

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

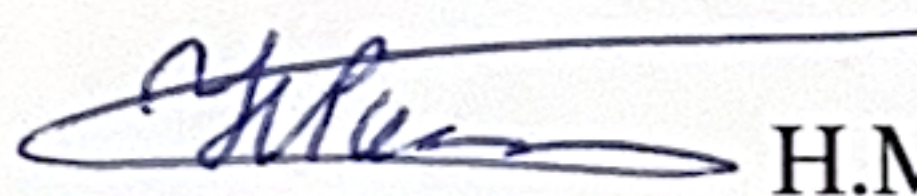
Кафедра нелинейной физики

**Исследование электродинамических структур миллиметрового
диапазона длин волн, созданных с применением
стереолитографической 3D печати**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 2211 группы
направления (специальности) 03.04.01 «Прикладные математика и физика»
Института физики
Ожогина Ивана Сергеевича

Научный руководитель
Заведующий кафедрой динамических систем,
на базе СФИРЭ РАН, д.ф.-м.н., проф
должность, уч. степень, уч. звание



дата, подпись

Н.М. Рыскин
инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой нелинейной физики,
к.ф.-м.н., доцент
должность, уч. степень, уч. звание



дата, подпись

Е.Н. Бегинин
инициалы, фамилия

Саратов 2025 год

Введение

Актуальность выбранной темы обусловлена тем, что разработка вакуумно-электронных устройств для усиления и генерации электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн представляет значительный интерес для широкого спектра приложений^{1,2,3}. Несмотря на прогресс в совершенствовании характеристик твердотельных устройств, вакуумные приборы продолжают оставаться наиболее мощными источниками излучения в диапазоне частот выше 0,1 ТГц^{4,5}.

Интенсивное освоение данного диапазона сопряжено с необходимостью оперативной разработки и создания прототипов миниатюрных приборов. Однако уменьшение длины волны приводит к существенному снижению размеров ключевых электродинамических компонентов, таких как волноводы, резонаторы и замедляющие системы (ЗС), до сотен микрометров или менее. Это создает серьёзные технологические вызовы в их изготовлении.

На сегодняшний день существуют хорошо зарекомендовавшие себя технологии для изготовления микроразмерных компонентов, включая методы на основе литографии, глубокого реактивного ионного травления (Deep Reactive Ion Etching, DRIE), фрезерования с числовым программным управлением (Micro-computer Numerical Control, CNC), электроэрозионная микрообработка, а также литографические технологии, такие как рентгеновская литография (X-ray LIGA) или ультрафиолетовая литография (UV-LIGA) и др. Однако для них как правило требуется сложное и дорогостоящее оборудование, а процесс изготовления является длительным и трудоемким. Таким образом, несмотря на достижения в области прецизионных технологий изготовления микроразмерных структур, существует потребность в альтернативных методах, которые могут ускорить

¹ 1. Advances in Terahertz Source Technologies / ed. by G.-S. Park, M. Tani, J.-S. Rieh, S.-Y. Park. Singapore: Jenny Stanford Publishing, 2024. 752 p.

² THz Communications / ed. by T. Kürner, D.M. Mittleman, T. Nagatsuma. Cham: Springer, 2022. 532 p.

³ Григорьев А.Д. Терагерцевая электроника. М: Физматлит, 2020. 292 с.

⁴ Booske J.H., Dobbs R.J., Joye C.D., et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011. Vol. 1, № 1. P. 54–75.

⁵ Chaudhary R., Fabbri P., Leoni E., et al. // Progr. Addit. Manuf. 2023. Vol. 8, No. 2. P. 331–351.

процесс прототипирования при сохранении приемлемой точности и разумных затрат.

В частности, значительный интерес представляют аддитивные технологии, такие как 3D-печать. Преимущества аддитивных технологий заключаются в значительном сокращении времени и ресурсов, необходимых для изготовления полнофункциональных прототипов. Существует несколько видов 3D-печати, включая FDM (моделирование методом наплавления), SLA (стереолитография) и SLS (селективное лазерное спекание), – каждый из которых имеет свои особенности и области применения.

