

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твёрдого тела

Управление АЧХ полосно-пропускающим фильтром с помощью
подвижной диафрагмы в X-диапазоне частот
АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4052 группы
направления 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»
института физики

Сер

Середич Снежаны Васильеваны

Научный руководитель:

ассистент

должность, ученая степень, ученое звание

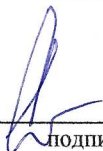
Зав. кафедрой физики твердого
тела:

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание

 17.06.2024
подпись, дата

Е.А. Рябов
инициалы, фамилия

 17.06.24
подпись, дата

А.В. Скрипаль
инициалы, фамилия

Саратов 2024

ВВЕДЕНИЕ

К фильтрам СВЧ предъявляются всё более высокие требования в отношении электрических характеристик, миниатюризации и адаптации к конструкторско-технологическим возможностям. Полосно-пропускающие фильтры выполняют функцию подавления нежелательных сигналов за пределами полосы пропускания. Фильтры также могут применяться как устройства для защиты входных цепей от мощного радиоимпульса. Для полосно-пропускающих фильтров важными параметрами амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), являются крутизна склонов полосы пропускания, уровень затухания в полосе заграждения, протяжённость полосы заграждения, а также величина потерь на частотах полосы пропускания. Несмотря на то, что в последние годы предложено большое количество конструкций фильтров СВЧ, активно ведутся исследования, связанные с разработкой и созданием устройств на основе не только традиционных, но и новых сред, которые ранее не применялись для этих целей. Совершенствование устройств фильтрации сигналов невозможно без исследований, направленных на улучшение управления амплитудой и фазой электромагнитных колебаний. Полученные в результате таких исследований знания позволяют проектировать устройства, удовлетворяющие конкретным техническим требованиям при использовании минимального количества резонаторов и обеспечивающие высокую крутизну склонов и высокий уровень заграждения в заданной частотной области.

Резонансные диафрагмы со сложной апертурой должны описываться более сложными эквивалентными схемами, чем стандартные резонансные окна. Корректное построение эквивалентной схемы сложных диафрагм позволяет эффективно использовать хорошо известные инструменты схемотехнического синтеза для расчётов характеристик прототипов СВЧ-фильтров.

Цель данной бакалаврской работы является исследование способов управления АЧХ полосно-пропускающего фильтра для прямоугольного волновода в X-диапазоне частот при помощи диафрагмы.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ литературы по основным линиям передач, их классификации и методам математического моделирования.
2. Исследование влияния диафрагмы на амплитудно-частотную характеристику коэффициента пропускания в прямоугольном волноводе.
3. Исследование влияния диафрагмы на амплитудно-частотную характеристику коэффициента пропускания периодических структур в прямоугольном волноводе.
4. Проведение анализа полученных результатов.

Работа выполнена на 78 страницах, состоит из введения, теоретического обзора, практической части, заключения, списка использованных источников, приложения. Работа содержит 61 рисунок, 1 таблицу, список использованных источников состоит из 44 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В разделе 1 описываются уравнения Максвелла, известные как фундаментальные уравнения классической электродинамики. Они представляют собой теоретическую основу, позволяющую описать поведение электромагнитных полей в сплошной среде или вакууме (без учёта квантовых эффектов), которые лежат в основе практически всех явлений, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни - от света, который мы видим, до радиоволн, которые мы используем для связи.

В разделе 2 приводится сравнение численных методов. Численные методы моделирования распространения электромагнитных волн используют уравнения Максвелла для определения характеристик устройства по его заданной физической геометрии. С их помощью можно анализировать произвольные структуры и обеспечивать очень точные результаты. Использование численных методов вместо дорогостоящих и трудоёмких экспериментов позволяет быстрее и эффективнее получать результаты. В работе рассматриваются следующие методы:

1. **Метод конечных разностей во временной области.** Метод был впервые предложен Кейном С. Йи в 1966 году для решения двумерных задач, и с тех пор получил широкое распространение. Основан на дискретизации уравнений Максвелла, описывающих взаимосвязь электрического и магнитного полей, с помощью метода конечных разностей. Это означает, что непрерывные поля разбиваются на отдельные точки в пространстве и времени, а производные заменяются конечными разностями.

