

На правах рукописи

Васильев Алексей Николаевич

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОНДЕНСАТОРЕ ПОД
ВОЗДЕЙСТВИЕМ СВЧ МОЩНОСТИ

01.04.03 - Радиофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт – Петербург – 2012

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) на кафедре ФЭТ

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор, Вендик Орест Генрихович

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор, Афанасьев Валентин Петрович, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, заведующий кафедрой квантовой электроники и оптико-электронных приборов

Кандидат физико-математических наук, Колмаков Игорь Анатольевич, ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем», ведущий научный сотрудник

Ведущая организация – ОАО «Гириконд»

Защита состоится 30 мая 2012 года в 17⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.238.08 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан __ апреля 2012 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Смирнов Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современная радиолокация формирует особый подход к экономике производства и эксплуатации СВЧ устройств. Актуальной задачей электроники является создание управляемых элементов для фазированных антенных решеток с низкой себестоимостью, высоким быстродействием, возможностью работы в широком диапазоне значений уровня мощности при малом потреблении мощности в цепях управления.

Всеми перечисленными характеристиками обладают только СВЧ устройства на основе сегнетоэлектрических материалов.

Под воздействием СВЧ сигнала высокой мощности в сегнетоэлектрическом конденсаторе возникают следующие эффекты:

1. Модуляция емкости СЭ конденсатора амплитудой СВЧ сигнала.
2. Изменение тангенса угла диэлектрических потерь в СЭ материале под воздействием СВЧ мощности.
3. Искажение сигнала вследствие генерации высших гармоник тока.

Первые эксперименты по исследованию сегнетоэлектриков при высоком уровне мощности показали, что тангенс угла диэлектрических потерь растет с увеличением напряженности СВЧ поля. Впоследствии при исследовании конденсаторов на основе СЭ пленок разной толщины было обнаружено, что механизм, обеспечивающий рост потерь при увеличении амплитуды СВЧ поля, является чувствительным к размерам образца. Помимо этого проводились исследования генерации высших гармоник и паразитных сигналов комбинационных частот в устройствах на основе нелинейного сегнетоэлектрического конденсатора. Результаты эксперимента показали, что уровень интермодуляционных искажений в сегнетоэлектрическом конденсаторе меньше, чем у полупроводниковых аналогов.

На сегодняшний день не существует надежных и простых моделей, описывающих поведение как комплексной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического материала при высокой СВЧ мощности, так и других нелинейных эффектов в конденсаторе на основе сегнетоэлектрика, для систем автоматизированного проектирования устройств.

Цель диссертационной работы – Исследование нелинейных эффектов, возникающих в сегнетоэлектрическом конденсаторе под воздействием СВЧ мощности.

Для достижения указанной цели решались следующие научные задачи:

1. Исследование модуляции емкости СЭ конденсатора под действием СВЧ поля.
2. Расчет высших гармоник полного тока, возникающих в нелинейном СЭ элементе.
3. Экспериментальное исследование планарного сегнетоэлектрического конденсатора в составе фазовращателя при высоком уровне СВЧ мощности.

4. Моделирование зависимости тангенса угла диэлектрических потерь СЭ элемента от амплитуды СВЧ сигнала.

Объектами исследования являются планарный сегнетоэлектрический конденсатор, аналоговый отражательный СВЧ фазовращатель на основе сегнетоэлектрика.

Основные методы исследования:

- а) теоретические: методы теории длинных линий, методы теории цепей, метод гармонического баланса, численные методы электродинамического моделирования.
б) экспериментальные.

Научные положения

1. Средняя емкость сдвоенного сегнетоэлектрического конденсатора, имеющего вольт-фарадную характеристику, соответствующую степенной модели, наименее чувствительна к амплитуде СВЧ поля при показателе $\gamma \cong 2$.

2. Средняя емкость сдвоенного сегнетоэлектрического конденсатора, имеющего вольт-фарадную характеристику, соответствующую степенной модели с показателем $\gamma = 1,2$, практически не зависит от амплитуды СВЧ поля при изменении управляющего напряжения (U_{dc}) в пределах $U_{min} < U_{dc} < U_{max}$, где U_{min} соответствует амплитуде СВЧ напряжения, а U_{max} обеспечивает требуемую управляемость.

3. Тангенс угла диэлектрических потерь тонкой сегнетоэлектрической пленки, имеющей толщину меньше половины длины акустической волны на частоте СВЧ сигнала, падает с ростом амплитуды СВЧ поля для поликристаллических пленок и растет для высококачественных монокристаллических пленок.

4. Зависимость амплитуды второй гармоники полного тока, протекающего через сегнетоэлектрический конденсатор, от постоянного и переменного полей, полученная путем непосредственного решения уравнения Гинзбурга-Девоншира методом гармонического баланса, совпадает с расчетом по методу разложения полного тока в ряд Фурье с использованием степенной модели.

Научная новизна работы:

1. Теоретически и экспериментально исследованы нелинейные свойства сегнетоэлектрического конденсатора под воздействием СВЧ сигнала большой мощности.

2. Сформулированы рекомендации к проектированию фазовращателя, предназначенного для работы при высоком уровне СВЧ мощности.

3. Установлено, что вид вольт-фарадной характеристики (ВФХ) сегнетоэлектрического конденсатора существенным образом влияет на нелинейные эффекты, возникающие в нем под воздействием СВЧ сигнала. Определены значения параметров модели ВФХ, обеспечивающие подавление модуляции емкости конденсатора СВЧ полем.

Практическая ценность работы

1. Предложены способы подавления модуляции СВЧ полем емкости сегнетоэлектрического конденсатора и высших гармоник полного тока, протекающего через него.

2. Разработана модель зависимости тангенса угла диэлектрических потерь сегнетоэлектрика от амплитуды СВЧ поля, позволяющая оценить потери в сегнетоэлектрическом конденсаторе при разных уровнях СВЧ мощности.