В данной работе для создания структур миллиметрового диапазона предложено использовать одну из разновидностей 3D-печати SLA технологию цифровой световой обработки (Direct Light Processing, DLP) — одну из самых перспективных разновидностей фотополимеризации в ванне. Так как данный метод позволяет изготавливать исключительно диэлектрические структуры, необходимым этапом является их последующая металлизация. Комбинация DLP-фотополимеризации и вакуумного магнетронного напыления представляет собой перспективный подход для быстрого и экономически эффективного прототипирования сложных электромагнитных устройств. Предлагаемая технология потенциально позволяет сократить продолжительность изготовления прототипов до одного рабочего дня, что трудно достижимо при использовании традиционных методов.

В качестве примеров объектов исследования были выбраны ЗС типа гребёнки для приборов вакуумной электроники, работающие в V (50–75 ГГц) и W (75–110 ГГц) диапазонах. Такие структуры демонстрируют практическую применимость предложенной методики для разработки устройств миллиметрового диапазона.

Цель исследования заключалась в разработке подхода к прототипированию электродинамических структур для приборов вакуумной электроники суб-ТГц диапазона на основе технологии DLP 3D-печати и

последующей металлизации изготовленных изделий с помощью магнетронного распыления.

Для достижения данной цели были поставлены следующие научные **задачи**:

1. Отработка технологии создания компонентов миллиметрового диапазона длин волн с помощью стереолитографической печати на основе DLP технологии и последующей металлизацией изготовленных изделий методом магнетронного распыления.
2. Анализ морфологии изготовленных структур методами оптической и сканирующей электронной микроскопии.
3. Оптимизация параметров 3D печати и металлизации на основе полученных результатов.
4. Проектирование и изготовление прямых волноводных секций и замедляющих систем типа одиночной гребёнки V и W диапазона.
5. Экспериментальное исследование тестовых структур в виде прямых волноводных секций и замедляющих систем типа одиночной гребёнки V и W диапазона, сопоставление с моделированием.
6. Моделирование электродинамических характеристик одиночной гребёнки и сравнение с моделированием в пакете COMSOL.

Основное содержание работы

1. Технологический маршрут. Предлагаемый в данной работе технологический подход состоит из нескольких этапов, изображённых на рис. 1 в виде блок-схемы. На первоначальном этапе создаётся 3D модель в программе Autodesk Fusion 360 (рис. 1,а) и отправляется на принтер для печати (рис. 1,б).

После завершения 3D-печати изделие помещается в автоматическое устройство для очистки (рис. 1,в). (резервуар с изопропиловым спиртом) с целью промывки и удаления не полимеризованной смолы. После очистки деталь помещается в камеру ультрафиолетового послеполимеризационного отверждения (рис. 1,г) для завершения обработки внешнего слоя изготовленной

структуры. Перед финальным этапом постобработки, изделие помещается в ультразвуковую ванну (рис. 1,д), наполненную спиртом для повторной и тщательной промывки неполимеризованной смолы. В завершающем этапе деталь помещается в лабораторный сушильный шкаф (рис. 1,е) для испарения остаточных неполимеризованных смол внутри структуры. Для формирования тонких медных покрытий (рис. 1,ж) использовался процесс магнетронного распыления на постоянном токе. Металлические покрытия из бескислородной меди были нанесены магнетронным способом на сформированные структуры из термостойкой фотополимерной смолы TR250 LV с помощью установки NexDep (Angstrom Engineering, Канада). Для предотвращения отслоения медных пленок от пластика наносился адгезионный подслоя из хрома толщиной 20-50 нм. С целью улучшения равномерности металлизации на разных частях изделий в процессе магнетронного распыления они закреплялись на держателе. Полученная толщина медной пленки составляла от 1 до 5 мкм.

