

Исследование конденсаторных структур на основе наноструктурированных сегнетоэлектрических пленок

П. А. Петрова, В. С. Орлов, С. П. Зубко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. Основной целью работы является исследование различных механизмов потерь в сегнетоэлектрических структурах на высоких частотах и поиск возможных путей их уменьшения при сохранении управляемости элементов на их основе. Объектом исследования является классический планарный конденсатор с тонкой пленкой титаната бария и с композитом на основе титаната бария. В работе представлены результаты моделирования пленочной структуры, а также конденсаторной структуры на основе композита с различными типами включений. Приведены рекомендации по снижению диэлектрических потерь в сегнетоэлектрическом конденсаторе.

Ключевые слова: сегнетоэлектрик, композит, диэлектрические потери

I. ВВЕДЕНИЕ

Сегнетоэлектрики за счет сильно выраженной нелинейности диэлектрической проницаемости уже давно хорошо зарекомендовали себя в качестве конкурентоспособной основы для создания устройств с электрическим управлением. Однако, имея неоспоримые преимущества по сравнению с другими материалами, используемыми для создания таких устройств, они также имеют ряд ограничений для применения в диапазоне СВЧ, связанные в первую очередь с высоким уровнем диэлектрических потерь. По этой причине поиск путей компенсации механизмов, отвечающих за уровень тангенса угла диэлектрических потерь, является немало важным для их дальнейшего развития в этой отрасли. Помимо таких механизмов потерь как мультифонное рассеяние мягкой моды, рассеяние сегнетоэлектрической моды на заряженных дефектах и квазиДебаевского механизма [1], для конденсаторной структуры на основе сегнетоэлектрического материала необходимо также рассматривать вклад электрострикционного механизма [2, 3]. В результате проведенного исследования были выработаны рекомендации, позволяющие компенсировать электрострикционную составляющую. Также было показано, что большой интерес представляет использование конденсатора с композитной пленкой на сегнетоэлектрических включениях, что позволяет не только снизить диэлектрические потери в СВЧ диапазоне, но и сохранить управляемость данной структуры.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Потери, связанные с электрострикцией в СВЧ-диапазоне, обусловлены резонансом гиперзвуковой волны в случае кратности половине длины этой волны рабочей области прибора – в данном случае ширина зазора и толщины пленки. Для композитных структур играет роль также размер сегнетоэлектрических включений.

Соотношение [2] описывает вклад электрострикционного механизма:

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

$$V = 4Q^2 \epsilon_0^3 / s; \quad V_1 = 4Q_k^2 \epsilon_0^3 / s; \quad k = \omega / v_s; \quad \Phi = \epsilon_f^2 E^2,$$

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.

Соотношение (1) демонстрирует возможность сдвига резонансных пиков по частоте за счет подбора соответствующей конфигурации структуры. Также в работе [4] говорится о возможности компенсации данного явления за счет использования композитной структуры вместо однородной сегнетоэлектрической пленки. Для такого случая приведенное выше соотношение можно переписать, заменив размеры характерных областей на соответствующие размеры включений.

На рис. 1 приведена исследуемая структура, а на рис. 2 – зависимость тангенса угла диэлектрических потерь, связанных с электрострикцией для планарного конденсатора на основе композитной пленки титаната бария в матрице алюмината лантана от частоты для нескольких размеров включений.

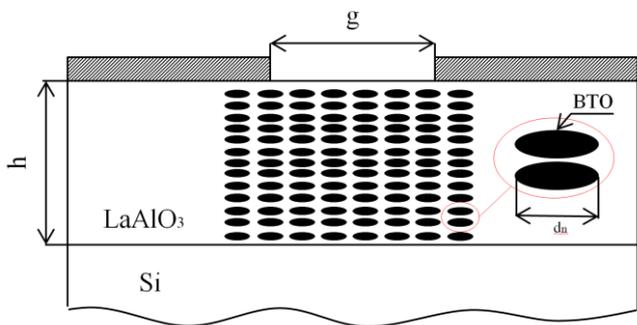


Рис. 1. Структура планарного конденсатора с композитной пленкой на основе дисковых включений титаната бария

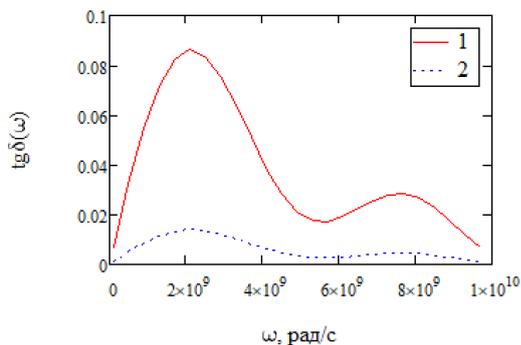


Рис. 2. Зависимость электрострикционных потерь композитной структуры на основе титаната бария от частоты при $h = 2,5$ мкм, $g = 5$ мкм для: 1 – размера зерна, равного 0,5 мкм; 2 – размера зерна, равного 1 мкм

Рис. 2 демонстрирует снижение вклада электрострикционного механизма за счет увеличения размера зерна.

