

05.3;05.4

©1993

## ПЛЕНОЧНЫЕ СТРУКТУРЫ (Ba,Sr) TiO<sub>3</sub>/YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>

*Б.М.Гольцман, В.В.Леманов, А.Л.Холкин, С.Г.Шульман*

В настоящее время интенсивно исследуется влияние электрического поля на свойства ВТСП пленок (*E*-эффект), см. обзор [1] и ссылки, содержащиеся там. Объектами исследования служат пленочные структуры ВТСП-диэлектрик-металл с управляющими напряжениями до 10 В. В работе [2] наблюдалось существенное изменение свойств пленок YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (YBCO) при переключении спонтанной поляризации сегнетоэлектрической подложки (*P*-эффект). При этом управляющие напряжения составляли несколько сот вольт.

В связи с вышеизложенным представляется интересным получение тонкопленочных структур ВТСП-сегнетоэлектрик-металл, в которых благодаря варьированию температуры сегнетоэлектрического фазового перехода возможно наблюдение как *E*-, так и *P*-эффекта при небольших (порядка нескольких вольт) напряжениях на затворе. С этой точки зрения перспективной является система BaTiO<sub>3</sub>-SrTiO<sub>3</sub> (BST). BaTiO<sub>3</sub> является сегнетоэлектриком с температурой Кюри для высокотемпературного фазового перехода около 400 К, а SrTiO<sub>3</sub> — диэлектрик с высоким значением диэлектрической проницаемости. Твердые растворы этих материалов в зависимости от состава могут иметь температуру Кюри от 400 до по крайней мере 40 К, что позво-

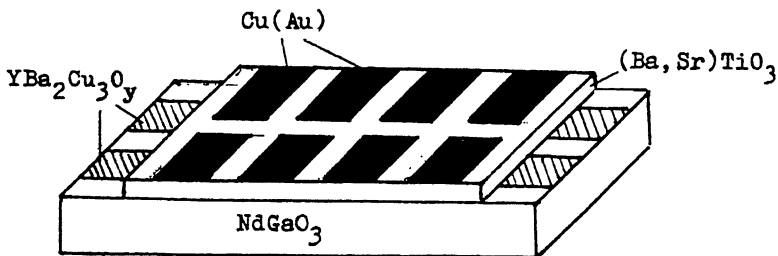


Рис. 1. Схематическое изображение пленочных структур высоко-температурный сверхпроводник-сегнетоэлектрик-металл.

ляет получать структуры сегнетоэлектрик-сверхпроводник с различным соотношением температур сегнетоэлектрического и сверхпроводящего фазовых переходов. Кроме научного интереса, исследование таких структур может быть полезным для создания сверхпроводящих полевых транзисторов с памятью [3].

Целью настоящей работы являлось получение пленочных структур YBCO-BST-металл с различными температурами Кюри и высокими значениями диэлектрической проницаемости при сохранении сверхпроводящих свойств пленок YBCO.

Исследуемые образцы представляли собой подложку из монокристалла  $\text{NdGaO}_3$ , ориентированного в направлении [100], с размерами  $8 \times 2.5 \times 0.7$  мм, на которую вдоль длинной стороны наносились изолированные друг от друга полоски пленки YBCO шириной 0.4 мм (рис. 1). Далее на среднюю часть подложки напылялась сплошная пленка BST и поверх нее — металлические контакты Cu с подслоем Au в виде полосок, ориентированных перпендикулярно полоскам ВТСП. Таким образом, каждое взаимное пересечение полосок YBCO и металла представляло собой автономный конденсатор. Выбранная геометрия позволяла независимо исследовать свойства как ВТСП, так и сегнетоэлектрических пленок.

Пленки YBCO толщиной 0.3–0.5 мкм наносились методом лазерного испарения *in situ* при температуре подложки  $750^\circ\text{C}$  и давлении кислорода 26 Па. Использовался импульсный лазер со следующими характеристиками:  $\lambda = 1.06$  мкм, длительность импульса  $\approx 40$  нс, частота следования импульсов 1.5 Гц, энергия в импульсе 150 мДж, плотность энергии 3–5 Дж/см<sup>2</sup>. Мишенью служило прессованное из стехиометрического порошка кольцо с внутренним и внешним диаметрами 10 и 20 мм соответственно. При помощи специального устройства мишень вращалась с одновременным радиальным смещением так, что вся поверхность мишени облучалась направленным по нормали к ней