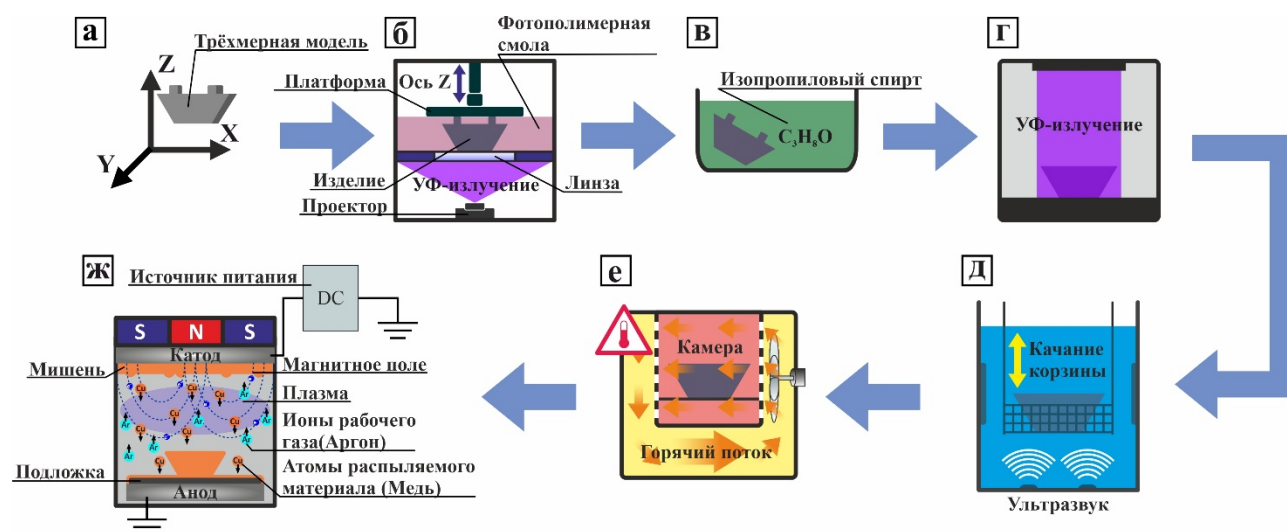


Рис. 1. Этапы аддитивной микрообработки и последующей обработки структур: разработка трёхмерной модели макета (а), печать структур на 3D-принтере (б), очистка и промывка изготовленных структур изопропиловым спиртом от не полимеризованной смолы (в), окончательное ультрафиолетовое отверждение (г), дополнительная очистка и промывка в ультразвуковой ванне, наполненной спиртом (д), сушка в лабораторном сушильном шкафу (е), металлизация изготовленных структур методом магнетронного распыления (ж).

2. Стереолитография с цифровой обработкой светом.

Стереолитография, или SLA, представляет собой метод полимеризации с использованием светочувствительного материала. В 3D принтерах, работающих по технологии SLA, для засветки используется ультрафиолетовый лазерный луч, который в ходе 3D печати в жидкой фотополимерной смоле обводит площадь формируемого изделия по слоям. На рис. 2 представлена схема процессов печати с использованием DLP и SLA принтеров

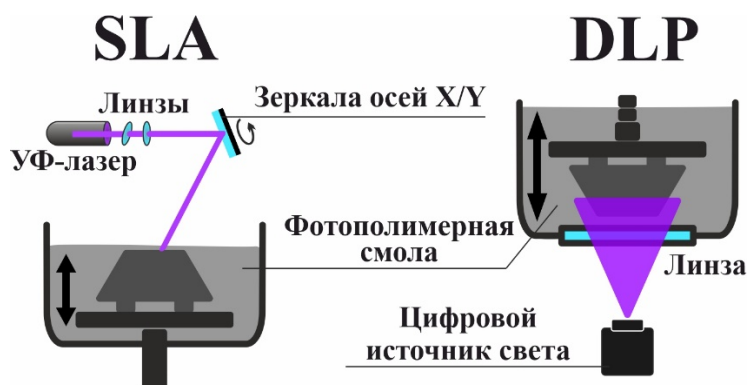


Рис. 2. Схематическое изображение процессов печати DLP и SLA.

Метод стереолитографии с применением цифровой обработки света (Direct Light Processing, DLP) основывается на проецировании цифрового изображения всего слоя структуры при помощи цифрового проектора, расположенного в нижней части устройства и микрозеркального устройства (Digital Micromirror Device, DMD). Низ емкости обычно сделан из прозрачной, износостойкой пленки. Такая пленка хорошо пропускает УФ-излучение, к ней практически ничего не прилипает. Это позволяет одномоментно отверждать целый слой материала, состоящего из квадратных пикселей, что приводит к созданию трёхмерного слоя, состоящего из вокселей, значительно ускоряя процесс печати, что особенно важно для задач быстрого прототипирования. Высокая точность и равномерность экспозиции DMD позволяют 3D-принтерам на основе DLP-технологии создавать структуры развитой геометрии с допусками до десятков микрон.

