

На правах рукописи

Амро Абделхамид Али Аттия

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ПЛАНАРНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ НА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ И ФИЛЬТРЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Специальность: 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» имени В.И.Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ), на кафедре Микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Мироненко Игорь Германович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Бубнов Юрий Захарович, ОАО «Авангард», г. Санкт-Петербург

кандидат физико-математических наук, доцент Семенов Александр Анатольевич, доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Защита состоится «16» Мая 2012 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.03 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « » апреля 2012 г.

Ученый секретарь совета Д 212.238.03 по защите докторских и кандидатских диссертаций,
д.т.н., доцент

Баруздин С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Неотъемлемым элементом почти любого сложного оптического и микроволнового прибора является резонатор. Прогресс в совершенствовании резонаторов зачастую приводил к достижению качественно новых результатов. Так, появление мазеров и лазеров было бы невозможно без реализации высокодобротных резонаторов СВЧ и оптического диапазонов. Высокдобротные резонаторы активно используются для сужения и стабилизации линии генерации, в качестве фильтров и дискриминаторов, в разнообразных высокочувствительных сенсорах и датчиках, в метрологии и в прецизионных физических экспериментах.

Фильтрами СВЧ являются пассивные цепи с заданными частотными характеристиками, обычно определяемыми требуемым минимальным затуханием в полосе пропускания и максимально возможным ослаблением частотного спектра сигнала в полосе непрозрачности. Фильтр является неотъемлемой частью различных устройств СВЧ. На основе фильтров строятся частотно-избирательные входные цепи приёмников, устройства разделения частотных каналов, выделение требуемой части спектра сигнала и т.д. Другими словами, фильтры СВЧ являются наиболее разработанными устройствами, осуществляющими передачу электромагнитной энергии в соответствии заданной амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной характеристикой (ФЧХ). Теория фильтров и способы их построения являются наиболее разработанными разделами технической электродинамики. В этой связи необходимо назвать классический труд [1], который до настоящего времени сохраняет свою актуальность. Однако, со временем появились новые требования к фильтрам, реализация которых стала возможной на новой элементной базе, которая ранее не существовала. Прежде всего, это связано с появлением микрополосковых линий, на основе которых стало возможным построение фильтров, конструкторские решения которых определялись топологией проводников на поверхности диэлектрической подложки. Появилось много работ, посвященных проектированию фильтров на основе полосковых и микрополосковых линий. Помимо микрополосковых линий в инженерной практике стали использоваться щелевые и копланарные линии, образованные металлическим пленками нанесенными на поверхность диэлектрической подложки. Таким образом, возникла возможность проектирования фильтров на основе планарной технологии, обеспечивающей требуемую топологию металлических пленок на поверхности диэлектрической подложки с целью синтеза заданных АЧХ.

Широкие возможности создания планарных структур позволили начать исследование путей построения фильтров с электрически перестраиваемыми АЧХ. Элементом электрической перестройки в составе фильтров стали нелинейные ёмкости обратных р-п переходов и сегнетоэлектрические конденсаторы. Способ построения фильтров с электрической перестройкой основывается на связи нелинейной ёмкости с резонансным отрезком линии передачи.

Конструкторские способы реализации этой связи весьма ограничены, как ограничен и частотный диапазон, в котором электрические ёмкости остаются сосредоточенными элементами.

Альтернативный способ построения электрически перестраиваемых фильтров исследован в диссертации и он состоит в перестройке резонансной частоты объёмных планарных резонаторов, образованных отрезками линий передачи, за счёт изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки (СЭП), включенной в объём резонатора. Линиями передачи планарного вида являются щелевая и копланарная линии, образованные на поверхности СЭП в структуре "СЭП-диэлектрическая подложка". Электромагнитная волна в щелевой линии в диапазоне СВЧ может получить замедление, требуемое для технической реализации устройств при толщине СЭП порядка 10^{-3} мм [2]. Диэлектрическая подложка оказывает незначительное влияние на электродинамические характеристики щелевой линии, и поэтому, её параметры - диэлектрическая проницаемость и толщина, могут быть выбраны исключительно из технологических соображений.

Сегнетоэлектрическим материалом пленки является твердый раствор $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$, который при концентрации бария $x = 0,5-0,6$ имеет относительную диэлектрическую проницаемость $\sim 10^3$, которая уменьшается в 1,5-2 раза при приложении электрического поля к пленке напряженностью 10 В/мкм. Тангенс угла диэлектрических потерь в диапазоне СВЧ имеет значение $\sim 10^{-2}$ [2]. Таким образом, совокупность параметров щелевой (и близкой к ней копланарной) линии даёт основание для исследований электродинамических свойств объёмных планарных резонаторов, образованных их резонансными отрезками.

Сдерживающим фактором широкого практического применения щелевых линий на основе СЭП является температурная зависимость их диэлектрической проницаемости и, как следствие, температурная зависимость АЧХ и ФЧХ фильтров, построенных на объёмных резонаторах. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков является их принципиальным свойством, которое проявляется в том, что нелинейность диэлектрической проницаемости по электрическому полю и температуре взаимосвязаны. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости приводит к изменению АЧХ резонатора сравнимым с её изменением под действием управляющего электрического поля. Появление технологических возможностей получения нанослоёв сложного химического состава дало основание для исследования нанокomпозитных СЭП с синтезируемыми свойствами. Термином - нанокomпозитная плёнка, мы определяем СЭП, образованную последовательностью нанослоёв, каждый из которых имеет свой химический состав. В данной работе это нанослои $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ с разным процентным содержанием бария. В щелевых резонаторах каждый нанослой участвует в формировании электромагнитного поля, поэтому можно прогнозировать результирующий эффект в виде температурной

стабилизации АЧХ резонатора, за счёт взаимных компенсаций температурных зависимостей диэлектрической проницаемости отдельных нанослоёв.

В диссертационной работе была поставлена задача исследования электродинамических свойств щелевых, копланарных и многощелевых линий (и резонаторов) на основе многослойных нанокompозитных структур, образующих СЭП толщиной ~ 1 мкм. Многослойную сегнетоэлектрическую структуру нельзя охарактеризовать таким параметром как диэлектрическая проницаемость, так как каждый нанослой сохраняет свойства сегнетоэлектрика с присущей ему температурной и полевой зависимостями диэлектрической проницаемости.

Таким образом, исследование представленных планарных резонаторов на основе нанокompозитных СЭП и фильтров представляет собой актуальную задачу, имеющую научную и фактическую новизну в области техники и технологии устройств СВЧ.

