



УДК 539.216.2, 537.226.4, 537.226.1

С. П. Зубко, А. Г. Гагарин, Н. Ю. Медведева
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Эффективная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрической пленки в составе плоскопараллельных и планарных конденсаторов¹

Экспериментально и теоретически исследованы характеристики плоскопараллельных и планарных сегнетоэлектрических конденсаторов. Исследован размерный эффект в тонкой пленке сегнетоэлектрика $Ba_{0,3}Sr_{0,7}TiO_3$ в составе плоскопараллельных и планарных конденсаторов.

Тонкая пленка, размерный эффект, сегнетоэлектрик, конденсатор

Сегнетоэлектрические материалы находят широкое применение в СВЧ-устройствах с электронным управлением. Как правило, сегнетоэлектрические пленки включают в состав многослойных конденсаторных структур – как планарных, так и плоскопараллельных – МДМ-конденсаторов. Конструкция конденсатора существенно влияет на диэлектрические характеристики сегнетоэлектрической пленки. Настоящая статья посвящена исследованию диэлектрических свойств сегнетоэлектрических пленок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BSTO) в составе планарного конденсатора (рис. 1, а) и МДМ-конденсатора (рис. 1, б).

На подложке из лейкосапфира r -среза площадью $10 \times 10 \text{ мм}^2$ в едином технологическом цикле

формировались МДМ-конденсатор и два планарных конденсатора с разными ширинами зазоров s . Цикл состоял из следующих операций:

- нанесение на диэлектрическую подложку пленки Pt толщиной $h_f = 100 \text{ нм}$ методом магнетронного распыления в атмосфере аргона и формирование ионным травлением планарных конденсаторов и нижнего электрода МДМ-структур;
- нанесение и литография сегнетоэлектрической пленки;
- нанесение термическим испарением пленки Cu толщиной 1 мкм и литография топологии верхних электродов конденсаторов.

Пленки BSTO наносились методом высокочастотного магнетронного распыления мишени из

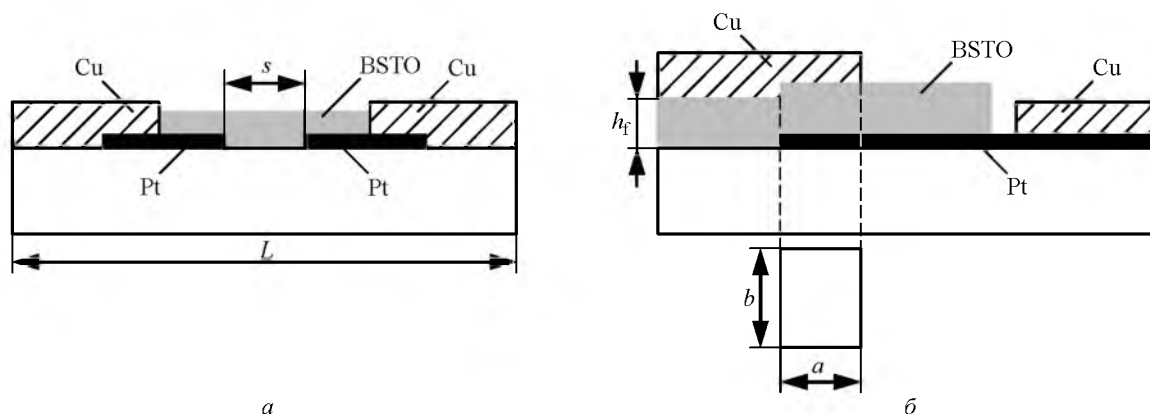


Рис. 1

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-02-12096 офи_м. Теоретическое исследование проведено при поддержке российского научного фонда (грант № 14-12-01296).