3. Разработана оригинальная конструкция фазовращателя, содержащего двоянный сегнетоэлектрический конденсатор, работающего при повышенном уровне СВЧ мощности и малой мощности в цепях управления.

4. Разработана методика измерения характеристик нелинейного сегнетоэлектрического элемента в составе отражательного фазовращателя при повышенном уровне СВЧ мощности.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

На международных конференциях: Международный студенческий семинар «Microwave and Optical applications of novel physical phenomena» ETU, St.-Petersburg, 2009; Progress In Electromagnetics Research Simposium, 18-21 августа, Москва, 2009.

На конференциях: XVIII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектричества ВКС-XVIII 2008 г; научно-технические семинары «Современные проблемы техники и электроники СВЧ» 2008, 2009, 2010г.

Работа выполнена при поддержке международного проекта «NANOSTAR» 6-й рамочной программы Европейского союза, а также СЧ ОКР «ВВО АП-Фаза».

Публикации:

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 14 статьях и докладах, среди которых 5 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК. Доклады получили одобрение на 9 международных, всероссийских и межвузовских научно-практических конференциях, перечисленных в конце автореферата

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 50 наименований. Основная часть работы изложена на 132 страницах машинописного текста. Работа содержит 77 рисунков и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи диссертации, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также научные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 «Применение сегнетоэлектриков в фазовращателях для фазированных антенных решеток» посвящена обзору литературы по теме диссертации.

В первом параграфе приведена краткая история создания первых фазированных антенных решеток (ФАР), основные виды устройств управления фазой (фазовращателей). Во втором параграфе обсуждаются аспекты применения сегнетоэлектриков в СВЧ технике. Сформулированы основные требования к управляемым СВЧ устройствам. Рассмотрены преимущества СВЧ-устройств на основе сегнетоэлектриков.

В третьем параграфе приведены примеры реализации сегнетоэлектрических фазовращателей СВЧ диапазона, сформулированы существующие проблемы.

В четвертом параграфе описана модель зависимости диэлектрического отклика сегнетоэлектрика переменного состава $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ (BSTO) от температуры, приложенного поля, частоты, параметра структурного качества и содержания бария.

В пятом параграфе описаны способы подавления температурной зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического материала.

В последнем параграфе приведен обзор результатов исследования параметрического разогрева акустических фононов в сегнетоэлектрической пленке СВЧ полем. Результаты сравнительного анализа уровня интермодуляционных искажений сигнала в сегнетоэлектриках и в полупроводниках. Обозначены проблемы, существующие в области исследования поведения сегнетоэлектриков при повышенном уровне СВЧ мощности, обоснована необходимость разработки аналитических моделей для САПР управляемых СВЧ приборов, работающих при высоких уровнях СВЧ мощности.

Глава 2 «Нелинейные эффекты в сегнетоэлектрическом конденсаторе под действием СВЧ сигнала повышенной амплитуды» посвящена теоретическому исследованию нелинейных эффектов, возникающих в сегнетоэлектрическом конденсаторе под действием СВЧ сигнала.

В первом параграфе исследуется модуляция емкости сегнетоэлектрического конденсатора СВЧ сигналом. Для подавления модуляции емкости СВЧ

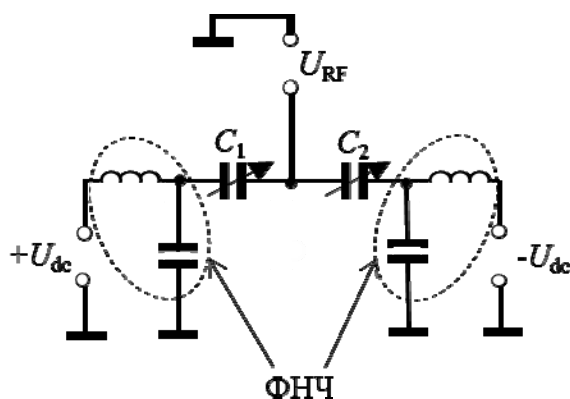


Рис. 1

полем было предложено использовать сдвоенный конденсатор, представляющий собой соединение двух сегнетоэлектрических конденсаторов (емкости C_1 и C_2), включенных по отношению к постоянному управляющему напряжению (U_{dc}) последовательно, а по отношению к СВЧ напряжению (U_{RF}) параллельно (рис. 1). Анализ показал, что эффективность подавления модуляции емкости СВЧ полем в таком конденсаторе

растет с увеличением постоянного управляющего напряжения. При нулевом постоянном напряжении подавления модуляции емкости переменным сигналом не происходит. Далее было исследовано влияние вида вольт-фарадной характеристики на изменение средней за период колебаний СВЧ поля емкости сегнетоэлектрического конденсатора.

Для описания зависимости емкости конденсатора от управляющего напряжения использовалась следующая аппроксимационная формула:

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

где C_0 – начальное значение емкости; U_0 – параметр, задающий номинал управляющего напряжения; n – управляемость сегнетоэлектрического конденсатора $n = C(0)/C(U_{\max})$ (в расчётах принималось $n = 2$); γ – параметр, определяющий скорость изменения зависимости $C(U)$.

Экспериментальное исследование серии сегнетоэлектрических планарных конденсаторов, содержащих пленку $Ba_{0,5}Sr_{0,5}TiO_3$, выращенную методом магнетронного распыления, показало, что при одинаковом значении начальной емкости крутизна ВФХ конденсаторов различна. Такое поведение емкости хорошо описывается формулой (1) при разных значениях степенного параметра γ (см. рис. 2). Обработка результатов полученных в ходе эксперимента показала, что для конденсаторов, содержащих поликристаллическую пленку, независимо от способа ее выращивания параметр γ принимает значения в диапазоне от 1,2 до 1,5. Для конденсаторов на основе сегнетоэлектрической керамики $\gamma = 2$ [1].