Достоинства. Прост и понятен в реализации для большинства задач. Метод позволяет задавать материалы в каждой точке счётного объёма и поддерживает широкий спектр материалов, включая металлы, диэлектрики и материалы с нелинейными свойствами. работает во временной области и даёт результаты в широком диапазоне частот, что позволяет изучать поведение электромагнитного поля в динамике. Эффекты экранирования и влияние отверстий внутри и снаружи экрана могут быть рассчитаны прямо или косвенно.

Недостатки. Возникают погрешности, связанные с дискретизацией пространства и времени. Рассчитываемый объем должен быть разбит на очень большое количество ячеек (величина дискретизации должен быть мал по сравнению с минимальной длиной волны), что увеличивает объем памяти и время моделирования, а также усложняет моделирование задач с протяжёнными пространственными структурами. Моделирование сложных задач может потребовать значительных вычислительных ресурсов, особенно при увеличении размера сетки и количества временных шагов. Поскольку магнитное поле должно быть рассчитано в каждой точке счётного объёма, при определении магнитного поля на заданном расстоянии от источника счётный объем может оказаться слишком большим. Чтобы поместиться в память компьютера, счётный объем должен быть конечным, что обычно достигается путём задания искусственных граничных условий на счётном объёме. Однако их использование может исказить данные.

2. Метод конечного интегрирования. Метод был впервые представлен профессором Томасом Виландом в 1977 году. Метод дискретизации уравнений Максвелла в интегральной форме.

Достоинства. Метод требует небольшого объёма памяти и имеет малое время расчёта. Он может учитывать произвольное распределение и свойства материала, такие как анизотропия, нелинейность и дисперсия. Кроме того, нет ограничений на тип используемой сетки разбиения, так как поддерживаются как декартова система координат, так и не ортогональные сетки. Пространственная дискретизация уравнений Максвелла выполняется на двух ортогональных сетках (бинарная сетка): первичной и вторичной.

Недостатки. Основным недостатком метода является сложность дискретизации криволинейных структур.

3. Метод матрицы линий передачи. Метод был впервые предложен в 1971 году и с тех пор стал широко известным и универсальным методом анализа распределения электромагнитного поля. Основан на моделировании распространения электромагнитных волн через серию ячеек линии передачи с определенным пространственным периодом. Использует гибридную ячейку, состоящую из 6 компонентов поля, границы которых, соответствующие электрическим и магнитным стенкам, представлены короткозамкнутыми и разомкнутыми шунтирующими узлами соответственно.

Достоинства. Метод имеет гибкую и простую математическую формулировку, а также предоставляет возможность моделирования систем с распределенными параметрами.

Недостатки. Из-за использования периодических решёточных структур, существует типичное явление пропускания и режекции в частотной области.

4. Метод конечных элементов. Метод был впервые предложен в 1943 году математиком Рихард Курант. Основная идея метода конечных элементов заключается в том, что непрерывные величины могут быть аппроксимированы с помощью дискретной модели. Эта модель создаётся путём деления исследуемой области на конечное число меньших подобластей, называемых

элементами. Каждый элемент имеет набор узлов – точек, в которых оценивается непрерывное значение изучаемой величины. В каждом узле значение непрерывной величины рассматривается как переменная, которую необходимо определить в процессе решения.

Достоинства. На каждом этапе расчёта он имеет чёткую физическую интерпретацию, что облегчает контроль результатов и расчёт комбинированных конструкций, то есть конструкций, включающих элементы различной размерности. Метод обеспечивает высокую точность решения за счёт дискретизации области моделирования на большое количество конечных элементов.

