

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

Кафедра физики твердого тела

Создание согласованных нагрузок на основе  
разупорядоченных СВЧ фотонных кристаллов, содержащих  
тонкие поглощающие слои.

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 411 группы  
направления «Электроника и наноэлектроника»  
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

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

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

Д.А. Усанов

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Саратов 2017

## 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.

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 продемонстрированы 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 (микростриповые линии передачи, интегральные схемы СВЧ, полупроводниковые управляющие устройства СВЧ и т.д.) .

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 тонкие поглощающие слои.

## 2.3 Результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных характеристик слоистой согласованной нагрузкой

Компьютерное моделирование выполнено в программе Mathcad.

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.

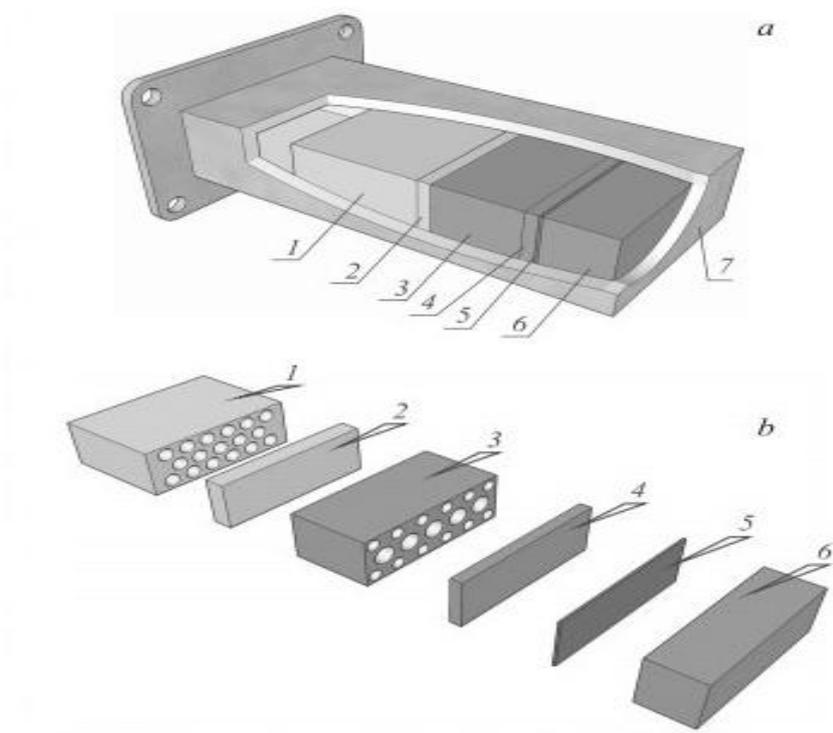


Рисунок 1. Конструкция согласованной нагрузки (а) и металлодиэлектрической структуры (б), включающей слои композитного материала ( $\epsilon''$  . 1-1.4, 3-6.15 ), сплошные диэлектрические слои ( $\epsilon''$  . 2-2.0, 4-9.6, 6-9.6 ) и нанометровую металлическую пленку-5 ( $\rho=80$ ).

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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,0 мм	4,6	
Диэлектрик, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5 мм	9,6	
Металлический слой, Cr	40 нм	1	
Диэлектрик, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,25 мм	4,3	
Диэлектрик, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,47 мм	9,6	

