

05;08

Поле гиперзвуковых смещений в многослойном конденсаторе с сегнетоэлектрической пленкой на частотах дисперсии импеданса

© А.Б. Козырев, А.К. Михайлов, А.М. Прудан, С.В. Пташник

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»
E-mail: mlp@umwlab.com

Поступило в Редакцию 30 апреля 2009 г.

Приведены данные о распределении амплитуды механических смещений в плоскопараллельном конденсаторе Pt/(Ba,Sr)TiO₃/Pt/Si, генерируемых электрическим полем СВЧ-диапазона на частотах акустического резонанса. Определены собственные акустические моды многослойного резонатора, возбуждение которых приводит к частотной дисперсии электрического импеданса сегнетоэлектрического конденсатора. Анализируется частотное поведение действительной и мнимой компонент СВЧ-тока в конденсаторе за счет индуцированного пьезоэффекта.

PACS: 77.65.-j, 77.65.Fs, 84.32.Tt, 84.40.-x

Сегнетоэлектрические (СЭ) материалы композиционного состава Ba_xSr_{1-x}TiO₃ (BSTO) в параэлектрическом состоянии обладают высокой диэлектрической нелинейностью при отсутствии дисперсии диэлектрической проницаемости вплоть до частот $f \sim 100$ GHz. Это свойство обеспечивает перспективность использования СЭ-материалов в устройствах СВЧ-электроники с электрически управляемыми характеристиками [1,2].

Плоскопараллельный сегнетоэлектрический конденсатор на основе многослойной структуры металл–BSTO–металл–подложка в настоящее время рассматривается как перспективный элемент для управляемых устройств СВЧ-электроники. Однако измерения электрического импеданса ($Z = U/I$) конденсатора такого типа в диапазоне частот $f = 1–25$ GHz выявили дисперсионное поведение мнимой и действи-

Параметры материалов структуры

Вещество	ρ , 10^3 kg/m^3	h , μm	c , 10^{11} N/m	Q	$\text{tg } \delta_0$	G , 10^{10} m/F	β , $10^9 \text{ m}^5/\text{C}^2\text{F}$
Pt [111]	21.3	0.5	3.34	$\frac{150}{f/10^9}$	—	—	—
$\text{Ba}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{TiO}_3$ [100]	4.40	0.5	3.21	$\frac{200}{(f/10^9)^2}$	0.035	1.08	2.69
Si [100]	2.34	500	1.66	—	—	—	—

тельной составляющих $Z(f)$ в присутствии управляющего напряжения. Электроакустические преобразования в сегнетоэлектрической пленке составляет основу обнаруженного эффекта индуцированной дисперсии импеданса (ЭИДИ) конденсатора [3–7]. Модель дисперсии импеданса конденсатора на основе пьезоэлектрика разработана в теории электроакустических фильтров [8] и успешно применяется для описания ЭИДИ сегнетоэлектрических конденсаторов [4–6]. Вместе с тем отсутствуют данные о распределении механических смещений для собственных акустических мод многослойной структуры и об эффективности их возбуждения однородным СВЧ-полем в СЭ-пленке. Данная работа посвящена решению этой задачи.

В исследуемом плоскопараллельном конденсаторе Pt/BSTO/Pt/Si геометрические размеры подложки существенно превышают длину волны гиперзвука, и отраженная от свободной поверхности подложки волна за счет затухания не оказывает влияния на распределения амплитуды плоских волн в трехслойном акустическом резонаторе Pt/BSTO/Pt. В дальнейшем представляем конденсатор в виде трехслойного акустического резонатора, одна внешняя граница которого механически свободна. Условие на противоположной границе задает волновое акустическое сопротивление подложки. Для анализа используем простейший вариант плоскопараллельного конденсатора в виде симметричной структуры Pt/ $\text{Ba}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{TiO}_3$ /Pt. Электрофизические параметры материалов структуры приведены в таблице [9–12], где использованы следующие обозначения: ρ — плотность вещества; h — толщина слоя; c — модуль упругости; Q — акустическая добротность; $\text{tg } \delta_0$ — тангенс угла диэлектрических потерь; G — коэффициент электрострикции; β — коэффициент диэлектрической нелинейности.

