

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФГБОУ ВО «САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твёрдого тела

**Создание согласованных нагрузок на основе
разупорядоченных СВЧ фотонных кристаллов,
содержащих композитные металлодиэлектрические слои.**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ
студента 2 курса 201 группы

направление 11.04.04 «Диагностика нано- и биомедицинских систем» факультета
нано- и биомедицинских технологий

Скрябина Александра Анатольевича

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

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

доцент, к.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Д.В. Пономарёв

инициалы, фамилия

И. о. зав. кафедрой
профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2019

Введение

В настоящее время СВЧ-излучение приобрело обширное использование в разных сферах науки и техники, таких как, например, радиолокация, телекоммуникации, радарная техника, создание интегральных микросхем, метрология и разработка измерительной техники. СВЧ-излучение играет важную роль в изучении электрических свойств твердых тел. Когда на твердое тело, пребывающее в магнитном поле, падает излучение СВЧ-диапазона, то данное излучение сильно поглощается, если его частота одинакова циклотронной частоте электрона. Это явление получило название циклотронного резонанса, оно дает возможность определить эффективную массу электрона. Подобные измерения дают возможность получить большое количество ценных данных о электрических свойствах полупроводников, металлов [1].

Излучение СВЧ-диапазона представляет значительную часть в изучении космического пространства. Астрономы достаточно многое выяснили о нашей Галактике, изучая излучение с длиной волны 21 см, испускаемое водородом в космосе. Сейчас возможно определять скорость и узнавать направление перемещения рукавов Галактики, а кроме того расположение и плотность сфер газообразного водорода в космическом пространстве.

Волны дециметрово-сантиметрового диапазона сохранились объектом исключительно научного любопытства вплоть до начала Второй мировой войны, когда появилась настойчивая необходимость в новейшем и эффективном электронном оружии преждевременного обнаружения объектов. Тогда и возникли интенсивные исследования изучения СВЧ-радиолокации, несмотря на то, что возможности СВЧ-радиолокации были продемонстрирована ещё в 1923 г. в Учено-экспериментальной лаборатории ВМС СОЕДИНЕННЫХ ШТАТОВ АМЕРИКИ. Суть радиолокации в том, что в пространство испускаются короткие, интенсивные импульсы СВЧ-

излучения, а далее фиксируется часть данного излучения, возвратившаяся от искомого далёкого объекта – мореходного корабля либо летательного аппарата.

Развитие СВЧ-устройств в первую очередь обусловлено необходимостью в повышении количества каналов радиосвязи при повышающихся требованиях к ширине полосы частот одного канала (телеграф, радио, телевидение, затем радиолокация и т.д.). Но хотя самые первые предположения о возможности передачи электромагнитных волн посредством металлических трубок были сделаны ещё в конце XIX столетия (Дж. Дж. Томсон, 1893г., Рэлей, 1897г.), практические устройства были сделаны только лишь в 30-40-х годах прошлого столетия (именно тогда появились первые результативные источники непрерывных колебаний дециметрового и сантиметрового диапазонов волн). Последующее же формирование СВЧ-приборов было связано с возникновением радиолокации в 40-50-х годах. Именно с тех пор наступает в особенности ярое развитие теоретических и экспериментальных исследований в сфере СВЧ-приборов, что связано как с модернизацией прежде известных приборов (согласующих элементов, делителей мощности, линий передачи и т.д.) с целью работы в наиболее высоких частотах, так и с формированием новейших устройств на основе достижений физики твёрдого тела (микроструктурные линии передачи, интегральные схемы СВЧ, полупроводниковые управляющие устройства СВЧ и т.д.) [2].

В частности, существует тенденция к интенсивному развитию СВЧ техники в одном из самых перспективных и актуальных направлений – создании материалов, способных поглощать электромагнитное излучение (например, технология «Стелс»).

Одной из возможных областей применения такого рода материалов, представляющей важный практический интерес, является создание малогабаритных согласованных нагрузок. Они могут применяться как

самостоятельные поглотители мощности СВЧ-излучения, так и в качестве элементов сложных функциональных устройств.

Ряд новых возможностей при создании СВЧ согласованных нагрузок сантиметрового и миллиметрового диапазонов открывается при использовании свойств так называемых структур с фотонной "запрещенной" зоной (СВЧ фотонных кристаллов).

Целью данной работы является создание и исследование согласованных нагрузок на основе разупорядоченных СВЧ фотонных кристаллов, содержащих композитные диэлектрические слои и нанометровые металлические структуры.

Выпускная квалификационная работа содержит 3 главы:

- 1) Анализ современного состояния исследования в области создания согласованных нагрузок СВЧ-диапазона
- 2) Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик слоистых согласованных нагрузок СВЧ-диапазона, состоящих из композитных диэлектрических слоев и нанометровых металлических структур
- 3) Экспериментальное исследование характеристик слоистых согласованных нагрузок.

Компьютерное моделирование

Компьютерное моделирование выполнено в программе HFSS (High Frequency Structural Simulator).[20]

Расчет КСВН для многослойной структуры сложной пространственной геометрии со слоями, содержащими массивы воздушных включений (рисунок 6), и оптимизация геометрических формы и размеров этих включений для получения определенного значения эффективной диэлектрической проницаемости диэлектрического слоя проводились методом конечных элементов. В ходе процесса оптимизации была выбрана металлодиэлектрическая структура, состоящая из 7 слоев, параметры которых показаны в таблице 1.

