

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики
наименование кафедры

**Исследование характеристик микроразмерных волноводов
миллиметрового диапазона, созданных с использованием технологии
лазерной микрообработки металла**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4011 группы

направления 03.03.01 «Прикладные математика и физика»

код и наименование направления

Института физики

наименование факультета


Чуриковой Вероники Дмитриевны

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

должность, ученая степень, уч. звание


подпись, дата

Р.А. Торгашов

Инициалы Фамилия

Научный консультант

инженер СФИРЭ

им. В.А. Котельникова РАН

должность, ученая степень, уч. звание


подпись, дата

Д.А. Ножкин

Инициалы Фамилия

Зав. кафедрой нелинейной физики

доцент, к.ф.-м.н.

должность, ученая степень, уч. звание


подпись, дата

Е.Н. Бегинин

Инициалы Фамилия

Саратов 2026 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Используемое оборудование и методы.....	5
1.1 Установки лазерной микрообработки «МикроСЕТ РА».....	5
1.2 Разработка технологической оснастки для изготовления пластин	6
1.3. Анализ рабочих режимов лазерного станка «МикроСЕТ РА».....	6
Глава 2. Изготовление и исследование прямоугольного волновода W-диапазона стандартного сечения.....	7
2.1 Теоретические основы прямоугольного волновода.....	7
2.2 Проектирование, технологический маршрут и сборка волновода из наборного пакета пластин	7
2.3 Экспериментальное исследование электродинамических характеристик прямоугольного волновода	8
Глава 3. Проектирование, изготовление и исследование характеристик полосового волноводного фильтра.....	9
3.1 Разработка и исследование электродинамических характеристик полосового фильтра в COMSOL Multiphysics.....	9
3.2 Изготовление волноводного фильтра.....	10
3.3 Анализ результатов экспериментального исследования электродинамических характеристик полосового фильтра.....	11
Заключение	12
Список литературы	14

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается существенный рост исследований, направленных на изучение и разработку как активных, так и пассивных устройств миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн. Интерес к данному направлению обусловлен широкими возможностями применения электромагнитного излучения субтерагерцового и терагерцового (0.1-10 ТГц) диапазонов, как в военной промышленности, так и в различных гражданских областях. Среди ключевых направлений применения излучения указанных диапазонов можно выделить создание и разработку приборов сверхразрешающей радиоастрономии, спектроскопии, применение в медицинской сфере, а также сверхвысокоскоростную беспроводную передачу данных [1, 2]. В связи с повышением рабочей частоты характерные размеры компонентов уменьшаются до значений порядка десятков и сотен микрон. Для их изготовления требуется разработка новых технологий, которые должны обеспечивать высокую точность, качество и скорость изготовления [3].

На сегодняшний день для изготовления микроразмерных компонентов современной электроники применяются такие технологии, как фотолитография, электронно-лучевая литография, глубокое ионное травление, 3D-печать и ЧПУ-микрофрезерование [3, 4]. При изготовлении волноведущих структур ключевыми параметрами для оценки качества изготовления выступают соответствие проектным размерам, шероховатость поверхности и точность воспроизведения геометрии структуры. Отклонения этих параметров напрямую влияют на электродинамические характеристики: вызывают дополнительные омические потери, ухудшают согласование и частотные свойства разрабатываемых структур.

Перспективной технологией для изготовления микроразмерных электродинамических структур миллиметрового диапазона выступает метод обработки материалов лазерными импульсами наносекундной длительности – метод лазерной микрообработки [5, 6]. Применение такой технологии возможно при изготовлении компонентов из различных материалов, как металлов и

полупроводников, так и диэлектриков. Метод лазерной микрообработки основан на эффекте лазерной абляции, который заключается в удалении тонкого слоя материала при его взаимодействии с мощным лазерным излучением. Такой подход позволяет создавать микроразмерные объекты со сложной геометрической формой, выдерживая высокую точность изготовления. Данная технология может применяться для выполнения таких задач, как резка, гравировка, маркировка, нано- и микрообработка, скрайбирование и фрезеровка. Лазерная микрообработка имеет ряд преимуществ по сравнению с представленными выше технологиями:

1. Высокая скорость изготовления и малое количество стадий технологического процесса, что определяет высокую гибкость технологии;
2. Минимальные деформации материала благодаря точечному локальному нагреву лазерным излучением;
3. Отсутствие прямого механического контакта с обрабатываемой поверхностью, что снижает риск повреждения детали при изготовлении;
4. Обработка материала без участия опасных химикатов.

