

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твёрдого тела

Исследование разупорядоченных слоистых структур с
переменной эффективной диэлектрической проницаемостью

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 201 группы
направления (специальности) _____
код и наименование направления (специальности)
факультета нано- и биомедицинских технологий, Саратовский Государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского

Сычевой Екатерины Александровны

Научные руководители
профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

доцент, к.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

Д.В. Пономарев

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой
Заслуженный деятель науки РФ,
профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

Д.А. Усанов

инициалы, фамилия

Саратов 2016

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение | 3 |
| 1 Согласованная нагрузка | 4 |
| 2 Математическая модель слоистой волноводной согласованной нагрузки | 5 |
| 3 Компьютерное моделирование взаимодействия СВЧ-излучения с различными типами согласованных нагрузок и проведение оптимизации полученных измерений | 6 |
| 4 Моделирование амплитудно-частотных характеристик слоев с воздушными включениями | 8 |
| 5 Экспериментальные исследования | 8 |
| Заключение | 11 |
| Список литературы | 12 |

Введение

Эксперименты, связанные с применением СВЧ-излучения, были проведены еще век назад, но мощным толчком для развития этой области послужило начало второй мировой войны. Только тогда начались интенсивные исследования СВЧ-радиолокации. Именно с тех пор начинается особенно бурное развитие теоретических и экспериментальных исследований в области СВЧ-устройств, что связано как с модернизацией ранее известных устройств (согласующих элементов, делителей мощности, линий передачи и т.д.) для работы на более высоких частотах, так и с созданием новых устройств на основе достижений физики твёрдого тела (микростриповые линии передачи, интегральные схемы СВЧ, полупроводниковые управляющие устройства СВЧ и т.д.) [1].

Применение СВЧ-излучения достаточно разнообразно и области применения его довольно обширны. Так, большие успехи в развитии, благодаря применению сверхвысоких частот, были достигнуты в медицине, космических исследованиях, военной промышленности и технике, телевидении и др.

В настоящее время проведение работ в области применения сверхвысоких частот является актуальным и значимым. Большое количество исследований открывает новые перспективы использования приборов на основе СВЧ, расширяет границы дальнейшего изучения. Одним из классов поглощающих устройств в СВЧ-технике является поглощающая нагрузка. Данный тип нагрузки применяется во многих областях, например, радиолокационных системах, в различных СВЧ-устройствах, а также в измерительных лабораториях.

Целью данной магистерской работы является создание малогабаритных согласованных нагрузок на основе слоистых металлодиэлектрических структур

с расширением их рабочих диапазонов частот до стандартных поддиапазонов СВЧ-диапазона.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

- 1) Разбор и анализ литературы по предложенной теме.
- 2) Построена математическая модель слоистой металлодиэлектрической нагрузки.
- 3) Проведена оптимизация параметров слоистой нагрузки для получения заданных значений коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) в стандартных поддиапазонах СВЧ-диапазона.
- 4) Созданы диэлектрические слои с воздушными включениями и оптимизирована их структура для получения заданного значения эффективной диэлектрической проницаемости
- 5) Проведены экспериментальные исследования созданных нагрузок.

1 Согласованная нагрузка

Задача согласования источника энергии с нагрузкой заключается в выборе такого сопротивления нагрузки, при котором в цепи будут выполняться некоторые условия, называемые критериями согласования. Наиболее часто используется согласование по волновому сопротивлению – получение максимального коэффициента бегущей волны в линии передачи. Волновое сопротивление должно быть равно внутреннему сопротивлению; при этом в линии передачи отражённая волна отсутствует. Нагрузку, при которой отражённая волна отсутствует, называют согласованной. Таким образом, система с согласованной нагрузкой является неотражающей, что часто используется в СВЧ-технике[2].

