

05.4;12

## Диэлектрические свойства планарных структур на основе сегнетоэлектрических пленок $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$

© Б.М. Гольцман, В.В. Леманов, А.И. Дедык, С.Ф. Карманенко,  
Л.Т. Тер-Мартirosян

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
Петербургский государственный электротехнический университет

Поступило в Редакцию 7 апреля 1997 г.

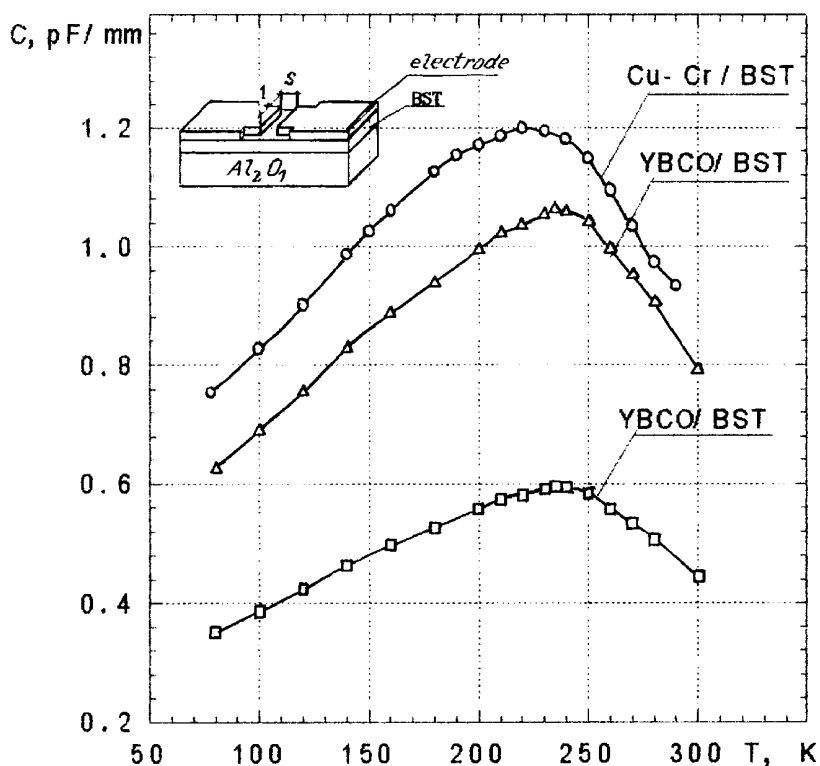
Экспериментально исследованы диэлектрические свойства планарных структур  $\text{Cu-Cr}/\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$  и  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}/\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$  в интервале температур 78–300 К.

Показано, что использование электродов из YBCO в структурах на основе пленок  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$  обеспечивает отсутствие диэлектрического гистерезиса в параэлектрической фазе при сохранении диэлектрической нелинейности и к снижению уровня диэлектрических потерь.

Работа посвящена сравнительному исследованию диэлектрических свойств планарных структур на основе поликристаллических пленок состава  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$  (BST) с электродами из металлов Cu–Cr, Ni и из окисного высокотемпературного сверхпроводника  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO).

Сегнетоэлектрические пленки BST были получены на подложке  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  методом ВЧ магнетронного распыления в атмосфере аргона и кислорода с последующим отжигом в кислороде при температуре 1150°C [1]. Толщина пленок была в пределах 1–1.2  $\mu\text{m}$ . Пленки имели поликристаллическую структуру.

Металлические электроды наносились методом термического испарения в вакууме. Электроды из высокотемпературного сверхпроводника наносились методом магнетронного распыления на постоянном токе. Толщина пленок YBCO составляла 0.4  $\mu\text{m}$ , температура перехода лежала в пределах (83–90) К, ширина перехода не превышала (1–2) К. Контакты к электродам из YBCO наносились термическим испарением Ag в вакууме. Планарные электроды формировались с



**Рис. 1.** Температурные зависимости емкости планарных структур на основе пленок  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$  с электродами из Cu-Cr и из YBCO.

