

Исследование диэлектрических потерь в конденсаторных структурах на основе наноструктурированных сегнетоэлектрических пленок

П.А. Петрова, В.С. Орлов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в данной работе исследовались механизмы диэлектрических потерь в сегнетоэлектрических пленках, входящих в состав конденсаторных структур, в СВЧ-диапазоне. Проведена количественная оценка электрострикционного механизма потерь в наноструктурированных пленках титаната стронция и титаната бария. Определены условия, при которых возможно подавление данного механизма потерь. Проведено численное моделирование конденсаторных структур на основе композитной сегнетоэлектрической пленки.

Ключевые слова: сегнетоэлектрик, композит, диэлектрические потери

1. Введение

Сегнетоэлектрики остаются одними из наиболее перспективных материалов для реализации электронно управляемых устройств и систем электроники и нанoeлектроники в широком частотном диапазоне. Одной из важнейших проблем, с которой сталкиваются разработчики и потребители СВЧ-устройств на основе сегнетоэлектриков, является высокий уровень диэлектрических потерь на СВЧ. Основными механизмами СВЧ-потерь в сегнетоэлектриках типа смещения являются мультифононное рассеяние мягкой сегнетоэлектрической моды, квазидебавевский механизм потерь, рассеяние сегнетоэлектрической моды на заряженных дефектах [1]. В конденсаторных структурах к фундаментальным механизмам потерь добавляется электрострикционный механизм [2, 3], результаты оценки которого приведены в данной работе. Как показали проведенные исследования и численное моделирование, использование композитных материалов в конденсаторных структурах позволяет компенсировать действие данного механизма потерь.

2. Результаты и обсуждение

Электрострикционные потери обусловлены преобразованием СВЧ-энергии в энергию гиперзвука вследствие явления резонанса, возникающего, когда размеры рабочей области конденсатора (ширина зазора, толщина сегнетоэлектрической пленки) кратны половине длины волны гиперзвука. Действие данного механизма потерь приводит к появлению дополнительных резонансных пиков на частотных зависимостях фактора диэлектрических потерь [3].

Тангенс угла потерь, обусловленных резонансом гиперзвука, описывается соотношением [2]:

$$\operatorname{tg} \delta = \left[V \frac{\sin^2(kg/2)}{kg/2} + 2V_1 k \frac{\sin^4(kh/2)}{kh/2} \right] \Phi, \quad (1)$$

$$V = 4Q^2 \varepsilon_0^3 / s; \quad V_1 = 4Q_k^2 \varepsilon_0^3 / s; \quad k = \omega / v_s; \quad \Phi = \varepsilon_f^2 E^2,$$

где g и h – ширина зазора планарного конденсатора и толщина сегнетоэлектрической пленки соответственно; Q и Q_k – диагональная и недиагональная компоненты тензора электрострикции соответственно; v_s – продольная составляющая фазовой скорости акустической волны в сегнетоэлектрике; s – диагональная компонента тензора упругости; k – волновое число; ε_f – диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрической пленки.

Использование в конденсаторе вместо однородной пленки сегнетоэлектрика композита на его основе позволяет подавить резонансные явления гиперзвука [4]. Если размеры сегнетоэлектрических включений таковы, что их собственная частота акустических колебаний лежит выше рабочего СВЧ-диапазона, то действие электрострикционного механизма потерь будет подавлено. В данной работе исследовался композит, представляющий собой диэлектрическую матрицу с сегнетоэлектрическими включениями дисковой формы.

На рисунке 1 представлены частотные зависимости тангенса угла потерь для разных размеров зерна композита.

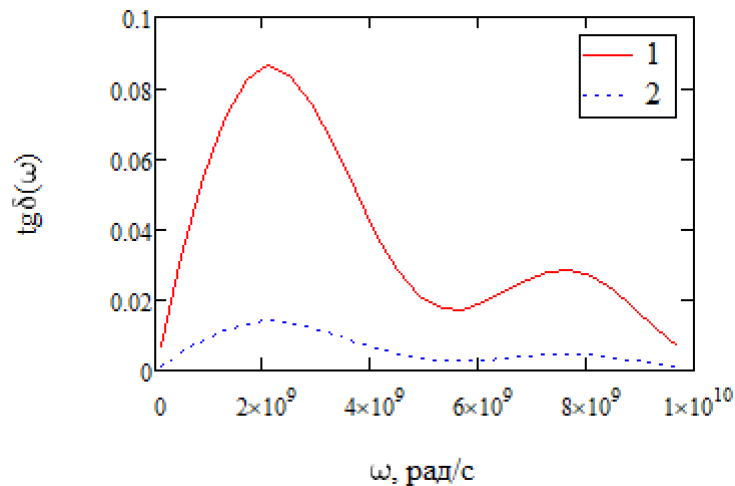


Рисунок 1. Частотная зависимость электрострикционных потерь в композитной структуре титаната бария в зависимости от частоты при $h = 2,5$ мкм, $a_{11} = 5$ мкм для: 1 – размера зерна, равного 0,5 мкм; 2 – размера зерна, равного 1 мкм.

Резонансные пики на рисунке 1 соответствуют резонансным частотам, на которых наблюдается резкое увеличение потерь, обусловленных рассматриваемым механизмом. Изменение размера сегнетоэлектрического включения позволяет резко снизить вклад электрострикционного механизма потерь в общие потери образца.

Для построения модели планарного конденсатора с дисковыми включениями в процессе численного моделирования использовалось параметрическое задание геометрических размеров структуры. При построении композитного слоя использовалась функции транспонирования модели единичного зерна в диэлектрической матрице. Проведенный сравнительный анализ результатов численного моделирования конденсатора с однородной сегнетоэлектрической пленкой и с композитной показал незначительное уменьшение управляемости конденсатора с композитной пленкой на фоне снижения потерь.

3. Заключение

При моделировании и применении в СВЧ-системах сегнетоэлектрических конденсаторных структур необходимо учитывать электрострикционный механизм потерь. Использование композитных пленок с сегнетоэлектрическими включениями

определенного размера позволяет резко снизить вклад данного механизма потерь в суммарные потери устройства в СВЧ-диапазоне.

Список литературы

1. Vendik O.G., Zubko S.P. Ferroelectrics as constituents of tunable metamaterials, in “Theory and Phenomena of Metamaterials (Handbook of Artificial Materials)”, Vol. I., edited by F. Capolino, Oxford, UK: Taylor and Francis Group, LLC. CRC Press, 2009. ISBN-10: 1-4200-5425-2.
2. О.Г. Вендик, Л.Т. Тер-Мартirosян. Электрострикционный механизм СВЧ потерь в планарном конденсаторе на основе пленки титаната стронция // ЖТФ. – 1999. – №. 8.
3. О.Г. Вендик, А.Н. Рогачев. Электрострикционный механизм сверхвысокочастотных потерь в пленке сегнетоэлектрика и его экспериментальное подтверждение // Письма в ЖТФ. – 1999. – №. 17.
4. Н.Ю. Медведева. Моделирование диэлектрических свойств наноструктурированных сегнетоэлектрических композитов в СВЧ диапазоне: дис. канд. физико-математических наук: 01.04.03 / Н.Ю. Медведева - СПб., 2009. 123 с.