Основной характеристикой согласованной нагрузки является модуль её коэффициента отражения $|R|$ или соответствующее значение КСВН

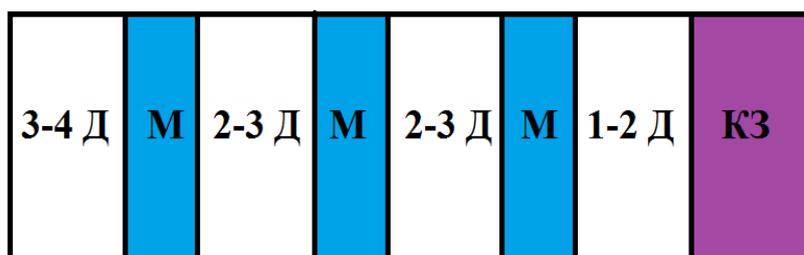
(коэффициент стоячей волны по напряжению) в заданной полосе частот. Коэффициент отражения и КСВН связаны друг с другом соотношением:

$$КСВН = \frac{1 + |R|}{1 - |R|} \quad (1)$$

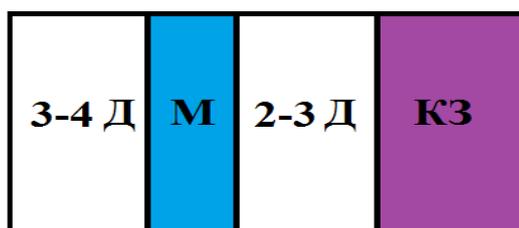
2 Математическая модель слоистой волноводной согласованной нагрузки

Слоистая волноводная согласованная нагрузка представляет собой набор диэлектрических и металлических слоев, полностью заполняющих по поперечному сечению короткозамкнутый отрезок прямоугольного волновода и расположенных перпендикулярно направлению падения электромагнитной волны.

Общее количество слоёв было выбрано от восьми до тринадцати, из которых некоторые слои – металлическая плёнка, а остальные диэлектрики с различной диэлектрической проницаемостью рис. 1. Перед слоем металла располагается от трёх до четырёх слоёв диэлектрика. Это обусловлено тем, что первые слои оказывают наибольшее влияние на величину КСВН. Слоистая нагрузка размещается в прямоугольном волноводе таким образом, чтобы диэлектрические проницаемости диэлектрических слоев до и после металлической пленки увеличивались по направлению к короткозамыкающей стенке волновода. Металлические плёнки нанесены на слои поликора толщиной 0,48 мм, это учитывается при расчётах как дополнительный диэлектрический слой.



(а)



(б)

Рис.1 (а) Схематичное представление выбранной металлодиэлектрической структуры (13 слоев), (б) – Схематичное представление выбранной металлодиэлектрической структуры (8 слоев)

Для теоретического описания характеристик металлодиэлектрических слоистых структур по спектрам отражения электромагнитного излучения, разработана теоретическая модель, позволяющая рассчитывать коэффициент отражения СВЧ-излучения для таких структур, содержащих тонкие нанометровые металлические слои[3].

3 Компьютерное моделирование взаимодействия СВЧ-излучения с различными типами согласованных нагрузок и проведение оптимизации полученных измерений

Используя метод матрицы передачи, было проведено компьютерное моделирование взаимодействия СВЧ-излучения с различными типами согласованных нагрузок, содержащих различное количество слоев диэлектриков и тонких металлических слоев. Следующим шагом стало проведение оптимизации числа слоев и их параметров для исследования возможности уменьшения продольного размера (вдоль волновода) нагрузки и получения требуемого значения коэффициента стоячей волны по напряжению в заданных частотных диапазонах[4].

Результаты показали, возможность расширения рабочего диапазона частот при одновременном сохранении малых габаритов нагрузки и уменьшении числа нанометровых металлических слоев до одного. Однако, при этом согласующие диэлектрические слои должны обладать значениями диэлектрической проницаемости, не соответствующей значениям диэлектрической проницаемости наиболее применяемых в практике СВЧ-материалов. В частности, наибольшие трудности представляет собой создание твердых материалов со значениями диэлектрической проницаемости 1,1 – 1,15.

Исходя из этого, решено было использовать слои с переменной эффективной диэлектрической проницаемостью, созданные на основе слоев широко применяемых в СВЧ технике диэлектрических материалов, содержащих упорядоченные массивы воздушных включений, представляющих собой в самом простом случае сквозные отверстия.

