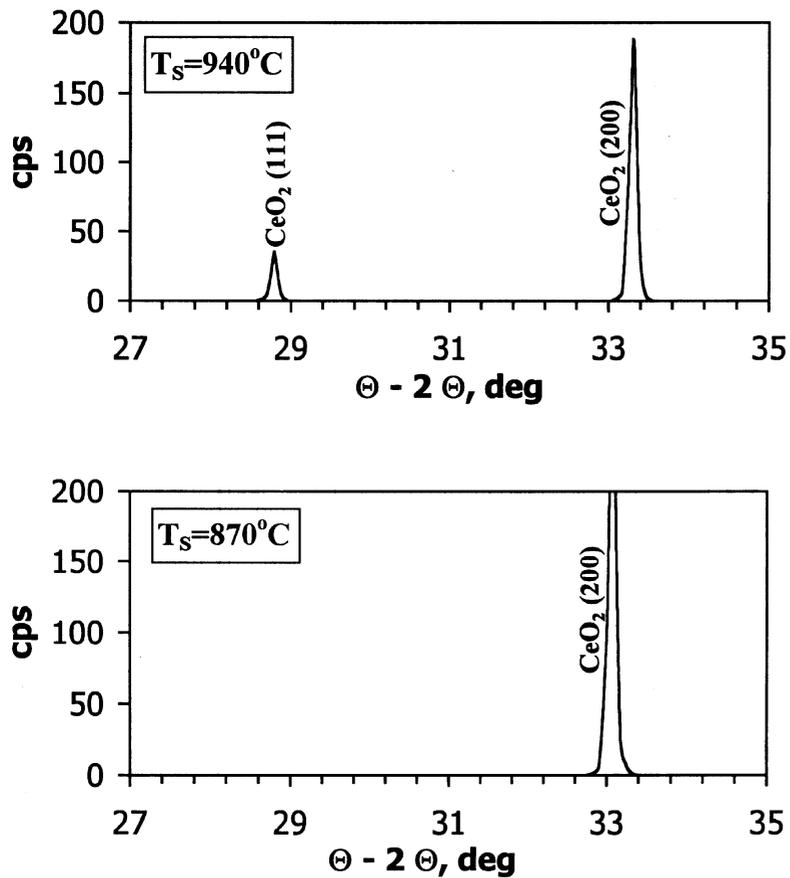


Рис. 2. Зависимость фазового состава пленок  $\text{NdGaO}_3$  на кремнии от температуры осаждения.

**Пленки  $\text{SrTiO}_3$ .** Фазовый состав пленок  $\text{SrTiO}_3$  на кремнии строго зависит от температуры синтеза, как показано на рис. 1. Полученная при температуре  $940^\circ\text{C}$   $\text{SrTiO}_3$  пленка содержит зерна ориентаций  $(hk1)$  и  $(hk0)$  относительно поверхности подложки, тогда как рост



**Рис. 3.** Зависимость фазового состава пленок  $\text{CeO}_2$  на кремнии от температуры осаждения.

блоков ориентации ( $h00$ ) подавлен. С другой стороны, при температуре осаждения  $770^\circ\text{C}$  на дифрактограмме присутствуют отражения (100) и (200), соответствующие фазе ( $h00$ ) при минимальных включениях посторонних фаз. Межплоскостное расстояние  $d(200)$  уменьшается при увеличении температуры синтеза с  $1.967 \text{ \AA}$  при  $770^\circ\text{C}$  до  $1.951 \text{ \AA}$  при

940°C. Таким образом, пленки  $\text{SrTiO}_3$ , осажденные при температуре 770°C, имеют преимущественную ориентацию ( $h00$ ), тогда как отличие их межплоскостного расстояния  $d(200)$  от аналогичного межплоскостного расстояния в порошковом образце ( $d(200)$  объемного образца составляет 1.953 Å) менее 2%.

**Пленки  $\text{NdGaO}_3$ .** В противоположность пленкам  $\text{SrTiO}_3$  увеличение температуры синтеза приводит к росту ( $h00$ ) ориентированных пленок  $\text{NdGaO}_3$ , как показано на рис. 2. Однако в данном случае однофазные пленки с ориентацией ( $h00$ ) обладают несколько сжатой решеткой в направлении, перпендикулярном подложке, по сравнению с объемным образцом. Действительно, межплоскостное расстояние  $d(100)$  в пленке при температуре синтеза 940°C составляет 5.381 Å, тогда как в объемном образце  $d(100) = 5.42$  Å.

**Пленки  $\text{CeO}_2$ .** Диапазон температур, в котором возможен однофазный рост пленок  $\text{CeO}_2$  на кремнии гораздо уже по сравнению с условиями получения преимущественно ориентированных пленок  $\text{SrTiO}_3$  и  $\text{NdGaO}_3$ . Пленки  $\text{CeO}_2$ , осажденные при температурах выше 900°C и ниже 800°C, обладают поликристаллической структурой с включениями блоков ( $hk1$ ) и ( $h00$ ) ориентацией. Однофазные пленки  $\text{CeO}_2$  с ориентацией ( $h00$ ) получены при температуре синтеза 870°C (рис. 3). Ширина пика (200) на полувысоте от максимума составила 0.24°, что свидетельствует о хорошо упорядоченной крупноблочной структуре пленок. Межплоскостное расстояние  $d(200)$  пленок, полученных при температуре подложки 780°C, близкое к значению для объемного материала, подтверждает практическое отсутствие внутренних напряжений в пленке ( $d(200)$  в пленке равно 2.706 Å, тогда как  $d(200)$  объемного образца равно 2.703 Å). Важным представляется тот факт, что найденная в данной работе оптимальная температура роста однофазных пленок  $\text{CeO}_2$  на кремнии совпадает с температурой синтеза однофазных пленок  $\text{CeO}_2$  на сапфире [8].

В результате проведенных исследований установлено, что рост однофазных пленок  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{NdGaO}_3$  и  $\text{CeO}_2$  с минимальными внутренними напряжениями на кремнии возможен при использовании оптимальных температур синтеза. Высокое структурное качество полученных буферных пленок позволяет рассчитывать на дальнейший рост структурно совершенных пленок  $\text{YBCO}$  на кремнии для широких технических применений.

## Список литературы

- [1] *Vendik O.G., Hollmann E.K., Zaitsev A.G.* et al. // J. of Phys. D: Appl. Phys. 1995. V. 28. P. 1457–1462.
- [2] *Meerovich V., Sokolovsky V., Shter G.E.* et al. // Phys. C 1997. V. 275. P. 119–125.
- [3] *Vendik O.G., Kozyrev A.B., Samoilova T.B.* et al. // Journ. of Supercond. 1997. V. 10. P. 63–67.
- [4] *Hollmann E.K., Ivanov A.V., Kozyrev A.B.* et al. // NATO ASI Series. Vol.: Microwave Physics and Technique. 1996. V. 33. P. 339–344.
- [5] *Hollmann E.K., Vendik O.G., Melekh B.T.* et al. // Supercond. Sci. Technol. 1994. V. 7. P. 609–620.
- [6] *Гольман Е.К., Плоткин Д.А., Разумов С.В.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 9. С. 132–136.
- [7] *Hollmann E.K., Razumov S.V., Tumarkin A.V.* // Physica C. 2000. V. 338. P. 246–250.
- [8] *Гольман Е.К., Разумов С.В., Тумаркин А.В.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 11. С. 47–51.
- [9] *Афросимов В.В., Гольман Е.К., Ильин Р.Н.* и др. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 1. С. 91–95.