Недостатки. Необходимость в эффективных генераторах конечных элементов и сложность соответствующих уравнений. Кроме того, при создании объёмной модели устройства необходимо дискретизировать занимаемую им область с переменным размером шага, что увеличивает вычислительные затраты, особенно при использовании многокомпонентных сред.

5. Метод моментов. Математический метод получения матричных уравнений. Сначала рассматривается характеристическое операторное уравнение, для его решения используется набор базисных функций в области оператора. Затем определяется набор весовых или тестовых функций в области значений оператора и берётся скалярное произведение с каждой функцией, чтобы получить систему уравнений, которую можно записать в виде матрицы. Если полученная матрица невырождена, значит, существует обратная матрица и можно решить систему уравнений. Выбор базисных и тестовых функций определяет точность решения. Поэтому ключевым шагом в использовании метода для решения задачи является тщательный выбор этих функций. Базисные функции должны быть линейно независимыми и хорошо аппроксимировать искомое решение, а тестовые функции также должны быть независимыми. При выборе этих функций важно учитывать требуемую точность решения, простоту вычисления элементов матрицы, максимальный размер матрицы, которую можно обработать, и хорошую обусловленность матрицы.

Достоинства. Подходит для работы с объектами сложной формы и обладает высокой скоростью вычислений, требуя относительно небольших ресурсов. Метод можно комбинировать с другими аналитическими и численными методами. В отличие от других методов, метод моментов требует дискретизации только поверхности, а не всего объёма, что снижает сложность процесса.

Недостатки. Трудности моделирования сложных внутренних задач и разнообразных сред. В некоторых случаях скорость расчётов методом моментов может быть ниже по сравнению с другими методами для более простых конфигураций объектов.

6. Метод эквивалентной схемы из частичных элементов. Он был предложен в 1972 году. Метод направлен на решение интегральных уравнений Максвелла, которые требуют решения плотных СЛАУ. При использовании этого метода структура разбивается на мелкие электрические элементы, и создаётся эквивалентная схема (матрица), описывающая связь между этими элементами, и решается полученная система линейных алгебраических уравнений.

Достоинства. аналогичны методу моментов. Однако в программный модуль можно добавить элементы схемы, чтобы смоделировать характеристики цепи, содержащей сосредоточенные элементы. Этот метод может применяться как в частотной, так и во временной области, что делает его идеальным для моделирования печатных плат. Кроме того, моделирование постоянного тока, учитывающее скин-эффект и дисперсию в диэлектрических материалах, относительно просто реализовать.

Недостатки. Аналогичны с методом моментов.

7. Гибридные методы. Существует множество различных численных методов, которые можно использовать для решения задач электромагнитного моделирования, но ни один из них не является эффективным для всех типов задач. Некоторые методы могут не подходить для описания неоднородных или нелинейных материалов, а другие могут испытывать трудности при

моделировании задач с большим рассеянием. Однако есть ситуации, когда необходимо учитывать все эти факторы. Чтобы решить эту проблему, можно объединить два или более методов в одной программе. Каждый метод можно применить к соответствующей проблемной области, наложив соответствующие граничные условия на границе между этими областями.

В разделе 3 приводится обзор программных пакетов для решения уравнений Максвелла приведённых численных методов. Были рассмотрены программные пакеты с открытым исходным кодом: openEMS, gprMax, Meep, FreeFEM, Elmer FEM, FEniCS, Bempp, PumaEM, Numerical Electromagnetics Code (NEC-2) – и коммерческие программные пакеты: Ansys HFSS, CST Studio Suite, COMSOL Multiphysics, Microwave Office.

В разделе 4 приводится обзор линий передач. Линии передачи можно разделить на два основных типа: регулярные и нерегулярные. Регулярная линия передачи имеет прямую и однородную форму поперечного сечения, а также неизменные электромагнитные свойства по всей своей длине. Этот тип линии считается однородным, если материал, заполняющий её поперечное сечение, также однороден. Напротив, нерегулярная линия передачи имеет изменяющиеся электромагнитные свойства по всей длине и может характеризоваться изменениями в форме или составе её поперечного сечения.