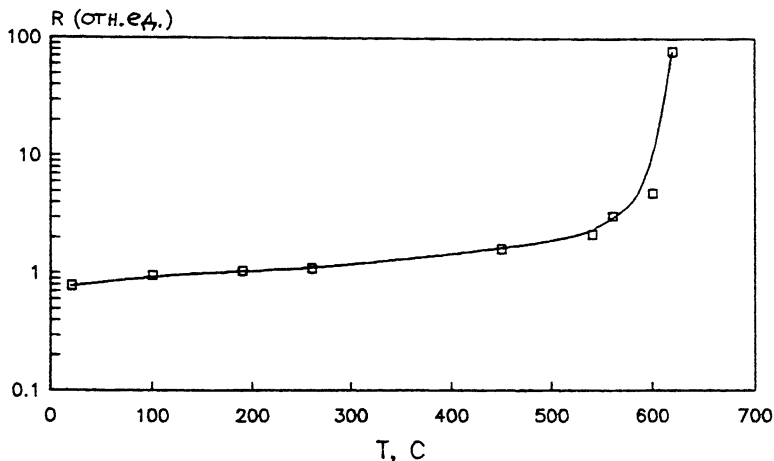


Рис. 2. Зависимость сопротивления пленок YBCO от температуры, полученная при нагревании в смеси  $\text{Ar} + \text{O}_2$  при давлении 8 Па.

лазерным пучком. Полученные пленки имели структуру  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  с осью  $c$ , перпендикулярной плоскости подложки. Температурная зависимость сопротивления пленки имела характерный металлический ход с температурой начала сверхпроводящего перехода 90 К и шириной перехода 4–6 К.

Пленки BST толщиной 1.5–2.0 мкм были получены высокочастотным магнетронным распылением на частоте 13.6 МГц при температуре подложки 620°C и давлении смеси аргона и кислорода 8 Па (соотношение концентраций 6:1). Как известно [4], бомбардировка поверхности пленки ионами с высокой энергией может являться причиной ее высокой дефектности и изменения состава. Поэтому подложка располагалась так, что ее поверхность была обращена в сторону, противоположную мишени. Расстояние подложка–мишень составляло 20 мм, а скорость роста пленки 50 нм/мин. Металлические электроды Cu с подслоем Au наносились с помощью термического испарения в вакууме  $\approx 10^{-5}$  Тор.

Особое внимание уделялось сохранению сверхпроводящих свойств пленки YBCO при напылении сегнетоэлектрической пленки BST. Поэтому в процессе напыления производился непрерывный контроль электросопротивления пленки сверхпроводника. С этой целью к пленке YBCO методом термокомпрессии присоединялись золотые токоподводы диаметром 50 мкм. Наблюдение за сопротивлением в процессе напыления показало следующее:

1. Нагревание пленки при давлении смеси аргона–кислорода 8 Па до  $T = 550\text{--}600^\circ\text{C}$  сопровождается отно-

сительно небольшим ростом сопротивления, связанным с уменьшением подвижности носителей и частичной потерей кислорода (рис. 2). При дальнейшем увеличении температуры сопротивление пленки резко увеличивается, что по-видимому объясняется переходом орторомбической структуры в тетрагональную [5]. Наблюдаемое изменение сопротивления обратимо: при увеличении давления кислорода до  $10^4$  Па за время 3–5 мин сопротивление пленки столь же значительно уменьшается.

2. Аргон-кислородная плазма является активным окислителем. Так, пленка YBCO, нагретая до  $620^\circ\text{C}$  при давлении  $\text{Ar}+\text{O}_2$  8 Па, после включения разряда за несколько минут уменьшает свое сопротивление в 10 раз. Затем, по мере напыления пленки BST, наблюдается постепенный рост ее сопротивления. Это может свидетельствовать в пользу того, что напыляемая сегнетоэлектрическая пленка с одной стороны экранирует YBCO пленку от плазмы, с другой стороны — “отсасывает” из нее кислород. Через 2 ч, по мере напыления BST, сопротивление YBCO достигает значения, которое она имела до включения разряда, т.е. эффект интенсивного окисления в плазме полностью исчезает. Однако после выключения разряда и увеличения давления кислорода до  $10^4$  Па при той же температуре  $620^\circ\text{C}$  наблюдается постепенное (в течение 10–15 мин) уменьшение сопротивления пленки до равновесного значения, которое она имела бы в условиях, если бы сегнетоэлектрическая пленка отсутствовала. Следовательно, окисление пленки YBCO при давлении кислорода  $\approx 10^4$  Па происходит и при наличии сегнетоэлектрической пленки за счет диффузии через нее атомов кислорода.

Таким образом, исходное сопротивление пленки YBCO при комнатной температуре может быть восстановлено, если после напыления на нее сегнетоэлектрической пленки снижение температуры подложки производить постепенно (в течение 1.5–2 ч) при высоком ( $\approx 10^4$  Па) давлении кислорода.

