

Модель зависимости фактора диэлектрических потерь сегнетоэлектрика от амплитуды СВЧ-сигнала

© С.П. Зубко, А.Н. Васильев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ),
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: van1708@mail.ru

На основе модели зависимости сегнетоэлектрической поляризации от амплитуды приложенного поля исследованы нелинейные явления в сегнетоэлектриках. Учет влияния постоянного встроенного поля дефектов позволил найти зависимость комплексной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряженности постоянного электрического поля. На основании теоремы Пойнтинга для гармонических СВЧ-колебаний получены зависимости комплексной диэлектрической проницаемости и фактора диэлектрических потерь от амплитуды СВЧ-колебаний.

Работа является частью международного проекта „NANOSTAR“ 6-й Рамочной программы Еврокомиссии.

PACS: 77.55.+f, 77.22.Gm

Одной из важных задач, связанных с широким применением сегнетоэлектрических элементов в СВЧ-диапазоне, является определение диэлектрических потерь, возникающих в сегнетоэлектрической пленке при приложении СВЧ-поля большой амплитуды. В настоящее время не существует теоретической модели зависимости тангенса угла диэлектрических потерь сегнетоэлектрика от амплитуды переменного поля СВЧ.

Диэлектрическая проницаемость материала в общем случае является комплексной величиной, которая, в частности, зависит от напряженности постоянного смещающего электрического поля E_0

$$\varepsilon(E_0) = \varepsilon'(E_0) + i\varepsilon''(E_0). \quad (1)$$

Отношение мнимой составляющей комплексной проницаемости к ее вещественной части определяет фактор диэлектрических потерь в материале

$$\operatorname{tg} \delta(E_0) = \frac{\varepsilon''(E_0)}{\varepsilon'(E_0)}. \quad (2)$$

Существуют достаточно надежные теоретические модели зависимости комплексной проницаемости от напряженности постоянного смещающего поля [1,2], подтвержденные результатами экспериментальных измерений зависимостей $\varepsilon'(E_0)$ и $\varepsilon''(E_0)$ в слабом СВЧ-поле [3].

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы с помощью известных теоретических и экспериментальных зависимостей $\varepsilon'(E_0)$ и $\varepsilon''(E_0)$ найти зависимости составляющих комплексной проницаемости от амплитуды СВЧ-поля E_m . Это позволит определить фактор потерь как функцию амплитуды сильного СВЧ-поля и напряженности постоянного поля смещения

$$\operatorname{tg} \delta(E_0, E_m) = \frac{\varepsilon''(E_0, E_m)}{\varepsilon'(E_0, E_m)}. \quad (3)$$

В соответствии с термодинамической теорией поляризации диэлектриков [4] диэлектрическая проницаемость определяется как производная от поляризации по напряженности электрического поля

$$\varepsilon'(E_0) + i\varepsilon''(E_0) = \left. \frac{\partial}{\partial E} (P'(E) + iP''(E)) \right|_{E=E_0}, \quad (4)$$

где $P'(E)$ и $P''(E)$ — вещественная и мнимая составляющие поляризации материала. В формуле (4) мы опустили множитель ε_0 (проницаемость свободного пространства).

При определении проницаемости через производную от поляризации как в теории, так и в эксперименте переменные во времени поля имеют малые амплитуды. Поэтому при решении поставленной задачи исследовалась комплексная поляризация материала, а не ее производная

$$P'(E) + iP''(E) = \int_0^E (\varepsilon'(E) + i\varepsilon''(E)) dE. \quad (5)$$

Положим, что электрическое поле в материале складывается из постоянного поля смещения и переменного поля частоты ω

$$E(t) = E_0 + E_m \cos \omega t. \quad (6)$$

Используем теорему Пойнтинга для определения энергетических соотношений в сегнетоэлектрическом материале, находящемся в сильном СВЧ-поле. Объемная плотность реактивной мощности, которая запасается в рассматриваемом материале, усредненная за период СВЧ-колебаний, может быть записана через вектор

Пойнтинга как

$$\Pi' = \frac{1}{2T} \int_0^T i\omega P'(E(t))E(t)dt. \quad (7)$$

Объемная плотность мощности, которая рассеивается в рассматриваемом материале, усредненная за период СВЧ-колебаний, имеет вид

$$\Pi'' = \frac{1}{2T} \int_0^T i\omega P''(E(t))E(t)dt. \quad (8)$$

В качестве периода, за который производится усреднение, можно принять период СВЧ-поля, приложенного к образцу,

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (9)$$

С другой стороны, по аналогии с электростатикой, можно ввести эффективную диэлектрическую проницаемость сегнетоэлектрика как коэффициент пропорциональности между плотностью энергии и квадратом амплитуды переменного СВЧ-поля. В таком случае объемная плотность запасаемой за период СВЧ-колебаний мощности имеет вид

$$\Pi'(E_m) = \frac{1}{T} \int_0^T i\omega \frac{\varepsilon'_{\text{eff}}(E_m)E_m \cos \omega t}{2} dt. \quad (10)$$

Объемная плотность рассеиваемой мощности

$$\Pi''(E_m) = \frac{1}{T} \int_0^T i\omega \frac{\varepsilon''_{\text{eff}}(E_m)E_m \cos \omega t}{2} dt. \quad (11)$$

Приравняв левые части соотношений (7), (8) и (10), (11) соответственно, найдем вещественную и мнимую части эффективной диэлектрической проницаемости

$$\varepsilon'_{\text{eff}}(E_m) = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P'(E_m \cos \omega t) \cos \omega t}{1/2E_m} dt, \quad (12)$$

$$\varepsilon''_{\text{eff}}(E_m) = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P''(E_m \cos \omega t) \cos \omega t}{1/2E_m} dt. \quad (13)$$

Таким образом получили выражения зависимости составляющих эффективной комплексной проницаемости от амплитуды СВЧ-поля. Вещественную часть эффективной проницаемости можно аппроксимировать следующим простым выражением:

$$\varepsilon_{\text{eff}}(E_m) = \frac{\varepsilon(0)}{1 + \left(\frac{E_m}{E_{00}r}\right)^2}, \quad (14)$$

где E_{00} — нормирующая напряженность поля, равная 150 kV/cm, r — подгоночный коэффициент.

