

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

На правах рукописи



Труфанова Наталья Сергеевна

КОМПОНЕНТЫ И СВЧ-УСТРОЙСТВА, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫЕ НА
ОСНОВЕ АДДИТИВНОЙ ПРИНТЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Специальность 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии
Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
канд. техн. наук
Артищев Сергей Александрович

Томск 2024

Оглавление

Введение.....	3
1 Достижения и перспективы изготовления компонентов и СВЧ-устройств с помощью аддитивной принтерной технологии (обзор).....	10
1.1 Антенны	11
1.2 Полосковые линии	21
1.4 Функциональные устройства.....	25
1.5 Квази-сосредоточенные компоненты	28
1.6 Обзор материалов, используемых в аддитивной технологии	31
1.7 Выводы.....	39
2 Исследование применимости аддитивной принтерной технологии для изготовления компонентов и СВЧ-устройств.....	42
2.1 Исследование характеристик печатных полосковых проводников.....	42
2.2 Усовершенствование технологии принтерной печати на основе численного моделирования экструзии паст	64
2.3 Разработка и применение паст.....	79
2.4 Разработка рекомендаций по совершенствованию аддитивной принтерной технологии	96
2.5 Выводы.....	104
3 Конструкции и характеристики компонентов и полосковых устройств...	105
3.1 Фильтры	105
3.2 Направленные ответвители.....	119
3.3 Изготовление макетов односторонних тестовых плат.....	129
3.4 Изготовление многослойных тестовых плат.....	133
3.5 Выводы.....	144
Заключение	145
Список литературы	147
Приложение А. Акты о внедрении результатов работы (справочное).....	160

Введение

Актуальность темы исследования

Современные тенденции развития антенных систем направлены на расширение рабочей полосы частот, повышение коэффициента усиления антенны и сокращение габаритных размеров. Отдельные узлы антенных систем выполняют на основе микрополосковых линий и резонаторов (микрополосковые антенны, фильтры, импедансные преобразователи, делители мощности, фазовращатели и т.д.) [1, 2].

Существуют различные методы и технологии, которые позволяют создавать более компактные, высокоэффективные и надежные антенные системы и СВЧ-узлы, что крайне важно в современных условиях, когда повышаются требования к функциональности и компактности при сохранении качества связи. Широкое применение в СВЧ-технике получила технология LTCC (Low Temperature Co-Fired Ceramic), т.к. позволяет создавать сложные многослойные структуры, которые интегрированы в единую керамическую матрицу, что улучшает их механическую прочность и надежность [3].

Одним из ключевых аспектов технологии LTCC является применение трафаретной печати, когда функциональные пасты переносят ракелем через сетчатый шаблон для получения топологического рисунка. Трафаретная печать стала важным элементом в производстве электроники, начиная с 1960-х годов и до сих пор продолжает использоваться для создания высококачественных и надежных электронных устройств.

При этом трафаретная печать применяется не только в СВЧ-технике, но и при создании низкочастотных и сильноточных гибридных интегральных. Её развитие было результатом коллективных усилий в области науки и технологий, таких авторов, как В.Г. Красов, Г.Б. Петраускас, Ю.С. Чернозубов, М. Топфер, Ю.В. Исаев, В.Я. Подвигалкин, Н.М. Ушаков, И.Д. Кособудский и др. Благодаря их вкладу в развитие толсто пленочной технологии созданы конструкции высоконадежных СВЧ-устройств – разработаны новые линии передачи (щелевые и копланарные), новые

топологии пассивных и активных элементов. Были получены значительные результаты в области разработки новых типов паст и подложек, композиций на основе металлоорганических и светочувствительных соединений.

Применение трафаретной печати сопряжено с рядом недостатков, таких как, дороговизна подготовки трафаретов и их совмещения; высокая трудоемкость операций; избыточный расход материалов; невозможность одновременного нанесения различных материалов.

Перспективной технологией является прямая печать материалов без применения трафаретов, например, поршневым или шнековым дозированием материала на подложку при помощи специализированных устройств (принтеров) непосредственно по цифровой модели. Применение данной технологии позволит исключить изготовление трафаретов, снизит потери материала на формирование топологии, обеспечит возможность получения многослойных гибридных интегральных схем (ГИС) в одном технологическом цикле и сократит время изготовления, обеспечит возможность быстрого прототипирования ГИС.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время работы, посвященные аддитивной принтерной технологии нанесения материала, находятся на стадии перехода от научных исследований к практическому внедрению (Sreenilayam S.P., Huang X., Li D., Lee J. и т.д.). Отечественные коллективы демонстрируют результаты за последние 10 лет преимущественно в области использования струйной печати (ink-jet) для формирования проводящих пленок на основе серебросодержащих или графеновых чернил на гибком основании, а также при формировании органических светоизлучающих диодов (Алешин А.Н., Филиппов Е.И., Адамантов И. Е., Малютин Н. Д., Туев В. И., Здрок А. Е., и др.). В работах используются струйные принтеры как самостоятельно разработанные и адаптированные для печати функциональными материалами, так и коммерческие принтеры, такие как Dimatix Materials DMP-2850, Sonoplot GIX Microplotter II. За рубежом активно ведутся работы, направленные на создание

оборудования для печати вязкими пастами: разработаны принтеры для изготовления печатных плат Voltera V-One, GPD Global Catalina и др. Применение многослойных ГИС, изготовленных по принтерной технологии, вызывает ряд вопросов, связанных с совместимостью проводящих и диэлектрических материалов. Развитие принтерной технологии возможно при создании широкой номенклатуры функциональных паст с определенной вязкостью и температурой спекания. В мире лидирующие позиции по созданию подобных композиций занимают компании DuPont, ESL, Cermalloy и др. В России лидирующие позиции по разработке паст для трафаретной печати занимают компании Элма-пасты, Дельта-пасты и др. Однако на отечественном рынке не представлено паст, адаптированных для нанесения без применения трафаретов. Поэтому представляет интерес проведение исследования для создания собственных паст.

Результаты, полученные с использованием наиболее близких технических решений, реализующих печать пастами с высокой вязкостью, представляют собой изготовление одно- и двухсторонних печатных плат, изготовленных в качестве прототипов. Образцы СВЧ-фильтров и антенн X-диапазона представлены в работах следующих авторов: Naerinia M., Noghianian S., Correia, V., Mitra, K.Y., Correia, V., Mitra, K.Y., Castro, H., Rocha, J.G., Sowade, E., Baumann, R.R., Лоцилов А.Г., Здрок А.Е. В работах использованы низкотемпературные полимерные пасты. Существенным недостатком полученных образцов является слабая адгезия к подложке, а также высокое удельное сопротивление. Данные недостатки могут быть устранены при использовании материалов, предназначенных для трафаретной технологии печати (пасты с высокой вязкостью), а значит, требуется разработка технологий и оборудования для их прямого нанесения по цифровому файлу (без использования трафаретов).

Целью работы является исследование возможности применения аддитивной принтерной технологии изготовления компонентов и СВЧ-устройств для применения в антенных системах.

Основные задачи исследования:

1. Аналитический обзор методов аддитивной технологии изготовления компонентов и СВЧ-устройств;
2. Разработка и изготовление полосковых линий по аддитивной принтерной технологии и исследование их характеристик;
3. Численное моделирование процесса экструзии паст поршневым дозатором;
4. Разработка составов паст, пригодных для аддитивной принтерной технологии;
5. Изготовление СВЧ-устройств и компонентов по аддитивной принтерной технологии, экспериментальное исследование их частотных характеристик;
6. Разработка рекомендаций по совершенствованию аддитивной принтерной технологии для изготовления компонентов и СВЧ-устройств.

Научная новизна

1. Определено, что при проектировании микрополосковой линии с требуемым характеристическим сопротивлением следует учитывать растекаемость паст на 50 мкм относительно диаметра используемого сопла.
2. С использованием уравнения Навье-Стокса для двухфазной среды описана математическая модель процесса экструзии паст, которая позволила определить граничные условия применения аддитивной принтерной технологии для изготовления полосковых проводников с достаточной однородностью геометрической формы при создании СВЧ-устройств.
3. Получены составы диэлектрических паст, вязкость которых адаптирована для использования в аддитивной принтерной технологии изготовления компонентов и СВЧ-устройств.
4. С определенными технологическими режимами аддитивной принтерной технологии получены пассивные СВЧ-устройства, такие как фильтры нижних/верхних частот и полосно-пропускающие, а также направленные ответвители со слабой боковой и сильной лицевой связью со

средними вносимыми потерями менее 1 дБ в диапазоне рабочих частот, включая L- и S-диапазоны.

Теоретическая значимость работы

Полученная в результате численного моделирования математическая модель процесса экструзии паст позволила определить технологические режимы их нанесения для получения полосковых линий с характеристическим сопротивлением в диапазоне до 97 Ом на керамической подложке с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 9,8$ и толщиной 1 мм.

Практическая значимость работы

1. Полученные результаты показывают возможность применения технологии для изготовления СВЧ-устройств с L, S-диапазоном рабочих частот, в том числе с применением низкотемпературной спекаемой керамики (LTCC) без применения трафаретов.

2. Подобранные соотношения связующего материала и функционального порошка позволяет создавать диэлектрические, сегнетоэлектрические, ферритовые и другие пасты, адаптированные для аддитивной принтерной технологии.

3. Прецизионное дозированное нанесение пасты позволяет проводить коррекцию расчетных индуктивных и емкостных параметров распределенных элементов для настройки СВЧ-узлов.

4. Сформулированы рекомендации по применению аддитивной принтерной технологии для однородного нанесения топологии полосковых устройств без применения трафаретов.

5. Полученные технологические режимы, а также рекомендации по оптимизации аддитивной принтерной технологии использованы при разработке опытного образца технологической установки изготовления керамических печатных плат в интересах АО «НПЦ «Полус», что подтверждается соответствующим актом внедрения.

6. Разработанные и напечатанные образцы планарных компонентов используются в учебном процессе подготовки бакалавров при выполнении

лабораторных работ на кафедре конструирования узлов и деталей РЭА Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Методология и методы исследования

В работе использован комплексный подход, включающий в себя анализ научных и технических источников, охватывающих область исследования, математическое моделирование, экспериментальные исследования, экстракцию параметров по данным измерений с использованием моделей микрополосковых линий.

Положения, выносимые на защиту

1. Получено технологическое ограничение применения аддитивной принтерной технологии для изготовления СВЧ-устройств, которым является скорость линейного перемещения дозатора в диапазоне 300–500 мм/мин с использованием сопла диаметром 100 мкм, что позволяет изготавливать однородные полосковые линии шириной от 150 мкм с обеспечением характеристического сопротивления в диапазоне до 97 Ом и вносимыми потерями не более 1,5 дБ/м на керамической подложке с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 9,8$ и толщиной 1 мм.

2. На основе численного моделирования экструзии паст с использованием уравнения Навье-Стокса для двухфазной среды показана возможность изготовления однородных в поперечном сечении полосковых линий в режиме непрерывного нанесения пасты с вязкостью 50–100 Па·с при расстоянии между соплом и подложкой 0,1 мм.

3. Достигнутое качество нанесения материала позволяет использовать аддитивную принтерную технологию для изготовления как однослойных, так и многослойных компонентов и СВЧ-узлов, рассчитанных на L- и S-диапазоны рабочих частот со средними вносимыми потерями менее 1 дБ и возможностью использования в качестве промежуточных слоев функциональных паст, обладающих магнитными, диэлектрическими или сегнетоэлектрическими свойствами.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов исследования подтверждена применением известных численных методов и согласованностью результатов, полученных в программных средствах и экспериментально. Достоверность измеренных частотных характеристик и первичных параметров подтверждается использованием поверенных средств.

Апробация результатов

Апробация основных результатов работы подтверждается публикациями в рецензируемых журналах. Основные результаты диссертационной работы представлялись на следующих конференциях: «Научная сессия ТУСУР» 2021–2023; «Электронные средства и системы управления» 2021, 2022; 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON).