Для изготовления макетов использовался 3D-принтер Asiga Max X DLP 3D. Латеральное разрешение печати исследуемого 3D-принтера составляет $27 \times$

27 мкм, при этом вертикальный шаг по оси Z установлен на уровне 50 мкм. В результате формируемый воксель имеет объем с размерами $27 \times 27 \times 50$ мкм. В качестве фотополимерного материала применялась функциональная смола TR250LV (Phrozen, КНР).

4. Технология аддитивного изготовления. На первом этапе были разработаны и изготовлены образцы прямых волноводов длиной 5 см. Волноводные секции стандартов WR10 и WR15, предназначенные для работы в диапазонах W (70–110 ГГц) и V (50–70 ГГц) соответственно. Геометрические параметры приведены в таблице 2. Конструкции состоят из двух частей: основания с прямоугольным пазом размерами $w \times h$ и верхней крышки.

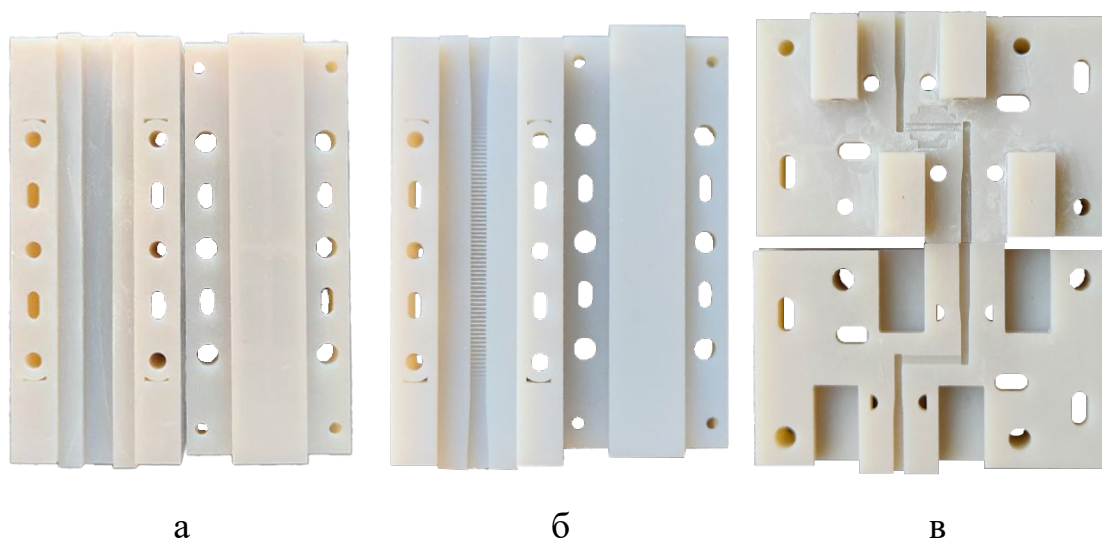


Рис. 3. Прямой участок волновода для работы в диапазоне частот V (а), замедляющая система типа одиночной гребёнки для работы в диапазоне частот W (б) и измерительная оснастка под замедляющую систему для работы в ди в диапазоне частот W (в), изготовленные с помощью DLP-3D-печати.

Двухсоставная структура обеспечивает доступ к внутренней полости волновода для последующей очистки от остаточной смолы и нанесения металлического покрытия методом магнетронного распыления. На рис. 3 представлены фотографии напечатанных отдельных половин, а на рис. 4 — тех же образцов после металлизации.