Таким образом тема выпускной квалификационной работы является **актуальной**.

Целью данной работы является разработка методов быстрого прототипирования и изготовления элементов волноводной техники миллиметрового диапазона с использованием технологии лазерной обработки.

Основными задачами для достижения поставленной цели являлись:

1. отработка технологии лазерной микрообработки тонких медных пластин, выбор оптимального режима изготовления;
2. разработка модели, изготовление и сборка прямоугольного волновода стандартного сечения W-диапазона, анализ результатов изготовления и экспериментального исследования электродинамических характеристик;
3. разработка модели волноводного полосового фильтра диапазона 81-86 ГГц для приборов космической связи миллиметрового диапазона, расчет электродинамических характеристик;

4. изготовление и сборка волноводного фильтра, анализ результатов изготовления и экспериментального исследования электродинамических характеристик.

Результаты выпускной квалификационной работы были представлены на студенческой научной конференции Института физики СГУ (2026 г, II место) и на Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика - 2025». Результаты также опубликованы в работах [13, 14].

ГЛАВА 1. ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ

Для изготовления и анализа волноводных структур, рассматриваемых в рамках данной работы, предлагается использование технологии, обеспечивающей создание электродинамических структур из наборного пакета медных пластин толщиной 150 мкм, которые подвергаются микрообработке лазерным излучением с целью формирования требуемой геометрии.

1.1 Установки лазерной микрообработки «МикроСЕТ РА»

Для микрообработки медных пластин использовался прецизионный станок лазерной микрообработки «МикроСЕТ РА» с источником когерентного излучения на основе иттербиевого импульсного лазера с длиной волны излучения 1064 нм. Максимальная мощность источника излучения составляет 20 Вт. Частота следования импульсов может изменяться в диапазоне от 1.6 кГц до 1 МГц, а длительность импульсов регулируется от 2 нс до 200 нс. Оптическая система установки позволяет формировать на обрабатываемой поверхности лазерное пятно диаметром 20-26 мкм с точностью позиционирования 1-2 мкм. В состав «МикроСЕТ РА» входит несколько ключевых компонентов: лазер – источник излучения, оптоволоконная линия, телецентрический объектив и подвижный столик. Для улучшения качества поверхности изготовленных компонентов использовался метод ультразвуковой чистки.

1.2 Разработка технологической оснастки для изготовления пластин

Для повышения точности и производительности при вырезании большого количества деталей на одной медной пластине была спроектирована и изготовлена специализированная оснастка с помощью технологии трехмерной полимерной печати. Оснастка состоит из двух частей, каждая размером 10×10 см с вырезанным рабочим окном 9×9 см. Нижняя часть имеет дополнительные упоры для размещения оснастки на поворотном столе лазерной установки. Предложенная конструкция обеспечивает жёсткую фиксацию обрабатываемого материала, в частности медного листа, а также исключает его смещение в процессе изготовления.

1.3. Анализ рабочих режимов лазерного станка «МикроСЕТ РА»

На первом этапе проводился анализ рабочих режимов лазерной установки «МикроСЕТ РА» при взаимодействии с поверхностью безоксидной меди. Для этого на поверхности медной пластины толщиной 150 мкм формировались абляционные пятна при единичном воздействии импульса. Анализ морфологии производился с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira II LMU.