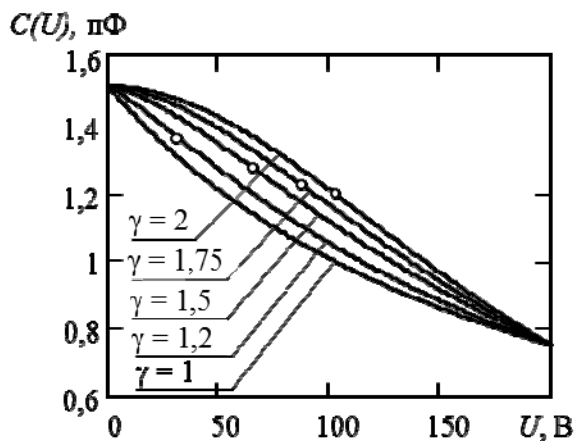


Рис. 2

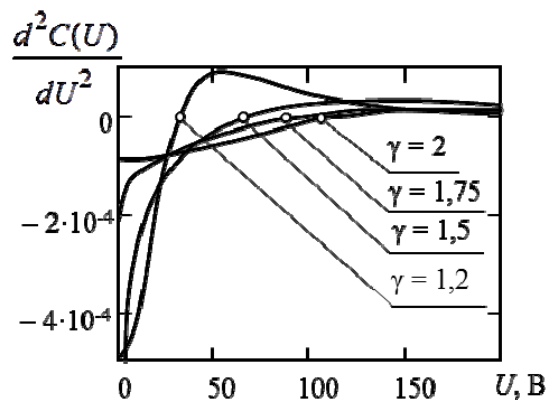


Рис. 3.

Величина параметра γ определяет положение точки перегиба ВФХ. Как показано на рис. 3, иллюстрирующем зависимость второй производной емкости конденсатора от приложенного напряжения, чем меньше параметр γ , тем меньшему значению управляющего напряжения соответствует точка перегиба, а следовательно и меньше протяженность начального, пологого, участка ВФХ. При амплитуде СВЧ напряжения не превышающей 1/2 значения

управляющего напряжения, соответствующего точке перегиба ВФХ, изменение емкости конденсатора под действием СВЧ поля составляет 5%.

Из расчетов следует, что эффективно подавить модуляцию емкости СВЧ сигналом при малых значениях постоянного напряжения можно лишь для конденсаторов с ВФХ, имеющей точку перегиба, соответствующую $\gamma = 2$. При меньших значениях параметра γ действие СВЧ поля приводит к существенному изменению средней емкости за период колебания на начальном участке ВФХ. 1. В этом случае средняя емкость практически не зависит от амплитуды СВЧ поля при изменении управляющего напряжения (U_{dc}) в пределах $U_{min} < U_{dc} < U_{max}$, где U_{min} соответствует амплитуде СВЧ напряжения, а U_{max} обеспечивает требуемую управляемость.

Во втором параграфе приведен расчет высших гармоник полного тока, генерируемых СВЧ полем в параллельном резонансном контуре, содержащем сегнетоэлектрический конденсатор.

Для нахождения амплитуды высших гармоник использовалось разложение в ряд Фурье полного тока в параллельном контуре с одиночным и содвоенным конденсатором. Расчет показал, что в параллельном контуре содвоенным конденсатором отсутствуют четные гармоники полного тока, а в параллельном контуре с одиночным конденсатором вторая гармоника полного тока имеет амплитуду в несколько раз большую, чем амплитуда третьей гармоники. Амплитуды третьей гармоники полного тока для рассматриваемых случаев оказались одинаковыми.

В третьем параграфе приведен расчет первой и второй гармоник полного тока в одиночном сегнетоэлектрическом конденсаторе. Расчет основывался на решении уравнения Гинзбурга-Девоншира [2] методом гармонического баланса.

Уравнение Гинзбурга-Девоншира описывает диэлектрические свойства сегнетоэлектрического материала:

$$Q(t) + \varepsilon_f \frac{Q(t)^3}{(D_N S)^2} - \frac{dQ(t)}{dt} C_0 R_N = C_0 U_g(t) \quad (2)$$

где Q – заряд, накопленный в конденсаторе за время t ; ε_f – диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика при заданной температуре и нулевом управляющем напряжении; D_N – универсальная характеристика нелинейности сегнетоэлектрика типа BSTO; S – площадь электродов конденсатора; R_N – сопротивление учитывающее потери в конденсаторе; $U_g(t) = U_{dc} + U_m \cos(\omega t)$ – суммарное напряжение, падающее на конденсаторе.

В расчетах было использовано следующее гармоническое представление заряда:

$$Q(t) = Q_0 + A_1 \cos(\omega t) + A_2 \cos(2\omega t) + B_1 \sin(\omega t) + B_2 \sin(2\omega t) \quad (3)$$

где $Q_1 \cos \phi_1 = A_1$ $Q_2 \cos \phi_2 = A_2$ $Q_1 \sin \phi_1 = B_1$ $Q_2 \sin \phi_2 = B_2$

Из решения уравнения Гинзбурга-Девоншира методом гармонического баланса была получена следующая система:

$$Q_0(U_{dc}) = \sqrt[3]{\frac{C_0 U_{dc} (D_N S)^2}{2 \varepsilon_f}} + \sqrt{\left(\frac{(D_N S)^2}{2 \varepsilon_f}\right)^3 + \left(\frac{C_0 U_{dc} (D_N S)^2}{2 \varepsilon_f}\right)^2} + \\ + \sqrt[3]{\frac{C_0 U_{dc} (D_N S)^2}{2 \varepsilon_f}} - \sqrt{\left(\frac{(D_N S)^2}{2 \varepsilon_f}\right)^3 + \left(\frac{C_0 U_{dc} (D_N S)^2}{2 \varepsilon_f}\right)^2}$$

$$A_1(U_{dc}, U_m) = \frac{C_0 U_m}{1 + \frac{3 \varepsilon_f Q_0(U_{dc})^2}{(D_N S)^2} + \frac{\omega^2 C_0^2 R_N^2 (D_N S)^2}{(D_N S)^2 + 3 \varepsilon_f Q_0(U_{dc})^2}}$$

$$B_1(U_{dc}, U_m) = \frac{\omega C_0 R_N (D_N S)^2 A_1(U_{dc}, U_m)}{(D_N S)^2 + 3 \varepsilon_f Q_0(U_{dc})^2}$$

