

05;09;12

Электрострикционный механизм сверхвысокочастотных потерь в пленке сегнетоэлектрика и его экспериментальное подтверждение

© О.Г. Вендик, А.Н. Рогачев

С.-Петербургский государственный электротехнический университет

Поступило в Редакцию 18 мая 1999 г.

Обсуждается наличие экспериментального подтверждения существования электрострикционного механизма сверхвысокочастотных потерь в тонкой пленке сегнетоэлектрика. Приведены результаты моделирования тангенса диэлектрических потерь, обусловленного обсуждаемым механизмом для планарного конденсатора с одним зазором, и проведено их сравнение с известными экспериментальными данными для встречно-штыревого конденсатора. Результаты моделирования хорошо согласуются с данными эксперимента. Некоторое несоответствие с экспериментом может быть как следствием неточного определения скорости звука в пленке сегнетоэлектрика, так и результатом различий конденсаторных структур, использованных в моделировании и эксперименте.

Диэлектрические потери на сверхвысоких частотах (СВЧ) в управляемых сегнетоэлектрических (СЭ) устройствах являются основным препятствием на пути к их практическому применению. Источники этих потерь до сих пор однозначно не определены. Согласно последним публикациям, СВЧ потери в СЭ обусловлены следующими механизмами [1,2]:

- 1) фундаментальными потерями, связанными с многофононным рассеянием мягкой СЭ моды;
- 2) преобразованием СВЧ колебаний электрического поля в акустические путем рассеяния на областях с остаточной СЭ поляризацией;
- 3) преобразованием СВЧ колебаний электрического поля в акустические колебания из-за полей, генерируемых заряженными дефектами;
- 4) преобразованием СВЧ энергии в энергию гиперзвука из-за резонансных явлений, возникающих, когда характерные размеры рабочей зоны СЭ устройства становятся кратными половине длины волны гиперзвука.

Все вышеупомянутые механизмы были сформулированы для так называемых виртуальных СЭ, используемых при азотной температуре. Однако они могут быть применены и к обычным СЭ, таким как $(\text{Ba}_x, \text{Sr}_{1-x})\text{TiO}_3$, находящимся в парафазе при комнатной температуре.

Это письмо посвящено доказательству существования экспериментального подтверждения наличия электрострикционного механизма СВЧ потерь, связанного с гиперзвуковым резонансом в СЭ пленке. СВЧ потери этого типа появляются в СЭ пленке при ненулевом смещающем напряжении, которое генерирует наведенный пьезоэффект в СЭ пленке. В случае планарного конденсатора гиперзвуковой резонанс может возникнуть на зазоре между электродами и на толщине СЭ пленки. Это явление было теоретически предсказано в работе [2], там же была приведена и формула, описывающая поведение тангенса диэлектрических потерь, обусловленного гиперзвуковыми резонансными явлениями:

$$\tan \delta_{ac} = \left[V \langle \sin^2(kg/2)/(kg/2) \rangle + 2V_k \langle \sin^4(kh/2)/(kh/2) \rangle \right] \Phi(E). \quad (1)$$

В формуле использованы следующие обозначения:

$$V_{(k)} = (4/s) Q_{(k)}^2 \varepsilon_0^3, \quad (2)$$

$$\Phi(E) = \varepsilon_r^3 (E_{dc}) E_{dc}^2, \quad (3)$$

$$k = \frac{\omega}{v_s}, \quad (4)$$

где s — диагональная компонента тензора упругости, Q и Q_k — диагональная и недиагональная компоненты тензора электрострикции соответственно, g — расстояние между электродами, h — толщина СЭ пленки, ω — частота СВЧ поля и v_s — продольная фазовая скорость звука в СЭ.

В работе [2] было показано, что тангенс диэлектрических потерь, обусловленных электрострикционным механизмом, является функцией частоты и для SrTiO_3 планарного конденсатора в диапазоне частот 1–10 GHz не превышает 0.01.

Вплоть до последнего времени трудность проверки теории, изложенной в [2], заключалась в отсутствии данных о зависимости тангенса диэлектрических потерь в СЭ пленке, полученной в достаточно широком диапазоне частот. Однако недавно в печати появилась первая

публикация [3], дающая такую информацию. В работе [3] представлен результат исследования серии встречно-штыревых конденсаторов на основе тонкой пленки $(\text{Ba}_{0.5}, \text{Sr}_{0.5})\text{TiO}_3$. Измерения были проведены при комнатной температуре в диапазоне частот 50 МГц–20 GHz. Для получения значений диэлектрической постоянной и тангенса диэлектрических потерь использовался метод комформных отображений, который позволил получить достоверные результаты вплоть до частоты 5 GHz. В работе [3] подробно описаны результаты измерений встречно-штыревого BSTO конденсатора со следующими характерными размерами: межэлектродное расстояние $g = 7.5 \mu\text{m}$ и толщина СЭ пленки $h = 0.4 \mu\text{m}$. Частотная зависимость тангенса потерь СЭ пленки в составе этого конденсатора представлена на рис. 1, *a*.