Для определения зависимости диаметра абляционного пятна от параметров лазерного излучения проведена серия экспериментов. Поверхность обрабатывалась одиночными импульсами при мощности от 40% до 100% и длительности импульса от 2 до 200 нс. Частота следования импульсов – 2000 кГц. На основе этих данных для резки пластин толщиной 150 мкм были выбраны рабочие режимы для резки и изготовления элементов конструкции волновода.

Таблица 1.1. Режимы резки медной фольги.

Режим №	Мощность, %	Частота, кГц	Длительность, нс	Кол-во повторений
1	70	200	2	10
2	70	20	8	50
3	70	15	14	300

ГЛАВА 2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА W-ДИАПАЗОНА СТАНДАРТНОГО СЕЧЕНИЯ

2.1 Теоретические основы прямоугольного волновода

Прямоугольный волновод представляет собой полую металлическую трубу прямоугольного сечения, в которой могут распространяться электромагнитные TE- и TM-волны. Основным типом волн, используемых для передачи СВЧ-энергии в прямоугольном волноводе, является мода TE₁₀. Для W-диапазона (75-110 ГГц) стандартное сечение прямоугольного волновода составляет $a \times b = 2.54 \times 1.27$ мм². Для указанной системы на частотах выше 75 ГГц дисперсия волн практически отсутствует.

2.2 Проектирование, технологический маршрут и сборка волновода из наборного пакета пластин

Для изготовления прямоугольного волновода из наборного пакета медных пластин толщиной 150 мкм была разработана трехмерная модель системы, которая состоит из 15 медных пластин, 9 из которых формируют боковые стенки волновода, 6 пластин – верхнюю и нижнюю стенки. Для обеспечения сборки волновода и соосности в отдельных пластинах дополнительно формировались отверстия диаметром 1 мм.

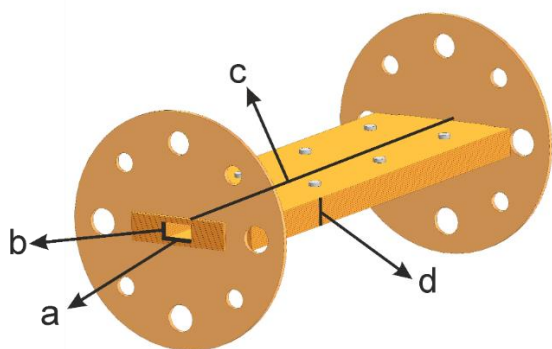


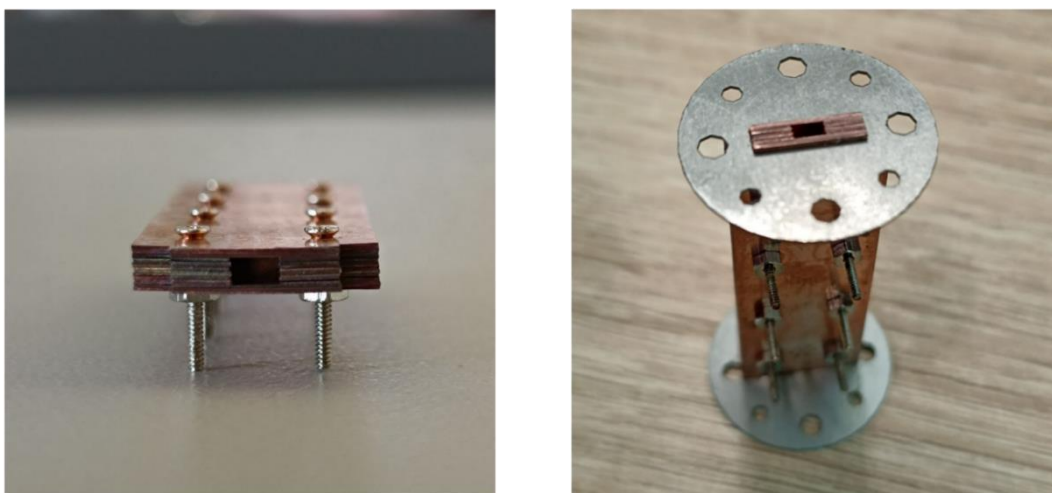
Рисунок 2.1. Трехмерная модель прямоугольного волновода из наборного макета пластин с фланцами.

