

05;07

Влияние ультрафиолетового излучения на процессы „медленной“ релаксации в сегнетоэлектрических конденсаторах

© А.Б. Козырев, А.Г. Алтынников, А.Г. Гагарин, М.М. Гайдуков

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ)

E-mail: mlpeltech@gmail.com

В окончательной редакции 28 февраля 2011 г.

Исследовано влияние коротковолнового излучения ультрафиолетового диапазона ($\lambda = 340$ nm) различной мощности (0.001–0.15 mW) на подавление процессов медленной релаксации остаточной поляризации в сегнетоэлектрических пленках $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ в параэлектрическом состоянии. Представлены экспериментальные данные о времени релаксации емкости и тока проводимости сегнетоэлектрических конденсаторов под действием УФ-излучения. Обнаружен механизм релаксации с временем порядка 1 s, на который УФ-облучение не влияет.

Нелинейные свойства сегнетоэлектрических (СЭ) пленок, в частности состава $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BSTO), в параэлектрическом состоянии делает перспективным создание на их основе перестраиваемых СВЧ-устройств (фильтры, линии задержки, фазовращатели и т.д. [1–3]). Быстродействие таких устройств, определяемое временем отклика диэлектрической проницаемости (ϵ) СЭ-пленки на электрическое поле (E), достигает наносекунд при теоретическом пределе ~ 0.01 ns (период колебаний мягкой моды). Однако наряду с таким быстрым откликом, составляющим $\sim 90\%$ изменения $\epsilon(E)$, в структурах металл/СЭ/металл (М/СЭ/М), наблюдаются процессы медленной (до сотен секунд) ре-

лаксации емкости [4,5]. Эти релаксационные процессы, возникающие после окончания воздействия импульсного E -поля, несмотря на их малый вклад в полное изменение емкости, недопустимы для ряда технических применений. Причиной медленных релаксационных явлений в СЭ-пленках в паразелектрическом состоянии является объемный нескомпенсированный заряд, возникающий в пленке за счет захваченных на дефектах электронов, инжектированных из металла [6], и/или миграции кислородных вакансий [5].

Одним из возможных способов подавления процессов медленной релаксации является использование ультрафиолетового (УФ) излучения [7,8]. Было показано, что УФ-облучение ($\lambda = 310\text{--}400\text{ nm}$) СЭ-пленок более чем на 2 порядка уменьшает времена медленных релаксационных процессов. Установлено, что спектральная зависимость проводимости ($\sigma(\lambda)$) пленки имеет ярко выраженный максимум, соответствующий минимуму на спектральной зависимости времени релаксации емкости ($\tau(\lambda)$). На основании работ [7,8] можно предположить, что для более эффективного подавления медленных релаксационных явлений необходимо увеличить мощность (P) УФ-облучения для увеличения концентрации свободных носителей заряда, генерируемых в объеме пленки. Данная работа направлена на определение характера зависимости $\tau(P)$ и $\sigma(P)$ и оценки эффективности подавления остаточных релаксационных процессов за счет увеличения мощности излучения УФ-диапазона.

Объектами исследования являются тонкопленочные сегнетоэлектрические конденсаторы планарной конструкции [9] на основе пленок $\text{Ba}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{TiO}_3$ толщиной $\sim 0.7\ \mu\text{m}$, полученных методом высокочастотного магнетронного распыления на подложках монокристаллического сапфира [10]. Пленки обладали поликристаллической структурой с преимущественной ориентацией (111) [11]. Сегнетоэлектрические конденсаторы демонстрировали хорошие с точки зрения их применения на СВЧ параметры в диапазоне 1–10 GHz: управляемость $K = C(0)/C(120\text{ V}) \sim 2$ и диэлектрические потери $\text{tg } \delta \sim 0.03\text{--}0.01$.

В качестве источника УФ-излучения использовался светодиод с максимумом мощности генерации на длине волны $\lambda = 340\text{ nm}$ и возможностью регулировки мощности излучения до 0.15 mW. Для снятия временных зависимостей изменения емкости после импульсного воздействия использовался разработанный ранее резонансный метод измерения параметров сегнетоэлектрических конденсаторов [12]. Типичные зависимости $C(t)$, характеризующие процессы временной релаксации

