

05;12

Влияние облучения электронами на диэлектрические свойства сегнетоэлектрических пленок BSTO

© В.А. Балакин, А.И. Дедык, С.Ф. Карманенко, М.В. Павловская

С.-Петербургский государственный электротехнический университет

E-mail: maryVP@mail.ru

Поступило в Редакцию 8 мая 2003 г.

Представлены экспериментальные результаты исследования влияния облучения потоком электронов с энергией 200 eV на емкость, тангенс угла диэлектрических потерь и управляемость планарных конденсаторных структур на основе сегнетоэлектрических пленок (Ba,Sr)TiO₃ (BSTO). Впервые для пленочных образцов наблюдался эффект существенного уменьшения уровня диэлектрических потерь при дозах облучения 10¹⁴ и 10¹⁵ см⁻², сопровождаемого незначительным снижением емкости. Обсуждаются механизмы воздействия облучения и влияние дефектов на свойства пленок.

До настоящего времени воздействие электронного облучения на сегнетоэлектрики наиболее полно было изучено для объемных керамических материалов [1–4]. В литературе отсутствуют сведения о влиянии такого облучения на тонкопленочные сегнетоэлектрические структуры. Однако с точки зрения практического применения в СВЧ-электронике, тонкие сегнетоэлектрические пленки представляют наибольший интерес. Поэтому целью работы явилось исследование влияния облучения электронами на диэлектрические характеристики сегнетоэлектрических пленок Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO₃ (BSTO).

Пленки BSTO формировались в процессе ВЧ катодного распыления порошковой синтезированной мишени соответствующего состава, в среде кислорода, при давлении 15–20 Р и последующей термической обработки в атмосфере кислорода. Толщина пленок составляла 0.5–1.0 μm. В качестве подложек использовались пластины поликора (поликристаллический корунд Al₂O₃) и алюмината лантана LaAlO₃ (LAO). Металлические электроды (медь с подслоем хрома) наносились методом магнетронного распыления на постоянном токе. Для измерения ди-

электрических характеристик изготавливались планарные конденсаторы посредством фотолитографии и химического травления [5]. Ширина зазоров в планарных конденсаторах составляла 5–10 μm , длина зазоров изменялась от 0.6 до 0.8 mm.

Измерения вольт-фарадных характеристик и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$) проводились на частоте $f = 1 \text{ MHz}$, в диапазоне напряжений $U = (-200 \dots + 200) \text{ V}$ при рабочей температуре $T = 300 \text{ K}$. Для оценки диэлектрической проницаемости пленок использовался метод парциальных емкостей [6], который позволяет учесть вклад подложки и окружающего пространства в измеряемую емкость планарного конденсатора.

Облучение конденсаторов проводилось электронным пучком статического ускорителя с термоэмиссионным катодом во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (г. Саров). Образцы облучались потоками электронов с энергией 200 eV дозами 10^{14} , 10^{15} и $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. При этом принимались меры для предотвращения перегрева образцов и снятия электростатического заряда. Облучению дискретными дозами подвергались одни и те же образцы, причем после каждого цикла облучения проводились измерения диэлектрических характеристик.

Экспериментальные характеристики одного из образцов, изготовленных на подложке из LAO, приведены на рис. 1 и 2. Для этого образца значение диэлектрической проницаемости составляло $\epsilon \approx 1900$. Вольт-фарадная характеристика образца после облучения практически полностью совпадала с характеристикой, приведенной на рис. 1. Сравнение вольт-фарадных характеристик до и после облучения показало, что облучение не оказывает влияния на величину диэлектрического гистерезиса. Коэффициент управляемости, т.е. отношение начальной емкости к значению емкости при максимальном напряжении смещения ($U = 200 \text{ V}$), после облучения уменьшался от 1.85 до 1.82.

Важным экспериментальным результатом явилось то, что значения тангенса угла диэлектрических потерь после облучения снижались на порядок (рис. 2, *a, b*). Для данного планарного BSTO конденсатора значение тангенса угла диэлектрических потерь составляло $\text{tg } \delta = 1.5 \cdot 10^{-3}$ при $U = 0$ (рис. 2, *b*), а при воздействии напряжения смещения более 80 V значение уменьшалось до $\text{tg } \delta < 5 \cdot 10^{-4}$. Если до облучения зависимость $\text{tg } \delta$ от напряжения смещения была монотонно убывающей, то после облучения она приобрела более сложный характер, однако