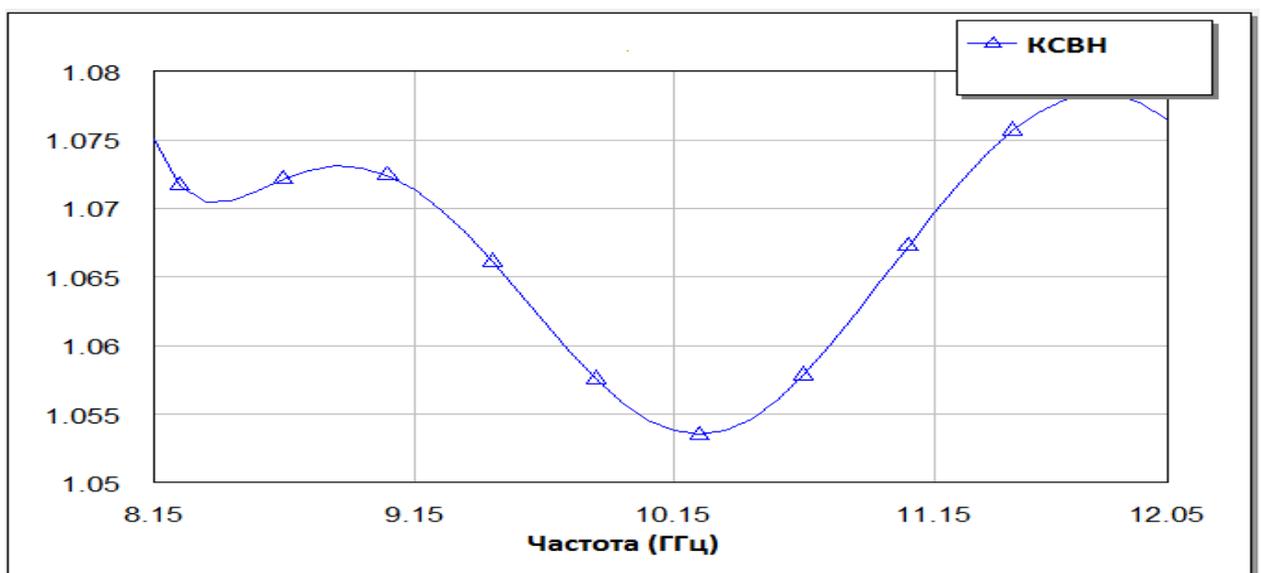


Рисунок 2. Теоретическая частотная зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению в диапазоне 8,15-12,05 ГГц.

Полученные после процесса оптимизации параметры слоев волноводной согласованной нагрузки для частотного диапазона 78,33-118,1 ГГц. На рисунке 2 приведен результат расчета коэффициента стоячей волны по напряжению для указанного диапазона. В ходе процесса оптимизации была выбрана металлодиэлектрическая структура, состоящая из 5 слоев, параметры которых показаны в таблице 2.

Таблица 2.

Материал слоя	Толщина слоя	Диэлектрическая проницаемость	Сечение волновода
Диэлектрик, тефлон	0,2 мм	2,0	2,4×1,2 мм
Диэлектрик, тефлон	0,4 мм	1,7	
Диэлектрик, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25 мм	9,6	
Металлический слой, Cr	510 нм	1	
Диэлектрик, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25 мм	9,6	