Результаты диссертации прошли экспертную оценку в составе отчетов по выполнению гос. задания по проекту FEWM-2022-0005 Министерства науки и высшего образования РФ по теме «Разработка и исследование технологии аддитивного принтерного изготовления функциональных узлов и элементов интегральной электроники».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 28 печатных работ, в т.ч. 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 10 статей индексируемые в базах данных Scopus и Web of Science, 15 работ, опубликованы в материалах международных конференций. Кроме того, результаты работы отражены в 7 отчетах по НИОКР. Получено 3 свидетельства регистрации программы ЭВМ.

Личный вклад

Все результаты диссертации, выносимые на защиту, получены автором лично. Постановка задач исследований осуществлялась научным руководителем С.А. Артищевым. На основе разработанных автором рекомендаций коллективом инженеров лаборатории печатной электроники разработан макет принтера.

1 Достижения и перспективы изготовления компонентов и СВЧ-устройств с помощью аддитивной принтерной технологии (обзор)

Применение аддитивной технологии печати для изготовления гибридных интегральных схем и устройств набирает популярность за счет снижения временных затрат на прототипирование и получение готовых изделий [4–6]. Ведутся исследования в области струйной печати [7, 8], однако при использовании этой технологии возможно формирование только тонкопленочных элементов толщиной до 1 мкм. По технологии струйной печати известны примеры исследований изготовления RFID-меток [9], антенн [10–13] разного типа: меандровые, двухдиапазонные, монополярные, дипольные, сверхширокополосные и др.

Для получения толстопленочных элементов применяются принтеры на основе поршневой, шнековой и пневматической экструзии паст [4]. Состав и характеристики паст для поршневой и шнековой экструзии существенно отличаются от чернил, применяемых для струйной печати, а также от паст для трафаретной печати. Основное отличие заключается в концентрации твердых частиц и вязкости материала [5].

Однако, аддитивная технология так же, как и любое другое направление развития науки и техники, для успешного внедрения требует решения ряда задач. Трудности реализации принтерной технологии изготовления компонентов и устройств в производстве вызвано техническими требованиями, предъявляемыми к устройству: проводимость, химическая и термическая стойкость, адгезионная прочность и др.

В рамках данного научного исследования рассматриваются основные возможности и ограничения аддитивной принтерной технологии, как одного из способов изготовления компонентов и устройств в области СВЧ, а также пути решения возможных трудностей.

Для этих целей проведен обзор существующих технологических приемов изготовления антенн и СВЧ-узлов по принтерной технологии. Выявлены главные достижения и проблемные области, связанные с технологией печати.

1.1 Антенны

В настоящее время развитие аддитивной технологий в той или иной степени базируется на достижениях в области материалов. Направление создания функциональных узлов с применением принтеров находится в стадии достаточно динамичного развития, поэтому исследования и разработки в данной области – актуальная задача.

Одним из направлений применения аддитивной технологии, как способа изготовления радиокомпонента, является – RFID-антенна или RFID-метка. RFID-метка – составляющая часть системы радиочастотной идентификации. По источнику питания RFID-метки делятся на пассивные, активные и полупассивные. Пассивные RFID-метки не имеют встроенного источника энергии. Электрический ток, индуцированный в антенне электромагнитным сигналом от считывателя, обеспечивает достаточную мощность для функционирования чипа, размещенного в метке, и передаче сигнала [14].

Изготовление RFID-метки по принтерной технологии сокращает время и затраты на производство в сравнении с традиционными методами, при этом используя механически гибкие и экологически чистые подложки (например, фотобумага) и сохраняя высокую производительность радиочастотного компонента. В [15, 16] описаны результаты исследований изготовления RFID-метки методом струйной печати.

Согласно [15], по струйной технологии была напечатана RFID-антенна на бумажном основании размером 8,2x4,5 см. На рисунке 1.1 представлены процесс изготовления (а) и готовый макет изделия (б).

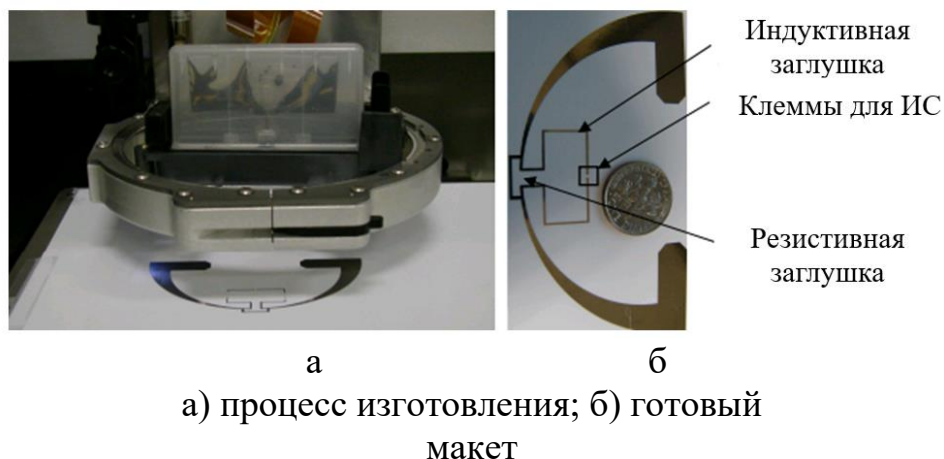


Рисунок 1.1 – Макет RFID-антенны

Представленная антенна была рассчитана на центральную частоту 914 МГц (рисунок 1.2). Эффективность излучения, согласно представленным данным, составила 92%.

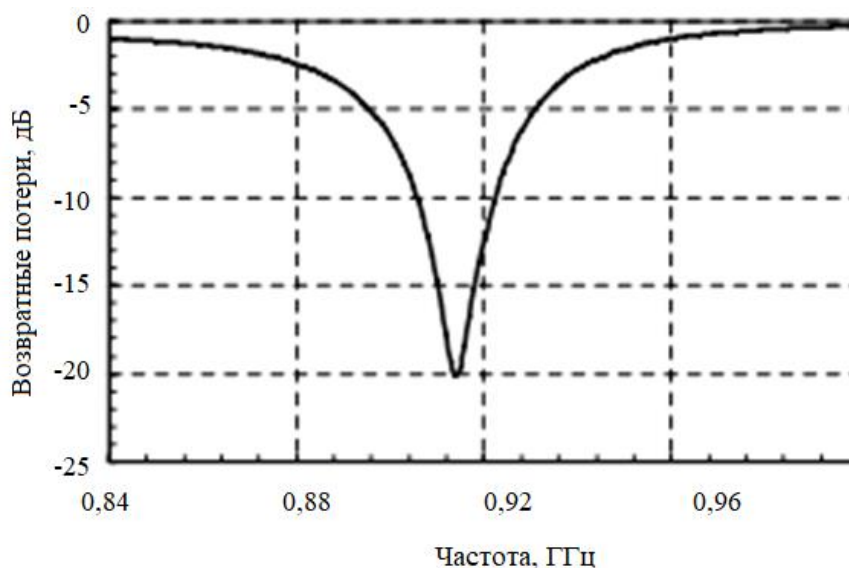


Рисунок 1.2 – График обратных потерь RFID-антенны [15]

В [16] представлено решение изготовления радиочастотного симметрирующего трансформатора, изготовленного для соединения несимметричных схем со сбалансированными антеннами. Ранее было невозможно реализовать преобразователи, используя струйную технологию, из-за их сложной многоуровневой топологии и отсутствия хорошо характеризуемого, надежного многоуровневого процесса. Однако усовершенствование технологии позволило изготовление таких сложных

компонентов. Предложенный симметрирующий трансформатор представлен на рисунке 1.3.

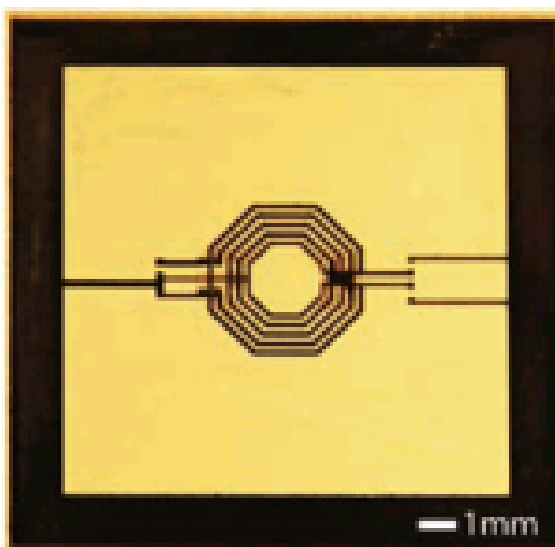


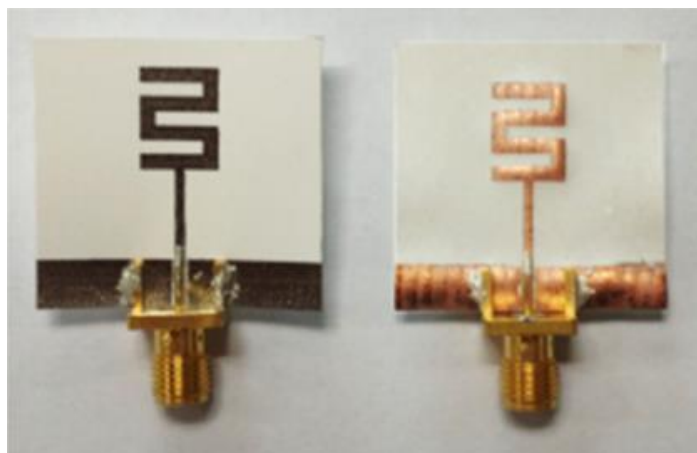
Рисунок 1.3 – Оптическая микрофотография симметрирующего трансформатора [16]

Усиление симметрирующего трансформатора составляет минус 1,7 дБ на рабочей частоте 1,4 ГГц, означая, что при соответствии условий 67% входной мощности будут переданы на выход.

В [17] рассматривается влияние толщины напечатанного слоя на характеристики антенн для RFID-меток. Были напечатаны три метки методом трафаретной печати с толщинами 13,9 мкм, 21,5 мкм и 50,5 мкм. При сравнении меток был сделан вывод, что уменьшение толщины проводника приводит к увеличению потерь, что снижает эффективность и приводит к более слабому обратному рассеянию от метки.

В работе приводится [10] сравнение двух антенн (рисунок 1.4), изготовленных двумя разными технологиями. Медная антенна была изготовлена с использованием осаждения безэлектролитной меди в течение 50 минут, а серебряная антенна была получена путем струйной печати пяти слоев серебряных чернил с последующей термообработкой при 120 °С в течение 2 часов на воздухе. Как и в предыдущей публикации, антенна были

напечатана при помощи принтера Dimatix (DMP-2800). В качестве подложек использовалась гибкая бумага.



а) б)

а) напечатанная антенна из серебра; б) антенна, изготовленная путем осаждения меди.