(4)

$$A_2(U_{dc}, U_m) = \frac{6 \omega C_0 R_N (D_N S)^2 A_1(U_{dc}, U_m) B_1(U_{dc}, U_m) Q_0(U_{dc}) -}{\left((D_N S)^4 + 3 \varepsilon_f Q_0(U_{dc})^2 (D_N S)^2\right) \times} \\ - \frac{3}{2} \varepsilon_f Q_0(U_{dc}) \left(A_1(U_{dc}, U_m)^2 - B_1(U_{dc}, U_m)^2\right) \left((D_N S)^2 + 3 \varepsilon_f Q_0(U_{dc})^2\right)} \\ \times \left[1 + \frac{3 \varepsilon_f Q_0(U_{dc}) \left(A_1(U_{dc}, U_m)^2 + B_1(U_{dc}, U_m)^2\right)}{2 (D_N S)^2} + \frac{4 \omega^2 C_0^2 R_N^2 (D_N S)^2}{(D_N S)^2 + 3 \varepsilon_f Q_0(U_{dc})^2} \right]$$

$$B_2(U_{dc}, U_m) = \frac{2 \omega \varepsilon_f C_0 R_N (D_N S)^2 A_2(U_{dc}, U_m) - 3 \varepsilon_f A_1(U_{dc}, U_m) B_1(U_{dc}, U_m) Q_0(U_{dc})}{(D_N S)^2 + 3 \varepsilon_f Q_0(U_{dc})^2}$$

Были найдены амплитуды первой и второй гармоник заряда:

$$Q_1(U_{dc}, U_m) = \sqrt{A_1(U_{dc}, U_m)^2 + B_1(U_{dc}, U_m)^2} \\ Q_2(U_{dc}, U_m) = \sqrt{A_2(U_{dc}, U_m)^2 + B_2(U_{dc}, U_m)^2}$$

(5)

Затем было записано выражение для полного тока:

$$I = \frac{dQ(U_{dc}, U_m, t)}{dt} = \omega Q_1(U_{dc}, U_m) e^{i(\omega t + \varphi_1)} + 2 \omega Q_2(U_{dc}, U_m) e^{i(2 \omega t + \varphi_2)}$$

(6)

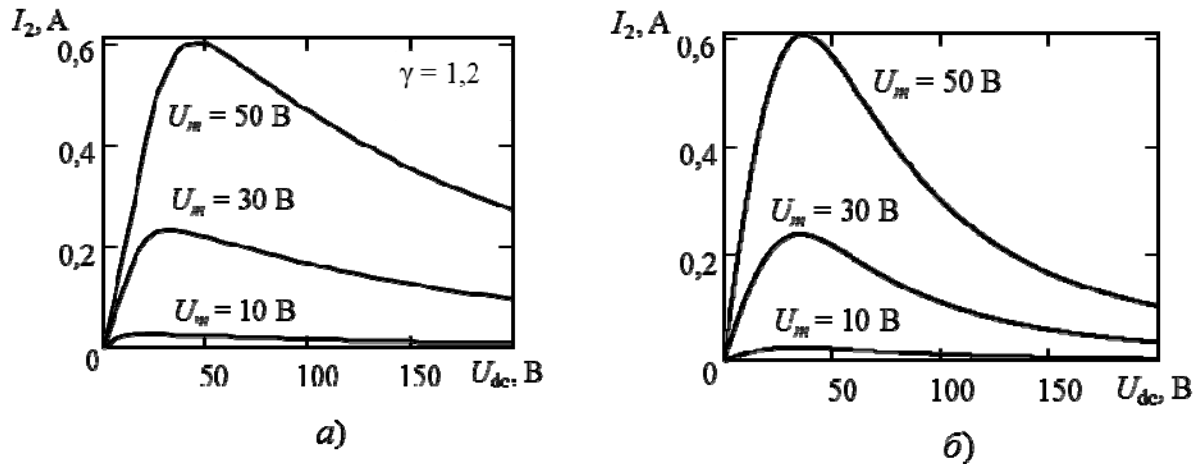


Рис. 4

На рис. 4 приведены результаты расчета амплитуды второй гармоники тока методами, описанными во втором и в третьем параграфах: разложением полного тока в ряд Фурье (рис. 4,а) и методом гармонического баланса (рис. 4,б) для одиночного конденсатора с одинаковой начальной емкостью. Графики на рис. 4,а построены с использованием ВФХ, рассчитанной по степенной модели (1) для $\gamma = 1,2$. Графики на рис. 4,б построены по формуле (6) с учетом физических параметров сегнетоэлектрической пленки ($D_N = 2.8$ кВ/см, $\epsilon_f = 600$).

Как видно из рис. 4 зависимость амплитуды второй гармоники полного тока, протекающего через сегнетоэлектрический конденсатор, от постоянного и переменного полей, полученная путем непосредственного решения уравнения Гинзбурга-Девоншира методом гармонического баланса, совпадает с расчетом по методу разложения полного тока в ряд Фурье с использованием степенной модели. Что говорит о достоверности использованной степенной модели (1).

Далее было проанализировано влияние вида ВФХ (значения γ) на генерацию третьей гармоники в одиночном конденсаторе с помощью метода разложения полного тока в ряд Фурье. Анализ показал, что при $\gamma = 2$ третья гармоника тока в конденсаторе имеет наименьшую амплитуду.