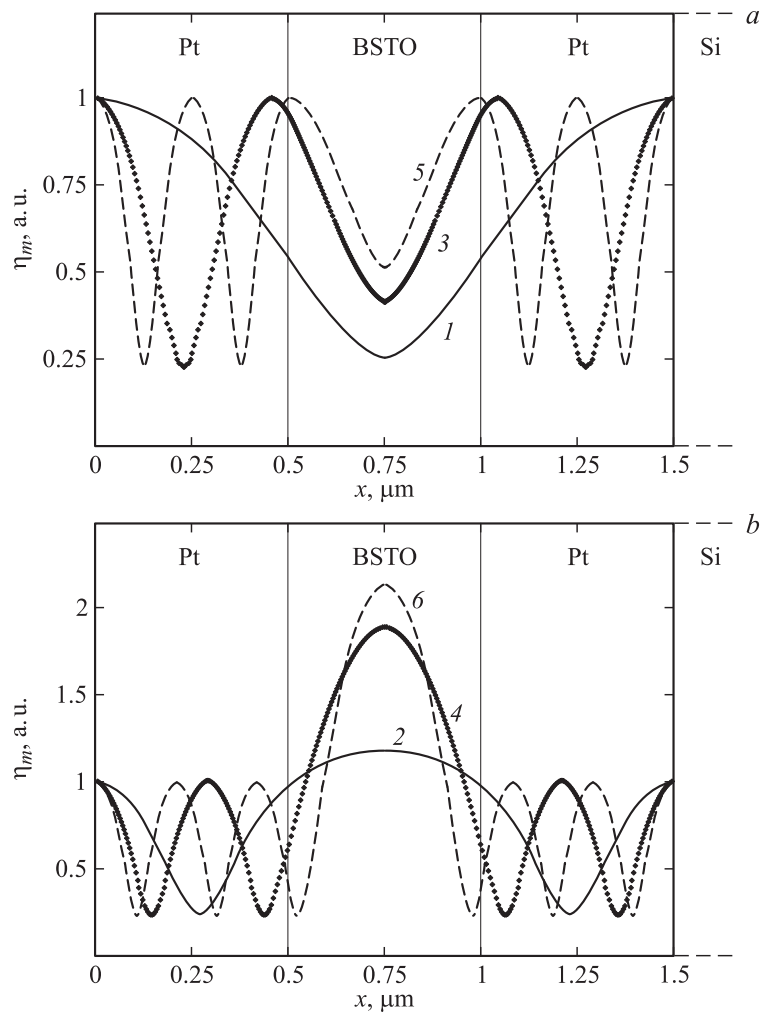


Рис. 1. Распределение модуля амплитуды стоячей волны механических смещений в трехслойном резонаторе Pt/BSTO/Pt для первых трех нечетных (a) и четных (b) собственных акустических мод с частотами: 1 — $f_0 = 1.315$ GHz; 2 — $f_0 = 3.605$ GHz; 3 — $f_0 = 4.400$ GHz; 4 — $f_0 = 6.790$ GHz; 5 — $f_0 = 7.985$ GHz; 6 — $f_0 = 9.430$ GHz. Границы между пленками — вертикальные линии.

Задача о собственных модах многослойного акустического резонатора решена на примере возбуждения акустических смещений на свободной границе структуры. В результате решения системы уравнений, описывающих непрерывность механических напряжений (σ) и смещений (η) на границах раздела, был определен спектр собственных частот ($f_0(\text{GHz}) = 1.32, 3.60, 4.40, 6.79, 7.98, 9.43, \dots$) акустических мод резонатора и получены данные о распределении вдоль структуры амплитуды $\eta_m(x)$ стоячей волны с частотой f_0 . На рис. 1 представлены профили распределения модуля амплитуды $\eta_m(x)$ для первых шести собственных мод, имеющих нечетное (рис. 1, *a*) и четное (рис. 1, *b*) количество узлов стоячей волны.

На следующем этапе решена задача о возбуждении СВЧ-полем конденсатора собственных мод резонатора с использованием следующих модельных представлений. Акустическая волна в СЭ-пленке с ненулевым пьезомодулем (e) неразрывно сосуществует с электрическим полем волнового типа. Функциональная зависимость потенциала (φ) электрического поля от координаты и времени определяется из совместного решения волнового уравнения для механических смещений (η) и уравнения Пуассона:

$$\begin{cases} c^D \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(-\varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial x} + e \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\varepsilon_0 \varepsilon$ — диэлектрическая проницаемость СЭ-пленки; $c^D = c + e^2/\varepsilon_0 \varepsilon$ — модуль упругости. Решение системы уравнений (1) имеет вид [8]:

$$\begin{cases} \eta(x, t) = A e^{j(\omega t + kx)} + B e^{j(\omega t - kx)}, \\ \varphi(x, t) = \frac{e}{\varepsilon_0 \varepsilon} \eta(x, t) - \frac{D(t)}{\varepsilon_0 \varepsilon} x + b, \end{cases} \quad (2)$$