Целью диссертационной работы является исследование возможностей построения резонаторов с перестраиваемыми амплитудно-частотными и фазочастотными характеристиками за счет изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки, включенной в структуру резонатора.

Цель диссертационной работы достигается решением следующих основных задач:

1. Расчетом постоянной распространения электромагнитной волны в планарных линиях передачи, образованных на многослойных нанокompозитных СЭП.
2. Расчетом затухания в линиях передачи, вызванного диэлектрическими потерями в СЭП и конечной проводимостью электродов линии.
3. Расчетом волнового сопротивления планарных линий передачи на слоистых диэлектрических подложках.
4. Исследованием резонансных характеристик объёмных резонаторов, образованных разомкнутыми и короткозамкнутыми полуволновыми отрезками планарных линий : АЧХ, добротности и перестройки АЧХ в зависимости от значений диэлектрической проницаемости СЭП.
5. Исследованием основных характеристик фильтров, образованных каскадным соединением резонаторов с четвертьволновыми связями.

Научная новизна работы:

1. Разработан метод расчёта постоянной распространения электромагнитной волны в планарных слоистых диэлектрических структурах, образованных тонкими электродами, расположенными на поверхности СЭП.
2. На основе модели температурной и полевой зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков типа твердого раствора $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$, выполнен численный анализ свойств планарных структур на основе многослойной нанокompозитной СЭП.
3. Обоснована возможность расширения температурного интервала для планарных структур на основе СЭП до значений ± 40 °С относительно рабочей температуры при сохранении значений постоянной распространения в интервале единиц процентов.

4. Выполнен анализ волнового сопротивления планарных слоистых диэлектрических структур на основе напряжения и передаваемой мощности.

5. Выполнен анализ основных параметров планарных резонаторов на основе СЭП.

6. Исследованы АЧХ перестраиваемых фильтров с четвертьволновыми связями.

7. Выполнен анализ ёмкости планарных структур с управляющими электродами.

Основные методы исследования:

В диссертации теоретические исследования выполнены на основе метода частичных областей, приводящим к системе интегральных уравнений относительно касательных составляющих электрического поля на узких зазорах между электродами. Решение уравнений получено методом Галеркина в базисе тригонометрических функций, обеспечивающим высокую сходимость рядов в элементах определителя системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), обнуление которого даёт значение постоянной распространения. Экспериментальные исследования выполнены на основе резонансных методов на базе современных векторных анализаторов электрических цепей.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Применение сегнетоэлектрической пленки, образованной нанослоями с заданным распределением концентрации барьера между ними и различной толщины в планарных волноведущих структурах, даёт эффект термостабилизации резонансной частоты резонаторов, оцениваемой в единицах процентов в широком температурном интервале.

2. В тригонометрическом базисе решение интегральных уравнения методом Галеркина улучшает сходимость рядов в элементах матрицы СЛАУ по сравнению с базисом, отвечающим условию "на ребре".

3. Уменьшение управляющего напряжения перестройки резонаторов, достигается с помощью электродов с толщиной меньше глубины скинслоя в металле электродов.

4. Разомкнутые резонансные отрезки планарных линий передачи с узкими зазорами между электродами, образуют объёмные резонаторы с резонансной частотой и добротностью, отвечающих идеальному холостому ходу.

5. Перестройка резонансной частоты планарных резонаторов лежит в диапазоне 10 – 20 % при изменении диэлектрической проницаемости СЭП в ~1,5 раза при сохранении формы АЧХ.

Практическая значимость результатов работы:

1. Обоснована и доказана возможность применения планарных резонаторов для перестройки АЧХ резонаторов и фильтров для использования в диапазоне СВЧ.

2. Решена задача температурной стабилизации параметров резонаторов и устройств на их основе с применением многослойных нанокompозитных СЭП.

3. Разработаны программы расчёта планарных волноведущих структур на основе многослойных диэлектрических плёнок и структур, включающие расчёт комплексной постоянной распространения и волнового сопротивления.

4. Совокупность результатов исследований, выполненных в диссертации, создаёт основу новой элементной базы проектирования устройств СВЧ с перестраиваемыми АЧХ и ФЧХ.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 3 научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», научно-техническом семинаре Санкт-Петербургского государственного института химии силикатов РАН.

Публикации:

Основные результаты диссертации опубликованы в 4 статьях в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК .

Структура и объём диссертации:

Диссертация включает в себя: введение, 4 главы с заключительными выводами, заключение, и список литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении к диссертации обозначены проблемы связанные с исследованием перестраиваемых резонаторов на основе сегнетоэлектрических пленок и обоснованы пути их решения.

Первый раздел посвящен обзору известных на настоящий момент перестраиваемых фильтров. Обзор литературы, посвященный рассмотрению конструкций и АЧХ фильтров с перестраиваемой частотой пропускания позволяет сделать следующие выводы:

- к настоящему времени исследованы разнообразные планарные структуры перестраиваемых фильтров в различных диапазонах сверхвысоких частот, что свидетельствует об интересе и актуальности проблемы создания электрически перестраиваемых фильтров;
- в конструкциях фильтров использованы π , ρ элементы и перестраиваемые конденсаторы на сегнетоэлектрических пленках. Перестройка фильтров осуществляется либо переключением резонансных отрезков микрополосковых линий, либо за счет изменения емкости конденсаторов, включенных в резонаторы;
- значения добротностей резонаторов с включенными элементами управления их частотой не превышают 10^2 , что приводит к потерям в полосе пропускания превышающим (3-5)дБ и полосе перестройки не превышающей (1-1.2)ГГц.

Второй раздел посвящен электродинамическому анализу волноведущих структур на многослойных нанокompозитных пленках.