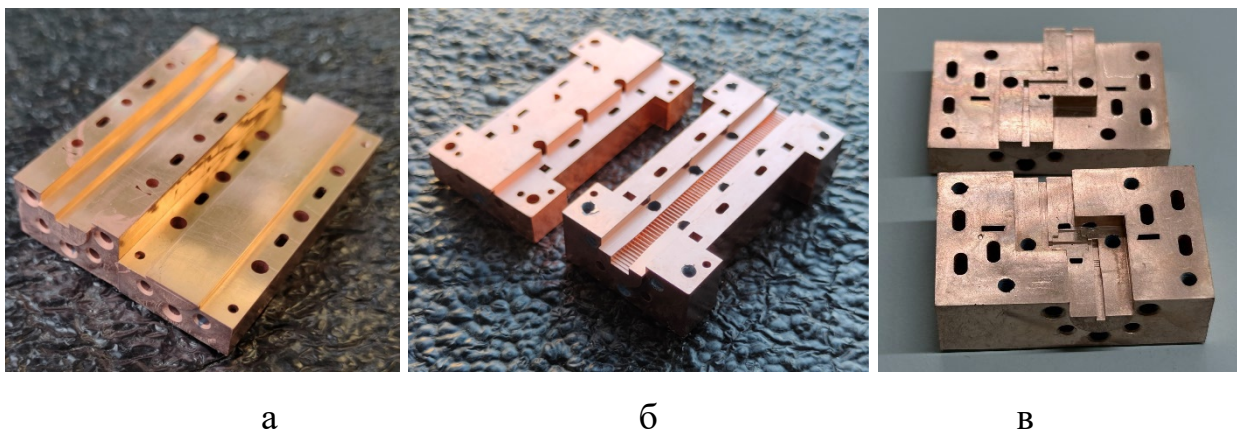


Рис. 4. Фотографии прямого участка волновода (а), замедляющей системы типа одиночной гребёнки (б) и измерительной оснастки для замедляющей системы (в), изготовленных методом DLP-3D-печати с последующей металлизацией посредством магнетронного распыления.

Таблица 2. Геометрические параметры прямых участков волновода

Стандарт волновода	Высота центрального канала прямоугольного волновода, h (мм)	Ширина центрального канала прямоугольного волновода, w (мм)	Длина волноводной части (мм)
WR10	1,25	2,538	51
WR15	1,85	3,753	51

5. Исследование электродинамических параметров. Следующим этапом работы стало экспериментальное исследование электродинамических характеристик волноводных секций, включая потери на отражение и передачу. Измерения в V-диапазоне проводились с использованием векторного анализатора цепей PNA N5227A (Keysight Technologies, США) при различных толщинах металлизации.

В W-диапазоне измерения S-параметров осуществлялись на анализаторе ZVA40 (Rohde & Schwarz, Германия) совместно с частотными преобразователями ZVA-Z110, обеспечивающими работу в диапазоне 75–110 ГГц.

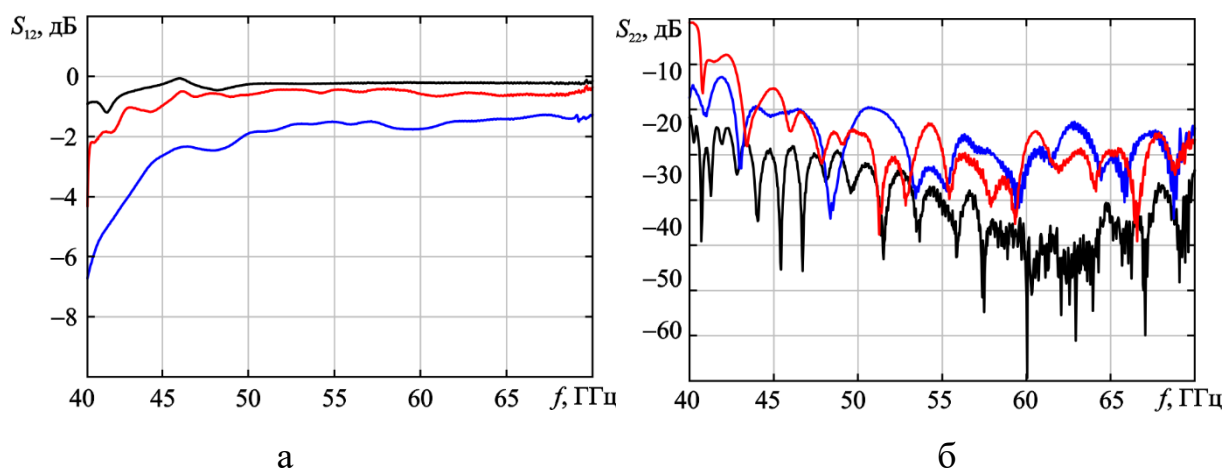


Рис. 5. Коэффициенты передачи (а) и отражения (б) для экспериментального и эталонного волноводов V-диапазона. Синие кривые — толщина металлизации 1 мкм, красные — 3 мкм, черные — эталонная волноводная секция

