

06

## **Влияние контактов металл—сегнетоэлектрик на формирование объемного заряда в сегнетоэлектрических тонкопленочных конденсаторах**

© А.Б. Козырев, М.М. Гайдуков, А.Г. Гагарин,  
А.Г. Алтынников, С.В. Разумов, А.В. Тумаркин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
(ЛЭТИ)  
E-mail: mcl@eltech.ru

*В окончательной редакции 5 февраля 2009 г.*

Проведены исследования быстродействия конденсаторных структур на основе пленки  $Ba_{0.3}Sr_{0.7}TiO_3$  (BSTO) с различными условиями изготовления контакта металл—сегнетоэлектрик. Обнаружены пороговые напряжения возникновения остаточного объемного заряда. На основе сопоставления технологических особенностей формирования контактов и экспериментальных данных сделан вывод о возможности подавления инжекции носителей заряда в сегнетоэлектрическую пленку путем формирования контактов конденсатора Pt—BSTO в кислородной атмосфере.

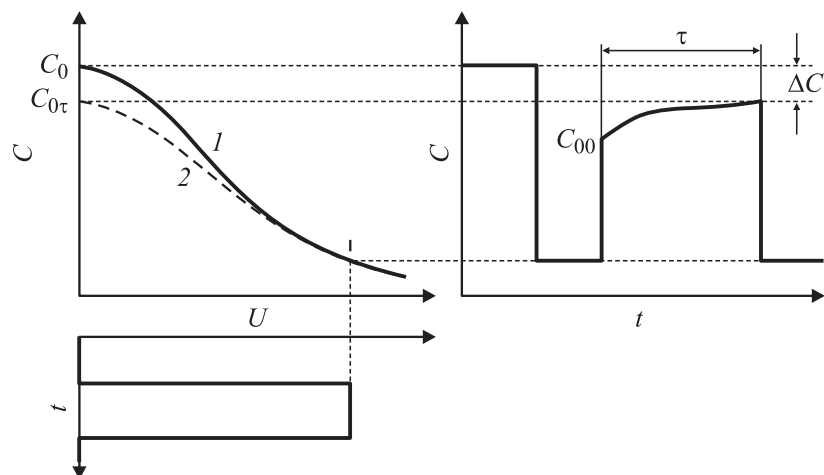
PACS: 77.55.+f, 84.32.-y, 84.32.Tt, 84.40.-x

Высокая нелинейность и низкие потери сегнетоэлектрических (СЭ) пленок в параэлектрической фазе делают целесообразным их использование в СВЧ-устройствах фазоамплитудного управления сигналом (фазовращатели, перестраиваемые фильтры, линии задержки и т.д.).

Как правило, для эффективной работы таких устройств необходимы высокие скорости их переключения, т.е. быстрый отклик изменения диэлектрической проницаемости СЭ-пленки при воздействии электрического поля. Общепринято считать, что в параэлектрической фазе отсутствие доменной структуры позволяет достигать быстрого действия, соизмеримого временам осцилляции „мягкой“ СЭ-моды, т.е. времен отклика  $\sim 10^{-11}$  с. Это положение основано на отсутствии частотной дисперсии диэлектрической проницаемости вплоть до частот  $\sim 100$  GHz и практически безынерционном нелинейном отклике СЭ-элементов в устройствах параметрического усиления и смещения сигналов [1]. Необходимо подчеркнуть, что в указанной работе нелинейное поведение сегнетоэлектриков исследовалось при воздействии гармонического СВЧ-сигнала, однако в современных СВЧ-устройствах управления, как правило, используется последовательность униполярных импульсов напряжения.

В ряде работ, посвященных исследованию нелинейных свойств сегнетоэлектрических материалов, отмечается образование в СЭ-пленке объемного заряда, медленная релаксация которого существенно снижает быстродействие СЭ-устройств. Основными причинами образования объемного заряда в параэлектрической фазе при воздействии управляющего электрического поля считаются инжекция носителей заряда с электродов и захват их в объеме СЭ-пленки [2,3] и миграция заряженных дефектов СЭ-пленки [4]. Можно отметить, что процессы миграции дефектов происходят в объеме СЭ-пленки и не зависят от свойств контакта пленки с электродом, в то время как инжекция носителей заряда прямо определяется свойствами этого контакта. Таким образом, исследование конденсаторов с различными контактами металл–СЭ-пленка, проведенное в настоящей работе, позволяет определить, какой из рассматриваемых механизмов образования объемного заряда играет ведущую роль, и определить влияющие на данные механизмы технологические факторы.

