

Исследование планарных сегнетоэлектрических конденсаторных структур

К. Е. Карымсаков

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

kamakar2003@mail.ru

К. А. Дмитриев

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

ne4ehbka88@gmail.com

С. П. Зубко

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

spzubko@gmail.com

Аннотация. В данной работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований планарных сегнетоэлектрических конденсаторов. Экспериментальные исследования проведены путем измерения вольт-фарядных характеристик (ВФХ), которые являются основным методом для оценки перестройки емкости под действием электрического поля.

Ключевые слова: сегнетоэлектрик; планарный конденсатор; вольт-фарядная характеристика

I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Современное развитие радиоэлектроники, систем связи и СВЧ-техники требует создания миниатюрных элементов с электрической перестройкой параметров. Ключевую роль в таких устройствах играют конденсаторы с перестраиваемой емкостью. Среди существующих типов таких компонентов особое место занимают сегнетоэлектрические конденсаторы, работа которых основана на нелинейной зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрических материалов от напряженности внешнего электрического поля [1]. Это свойство позволяет изменять емкость конденсатора путем подачи управляющего напряжения, что открывает широкие возможности для создания перестраиваемых фильтров, фазовращателей, и других устройств.

A. Особенности планарной геометрии

Планарные конденсаторы представляют собой структуры, в которых оба электрода расположены на одной стороне диэлектрической подложки или пленки. В отличие от традиционных плоскопараллельных (сэндвич) структур, в планарной геометрии электрическое поле распределено неоднородно и локализовано преимущественно в приповерхностной области между электродами. Это создает специфические условия для управления емкостью и накладывает особые требования к материалам и топологии [2].

На рис. 1 представлена структура такого конденсатора.

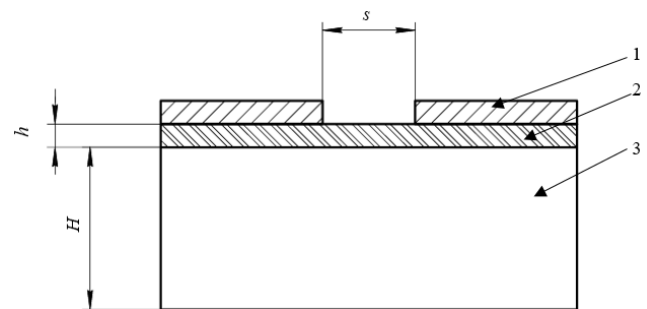


Рис. 1. Структура планарного конденсатора

Планарный конденсатор состоит из электродов 1, образующих зазор шириной s , сегнетоэлектрической пленки 2 толщиной h и диэлектрической проницаемостью, равной ε_2 , диэлектрической подложки 3 толщиной H и диэлектрической проницаемостью, равной ε_3 . Подложка является базовым элементом, на котором формируется вся структура. Сегнетоэлектрический слой является функциональным элементом, обеспечивающий перестройку емкости. Толщина сегнетоэлектрического слоя варьируется от десятков нанометров до нескольких микрометров в зависимости от требуемого рабочего напряжения и емкости. Материалы электродов выбираются из условия хорошей адгезии к сегнетоэлектрику, низкого удельного сопротивления. Обычно применяются медь, золото, алюминий или многослойные металлизации.

B. Методы теоретического расчета

Для расчетов емкости планарных конденсаторов применяется метод конформных изображений. Метод конформных отображений является классическим аналитическим методом решения для планарных геометрий. Суть метода заключается в преобразовании исходной сложной области в прямоугольную область на основании преобразования Кристоффеля-Шварца. Для расчета емкости планарного конденсатора воспользуемся методом частичных емкостей, то есть представим такой конденсатор как параллельное соединение трех частичных емкостей:

$$C = C_1 + C_2 + C_3,$$

где C_1 , C_2 , C_3 – емкость зазора через воздух, емкость сегнетоэлектрического слоя, емкость подложки соответственно. Расчет этих емкостей подробно описан

в [3]. Суть данного метода заключается в следующих выражениях:

$$\begin{aligned}\varepsilon_2^* &= \varepsilon_2 - \varepsilon_3; \\ \varepsilon_3^* &= \varepsilon_3 - 1.\end{aligned}$$

То есть каждый слой экранирован от других слоев «магнитной стенкой». Данная «стенка» не пропускает нормальные составляющие векторов напряженности электрического поля. При этом взаимное влияние слоев учитывается в изменении диэлектрических проницаемостей каждого из слоев.

Для практических расчетов удобнее пользоваться формулами, полученными разложением в ряд по малому параметру:

$$\begin{aligned}C_1 &= w\varepsilon_0 \frac{2}{\pi} \ln\left(4 \frac{l}{s}\right), \\ C_2 &= \frac{w\varepsilon_0 (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)}{\frac{s}{h} + \frac{4}{\pi} \ln 2}, \\ C_3 &= w\varepsilon_0 (\varepsilon_3 - 1) \frac{1}{\pi} \ln\left(16 \frac{H-h}{\pi s}\right),\end{aligned}$$

где w – ширина планарного конденсатора; l – длина планарного конденсатора; ε_0 – диэлектрическая постоянная.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

A. Исследуемые образцы

Исследуемыми образцами являются планарные конденсаторы на подложке из поликора, имеющего диэлектрическую проницаемость равную 9.8. Сегнетоэлектрической пленкой является пленка (BaSr)TiO₃. На рис. 2 представлены вольт-фарадные характеристики (ВФХ) двух разных конденсаторов, что открывает широкие возможности для создания перестраиваемых фильтров, фазовращателей, и других устройств.