Сделан вывод о том, что для подавления высших гармоник полного тока необходимо использовать сдвоенный конденсатор, ВФХ которого имеет параметр γ , близкий к 2.

В последнем параграфе проведено моделирование зависимости тангенса угла диэлектрических потерь сегнетоэлектрической пленки от амплитуды СВЧ поля.

Получены выражения для вещественной и мнимой частей эффективной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического материала:

$$\epsilon'_{eff}(E_m) = \frac{2}{T} \int_0^T \frac{P'(E_m \cos \omega t) \cos \omega t}{E_m} dt; \quad (7)$$

$$\varepsilon_{eff}''(E_m) = \frac{2}{T} \int_0^T \frac{P''(E_m \cos \omega t) \cos \omega t}{E_m} dt, \quad (8)$$

где E_m - амплитуда СВЧ поля. Поляризация P в (7) и (8) определяется из:

$$P'(E) + iP''(E) = \int_0^E (\varepsilon'(E) + i\varepsilon''(E)) dE, \quad (9)$$

Комплексная диэлектрическая проницаемость $\hat{\varepsilon}(E) = \varepsilon'(E) + i\varepsilon''(E)$ в (9) определялась по феноменологической модели диэлектрического отклика сегнетоэлектрика [1].

Отношение (8) к (7) определяет тангенс угла диэлектрических потерь как функцию амплитуды напряженности переменного СВЧ поля.

На рис. 5 приведены рассчитанные зависимости $tg\delta$ от амплитуды СВЧ поля при разных значениях параметра качества сегнетоэлектрика ξ_s , являющегося мерой дефектности образца. Параметр качества $\xi_s = 1$ соответствует поликристаллической дефектной пленке, а параметр $\xi_s < 0,25$ соответствует высококачественным монокристаллическим пленкам.

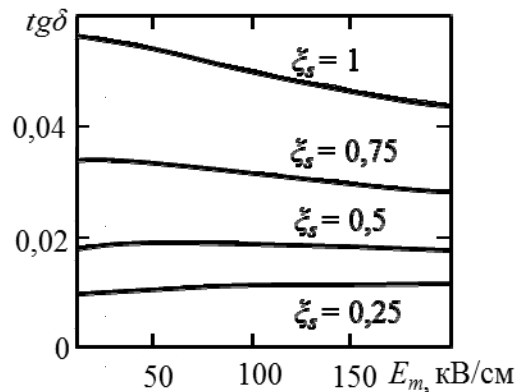


Рис. 5

Тенденция изменения тангенса угла диэлектрических потерь под воздействием

СВЧ поля совпадает с тенденцией изменения тангенса угла диэлектрических потерь под воздействием постоянного поля смещения. Однако, изменение тангенса угла диэлектрических потерь под воздействием СВЧ поля существенно слабее, чем под воздействием постоянного поля смещения.

Убывание $tg\delta$ с ростом амплитуды СВЧ напряжения справедливо только для достаточно тонких пленок. Если толщина пленки превосходит половину длины акустической волны в материале пленки при рабочей частоте СВЧ волны, то в пленке возможно возбуждение акустических колебаний за счет наведенного пьезоэффекта [3] или за счет параметрического возбуждения акустических колебаний [4].

В главе 3 «Модель отражательного фазовращателя на основе управляемого сегнетоэлектрического конденсатора» проводится моделирование отражательного фазовращателя и расчет влияния на его параметры модуляции емкости сегнетоэлектрического конденсатора СВЧ сигналом.

В первом и втором параграфах описана схема построения проходного фазовращателя на гибридных мостах и отражательных сегнетоэлектрических фазовращателях. Обосновано использование в качестве отражательного фазовращателя параллельного соединения сегнетоэлектрического конденсатора с индуктивностью. Рассмотрено влияние четвертьволнового трансформатора на полный фазовый сдвиг отражательного фазовращателя. Произведена оценка величины СВЧ напряжения на конденсаторе в резонансном контуре.

В третьем параграфе приведена оригинальная модель отражательного фазовращателя, предназначенного для использования при повышенном уровне СВЧ мощности. В модели была учтена модуляция емкости сегнетоэлектрического конденсатора, а также изменение в нем потерь под действием СВЧ сигнала.

Влияние вида ВФХ сегнетоэлектрического конденсатора, характеризующегося параметром γ , на управление фазой отраженной волны в фазовращателе наглядно проиллюстрировано на рис. 6, на котором приведены зависимости разности фаз отраженной волны от управляющего напряжения при разных амплитудах СВЧ сигнала: 1 – 0; 2 – 30; 3 – 50 В для $\gamma = 1,2$ (поликристаллическая пленка) (рис. 6,а) и для $\gamma = 2$ (объемная керамика) (рис. 6,б).