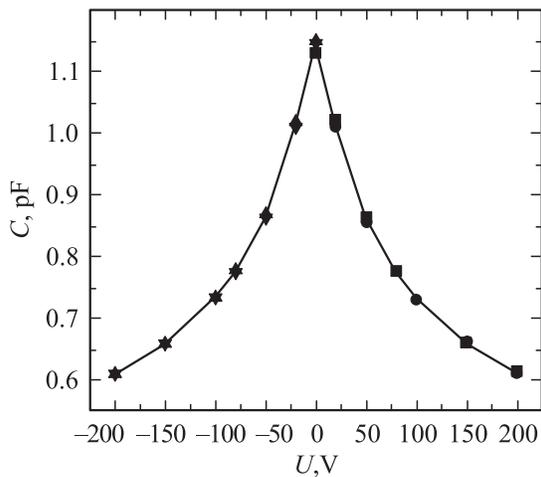


Рис. 1. Вольт-фарадная характеристика сегнетоэлектрического планарного конденсатора на основе пленки BSTO до облучения.

максимальное значение $\operatorname{tg} \delta$, наблюдавшееся при $U = 20 \text{ V}$, не превышало $5 \cdot 10^{-3}$.

На рис. 3 представлены зависимости погонной емкости и $\operatorname{tg} \delta$ от дозы облучения для планарных конденсаторов на основе сегнетоэлектрических пленок, отличающихся материалом подложки. Начальные значения погонной емкости и $\operatorname{tg} \delta$ на графиках соответствуют состоянию образцов до первого цикла облучения. Наибольшее влияние на диэлектрические характеристики всех конденсаторов оказали дозы облучения 10^{14} и 10^{15} см^{-2} . При этих дозах облучения емкость, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь и коэффициент управляемости достигали минимальных значений.

Уровень значений емкости C и диэлектрической проницаемости пленок на подложках из LAO был выше, чем на пленках, выращенных на подложках из поликора. Относительное изменение C и ϵ при воздействии облучения было меньше для пленок на подложках из LAO и составляло 5%, а относительное изменение C и ϵ для пленок на подложках из поликора составляло 18%. До облучения значение тангенса угла диэлектрических потерь всех образцов составляло ~ 0.02 . После

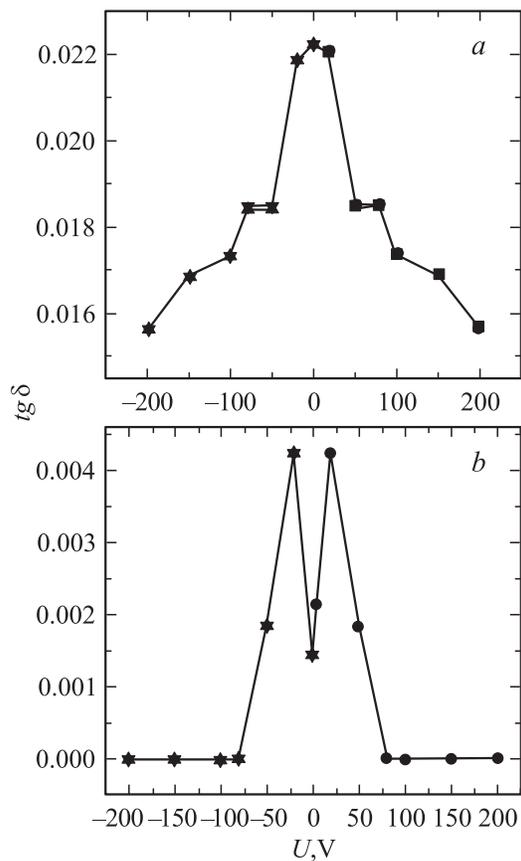


Рис. 2. Зависимости $\text{tg } \delta$ от напряжения смещения для сегнетоэлектрического планарного конденсатора на основе BSTO: *a* — до облучения; *b* — после облучения дозой $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$.

облучения дозами 10^{14} и 10^{15} cm^{-2} уровень потерь для большинства образцов уменьшался на порядок и составлял: $\text{tg } \delta = 5 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-4}$.