4 Моделирование амплитудно-частотных характеристик слоев с воздушными включениями

Уровень современных технологий создания СВЧ-материалов позволяет производить различного рода высокочастотные ламинаты и композиты с заданными значениями диэлектрической проницаемости, однако существуют ограничения как по минимально, так и по максимально возможным значениям диэлектрической проницаемости и толщинам слоев создаваемых композитных материалов. В то же время из результатов расчета следует, что в случае использования широко применяемых в СВЧ-технике диэлектрических пластин не обеспечивался необходимый рабочий диапазон частот. Для того чтобы избежать этих трудностей был предложен способ создания диэлектрических слоев с эффективной диэлектрической проницаемостью, величина которой определяется числом, расположением и геометрической формой воздушных включений в них

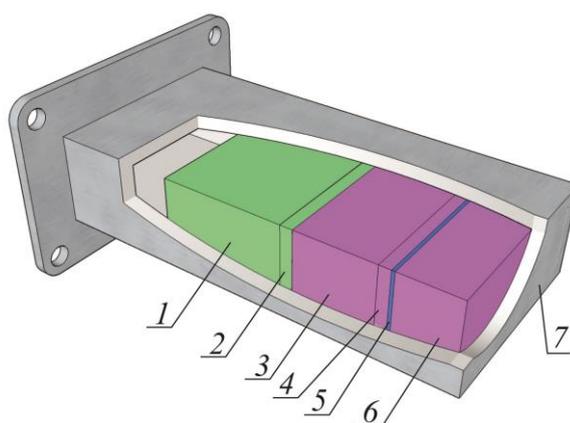
В пакете программ ANSYS HFSS было проведено компьютерное моделирование спектров отражения и прохождения СВЧ-излучения, взаимодействующего с отдельными слоями, содержащими воздушные включения, и оптимизация размера включений для получения необходимого значения эффективной диэлектрической проницаемости. Результаты электромагнитного моделирования и расчетов по представленным моделям «эффективной среды» демонстрируют хорошее количественно совпадение, что подтверждает возможность использования таких моделей для расчета параметров слоев для согласованных нагрузок.

На основе полученных данных была рассчитана компьютерная модель согласованной нагрузки, состоящей из слоев, содержащих массивы включений в виде сквозных цилиндрических отверстий. Теоретически рассчитанные в ANSYS HFSS частотные зависимости КСВН нагрузок продемонстрировали

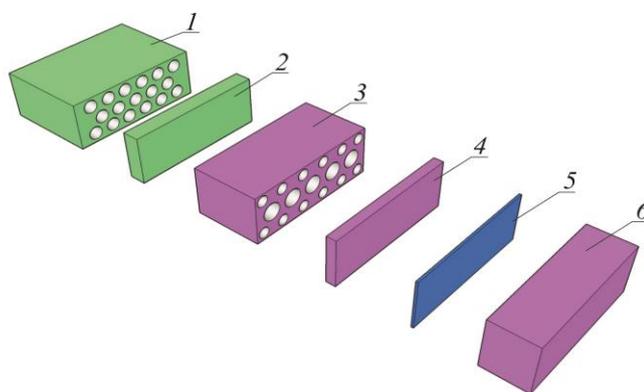
значения $K_{СВН} < 1.1$ в диапазоне частот 8,15-12,05 и $K_{СВН} < 1,15$ в диапазонах частот 25,95—37,50 ГГц, 37.50—53.57 ГГц.

5 Экспериментальные исследования

Согласно результатам, проведенной оптимизации и компьютерного моделирования, была собрана слоистая структура, состоящая из диэлектрических слоев с воздушными включениями и нанометровой металлической пленки на диэлектрической подложке.



(a)



(б)

Рис.2 Конструкция согласованной нагрузки (a) и металлодиэлектрической структуры (b), включающей слои композитного материала ($\epsilon:1-1.4; 3-6.15$), сплошные диэлектрические слои ($\epsilon:2-2.0; 4-9.6; 6-9.6$) и нанометровую металлическую пленку– 5 ($\rho=80 \text{ Ом}/\square$).

Для повышения технологичности создания слоев с эффективной диэлектрической проницаемостью и упрощения процесса настройки согласованной нагрузки, эти слои выполнялись в виде набора диэлектрических столбиков, посредством изменения числа которых становилось возможным управлять эффективной диэлектрической проницаемостью слоя.

Выбранные слои помещались вблизи короткозамкнутого конца волновода, при этом учитывался порядок расположения слоев в соответствии с результатами оптимизации в HFSS и контролировалось отсутствие воздушных зазоров между ними. Первый слой выполнялся сплошным, чтобы исключить влияние изменения влажности воздуха, находящегося во включениях.

Короткозамкнутый отрезок волновода с помощью коаксиального кабеля и коаксиально-волноводного перехода соединялся с векторным анализатором цепей «Agilent PNA-LNetwork Analyzer N5230A».