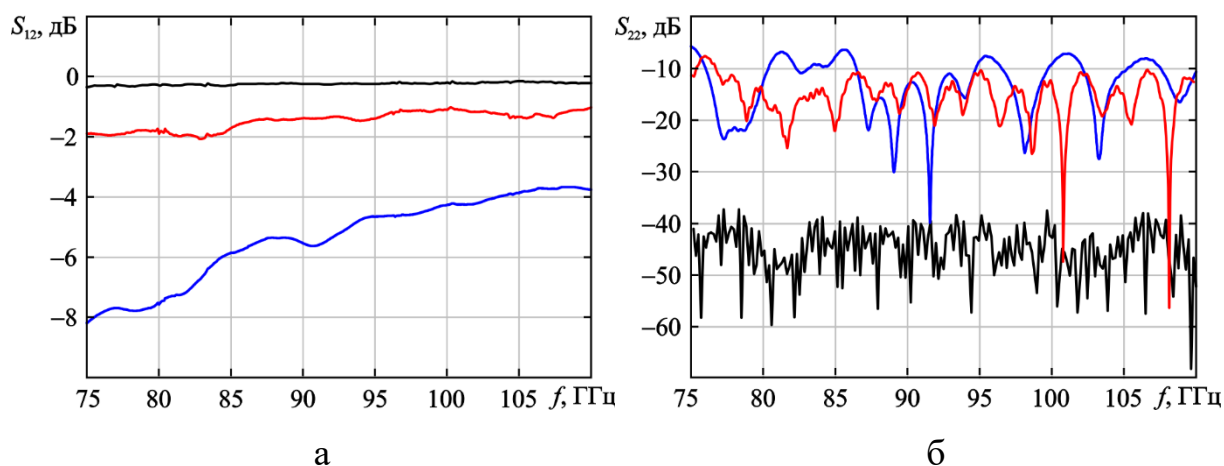


Рис. 6. Результаты измерения S-параметров напечатанных на 3D-принтере прямых волноводных секций стандарта WR-10 (а,б). Синие кривые — толщина металлизации 1 мкм, красные — 3 мкм, черные — эталонные волноводные секции

На рис. 5 представлены экспериментальные данные для V-диапазона напечатанных структур и покрытых медью и их сравнение с прямой эталонной волноводной секцией с золотым покрытием (длина 50 мм). При измерении прототипов после увеличении толщины медного покрытия с 1 до 3 мкм наблюдается существенное снижение потерь на передачу, значения которых приближаются к эталонным. Коэффициент отражения остаётся ниже -20 дБ на всём диапазоне. Потери на передачу для образца с толщиной покрытия 1 мкм не превышают -2 дБ, а при увеличении толщины до 3 мкм — становятся ещё ниже.