Параметры системы	
a	2.54 мм
b	1.35 мм
c	42 мм
d	2.25 мм

Таблица 2.1. Параметры системы трехмерной модели прямоугольного волновода из наборного макета пластин с фланцами.

Полная длина системы составляет 42 мм. По краям пластин сформированы дополнительные пазы шириной 1 мм для установки волноводных фланцев из

молибдена. Ширина системы была выбрана равной 12.54 мм для удобства сборки системы и установки винтов. Фотографии изготовленного макета прямоугольного волновода W-диапазона приведены на рис. 2.2.



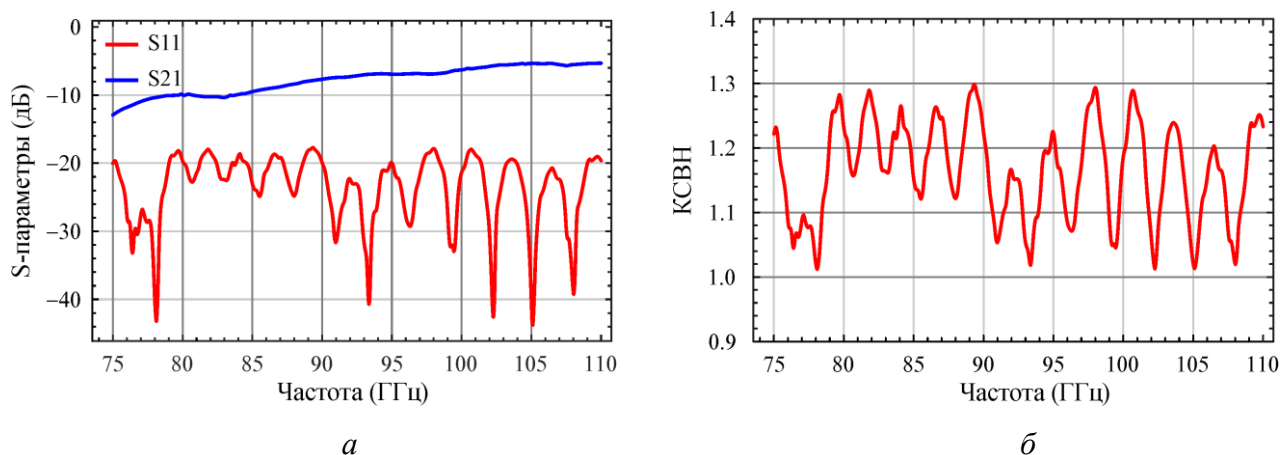
a

б

Рисунок 2.2. Фотографии изготовленного волновода в сборке: (*a*) – без фланцев, (*б*) – с фланцами.

2.3 Экспериментальное исследование электродинамических характеристик прямоугольного волновода

С помощью векторного анализатора цепей были получены частотные зависимости S -параметров и КСВН. Показано, что КСВН для исследуемой системы составляет не более 1.3, что соответствует $S_{11} = -17$ дБ. Коэффициент прохождения уменьшается с ростом частоты и составляет в среднем 0.2 дБ/мм. Возникающие в системе потери обусловлены омическим затуханием, а также излучением через зазоры между пластинами. Результаты приведены на рис. 2.3.



a

б

Рисунок 2.3. Экспериментальные результаты измерений электродинамических характеристик: (*a*) – S -параметры, (*б*) – КСВН.

ГЛАВА 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛОСОВОГО ВОЛНОВОДНОГО ФИЛЬТРА

3.1 Разработка и исследование электродинамических характеристик полосового фильтра в COMSOL Multiphysics

Моделирование проводилось с использованием современного конечно-элементного программного пакета трехмерного мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics. Система представляет собой участок прямоугольного волновода стандартного сечения WR-10 ($a \times b = 2.54 \times 1.27$ мм) с индуктивными диафрагмами шириной w_i и толщиной t . Расстояние между соседними диафрагмами составляет d_i . Схема разрабатываемой системы приведена на рис. 3.1.