В разделе 5 приводится обзор матричной теории цепей СВЧ. При исследовании сложных СВЧ-устройств анализ и решение электродинамических задач может представлять собой серьёзную проблему. Поэтому на практике часто используются более простые методы из теории электрических цепей. Применение теории цепей в СВЧ-диапазоне основано на возможности перехода от рассмотрения электрических и магнитных полей, характеризующихся их напряжённостью, к эквивалентным напряжениям и токам на тех же участках СВЧ-цепи.

В разделе 6 приводится исследование влияния диафрагмы на АЧХ коэффициента пропускания в прямоугольном волноводе. Проводятся математические моделирования АЧХ различных диафрагм, помещённых в

прямоугольный волновод. Также приводятся исследования влияние угла поворота диафрагмы на спектр пропускания.

В разделе 7 приводится исследование влияния диафрагмы на АЧХ коэффициента пропускания периодических структур в прямоугольном волноводе. В работе рассматриваются периодические структуры с различным дефектом в центре. При добавления диафрагмы в периодическую структуру без дефекта уменьшается коэффициент пропускания полосы пропускания, также появляется резонансный пик пропускания. При увеличении высоты диафрагмы резонансный пик смещается в низкочастотную область. При добавлении диафрагмы в середину периодической структуры с дефектом квадрат, появляется резонансный пик пропускания. При увеличении высоты диафрагмы резонансный пик смещается в низкочастотную область. При смещении диафрагмы из середины, резонансный пик остаётся, но при увеличении высоты дополнительно уменьшается коэффициент пропускания пика. При добавлении диафрагмы в периодическую структуру с дефектом в форме квадранта круга появляется резонансный пик пропускания. При увеличении высоты диафрагмы резонансный пик смещается в низкочастотную область. При добавлении диафрагмы в периодическую структуру с дефектов в виде двух противоположащих квадрантов круга появляется резонансный пик пропускания. При увеличении высоты и ширины диафрагмы резонансный пик не смещается при угле поворота 0 градусов. Для диафрагмы с углом поворота 90 градусов при увеличении высоты диафрагмы резонансный пик смещается в низкочастотную область. При увеличении угла поворота диафрагмы высотой $h = 10$ мм наблюдается увеличение коэффициента пропускания с резонансным пиком, который смещается в низкочастотную область. Изменение угла поворота диафрагмы высотой $h = 5$ мм приводит к смещению пика пропускания на 0,15 ГГц. При $h = 7$ мм можно добиться смещения частоты на 0,45 ГГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения бакалаврской работы можно сделать следующие выводы.

1. Проведён литературный обзор по линиям передач, их классификации и методам математического моделирования. Показаны достоинства и недостатки методов математического моделирования и продемонстрирован обзор программных пакетов по каждому методу. В работе применялся программный пакет openEMS, в основе которого лежит решение уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области.

2. Исследовано влияние диафрагмы на амплитудно-частотную характеристику коэффициента пропускания в прямоугольном волноводе. Демонстрируется управление амплитудно-частотной характеристикой коэффициента пропускания при помощи поворота диафрагмы.

3. Исследовано влияние диафрагмы на амплитудно-частотную характеристику коэффициента пропускания периодических структур. Наблюдается уменьшение полосы пропускания при увеличении высоты диафрагмы, расположенной в периодической структуре. Также демонстрируется управление положением резонансным пиком пропускания.

4. Показано, что использование диафрагмы с высотой h до 7 мм позволяет управлять положением резонансного пика пропускания для периодической структуры с дефектом в форме квадранта круга и в форме двух противоположащих квадрантов круга. Для периодической структуры с дефектом в форме двух противоположащих квадрантов круга диафрагма высотой $h = 7$ мм и шириной $w = 20$ мм при повороте позволяет смещать резонансный пик пропускания на 0,45 ГГц.

Сер