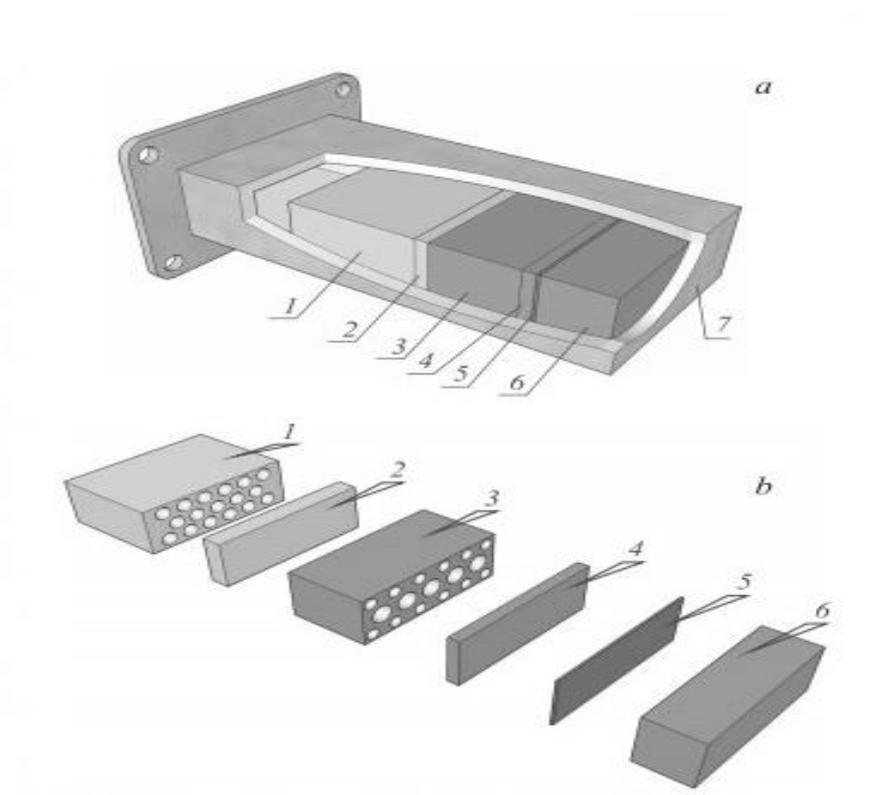


Рисунок 6. Конструкция согласованной нагрузки (а) и металлодиэлектрической структуры (б), включающей слои композитного материала (ϵ'' . 1-1.4, 3-6.15), сплошные диэлектрические слои (ϵ'' . 2-2.0, 4-9.6, 6-9.6) и нанометровую металлическую пленку-5 ($\rho=80$). [6]

Таблица 1.

Материал слоя	Толщина слоя	Диэлектрическая проницаемость	Сечение волновода
Диэлектрик, тефлон	0,5 мм	2,0	23×10 мм
Диэлектрик, тефлон	6,2 мм	1,4	
Диэлектрик, Al ₂ O ₃	3,0 мм	4,6	
Диэлектрик, Al ₂ O ₃	0,5 мм	9,6	
Металлический слой, Cr	40 нм	1	
Диэлектрик, Al ₂ O ₃	1,25 мм	4,3	
Диэлектрик, Al ₂ O ₃	1,47 мм	9,6	

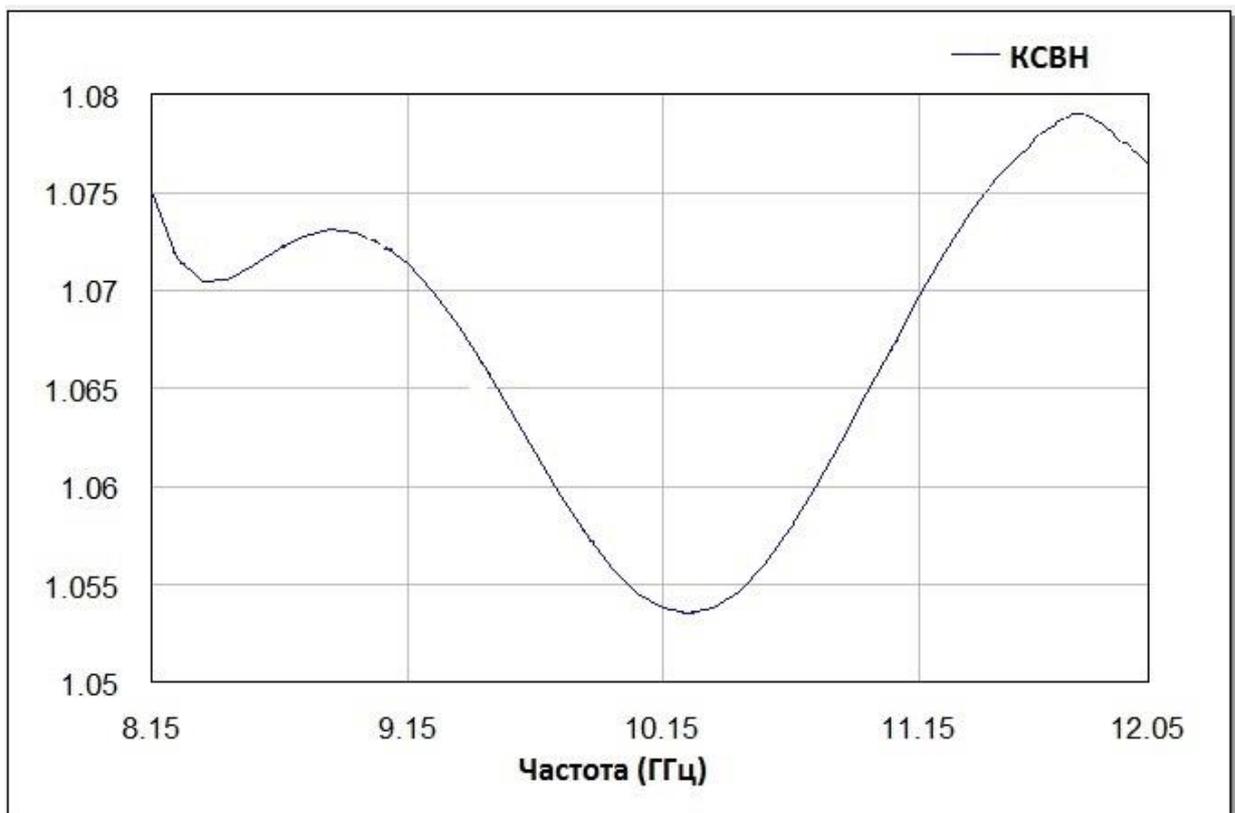


Рисунок 7. Теоретическая частотная зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению в диапазоне 8,15-12,05 ГГц.