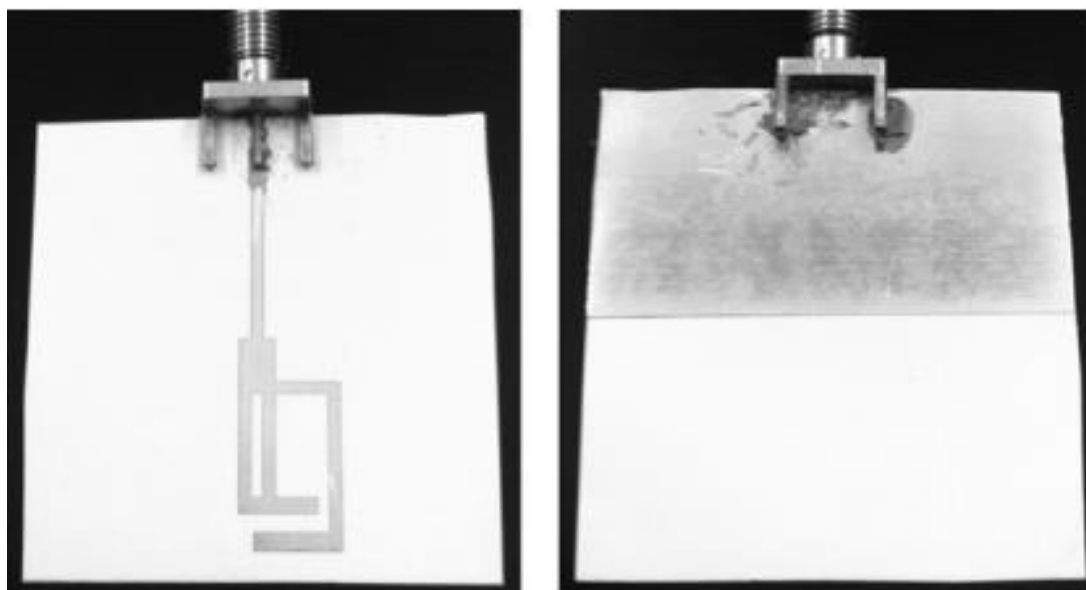
Рисунок 1.4 – Меандровые антенны [10]

Для присоединения разъемов SMA к обеим антеннам для измерений использовалась проводящая серебросодержащая эпоксидная смола.

Результаты измерений показали:

- образцы на основе меди обладают примерно сопоставимыми значениями электропроводности (10^5 – 10^6 См/м), что и для образцов серебряных образцов;
- моделированные обратные потери, дали центральную частоту 2,45 ГГц и полосу импеданса 450 МГц;
- разработана меандровая монополярная антенна с частотой 2,4 ГГц.

В [18] приводится компактная двухдиапазонная печатная антенна, напечатанная на бумажной подложке (рисунок 1.5). Такие антенны могут устанавливаться в любое приложение в диапазоне от 1,1 до 7,5 ГГц. При изготовлении прототипа антенны был выбран диапазон частот 2,4–3,4 ГГц.



а)

б)

а) топологический слой; б) заземляющий слой.

Рисунок 1.5 – Прототип двухдиапазонной антенны [18]

Печать проводилась в пять слоев проводящими серебряными чернилами (размер наночастиц, диспергированных в углеводородном растворителе, составил 10 нм). Спекание бумажной подложки осуществлялся при температуре 160°C в течение примерно 1 часа. Для обеспечения нужной толщины макета изделия были использованы два слоя бумаги (каждый толщиной 0,22 мм). Топология антенны была напечатана на первом слое, заземляющий слой – на втором. Для измерения характеристик SMA-разъем монтировался при помощи проводящей серебряной эпоксидной смолы.

Результаты измерений показали, что антенна имеет:

- полосу пропускания 50 дБ;
- диэлектрическую проницаемость 3,5;
- тангенс угла потерь 0,05.

В [12] представлен результат изготовления монопольной и дипольной антенн методом струйной печати. Печать осуществлялась серебряными чернилами поверх частотно-избирательной поверхности, под которую поместили медный лист для формирования заземляющей плоскости искусственного магнитного проводника. Для крепления разъемов и SMD на

серебряных дорожках использовалась серебряная эпоксидная смола. На рисунке 1.6 показаны монополярная и дипольная антенны.

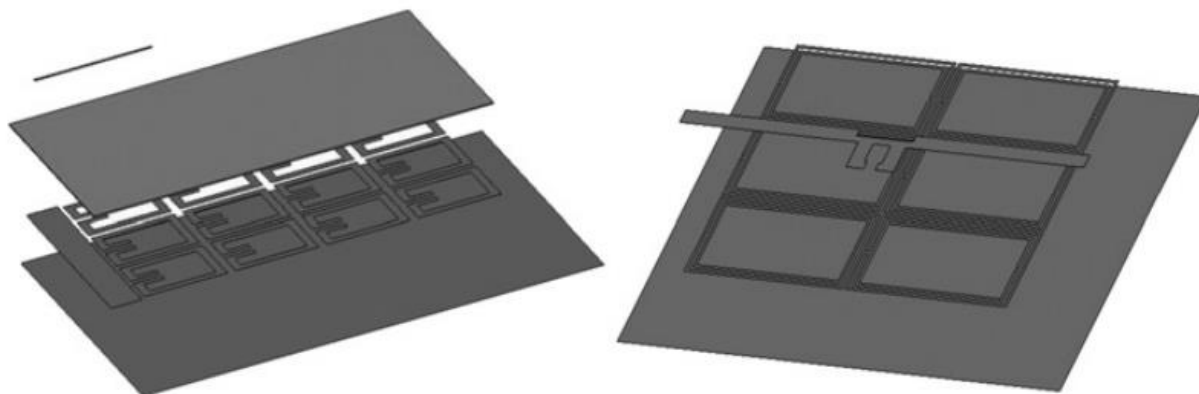


Рисунок 1.6 – Монополярная и дипольная антенны [12]

Напечатанную монополярную и дипольную антенны можно охарактеризовать частотой 2,36–2,61 ГГц и диапазоном связи 82,8 м.

В [19] представлен беспроводной сенсорный модуль (рисунок 1.7). Представленный прототип беспроводного сенсорного модуля с поддержкой RFID и дипольной антенной был напечатан на двухслойной фотобумаге. Габаритные размеры конструкции составили 9,5×6 см. В частности, антенна и схема были напечатаны серебряными чернилами на бумажной подложке и высушены. Чтобы обеспечить максимальную проводимость и эффективность антенны, схема печаталась в 12 слоев. В результате была достигнута толщина проводника 12 мкм. При сборке модуля использовалась эпоксидная смола, так как пайка исключена из-за низкой термостойкости бумаги, а также низкой адгезии контактных площадок к бумаге. Полученный беспроводной сенсорный модуль характеризуется диапазоном считывания свыше 300 м, точностью измерения температуры выше 0,2 °С.

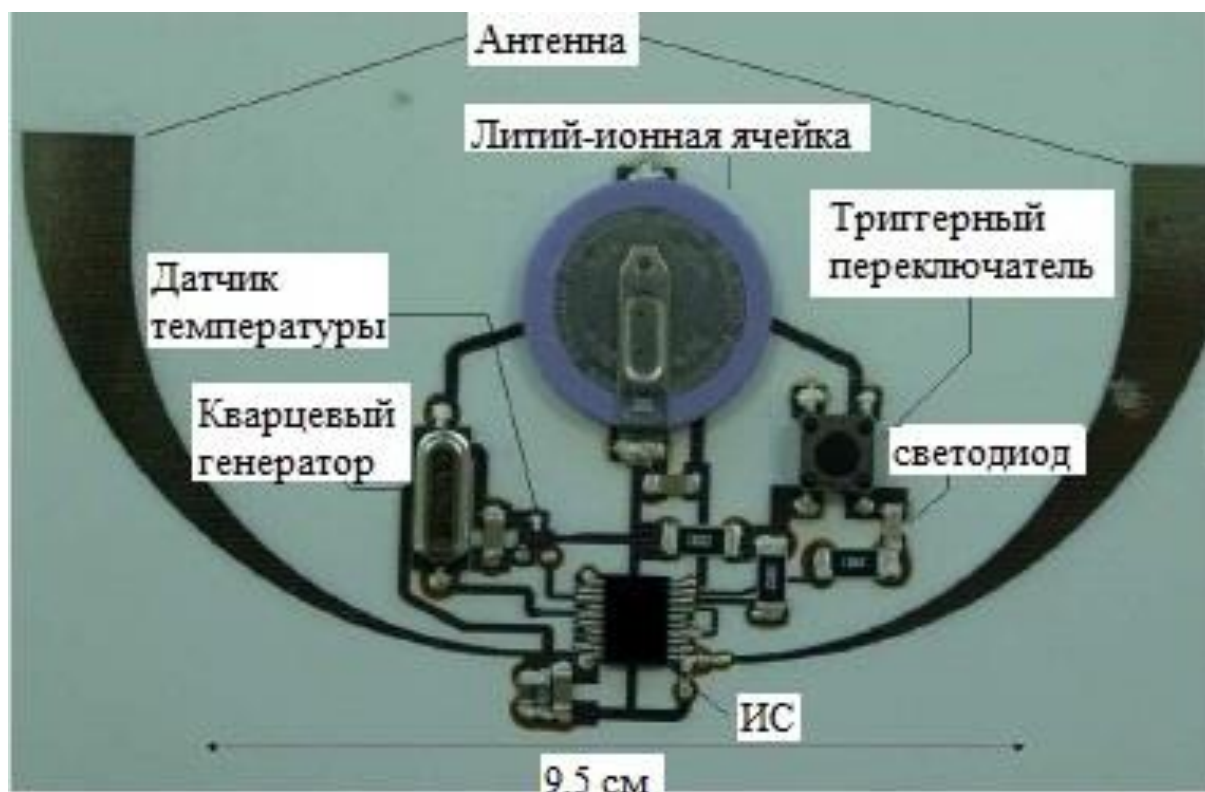
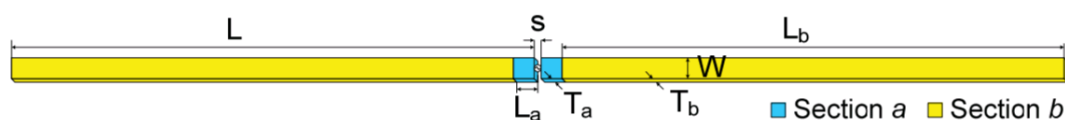


Рисунок 1.7 – Прототип беспроводного сенсорного модуля с напечатанными RFID и дипольной антенной [19]

В статье [20] описана дипольная антенна, которая состоит из областей с разной проводимостью. В предлагаемой конструкции используют проводящие чернила с более высокой проводимостью вместо утолщения, исключая дорогостоящий и трудоемкий процесс повторной печати. Антенна была изготовлена методом струйной печати за один цикл с использованием адаптированного картриджа. На рисунке 1.8 показана конструкция дипольной антенны.



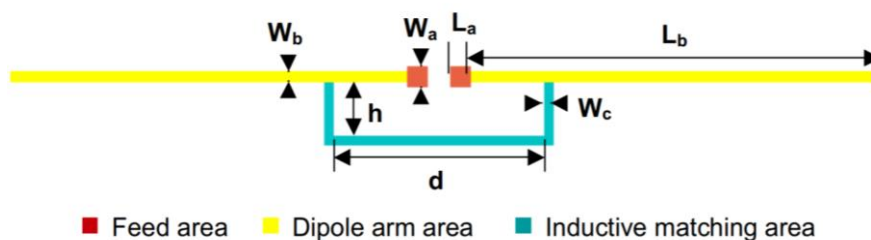
L L_b – длина плеча антенны; L_a – длина области подключения питания; T_a – толщина области подключения питания; T_b – толщина плеча антенны; W – ширина антенны; S – зазор между плечами.

Рисунок 1.8 – Конфигурация дипольной антенны [20]

Как видно из рисунка антенна разделена на 2 секции. Секция a расположена ближе к области подключения питания, следом секция b . Для

дипольной антенны характерна концентрация тока вблизи питания, то есть в секции a . В результате была получена дипольная антенна с одинаковой толщиной по всей площади.

В работе [21] приводится также дипольная антенна. Отличительной особенностью данной работы от [20] является то, что добавлена индуктивная цепь согласования импеданса. Конструкция дипольной антенны состоит из области питания, области плеч диполя и цепи индуктивного согласования (рисунок 1.9). Геометрические размеры (ширина и толщина) области питания больше, чем остальные области.



W_b – ширина антенны; W_a – ширина области питания; L_a – длина области питания; L_b – длина плеча антенны; h – расстояние между антенной и индуктивной цепью; d – длина индуктивной цепи; W_c – ширина индуктивной цепи.