Таким образом, появились экспериментальные данные, позволяющие проверить справедливость предложенной в работе [2] теории.

Для того чтобы провести сравнение экспериментальных результатов [3] с теоретическими оценками, необходимо сначала выделить из экспериментальных данных ту часть СВЧ потерь, за которую ответственен исследуемый механизм. Как уже упоминалось выше, резонанс гиперзвука возникает в СЭ пленке только при ненулевом смещающем напряжении, следовательно, при напряжении смещения, равном нулю (рис. 1, *a*, кривая 1), данный механизм не вносит вклад в суммарные СВЧ потери в пленке. Следует заметить, что в этом случае экспериментальное значение тангенса диэлектрических потерь с высокой точностью может быть аппроксимировано функцией вида $\tan \delta(f) \sim f^{1/3}$ (рис. 1, *a*, кривая 1'). При ненулевом смещающем напряжении потери через гиперзвук проявляют себя в виде резонансных пиков на частотной характеристике тангенса диэлектрических потерь (рис. 1, *a*, кривые 2–5). Второе обстоятельство, помогающее разделить различные механизмы потерь, заключается в том, что для данных размеров конденсаторной структуры вклад исследуемого механизма на частотах выше 2–3 GHz пренебрежимо мал. Таким образом, для того чтобы отделить обсуждаемый механизм потерь от остальных, следует сначала аппроксимировать полевою зависимость тангенса потерь, за который ответственны остальные механизмы потерь следующей зависимостью:

$$\tan \delta(E, f) = A(E) \cdot f^{1/3}, \quad (5)$$

где $A(E)$ является функцией смещающего поля, обеспечивающей согласование экспериментальных и расчетных значений тангенса диэлектри-

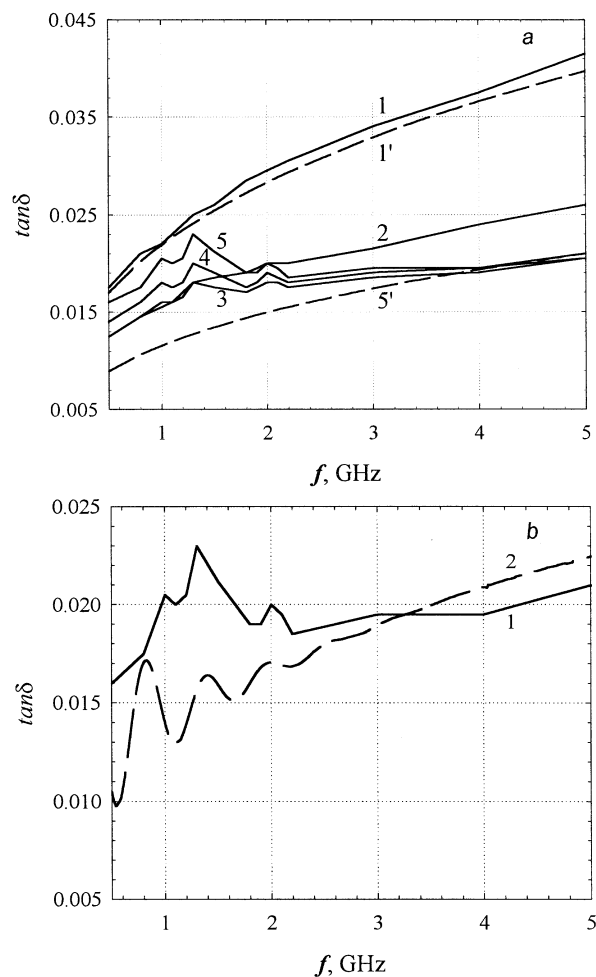


Рис. 1. *a* — частотная зависимость тангенса диэлектрических потерь встречно-платяревого конденсатора на основе тонкой СЭ пленки. Эксперимент [3]: 1 — $U_b = 0$ В, 2 — $U_b = 10$ В, 3 — $U_b = 20$ В, 4 — $U_b = 30$ В, 5 — $U_b = 40$ В. Моделирование: 1' — $f^{1/3}$ для $U_b = 0$ В, 5' — $f^{1/3}$ для $U_b = 40$ В. *b* — частотная зависимость СВЧ потерь, обусловленных генерацией гиперзвука на зазоре конденсатора, и потерь на заряженных дефектах ($U_b = 40$ В): 1 — результаты эксперимента [3], 2 — моделирование.

ческих потерь на высоких частотах. Затем нужно вычесть расчетные зависимости из экспериментальных для каждого значения смещающего напряжения. Остаток следует считать тангенсом потерь, который вызван исследуемым механизмом.

Что касается источника потерь, описываемых выражением (5), то в основном это потери на заряженных дефектах [1,4]. Было показано [4], что потери на заряженных дефектах характеризуются зависимостью $\tan \delta$ от смещающего напряжения, пропорциональной полевой зависимости диэлектрической проницаемости. Эта связь между тангенсом потерь и диэлектрической проницаемостью СЭ пленки видна и из вышеописанного эксперимента [3]. Частотная зависимость СВЧ потерь на заряженных дефектах определяется размерами заряженных областей. Разумный выбор распределения размеров заряженных областей позволяет удовлетворить наблюдаемой в эксперименте зависимости $f^{1/3}$.