где ω, k — частота волны и модуль волнового вектора; $D(t)$ — однородная составляющая индукции электрического поля; b — произвольная постоянная. Структура функции $\varphi(x, t)$ свидетельствует о том, что однородное в СЭ-пленке СВЧ-поле способно возбудить собственную акустическую моду резонатора. Разрешен и обратный эффект: стоячая

акустическая волна индуцирует поправку к однородной составляющей индукции поля в сегнетоэлектрическом слое:

$$D(t) = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{2h_0} u_{AC}(t) + e \frac{\Delta h(t)}{h_0}, \quad (3)$$

где $2h_0$ — исходное значение толщины СЭ-слоя; $\Delta h(t) = \eta(h, t) - \eta(-h, t)$ — изменение толщины СЭ-слоя, $u_{AC}(t)$ — СВЧ-напряжение между обкладками конденсатора.

Пьезоэлектрический модуль (e) сегнетоэлектрика, находящегося в параэлектрическом состоянии, имеет ненулевое значение только при воздействии постоянного электрического поля. Феноменологическая теория сегнетоэлектриков с фазовым переходом второго рода устанавливает следующую взаимосвязь между управляющим полем и искомым пьезоэлектрическим модулем:

$$e = 2\varepsilon_0 \varepsilon G P_{DC}, \quad (4)$$

где P_{DC} — поляризация в СЭ-пленке, созданная управляющим полем; $\varepsilon_0 \varepsilon = ((\varepsilon_0 \varepsilon(0))^{-1} + 3\beta P_{DC}^2)^{-1}$ — диэлектрическая проницаемость СЭ в присутствии управляющего поля.

Расчет поля гиперзвуковых смещений в трехслойном резонаторе основан на решении системы уравнений, описывающих непрерывность механических смещений (η_i) и напряжений (σ_i) на границе ($x = x_j$) раздела соседних слоев:

$$\begin{cases} \eta_i(x_j) = \eta_{i+1}(x_j), \\ \sigma_i(x_j) = \sigma_{i+1}(x_j), \end{cases} \quad i = 0, 1, 2, 3. \quad (5)$$

Анализируемая модель учитывает диссипацию акустической и электромагнитной энергии в составных частях конденсатора за счет комплексного представления диэлектрической проницаемости ($\varepsilon = \varepsilon'(1 - j \operatorname{tg} \delta_0)$) и модулей упругости ($c_i^p = c_i^0(1 + j/Q_i)$) с параметром Q_i , зависящим от частоты [11,12]. В результате численного решения системы уравнений (5) были определены комплексные амплитуды (A_i, B_i) волн в составных частях многослойного резонатора Pt/Ba_{0.3}Sr_{0.7}TiO₃/Pt. На рис. 2 представлены графики пространственного распределения амплитуды стоячей акустической волны, возбуждаемой СВЧ-полем на двух резонансных частотах, соответствующих нечетной

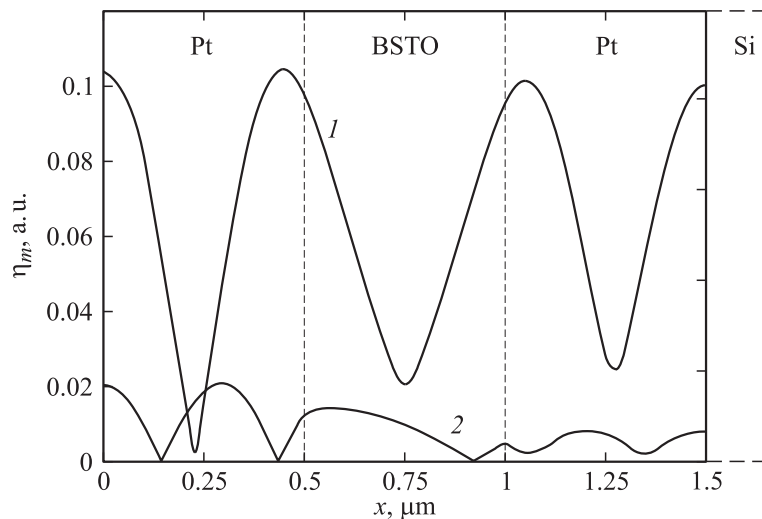


Рис. 2. Распределение модуля амплитуды стоячей волны механических смещений в трехслойном резонаторе Pt/BSTO/Pt, возбуждаемой СВЧ-полем на собственных акустических частотах: 1 — $f = 4.400$ GHz; 2 — $f = 6.790$ GHz.