Поведение емкости конденсатора на основе СЭ-пленки в параэлектрической фазе при импульсном воздействии управляющего напряжения  $U$  во времени  $t$  схематично приведено на рис. 1. Емкость конденсатора  $C$  до начала управляющего воздействия обозначена как  $C_0$ . По окончании импульса напряжения емкость за короткое время ( $t < 10$  ns [5]) увеличивается до величины  $C_{00}$ , которая может быть существенно меньше начальной емкости. После этого в паузе



**Рис. 1.** Иллюстрация изменения емкости СЭ МДМ-конденсатора под воздействием периодических импульсов управляющего напряжения: *1* — статическая управляемость, *2* — динамическая управляемость.

между импульсами  $\tau$  наблюдается медленное увеличение емкости до значений  $C_{0\tau}$ . Это эквивалентно снижению динамической управляемости (управляемости в режиме подачи периодических импульсов) по отношению к статической и изменению номинала емкости во время паузы. Время полного восстановления емкости до величины  $C_{0\tau}$  зависит от ряда факторов (амплитуды импульсов, периода их повторения, полярности и др.) и может достигать времен порядка  $10^3$  s. Величиной, количественно характеризующей релаксацию емкости при данных амплитуде, периоде повторения, полярности импульсов можно считать отношение  $\Delta C/C_0$ , где  $\Delta C = C_0 - C_{0\tau}$ .

В качестве объектов исследования в настоящей работе использовались изготовленные на основе пленки  $\text{Ba}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{TiO}_3$  (BSTO) толщиной  $\sim 0.6 \mu\text{m}$  конденсаторы различных конструкций, предназначенных для использования в СВЧ-диапазоне: 2-электродный планарный конденсатор (ширина зазора  $6 \mu\text{m}$ ), рис. 2, *a* [6]; 4-электродный планарный конденсатор (ширина зазора  $3 \mu\text{m}$ ), рис. 2, *b* [7]; плоскопараллельный конденсатор (МДМ), рис. 2, *c* [8]. Металлические электроды формиро-

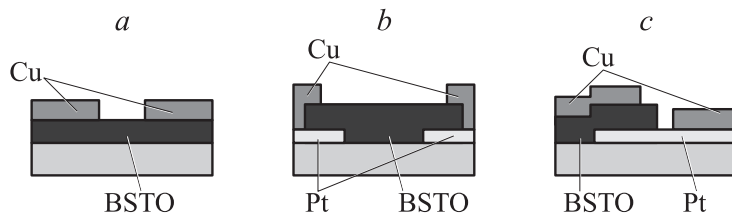
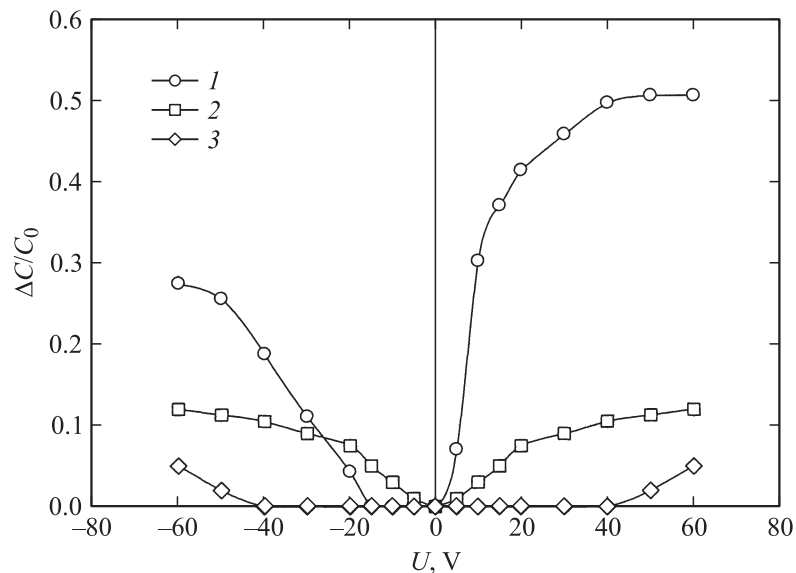


Рис. 2. Различные конструкции сегнетоэлектрических СВЧ-конденсаторов.