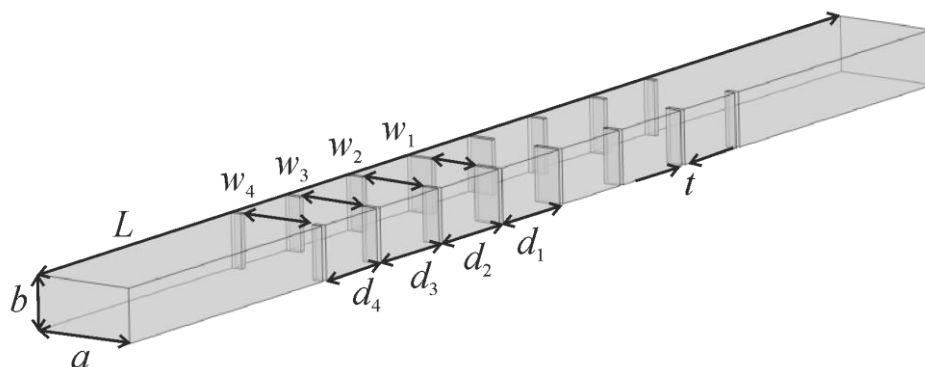


Рисунок 3.1. Геометрия полосового фильтра.

С использованием встроенного в программный пакет COMSOL Multiphysics модуля оптимизации осуществлялся подбор оптимальных геометрических размеров методом Нелдера-Мида [12].

В результате оптимизации получены следующие значения параметров (Таблица 3.1.). Обеспечивалась высокая точность расчета электродинамических характеристик за счет использования высокой степени дискретизации системы.

На рис. 3.2 приведены результаты расчета S -параметров волноводного фильтра при оптимальных размерах системы. Видно, что разработанная конструкция обеспечивает прохождение сигнала в диапазоне 81-86 ГГц. При этом вне этого диапазона у системы оказывается полоса непропускания, т.е.

обеспечивается затухание сигнала вне рабочего диапазона. В рабочей полосе частот фильтра коэффициент отражения $S_{11} \leq -22$ дБ.

Таблица 3.1. Оптимальные параметры волноводного фильтра с индуктивными диафрагмами диапазона 81-86 ГГц.

Геометрический параметр	Значение (мм)
d_1	2.2425
d_2	2.2607
d_3	2.2989
d_4	2.0372
w_1	1.1879
w_2	1.6690
w_3	1.7374
w_4	1.9826