помощью жидкостной фотолитографии. Ширина зазоров, полученных таким способом, составляла  $s = 5\text{--}10\ \mu\text{m}$ , длина зазоров менялась в пределах  $l = 0.1\text{--}2.5\ \text{mm}$  (рис. 1). На одной подложке размером  $10 \times 10\ \text{mm}$  формировалось до 32 отдельных элементов.

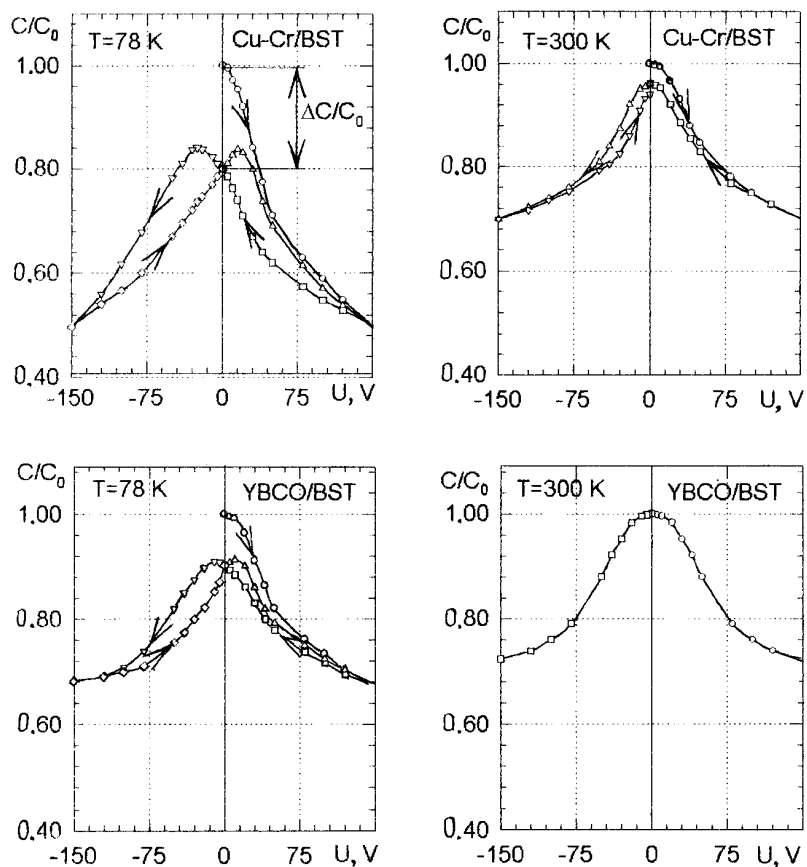
В работе были проведены измерения температурных зависимостей емкости ( $C$ ) и  $\text{tg } \delta$  на частоте 1 МГц в интервале 78–300 К, а также измерения вольт-фарадных характеристик при 78 и 300 К в диапазоне напряжения — 150–150 В. Было изготовлено и измерено по  $\sim 30$  структур с различным материалом электродов.

На температурных зависимостях погонной емкости планарных структур с металлическими электродами и с электродами из YBCO обнаружены широкие максимумы при  $T = 210\text{--}240\text{ К}$  (рис. 1) в области перехода сегнетопарафаза. Верхняя кривая, приведенная на рис. 1 для образцов с электродами из Cu–Cr, характерная для всех структур такого типа. Значения емкостей таких образцов различались не более чем на 10% во всем температурном диапазоне. Емкости структур с YBCO-электродами были всегда меньше, а разброс значений емкости для различных образцов таких структур был существенно больше, чем у структур с металлическими электродами. Две кривые, приведенные на рис. 1, ограничивают диапазон, в котором лежат значения емкости для структур YBCO/BST. Скорее всего, это связано с диффузией компонентов пленки YBCO в BST в результате технологического процесса.

