

05

СВЧ-потери в конденсаторе на основе тонкопленочной структуры металл—сегнетоэлектрик—металл

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

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

В окончательной редакции 12 декабря 2007 г.

Рассмотрены конструкция и технология изготовления СВЧ сегнетоэлектрического (СЭ) конденсатора на основе тонкопленочной Pt/(Ba,Sr)TiO₃/Cu структуры. Приведены структурные и электрофизические параметры СЭ-пленки, осажденной на пленку Pt. Представлены экспериментальные зависимости СВЧ-потерь в интервале частот (1 ÷ 30) GHz для конденсатора, обеспечивающего перестройку емкости в ~ 2 раза при напряжениях управления ~ 30 V. На основе эквивалентных представлений определен вклад металлических потерь в общие потери конденсатора и сделан вывод об их доминирующей роли в миллиметровом диапазоне СВЧ-диапазона.

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

Сегнетоэлектрические пленки (Ba, Sr)TiO₃ (BSTO) в параэлектрической фазе являются перспективным материалом для создания быстродействующих устройств управления фазой и амплитудой СВЧ-сигнала (фазовращатели, перестраиваемые линии задержки и фильтры) [1,2]. Ряд технологических проблем получения номиналов емкостей, используемых в СВЧ-диапазоне (порядка 1 pF и менее), приводил к необходимости использования СЭ-конденсаторов планарной конструкции. Основным недостатком подобных структур являются высокие значения управляющих напряжений, масштаб которых при характерных значениях зазоров между электродами ~ 10 μm определяется сотнями вольт. Снижение управляющего напряжения за счет уменьшения зазора ведет к снижению управляемости варактора за счет увеличения паразитных емкостей.

Наряду с возможностью использования нанотехнологии планарных СЭ-структур [3] существенное снижение управляющих напряжений может быть получено при использовании плоскопараллельных конденсаторных структур металл/диэлектрик/металл (МДМ), что продемонстрировано в работах [4,5]. Технология существующих МДМ СЭ-конденсаторов предусматривает, как правило, использование пленки Pt в качестве нижнего электрода, нанесенного на подложку, с последующим выращиванием пленки сегнетоэлектрика. Использование Pt продиктовано ее сравнительно высокой проводимостью, а также химической и температурной стойкостью, что является необходимым при высокотемпературном процессе выращивания BSTO на ее поверхности [6]. Создание высококачественного контакта Pt/BSTO накладывает ограничение на толщину Pt-пленки (не более $0.1 \div 0.2 \mu\text{m}$). Получение более толстых пленок осложнено возможными отслоениями электрода от подложки из-за плохой адгезии, что приводит к необходимости использования специального подслоя [7]. Однако более серьезной проблемой является рекристаллизация и бугрение („hillocks“ эффект) толстых Pt-пленок, что приводит в дальнейшем к проколам сегнетоэлектрической пленки и замыканию нижнего и верхнего электродов. С точки зрения СВЧ-применений подобных МДМ-структур использование тонких пленок Pt ведет к увеличению их сопротивления, что приводит к росту полных СВЧ-потерь конденсатора. Оценка вклада СВЧ-потерь в электродах и диэлектрических СВЧ-потерь в СЭ-пленке позволит провести их минимизацию за счет как соответствующих конструктивных решений, так и корректировки технологического процесса МДМ-структур.

Топология СЭ МДМ-конденсатора представлена на рис. 1, *a*. Определим вклад СВЧ-потерь, связанных с рассеянием мощности в металлических электродах, используя СВЧ эквивалентные представления исследуемого МДМ-варактора (рис. 1, *b*). На эквивалентной схеме: C — управляемая емкость СЭ-пленки; R — эквивалентное сопротивление СВЧ-потерь в СЭ-пленке ($\tan \delta_{FE}$); L — последовательная индуктивность верхнего и нижнего электродов конденсатора; C_p — планарная межэлектродная емкость зазора w и клинообразных зазоров между подводящими электродами по всей ширине варактора; R_{Pt} , R_{Cu} — активное сопротивление Pt и Cu электродов.

Очевидно, что увеличение предельных рабочих частот конденсатора делает необходимым минимизацию значений реактивных параметров L и C_p , а уменьшение потерь требует минимизации R_{Cu} и R_{Pt} . В рассматриваемой конструкции (рис. 1) за счет операции травления BSTO в