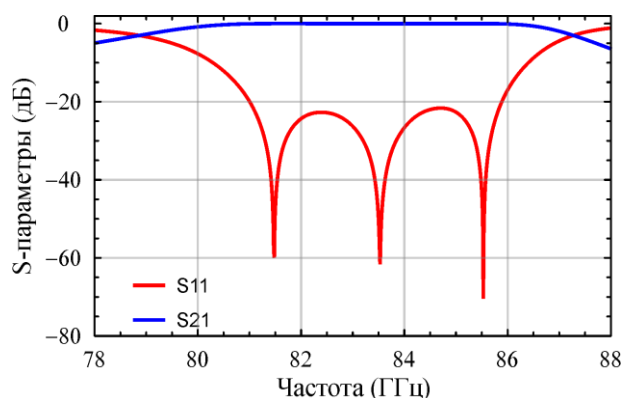


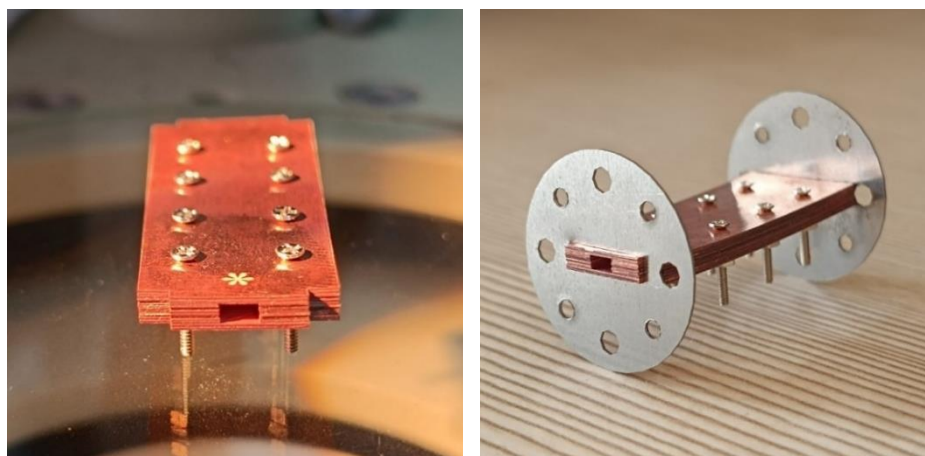
Рисунок 3.2. Теоретически рассчитанные S -параметры полосового фильтра.

3.2 Изготовление волноводного фильтра.

Фильтр был изготовлен из наборного пакета медных пластин толщиной 150 мкм. Система состоит из 15 пластин: 9 – боковые стенки, 6 – верхняя и нижняя. Были разработаны макеты, определяющие ход лазерного луча для формирования внутренних стенок полосового фильтра с требуемой геометрией.

Проведён анализ качества изготовления с использованием оптического микроскопа. Погрешность изготовления составила не более 3-5% для штырей и

1.5-2% для расстояний между диафрагмами. Наблюдается конусность краёв 1-1.5°.



a

б

Рисунок 3.3. Фотографии изготовленного фильтра.

3.3 Анализ результатов экспериментального исследования электродинамических характеристик полосового фильтра

Проведено экспериментальное исследование электродинамических характеристик изготовленного волноводного фильтра. В полосе пропускания 81-86 ГГц коэффициент отражения S_{11} находится на уровне $-18...-35$ дБ. На высокочастотном краю диапазона происходит рост коэффициента отражения до значений порядка -10 дБ. В области низких частот наблюдается коэффициент отражения от -15 дБ и ниже, что означает, что в области низких частот наблюдается прохождение сигнала. Коэффициент прохождения S_{21} в полосе пропускания фильтра составляет $-10...-12$ дБ. Вне полосы пропускания ниже 81 ГГц и выше 86 ГГц коэффициент S_{21} падает до значений -16 дБ и ниже, что обеспечивает лучшее подавление сигнала вне полосы фильтра.

Проводилось моделирование с учётом реальных размеров и конечной проводимости металла $\sigma = 1.0 \times 10^7$ См/м. В данном случае КСВН в рабочей полосе принимает значения 1.2-1.5. Наблюдаемое уширение полосы и дополнительные потери, которые обусловлены излучением полезной мощности через зазоры между пластинами, а также омическими потерями в стенках волновода.