Из Введения вытекают задачи, решения которых должно образовать теоретическое обоснование построения фильтров на перестраиваемых объемных резонаторах, образованных отрезками планарных волноведущих структур, содержащих сегнетоэлектрическую пленку. К их числу относятся щелевые линии, копланарные, многощелевые линии. Основной электродинамической характеристикой этих линий является зависимость постоянной распространения электромагнитной волны (фазовой скорости) от диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки, которая изменяется под действием управляющего напряжения. В диссертационной работе ставится задача теоретического анализа электродинамических характеристик планарных волноведущих структур, образованных на многослойных сегнетоэлектрических пленках. Основные идеи, положенные в основу патента [3], позволяют надеяться на достижение температурной стабилизации постоянной распространения в щелевых линиях на основе нанокompо-

зитных сегнетоэлектрических пленок. Это дает основания к прогнозу температурной стабилизации перестраиваемых объемных резонаторов, образованных отрезками линий на многослойных сегнетоэлектрических пленках. Теоретическая сторона анализа планарных волноведущих структур основана на классическом методе решения уравнений Максвелла в отдельных частичных областях (в нашем случае в отдельных диэлектрических слоях) с последующим сшиванием решений на границах областей [4]. Особенностью электродинамического анализа многослойных структур является сложная вычислительная модель, не позволяющая в реальном времени получить численные результаты. Для современных программных пакетов, таких как HFSS, в основу которых положен метод конечных элементов, подобная задача неразрешима. Схема решений уравнений Максвелла может быть разделена на две части: аналитическую часть, завершающую построение аналитической модели и программно-вычислительную часть, завершающуюся программой вычислений. В классическом подходе вычислительная модель сводится к системе линейных алгебраических уравнений, обнуление определителя которой дает искомое значение постоянной распространения. Следует отметить существенную особенность решения для планарных структур, образованных металлическими электродами, разделенными узкими зазорами. Она состоит в разложении поля в зазоре щели в базисе, допускающем аналитическое интегрирование с гармоническими функциями ряда Фурье в области существования электромагнитного поля. Это, в свою очередь, сужает выбор вида базиса на узких зазорах, с учетом граничного условия на бесконечно тонком ребре. Разумеется, что оценки сходимости и точности сходимости решения остаются весьма важными.

Основной электродинамической характеристикой щелевой линии является зависимость постоянной распространения электромагнитной волны (фазовой скорости) от диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки, которая изменяется под действием управляющего напряжения. Однако температурная зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки неизбежно должна вести к поиску способов температурной стабилизации фазовой скорости при сохранении зависимости от управляющего электрического поля. Одним из возможных способов решения этой задачи является применение нанокompозитных пленок в щелевой линии. Термином “нанокompозитная” сегнетоэлектрическая пленка, мы определяем пленку, образованную последовательностью сегнетоэлектрических слоев, отличающихся химическим составом. В таком химическом составе при ограничении на толщину пленки размером $(2 \div 0.25)$ мкм, каждый слой может иметь толщину ≥ 50 нм, что дает основание к определению “нанокompозитная пленка”. Каждый нанослой имеет температурную и полевую зависимость диэлектрической проницаемости $\epsilon(T, E)$, определяемую его химическим составом. Например, в случае использования твердого раствора $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ нанослои могут отличаться соотношением бария и стронция, что определяет различные зависимости $\epsilon(T, E)$ в нанослоях. Так как каждый нанослой вносит свой вклад в электродинамические характеристики щелевой линии, образованной на нанокompозитной пленке, то можно прогнозировать и исследовать результирующий эффект в виде температурной стабилизации фазовой скорости в заданном температурном интервале.

Рассмотрим основные детали теоретического анализа многослойной диэлектрической структуры в составе щелевой линии.

На рис. 1. представлено поперечное сечение рассматриваемой щелевой линии. Где обозначено:

d_1 – толщина нанокompозитной сегнетоэлектрической пленки,

Δl_i – толщина нанослоя, где, $i=1,2,..N$, N – количество нанослоев,

εl_i – диэлектрическая проницаемость нанослоя.

В этих обозначениях первый индекс указывает на номер области поперечного сечения нанокompозитной пленки.

Поле в структуре представим композицией LSE и LSM полей, которые порождаются векторными электродинамическими потенциалами

$A(x, y, z, t) = \vec{e}_y A(x, y) \cdot e^{-j(\gamma z - \omega t)}$, $F(x, y, z, t) = \vec{e}_y F(x, y) \cdot e^{-j(\gamma z - \omega t)}$, где γ – постоянная распространения электромагнитного поля в линии. В диссертации найдены векторные потенциалы в каждой частичной области.

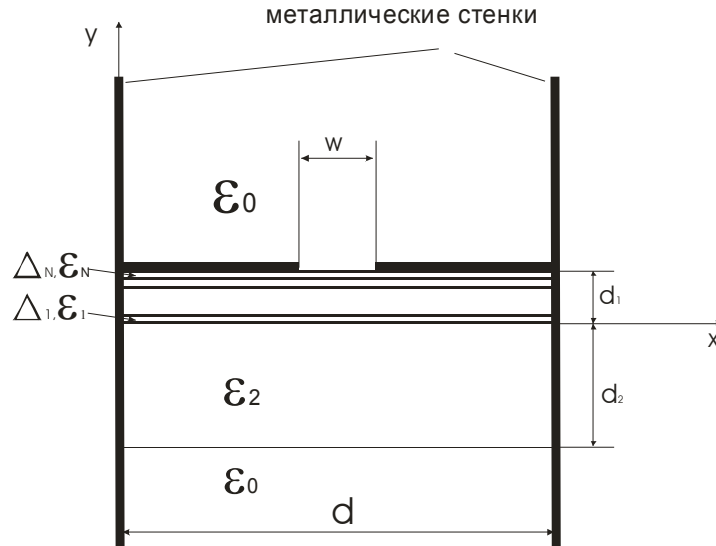


Рис.1. Поперечное сечение щелевой линии на нанокompозитной пленке.

Типичным соотношением для потенциалов является выражение для области i -го нанослоя:

$$A_{li}(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(A_{lin} \sin(k_{lin} y) + B_{lin} \cos(k_{lin} y) \right) \sin(a_n x), \quad F_{li}(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(F_{lin} \sin(k_{lin} y) + D_{lin} \cos(k_{lin} y) \right) \cos(a_n x) \quad (1).$$

В этих выражениях использованы обозначения:

$$k_0^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0, \quad a_n = \frac{n\pi}{d}, \quad k_{lin}^2 = k_0^2 \varepsilon_{li} - \gamma^2 - a_n^2, \quad \gamma > k_0.$$

Условия непрерывности для векторных потенциалов и их нормальных производных на границах диэлектрических слоев имеют вид:

$$A_{li}(x, \Delta_{li}) = A_{l(i+1)}(x, \Delta_{li}), \quad \frac{1}{\varepsilon_{li}} \frac{\partial A_{li}(x, \Delta_{li})}{\partial y} = \frac{1}{\varepsilon_{l(i+1)}} \frac{\partial A_{l(i+1)}(x, \Delta_{li})}{\partial y},$$

$$F_{li}(x, \Delta_{li}) = F_{l(i+1)}(x, \Delta_{li}), \quad \frac{\partial F_{li}(x, \Delta_{li})}{\partial y} = \frac{\partial F_{l(i+1)}(x, \Delta_{li})}{\partial y}.$$

Очевидно, что последовательное применение соотношений непрерывности на границах областей приведет к связи произвольных коэффициентов в разложениях потенциалов в соответствующих областях.