Рисунок 1.9 – Дипольная антенна [21]

В результате полученные характеристики данной конструкции аналогичны при традиционном исполнении дипольной антенны, но при этом значительно сокращается количество проводящего материала, необходимое для изготовления антенны.

В статье [13] показана возможность реализации сверхширокополосной антенны методом струйной печати серебряными чернилами. Печать антенны осуществлялась на бумажной подложке в три слоя и в результате толщина составляла около 3 мкм. На рисунке 1.10 приведены геометрические размеры и напечатанная антенна.

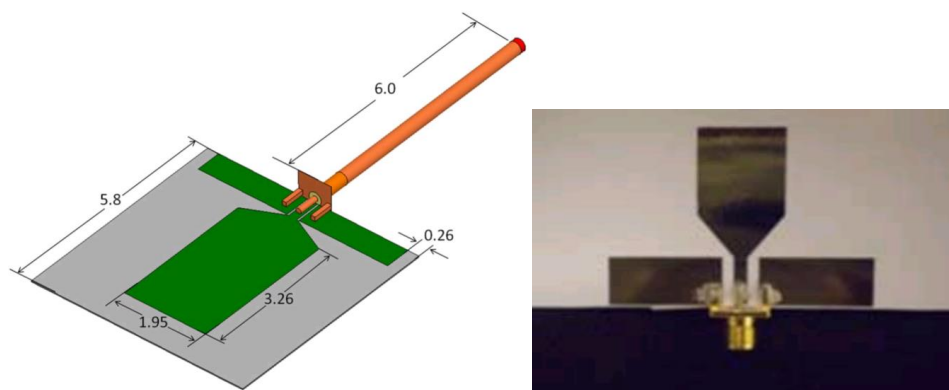


Рисунок 1.10 – Сверхширокополосная антенна [13]

Напечатанная антенна характеризуется хорошим согласованием на частотах до 10 ГГц и групповой задержкой до 0,6 нс.

В работе [22] представлена гибридная система, которая включает в себя высокочастотную катушку и две сверхвысокочастотные антенны для приложений беспроводной передачи энергии (рисунок 1.11). Антенна представляет собой микрополосковую антенну, разработанную на основе разъемного кольцевого резонатора. Антенны можно использовать для приема или передачи данных при частоте 2,48 ГГц и 4,66 ГГц. Печать осуществлялась на принтере Voltera V-One.

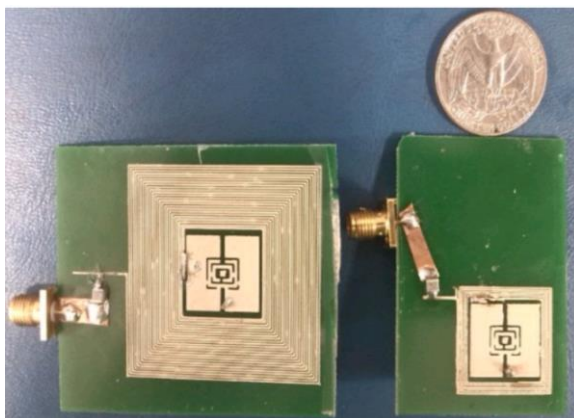


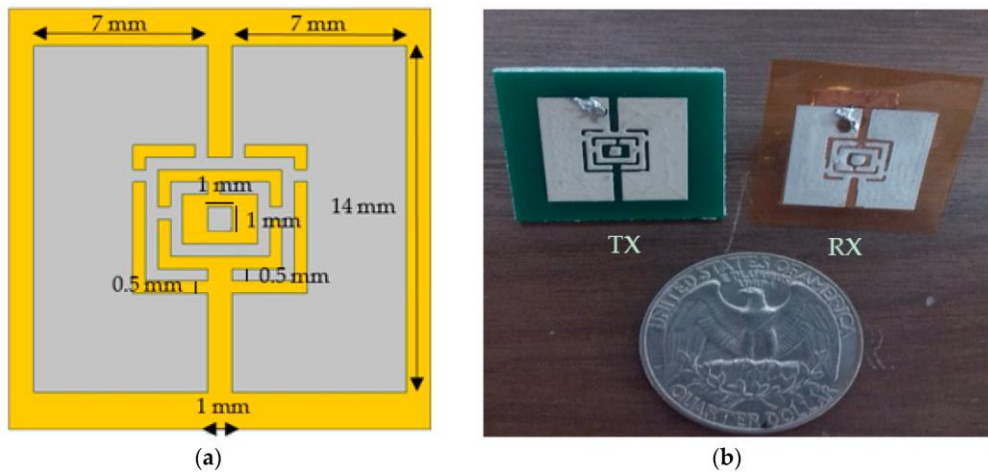
Рисунок 1.11 – Напечатанная антенна [22]

Геометрические размеры напечатанной антенны составляют 14×15 мм, а гибридной системы 20×20 мм. В результате коэффициенты передачи для каждой части хорошо согласованы.

В работе [23] рассматриваются двухдиапазонные печатные антенны, работающие в двух СВЧ диапазонах 2,5 ГГц и 4,5 ГГц, предназначенные для беспроводной передачи энергии для носимых приложений (рисунок 1.12).

Приемная антенна напечатана на гибкой подложке на основе полиимида каптона, а передающая антенна – на подложке FR-4. Размеры антенн передатчика и приемника составляют 14×15 мм, занимая небольшую площадь.

Предлагаемая конструкция микрополосковой антенны основана на элементах с разъемным кольцом. Для изготовления антенны применялся принтер Voltera V-One.



а – геометрические размеры антенны передатчика (*TX*) и приемника (*RX*);
б – изготовленные прототипы *TX* и *RX*.

Рисунок 1.12 – Напечатанные антенны [23]

Коэффициент отражения антенны передатчика составляет минус 19,5 дБ на первой резонансной частоте и минус 16,9 дБ на второй резонансной частоте. Коэффициент отражения антенны приемника (S_{22}) составляет минус 15 дБ на первой резонансной частоте и минус 21,9 дБ на второй. Усиление передатчика на 2,5 ГГц и 4,5 ГГц составляет минус 5,3 дБ и минус 4,5 дБ.

В [24] представлена антенна, изготовленная методом струйной печати на подложке из ПЭТ (рисунок 1.13). Для печати этой антенны использовался струйный принтер Brother MFC-J430W, серебряные чернила с размером наночастиц около 20 нм.

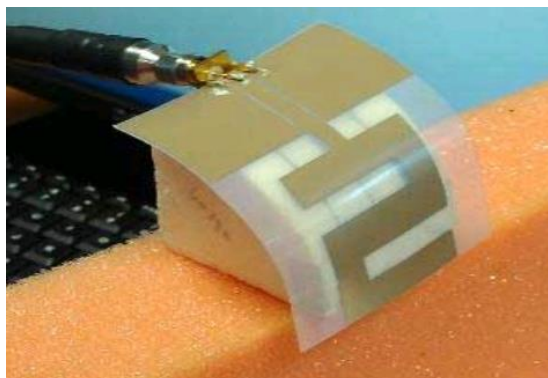


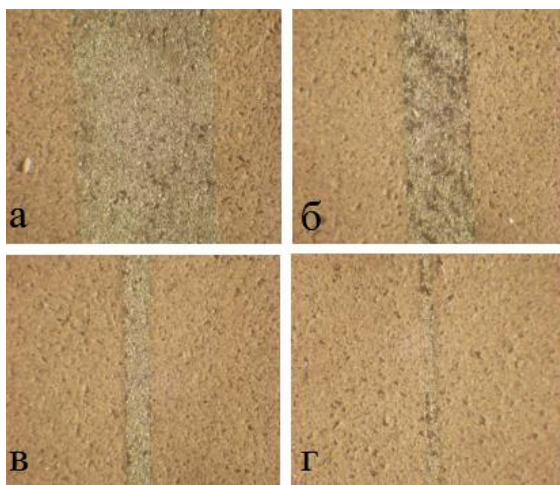
Рисунок 1.13 – Z-образная антенна [24]

Толщина слоя наночастиц серебра составила 300 нм с сопротивлением слоя $0,3 \text{ Ом}/\square$, проводимость около $1,11 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ при одном слое.

Z-образная планарная антенна с питанием из копланарного волновода достигла коэффициента усиления 1,44 дБ на частоте 2,45 ГГц.

1.2 Полосковые линии

В [25] представлено применение технологии струйной печати для изготовления микрополосковых линий на перестраиваемых сегнетоэлектрических керамико-полимерных композитах, работающих в области субтерагерца. В качестве керамико-композитного материала для подложки использовались следующие материалы: BaCO_3 (CHEMPUR, Польша), SrCO_3 (CHEMPUR, Польша), TiO_2 (ALDRICH). Представленные материалы имеют высокую диэлектрическую проницаемость, низкие диэлектрические потери и зависящую от состава температуру Кюри. Печать образца осуществлялась на струйном принтере Dimatix (DMP-2800). Были напечатаны четыре микрополосковые линии разной ширины (1 мм, 500 мкм, 200 мкм, 100 мкм). Для печати использовались серебряные чернила типа U5603 (SunChemical). Спекание напечатанных линий проводилась при температуре $180 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 20 минут. На рисунке 1.14 представлены снимки линий.



а) 1 мм; б) 500 мкм; в) 200 мкм; г) 100 мкм.

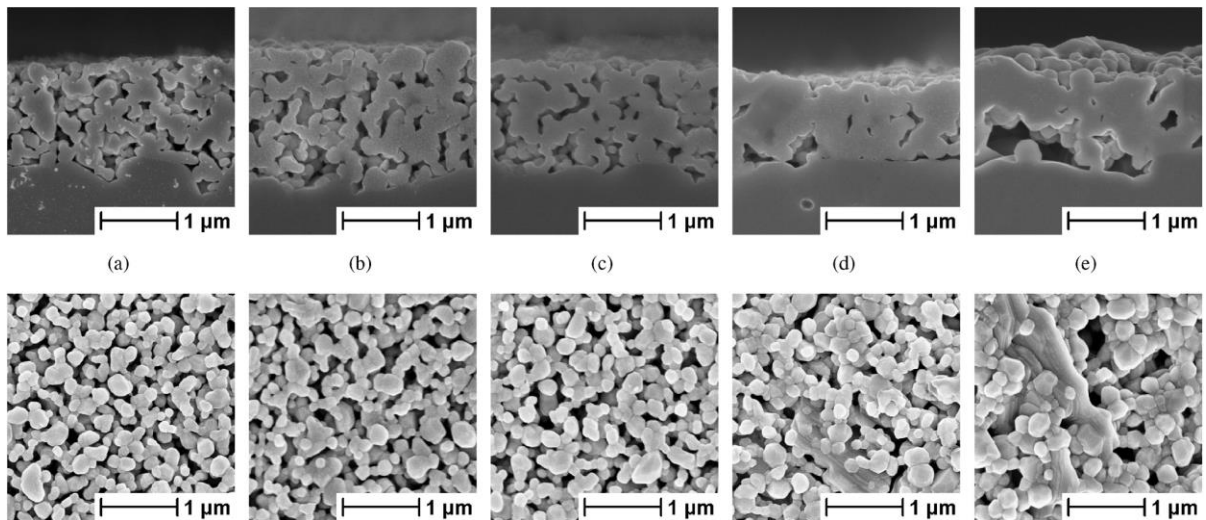
Рисунок 1.14 – Микрофотографии микрополосковых линий, нанесенных на керамико-полимерную подложку [25]

Результаты измерений показали, что разработанный материал можно использовать для создания структур, способных регулировать некоторые их электромагнитные характеристики. Относительно низкотемпературный технологический процесс (технология струйной печати) способен наносить проводящие линии на керамический полимер. Напечатанные серебряные микрополосковые линии могут работать в области субтерагерца.