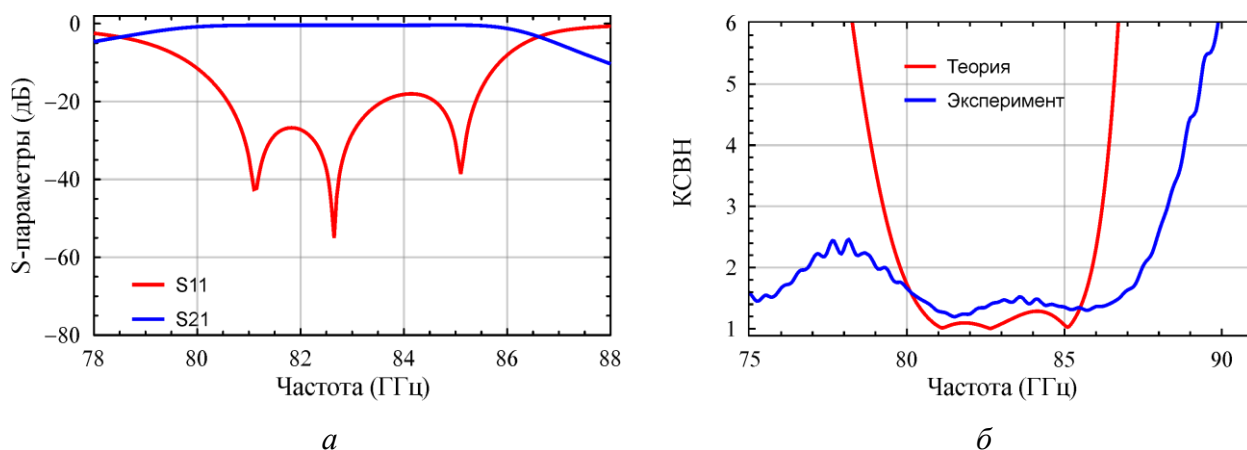


Рисунок 3.4. Электродинамические характеристики фильтра с учетом технологических погрешностей: (а) – S -параметры в рабочей полосе фильтра (моделирование), (б) – КСВН в зависимости от частоты, полученные в результате моделирования (красная) и из эксперимента (синяя).

Для улучшения частотных свойств фильтра в дальнейшем возможна доработка технологии, которая будет включать в себя пайку отдельных пластин между собой в высокотемпературной водородной печи с использованием серебряного припоя в процессе сборки, что обеспечит плотное примыкание пластин между собой, а также снятие механических нагрузок в отдельных пластинах и, как следствие, улучшение значений коэффициента прохождения. Также для снижения уровня утечки входной мощности в области подключения к измерительной установке требуется шлифовка торца изготовленного волновода.

Таким образом, показано, что технология лазерной микрообработки обеспечивает изготовление отдельных компонентов волноведущих структур с высокой точностью. Сборная конструкция на основе пакета медных пластин в целом обладает требуемыми частотными свойствами в рабочем диапазоне, однако наблюдается нарушение требуемых характеристик в области высокочастотной и низкочастотной границы рабочего диапазона. Технология требует доработки с целью снижения уровня потерь в системе и улучшения электродинамических свойств полосового фильтра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы бакалавра были получены следующие основные результаты:

1. Были исследованы рабочие режимы лазерной установки «МикроСЕТ РА» для обработки медных пластин. Были установлены зависимости диаметра формируемого абляционного пятна от мощности и длительности импульса лазерного излучения при взаимодействии с поверхностью меной пластины толщиной 150 мкм с использованием метода сканирующей электронной микроскопии. На основе полученных данных были определены оптимальные режимы резки, обеспечивающие высокую точность изготовления и минимальную шероховатость поверхности.

2. Разработана трехмерная модель и созданы векторные макеты для изготовления прямоугольного волновода W-диапазона (75-110 ГГц) из наборного пакета медных пластин. Проведена лазерная резка отдельных компонентов с последующей чисткой в ультразвуковой ванне. Изготовлен и собран экспериментальный образец прямоугольного волновода. Проведен анализ экспериментальных частотных зависимостей электродинамических характеристик. Показано, что КСВН такой системы составляет не более 1.3, что соответствует значениям коэффициента отражения не более -17 дБ в диапазоне 75-110 ГГц. Коэффициент затухания в указанной полосе частот составляет в среднем 0.2 дБ/мм.

3. В программном пакете численного конечно-элементного трехмерного моделирования COMSOL Multiphysics была разработана конструкция волноводного полосового фильтра на основе прямоугольного волновода с индуктивными диафрагмами. Проведена оптимизация системы для формирования полосы пропускания в диапазоне 81-86 ГГц. Предложенная конструкция обеспечивает коэффициент отражения по уровню не более -22 дБ в рабочем диапазоне. Показано, что предложенная структура представляет собой резонансную электродинамическую систему с фиксированной модой TE_{107} .