Перейдем к обсуждению свойств полученных структур. На рис. 3 показаны температурные зависимости диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  пленок  $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$  с  $x = 0.5$  и  $x = 0.21$ , измеренные на частоте 5 кГц, а также температурная зависимость удельного сопротивления  $\rho$  пленки YBCO после напыления на нее пленки BST. Значения  $x$  относятся к составу распыляемой мишени. Видно, что для состава с  $x = 0.5$  (кривая 1) наблюдается широкий максимум диэлектрической проницаемости в районе 180–210 К, свидетельствующий о наличии сегнетоэлектрического фазового перехода. Размытие перехода связано, вероятно, как с высокой дефектностью пленки, так и с механическими напря-

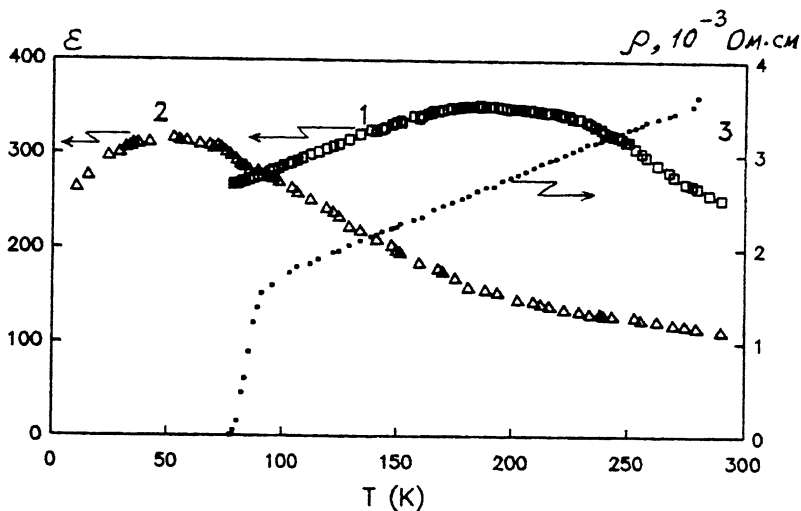


Рис. 3. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  пленок  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  (1 —  $x = 0.5$ , 2 —  $x = 0.21$ ) и удельного сопротивления  $\rho$  пленки YBCO (3) с структурах YBCO/BST/Au.

жениями и является характерным для пленок такого типа [6]. Тем не менее диэлектрическая проницаемость в максимуме достаточно высока и составляет около 350.

При  $x = 0.21$  (кривая 2) сегнетоэлектрический фазовый переход смещается в область низких температур (50–60 К). Температурная зависимость удельного сопротивления пленки YBCO имеет характерный для ВТСП металлический ход с отношением сопротивлений при комнатной температуре и при температуре начала сверхпроводящего перехода  $\rho(300\text{ К})/\rho(90\text{ К}) \approx 2.2$ . Температура начала перехода, как и до напыления пленок BST, составляла около 90 К, что свидетельствует о сохранении содержания кислорода. Ширина перехода, измеренная по уровню 0.1 и 0.9, несколько увеличивается и составляет приблизительно 8 К.

Таким образом, непрерывный контроль за сопротивлением пленок YBCO в процессе напыления на них сегнетоэлектрических пленок позволяет определить технологический режим, практически полностью восстанавливающий их сверхпроводящие свойства.

Полученные результаты демонстрируют возможность изготовления пленочных структур высокотемпературный сверхпроводник–сегнетоэлектрик–металл с различным соотношением температур сегнетоэлектрического и сверхпроводящего переходов и удовлетворительными сегнетоэлек-

трическими и сверхпроводящими свойствами. При этом температурной области вблизи сверхпроводящего перехода, в которой эффект электрического поля особенно велик [1], может соответствовать как сегнето-, так и параэлектрическая фаза сегнетоэлектрической пленки. Вследствие размытости перехода диэлектрическая проницаемость сохраняет высокие значения в широкой области температур, что особенно важно для практических приложений.

Отметим, что получение таких структур с регулируемой температурой сегнетоэлектрического фазового перехода может представлять интерес и для изучения связи мягкой моды сегнетоэлектрика с параметрами сверхпроводника [7].

Работа выполнена в рамках проекта № 802 Государственной программы по высокотемпературной сверхпроводимости.

### Список литературы

- [1] *Mannhart J.* // *Modern Phys. Lett.* 1992. V. B6. N 10. P. 555-571.
- [2] *Леманов В.В., Холкин А.Л., Шерман А.Б.* // *Письма в ЖЭТФ.* 1992. Т. 56. В. 11. С. 580-583.
- [3] *Леманов В.В., Павлов С.Т., Пивоваров И.С.* // *Письма в ЖТФ.* 1992. Т. 18. В. 15. С. 55-59.
- [4] *Surowiak Z., Margolin A.M., Zakharchenko I.N., Biryukov S.V.* // *Thin Solid Films.* 1989. V. 176. N 2. P. 227-246.
- [5] *Feenstra R., Lindemer T.B., Budai J.D., Galloway M.D.* // *J. Appl. Phys.* 1991. V. 69. N 9. P. 6569-6585.
- [6] *Барский И.В., Вендик О.Г., Смирнов А.Д., Хижа Г.С.* // *ЖТФ.* 1989. Т. 59. В. 9. С. 173-176.
- [7] *Визгин В.С.* В сб.: *Высокотемпературная сверхпроводимость: актуальные проблемы* / Под ред. А.А.Киселева. Л.: ЛГУ, 1989. В. 1. С. 97.

Физико-технический институт  
им.А.Ф.Иоффе РАН  
С.-Петербург

Поступило в Редакцию  
21 июля 1993 г.