Далее рассмотрим структуру, в которой нанометровая металлическая пленка заменена на композитный слой металла с воздушными включениями. Для получения данной структуры, исходя из данных полученных в расчете для металлодиэлектрической слоистой волноводной согласованной нагрузки

с нанометровой металлической пленкой. Нанометровая металлическая пленка заменяется на композитный слой, на основе напыленной на диэлектрическую подложку тонкой нанометровой металлической пленки, содержащей упорядоченные массивы воздушных включений, при этом во сколько раз уменьшаем площадь нанометрового слоя металла, во столько раз увеличиваем его толщину.

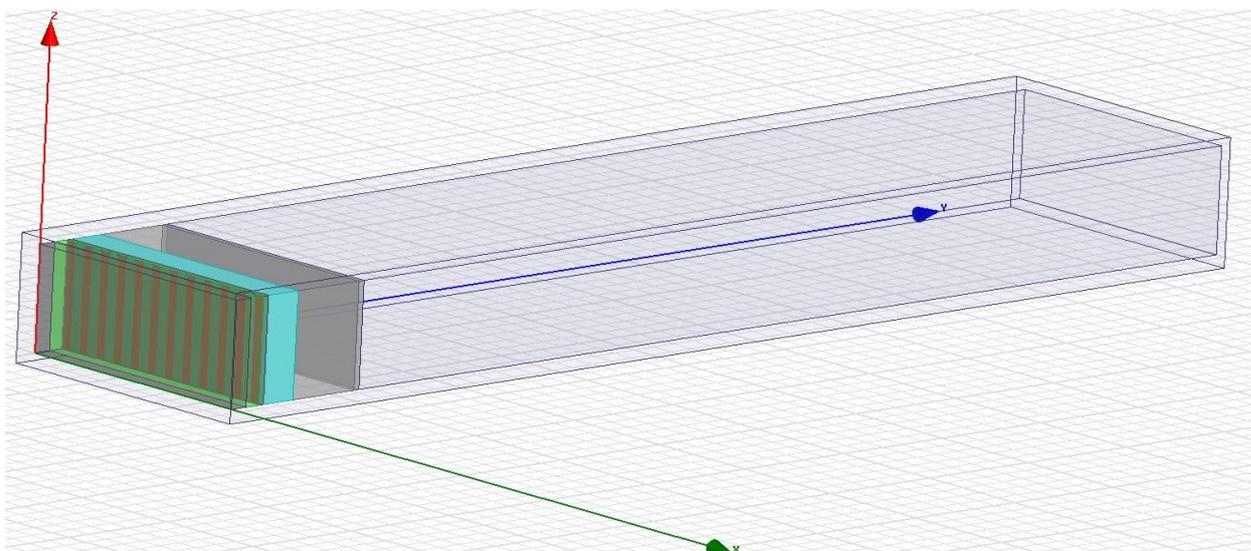


Рисунок 8. Модель металлодиэлектрической слоистой волноводной согласованной нагрузки, в которой нанометровая металлическая пленка заменяется на композитный слой, на основе напыленной на диэлектрическую подложку тонкой нанометровой металлической пленки, содержащей упорядоченные массивы воздушных включений.