вались следующим образом: верхний электрод Cu толщиной  $\sim 1 \mu\text{m}$  с адгезионным слоем Cr ( $\sim 50 \text{ nm}$ ) наносился вакуумным испарением, нижний электрод Pt толщиной  $\sim 0.1 \mu\text{m}$  — магнетронным распылением. Осаждение BSTO-пленки проводилось магнетронным распылением в кислородной плазме ( $P_{\text{O}_2} \approx 2 \text{ Pa}$ ) при технологических условиях, соответствующих наилучшим СВЧ-характеристикам элемента [9], непосредственно на подложку  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (для 2-электродного планарного конденсатора) или на пленку Pt, осажденную на подложку  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (4-электродный планарный конденсатор и МДМ-конденсатор). Топология Pt электродов была получена ионным травлением, топология BSTO-пленки и Cu электродов — жидкостным химическим травлением.

Для исследования медленной релаксации емкости конденсаторов необходимо определение изменения емкости за времена от единиц микросекунд до десятков минут. Разработанный ранее резонансный метод измерения параметров СЭ-конденсаторов, связывающий параметры СВЧ-резонатора (резонансную частоту, добротность) с параметрами конденсатора (емкость, СВЧ-потери), позволяет выполнить все эти требования при подаче на конденсатор периодических управляющих импульсов. Используемый в данной работе СВЧ-резонатор на основе симметричной полосковой линии передачи позволяет измерять изменение емкости во времени с точностью  $\Delta C/C_0 < 1\%$  и  $\Delta < 10^{-8} \text{ s}$  [10].

В ходе эксперимента производилось измерение емкости  $C_{0r}$  в зависимости от амплитуды, полярности (для МДМ-конденсаторов указана относительно нижнего Pt электрода), длительности и скважности управляющих импульсов напряжения. Изменение длительности импульса, как показали измерения, не оказывает влияния на величину  $C_{0r}$ . На рис. 3 приведены результаты измерения  $\Delta C/C_0$  в зависимости от амплитуды



**Рис. 3.** Зависимость  $\Delta C/C_0$  от амплитуды импульса управляющего напряжения: 1 — МДМ-конденсатор, 2 — 2-электродный планарный конденсатор, 3 — 4-электродный планарный конденсатор.

управляющих импульсов при длительности импульса  $1 \mu\text{s}$  и длительности паузы  $9 \mu\text{s}$  для всех исследованных конденсаторных структур. Видно, что ряд зависимостей имеет характерное пороговое напряжение, до достижения которого емкость конденсатора восстанавливается до первоначальной величины за время паузы. Для 2-электродных планарных структур с медными электродами такое явление не наблюдалось ( $\Delta C/C_0 \neq 0$  при напряжениях управления, минимально отличных от нуля); для 4-электродных конденсаторов с платиновыми электродами под BSTO-пленкой пороговое напряжение наблюдалось вне зависимости от полярности управляющего импульса; для МДМ-структур наблюдались характерные асимметричные характеристики, аналогичные 2-электродному конденсатору при положительной полярности и 4-электродному конденсатору при отрицательной. Следует отметить, что приведенные на рис. 3 зависимости отличаются величинами напряжен-

ности электрического поля в BSTO-пленке, которое в предположении однородного поля составляет для пороговых значений  $30 \text{ V}/\mu\text{m}$  в МДМ-конденсаторе и  $13 \text{ V}/\mu\text{m}$  в 4-электродном конденсаторе.

Влияние полярности приложенного управляющего напряжения на время релаксации емкости (в частности, несимметричность релаксационных характеристик для МДМ-конденсаторов) позволяет сделать вывод, что механизм формирования объемного заряда в СЭ-пленке определяется свойствами контактов металл–сегнетоэлектрик. Можно предположить, что наблюдаемые экспериментальные характеристики определяются различными условиями для инъекции объемного заряда из электродов в СЭ-пленку в конденсаторах различной конструкции. Учитывая работу выхода металла электродов ( $(5.6 \div 5.9) \text{ eV}$  — Pt,  $(4.5 \div 5.1) \text{ eV}$  — Cu,  $4.5 \text{ eV}$  — Cr [11]) и BSTO-пленки, которая может быть принята близкой к работе выхода  $\text{BaTiO}_3$  ( $2.5 \div 4.4) \text{ eV}$  [12], можно предположить существование потенциальных барьеров (барьеров Шоттки) на контакте металл/сегнетоэлектрик, которые препятствуют инъекции электронов. Существенную величину барьера Шоттки на границе Pt–BSTO и его подавление на границе Cu–BSTO можно объяснить тем, что нанесение электродов производилось при разных условиях: осаждение СЭ-пленки на Pt-электрод производится в кислородосодержащей атмосфере; нанесение пленки Cu/Cr на BSTO производится в вакууме, что приводит к повышенной концентрации кислородных вакансий на контакте Cu/Cr–BSTO по сравнению с контактом Pt–BSTO. В свою очередь, повышенная концентрация кислородных вакансий приводит к эффекту  $n^+$ -легирования приконтактной области и, следовательно, сильному снижению величины барьера Шоттки на контакте Cu/Cr–BSTO.