В будущем возможно создание многослойных структур в сочетании с технологией Low Temperature Co-Fired Ceramic (LTCC) для обеспечения возможности настройки некоторых характеристик этих структур без использования каких-либо полупроводниковых или электромеханических элементов.

Как известно, СВЧ-узла включает в себя проводящие материалы и диэлектрические. Одним из явных представителей текучих материалов, обладающих диэлектрическими свойствами и перспективой внедрения, является титанат бария стронция. Титанат бария-стронция [26] (BST) является перспективным материалом для пассивных микроволновых настраиваемых устройств, таких как фазовращатели, настраиваемые фильтры или настраиваемые цепи согласования. В данной публикации описано получение толстых пленок BST для микроволновых приложений с применением струйной печати. Изготовленные чернила $Ba_0.6Sr_0.4TiO_3$, были напечатаны на

алюминиевой подложке и спекались при температуре около 1100–1200 °С. Полученные пленки показали достаточно высокую однородность по поверхности и внутренней структуре. Кроме всего прочего, качество структуры повышалось с увеличением температуры спекания (рисунок 1.15).



a) 1100 °С; b) 1125 °С; c) 1150 °С; d) 1175 °С; e) 1200 °С.

Рисунок 1.15 – Микрофотография структуры пленки BST при различных температурах [26]

Максимальное значение диэлектрической проницаемости пленок было измерено для пленок, полученных при температуре спекания $T_S=1175$ °С, где пористость составила $P=23\%$. Максимальное изменение значения диэлектрической проницаемости $\tau=36\%$ достигнуто при напряженности электрического поля $E=10$ В / м и частоте $F=10$ ГГц для пленки, полученной при температуре спекания $T_S=1150$ °С.

Тангенс диэлектрической проницаемости не зависит от температуры спекания и во всех случаях показывает значения $\text{tg}\delta=0,09-0,10$ при частоте $f=10$ ГГц.

Чтобы продемонстрировать возможности процесса струйной печати для изготовления перестраиваемых микроволновых устройств, был подготовлен линейный фазовращатель. Он показывает максимальный сдвиг фазы $\Delta\varphi=175^\circ$. Данные результаты успешно демонстрируют возможности процесса струйной печати для подготовки настраиваемых микроволновых устройств.

В статье [27] технология струйной печати использовалась для изготовления линий передачи на стеклянной подложке. Линии передачи печатались на принтере Dimatix DMP 2800 с картриджем DMC-11610 серебряными чернилами. Копланарные линии длиной 20,5 мм, включают в себя входные и выходные конические переходы для обеспечения шага зондов Infinity I40 GSG. Входные и выходные переходы шириной 100 мкм постепенно расширяются до 150 мкм. Центральные проводники копланарных линий шириной 100 мкм, подобно переходам, расширяются до 750 мкм (рисунок 1.16).

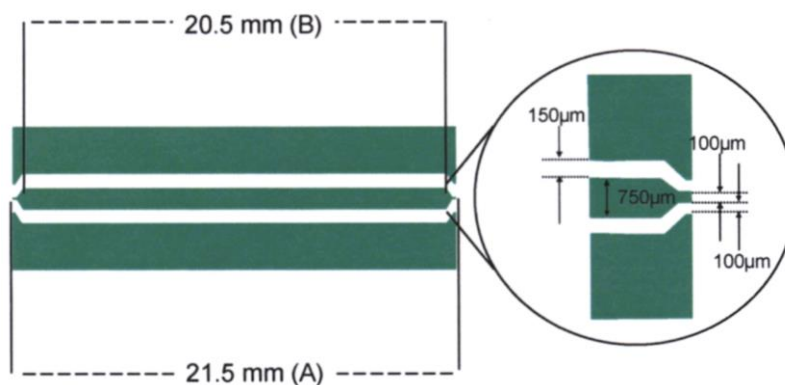


Рисунок 1.16– Выполнение конического перехода копланарных линий [27]

На рисунке 1.17 показаны напечатанные копланарные линии. Полученные линии показывают потери 1,62 дБ/см на частоте 10 ГГц и 2,65 дБ/см на частоте 20 ГГц.

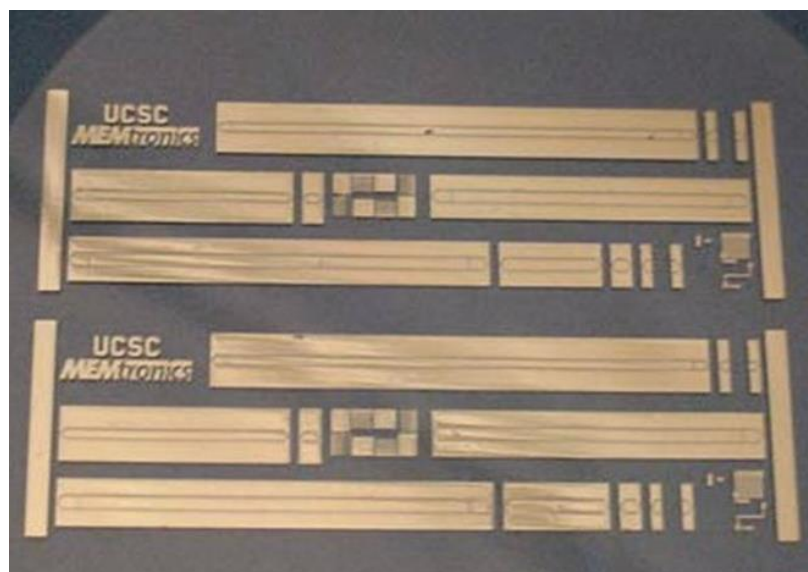


Рисунок 1.17 – Напечатанные линии на стеклянной подложке

1.4 Функциональные устройства

В работе [28] рассматриваются примеры изготовления СВЧ-устройств на принтере Voltera V-one. Первым примером в данной работе представлен ступенчатый фильтр нижних частот с частотой среза 2,5 ГГц (рисунок 1.18).

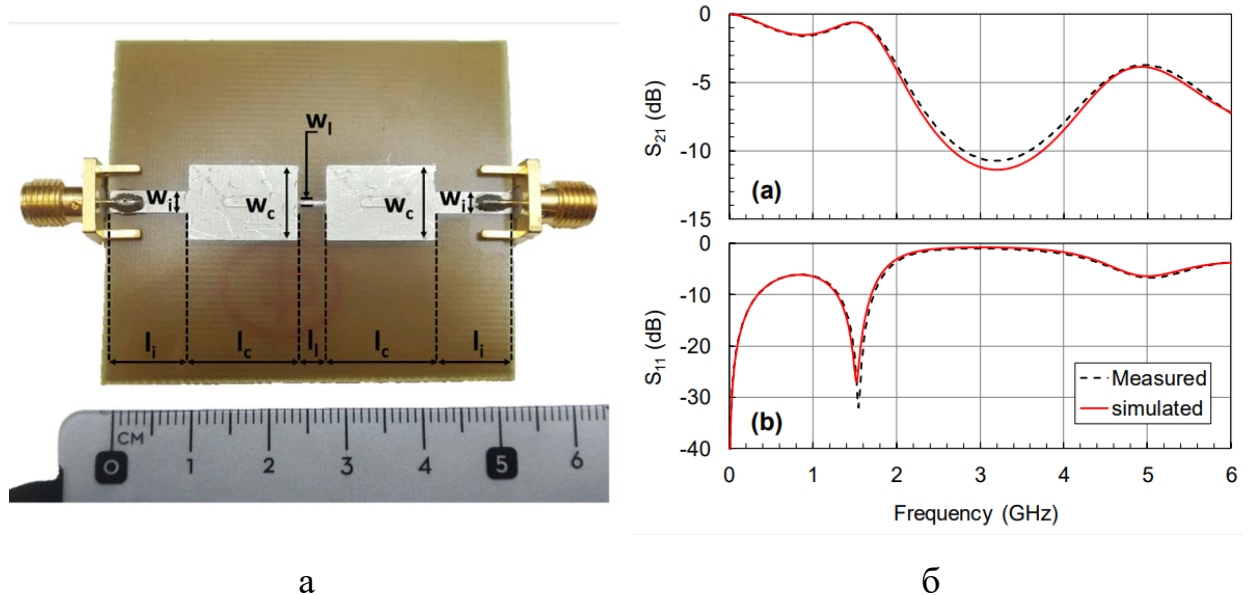
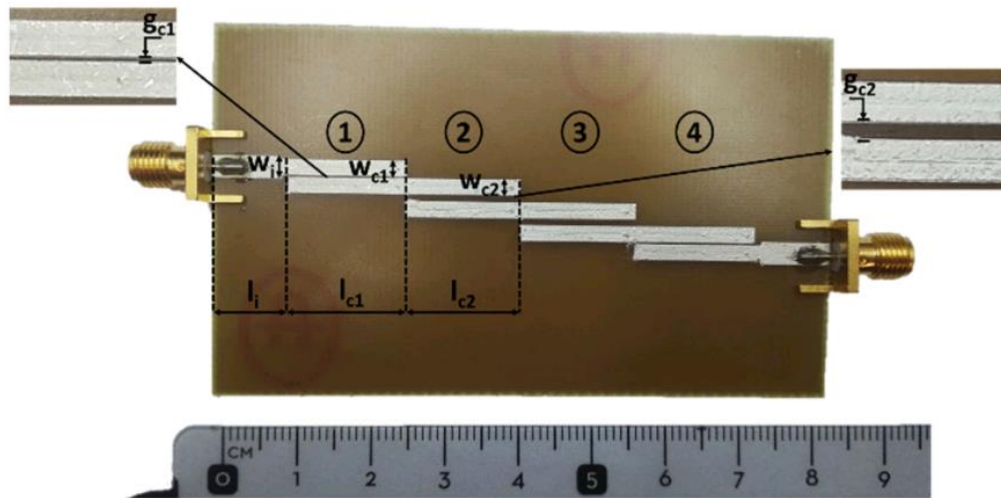


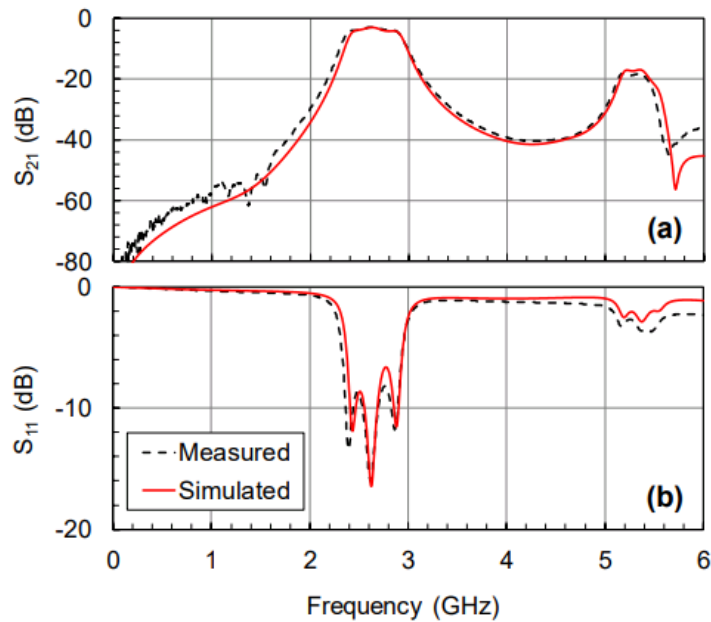
Рисунок 1.18 – Напечатанный ступенчатый фильтр нижних частот (а) и сравнение результатов моделирования и измерения (б) [28]

Как видно из рисунка 1.18, б результаты моделирования и измерения совпадают.