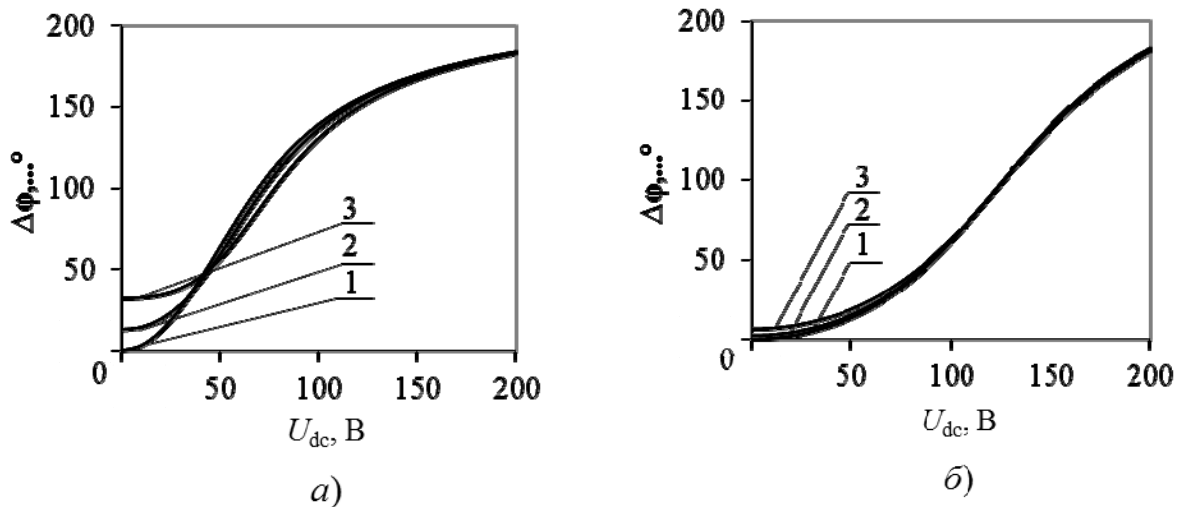


Рис. 6.

Чем больше значение параметра γ , тем меньше меняется фаза отраженной волны под действием СВЧ сигнала. При малых значениях γ , характерных для поликристаллических пленок ($\gamma \leq 1,5$), фаза отраженного сигнала перестает существенно меняться под действием СВЧ поля при величинах управляющего напряжения близкой к амплитуде СВЧ напряжения.

Для эффективного подавления изменения фазового сдвига под действием СВЧ поля, необходимо использовать фазовращатели с сегнетоэлектрической пленкой, близкой по своим свойствам к объемной керамике (с $\gamma = 2$).

В последнем параграфе приведена топология отражательного фазовращателя и результаты электродинамического анализа.

Глава 4 «Экспериментальное исследование сегнетоэлектрического фазовращателя для фазированной антенной решетки» посвящена анализу результатов измерения основных характеристик сегнетоэлектрических фазовращателей при низком и при повышенном уровнях СВЧ мощности.

В первом параграфе приведен результат экспериментального исследования проходного сегнетоэлектрического фазовращателя с аналоговым управлением, обеспечивающего фазовый сдвиг $0 \dots 360^\circ$ в диапазоне $3,9 \dots 4,2$ ГГц, при низком уровне СВЧ мощности. Отражательные фазовращатели, входящие в состав проходного, представляют собой параллельное соединение

одиноконда КН1-7 и индуктивности в виде отрезка линии передачи. В результате эксперимента получен параметр качества проходного фазовращателя $F \approx 110$ град/дБ, что подтверждает возможность разработки надежных СВЧ сегнетоэлектрических фазовращателей для приемных фазированных антенных решеток с использованием отечественных материалов и комплектующих изделий.

Во втором параграфе проведено экспериментальное исследование отражательного фазовращателя на основе сегнетоэлектрического сдвоенного конденсатора при повышенном уровне СВЧ мощности.

На рис. 7 показаны эквивалентная схема (рис. 7,а) и фотография макета отражательного фазовращателя и навесным сегнетоэлектрическим сдвоенным конденсатором (рис. 7,б).

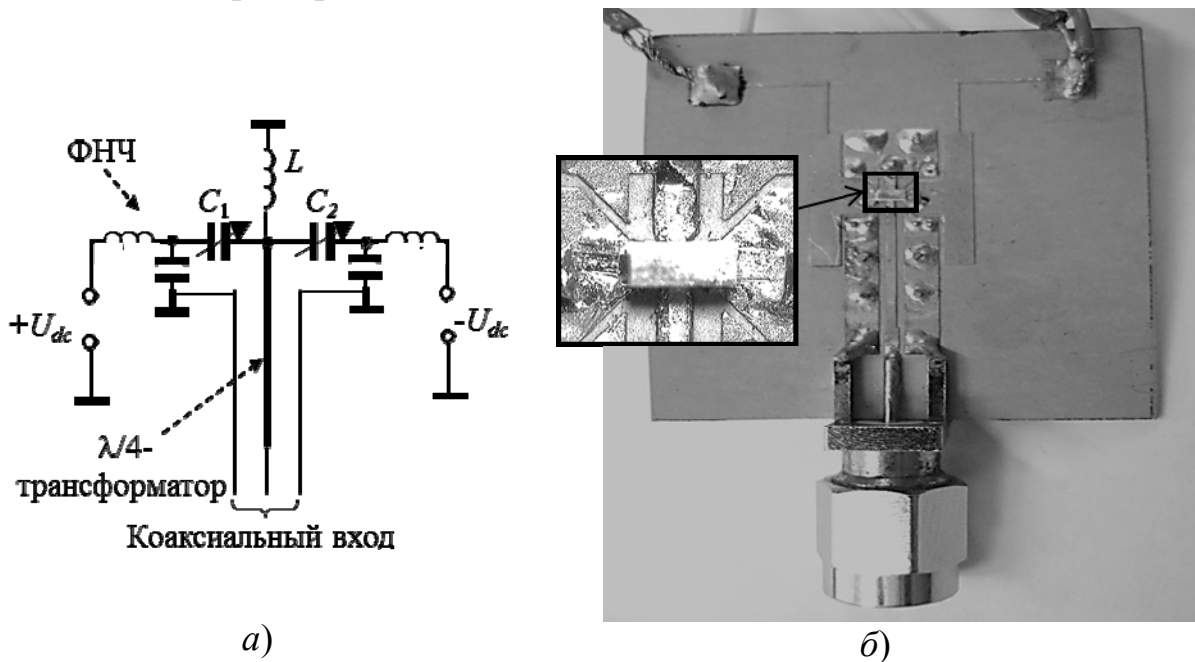


Рис. 7

Макет был изготовлен на подложке из фольгированного диэлектрика Rogers 6006, толщиной 635 мкм, диэлектрической проницаемостью 6,15 и толщиной металлизации 35 мкм. Размер подложки макета 30x30 мм. В экспериментальный макет фазовращателя был установлен сдвоенный конденсатор с емкостью 3 пФ на основе пленки $Ba_{0,5}Sr_{0,5}TiO_3$ толщиной 0,7 мкм.