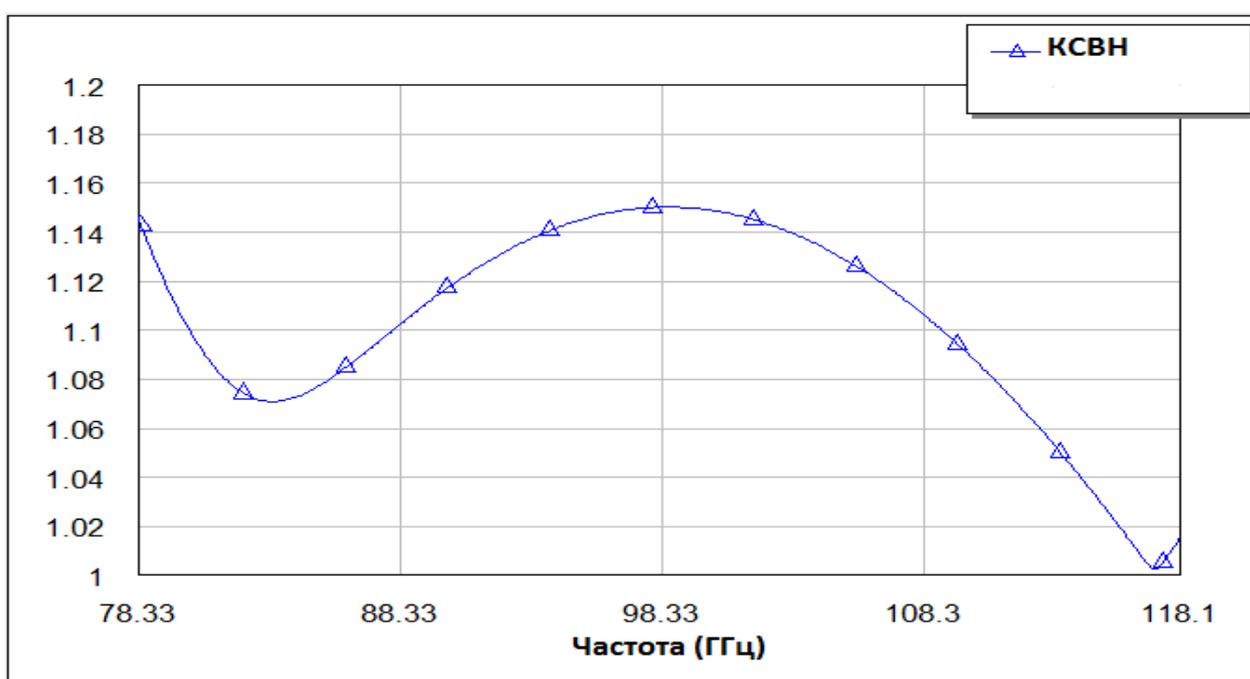


Рисунок 3. Теоретически рассчитанная частотная зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению в диапазоне 78,33-118,1 ГГц.

Полученные после процесса оптимизации параметры слоев волноводной согласованной нагрузки для частотного диапазона 118,1-178,4 ГГц. На рисунке 4 приведен результат расчета коэффициента стоячей волны по напряжению для указанного диапазона. В ходе процесса оптимизации была выбрана металлодиэлектрическая структура, состоящая из 6 слоев, параметры которых показаны в таблице 3.

Таблица 3.

Материал слоя	Толщина слоя	Диэлектрическая проницаемость	Сечение волновода
Диэлектрик, кварц	0,38 мм	2,2	1,6×0,8 мм
Диэлектрик, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25 мм	9,0	
Диэлектрик, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25 мм	9,6	
Металлический слой, Cr	40 нм	1	
Диэлектрик, кварц	0,45 нм	2,6	
Диэлектрик, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25 мм	9,6	