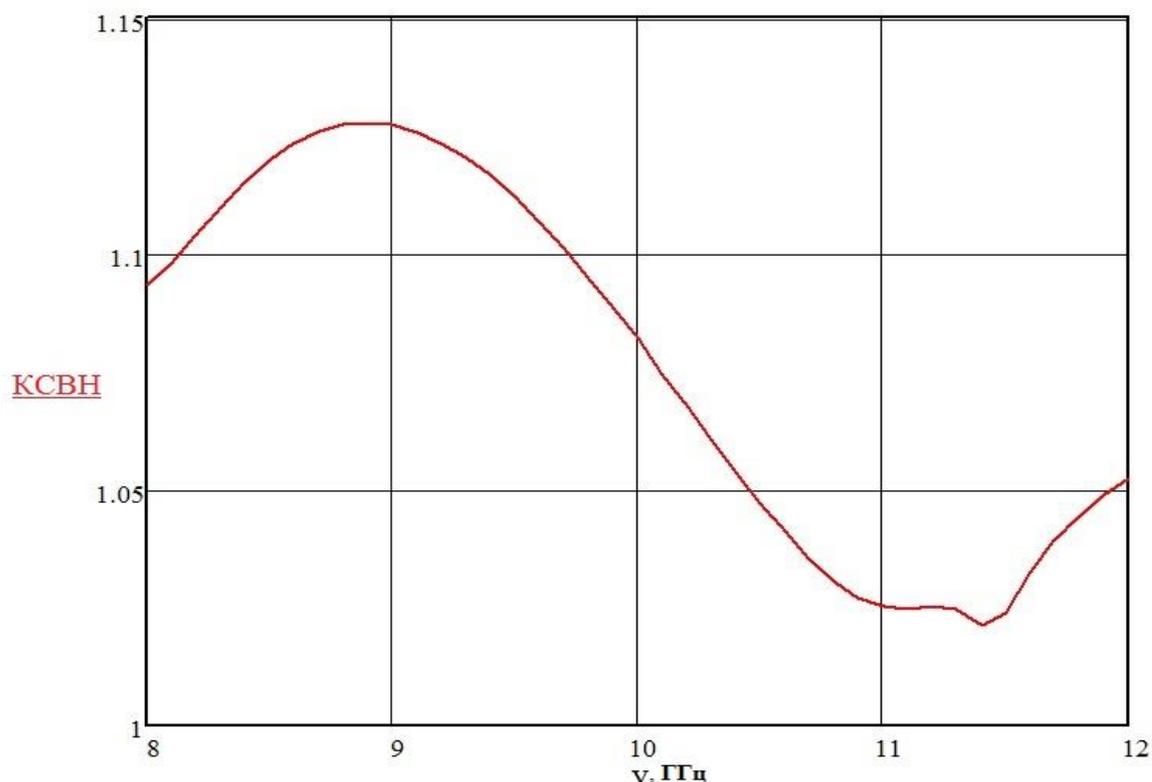


Рисунок 9. Теоретическая частотная зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению в диапазоне 8,15-12,05 ГГц полученная после моделирования в программе HFSS.

Методом оптимизации теоретически получены КСВН не более 1,12 в диапазоне частот от 8,15 до 12,05 ГГц. Метод оптимизации заключался в подборе числа, позиций, толщин и электрофизических параметров слоев нагрузки, а также числа, размеров и геометрической конфигурации включений в композитных слоях, для получения требуемого значения КСВН в заданном диапазоне частот.

Экспериментальное исследование характеристик слоистых согласованных нагрузок

Для получения композитного слоя, на основе напыленной на диэлектрическую подложку тонкой нанометровой металлической пленки, содержащей упорядоченные массивы воздушных включений, с помощью векторного анализатора цепей «Agilent PNA-X Network

Analyzer N5242A» (рисунок 10), были получены частотные зависимости КСВН нанометровой металлической пленки, помещенной между двумя слоями пенопласта (рисунок 11), которые вносились в короткозамкнутый отрезок волновода, с помощью коаксиального кабеля и коаксиально-волноводного перехода соединявшегося с векторным анализатором цепей (рисунок 12). Векторный анализатор цепей (ВАЦ) предназначен для измерения комплексных S-параметров линейных однопортовых и двухпортовых устройств, различных характеристик нелинейных цепей.

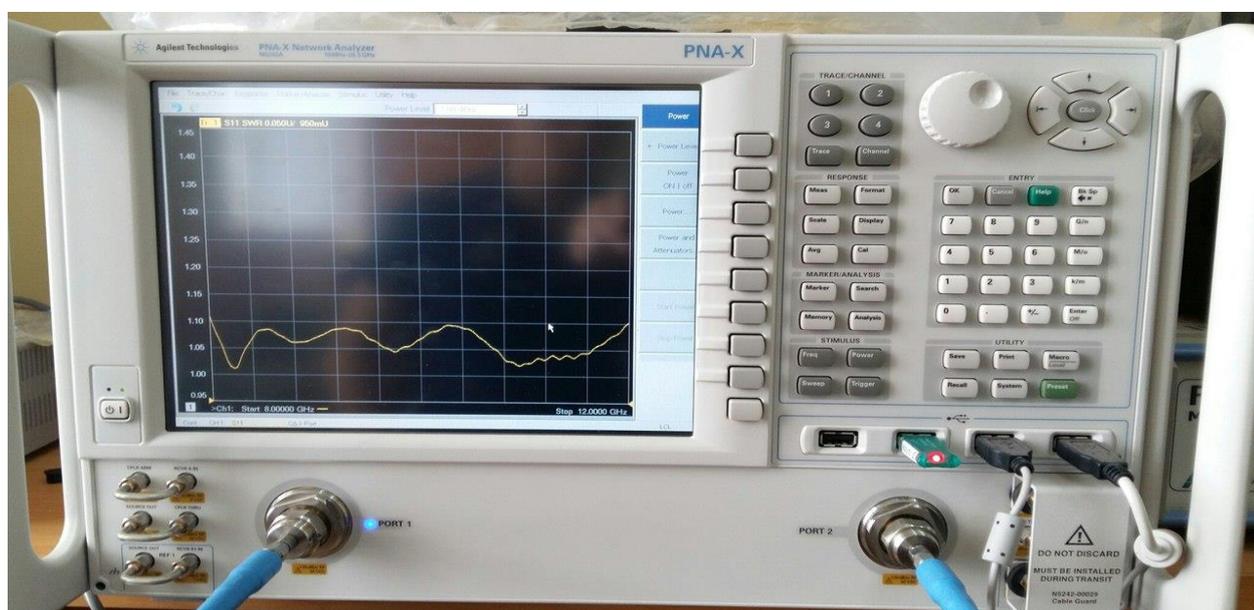


Рисунок 10. Векторный анализатор цепей «Agilent PNA-X Network Analyzer N5242A»



Рисунок 12. Нанометровая металлическая пленка.



Рисунок 12. Установка для проведения эксперимента.

С помощью функции векторного анализатора цепей «Memory trace», была зафиксирована кривая, показывающая значение КСВН данной нанометровой металлической пленки.

Далее в короткозамкнутый отрезок волновода помещалась, полученная согласно результатам, проведенной оптимизации и компьютерного моделирования, тонкая нанометровая металлическая пленка, содержащая упорядоченные массивы воздушных включений (рисунок 13).