На рис. 1 показаны зависимость вещественной части эффективной проницаемости от амплитуды СВЧ-поля, рассчитанная по модели (12) при температуре $T = 273$ К и значении параметра кристаллографического качества материала $\xi_s = 1$, и ее аппроксимация (14) при разных значениях подгоночного коэффициента r . Как видно из рис. 1, погрешность аппроксимации мала только при определенных значениях амплитуды СВЧ-поля. Из сравнения кривых для разных величин подгоночного параметра можно заключить, что при фиксированном значении нормирующего поля E_{00} аппроксимация в форме (14) применима для всего диапазона амплитуд в том случае, если для разных диапазонов амплитуды поля в этой аппроксимации будут использованы разные значения подгоночного параметра: при малых значениях амплитуды СВЧ-поля (0–100 kV/cm) $r = 2$; при 100–250 kV/cm $r = 2.5$, а при больших полях > 250 kV/cm $r = 2.8$.

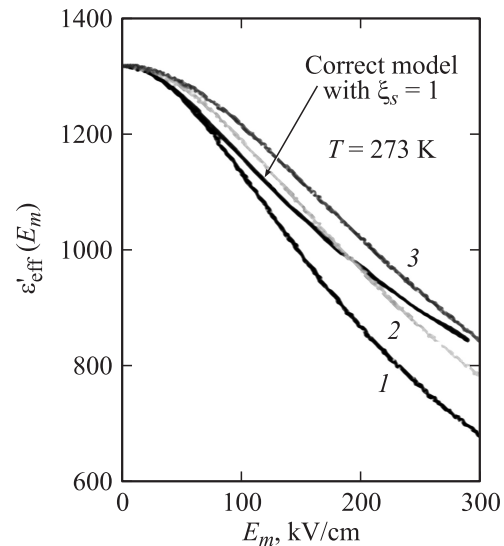


Рис. 1. Вещественная часть эффективной диэлектрической проницаемости как функция амплитуды СВЧ-поля. Кривые 1–3 — аппроксимация при $r = 2.8$ (1), 2.5 (2), 2.0 (3).

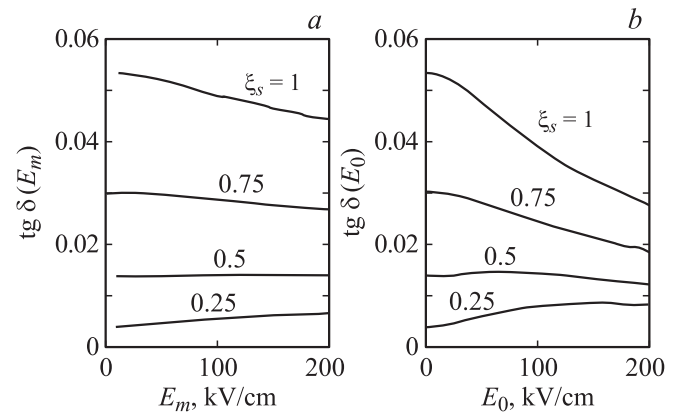


Рис. 2. Зависимость $\text{tg } \delta$ от амплитуды СВЧ-поля, полученная из (12), (13) (a), и зависимость $\text{tg } \delta$ от постоянного поля, определенная по модели [1,2] (b), при различных значениях параметра кристаллографического качества материала ξ_s .

На рис. 2 приведены зависимости фактора диэлектрических потерь от амплитуды СВЧ-поля, полученные путем подстановки соотношений (12) и (13) в уравнение (3). Качественно характер изменения фактора потерь под воздействием СВЧ-поля совпадает с наблюдаемым при воздействии постоянного поля смещения, однако изменение фактора потерь в первом случае существенно слабее, чем во втором.

Описанную выше процедуру усреднения можно считать корректной, если время основных процессов релаксации фононной подсистемы в сегнетоэлектрической пленке τ достаточно мало, т.е. $\omega\tau \ll 1$, где ω — введенная выше частота СВЧ-поля. Теоретические оценки [1,3] показывают, что для наиболее „тонкого“ механизма потерь в сегнетоэлектрике (квазиДебаевский механизм) $\tau \leq 3 \cdot 10^{-12}$ с. Оценка времени релаксации фононной подсистемы для других механизмов потерь требует специального исследования. Используя общие соображения о природе СВЧ-потерь в сегнетоэлектрике, можно считать, что предложенная процедура усреднения фактора потерь в сильном СВЧ-поле приемлема до рабочих частот 30–40 GHz. При этом также следует ограничить максимальную напряженность СВЧ-поля неравенством

$$E_m \leq E_{00}. \quad (15)$$

Авторы выражают признательность О.Г. Вендику, А.Н. Делениву и А.К. Таганцеву за предложение темы настоящей работы и внимание к ней.

Список литературы

- [1] A.K. Tagantsev. Appl. Phys. Lett. **76**, 9, 1182 (2000).
- [2] O.G. Vendik, S.P. Zubko, M.A. Nikol'ski. J. Appl. Phys. **92**, 12, 7448 (2002).
- [3] A.K. Tagantsev, V.O. Sherman, K.F. Astafiev, J. Venkatesh, N. Setter. J. Electroceram. **11**, 5 (2003).
- [4] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. Наука, М. (1982). 620 с.