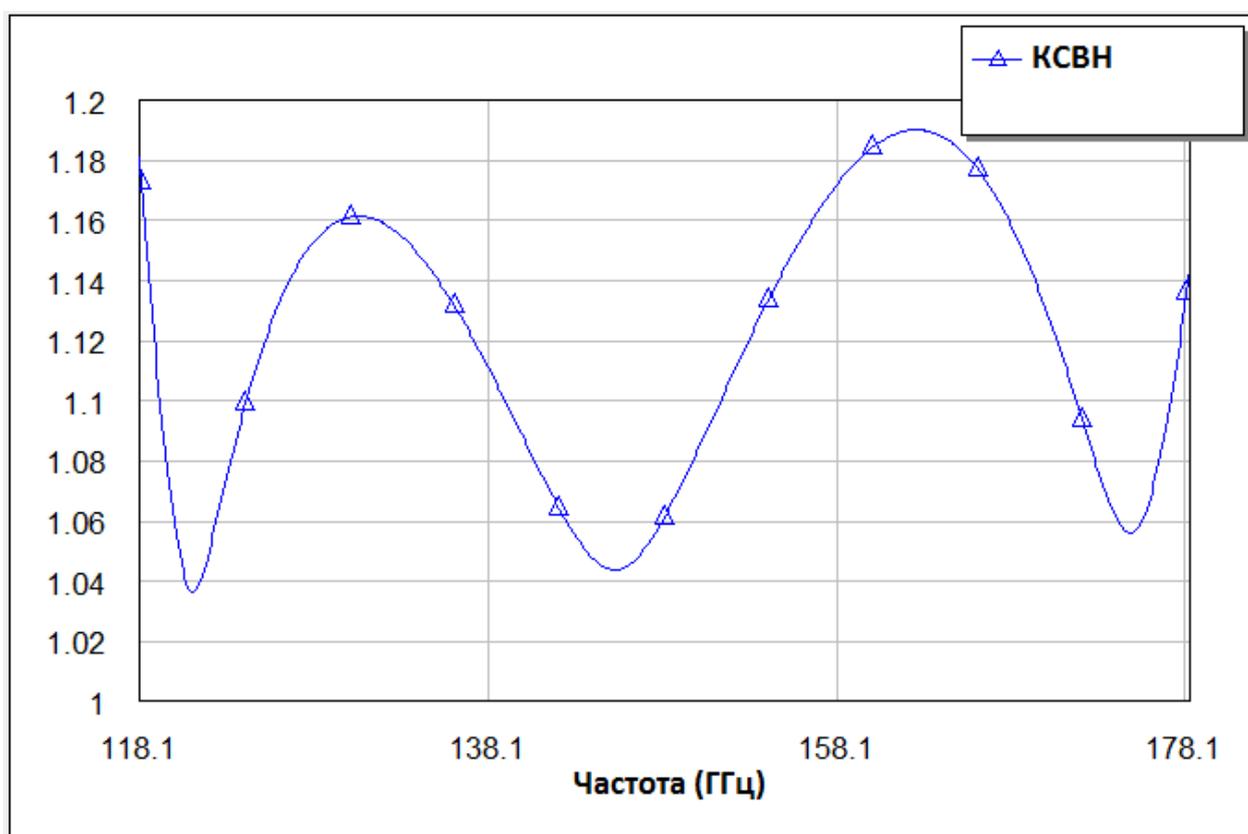


Рисунок 4. Теоретически рассчитанная частотная зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению в диапазоне 118,1-178,4 ГГц.

Методом оптимизации теоретически получены КСВН не более 1,10 в диапазоне частот от 8,15 до 12,05 ГГц, КСВН не более 1,10 в диапазоне частот от 12,05 до 17,44 ГГц, КСВН не более 1,10 в диапазоне частот от 17,44 до 25,95 ГГц, КСВН не более 1,15 в диапазоне частот от 25,95 до 37,5 ГГц, КСВН не более 1,15 в диапазоне частот от 37,5 до 53,57 ГГц, КСВН не более

1,15 в диапазоне частот от 53,57 до 78,33 ГГц, КСВН не более 1,20 в диапазоне частот от 78,33 до 118,1 ГГц, КСВН не более 1,20 в диапазоне частот от 118,1 до 178,4 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.

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

Первые результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 5. Из результатов измерения следует необходимость дополнительной настройки слоистой структуры.