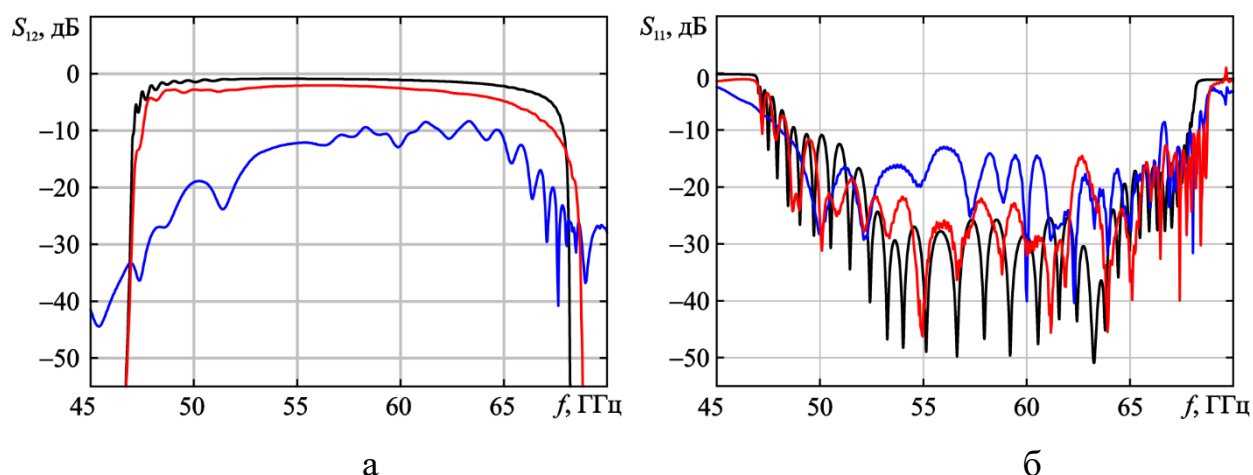


Рис. 7. Результаты измерения S-параметров ЗС V-диапазона: а – зависимость потерь на передачу от частоты; б – зависимость потерь на отражение от частоты. Синие кривые — первоначальный дизайн, толщина металлизации 3 мкм, красные — модифицированный дизайн, толщина металлизации 5 мкм, черные — численное моделирование.

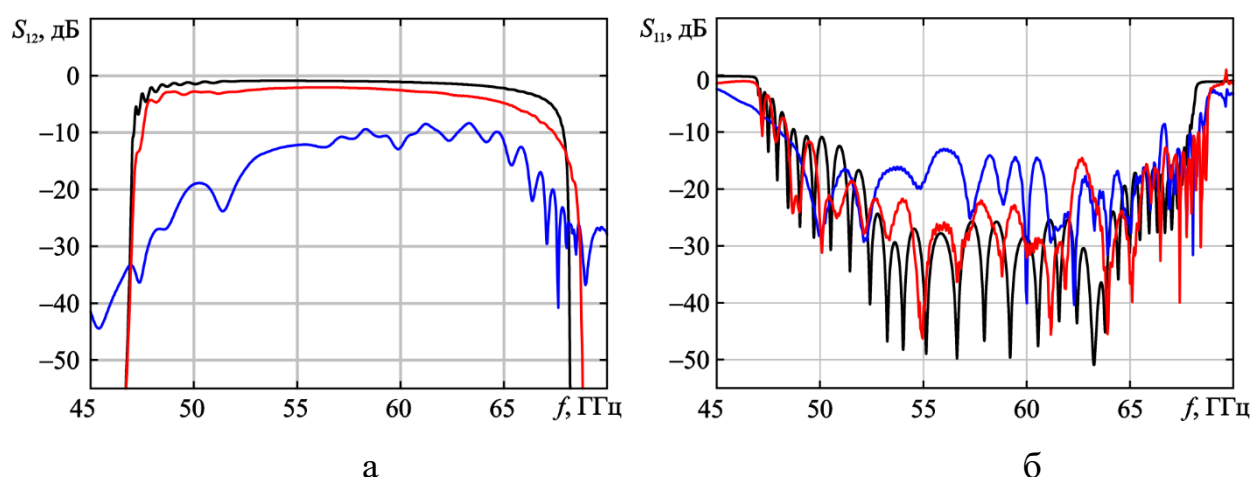


Рис. 8. Результаты измерения S-параметров ЗС W-диапазона: а – зависимость потерь на передачу от частоты; б – зависимость потерь на отражение от частоты. Синие кривые — первоначальный дизайн, толщина металлизации 3 мкм, красные — модифицированный дизайн, толщина металлизации 5 мкм, черные — численное моделирование.

На рис. 6 а,б представлены результаты измерений S-параметров для волновода W диапазона, которые сопоставлены с данными для эталонной металлической волноводной секции, покрытой золотом (длина 50 мм). Как и в предыдущем случае, увеличение толщины металлизации с 1 мкм до 3 мкм привело к значительному снижению потерь на передачу, которые приблизились к значениям эталонного образца. При толщине металлизации 1 мкм

зафиксированы значительные потери на передачу, варьирующиеся в диапазоне -4 до -8 дБ. Увеличение толщины до 3 мкм привело к существенному улучшению характеристик: потери на передачу не превышали -2 дБ. Одновременно наблюдалось уменьшение потерь на отражение, которые не превышали -10 дБ.

