

06;12

Время переключения планарных сегнетоэлектрических конденсаторов на основе пленок титаната стронция и титаната бария-стронция

© А.Б. Козырев, О.И. Солдатенков, А.В. Иванов

С.-Петербургский электротехнический университет

Поступило в Редакцию 27 марта 1998 г.

С помощью микрополоскового резонатора проведены СВЧ ($f \sim 10$ GHz) измерения времени изменения диэлектрической проницаемости пленок SrTiO_3 и $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ при воздействии униполярных видеоимпульсов напряжения. Показано, что диэлектрическая проницаемость пленок SrTiO_3 изменяется за времена, меньшие 30 ns. Для пленок $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ выявлены два характерных времени изменения диэлектрической проницаемости: быстрое изменение за времена, меньшие 30 ns, и более медленное — порядка 20 μs .

Сегнетоэлектрические материалы SrTiO_3 и $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$, обладающие высокой диэлектрической нелинейностью, вызывают большой интерес у разработчиков СВЧ устройств. Применение объемных монокристаллических и поликристаллических сегнетоэлектриков в качестве нелинейных элементов параметрических усилителей и генераторов гармоник показало, что время изменения диэлектрической проницаемости этих материалов под воздействием СВЧ синусоидального сигнала не превышает 10^{-11} s [1,2]. Такое малое время релаксации является привлекательным с точки зрения создания СВЧ устройств управления и переключения (фазовращатели, переключатели каналов, перестраиваемые фильтры и т.д.), требующих высокого быстродействия при управлении видеоимпульсами напряжения.

В современной микроэлектронике для создания указанных устройств необходимо использовать сегнетоэлектрические пленочные материалы, свойства которых могут существенно отличаться от свойств объемного материала. В частности, высокоориентированные пленки титаната стронция (SrTiO_3) демонстрируют немонотонную температурную зависимость диэлектрической проницаемости ($\varepsilon(T)$) и повышенные

СВЧ потери ($\text{tg } \delta$), не соответствующие СВЧ свойствам монокристаллов [3–5]. Поэтому вопрос о времени отклика диэлектрической проницаемости пленок, как под действием СВЧ сигнала, так и под действием видеоимпульсов напряжения, требует дополнительных исследований. В настоящем сообщении представлены методика и результаты экспериментального исследования времени изменения диэлектрической проницаемости пленок SrTiO_3 и $(\text{Ba, Sr})\text{TiO}_3$ при приложении управляющих униполярных видеоимпульсов напряжения.

Пленки SrTiO_3 толщиной $h \cong 0.7 \mu\text{m}$ с преимущественной ориентацией (100) были получены методом магнетронного напыления на подложках Al_2O_3 . Пленки $(\text{Ba, Sr})\text{TiO}_3$ (60% — Ba, 40% — Sr), толщиной $h \cong 4 \mu\text{m}$, изготавливались по керамической технологии на подложках MgO и являлись поликристаллическими. Более подробно указанные пленки были охарактеризованы в работах [3,5]. Объектами исследования были планарные сегнетоэлектрические конденсаторы на основе указанных пленок (рис. 1, а). Управляемость конденсаторов ($K = C_{U=0V}/C_{(U_{\text{max}})}$) с пленкой SrTiO_3 (ширина зазора $g = 10 \mu\text{m}$, длина зазора $l = 0.5 \text{mm}$) и с пленкой $(\text{Ba, Sr})\text{TiO}_3$ ($g = 30 \mu\text{m}$, $l = 1 \text{mm}$) достигает значения $K \cong 2$ при увеличении напряженности постоянного электрического поля в зазоре этих конденсаторов до величины порядка $10 \text{V}/\mu\text{m}$.

Измерение времени изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического конденсатора при взаимодействии импульсного управляющего напряжения основано на определении скорости перестройки по частоте амплитудно-частотной характеристики микрополоскового СВЧ резонатора, включающего в себя исследуемый конденсатор. Изменение во времени слабого (по сравнению с импульсом управляющего напряжения) СВЧ сигнала, проходящего через резонатор с включенным сегнетоэлектрическим конденсатором, позволяет определить время отклика сегнетоэлектрической пленки на импульсное воздействие.

Топология микрополосковой схемы измерений, включающая резонатор с исследуемым планарным конденсатором, изображена на рис. 1, а. Планарный сегнетоэлектрический конденсатор помещается в разрыв микрополосковой линии резонатора вблизи ее короткозамкнутого окончания. На другом конце резонатора выполняется условие холостого хода. Резонатор включен в СВЧ схему через емкостные зазоры, которые обеспечивают необходимую связь резонатора с СВЧ цепями и одновременно защищают СВЧ цепи от воздействия импульса управляющего