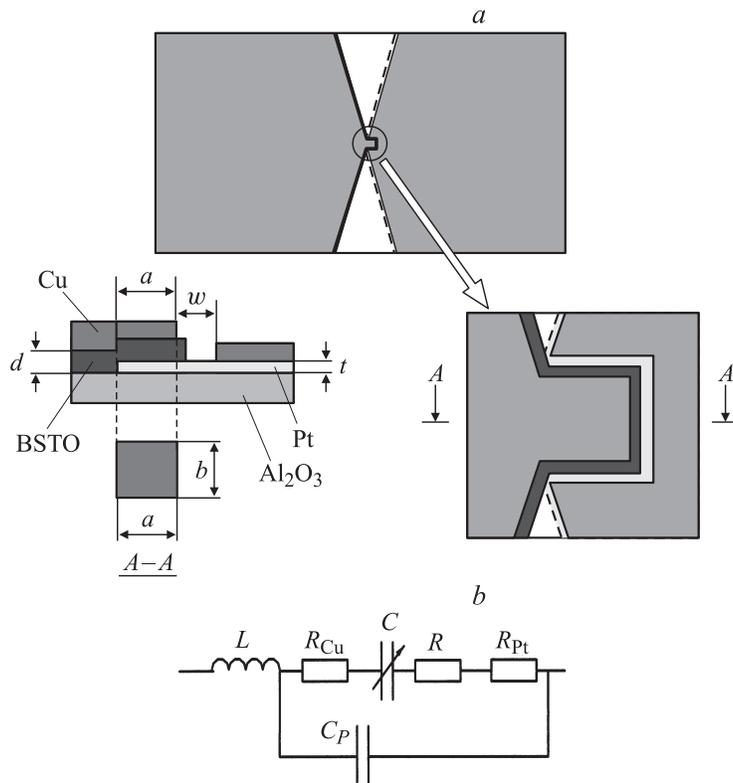


Рис. 1. Конструкция МДМ-конденсатора (*a*, белая стрелка указывает увеличенный вид рабочей области конденсатора) и ее СВЧ эквивалентная схема (*b*).

зазоре $w = 4 \mu\text{m}$ и клинообразном зазоре между электродами получены минимальные значения $C_p \ll C$, позволяющие избежать собственных резонансов структуры вплоть до частот порядка 100 GHz.

Принимая во внимание $R_{Cu} \ll R_{Pt}$, что справедливо для рассматриваемой конструкции при толщинах пленки Cu больше скин-глубины проникновения (δ), общие потери в МДМ-конденсаторе $\tan \delta_\Sigma$ на рабочей частоте f можно представить как сумму диэлектрических потерь в СЭ-пленке и СВЧ-потерь в металлических электродах $\tan \delta_M$:

$$\tan \delta_\Sigma = 2\pi f C (R_{Pt} + R) = \tan \delta_M + \tan \delta_{FE}. \quad (1)$$

Для приведенной топологии МДМ-конденсатора, учитывая малые (по сравнению с длиной волны) размеры элемента, значение R_{Pt} будет определяться суммой сопротивления зазора между электродами (w) и сопротивления растекания тока по платине в зоне ее перекрытия с верхним электродом ($a \times b$) и может быть записано как

$$R_{Pt} = \frac{1}{2} R_S \left(\frac{w}{a + \frac{b}{2} + w} + \frac{ab}{2a^2 + b^2} \right), \quad (2)$$

где $R_S = \rho/t$ — поверхностное сопротивление пленки Pt при условии $t > \delta$, ρ — удельное сопротивление пленки Pt (в рассматриваемом случае $\rho = (2.5 \div 5) \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$). Очевидно, что минимизация первого слагаемого в выражении (2) в наибольшей степени обеспечивается уменьшением величины зазора w , которое ограничено как возможностями технологии, так и ростом паразитной емкости C_p . При выполнении условия $w \ll a, b$ основной вклад в R_{Pt} вносит второе слагаемое в выражении (2), зависимость которого от соотношения сторон перекрытия конденсатора a/b для рассмотренной конструкции (рис. 1) имеет максимум, соответствующий $a = 0.7b$. В конструкции, изготовленной для тестирования, было принято $a \approx 2.5b$, что соответствует уменьшению сопротивления относительно максимума приблизительно в 2 раза и может быть рассмотрено как компромисс наших технологических возможностей и минимизации паразитных факторов.

Pt пленка толщина $\sim 0.1 \mu\text{m}$ наносилась на R -срез монокристаллической подложки Al_2O_3 толщиной 0.5 mm с последующим ионным травлением Pt для обеспечения необходимой топологии нижнего электрода. СЭ-пленка толщиной $\sim 0.6 \mu\text{m}$ наносилась реактивным магнетронным ВЧ-распылением мишени состава $\text{Ba}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{TiO}_3$ [8]. Удаление BSTO пленки из межэлектродного зазора w (рис. 1) производилось химическим травлением в смеси кислот $\text{HF}-\text{HNO}_3$. Далее термическим испарением на пленку BSTO наносился адгезионный слой Cr ($\sim 100 \text{ \AA}$) и затем Cu пленка толщиной $\sim 1 \mu\text{m}$. Травление верхнего металлического покрытия (Cr/Cu) обеспечивало зону перекрытия верхнего и нижнего электродов с площадью $a \times b = 10 \times 4 \mu\text{m}^2$.