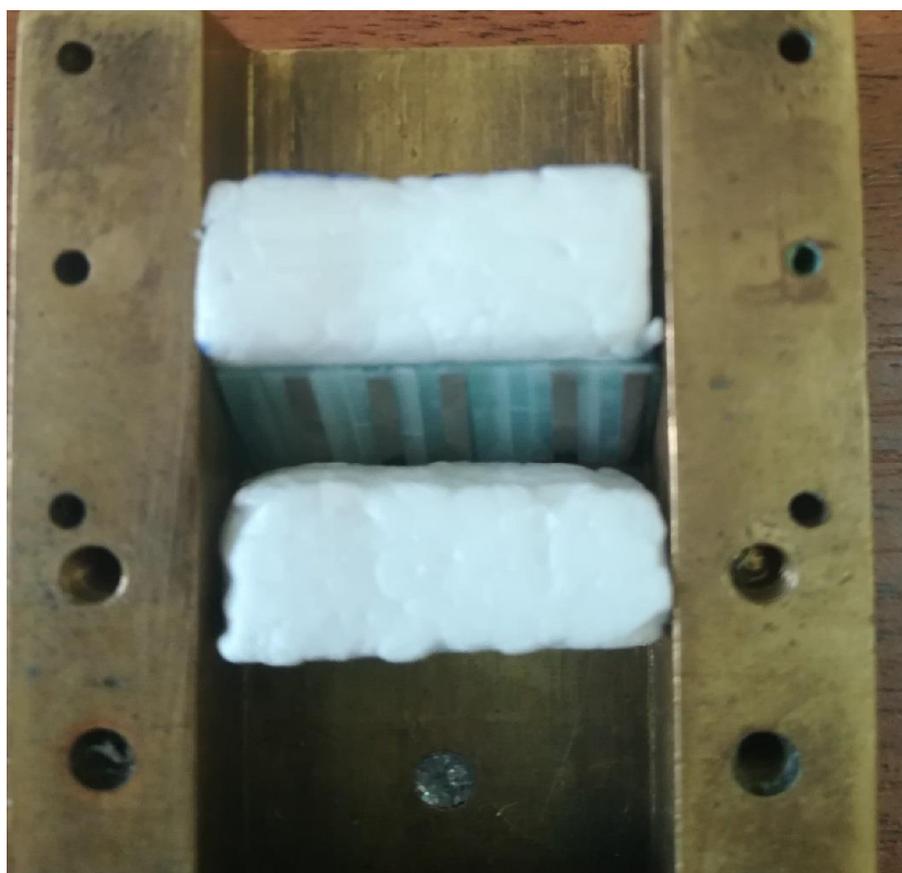


Рисунок 13. Нанометровая металлическая пленка, содержащая массивы воздушных включений.

Далее фиксировалась кривая КСВН нанометровой металлической пленки, содержащей массивы воздушных включений и сравнивалась с сохраненной кривой КСВН нанометровой металлической пленки.

На рисунке 14 можно увидеть максимально приближенные кривые, которые смогли получить, методом перестановки металлических столбиков.

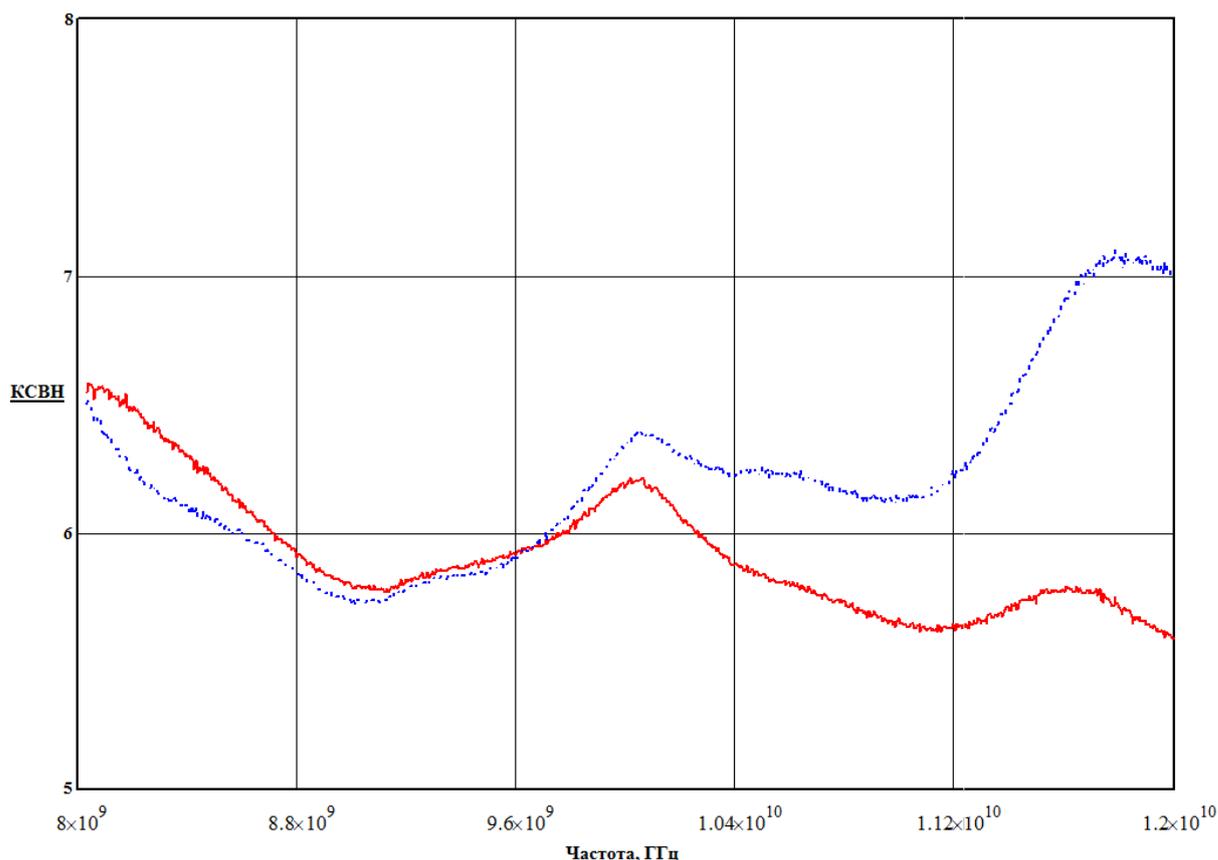


Рисунок 14. КСВН нанометровой металлической пленки и нанометровой металлической пленки, содержащей массивы воздушных включений.