Было проведено электродинамическое моделирование планарного конденсатора на основе композитной пленки, представляющей собой матрицу алюмината лантана с дисковыми включениями титаната бария. Размер дисковых включений подбирался таким образом, чтобы подавить электрострикционный механизм потерь. Производилось параметрическое задание геометрических размеров компонентов конденсатора. Было проанализировано влияние различных факторов на S -параметры конденсатора. При построении периодической структуры, состоящей из дисковых наноразмерных зерен, выполнялось построение одного зерна, которое далее транспонировалось с копированием и объединением в один объект. Данная модель приведена на рис. 3.

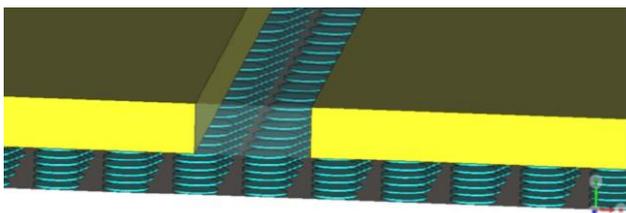


Рис. 3. Модель планарного конденсатора, построенная в программной среде CST studio suite

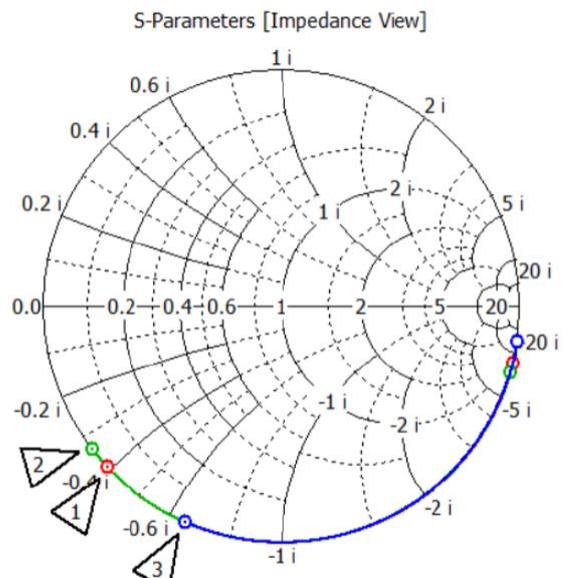


Рис. 4. Диаграмма Вольперта-Смита для исследуемой структуры. Синим цветом обозначено полное сопротивление структуры при максимальном смещении, зеленым – при нулевом, красным – при значении напряженности внешнего электрического поля порядка 15 В/мкм

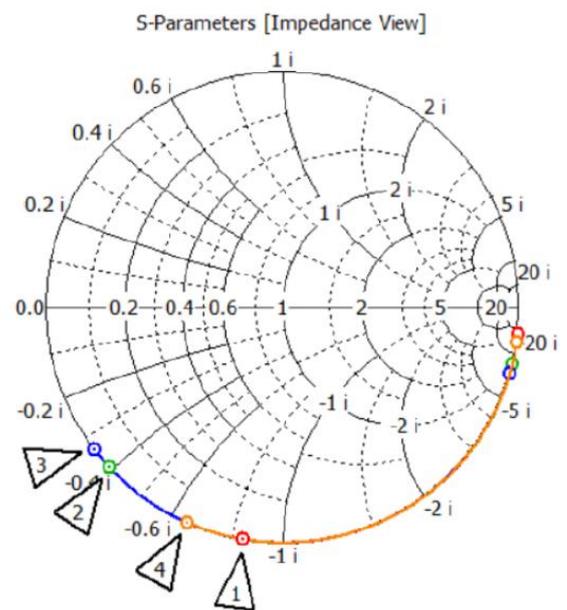


Рис. 5. Диаграмма Вольперта-Смита для исследуемой структуры при максимальном смещении. Красным цветом обозначено полное сопротивление структуры при смещении порядка 300 В/мкм, оранжевым – 200 В/мкм, зеленым – 15 В/мкм, синим – 0 В/мкм

Значения емкости исследуемой конденсаторной структуры были получены с помощью диаграммы Вольперта-Смита (рис. 4–5).

Результаты моделирования показали, что при нулевом постоянном смещении емкость конденсатора составила 1.89 пФ, а при максимальном смещении – 0.98 пФ. Соответственно, в диапазоне внешнего управляющего электрического поля от 0 В/мкм до 200 В/мкм, управляемость структуры составила 1.9. Данный

результат является удовлетворительным для использования предложенной конденсаторной структуры в различного рода, управляемых СВЧ-устройствах.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с помощью предварительного моделирования параметров конденсатора возможна компенсация вклада электрострикционного механизма на рабочих частотах. Использование композитных пленок на основе сегнетоэлектрических включений вместо однородных сегнетоэлектрических пленок для создания управляемых устройств позволяет значительно снизить СВЧ-потери в структуре при сохранении высокой управляемости.

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] Вендик О.Г., Тер-Мартirosян Л.Т. Электрострикционный механизм СВЧ потерь в планарном конденсаторе на основе пленки титаната стронция // ЖТФ. 1999. № 8.
- [3] Вендик О.Г., Рогачев А.Н. Электрострикционный механизм сверхвысокочастотных потерь в пленке сегнетоэлектрика и его экспериментальное подтверждение // Письма в ЖТФ. 1999. № 17.
- [4] Медведева Н.Ю. Моделирование диэлектрических свойств наноструктурированных сегнетоэлектрических композитов в СВЧ диапазоне: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03 / С.-Петербург. гос. электротехн. ун-т «ЛЭТИ». СПб., 2009. 123 с.