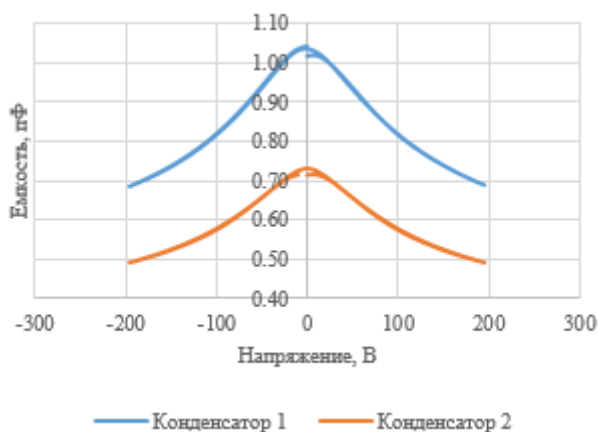


Рис. 2. Экспериментальные ВФХ конденсаторов

B. Результаты эксперимента

Одним из важных параметров сегнетоэлектрических конденсаторов является его перестройка емкости n (управляемость), которая вычисляется по следующей формуле:

$$n = \frac{C(U_0)}{C(U_{\max})},$$

где $C(U_0)$ – емкость сегнетоэлектрического планарного конденсатора при отсутствии внешнего электрического поля (напряжения); $C(U_{\max})$ – емкость конденсатора при максимальном напряжении, которое может выдержать конденсатор. Для данной структуры максимальное напряжение определяется напряжением пробоя по воздуху. Для повышения электрической прочности можно заполнить зазор диэлектрическим материалом либо создать дополнительные электроды в сегнетоэлектрической пленке, что приведет к перераспределению поля и его сосредоточению в пленке, что повысит прочность.

Для построения теоретической вольт-фарадной характеристики можно воспользоваться следующей аппроксимацией:

$$C = \frac{C_0}{1 + (n-1) \left(\frac{U}{U_0}\right)^\gamma},$$

где C_0 – начальная емкость при отсутствии напряжения, U_0 – напряжение, при котором достигается управляемость, равной n , γ – подгоночный параметр, который определяет меру кривизны зависимости, обычно лежит в пределах от 1 до 2. На рис. 3 и 4 представлены теоретические и экспериментальные ВФХ конденсатора 1 и 2 соответственно.

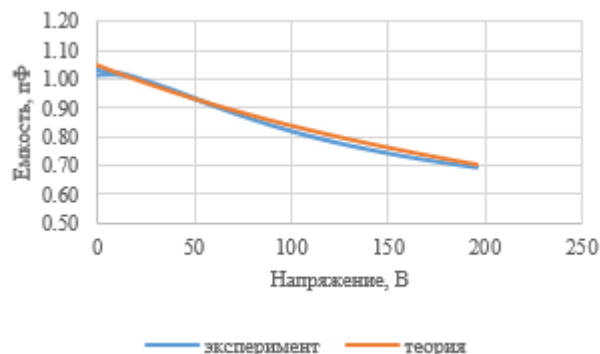


Рис. 3. Теоретическая и экспериментальная ВФХ конденсатора 1

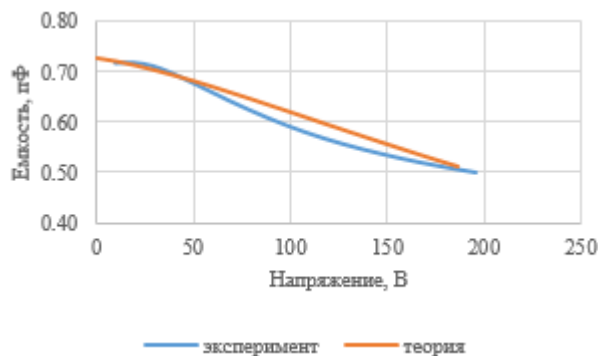


Рис. 4. Теоретическая и экспериментальная ВФХ конденсатора 2

По результатам экспериментальных измерений можно видеть, что конденсатор 1 показал перестройку, равную

1.5, конденсатор 2 показал перестройку, равную 1.44. По рис. 3 и 4 можно наблюдать, что модель соответствует эксперименту.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований были получены вольт-фарадные характеристики двух конденсаторов. Исследованы несколько сегнетоэлектрических планарных конденсаторов и оценена их перестройка ёмкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Вендик О.Г. Сегнетоэлектрики находят свою «нишу» среди управляющих устройств СВЧ //Физика твердого тела. 2009. Т. 51. №. 7. С. 1441-1446.
- [2] Гагарин А.Г., Зубко С.П., Медведева Н.Ю. Эффективная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрической пленки в составе плоскопараллельных и планарных конденсаторов //Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2016. №. 1. С. 51-54.
- [3] Вендик О.Г., Зубко С.П., Никольский М.А. Моделирование и расчет емкости планарного конденсатора, содержащего тонкий слой сегнетоэлектрика //Журнал технической физики. 1999. Т. 69. №. 4. С. 1-7.