Согласно результатам, проведенной оптимизации и компьютерного моделирования, была собрана слоистая структура, состоящая из диэлектрических слоев с воздушными включениями и нанометровой металлической пленки, содержащей массивы воздушных включений.

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.

После компьютерного моделирования согласованной нагрузки была создана конструкция слоистой нагрузки с параметрами слоёв, приведенных в

таблице 1. Нанометровая металлическая пленка, заменяется на ранее полученную нанометровую металлическую пленку, содержащую массивы воздушных включений. Важным условием создания такой нагрузки являлось получение КСВН не более 1,15 в максимально широком диапазоне частот равным 8-12 ГГц.

Вся структура (рисунок 15) помещается в волновод с одним портом, на втором порту которого находится короткозамыкатель. Первый слой фторопласта изготавливается с отверстиями для того, чтобы получить очень низкую диэлектрическую проницаемость, порядка 1,4, а также этот слой фиксирует всю структуру за счет своей жесткости.

Для создания слоёв с диэлектрической проницаемостью 4,3 и 4,6 была использована конструкция слоёв в виде диэлектрических столбиков, разделенных воздушными зазорами.

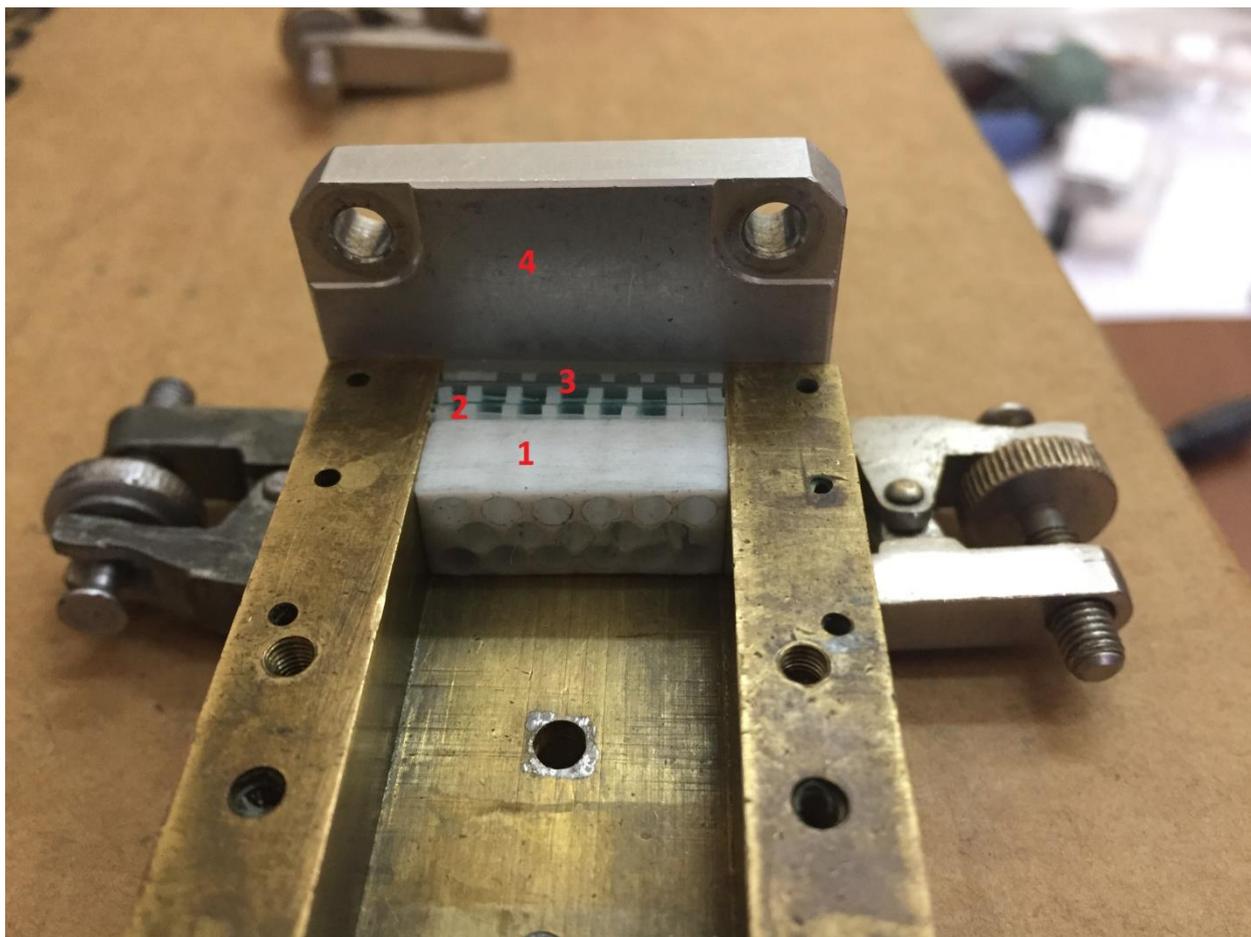


Рисунок 15. Вид собранной нагрузки; 1 – слой фторопласта, 2 – слой столбиков из поликора, 3 – металлический слой, содержащий массивы воздушных включений (см рис.13), 4 – короткозамыкатель

Экспериментальное исследование частотной зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению для слоистых согласованных нагрузок

Первые результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 16. Из результатов измерения следует необходимость дополнительной настройки слоистой структуры.