Исследование фазовращателя при высоком уровне мощности осложняется тем, что стандартные векторные анализаторы работают примерно до мощности 0,5 Вт. К тому же для измерений на высоком уровне мощности желательно иметь импульсную мощность и возможность менять длительность импульса и скважность. Это необходимо для исключения нагрева сегнетоэлектрического конденсатора СВЧ мощностью, либо определения влияния нагрева на фазовый сдвиг и потери фазовращателя.

Для исследования отражательного фазовращателя при высоком уровне мощности был создан испытательный стенд. Измерения проводились на частоте 4,2 ГГц, задаваемой генератором синусоидального сигнала низкого

уровня мощности. Далее сигнал с генератора поступал на усилитель мощности, который усиливал и модулировал сигнал. Усилитель мощности работал в диапазоне 3,9...4,2 ГГц и усиливал до 8 Вт импульсной мощности, что соответствовало амплитуде СВЧ поля $U_m \cong 80$ В. Модуляция задавалась внешним генератором импульсов со скважностью 100 и длительностью импульса 10 мкс.

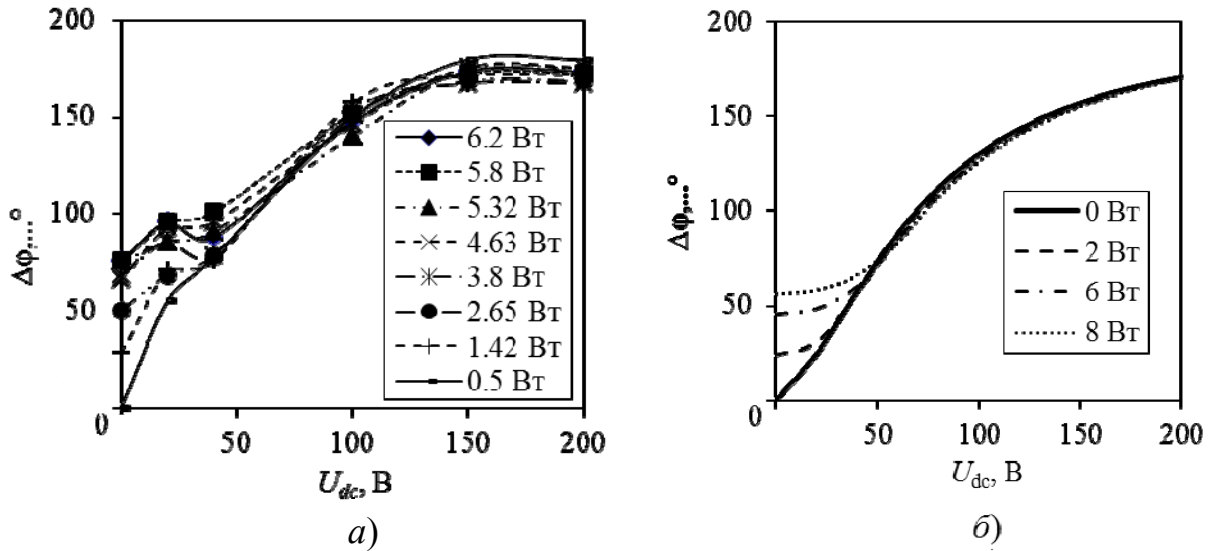


Рис. 8

Графики на рис. 8 демонстрируют качественное совпадение измеренной (рис. 8,а) и рассчитанной (рис. 8,б) зависимостей фазы отраженной волны в отражательном фазовращателе от управляющего напряжения при разной мощности СВЧ сигнала. Анализ зависимостей на рис. 8 подтверждает вывод о том, что эффективно подавить модуляцию емкости сдвоенного конденсатора на основе пленки с $\gamma \cong 1,2$ (рис. 8,б) можно только при управляющих напряжениях $U_{dc} \geq U_m$. Обеспечить подавление модуляции во всем диапазоне управляющего напряжения можно только, используя в сдвоенном конденсаторе сегнетоэлектрическую пленку с $\gamma \cong 2$.