Процедура построения численной модели Галеркина в рассматриваемой задаче принципиально не отличается от приведенной в [2], за тем исключением, что мы использовали аппроксимации касательных электрических полей на щели в виде разложений по тригонометрическим функциям

$$E_z(x') = \sum_{m=0}^M b_m \sin \frac{2(m+1)\pi x'}{w}, \quad E_x(x') = \sum_{m=0}^M a_m \cos \frac{2\pi m x'}{w},$$

где x' – координата в пределах щели.

Выбор тригонометрических функций в качестве базиса разложения касательных компонент поля на щели не противоречит условию на ребре, которым можно считать край электрода. Выбор тригонометрического базиса оправдан и тем, что электрод имеет конечную, хотя и малую толщину. Поэтому суммирование гармоник на краю электрода отвечает физической трактовке поведения поля на краю электрода малой толщины. При выбранной аппроксимации упрощаются вычислительные процедуры метода Галеркина уменьшается время вычислений и возрастает скорость сходимости.

Действительно, выполнение граничных условий непрерывности касательных компонент электрического поля на щели приводит к вычислению соотношений вида

$$\int_0^w \cos \frac{2\pi m x'}{w} \cos \frac{n\pi x}{d} dx = \int_0^w \sin \frac{2(m+1)\pi x'}{w} \sin \frac{n\pi x}{d} dx$$

Координата x' в разложениях E_x и E_z связано с исходной системой координат (рис 1) соотношением $x' = x + w/2 - d/2$.

Нормируем x' , $\xi = \frac{x'}{w}$. Обозначим $\frac{d-w}{2} = b$. Тогда на ширине щели

$$E_z(\xi) = \sum_{m=0}^M b_m \sin 2\pi(m+1)\xi, \quad E_x(x) = \sum_{m=0}^M a_m \cos 2\pi m \xi.$$

Найдём вспомогательные величины [2]

$$F_n = \frac{w}{d} \alpha_0 \sum_{m=0}^M a_m \int_0^1 \cos(q_m \xi) \cos(q_n \xi + \alpha_n) d\xi, \quad G_n = \frac{w}{d} \sum_{m=0}^M b_m \int_0^1 \sin(p_m \xi) \sin(q_n \xi + \alpha_n) d\xi,$$

где $q_m = 2\pi m$, $q_n = \frac{n\pi w}{d}$, $\alpha_n = \frac{n\pi b}{d}$, $\alpha_0 = \begin{cases} 1/2, & \text{при } n = 0 \\ 1, & \text{при } n \neq 0 \end{cases}$.

Интегралы в F_n и G_n вычисляются точно. Представим F_n и G_n в виде

$$F_n = \frac{w}{2d} \alpha_0 \sum_{m=0}^M a_m J_{mk}^{(F)}, \quad G_n = \frac{w}{2d} \sum_{m=0}^M b_m J_{mF}^{(G)},$$

где $J_{mk}^{(F)} = \frac{\sin(q_m + q_n + \alpha_n) - \sin \alpha_n}{q_m + q_n} + \frac{\sin(q_m - q_n - \alpha_n) + \sin \alpha_n}{q_m - q_n}$,

$$J_{mF}^{(G)} = \frac{\sin(p_m - q_n - \alpha_n) + \sin \alpha_n}{p_m + q_n} + \frac{\sin(p_m + q_n + \alpha_n) - \sin \alpha_n}{p_m + q_n}.$$

Выполнение условий непрерывности касательных составляющих магнитного поля на щели и применение процедуры Галёркина приведет к СЛАУ относительно неизвестных коэффициентов a_m и b_m . Представим её в виде

$$\sum_{m=0}^M b_m X_{ms}^{(11)} + \sum_{m=0}^M a_m X_{ms}^{12} = 0$$

$$\sum_{m=0}^M b_m X_{ms}^{(11)} + \sum_{m=0}^M a_m X_{ms}^{12} = 0$$

$$\text{где } X_{ms}^{11} = \sum_{n=0}^{\infty} f_{11,n}(\gamma) J_{mn}^{(G)} J_{sn}^{(G)}, X_{ms}^{12} = \sum_{n=0}^{\infty} f_{12,n}(\gamma) J_{mn}^{(F)} J_{sn}^{(G)}, X_{ms}^{21} = \sum_{n=0}^{\infty} f_{21,n}(\gamma) J_{mn}^{(G)} J_{sn}^{(F)},$$

$$X_{ms}^{22} = \sum_{n=0}^{\infty} f_{22,n}(\gamma) J_{mn}^{(F)} J_{sn}^{(F)}.$$

Величины $f_{11,n}(\gamma) \dots f_{22,n}(\gamma)$ для щелевой линии на основе многослойной нанокомпозитной пленки, вычисляются с использованием переходных матриц.

Определитель матрицы СЛАУ должен быть равен нулю, что возможно только при значении γ , как корня этого уравнения. Асимптотика рядов в матричных элементах определяется как n^{-2} , что является существенно более быстрым убыванием, чем в случае разложения полей по полиномам Чебышева [2].

Модель температурной и полевой зависимости диэлектрической проницаемости в каждом нанослое $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ была принята в виде [5]

$$\varepsilon(\eta, \xi) = \frac{\varepsilon_{00}(x)}{\left[(\xi^2 + \eta^3)^{\frac{1}{2}} + \xi \right]^{\frac{2}{3}} + \left[(\xi^2 + \eta^3)^{\frac{1}{2}} - \xi \right]^{\frac{2}{3}} - \eta},$$

где $x=(0, \dots, 1)$ – концентрация бария,

$$\varepsilon_{00}(x) = \frac{C(x)}{T_c(x)}, \quad \eta(x) = \frac{\Theta_F}{4 \cdot T_c(x)} \sqrt{1 + \left(\frac{4 \cdot T}{\Theta_F} \right)^2} - 1, \quad \xi = \frac{E}{E_H},$$

где: E – напряженность электрического поля, E_H – нормирующее поле, Θ_F - температура Дебая, а концентрационная зависимость постоянной Кюри $C(x)$ и температуры Кюри-Вейса $T_c(x)$ была принята в виде

$$C(x) = 10^5 \cdot (0.78 + 0.76 \cdot x^2), \quad T_c(x) = 42 + 439 \cdot x - 96 \cdot x^2.$$

Постановка задачи расчета постоянной распространения электромагнитной волны в щелевой линии передачи на основе нанокомпозитной сегнетоэлектрической пленки и разработанный метод решения адекватны реальной модели щелевой линии. Поэтому численные результаты могут быть весьма близки к экспериментальным. Расчеты выполнены для широкого диапазона частот и размеров поперечного сечения щелевой линии.