Рис. 2 иллюстрирует влияние материала электродов на диэлектрический гистерезис [2]. На вольт-фарадных характеристиках структур с металлическими электродами диэлектрический гистерезис ( $\Delta C/C_0$ ,  $C_0$  — начальное значение емкости) проявляется как в сегнето- ( $T = 78\text{ К}$ ), так и в парафазе ( $T = 300\text{ К}$ ). Большинство ( $\sim 80\%$ ) структур YBCO/BST не проявляют гистерезис в парафазе ( $T = 300\text{ К}$ ) независимо от характера кривой  $C(T)$ . Для образцов с YBCO-электродами диэлектрический гистерезис в сегнетофазе становится меньше ( $T = 78\text{ К}$ ) по сравнению с гистерезисом в сегнетофазе для структур Cu–Cr/BST. Наличие образцов YBCO/BST с гистерезисом в парафазе, вероятно, можно объяснить химическими процессами на границе раздела электрод–пленка [3]. Управляемость нелинейных конденсаторных структур удобно характеризовать коэффициентом  $K = C_0 C(U_{\max})$  ( $U_{\max} = |150\text{ В}|$ ) [4]. Следует отметить, что при 300 К управляемость структур YBCO/BST с безгистерезисными характеристиками сохранялась практически такой же ( $K = 1.34$ ), как и для структур Cu–Cr/BST ( $K = 1.43$ ), если их температурная зависимость емкости соответствовала верхней кривой рис. 1. У образцов, температурная зависимость которых соответствовала нижней кривой (рис. 1), управляемость была значительно меньше ( $K = 1.15$ ).

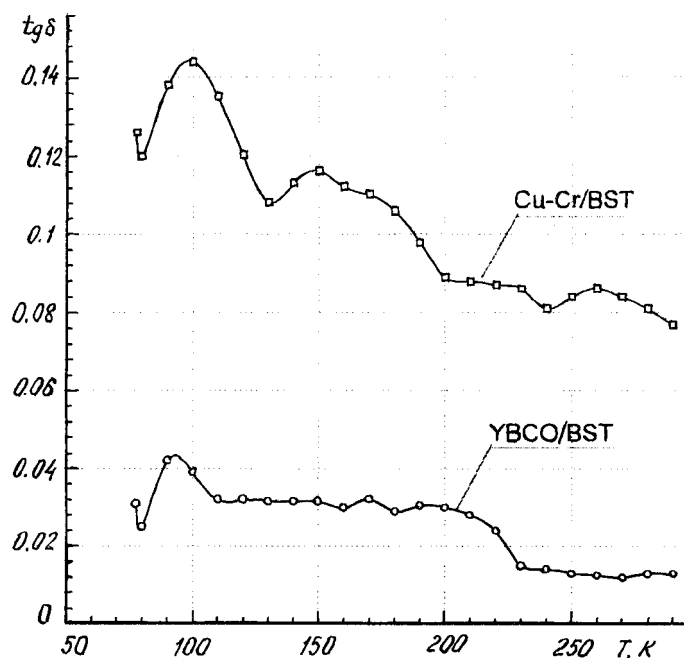
Тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$  (рис. 3) структур с электродами из YBCO во всем температурном диапазоне меньше, чем  $\text{tg } \delta$  образцов с металлическими электродами.

Сильное уширение максимумов  $C(T)$  для пленок  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$  уже обсуждалось нами в [1]; основными причинами широких максимумов



**Рис. 2.** Вольт-фарадные характеристики планарных структур с различным материалом электродов в сегнето- ( $T = 78$  К) и в парафазе ( $T = 300$  К).

могут быть неоднородность состава по толщине и по площади пленки, а также упругие напряжения в пленке. Изменение материала электродов оказывает незначительное влияние на ширину максимумов температурных зависимостей  $C(T)$ . Наблюдаемое снижение емкости структур YBCO/BST, вероятно, связано с изменениями, происходящими в пленке



**Рис. 3.** Температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь для структур с электродами из Cu-Cr и из YBCO.

BST как при нанесении YBCO-электрода, так и при последующем хранении [3], в частности имеет место химическое взаимодействие между слоями BST и YBCO [5]. При этом эффективная емкость всей структуры и соответствующая ей диэлектрическая проницаемость уменьшаются. Приближенная оценка диэлектрической проницаемости структур с металлическими электродами при рабочей температуре 300 К составляет  $\epsilon \cong 700$  [1], для структур с электродами из YBCO диэлектрическая проницаемость лежит в диапазоне  $\epsilon \cong 670-300$ . Верхняя граница соответствует кривой 2, нижняя — кривой 3 (рис. 1).