(кривая 1) и четной (кривая 2) моде. Амплитуды η_{mi} на рис. 2 нормированы на параметр, имеющий размерность длины $\eta_0 = U_{AC}/2GP_{DC}$, где U_{AC} — амплитуда СВЧ-напряжения на конденсаторе. Ненулевые значения $\eta_m(x)$ в точках минимума, принадлежащих СЭ-пленке и нижнему электроду, указывают на дополнительное присутствие в этих слоях бегущей акустической волны, обеспечивающей перенос энергии в сторону подложки.

Анализ полученных данных показывает, что однородное СВЧ-поле в СЭ-пленке обеспечивает возбуждение только собственных мод нечетного типа. При воздействии СВЧ-поля на частоте четной моды (рис. 2, кривая 2) в структуре возникает стоячая волна с распределением амплитуды, которое не соответствует собственной моде резонатора. Таким образом, в симметричной структуре Pt/Ba_{0.3}Sr_{0.7}TiO₃/Pt не происходит возбуждение четных мод (рис. 1, *b*) СВЧ-полем конденсатора. Последующий анализ электрической реакции конденсатора на воздействие СВЧ-напряжений подтверждает это заключение.

Эффект индуцированной дисперсии импеданса плоскопараллельного конденсатора на основе сегнетоэлектрической пленки обусловлен присутствием дополнительного тока в цепи конденсатора. В соответствии с (3) однородная составляющая индукции ($D(t)$) поля в СЭ-пленке с пьезоэлектрическими свойствами имеет две компоненты. Основная компонента (первое слагаемое в (3)) — результат поляризации сегнетоэлектрика СВЧ-полем; второе слагаемое — поправка к однородному полю, которая индуцируется стоячей акустической волной. Полный ток в цепи сегнетоэлектрического конденсатора ($(i_1 + i_2) \sim dD/dt$) имеет две составляющие: классический ток смещения ($i_1 = Cdu/dt$) в цепи конденсатора и дополнительный ток, связанный с осцилляцией толщины ($h(t) = 2h_0 + \Delta h(t)$) СЭ-пленки.

Амплитуда осцилляции толщины сегнетоэлектрической пленки ($\Delta h = \Delta h' + i\Delta h''$) имеет действительную и мнимую составляющие, зависимость которых от частоты представлена на рис. 3, *a*; на рис. 3, *b* приведены относительные амплитудно-частотные характеристики активной ($I_{2a}(f)/I_{1a}(f)$) и реактивной ($I_{2r}(f)/I_{1r}(f)$) компонент тока. Полученные зависимости согласуются с экспериментальными данными о частотном поведении емкости ($C \sim I_r$) [3–5] и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta \sim I_a/I_r$) [4,5] сегнетоэлектрического конденсатора. Положение максимумов зависимостей $I_{2a}(f)$, $\Delta h''(f)$ соответствует только частотам нечетных собственных акустических мод многослойного резонатора, на частотах четных мод такие максимумы отсутствуют.

В заключение отметим следующее. В волновом приближении решена задача о резонансном возбуждении СВЧ-полем собственных акустических мод в многослойной конденсаторной структуре на основе сегнетоэлектрической пленки. СВЧ-напряжение на сегнетоэлектрическом конденсаторе с симметричной структурой $\text{Me}/\text{СЭ}/\text{Me}$ обеспечивает эффективное возбуждение гиперзвука только на частотах нечетных мод многослойного резонатора.

Индукцированная акустическая волна в СЭ-пленке возбуждает в цепи конденсатора дополнительный ток той же частоты и с начальной фазой, отличной от фазы СВЧ-сигнала. Присутствие в цепи дополнительного тока, амплитудно-частотная характеристика которого имеет резонансный характер, предопределяет дисперсионное поведение электрического импеданса $Z(f)$ конденсатора. Резкое снижение электрической добротности ($Q_{el} = |\text{Im } I|/|\text{Re } I|$) конденсатора в окрестности