На рис. 1.а. представлены расчетные температурные зависимости γ для различных нанокомпозитных пленок.

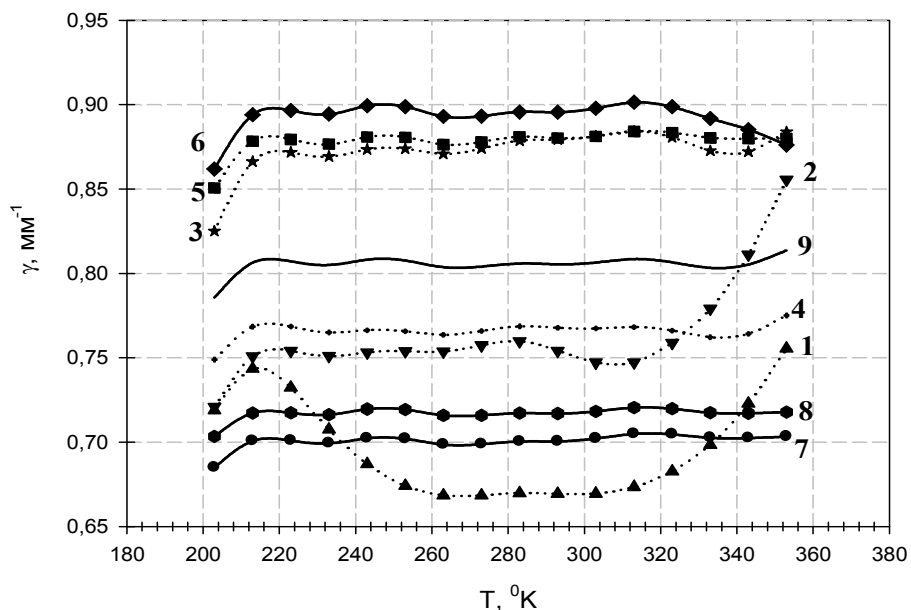


Рис.1.а . На частоте 10 ГГц, Расчеты выполнены для многослойных структур: 1- трехслойной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной 1.89 мкм, состава $x_1 - 0.4$, $x_2 - 0.6$, $x_3 - 1.0$. 2- четырехслойной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной 1.95 мкм, состава $x_1 - 0.4$, $x_2 - 0.5$, $x_3 - 0.6$, $x_4 - 0.9$. 3- пятислойной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной 2.5 мкм, состава $x_1 - 0.4$, $x_2 - 0.5$, $x_3 - 0.6$, $x_4 - 0.7$, $x_5 - 0.9$. 4- шестислойной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной 2.5 мкм, состава $x_1 - 0.1$, $x_2 - 0.4$, $x_3 - 0.5$, $x_4 - 0.6$, $x_5 - 0.7$, $x_6 - 0.9$. 5- семислойной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной 2.54 мкм, состава $x_1 - 0.3$, $x_2 - 0.4$, $x_3 - 0.5$, $x_4 - 0.6$, $x_5 - 0.7$, $x_6 - 0.8$, $x_7 - 0.9$. 6- восьмислойной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной 2.45 мкм, состава $x_1 - 0.2$, $x_2 - 0.3$, $x_3 - 0.4$, $x_4 - 0.5$, $x_5 - 0.6$, $x_6 - 0.7$, $x_7 - 0.8$, $x_8 - 0.9$. 7- девятислойной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной 1.38 мкм, состава $x_1 - 0.1$, $x_2 - 0.3$, $x_3 - 0.4$, $x_4 - 0.5$, $x_5 - 0.6$, $x_6 - 0.7$, $x_7 - 0.8$, $x_8 - 0.9$, $x_9 - 1$. 8- десятислойной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной 1.75 мкм, состава $x_1 - 0.1$, $x_2 - 0.2$, $x_3 - 0.3$, $x_4 - 0.4$, $x_5 - 0.5$, $x_6 - 0.6$, $x_7 - 0.7$, $x_8 - 0.8$, $x_9 - 0.9$, $x_{10} - 1.0$. 9- одиннадцатислойной сегнетоэлектрической структуры суммарной толщиной 2.61 мкм, состава $x_1 - 0$, $x_2 - 0.1$, $x_3 - 0.2$, $x_4 - 0.3$, $x_5 - 0.4$, $x_6 - 0.5$, $x_7 - 0.6$, $x_8 - 0.7$, $x_9 - 0.8$, $x_{10} - 0.9$, $x_{11} - 1.0$.

В электродинамической модели щелевой линии ее поперечное сечение ограничено прямоугольной областью с металлическими границами рис. 1. Поэтому разложение в ряд Фурье электромагнитного поля по координате x в каждой частичной области определяется тригонометрическими функциями $\cos\left(\frac{n\pi x}{d}\right)$ и $\sin\left(\frac{n\pi x}{d}\right)$ обеспечивающих граничные условия на металлических стенках. На рис. 2. представлено обоснование использования электродинамической модели щелевой линии для расчета копланарной линии.