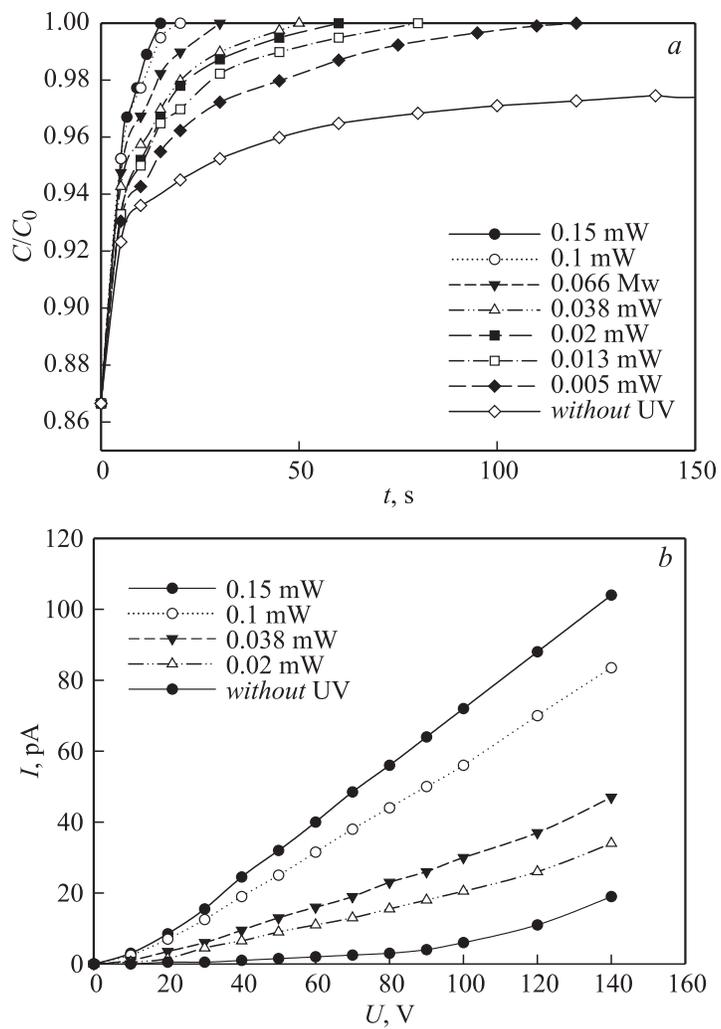


Рис. 1. Временные зависимости релаксации емкости сегнетоэлектрического конденсатора (a) и его вольт-амперные характеристики (b) при воздействии излучения с длиной волны $\lambda = 340$ nm различной мощности.

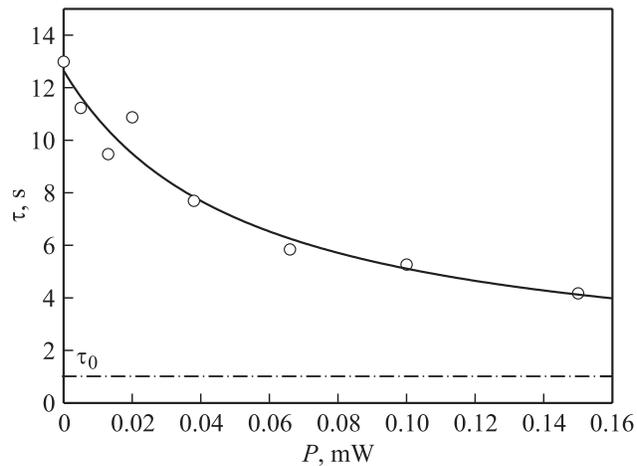


Рис. 2. Зависимости величины постоянной времени релаксации СЭ-емкости от мощности УФ-излучения (сплошная кривая — аппроксимационная зависимость).

емкости при УФ-облучении различной мощности, приведены на рис. 1, *a*. Зависимости получены после окончания импульсного воздействия длительностью 5 s и напряжением 140 V, что соответствует $E \approx 30 \text{ V}/\mu\text{m}$ в пленке. Измерение вольт-амперных характеристик при воздействии УФ-излучения различной мощности (рис. 1, *b*) проводилось с помощью вольтметра-электрометра В7-30, погрешность при измерении токов составляла $\sim 0.1 \text{ pA}$. Отметим, что при постоянном напряжении величина тока сквозной проводимости возрастала линейно с увеличением мощности УФ-облучения, что характерно для явления внутреннего фотоэффекта в материале.

Под действием УФ-излучения релаксационные зависимости изменения емкости конденсатора (рис. 1, *a*) можно описать функцией, содержащей единственную для каждого уровня мощности компоненту $\exp(-t/\tau)$, что позволяет построить зависимость $\tau(P)$, которая хорошо аппроксимируется гиперболической функцией вида

$$\tau(P) = \tau_0 + \frac{a \cdot b}{b + P},$$

где a , b и τ_0 — параметры аппроксимации, не зависящие от мощности излучения (рис. 2).

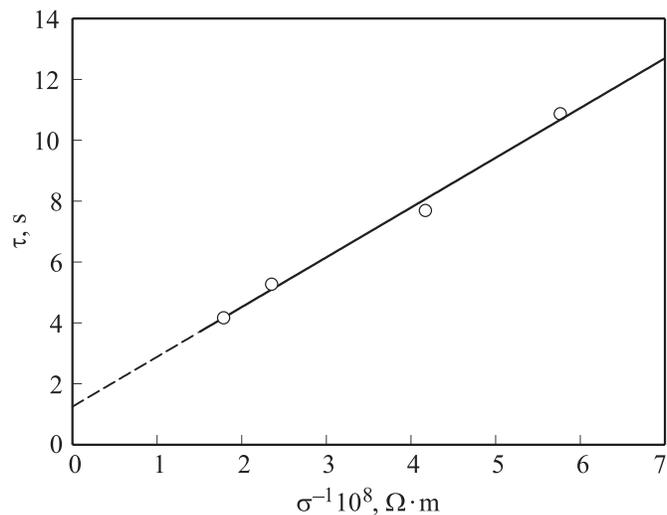


Рис. 3. Зависимость постоянной времени релаксации от обратной величины удельной проводимости СЭ-пленки.