В ходе эксперимента удалось реализовать слоистые структуры согласованных нагрузок, обеспечивающих значения $K_{СВН} < 1,1$ в диапазоне 8-12 ГГц и $K_{СВН} < 1,15$ в диапазоне 25.95-37.50 ГГц, 37.50—53.57 ГГц. Таким образом, созданные согласованные нагрузки обладают расширенными до стандартных рабочими диапазонами частот, в которых имеют заданное значение $K_{СВН}$. Необходимо отметить, что нагрузки при этом имеют малые габариты, а число металлических нанометровых слоев уменьшено до одного. Эксперимент продемонстрировал возможность расширение рабочего диапазона частот слоистых согласованных нагрузок за счет использования в качестве согласующих диэлектрических слоев с переменной эффективной диэлектрической проницаемостью.

Результат частотной характеристики КСВН для диапазона частот 37,50—53,57 ГГц представлен на рис. 26

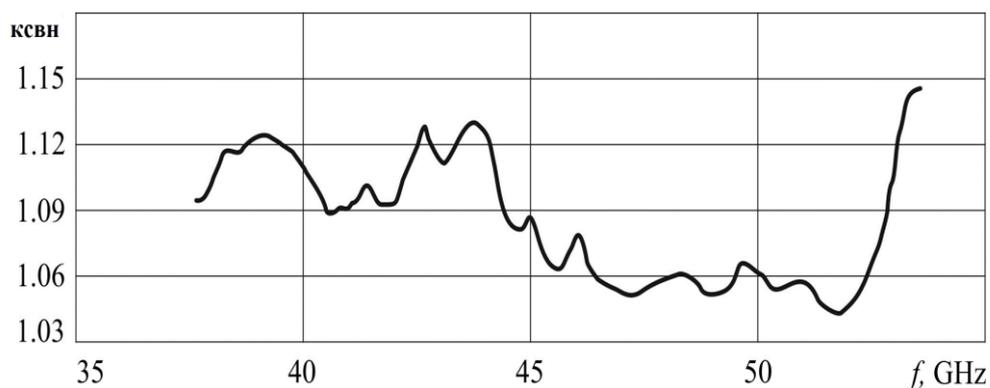


Рис. 26 Экспериментальная частотная зависимость КСВН в диапазоне 37.50—53.57 ГГц

На рис. 26 видно, что $КСВН < 1,15$ в диапазоне 37.50—53.57 ГГц. То есть в ходе эксперимента удалось получить широкий частотный диапазон, в котором значение КСВН не превышает 1,15. Данный результат демонстрирует возможность расширения рабочего диапазона частот слоистых согласованных нагрузок за счет использования в качестве согласующих диэлектрических слоев с переменной эффективной диэлектрической проницаемостью.

Заключение

В ходе выполнения данной магистерской работы была достигнута цель работы и получены следующие результаты:

1. Проведен анализ современных исследований в области согласованных нагрузок для диапазона сверхвысоких частот.
2. Проведен анализ различных моделей эффективной среды для реализации СВЧ-нагрузок, содержащих диэлектрические слои с управляемой эффективной диэлектрической проницаемостью.
3. Разработана математическая модель слоистой согласованной СВЧ-нагрузки с использованием диэлектрических слоев, содержащих упорядоченные массивы воздушных включений.
4. Создана малогабаритная волноводная согласованная нагрузка с использованием диэлектрических слоев с переменной эффективной диэлектрической проницаемостью.
5. Экспериментально получено значение $K_{СВН} < 1,1$ в диапазоне 8,15-12,05 и $K_{СВН} < 1,15$ в диапазоне 25,95—37,50 ГГц, 37.50—53.57 ГГц.

Список литературы

1. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А., Устройства СВЧ // М: Высшая школа, 1981.
2. Баранов С.А., Наймушин М.П., Исследование полоснопропускающих волноводных фильтров СВЧ и методов узкополосного согласования в волноводных трактах // Свердловск, 1987.
3. Усанов, Д.А., Скрипаль, А.В., Физика работы полупроводниковых приборов в схемах СВЧ // Изд. Сарат. ун-та, 1999, 376 с.
4. М.А. Коржавчиков. "Численное моделирование диэлектрических свойств увлажненных дисперсных систем" //Вестник РГРТУ, 2008, № 3 (выпуск 25), С. 59-65.