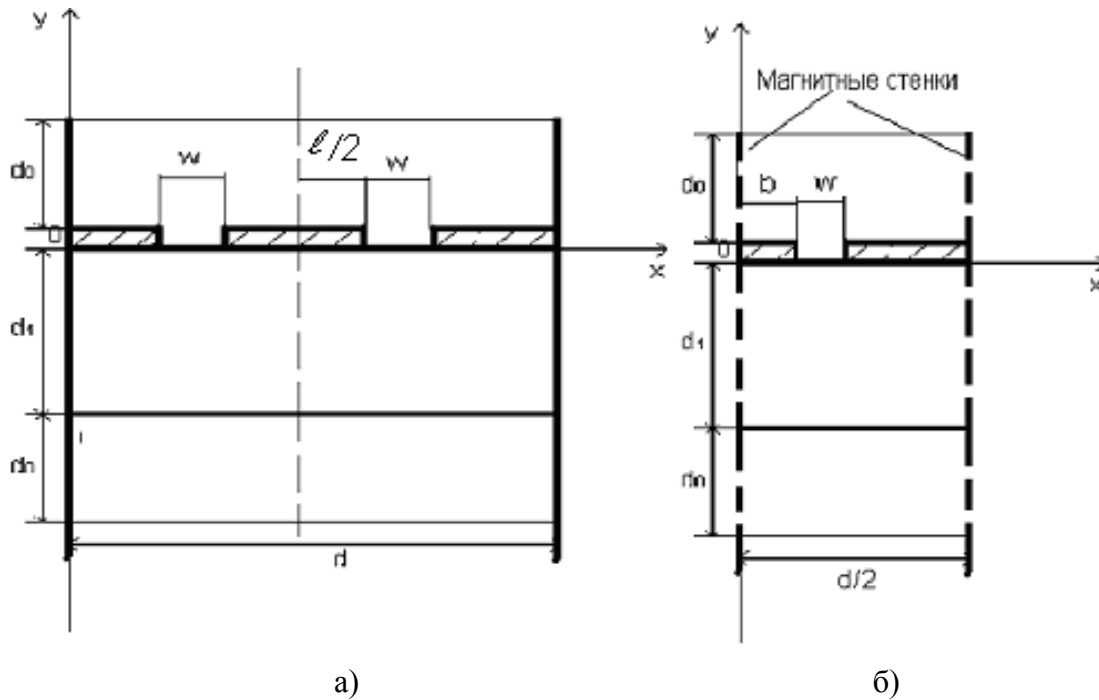


Рис. 2. Обоснование модели копланарной линии

Копланарная линия в силу антисимметричного типа поля допускает введение магнитной стенки в плоскости симметрии поперечного сечения (рис. 2.а). Боковые стенки при $y=0$ и $y=d$ и большой удаленности от плоскости симметрии оказывают исчезающе малое влияние на электродинамический процесс в линии. Поэтому природа этих границ не играет существенной роли. На этом основании переход от модели копланарной линии (рис.2.а) к щелевой линии(рис.2.б) с несимметричным расположением щели и двумя магнитными стенками (при $y=0$ и $y=d/2$) полностью обоснован. При условии, что $d \rightarrow \infty$ влияние правой стенки на электромагнитное поле в линии стремится к 0. Таким образом, рис. 2.б представляет собой модель копланарной линии. Наличие нанокompозитных слоев принципиально, но не изменяет модель. Размер "b" равен половине ширины центрального электрода копланарной линии.

На основании вышеизложенного в частичных областях поперечного сечения (рис. 2.) распределение электродинамических потенциалов сохраняется в форме соотношений (1) при условии, что в них следует заменить $\cos\left(\frac{n\pi x}{d}\right)$ на

$$\sin\left(\frac{n\pi x}{d}\right)$$

и наоборот. Эта замена допускается граничными условиями для векторных потенциалов, касательных к магнитным стенкам при $y=0$ и $y=d/2$. Процедура сшивания полей на границах частичных областей в модели рис. 2.б полностью совпадает с изложенной выше. Различие возникает при сшивании полей на границах N-го нанослоя под электродами линии и области над электродами линии. Опустим подробности дальнейшего анализа и приведем результаты расчета копланарной линии представленные на рис. 3.

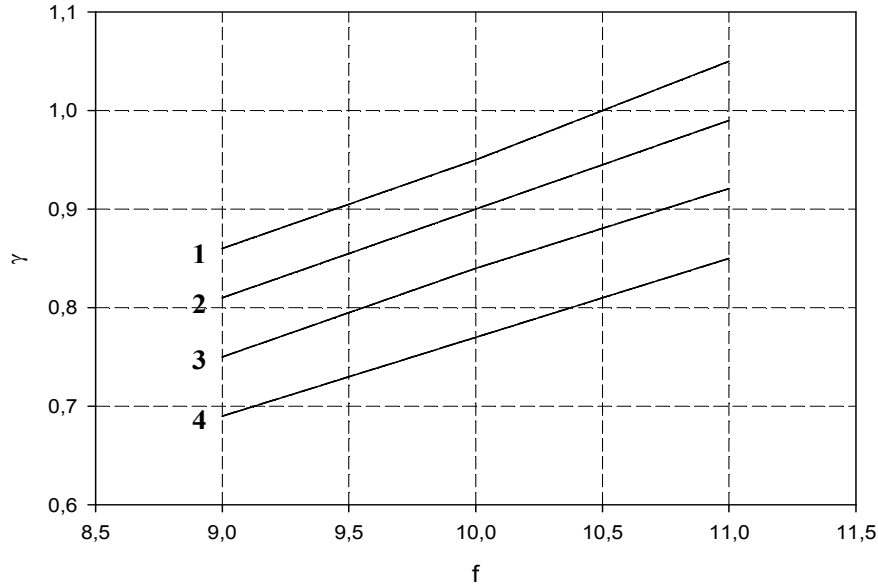


Рис.3. Зависимость постоянной распространения в копланарной линии при значениях диэлектрической проницаемости СЭП 1 – 1200, 2 – 1000, 3 – 800, 4 – 600, $l=50\text{мкм}$, $w=100\text{мкм}$, $f=10\text{ГГц}$.

Копланарную линию можно рассматривать как две сильно связанные щелевые линии одинаковой ширины, расположенные симметрично относительно их общего электрода. Очевидно, что элементом связи является электрод, ток через который, связывает поля отдельных линий в общий электродинамический мод копланарной линии. Понятно, что он является антисимметричным. Поэтому, возбуждение копланарной линии должно быть выполнено с учетом этой особенности.

Щелевые и копланарные линии, выполненные на основе сегнетоэлектрических пленок имеют очень узкие щели и узкий электрод (в копланарной линии). Поэтому в копланарных линиях всегда существует опасность переизлучения копланарного мода в щелевой мод, возмущенный электродом линии. Поэтому в ряде случаев, ради сохранения антисимметричного мода, приходится искусственным образом поддерживать 180° – сдвиг между электродом и общей металлизацией. Поэтому, чтобы избежать переизлучения копланарного мода сместим центральный электрод из положения симметрии (используемый в качестве электрода на который подается управляющее напряжение), тем самым, исключим необходимость поддержания антисимметричного мода. В такой конструкции будет возбуждаться устойчивый щелевой мод, образованный двумя связанными щелевыми линиями. На рис. 4. представлено поперечное сечение двух щелевой линии. Электродинамический анализ представленной линии будет отличаться от анализа щелевой линии, только на этапе выполнения граничных условий вдоль щели (при $y=0$). В рассматриваемом случае они таковы

$$E_{x,LSE}^0 + E_{x,LSM}^0 = \begin{cases} \sum_{i=1}^2 f_i(x) \text{ на щели} \\ 0 \text{ на металле} \end{cases}, \quad E_{z,LSE}^0 + E_{z,LSM}^0 = \begin{cases} \sum_{i=1}^2 g_i(x) \text{ на щели} \\ 0 \text{ на металле} \end{cases}.$$

В этих соотношениях t – номер щели $f_t(x)$ и $g_t(x)$ распределение касательных полей вдоль щелей.