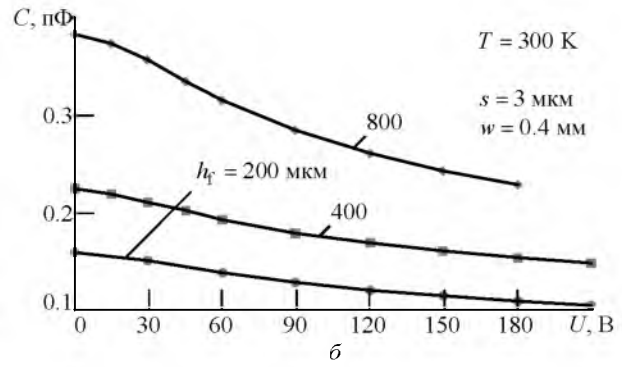
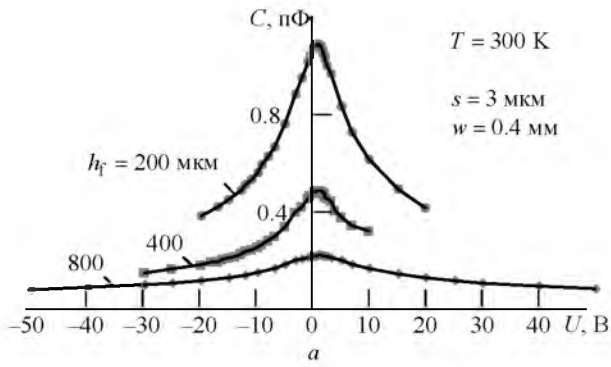


Рис. 2

$Ba_{0.3}Sr_{0.7}TiO_3$ в атмосфере O_2 при давлении 2 Па и температуре подложки $675^\circ C$. Была изготовлена серия пленок BSTO толщиной от 200 до 800 нм, значение которой оценивалось по времени осаждения. Разброс по толщине пленки в пределах подложки составлял 10–20 %.

Измерения геометрических параметров конденсаторов на оптическом микроскопе показали, что ширины зазоров изготовленных планарных конденсаторов s (см. рис. 1, а) составили 2 ± 0.2 и 3.7 ± 0.2 мкм. Площадь верхних электродов МДМ-конденсаторов (см. рис. 1, б) составила $S_3 = a \times b = 4 \times 10$ мкм² для конденсаторов, содержащих пленку BSTO толщиной 400 и 800 нм, и 6×15 мкм² – для конденсаторов, содержащих пленку толщиной 200 нм.

Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) конденсаторов измерялись на частоте 1.5 ГГц резонансным методом [1], управляющее напряжение прикладывалось к конденсатору в течение 1 с. Экспериментально измеренные ВФХ МДМ и планарных конденсаторов, содержащих BSTO-пленки разной толщины h_f , приведены на рис. 2.

Измеренные ВФХ МДМ-конденсаторов (рис. 2, а) симметричны с осью симметрии, сдвинутой относительно точки $U = 0$ на величину $U_{см}$ в сторону

положительного потенциала на нижнем (Pt) электроде. Максимальная емкость превышает значение емкости при $U = 0$ не более чем на 3 %.

Для планарных конденсаторов ВФХ симметричны относительно $U = 0$ (рис. 2, б). Это может быть связано с тем, что емкость планарных конденсаторов и ее зависимость от управляющего напряжения определяются не только диэлектрической проницаемостью сегнетоэлектрической пленки, но и паразитной емкостью подложки, включенной параллельно.

На рис. 3 приведены зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрических пленок от напряжения смещения для двух типов конденсаторов, содержащих сегнетоэлектрические пленки разной толщины. Зависимости построены для тех же значений толщины подложки, что и зависимости на рис. 2.

Диэлектрическая проницаемость пленки в составе МДМ-конденсатора рассчитывалась по стандартной формуле для плоскопараллельного конденсатора: $\epsilon = h_f C / (\epsilon_0 S_3)$, где C – экспериментально измеренная емкость конденсатора; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость свободного пространства. Для планарного конденсатора в параэлектрической фазе расчеты проводились по формуле [2]

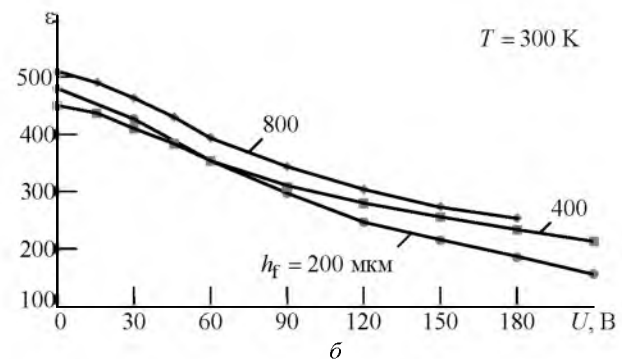
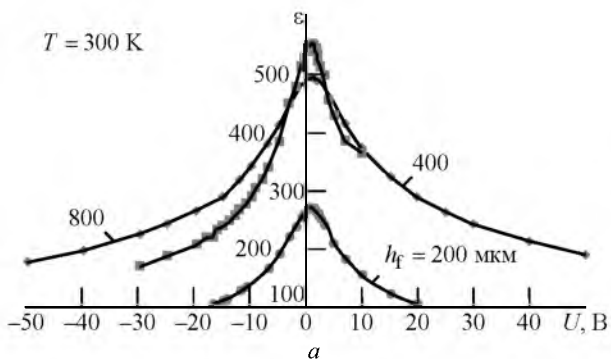