Таким образом, исследования быстродействия конденсаторных структур на основе пленки BSTO с различными условиями формирования контактов показало, что объемный заряд имеет инъекционную природу, причем существуют пороговые напряжения управления, ниже которых инъекция носителей заряда не происходит и которые возникают при формировании контакта Pt–BSTO в кислородной атмосфере, что позволяет подавить процессы медленной релаксации диэлектрической проницаемости.

Работа выполнена в рамках проектов РНП 2.1.2.7083 и 02.513.11.3136 ФАО РФ.

## Список литературы

- [1] *Kozyrev A.B., Samoilova T.B., Golovkov A.A. et al. // J. Appl. Phys. 1998. V. 84. Is. 6. P. 3326–3332.*
- [2] *Дедык А.И., Тер-Мартirosян Л.Т. // ФТТ. 1997. Т. 39. В. 2. С. 349–352 (Dedyk A.I., Ter-Martirosyan L.T. // Physics Solid State. 1998. V. 39. N 2. P. 305–307).*
- [3] *Дедык А.И., Тер-Мартirosян Л.Т. // ФТТ. 1998. Т. 40. В. 2. С. 245–247 (Dedyk A.I., Ter-Martirosyan L.T. // Physics Solid State. 1998. V. 40. N 2. P. 220–222).*
- [4] *Voikov Yu.A., Goltsman V.M., Yarmarkin V.K., Lemanov V.V. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. Is. 24. P. 3866–3868.*
- [5] *Козырев А.Б., Солдатенков О.И., Иванов А.В. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 19. С. 19–25 (Kozyrev A.B., Soldatenkov O.I., Ivanov A.V. // Technical Physics Letters. 1998. V. 24. N 10. P. 755–757).*
- [6] *Вендик О.Г., Зубко С.П., Никольский М.А. // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 4. С. 1–7 (Vendik O.G., Zubko S.P., Nikol'skii M.A. // Tech. Phys. 1999. V. 44. N 4. P. 349–355).*
- [7] *Прудан А.М., Гольман Е.К., Козырев А.Б. и др. // ФТТ. 1998. Т. 40. В. 8. С. 1473–1478 (Prudan A.M., Gol'tman E.K., Kozyrev A.B. et al. // Physics Solid State. 1998. V. 40. N 8. P. 1339–1343).*
- [8] *Гайдуков М.М., Гагарин А.Г., Козырев А.Б., Разумов С.В., Тумаркин А.В., Алтынников А.Г. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 13. С. 50–55 (Gaidukov M.M., Gagarin A.G., Kozyrev A.B. et al. // Tech. Phys. Lett. 2008. V. 34. N 7. P. 565–567).*
- [9] *Razumov S.V., Tumarkin A.V., Gaidukov M.M. et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. N 9. P. 1675–1677.*
- [10] *Козырев А.Б., Гайдуков М.М., Гагарин А.Г., Алтынников А.Г. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 16-й Международной конф. „КрымМиКо'2006“. Севастополь, 10–14 сент. 2006 г. Севастополь, 2006. С. 778–779 (Kozyrev A.B., Gaidukov M.M., Gagarin A.G., Altynnikov A.G. // Microwave and Telecommunication Technology: Proceedings on 16th International Crimean Conference, CriMiCO'06. 2006).*
- [11] *Handbook of Chemistry and Physics / Editor-in-Chief: David R. Lide; CRC Press. 2007. 2640 с.*
- [12] *Nowotny J., Rekas M. // Cer. Int. 1994. V. 20. Is. 4. P. 251–255.*