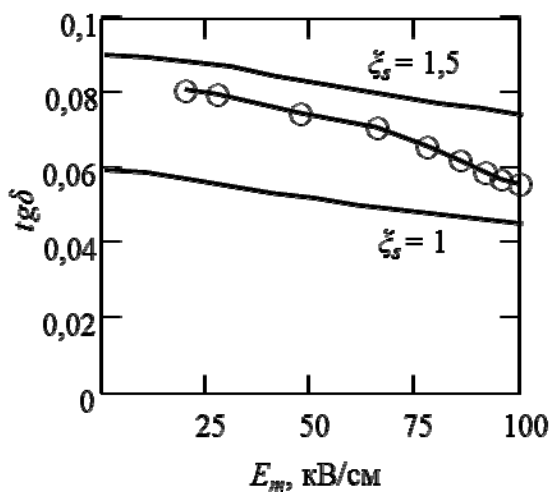


Рис. 9

Из зависимости вносимых потерь от управляющего напряжения была извлечена зависимость тангенса угла диэлектрических потерь сегнетоэлектрика (точки рис. 9). Сплошные кривые на рис. 9 рассчитаны с помощью формул (7) и (8) и феноменологической модели [2] для двух значений коэффициента ζ_s [2], характеризующего усредненную напряженность встроенного электрического поля, созданного заряженными дефектами.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в рамках диссертационной работы.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Сегнетоэлектрики в технике СВЧ [текст]: под ред. О.Г. Вендика. - М.: «Сов. Радио», 1979. - 272 с.
2. О.Г. Вендик. Феноменологическое описание зависимости диэлектрической проницаемости титаната стронция от приложенного электрического поля и температуры [текст] / О.Г. Вендик, С.П. Зубко // Журнал Технической Физики.- 1997. Т. 67. Вып. 3. С. 29-33,
3. О.Г. Вендик. Электрострикционный механизм СВЧ потерь в планарном конденсаторе на основе плёнки титаната стронция [текст] / О.Г. Вендик, Л.Т. Тер-Мартirosян // Журнал Технической Физики. - 1999. Т. 69. Вып. 8. С. 93-99.
4. L.T. Ter-Martirosyan. Investigation of non-equilibrium heating-up of thermal phonons in ferroelectrics films at microwaves [текст] (Исследование неравновесного нагрева тепловых фононов в сегнетоэлектрической пленке на СВЧ) / L.T. Ter-Martirosyan // Ferroelectrics. - 1974. Vol. 13. P. 423-424.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендуемых ВАК России:

1. С.П. Зубко. Модель зависимости фактора диэлектрических потерь сегнетоэлектрика от амплитуды СВЧ сигнала [текст] / А. Н. Васильев, С.П. Зубко // Физика Твёрдого Тела. -2009. Т. 51. Вып. 8. -С. 1457- 1459.
2. А.Н. Васильев. Оптимизация СВЧ-фазовращателя, выполненного на основе гибридного моста и управляемого сегнетоэлектрического элемента [текст] / А.Н. Васильев, О.Г. Вендик // Известия вузов России. Радиоэлектроника. -2008. Вып. 6. -С. 61-65.
3. А.Н. Васильев. Тангенс угла потерь в сегнетоэлектрическом материале как функция амплитуды переменного поля СВЧ [текст] / О.Г. Вендик, А.Н. Васильев // Известия вузов России. Радиоэлектроника. -2007. Вып. 5. -С. 66 – 69.
4. М.Д. Парнес. Проходной фазовращатель на основе сегнетоэлектрических управляющих элементов для работы в составе фазированной антенной решетки [текст] / М.Д. Парнес, О.Г. Вендик, А.Н. Васильев, П.В. Логачев, Р.Г. Шифман // Радиотехника.– 2009 №10. -С. 128-133.
5. А.Н. Васильев. Влияние мощности СВЧ сигнала на управляемость сегнетоэлектрического фазовращателя [текст] / А.Н. Васильев, О.Г. Вендик, И.В. Якушин // Журнал Технической Физики.- 2011. Т. 81. Вып. 10. С. 55-59.

Другие статьи и материалы конференций

6. А.Н. Васильев. Модель зависимости фактора диэлектрических потерь сегнетоэлектрика от амплитуды СВЧ сигнала [текст] / О.Г. Вендик, А.Н.

Васильев // научно-технический семинар «Инновационные разработки в СВЧ технике и электронике». -2008. -С. 7.

7. А.Н. Васильев. Диэлектрический отклик сегнетоэлектрика на воздействие СВЧ поля большой амплитуды [текст] / А.Н. Васильев, С.П. Зубко // материалы XVIII всероссийской конференции по физике сегнетоэлектриков. -2008. С.158.

8. А.Н. Васильев. Исследование фазовращателя с сегнетоэлектрическим управляемым элементом, рассчитанным на повышенный уровень СВЧ-мощности [текст] / А.Н. Васильев, О.Г. Вендик // материалы научно-технического семинара «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ», СПбГЭТУ «ЛЭТИ». -2009. – С.31.

9. A. N. Vasiliyev. Loss factor of a ferroelectrical material as a function of microwave field amplitude [текст] (Тангенс угла диэлектрических потерь в сегнетоэлектрическом материале как функция амплитуды СВЧ поля) / O. G. Vendik, A. N. Vasiliyev // 15th International Student Seminar on Microwave Applications of Novel Physical Phenomena, Seminar Proceedings Book, Saint Petersburg, 2009.

10. A. Nikitin, A. Vasiliyev, and O. Vendik. Tunable ferroelectric phase shifter operating at higher amplitude of microwave field [текст] (Управляемый сегнетоэлектрический фазовращатель работающий при повышенной амплитуде СВЧ поля) // 15th International Student Seminar on Microwave Applications of Novel Physical Phenomena, Seminar Proceedings Book, Saint Petersburg, 2009.

11. O. G. Vendik,. Phased-array Antenna Ferroelectric Phase Shifter for a Higher Microwave Power Level [текст] (Сегнетоэлектрический фазовращатель на повышенный уровень мощности для фазированной антенной решетки) / A. N. Vasiliyev, M. D. Parnes, A.E. Nikitenko, and R.G. Shifman // PIERS Proceedings, Russia, August 18-21, 2009, p. 1685-1689.

12. Vendik, O. Low cost ferroelectric phase shifter for a higher microwave power level [Текст] (Сегнетоэлектрический фазовращатель на повышенный уровень мощности с низкой стоимостью) / O. Vendik, A. Vasiliyev, M. Parnes // IEEE COMCAS 2009, The International IEEE Conference on Microwaves, Communication, Antennas and Electronic Systems. – 2009. – Tel-Aviv, Israel.

13. А.Н. Васильев. Сегнетоэлектрический фазовращатель на повышенный уровень СВЧ мощности [текст] /А.Н. Васильев, О.Г. Вендик, М.Д. Парнес, Р.Г. Шифман// материалы научно-технического семинара «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ», СПбГЭТУ «ЛЭТИ». -2010. – С.28.

14. А.Н. Васильев. Генерация высших гармоник в сегнетоэлектрическом фазовращателе на одиночном и вдвоенном вариконде [текст] // материалы научно-технического семинара «Инновационные разработки в технике и электронике СВЧ», СПбГЭТУ «ЛЭТИ». -2010. – С.29.