Рис. 3

$$\varepsilon = \left[\frac{C}{\varepsilon_0 w} - \frac{2}{\pi} \ln \left(4 \frac{L}{s} \right) - \frac{1}{\pi} (\varepsilon_s - 1) \ln \left(16 \frac{h_f + h_s}{\pi s} \right) \right] \times \left[\frac{s}{h_f} + \frac{4}{\pi} \ln 2 \right] + 1,$$

где w и s – длина и ширина зазора конденсатора соответственно; L – ширина конденсатора; ε_s и h_s – диэлектрическая постоянная и толщина подложки соответственно.

Как видно из графиков рис. 3, а, в МДМ-конденсаторе с пленкой BSTO толщиной 200 нм наблюдается размерный эффект – зависимость характеристик пленки от ее толщины, – приводящий к существенному уменьшению диэлектрической проницаемости и управляемости пленки напряжением смещения. В планарных же конденсаторах при тех же толщинах сегнетоэлектрической пленки размерный эффект не появляется: проницаемость пленок практически не зависит от толщины (рис. 3, б).

Размерный эффект в конденсаторе является следствием корреляции поляризации в сегнетоэлектрической пленке и появляется при равенстве нулю поляризации на ее границах [3]. Основной характеристикой размерного эффекта служит корреляционный параметр λ , значения которого определяются из обработки дисперсионных кривых сегнетоэлектрической моды [3], [4]. В параэлектрическом состоянии диэлектрическая проницаемость тонкой пленки сегнетоэлектрика в корреляционной модели имеет вид

$$\varepsilon^{-1} = \varepsilon_{00}^{-1} \left\{ \left[(\xi^2 + \eta^3)^{1/2} + \xi \right]^{2/3} + \left[(\xi^2 + \eta^3)^{1/2} - \xi \right]^{2/3} - \eta + 2\varepsilon_{00} \frac{\sqrt{2\lambda}}{h_f} \right\},$$

где ε_{00} – аналог постоянной Кюри–Вейсса;

$$\xi = \sqrt{\xi_s^2 + (E/E_n)^2}; \quad \eta = T/T_C - 1$$

(ξ_s – параметр размытия фазового перехода, вызываемого полем заряженных дефектов; E_n – напряженность нормирующего поля; T_C – температура Кюри).

Для упрощения расчетов в условиях действия размерного эффекта удобно использовать модель "мертвого" слоя, основная концепция которой ба-

зируется на введении на поверхности сегнетоэлектрической пленки слоя линейного диэлектрика, не обладающего сегнетоэлектрическими свойствами, – так называемого мертвого слоя. Толщина "мертвого" слоя определяется значением корреляционного параметра и для BSTO составляет единицы нанометров: $h_d = \varepsilon_d \sqrt{2\lambda} = 2 \dots 4$ нм при диэлектрической постоянной этого слоя $\varepsilon_d = 40 \dots 50$ [5], [6]. В МДМ-конденсаторе "мертвые" слои находятся на границе раздела сегнетоэлектрической пленки и проводящих электродов. В данном случае емкость, обусловленная "мертвым" слоем, соединена с емкостью сегнетоэлектрической пленки последовательно и вносит существенный вклад в полную емкость конденсатора:

$$C = \frac{C_f C_d}{2C_f + C_d},$$

где C_f , C_d – емкости сегнетоэлектрика и "мертвого" слоя соответственно.