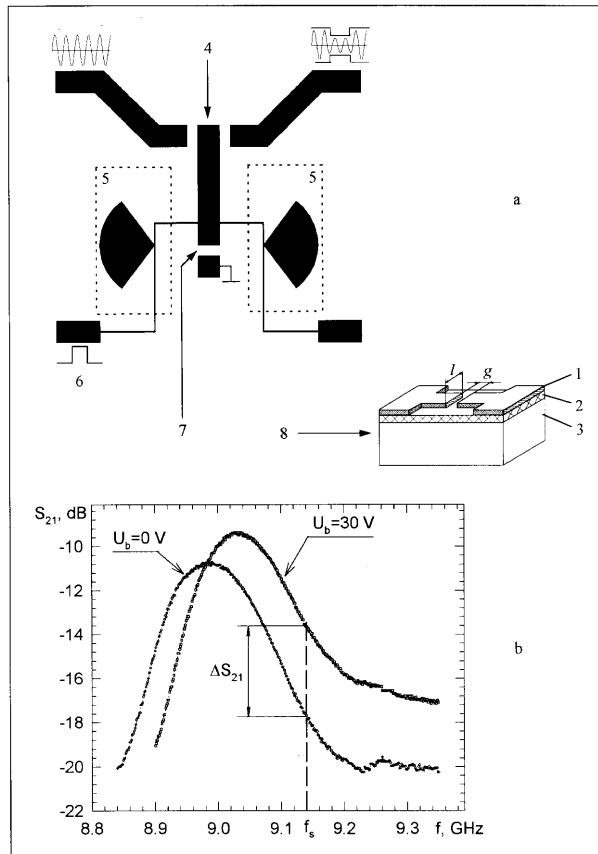


Рис. 1. Упрощенная топология микрополосковой СВЧ схемы для измерения времени переключения планарных сегнетоэлектрических конденсаторов (а): 4 — микрополосковый резонатор, 5 — фильтры нижних частот, 6 — цепь для подачи управляющего импульса, 7 — место включения планарного конденсатора, 8 — планарный сегнетоэлектрический конденсатор (1 — медные электроды, 2 — SrTiO₃ или (Ba, Sr)TiO₃ пленка, 3 — подложка Al₂O₃ или MgO). Изменение амплитудно-частотной характеристики резонатора при приложении к сегнетоэлектрическому конденсатору постоянного управляющего напряжения (b). ΔS_{21} — изменение коэффициента передачи на фиксированной частоте СВЧ сигнала (f_s).

напряжения. Импульс управляющего напряжения прикладывается к сегнетоэлектрическому конденсатору через фильтры нижних частот, частота среза ~ 2 GHz. Фильтры нижних частот подключены к микрополоску резонатора вблизи точек нулевого значения напряженности СВЧ электрического поля, что позволяет уменьшить влияние цепей управления на амплитудно-частотную характеристику резонатора.

Изменение емкости конденсатора при приложении постоянного управляющего напряжения $C(U_b)$ приводит к изменению резонансной частоты (f_0) резонатора (рис. 1, *b*) в соответствии со следующим выражением:

$$2\pi Z_0 f_0 \cdot C(U_b) = \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{c} \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}} \cdot f_0 \cdot l_{\text{eff}} \right), \quad (1)$$

где Z_0 и ε_{eff} — волновое сопротивление и эффективная диэлектрическая проницаемость микрополосковой линии резонатора, l_{eff} — эффективная длина резонатора, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s — скорость света. При приложении к конденсатору импульса управляющего напряжения происходит частотный сдвиг амплитудно-частотной характеристики резонатора, что приводит к изменению его коэффициента передачи S_{21} на фиксированной частоте СВЧ сигнала (рис. 1, *b*). Сравнение воздействующего видео-импульса напряжения и протектированного импульса СВЧ отклика, наблюдаемых на экране осциллографа, позволяет характеризовать время перестройки резонатора с включенным сегнетоэлектрическим конденсатором.

Время переходных процессов в резонансной цепи и схемное искажение импульсов управляющего напряжения при их подаче на конденсатор не превышает 1 ns, что позволяет надежно определять времена релаксации (t_r) сегнетоэлектрического элемента при условии $t_r \geq 10$ ns. В экспериментах использовался генератор импульсов напряжения, формирующий униполярные видеоимпульсы прямоугольной формы амплитудой до 60 V, длительностью импульсов от 0.1 μ s до 10 ms и длительностью фронтов порядка 30 ns. Таким образом, в данной работе определение времени отклика сегнетоэлектрической пленки на импульс напряжения лимитировалось только быстродействием генератора, т. е. длительностью фронтов управляющего импульса ~ 30 ns.