Вторым примером рассматривается четвертьволновый полосовой фильтр третьего порядка с центральной частотой 2,7 ГГц (рисунок 1.19). Исходя из рисунка 1.19, б видно, что измеренный отклик (пунктирная линия) имеет более широкую полосу пропускания. Возможно, это связано с растеканием паст, что, в свою очередь, приводит к уменьшению расстояния между резонаторами. Дальнейшее моделирование подтверждает, что увеличение ширины линии всего на 50 мкм (и последующее уменьшение расстояния на 100 мкм) приведет к увеличению полосы пропускания, аналогичному измеренному.



a



б

Рисунок 1.19 – Напечатанный полосовой фильтр и его частотная зависимость коэффициента передачи и отражения [28]

В статье [29] описано изготовление многослойного полосового фильтра на основе шлейфового резонатора. Для изготовления использовался струйный принтер Nano Dimension DragonFly LDM. Преимуществом применения данного принтера является наличие двух дозаторов для проводящих и диэлектрических чернил. На рисунке 1.20 показан напечатанный многослойный фильтр.

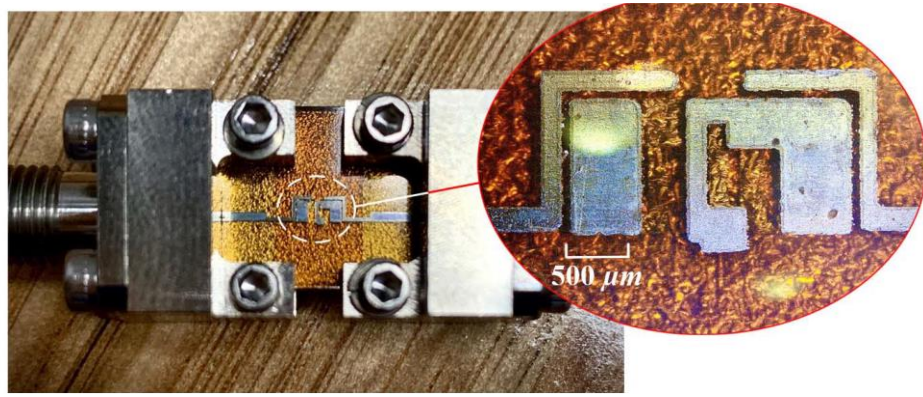


Рисунок 1.20 – Многослойный полосовой фильтр [29]

Геометрические размеры напечатанного фильтра равны $2,7 \times 1,425$ мм. Фильтр состоит из пяти проводящих слоев, и его толщина составляет 0,585 мм. В результате напечатанный фильтр характеризуется вносимыми потерями 3,42 дБ и возвратными потерями 16,65 дБ на центральной частоте 12,25 ГГц.

В работе [30] описывается изготовление трехслойного гибкого датчика на основе наносинтетического серебра на полиимидной пленке. Печать материалов проводилась на принтере, основанного на пневматическом способе дозирования. Первым слоем наносился материал на основе чешуек серебра. После печати слой спекался при 180°C в течение 60 минут. После спекания наносился второй слой на основе композиции серебра. Спекание проводилось в два этапа: 1) при температуре 120°C в течение 40 мин; 2) при температуре 250°C в течение 60 мин. В результате геометрические размеры сенсора составляют $16 \times 5 \times 0,125$ мм. На рисунке 1.21 приведен напечатанный датчик $16 \times 5 \times 0,125$ мм.

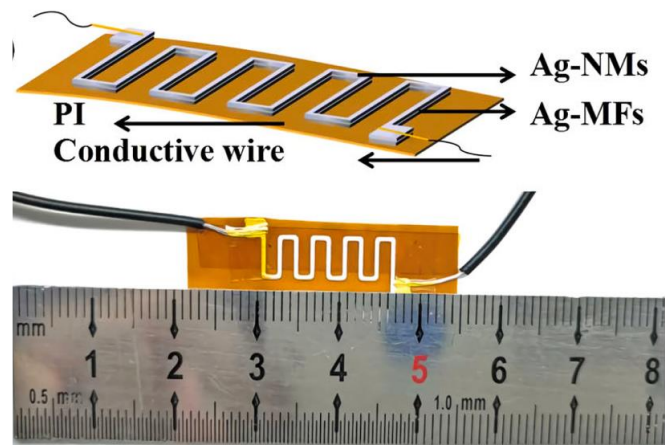
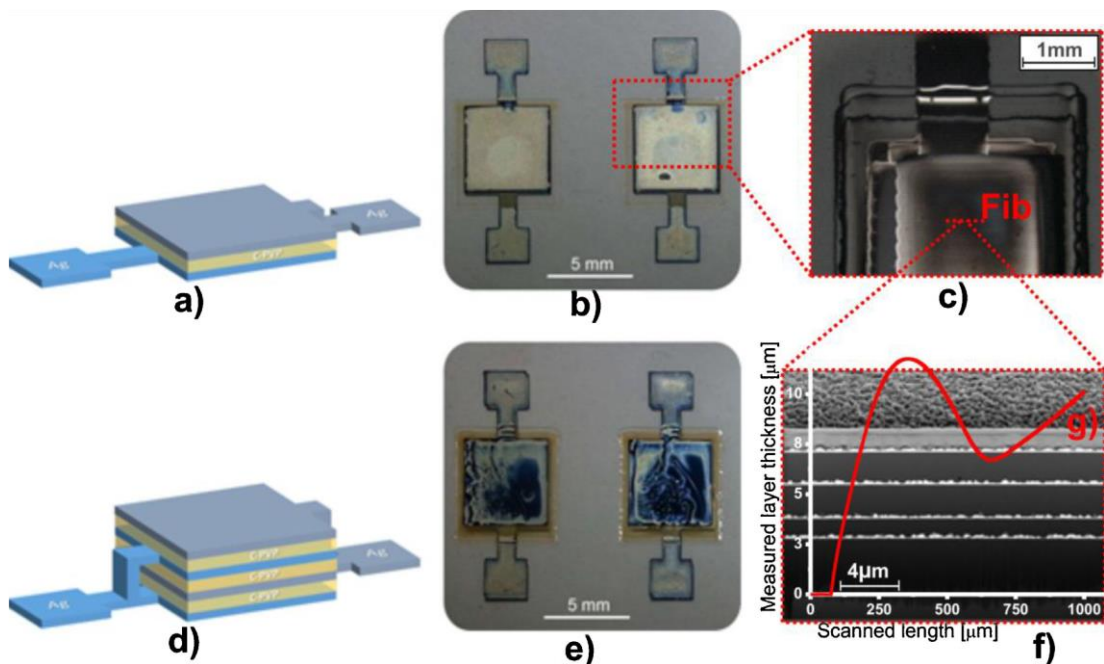


Рисунок 1.21 – Напечатанный трехслойный датчик [30]

В результате объемное сопротивление напечатанного датчика составляет $1,37 \cdot 10^{-5}$ Ом·см, его теплопроводность 39 Вт·м⁻¹·К⁻¹. Также датчик исследовали на растяжение и изгиб при 25 °С и 250 °С. При изгибе до 100° – $0,43$ и $0,45$; после растяжения на $2,5$ % значения $0,31$ и $0,18$ при 25 °С и 250 °С, соответственно.

1.5 Квази-сосредоточенные компоненты

Печать планарных компонентов рассматривалась в работах [31, 32]. В работе [31] описано применение струйной технологии для изготовления конденсаторов, катушек индуктивности и резисторов. На рисунке 1.22 показано два варианта планарных конденсаторов и профилограмма.

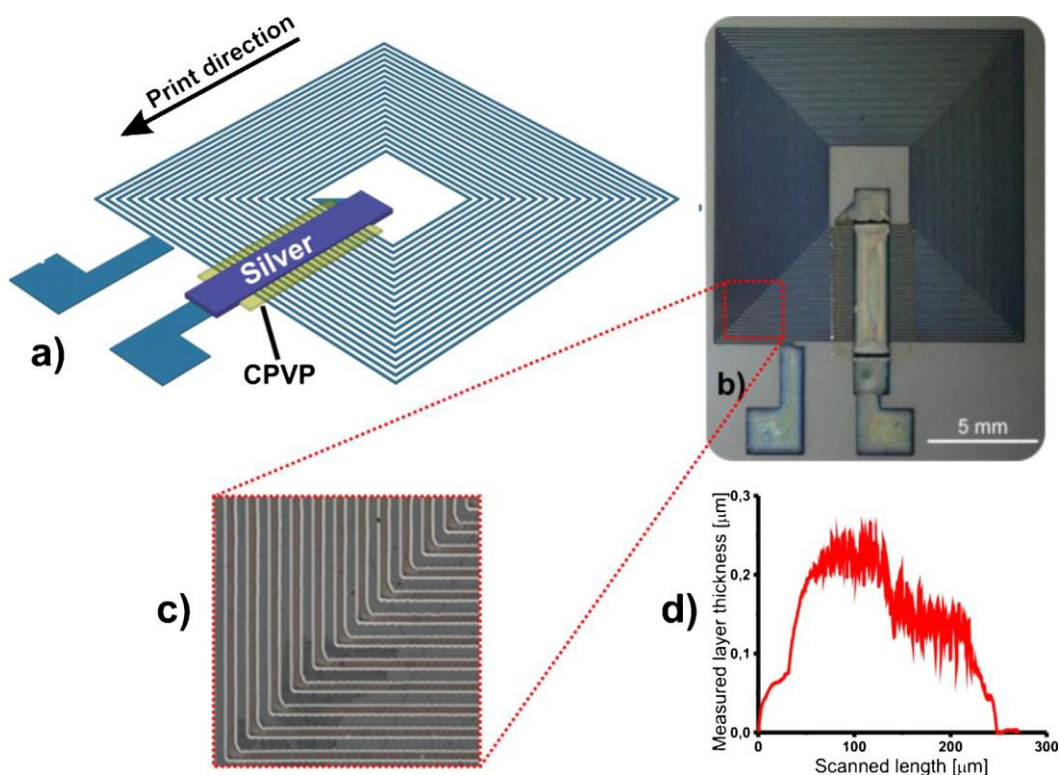


а) схематичное представление планарного конденсатора б) печатный конденсатор; с) увеличенное изображение конденсатора, на котором видны разные слои; д) схематичное представление тройной конденсатора; е) печатный тройной конденсатор; ф) поперечное сечение различных слоев, образующих тройной конденсатор; г) профилограмма конденсатора

Рисунок 1.22 – Планарные конденсаторы [31]

Изготовление планарной катушки индуктивности предусматривает печать проводящего слоя. Однако для доступа к центру катушки необходимо формирование моста над витками путем печати еще двух слоев –

диэлектрического и проводящего. На рисунке 1.23 приведена напечатанная катушка индуктивности и ее профилограмма.

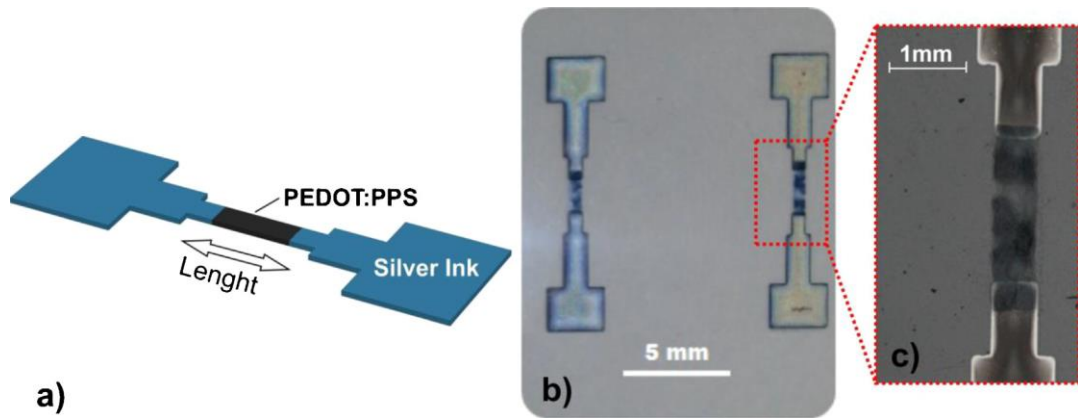


a) схематическое изображение катушки; b) напечатанная катушка;
c) витки катушки; d) профилограмма

Рисунок 1.23 – Планарная катушка индуктивности [31]

Напечатанная катушка состоит из 25 витков, что соответствует 1 м. Геометрические размеры напечатанной катушки индуктивности составляют $14 \times 14 \text{ мм}^2$ при ширине линий 100 мкм и расстоянии между линиями порядка 75 мкм. Измеренные электрические параметры катушки показывают индуктивность 5,42 мкГн, сопротивление 12,7 кОм и емкость 50 пФ.