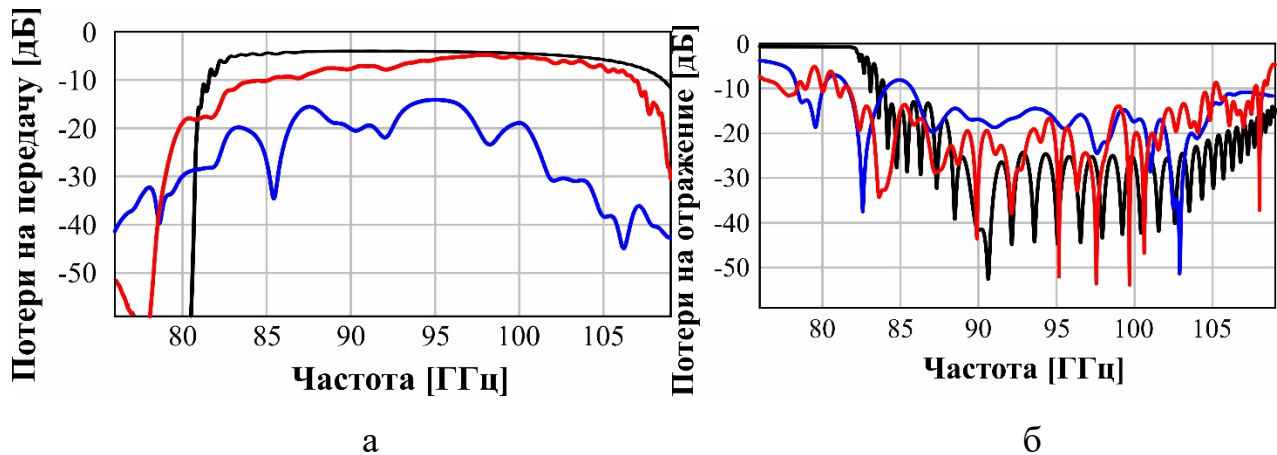


Рис. 9. Результаты измерения S-параметров ЗС W-диапазона: а – зависимость потерь на передачу от частоты; б – зависимость потерь на отражение от частоты. Синие кривые — первоначальный дизайн, толщина металлизации 3 мкм, красные — модифицированный дизайн, толщина металлизации 5 мкм, черные — численное моделирование.

На рис. 7 показано сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования в CST Studio для макета с толщиной металлизации 3 мкм. Несмотря на расчётные ожидания, измеренные потери превышали -10 дБ, а коэффициент отражения — расчётные значения. Это обусловило необходимость модификации конструкции: уменьшен зазор между половинами структуры с 100 до 50 мкм, размещение отверстий для винтов ближе к центральному каналу ЗС, добавлены дополнительные винты на торцах, толщина металлизации была увеличена до 5 мкм.

В результате, как видно на рис. 8, параметры доработанного макета (красные кривые) демонстрируют хорошее согласие с моделированием: потери на передачу в диапазоне 50–65 ГГц не превышают -3 дБ, коэффициент отражения — лучше -20 дБ. Аналогично, на рис. 10 показаны результаты для W-диапазона: потери не превышают -6 дБ, отражение — менее -20 дБ, что

подтверждает эффективность конструктивных изменений и увеличение толщины металлизации.

Заключение

В рамках исследования были изучены различные технологии создания компонентов, используя стереолитографическую печать на основе DLP и последующую металлизацию методом магнетронного распыления. Основное внимание уделено оптимизации геометрических параметров компонентов для обеспечения точности изготовления сложных периодических электродинамических структур, таких как замедляющие системы типа плоских гребенок. Исследованная относительная погрешность изготовления не превышает 3%.

Экспериментальные измерения электродинамических параметров подтвердили высокое качественное и количественное соответствие с результатами численного моделирования. Например, для периодической ЗС с комплексным профилем волновода и изменяющейся высотой ламелей потери на передачу в рабочем диапазоне частот составляют менее –3 дБ, что соответствует различиям не более 1 дБ по сравнению с численным моделированием. Предложенный подход эффективен, а созданные структуры демонстрируют высокую точность соответствия численным моделям.

Дополнительно была разработана конструкция плоской гребенки типа V-диапазона в волноводе с использованием программного обеспечения, написанного на языке Wolfram Mathematica, и проверена на соответствие численным моделям, созданным в COMSOL Multiphysics. Результаты моделирования показали хорошее соответствие дисперсионных характеристик между экспериментальными и численными данными.

Анализ морфологии и профилометрии изготовленных структур подтвердил, что увеличение толщины металлизации уменьшает шероховатость поверхности до приемлемых значений в диапазоне 3–5 мкм. Все этапы от старта 3D-печати до получения металлизированного макета структуры могут быть завершены в течение одного рабочего дня.