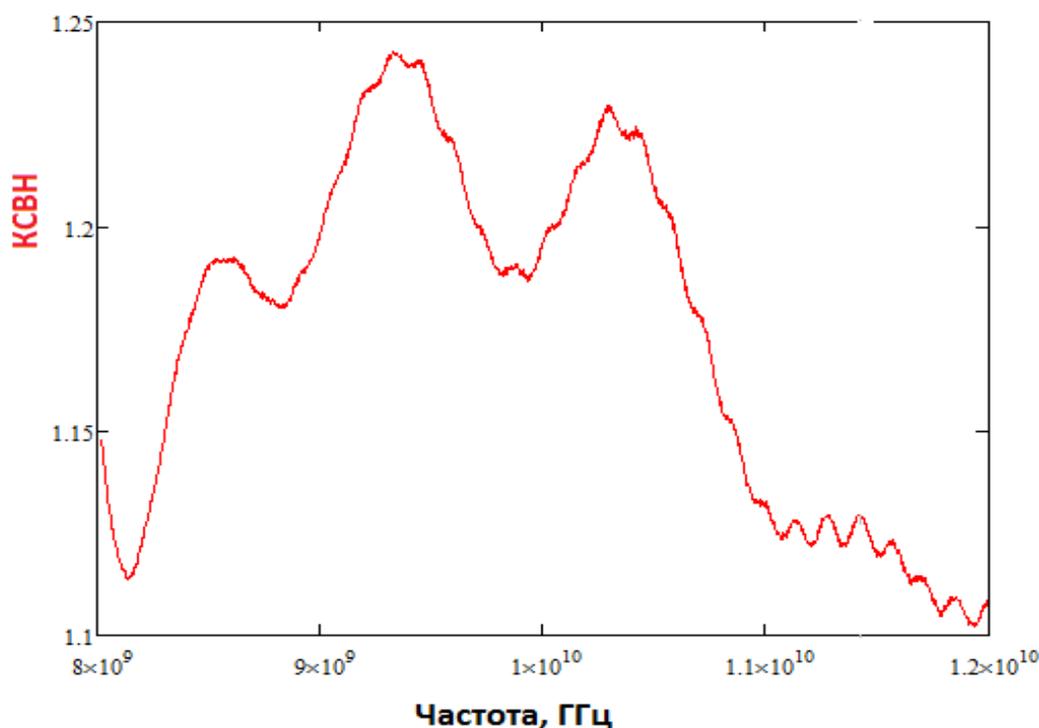


Рисунок 5. Экспериментальная частотная зависимость КСВН от частоты.

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 6.

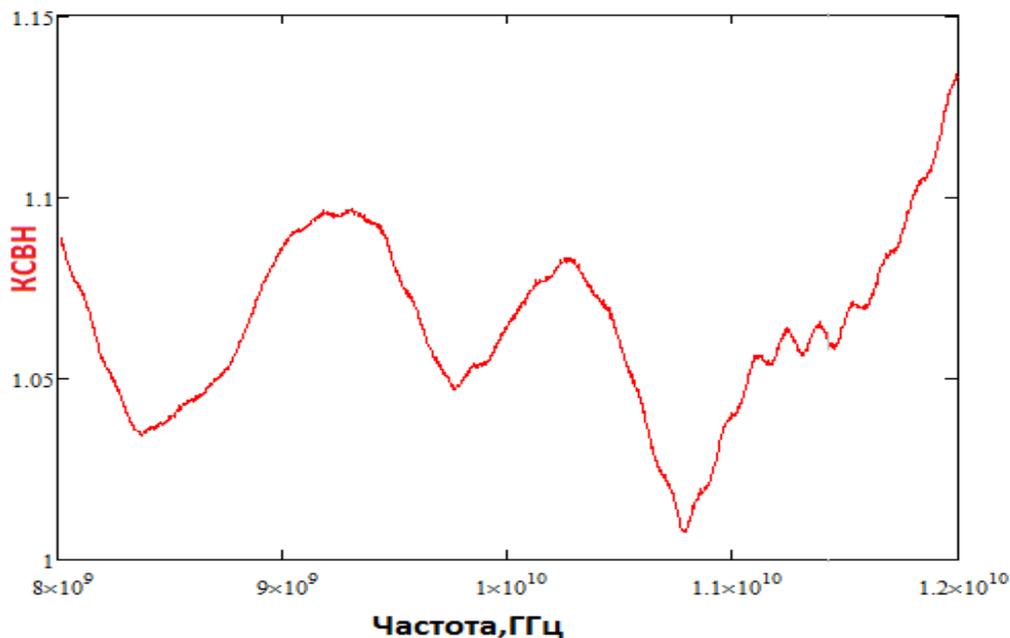


Рисунок 6. Экспериментальная частотная зависимость КСВН от частоты.

Для того, чтобы опустить высокочастотный край, внесенный ранее дополнительный диэлектрический столбик последовательно перемещался из одного в другой по направлению к центру волновода. На рисунке 7 представлена окончательно полученная частотная зависимость КСВН.