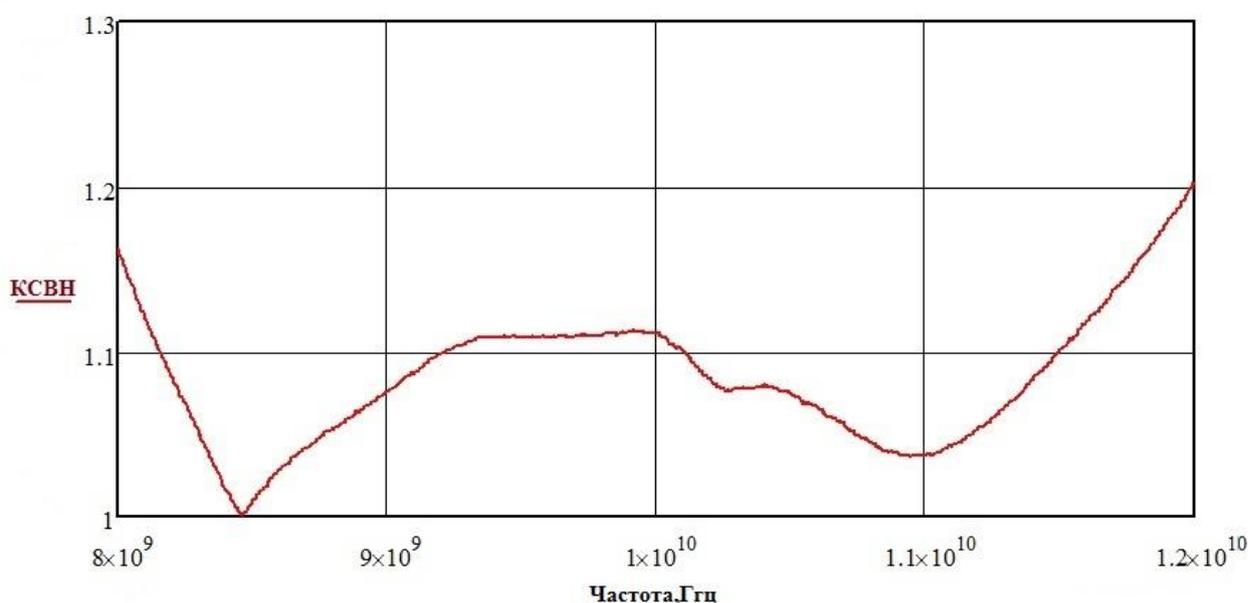


Рисунок 16. Экспериментальная частотная зависимость КСВН от частоты.

В каждый из содержащих воздушные включения, поликоровые слои, были помещены, в ближайšie к узкой стенке волновода зазоры, дополнительные диэлектрические поликоровые столбики. Результат приведен на рисунке 17.

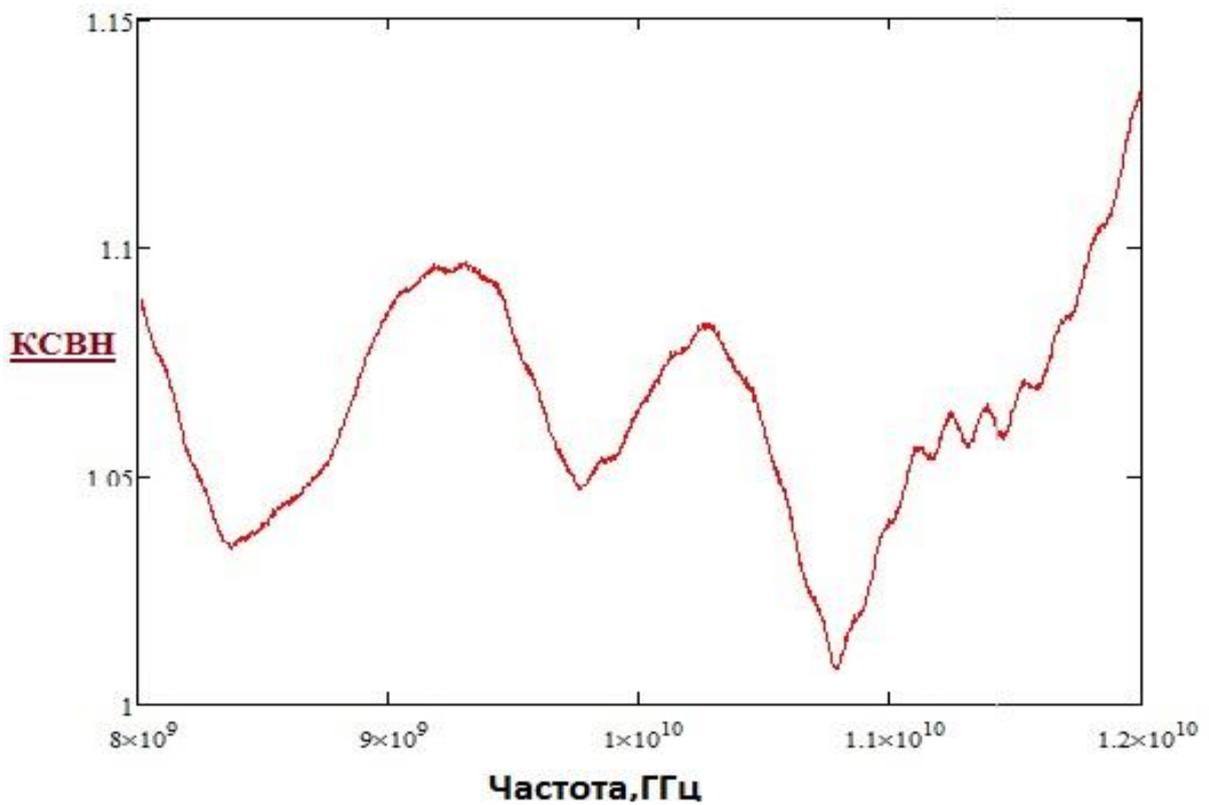


Рисунок 17. Экспериментальная частотная зависимость КСВН от частоты.