4. Разработана конструкция и проведено изготовление экспериментального образца волноводного фильтра, состоящего из 15 медных пластин. Проведен с использованием методов оптической микроскопии морфологический анализ изготовленных деталей. Показано, что погрешность изготовления штырей,

которые формируют индуктивные диафрагмы, составляет не более 3-5%, а ошибка в формируемом расстоянии между отдельными диафрагмами составляет 1.5-2%. Возникающая конусность краёв обрабатываемых лазерным излучением пластин составляет 1-1.5°.

5. Проведен анализ результатов измерений электродинамических характеристик изготовленного фильтра. Показано, что предложенная геометрия формирует более широкую полосу частот, а коэффициент отражения S_{11} в рабочей полосе частот не превышает -17 дБ. Вносимые потери S_{21} составили около 10-12 дБ, что объясняется возникающими омическими потерями в медных стенках, а также утеканием сигнала между пластинами волноводного фильтра.

Таким образом, подтверждена эффективность предложенного технологического подхода лазерной микрообработки для создания микроразмерных волноводных компонентов миллиметрового диапазона. Показана возможная высокая точность и низкая погрешность изготовления. Однако, для снижения возникающих потерь на прохождение требуется доработка данной технологии.

Список литературы

1. Park G-S, Tani M, Rieh J-S, Park SY Advances in terahertzsource technologies. Jenny Stanford Publishing, New York, 2024.
2. Kürner T, Mittleman DM, Nagatsuma T THz communications. Springer International Publishing, Cham, 2022.
3. Стародубов А.В., Ножкин Д.А., Расулов И.И. и др. Технологии формирования электродинамических структур для устройств вакуумной микроэлектроники миллиметрового и терагерцевого диапазонов (обзор) // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67, № 10. 935–945 с. DOI: 10.31857/S0033849422100126.
4. C. Jung-Kubiak, T. J. Reck, J. V. Siles et al. A multistep DRIE process for complex terahertz waveguide components // IEEE Transactions on Terahertz

- Science and Technology, Vol. 6, No. 5. 2016. P. 690–695.
DOI: 10.1109/TTHZ.2016.2593793
5. Парфенов В.А. Лазерная микрообработка материалов. Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.
 6. Žemaitis A., Gečys P., Barkauskas M., Račiukaitis G., Gedvilas M. Highly-efficient laser ablation of copper by bursts of ultrashort tuneable (fs-ps) pulses // Sci. Rep. 2019. Vol. 9, № 1. P. 12280. DOI:10.1038/s41598-019-48779-w.
 7. Григорьев А.Д. Электродинамика и микроволновая техника. Издательство «Лань», 2007.
 8. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М: Высшая школа. 1988.
 9. Лихачев С.Ф., Рудницкий А.Г., Андрианов А.С. и др. Перспективы и направления развития субтерагерцовой астрономии в Российской Федерации // Космические исследования. Т. 62, №1, 2024. С.121-138
DOI: 10.31857/S0023420624010116.
 10. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник. М.: Издательство Юрайт, 2010. – 479 с.
 11. Боровков А. А. Математическая статистика: учебник. СПб.: Лань, 2010. – 703 с.
 12. Peren F. W., Neifer T. Operations Research and Management: Quantitative Methods for Planning and Decision-Making in Business and Economics. Springer International Publishing, Cham, 2024.
 13. Ножкин Д.А., Бессонов Д.А., Навроцкий И.А. и др. Применение лазерных технологий для изготовления компонентов вакуумных электронных приборов миллиметрового диапазона // ЖТФ. Т. 96, № 5. 2026. С. 1042-1049.
DOI: 10.61011/JTF.2026.05.62763.329-25
 14. Чурикова В. Д., Ножкин Д. А., Торгашов Р. А. Изготовление прямоугольного волновода W-диапазона стандартного сечения с помощью технологии лазерной микрообработки // Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: Сборник трудов XX Всероссийской конференции молодых ученых, Саратов, 07–08 октября 2025 года, 132-133 с.