В планарном конденсаторе "мертвый" слой расположен на поверхности сегнетоэлектрической пленки, граничащей с электродами, но, так как его площадь велика при малой толщине, в планарном конденсаторе имеет место сильное растекание линий электрического поля в этом слое и их концентрация мала. В данном случае емкость мертвого слоя

$$C_d = \varepsilon_0 (\varepsilon_f - \varepsilon_d) w \left[\frac{s}{h_d} + \frac{4}{\pi} \ln 2 \right]^{-1}$$

оказывается включенной параллельно с емкостью сегнетоэлектрической пленки: $C = C_f + C_d$ и ее вклад в полную емкость конденсатора пренебрежимо мал (при $\varepsilon_d = 40$, $h_d = 4$ нм, $w = 0.4$ мм емкость мертвого слоя $C_d \cong 1.6$ фФ).

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования показали, что в планарном конденсаторе размерный эффект не возникает при уменьшении толщины пленки до 200 нм, в то время как в МДМ-структуре при данной толщине влияние размерного эффекта приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости пленки почти в два раза.

Авторы признательны проф. О. Г. Вендику за предложение исследования данной проблемы и полезные дискуссии в процессе ее решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Измерение емкости и диэлектрических потерь планарных конденсаторов на сегнетоэлектрической плёнке в диапазоне СВЧ / М. М. Гайдуков, А. Б. Козырев, А. С. Рубан и др. // Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20, вып. 12. С. 2588–2591.
2. Вендик О. Г., Зубко С. П., Никольский М. А. Моделирование и расчет емкости планарного конденсатора, содержащего тонкий сегнетоэлектрический слой // ЖТФ. 1999. Т. 69, вып. 4. С. 1–7.
3. Вендик О. Г., Зубко С. П. Размерный эффект в сегнетоэлектриках типа смещения // Кристаллография. 2004. Т. 49, вып. 5. С. 1–7.
4. Vendik O. G., Zubko S. P. Ferroelectrics as Constituents of Tunable Metamaterials, in "Theory and Phenomena of Metamaterials" / ed. by F. Capolino. Boca Raton: CRC Press, 2009. P. 33–1–33–43.
5. Vendik O. G., Zubko S. P., Medvedeva N. Yu. "Dead Layer" Characteristics Based on a Correlation of the Ferroelectric Polarization under Relevant Boundary Conditions in a Parallel Plate Capacitor // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105, iss. 5. P. 053515(1–4).
6. Thickness and Dielectric Constant of Dead Layer in Pt/(Ba_{0.7}Sr_{0.3})TiO₃/YBa₂Cu₃O_{7-x} Capacitor / B. Chen, H. Yang, L. Zhao, J. Miao, B. Xu, X. G. Qiu, B. R. Zhao // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 84, iss. 4. P. 583–585.

S. P. Zubko, A. G. Gagarin, N. Yu. Medvedeva
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Effective dielectric permittivity of ferroelectric film included in parallel-plate and planar ferroelectric capacitors

The characteristics of parallel-plate and planar ferroelectric capacitors are investigated experimentally and theoretically. The size effect in Ba_{0.3}Sr_{0.7}TiO₃ included into parallel-plate and planar capacitors is studied.

Thin film, size effect, ferroelectrics, capacitor

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2015 г.

УДК 621.315.592

С. А. Тарасов, И. А. Ламкин, А. С. Евсеенков, И. И. Михайлов, А. В. Соломонов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Селективные фоточувствительные структуры на основе барьера Шотки Au–AlGaN

Созданы и исследованы селективные фоточувствительные структуры на основе барьера Шотки Au–AlGaN для ультрафиолетового диапазона спектра. Показаны методы управления спектром фоточувствительности за счет применения эффектов широкозонного окна и надбарьерного переноса в структурах Au–AlGaN. Получены фотодиоды с полушириной спектра фоточувствительности 5...6 нм для длин волн 351...373 нм и чувствительностью до 140 мА/Вт.

Фотодиод, AlGaN, ультрафиолетовая область, барьер Шотки

Фоточувствительные структуры и приборы на их основе в настоящее время широко используются практически во всех областях человеческой деятельности [1], [2]. В последние годы для ряда военных и гражданских применений все более востребованными становятся фотоприемники, обладающие чувствительностью в ультрафиолетовой (УФ) части спектрального диапазона [3]. Одним из наиболее актуальных примеров исполь-

зования подобных приборов являются системы УФ-локации, способные эффективно обнаруживать аппараты различного назначения по УФ-составляющей излучения реактивной струи, в том числе находящиеся в космическом пространстве [4]. К гражданским применениям можно отнести: контроль уровня УФ-излучения при обеззараживании воды и при некоторых медицинских процедурах; экологический мониторинг, включая ис-