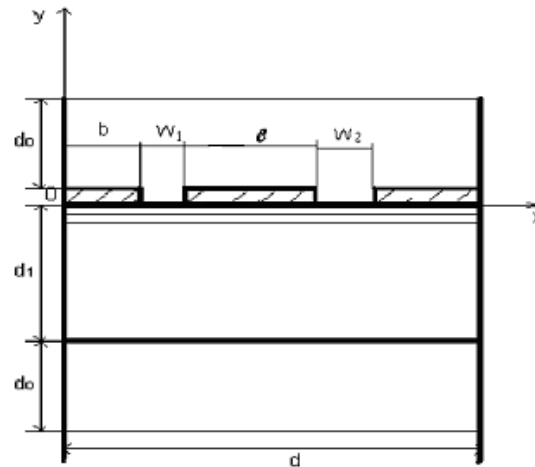


Рис. 4. Поперечное сечение двухщелевой линии.

Волновое сопротивление линии передачи определено точно, если в ней существует ТЕМ тип поля. В иных случаях определение волнового сопротивления основано на определении тока, напряжения и переносимой мощности с той мерой достоверности, которая может быть принята с позиции инженерной практики. В щелевой линии гибридный тип электромагнитной волны неразрывно связан с приближенным способом определения тока и напряжения.

Конструирование резонаторов и фильтров на основе щелевых линий базируется на основе определения волнового сопротивления через мощность и напряжение

$Z_0 = \frac{1}{2} \frac{U_m^2}{P}$, где U_m - амплитуда напряжения между краями щели, P - переносимая мощность. Мощность в линии передачи может быть определена через вектор Пойнтинга с помощью соотношения

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_s \left[\overline{E_m H_m^*} \right] ds = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_s (E_x H_y^* - E_y H_x^*) ds,$$

где s - поперечное сечение линии изображенной на рис. 4., E_m , H_m - комплексные амплитуды напряженности электромагнитного поля.

Известно, что волновое сопротивление линии устойчиво к распределению поля, поэтому можно допустить, что ошибка в его определении будет мала (во втором порядке) по отношению к отклонению поля в первом порядке от истинного вида. Это замечание необходимо сделать для того, чтобы обосновать использование значение волнового сопротивления, определенного для щелевой линии с однородной сегнетоэлектрической пленкой. В ином случае, прямой расчет волнового сопротивления с многослойной структурой сегнетоэлектрической пленки становится весьма трудоемким, при том, что ожидаемый точный результат незначительно должен отличаться от приблизительного. В диссертации выполнен расчет волнового сопротивления для щелевой и многощелевой линий с однородной сегнетоэлектрической пленкой с последующей заменой постоянной распространения на эффективную постоянную распространения волны в линии с нанокompозитной пленкой. Опустим процедуру расчета и представим результаты в виде зависимости изображенных на рис. 5

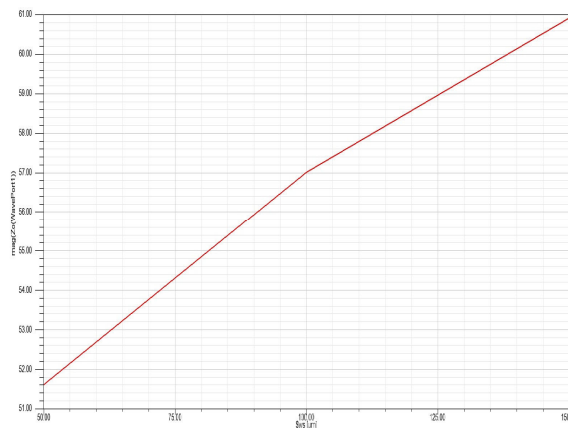


Рис.5. Зависимость волнового сопротивления щелевой линии при $w=100\text{мкм}$, $d_1=1\text{мкм}$, $\epsilon=600$.

В разделе три выполнен анализ частотных свойств планарных объемных резонаторов на основе расчета постоянной распространения волнового сопротивления в линиях передачи. Отрезки щелевых линий длина которых кратна половине длины волны, обладают резонансными свойствами. Резонансные отрезки щелевых линий на основе СЭП имеют дополнительное качество заключающееся в перестройке их АЧХ при изменении диэлектрической проницаемости СЭП. Очевидно, что резонаторы на отрезках линий могут быть выполнены в различных топологических вариантах и могут быть включены в микрополосковую линию передачи в качестве перестраиваемых контуров эквивалентных резонаторов. Резонаторы могут быть приведены к эквивалентным контурам параллельным или последовательным в зависимости от выбранной клеммной плоскости. Рассмотрим частотные характеристики различных видов резонаторов. Длина резонаторов $l = \frac{\pi}{\gamma}$.

В общем случае γ , является комплексной величиной $\gamma = \gamma' - j\gamma''$, где γ'' обязана потерям в СЭП и электродах линии. В практических случаях γ'' много меньше γ' . В диссертации получены соотношения для расчета эквивалентной индуктивности L , емкости C и собственной добротности Q_0 объемных резонаторов. Резонансная частота ω_0 определяется зависимостью $\gamma(\omega)$ для различных типов линий. Для короткозамкнутого полуволнового отрезка линии эти параметры равны $L = Z_s \frac{1}{2} \frac{\partial \gamma'}{\partial \omega} \Big|_{\omega_0}$, $R = Z_s \gamma'' l$, $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$, где Z_s волновое сопротивление линии, образующей резонатор. Собственная добротность резонатора равна $Q_0 = \frac{\omega_0}{2\gamma''} \frac{\partial \gamma'}{\partial \omega} \Big|_{\omega_0}$. Полагая, что γ'' определяется малыми значениями вызванными потерями в СЭП и электродах, можно определить собственную добротность за счет потерь в СЭП в виде $Q_\epsilon = \frac{\omega_0}{2\epsilon \tan(\delta)} \frac{\partial \gamma'}{\partial \omega} \Big|_{\omega_0} \left(\frac{\partial \gamma'}{\partial \epsilon} \Big|_{\omega_0} \right)^{-1}$. где $\tan(\delta)$ - тангенс угла диэлектрических потерь, ϵ диэлектрическая проницаемость. Собствен-

ная добротность определяемая потерями в электродах равна $Q_\sigma = \frac{\omega_0}{2} \frac{\partial \gamma'}{\partial \omega} \Big|_{\omega_0}$. Результирующая собственная добротность равна $Q_0 = \frac{\zeta}{\tan(\delta) + \gamma''_\sigma (\epsilon \frac{\partial \gamma'}{\partial \epsilon})^{-1}}$ где

$$\zeta = \frac{f_0}{2} \left(\epsilon \frac{\partial f}{\partial \epsilon} \right)^{-1}.$$

Эквивалентные параметры разомкнутого полуволнового отрезка линии определяются для параллельного контура соотношениями $C = Y_s \frac{1}{2} \frac{\partial \gamma'}{\partial \omega} \Big|_{\omega_0}$, $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$, $G = Y_s \gamma''_l$, где Y_s волновая проводимость линии. АЧХ

контура определяется известным выражением $K^2(f) = \frac{1}{1 + Q_0 \frac{2\Delta f}{f_0}}$. На рис. 6.