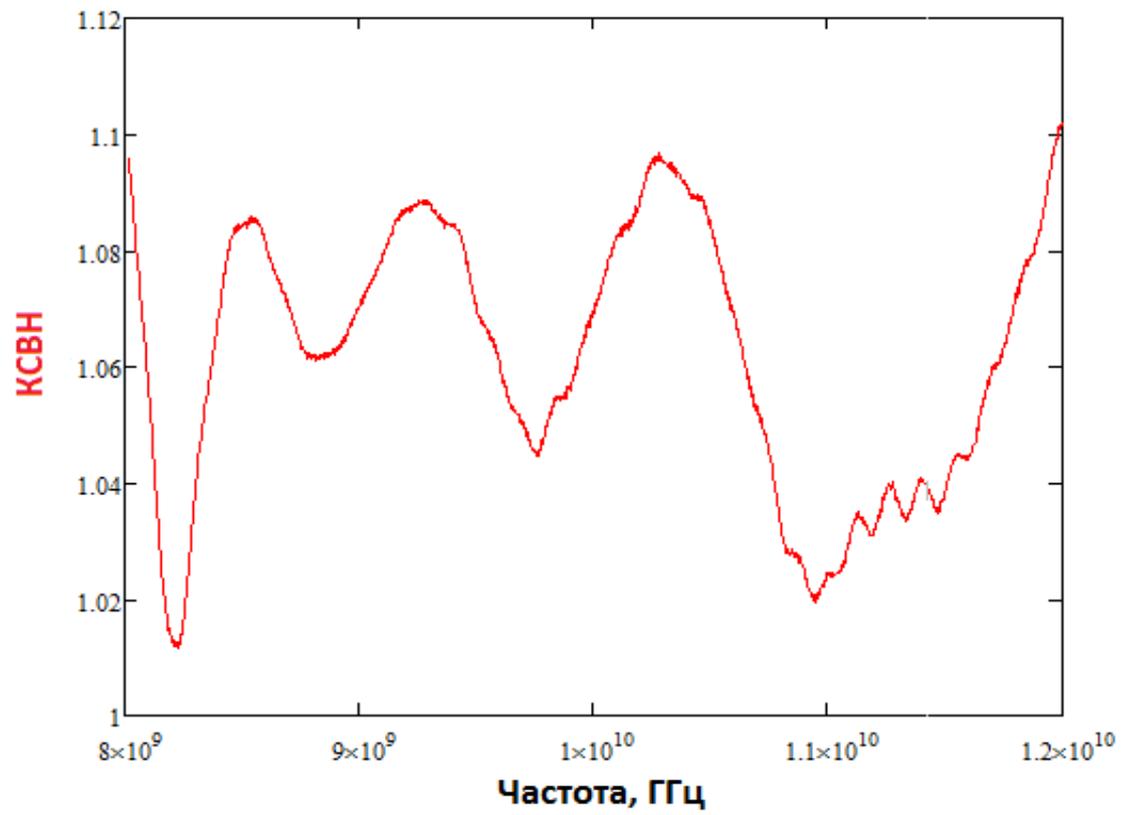


Рисунок 7. Экспериментальная частотная зависимость КСВН от частоты

Таблица 4 – 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	Короткозамы катель		

На рисунке 20 видно, что  $K_{СВН} < 1,11$  в диапазоне 8—12 ГГц. То есть в ходе эксперимента удалось получить значение  $K_{СВН}$  не превышающее 1,1. Данный результат демонстрирует возможность получения малого значения  $K_{СВН}$  в заданном диапазоне и уменьшение габаритов слоистых согласованных нагрузок за счет использования в качестве согласующих диэлектрических слоев с переменной эффективной диэлектрической проницаемостью.

## Заключение

В ходе выполнения данной бакалаврской 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 слоистую металлодиэлектрическую структуру.
3. Проведены 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 нанометровый слой металла. Продольный размер составил 11,05 мм.
5. Экспериментально получено значение КСВН  $<1,1$  в диапазоне частот 8—12 ГГц.