Для того, чтобы опустить высокочастотный край, внесенный ранее дополнительный диэлектрический столбик последовательно перемещался из одного в другой по направлению к центру волновода. На рисунке 18 представлена окончательно полученная частотная зависимость КСВН.

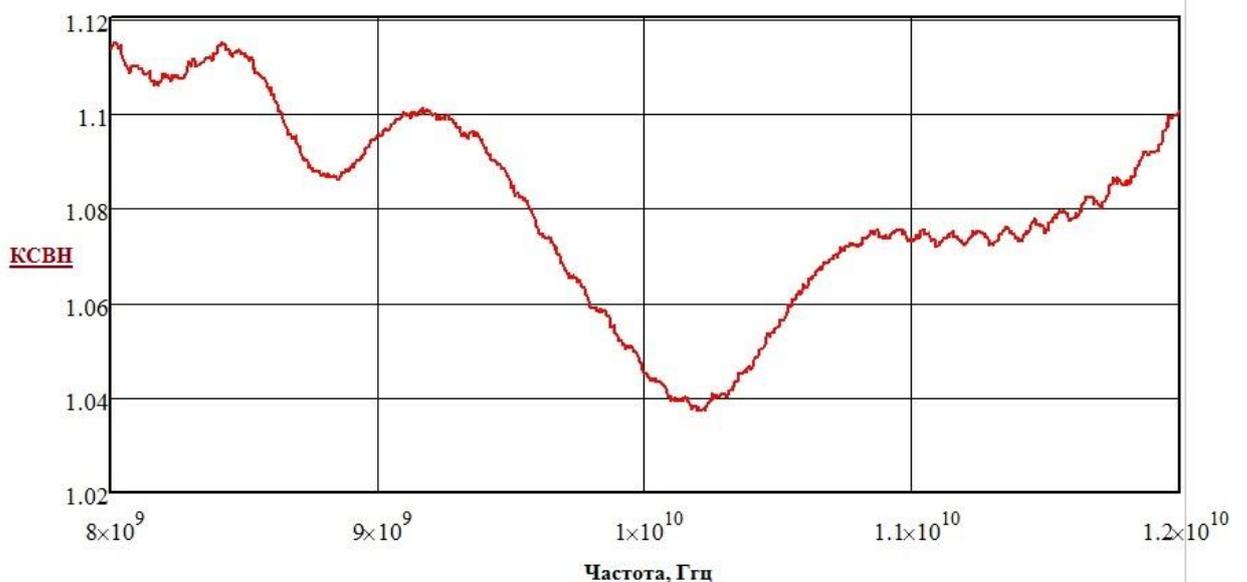


Рисунок 18. Экспериментальная частотная зависимость КСВН от частоты

Таблица 9 – Таблица параметров (диапазон частот: 8-12 ГГц)

№ слоя	Вид материала	Толщина слоя	Диэлектрическая проницаемость
1	Диэлектрик (тефлон) с отверстиями	6,2 мм	1,4
2	Диэлектрик (поликор) с отверстиями	3,0 мм	4,6
3	Фторопласт сплошной слой	100 мкм	2,02
4	Проводник (Ni-Cr-N)	40,0 нм	9,6
5	Диэлектрик (поликор) сплошной слой	0,5 мм	1
6	Диэлектрик (поликор) с отверстиями	1,25 мм	4,3
7	Короткозамыкатель		

На рисунке 18 видно, что $K_{СВН} < 1,12$ в диапазоне 8—12 ГГц. То есть в ходе эксперимента удалось получить значение $K_{СВН}$ не превышающее 1,15. Данный результат демонстрирует возможность получения малого значения $K_{СВН}$ при использовании многослойных металлодиэлектрических структур, в которых один нанометровый металлический слой заменен на композитный металл с массивами воздушных включений, параметры которых определяются из результатов оптимизации и позволяет создавать широкополосные волноводные согласованные нагрузки для диапазона частот, в котором необходимо реализовать требуемый коэффициент стоячей

волны по напряжению. Изменяя толщину и площадь напыления нанометрового металлического слоя (рисунок 8), можно управлять АЧХ (рисунок 9), при этом не изменяя значения диэлектрической проницаемости, что в свою очередь упрощает процесс создание такой согласованной нагрузки.

Заключение

В ходе выполнения данной магистерской работы были получены следующие результаты:

1. Проведен анализ современного состояния исследования в области создания согласованных нагрузок СВЧ-диапазона
2. Рассмотрена математическая модель согласованной СВЧ-нагрузки, представляющей собой разупорядоченный фотонный кристалл, содержащий композитные диэлектрические слои и нанометровые металлические структуры .
3. Проведено компьютерное моделирование частотной зависимости КСВН слоистых нагрузок в диапазонах частот и оптимизация параметров слоев для получения заданных величин КСВН.
4. Создана малогабаритная широкополосная волноводная согласованная нагрузка в диапазоне частот 8—12 ГГц, содержащая один тонкий нанометровый металлический слой, содержащий массивы воздушных включений. Продольный размер составил 17,02 мм.
5. Экспериментально получено значение КСВН $< 1,12$ в диапазоне частот 8—12 ГГц.