При изготовлении планарных резисторов один слой печатался из активного материала PEDOT:PPS, а второй серебряными чернилами для формирования контактных выводов. Результат печати показан на рисунке 1.24.



a) схематическое представление резистора, b) результат печати двух резисторов разной длины, c) оптическое изображение электродного слоя (Ag) и активного слоя (PEDOT:PPS).

Рисунок 1.24 – Планарные резисторы [31]

Оценка сопротивления активной области при варьировании длины от 0,5 мм до 2 мм и количества слоев печати для 2, 4 и 6 показывает изменение от 25 Ом до 650 Ом.

Печать многослойного высоковольтного конденсатора описана в [32]. Печать проводилась из шприца под давлением, создаваемым насосом, с применением диэлектрических чернил PMMA и серебряных чернил. На рисунке 1.25 показано схематическое изображение высоковольтного конденсатора и результат печати.

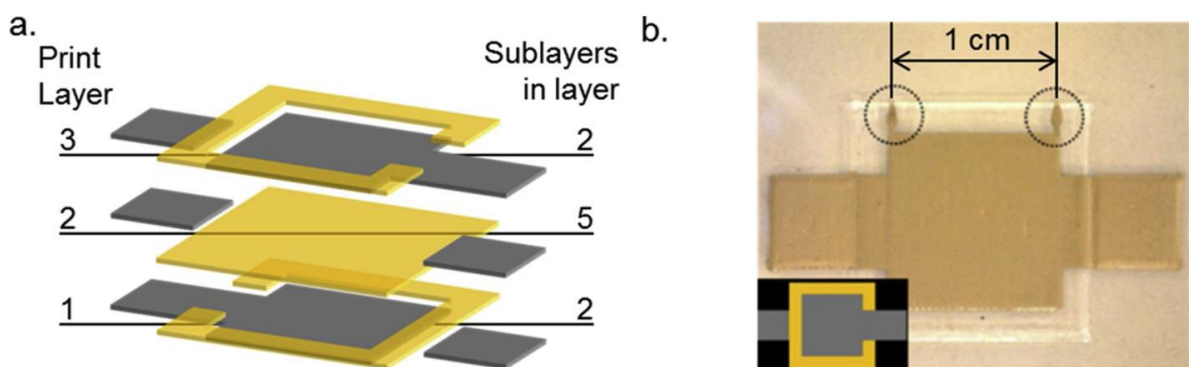


Рисунок 1.25– Схематичное представление высоковольтного конденсатора (слева) и напечатанный конденсатор (справа) [32]

Напечатанный конденсатор имеет емкость 322 пФ при 1 кГц и напряжение пробоя 1000 В. Печатная схема, изготовленная с применением такого конденсатора, представлена на рисунке 1.26.

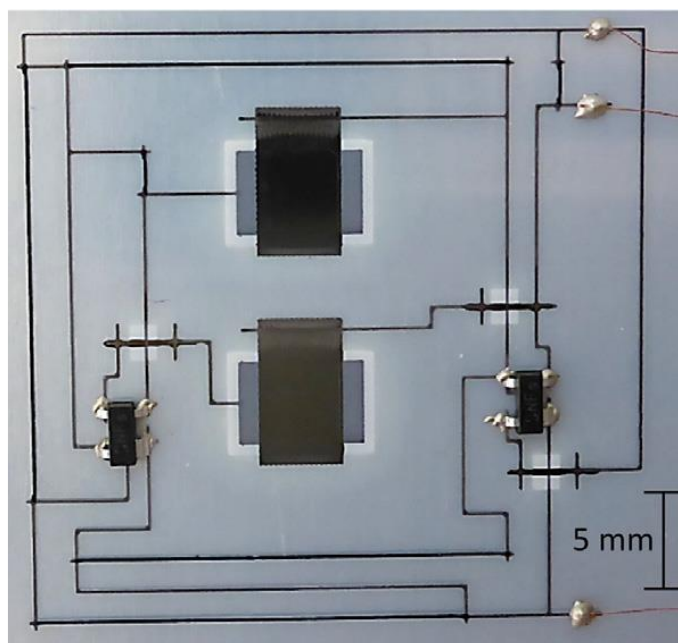


Рисунок 1.26 – Пример изготовления гибридной интегральной схемы

1.6 Обзор материалов, используемых в аддитивной технологии

Материалы и технология изготовления устройства определяет его функциональные качества: электрические параметры, надежность, срок эксплуатации, габариты и другое. Используемые материалы при печати компонента или целого устройства влияют на качество готового изделия, также не следует упускать такие важные этапы, как: обработка поверхности (очистка, формирование шероховатости: полировка, прокатка, абразив), сушка и спекание (выпаривание связующего, плавление и спекание частиц металла или диэлектрика).

Важным показателем являются электрические характеристики, а именно проводимость для проводников, для диэлектриков – диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь. Так, удельное сопротивление пленок должно быть не хуже $5 \text{ мОм/}\square$.

Для изготовления компонентов и устройств по аддитивной принтерной технологии, в зависимости от способа экструзии, используются чернила или пасты. Основным отличием между чернилами и пастой является вязкость и концентрация частиц [5].

В данном подразделе рассмотрены материалы основания для печати (подложки) и функциональный материал, который используется для нанесения.

1.6.1 Подложки

Аддитивная технология печати позволяет использовать подложки широкой номенклатуры: от традиционных жестких (стеклотекстолит, кремний, керамика и т.д.) [33] до гибких оснований (бумага, полиэтиленнафталат, фольга и т.д.) [34, 35]. Использование гибких оснований связано с развитием персональных радиоэлектронных систем и возможностью интеграции гибридных СВЧ-микросхем, а также patch-антенн [36], в устройство любой формы.

В производстве гибридных СВЧ-микросхем используются диэлектрические и ферритовые подложки, что связано с обеспечением качества передачи сигнала, снижения потерь в линиях и рассеяния в материале.

Диэлектрики – вещества, относительно плохо проводящие электрический ток (по сравнению с проводниками). Электропроводность диэлектриков, по сравнению с металлами, очень мала. Их удельное сопротивление составляет порядка 10^8 – 10^{17} Ом·см (у металлов $\sim 10^{-6}$ – 10^{-4} Ом·см) [37]. Высокое значение диэлектрической проницаемости в некоторых приложениях СВЧ-компонентов является одним из ключевых моментов. В [38] представлены результаты синтеза и определения характеристик композитов ПТФЭ/($\text{Na}_x\text{Li}_{1-x}$) $_{0,5}\text{Nd}_{0,5}\text{TiO}_3$ с высокой диэлектрической проницаемостью (от 9,65 до 10,15) и высокой температурной стабильностью для применения подложек в СВЧ-технике.

Материалы, поглощающие микроволновое излучение (MAMs) с высокой эффективностью, малым весом и широкой полосой пропускания, имеют большое значение. Как известно, материалы с диэлектрическими

потерями играют существенную роль в поглощении поля электромагнитных волн. Обнаружено, что синергетические эффекты диэлектрических потерь (мультирелаксации) и магнитных потерь (резонанс и вихревой ток) эффективны для усиления свойств поглощения микроволнового излучения поглотителями Fe_x-10x/C/rGO. Когда температура термической обработки достигает 500 °С, свежеприготовленный композитный образец демонстрирует идеальные характеристики поглощения микроволнового излучения: значение потерь на отражение составляет минус 25,94 дБ, а эффективная полоса пропускания достигает 5,84 ГГц на расстоянии 1,9 мм. [39]

Так же примечательными из-за магнитных свойств являются «ферриты». Ферриты – соединения оксида железа (Fe₂O₃) с более основными оксидами других металлов [40]. Широко применяются в качестве магнитных материалов в радиоэлектронике, радиотехнике и вычислительной технике, поскольку сочетают высокую намагниченность с полупроводниковыми или диэлектрическими свойствами [41]. Оксиды металлов на основе железа (Fe) с более высоким удельным сопротивлением могут эффективно снижать проводимость композитов, что полезно для оптимизации согласования импедансов. А также могут эффективно оптимизировать характеристики поглощения электромагнитных волн благодаря синергетическому эффекту магнитного/диэлектрического рассеяния [39].

1.6.2 Функциональные материалы для изготовления компонентов и СВЧ-устройств

Для изготовления компонентов и устройств по аддитивной принтерной технологии используется широкий спектр функциональных материалов, причем каждый тип материала характеризуется своей функциональностью и назначением. Функциональный материал представляет собой чернила или пасты в виде взвеси порошков функционального наполнителя,

диспергированных в органической жидкости и/или растворе [42]. В целом, функциональные материалы можно разделить:

- на диэлектрические чернила и пасты;
- чернила и пасты с металлическими наночастицами;
- проводящие полимеры;
- чернила с органическим разложением металлов (MOD);
- чернила из углеродных наноматериалов;
- полупроводниковые чернила [6].

Состав материала, размер частиц, форма частиц и процентное содержание твердых частиц являются параметрами, определяющими качество функционального материала [43]. Использование порошка, размер частиц которого не превышает порядка нанометр для чернил, для паст не более 20 мкм, приводит к уменьшению температуры плавления по сравнению с объемными материалами. Как правило, размер частиц и температура плавления имеют линейную зависимость, при которой температура плавления снижается по мере уменьшения размера частиц. Это явление можно объяснить тем, что наночастицы имеют более высокое отношение поверхности к объему, чем объемный материал. Однако по мере того, как размер частиц становится меньше, силы Ван-дер-Ваальса внутри частиц также увеличиваются. Таким образом, наночастицы склонны агломерироваться друг с другом в суспензии, и в состав чернил необходимо добавлять органические добавки и стабилизаторы для обеспечения гомогенных дисперсий.

Диэлектрический функциональный материал

Диэлектрический функциональный материал представляет собой суспензию, обладающую электроизоляционными свойствами. Диэлектрические материалы находят применение во многих аспектах устройств, включая защиту цепей, изоляцию слоев в многослойных структурах, изготовление конденсаторов и транзисторов [44,45,46]. Диэлектрические материалы могут быть в виде взвесей неорганических материалов или органических полимеров. Некоторые из обычно

используемых органических полимеров для диэлектрических чернил включают: полиметилметакрилат (ПММА), полиимид (ПИ), полистирол (ПС), поливинилиденфторид (ПВДФ), поливинилпирролидон (ПВП) и поливиниловый спирт (ПВС) [47]. В качестве неорганических материалов используют порошки стекла, керамики, оксиды металлов: магния, иттрия, лантана, алюминия и т.д. При выборе диэлектрических функциональных материалов важно учитывать совместимость как с подложками, так и с другими функциональными материалами.

Использование диэлектрических паст в качестве промежуточного изолирующего слоя между проводящими слоями в многослойных печатных платах и интегральных схемах позволяет исключить возникновение короткого замыкания. Однако следует учитывать, что толщина диэлектрических слоев должна быть не менее, а то и в два–три раза больше, чем толщина проводящих слоев, для обеспечения электрической изоляции и предотвращения токов утечки. В противном случае достаточно высокое напряжение может вызвать эффект «пробоя» и привести к тому, что эти диэлектрические слои потеряют свои изолирующие свойства. Так же следует отметить, что диэлектрические слои должны обладать гладкой и равномерной (бездефектной) поверхностью, так как это ключевой критерий для обеспечения пригодности для печати и электрической изоляции для последующих слоев [46].