Наличие параметра τ_0 в аппроксимационной функции позволяет говорить о масштабе предельных минимальных значений времени медленной релаксации, которые могут быть достигнуты за счет увеличения мощности УФ-облучения. Для исследованной структуры значение τ_0 составляет ~ 1 s (рис. 2), что по масштабу величины соответствует данным, полученным авторами и на других подобных СЭ-структурах.

На основании вольт-амперных характеристик при различных уровнях мощности УФ-облучения (рис. 1, *b*) и зависимости $\tau(P)$ (рис. 2) можно построить зависимость $\tau(\sigma^{-1})$, которая является практически линейной (рис. 3) и может быть представлена как $\tau(\sigma) = \tau'_0 + A\sigma^{-1}$.

Второй член аппроксимационной функции $\tau(\sigma)$ по своему виду формально соответствует механизму максвелловской релаксации, если его параметр A рассматривать как диэлектрическую проницаемость (ϵ). Однако этот механизм должен быть исключен из рассмотрения, так как расчетная величина $\epsilon \sim 2000$, полученная на основании зависимости на рис. 3, явно не соответствует значениям оптической диэлектрической проницаемости исследованных пленок.

Значения τ'_0 , полученные экстраполяцией экспериментальной зависимости (пунктир на рис. 3), составляют 0.5–1.5 s и находятся в хорошем соответствии со значениями τ_0 , полученными выше.

Таким образом, можно сделать вывод, что наряду с процессом медленной релаксации, который можно подавить за счет фотоэффекта, существует другой механизм медленной релаксации с $\tau \sim 1$ s, на который УФ-излучение не влияет. Природа этого механизма неясна, и авторы могут только предположить, что в сильных управляющих полях ($E \geq 15\text{--}20$ V/ μm), при которых начинаются процессы медленной релаксации [13], в пленке возможно индуцирование сегнетоэлектрического состояния, время разрушения которого, после снятия электрического поля, и определяет неподавляемую УФ-излучением медленную релаксацию.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы и аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)“.

Список литературы

- [1] Scott J.F. *Ferroelectric Review*. 1998. V. 1. N 1. P. 1–129.
- [2] Hongtao Xu, Nadiq K. Pervez, and Robert A. York // *Integr. Ferroelectr.* 2005. V. 77. P. 27.
- [3] Kozyrev A., Buslov O., Keis V. et al. // *Integr. Ferroelectr.* 2003. V. 55. P. 905.
- [4] Kozyrev Andrey B., Osadchy Vitaly N., Kosmin Dmitry N. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 91. P. 022905.
- [5] Boikov Yu.A., Goltsman B.M., Yarmarkin V.K. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 78. P. 3866
- [6] Dawber M., Rabe K.M., Scott J.F. // *Rev. Mod. Phys.* 2005. V. 77. P. 1083.
- [7] Petrov P.K., Alford N. McN, Kozyrev A. et al. // *J. Appl. Phys.* 2010. V. 107. P. 084102.
- [8] Neil McN. Alford, Peter Kr. Petrov, Aleksandr G. Gagarin et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 87. P. 222904.
- [9] Vendik O.G., Razumov S.V., Tumarkin A.V. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 86. P. 022902.
- [10] Razumov S.V., Tumarkin A.V., Gaidukov M.M. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2002. V. 81. N 9. P. 1675–1677.

- [11] *Тумаркин А.В., Михайлов А.К., Алтынников А.Г.* // Письма в ЖТФ. Т. 34. В. 18. С. 14–19.
- [12] *Козырев А.Б., Гайдук М.М., Гагарин А.Г., Алтынников А.Г.* // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 16-й Международ. конф. „КрыМиКо’2006“. Севастополь, 10–14 сент. 2006 г. Севастополь, 2006. С. 778–779 (Kozyrev A.V., Gaidukov M.M., Gagarin A.G., Altynnikov A.G. // Microwave and Telecommunication Technology: Proceedings on 16th International Crimean Conference, CriMiCO’06. 2006).
- [13] *Козырев А.Б., Гайдук М.М., Гагарин А.Г., Алтынников А.Г., Разумов С.В., Тумаркин А.В.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 13. С. 1–7 (Kozyrev A.V., Gaidukov M.M., Gagarin A.G., Altynnikov A.G., Rasumov S.V., Tumarkin A.V. // Tech. Phys. Lett. 2009. V. 35. N 13. P. 1–7).