Электроды из YBCO оказывают влияние на наличие диэлектрического гистерезиса как в пара, так и в сегнетофазе. В случае металлических электродов диэлектрический гистерезис структур на основе пленок

$\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$  в парафазе (рис. 2,  $T = 300 \text{ K}$ ) можно объяснить, как и для  $\text{SrTiO}_3$  [2]: 1) образованием объемного заряда на контакте металл/сегнетоэлектрик; если, как обычно, работа выхода из металла ( $\Phi_{\text{M}}$ ) меньше работы выхода из сегнетоэлектрика ( $\Phi_{\text{сэ}}$ ), то образуется барьер для дырок [6]; 2) инжекцией электронов из металлического электрода. Вольт-фарадные характеристики без диэлектрического гистерезиса наблюдались в структурах на основе монокристаллического  $\text{SrTiO}_3$  с электродами из YBCO при 4.2 K (при этом  $\Phi_{\text{YBCO}} > \Phi_{\text{сэ}}$  [6]). При таком соотношении работ выхода инжекция носителей из электродов подавлена [7] и диэлектрический гистерезис отсутствует. Можно предположить, что в случае контакта YBCO/BST реализуется такое же соотношение работ выхода и диэлектрический гистерезис не наблюдается (рис. 2,  $T = 300 \text{ K}$ ).

При использовании электродов из YBCO диэлектрический гистерезис структур в сегнетофазе также становится меньше по сравнению с гистерезисом в сегнетофазе для структур с электродами из Cu–Cr (рис. 2,  $T = 78 \text{ K}$ ). Это можно объяснить тем, что гистерезис в структурах Cu–Cr/BST обусловлен не только сегнетоэлектрическим переходом, но и образованием и перераспределением объемного заряда. Переход YBCO в сверхпроводящую фазу, скорее всего, не оказывает влияния на характеристики структур при 78 K, так как работа выхода при этом не изменяется [5,8]; наши предыдущие эксперименты со структурами YBCO/STO (STO-монокристалл) показали, что корреляции между температурой сверхпроводящего перехода и наличием диэлектрического гистерезиса не наблюдается [6].

Снижение уровня диэлектрических потерь в структурах YBCO/BST по сравнению с потерями в структурах Cu–Cr/BST может быть связано с изменением свойств граничного слоя пленки BST.

Таким образом, использование электродов из YBCO в планарных структурах на основе тонких пленок  $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$  обеспечивает отсутствие диэлектрического гистерезиса в параэлектрической фазе при сохранении диэлектрической нелинейности и к снижению уровня диэлектрических потерь.

Работа выполнена в рамках проектов по сверхпроводимости № 94051 и № 95014.

## Список литературы

- [1] Гольцман Б.М., Дедык А.И., Леманов В.В., Тер-Мартirosян Л.Т., Карманенко С.Ф. // ФТТ. 1996. Т. 38. С. 2493–2501.
- [2] Вендик О.Г., Дедык А.И., Дмитриев Р.В. и др. // ФТТ. 1984. Т. 26. С. 684–689.
- [3] Дедык А.И., Карманенко С.Ф., Тер-Мартirosян Л.Т. // Электрическая релаксация в высокоомных материалах. Тез. докл. С.-Петербург, 1994. С. 1373.
- [4] Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / Под ред. О.Г. Вендика. М., 1979. 272 с.
- [5] Куприянов М.Ю., Лихарев К.К. // УФН. 1990. Т. 160. С. 49–56.
- [6] Dedyk A.L., Plotkina N.W., Ter-Martirosyan L.T. // Ferroelectrics. 1993. Т. 144. С. 77–81.
- [7] Дедык А.И., Карманенко С.Ф., Малышев М.Н., Тер-Мартirosян Л.Т. // ФТТ. 1955. Т. 37. С. 3470–3475.
- [8] Шкуратов С.И., Месяц В.Т., Иванов С.Н. и др. / СФХТ. 1990. Т. 3. С. 1214–1222.