представлены АЧХ резонатора для различных значений диэлектрической проницаемости СЭП в щелевой линии с $w=100\text{мкм}$, $Q_0=213$ $d_1=1\text{мкм}$.

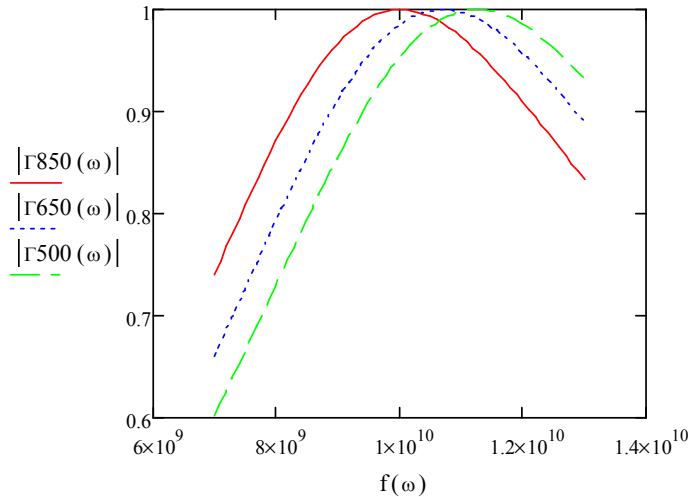


Рис. 6. АЧХ щелевого резонатора.

В разделе 4 выполнен анализ АЧХ ППФ и ПЗФ, образованных каскадным включением резонаторов с четверть волновыми связями. В основу анализа положена системная характеристика фильтра нижних частот

$K(p) = \frac{1}{1 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n}$, где p нормированная комплексная частота равная

$p = \frac{S}{\omega_0}$ $S = \sigma + j\omega$ комплексная частота, n – порядок фильтра. В зависимости от

порядка фильтра вычисляются полюса в левой полуплоскости комплексной частоты с функции $G(p) = K(p)K(-p)$. при выбранном виде аппроксимации функции $G(p)$. Для фильтра прототипа нижних частот эти процедуры выполнены и значения нормированных реактивных сопротивлений фильтра табулированы [1]. Частотным преобразованием АЧХ ФНЧ можно перейти к АЧХ ФВЧ и ППФ. В диссертации подробно изложен метод расчета фильтров. В качестве одного из

результатов расчета на рис. 7 приведены АЧХ ПЗФ третьего порядка, топология которого представлена на рис. 8.

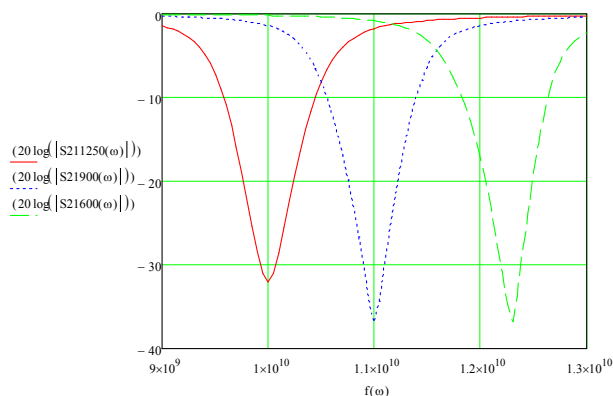


Рис.7.

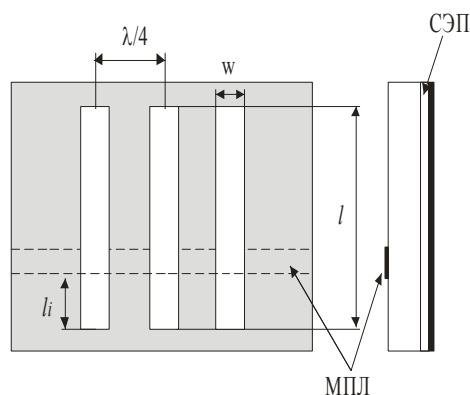


Рис.8

В Заключение диссертации приведены выводы по результатам проделанной работы

Список литературы

1. Д.Л. Матей, Л. Янг, Е.М.Т. Джонс, Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи, Изд-во “Связь”, Москва, 1972
2. Мироненко И.Г., Иванов А.А., Семёнов А.А., Карманенко С.Ф., Назаров И.А. Сегнетоэлектрические пленки и устройства на сверх - и крайне высоких частотах, Санкт -Петербург, изд. "Элмор", 2007г., 161 с.
3. Мироненко И.Г., Иванов А.А., Ястребов А.Н., и др. Щелевая линия. Патент по заявке № 2010 148 489/07 от 19.11.2010.
4. В.Н. Гридин, Е.И. Нефедов, Т.Ю. Черникова, Электродинамика структур крайне высоких частот. Под ред. Акад. О.М. Белоцерковского, Москва, “Наука” 2002.
5. Под ред. О.Г. Вендик, Сегнетоэлектрики в технике СВЧ, М.: Сов. радио, 1979 – 272с.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях рекомендованных ВАК России

1. Балашов В.М., Мироненко И.Г., Иванов А.А., Атия Амро, Вычисление рядов Бесселевых функций // Вопросы радиоэлектроники. 2010, № 1, С.127-132.
2. Балашов В.М., Мироненко И.Г., Иванов А.А., Атия Амро, Щелевая линия на основе нанокompозитных сегнетоэлектрических пленок // Вопросы радиоэлектроники. 2011, № 1, С. 25-27.
3. Атия Амро, Иванов А.А., Волновое сопротивление щелевых и многощелевых линий на слоистых подложках // Известия СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. 2011, № 8, С. 3-7.
4. Атия Амро, Иванов А.А., Полосовые фильтры диапазонов СВЧ и КВЧ с электрической перестройкой // Известия СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. 2011, № 9, С. 8-16.