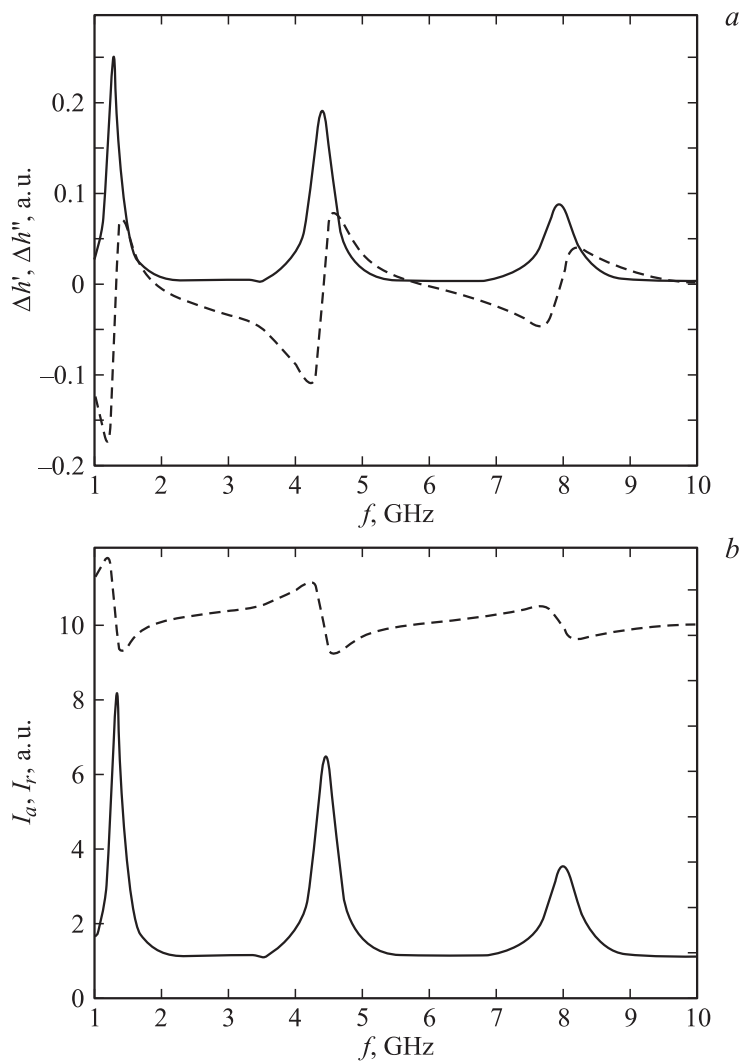


Рис. 3. Частотное поведение действительной ($\Delta h'(f)$ — пунктирная линия) и мнимой ($\Delta h''(f)$ — сплошная линия) частей амплитуды осцилляций толщины сегнетоэлектрической пленки (а) и амплитуды активной (сплошная линия — I_{2a}/I_{1a}) и реактивной (пунктирная линия — $10 \cdot I_{2r}/I_{1r}$) составляющей дополнительного тока в цепи конденсатора (b).

акустического резонанса связано с затратами энергии на возбуждение дополнительной компоненты тока во внешней цепи.

Работа выполнена при поддержке программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)“, проект 2.1.2/2838.

Список литературы

- [1] *Vendik O.G., Golman E.K., Kozyrev A.B.* et al. // J. Superconductivity. 1999. V. 12. N 2. P. 325–338.
- [2] *Keis V., Kozyrev A., Khazov M.* et al. // Electron Lett. 1998. V. 34. P. 1107.
- [3] *Morito K., Iwazaki Y., Suzuki T.* et al. // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. N 8. P. 5199–5205.
- [4] *Tappe S., Böttger U., Waser R.* // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. N 4. P. 624–626.
- [5] *Gevorgian S., Vorobiev A., Lewin T.* // J. Appl. Phys. 2006. V. 99. P. 124 112.
- [6] *Noeth A., Yamada T., Sherman V.* et al. // J. Appl. Phys. 2007. V. 102. P. 114 110.
- [7] *Noeth A., Yamada T., Tagantsev A.K.* et al. // J. Appl. Phys. 2008. V. 104. P. 094 102.
- [8] *Lakin K., Kline G., McCarron K.* // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1993. V. 41. N 12. P. 2139–2146.
- [9] *Landolt-Bornstein.* New Series, Group III. V. 29. Part B. New York: Springer, 1981.
- [10] *Физические величины: Справочник* / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
- [11] *Леманов В.В., Смоленский Г.А.* // УФН. 1972. Т. 108. В. 3.
- [12] *Физическая акустика. Принципы и методы. Т. 7. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Т. 1* / Под ред. У. Мезона и Р. Терстона. Пер. с англ. М.: Мир, 1974, 1966.