Возвращаясь к акустическому механизму потерь, надо отметить, что для данных значений межэлектродного зазора ($7.5 \mu\text{m}$) и толщины СЭ пленки ($0.4 \mu\text{m}$) исследуемый механизм образует максимумы СВЧ потерь на частотах в 1, 1.3 и 2 GHz.

Для того чтобы вычислить тангенс диэлектрических потерь, используя выражение (1), необходимо сначала определить продольную фазовую скорость звука в пленке ($\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$). Использованное в моделировании значение скорости звука было найдено, как интерполяция скоростей в SrTiO_3 и BaTiO_3 [5], и равняется $v_s = 4200 \text{ m/s}$.

На рис. 1, *b* представлена частотная зависимость СВЧ потерь при смещающем напряжении ($U_b = 40 \text{ V}$). Экспериментальные результаты (1 GHz) и результаты моделирования (0.8 GHz) полевой зависимости исследуемого механизма потерь в диапазоне 0–40 V показаны на рис. 2. В расчете использовалось значение относительной диэлектрической проницаемости, полученное в работе [3] (рис. 2, врезка). Несовпадение положения максимумов СВЧ потерь для результатов моделирования и эксперимента может быть объяснено неточностью в определении скорости звука в СЭ пленке.

В заключение надо отметить, что результаты моделирования хорошо совпадают с экспериментальными данными, и это можно рассматривать как экспериментальное доказательство существования механизма потерь через генерацию гиперзвука на зазоре планарного конденсатора. Некоторое несовпадение с экспериментом может следовать из различий конструкций конденсаторных структур, использованных в расчете и в

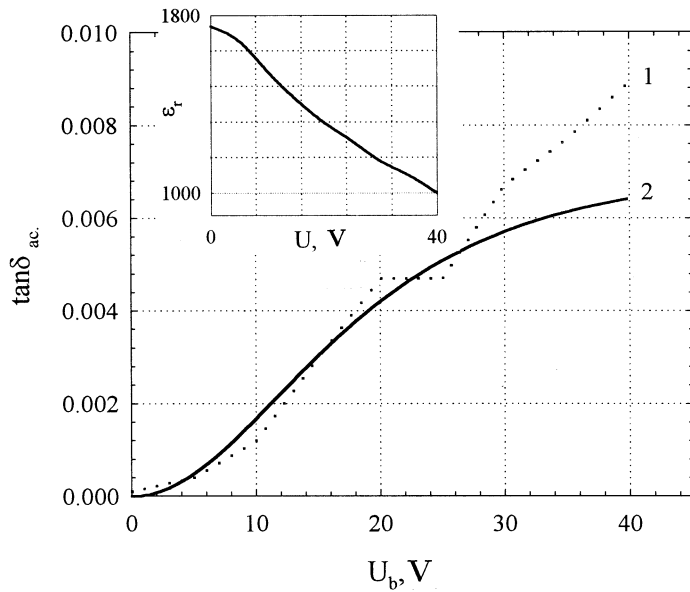


Рис. 2. СВЧ потери, обусловленные генерацией гиперзвука на зазоре конденсатора, как функция смещающего напряжения: 1 — результаты эксперимента [3] ($f = 1$ GHz), 2 — моделирование ($f = 0.8$ GHz).

эксперименте [3]. Встречно-штыревой конденсатор, использованный в эксперименте [3], может иметь некоторые особенности частотной зависимости СВЧ потерь благодаря своей периодической структуре. Таким образом, теория, разработанная в [2], должна быть доработана с учетом конструкции встречно-штыревого конденсатора с несколькими зазорами. Результатом может стать акустическая модель, напоминающая модель Кронига–Пени для энергетических зон в твердом теле. Это позволит дать рекомендации по изменению размеров встречно-штыревого конденсатора и, как следствие, уменьшению СВЧ потерь в рабочем диапазоне частот устройства.

Авторы благодарны Л.Т. Тер-Мартиросяну за обсуждение настоящей работы и Д. Понду за предоставление экспериментальных данных о СВЧ потерях в BSTO планарном конденсаторе до публикации работы [3].

Список литературы

- [1] *Vendik O.G., Ter-Martirosyan L.T., Zubko S.P.* // J. of Appl. Phys. 1998. V. 84. N 29. P. 993–998.
- [2] *Вендик О.Г., Тер-Мартirosян Л.Т.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 8.
- [3] *Pond J.M., Kirchoffer S.W., Chang W., Horwitz J.S., Chrissey D.B.* // Integrated Ferroelectrics. V. 22. P. 317–328.
- [4] *Вендик О.Г., Платонова Л.М.* // ФГТ. 1971. Т. 13. № 6. С. 1617–1625.
- [5] *Смоленский Г.А.* Физика сегнетоэлектрических явлений. Л.: Наука, 1985. 396 с.