Рентгеноструктурный анализ, проведенный после нанесения пленки BSTO, показал ее преимущественную ориентацию (111). Исследования поверхности с помощью атомно-силовой микроскопии позволили оценить размер гранул как $(0.3 \div 0.6) \mu\text{m}$. Анализ методом вторичной

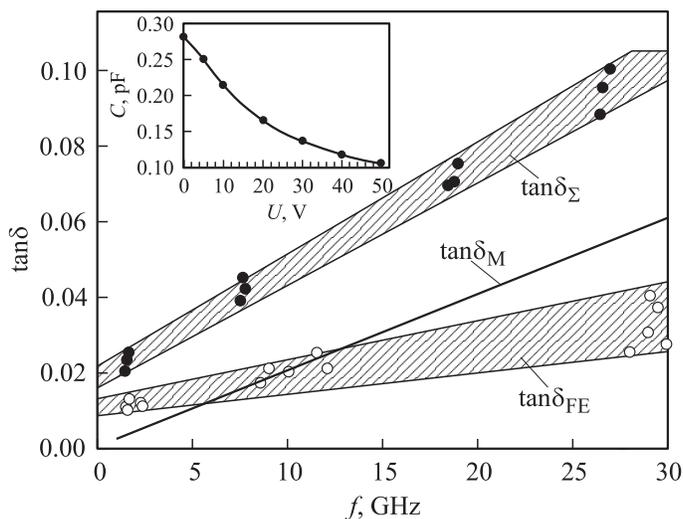


Рис. 2. Вольт-фарадная характеристика МДМ-конденсатора (врезка) и экспериментальные частотные зависимости общих потерь конденсатора ($\tan \delta_{\Sigma}$) и потерь в СЭ-пленке ($\tan \delta_{FE}$). Зависимость СВЧ-потерь в металлических электродах ($\tan \delta_M$) получена на основе эквивалентной схемы.

ионной масс-спектрометрии позволяет сделать вывод о соответствии стехиометрического состава пленки составу распыляемой мишени по компонентам Ba, Sr и Ti в пределах 5% по всей ее толщине за исключением переходных слоев (~ 50 nm) на границах Pt/BSTO и BSTO/Cu. Удельная емкость конденсаторов при комнатной температуре в отсутствие напряжения смещения составляла $C \approx 7$ fF/ μm^2 , что соответствует диэлектрической проницаемости BSTO пленки $\epsilon \approx 500$.

На рис. 2 представлены результаты экспериментального исследования изготовленных конденсаторов. Из вольт-фарадной характеристики видно, что управляемость $K = C(0)/C(U)$ достигает величины $K = 2$ уже при приложении напряжения $U = 30$ V, что является решением задачи снижения напряжения управления. Зависимость диэлектрических потерь в СЭ-пленке и в СЭ-МДМ-конденсаторе от частоты была определена рядом экспериментальных методов [9,10]. Сравнение экспериментальных зависимостей с расчетной частотной зависимостью потерь в металлических электродах МДМ-конденсатора, полученной на

основе эквивалентных представлений, показывает, что общие потери в конденсаторе соответствуют сумме СВЧ-потерь в металлических электродах и диэлектрических СВЧ-потерь в СЭ-пленке. Это подтверждает хорошую точность расчетных соотношений (1) и (2). Помимо этого, сравнение полученных зависимостей позволяет сделать вывод о незначительной ($\leq 10\%$) роли потерь в электродах в нижней части СВЧ-диапазона ($1 \div 3$) GHz. Видно также, что при увеличении частоты до ($20 \div 30$) GHz следует ожидать доминирующего вклада потерь в электродах по сравнению с диэлектрическими СВЧ-потерями. Можно сделать вывод, что дальнейшее развитие МДМ-СЭ-структур будет связано с поиском путей коренного снижения вклада металлических потерь, играющих определяющую роль в миллиметровой части СВЧ-диапазона.

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

Список литературы

- [1] *Tagantsev A.K., Sherman V.O., Astafiev K.F.* // J. of Electroceramics. 2003. V. 11. N 1–2. P. 5–66
- [2] *Noren B.* // Microwave Journal. 2004. V. 47. N 5.
- [3] *Мухомтов В.М., Масычев С.И., Головки Ю.И., Чуб А.В.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 10. С. 106–109.
- [4] *Koutsaroff I.P., Bernacki T., Zelner M.* et al. // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 2003. V. 784. P. 319–325.
- [5] *Acikel B., Taylor T.R., Hansen P.J.* et al. // IEEE Microwave and Wireless Components Lett. 2002. V. 12. Is. 7. P. 237–239.
- [6] *Al-Shareef H.N., Gifford K.D., Rou S.H.* et al. // Integrated Ferroelectrics. 1993. V. 3. P. 321–332.
- [7] *Афанасьев П.В., Коровкина Н.М.* // Вакуумная техника и технология. 2006. Т. 16. В. 3. С. 215–219.
- [8] *Razumov S.V., Tumarkin A.V., Gaidukov M.M.* et al. // App. Phys. Lett. 2002. V. 81. Is. 9. P. 1675–1677.
- [9] *Kozyrev A., Ivanov A., Keis V.* et al. // Microwave Symp. Digest IEEE MTT-S. 1998. V. 2. N 7–12. P. 985–988.
- [10] *Kozyrev A., Buslov O., Keis V.* et al. // Integrated Ferroelectrics. 2003. V. 55. N 1. P. 895–903.