Для всех исследованных SrTiO₃ конденсаторов во всем диапазоне изменения амплитуды и длительности управляющего видеоимпульса форма огибающей СВЧ сигнала была идентична форме управляющего

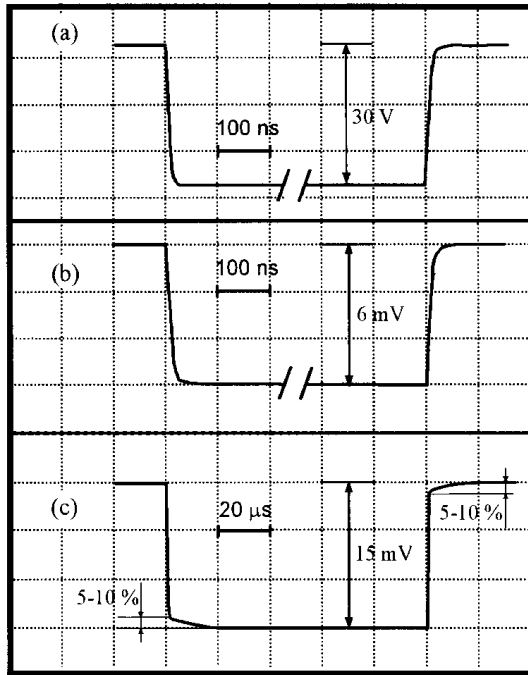


Рис. 2. Осциллограммы, иллюстрирующие время переключения SrTiO₃ (b) и (Ba,Sr)TiO₃ (c) конденсаторов под действием управляющего импульса (a) длительностью 100 μs. Масштаб представления длительности импульса СВЧ отклика для SrTiO₃ и (Ba,Sr)TiO₃ элементов различен для выделения "медленного" (~ 20 μs) механизма релаксации.

импульса. Длительность переднего и заднего фронтов детектируемого СВЧ импульса совпала с длительностью фронтов управляющего импульса и составляла ~ 30 ns, что свидетельствует о времени отклика диэлектрической проницаемости для SrTiO₃ конденсатора $t_r \leq 30$ ns. В качестве примера на рис. 2, a представлены осциллограммы управляющего импульса напряжения (длительность импульса 100 μs, длительность фронтов $t_f \cong 30$ ns, амплитуда $U_m = 30$ V) и импульса детектируемого СВЧ сигнала (рис. 2, b), прошедшего через резонатор с SrTiO₃ конденсатором.

Для резонатора с $(\text{Ba, Sr})\text{TiO}_3$ конденсатором форма огибающей СВЧ сигнала (рис. 2, *с*) указывает на наличие двух различных механизмов изменения диэлектрической проницаемости $(\text{Ba, Sr})\text{TiO}_3$ пленки при воздействии импульса управляющего напряжения: наблюдалось быстрое изменение величины диэлектрической проницаемости за время, не превышающее длительность фронтов управляющего импульса (~ 30 ns), и более медленное, с временем отклика порядка $20 \mu\text{s}$. Медленное изменение амплитуды импульса детектируемого СВЧ сигнала не превышало 5–10% от полной амплитуды этого импульса.

Заметим, что для SrTiO_3 конденсаторов изменение коэффициента прохождения СВЧ сигнала (ΔS_{21}) под действием видеоимпульсов с амплитудой U_m при временах $t \geq t_f \cong 30$ ns соответствовало ΔS_{21} , наблюдаемому при приложении к конденсатору постоянного напряжения смещения $U_b = U_m$. Аналогичный эффект наблюдался для $(\text{Ba, Sr})\text{TiO}_3$ элементов при $t \geq 20 \mu\text{s}$. Таким образом, при временах, превышающих указанные, наблюдалось одинаковое изменение емкости при обоих типах управляющих воздействий. Это свидетельствует об отсутствии других, более медленных механизмов релаксации и позволяет использовать соотношение (1) и вольт-фарадные характеристики, полученные при постоянном напряжении смещения $C(U_b)$, для определения сдвига резонансной частоты (управляемости устройств) при импульсном воздействии.

На основе проведенных исследований по предложенной методике можно заключить, что полное изменение диэлектрической проницаемости SrTiO_3 пленок при импульсном воздействии происходит за времена ≤ 30 ns. Для $(\text{Ba, Sr})\text{TiO}_3$ конденсаторов наблюдалось также и более медленное изменение диэлектрической проницаемости с временем релаксации порядка $20 \mu\text{s}$, составляющее, однако, не более 10% от полного изменения ϵ . Время отклика планарных SrTiO_3 и $(\text{Ba, Sr})\text{TiO}_3$ конденсаторов и величина изменения их емкости при воздействии импульсов управляющего напряжения являются вполне приемлемыми для их использования в качестве быстродействующих элементов перестраиваемых СВЧ устройств.

Список литературы

- [1] *Сегнетоэлектрики в технике СВЧ* / Под ред. О.Г. Вендика. М.: Сов. радио, 1979. 272 с.
- [2] *DiDomenico M., Johnson D.A., Pantell R.H.* // J. Appl. Phys. 1962. V. 33 (5). P. 1697–1706.
- [3] *Kozyrev A.B., Samoilova T.B., Soldatenkov O.I.* et al. // Proceedings of 27th European Microwave Conference (EMC97), Jerusalem, Israel, September 8–12, 1997. V. 2. P. 1020–1025.
- [4] *Galt D., Proce J., Beall J., Harvey T.* // IEEE Trans. Appl. Superconductivity. 1995. V. 5. P. 2575–2578.
- [5] *Kozyrev A.B., Keis V.N., Koepf G.A.* et al. // Microelectronic Engineering. 1995. V. 29. P. 257–260.