Незначительные снижения диэлектрической проницаемости и коэффициента управляемости, наблюдавшиеся экспериментально при дозах 10^{14} и 10^{15} cm^{-2} , можно отнести за счет накапливающихся радиаци-

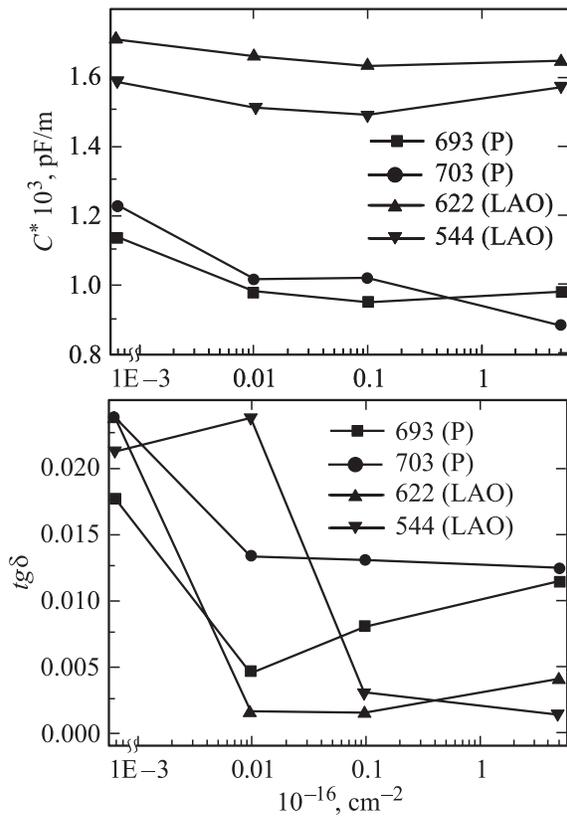


Рис. 3. Зависимости погонной емкости и $\text{tg} \delta$ от дозы облучения для сегнетоэлектрических планарных конденсаторов на различных подложках; LAO — алюминат лантана, P — поликор.

онных дефектов. По-видимому, это дефекты по Френкелю, соответствующие смещению иона кислорода в междоузлия. К такому выводу можно прийти, приняв во внимание тот факт, что энергия электронов в экспериментах была близка к пороговой энергии смещения атомов кислорода, равной 160 eV [2]. При облучении благодаря малой толщине пленок BSTO 0.5...1 μm в них отсутствовали эффекты торможения,

приводящие к неоднородному распределению дефектов и объемного заряда по толщине образца. Следует отметить, что в керамике BSTO толщиной 0.2...0.15 mm уже при энергии электронов 150 keV наблюдались эффекты торможения, приводящие к уменьшению диэлектрической проницаемости в несколько раз [3]. Таким образом, высокие значения диэлектрической проницаемости и коэффициента управляемости после воздействия облучения сохранялись именно благодаря малой (по сравнению с керамическими образцами) толщине пленки.

Существенное снижение $\text{tg } \delta$ от 0.02 до $5 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-3}$ при воздействии облучения дозами 10^{14} и 10^{15} cm^{-2} , вероятно, обусловлено компенсацией заряда кислородных вакансий вследствие инжекции электронов в образец, что в свою очередь уменьшает вероятность появления перескокового механизма проводимости.

В ряде экспериментальных работ [2–4] сообщалось, что явление снижения емкости и $\text{tg } \delta$ после радиационного облучения объемных керамических образцов носит обратимый характер. В работе [2] отмечалось, что такие дефекты могут устраняться при воздействии электрического поля $7 \cdot 10^5 \text{ V/m}$. В наших экспериментах пленочные образцы подвергались многократному воздействию полей до $\sim 10^7 \text{ V/m}$, однако значения C , ϵ и $\text{tg } \delta$, полученные после воздействия облучения, сохранялись.

Таким образом, в работе получен важный практический результат, связанный с улучшением качества сегнетоэлектрических конденсаторных структур, который не наблюдался и, по-видимому, не должен наблюдаться на объемных керамических образцах: воздействие электронного облучения с дозами 10^{14} и 10^{15} cm^{-2} более чем на порядок уменьшает тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta \sim 10^{-3}$ на частоте 1 MHz), при этом значения C , ϵ и коэффициента управляемости уменьшаются незначительно на 5...17%.

Список литературы

- [1] Соловьев С.П., Кузьмин И.И., Закуркин В.В. // Титанат бария. М.: Наука, 1973. С. 263.
- [2] Закуркин В.В., Соловьев С.П., Кузьмин И.И. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1971. Т. 35. С. 1148–1153.
- [3] Пешиков Е.В. // Радиационные эффекты в сегнетоэлектриках. Ташкент: Изд. Фан, 1986. С. 126.

- [4] Ломасов В.Н. // Электронная техника. Сер. Радиодетали и радиокомпоненты. 1989. В. 4 (77). С. 13–17.
- [5] Карманенко С.Ф., Дедык А.И., Исаков Н.Н., Сахаров В.И., Семенов А.А., Серенков И.Т., Тер-Мартirosян Л.Т. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 19. С. 50–60.
- [6] *Сегнетоэлектрики* в технике СВЧ / Под ред. О.Г. Вендика. М.: Сов. радио, 1979. С. 272.