Второе важное направление использования диэлектрических материалов – это их применение в задачах изготовления планарных транзисторов и конденсаторов. Физические и химические свойства диэлектрических порошков во многом определяют электрические свойства транзисторов [48] и конденсаторов [49]. Например, диэлектрическая проницаемость напрямую влияет на емкость напечатанных конденсаторов. Для конденсаторов высокой емкости требуются диэлектрические чернила и пасты с высокой диэлектрической проницаемостью и низкими потерями. По сравнению с органическими диэлектрическими полимерами, диэлектрические материалы из суспензий неорганических порошков имеют более высокую

диэлектрическую проницаемость, более высокую стабильность устройства и меньший гистерезис. Кроме того, диэлектрическая проницаемость суспензий неорганических порошков может быть увеличена либо за счет увеличения загрузки частиц наполнителя, либо за счет использования частиц наполнителя с более высокой диэлектрической проницаемостью. Для напечатанных диэлектрических пленок удельное электрическое сопротивление, диэлектрическая прочность и напряжение пробоя также являются важными параметрами.

Одним из явных представителей текучих материалов, обладающих диэлектрическими свойствами и перспективой внедрения, является титанат бария стронция. Титанат бария-стронция [50] (BST) является перспективным материалом для пассивных микроволновых настраиваемых устройств, таких как фазовращатели, настраиваемые фильтры или настраиваемые цепи согласования.

Проводящий функциональный материал

Проводящие чернила и пасты представляют собой взвесь проводящего металлического порошка в жидкой среде. Проводящие чернила и пасты используются для изготовления проводников и топологий из-за их хорошей электропроводности. В состав чернил и паст входят три основных компонента: наночастицы металла в виде порошка, органические добавки и стабилизаторы, и жидкая среда (связующее вещество). Силы Ван-дер-Ваальса между металлическими наночастицами, как правило, приводят к агломерации частиц, что вызывает неоднородное распыление и засорение сопла [51]. Поэтому каждая металлическая наночастица должна быть инкапсулирована органическими добавками и стабилизаторами для образования стерического эффекта между отдельными частицами во избежание агломерации [52]. Однако в то же время инкапсулирующие органические добавки и стабилизаторы предотвращают контакт металлических наночастиц друг с другом. По этой причине чернила и пасты с металлическими наночастицами изначально не являются проводящими при нанесении.

Проводящий функциональный материал требует тщательного подхода к процессу сушки с последующим спеканием – это обуславливает электрическую проводимость пленки. Сушка, как предварительный этап, необходима для выпаривания связующего вещества и разложения органических добавок и стабилизаторов, оставляя в основном металлические наночастицы. Затем повышение температуры на этапе спекания приводит к подплавке металлических частиц и их агломерации. Следует отметить, что температура спекания и время спекания оказывают существенное влияние на электрические и механические характеристики напечатанных рисунков. Например, при более высокой температуре спекания металлические наночастицы склонны к чрезмерному плавлению и большему слипанию, что приводит к образованию более крупных зерен [53]. Некоторые из широко используемых методов спекания включают: термическое спекание, спекание интенсивного импульсного света (IPL), инфракрасное (ИК) спекание, ультрафиолетовое (УФ) спекание, лазерное спекание, электрическое спекание, микроволновое спекание, спекание в локализованной атмосферной плазме, спекание в плазме низкого давления и химическое спекание. После спекания металлические наночастицы путем коалесценции образуют контакт друг с другом для обеспечения потока электронов.

Металлический порошок, входящий в состав паст и чернил, можно разделить на четыре группы: одноэлементные металлические наночастицы, наночастицы оксидов металлов, металлические наночастицы из сплавов и биметаллические наночастицы типа ядро-оболочка [6]. Одноэлементные металлические наночастицы, такие как наночастицы серебра, наночастицы золота и наночастицы меди, широко используются для изготовления паст с металлическими наночастицами. Пасты с наночастицами серебра наиболее предпочтительны из-за их устойчивости к окислению и высокой электропроводности [54]. Хотя наночастицы золота также обладают хорошей электропроводностью и устойчивостью к окислению, применение паст на основе золотых наночастиц для изготовления проводящих рисунков

нерентабельно из-за высокой стоимости золота. Пасты на основе меди благодаря высокой электропроводности и низкой стоимости также набирают популярность в качестве аналога серебра [55]. Тем не менее, разработка рецептур с наночастицами меди и разработка процессов спекания является сложной задачей. Это связано с тем, что наночастицы меди окисляются во время спекания при высокой температуре в неинертной среде, а оксиды меди обладают гораздо меньшей проводимостью, чем медь.

Металлические оксиды, сплавы и пасты с наночастицами «ядро/оболочка» находятся на стадии исследований и не широко доступны на коммерческом рынке [56]. Пасты с наночастицами оксидов металлов обладают высокой устойчивостью к окислению, что позволяет проводить спекание в условиях окружающей среды без окисления. В состав паст входят наночастицы оксида меди, оксида железа, оксида цинка и оксида индия-олова. Пасты с металлическими наночастицами из сплавов, например, сплав меди и никеля, хорошо подходят для сенсорных приложений, таких как тензодатчики и термопары, из-за их хорошей усталостной долговечности, чувствительности к деформации и высокой способности к удлинению [57].

Биметаллическая наночастица «ядро/оболочка» представляет собой особый тип наночастиц, состоящих из двух разных материалов, в которых внутреннее «ядро» окружено внешней «оболочкой» из другого материала [58]. Внешняя «оболочка» обычно изготавливается из устойчивых к окислению материалов (например, золота и серебра), которые могут предотвратить окисление и коррозию внутреннего «ядра». Такая конфигурация «ядро-оболочка» имеет несколько преимуществ. Прежде всего, достижение желаемых электрических, фотокаталитических, каталитических и оптических свойств за счет настройки соотношения «ядра» к «оболочке» и состава материалов «оболочки» и «ядра». Во-вторых, уменьшается содержание дорогих материалов, заменив «ядро» менее дорогим материалом при сохранении электрических свойств. Хорошим примером является биметаллическая наночастица медь/серебро [59]. Тонкая серебряная

«оболочка» используется для защиты внутреннего медного «ядра» от окисления. Следовательно, использование серебра может быть значительно сокращено при сохранении электрических свойств. Некоторые другие примеры паст с биметаллическими наночастицами «ядро/оболочка» также включают серебро/золото, олово/серебро, золото/палладий [56].

На электрические, оптические, магнитные и каталитические свойства проводящего материала может влиять форма частиц. Сферические наночастицы в основном используются в составе чернил с металлическими наночастицами, поскольку их проще и дешевле синтезировать по сравнению с другими формами частиц. Среди всех форм частиц сферическая форма имеет форму с наименьшей энергией и, следовательно, требует минимального количества диспергаторов для максимальной стабильности дисперсии [51,59]. Некоторые другие формы частиц включают: нанопроволоки, наностержни, нанокубы, нанопризмы, нанопластинки и многогранные наночастицы, помимо сферических наночастиц.

Нанопластинки и нанопроволоки – одни из немногих интересных форм частиц, которые в последнее время вызывают растущий интерес. Двумерные (2D) плоские структуры нанопластинок позволяют создавать более плотные микроструктуры для лучшей электропроводности. Нанопроволоки очень подходят для изготовления гибких и прозрачных электродов благодаря их высокой гибкости и оптической прозрачности. Однако нанопроволоки имеют тенденцию легко засорять сопла из-за их структуры [59].

1.7 Выводы

Проведенный аналитический обзор позволяет сделать следующие выводы. Применение аддитивной принтерной технологии для изготовления компонентов и СВЧ-устройств является актуальной и перспективной задачей, так как упрощается процесс изготовления новых устройств за счет отсутствия необходимости подготовки трафаретов. Это особенно актуально на этапе

прототипирования и отработки топологии новых устройств. Значительная часть проведенных работ основаны на струйной печати, в которой требуется использование чернил с низкой вязкостью. Основными недостатками таких материалов являются слабая адгезия к подложке и малая проводимость, что существенно ограничивает их применение для создания устройств СВЧ-диапазона.

Несмотря на выявленное многообразие материалов и технологического оборудования следует отметить, что основные усилия исследователей направлены на создание проводниковых паст. При этом в СВЧ-технике представляет интерес использование и иных материалов, таких как диэлектрические пасты с заданной относительной диэлектрической проницаемостью и тангенсом угла диэлектрических потерь, а также пасты на основе сегнетоэлектриков и ферритов и т.д.

Все материалы, используемые для печати, являются композитными, так как в состав входят связующие вещества, пластификаторы, различные добавки. Предполагается, что основная часть их удаляется на этапе спекания. Однако конечные свойства пленок после спекания отличаются от исходных «чистых» материалов. Существует необходимость разработки моделей устройств с учетом свойств используемых для печати материалов. Для проектирования СВЧ устройств существует потребность как в разработке моделей компонентов и устройств, так и режимов работы технологического оборудования.

В связи с этим сформулирована цель диссертационного исследования, которая заключается в проведении исследований возможности применения аддитивной принтерной технологии для изготовления компонентов и СВЧ-устройств.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– разработка и изготовление полосковых линий по аддитивной принтерной технологии и исследование их характеристик;

- численное моделирование процесса экструзии паст поршневым дозатором;
- разработка составов паст, пригодных для аддитивной принтерной технологии;
- изготовление СВЧ-устройств и компонентов по аддитивной принтерной технологии, экспериментальное исследование их частотных характеристик;
- разработка рекомендаций по совершенствованию аддитивной принтерной технологии для изготовления компонентов и СВЧ-устройств.

2 Исследование применимости аддитивной принтерной технологии для изготовления компонентов и СВЧ-устройств

В данном разделе представлены исследования полосковых проводников изготовленных по аддитивной принтерной технологии с применением высоковязких паст. В основе содержания раздела положены результаты, опубликованные в работах [60–68].

Основная цель помещенных здесь материалов – исследование возможности применения аддитивной принтерной технологии для изготовления полосковых линий и исследование их характеристик. При этом рассматривается математическая модель экструзии паст с помощью поршневого дозатора и разработка составов паст.

2.1 Исследование характеристик печатных полосковых проводников

Определение характеристик полосковых проводников, изготовленных из проводящих паст, которые используются в трафаретной технологии, использовалась методика экстракции параметров [60]. Методика экстракции заключается в определении характеристик паст путем анализа частотных параметров микрополосковой линии передачи (МПЛ). Экстракция основана на расчетно-экспериментальном методе проектирования, который заключается в создании макета на основе результатов расчетов и моделирования. Для выполнения экстракции параметров материала была разработана методика экстракции, которая включает в себя следующие этапы:

1. Разработка конструкции модели МПЛ в САПР с целью учета влияния параметров материала;
2. Изготовление тестовых образцов по аддитивной принтерной технологии;
3. Измерение частотных характеристик напечатанных образцов и сравнительный анализ измеренных характеристик с результатами модели;

4. Подбор параметров модели для достижения соответствия с измеренными характеристиками;

5. Анализ полученных зависимостей.

Согласно вышеописанной методике, была рассчитана и построена модель МПЛ в САПР AWR Design Environment. Так как рассматриваются проводящие пасты в модели была задана проводимость серебра, а в качестве диэлектрика были указаны параметры подложки со следующими параметрами: диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 9,8$, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0,0004$ и толщина $H = 1$ мм.

В качестве объекта для экстракции параметров была выбрана полимерная серебрясодержащая пасты ПСП-2. Преимуществом данной пасты является низкая температура спекания, которая составляет 125 °С. В качестве подложки использовалось ВК-100. Изначально был произведен расчет ширины линии при волновом сопротивлении 50 Ом. Частотная характеристика МПЛ с волновым сопротивлением 50 Ом показана на рисунке 2.1.

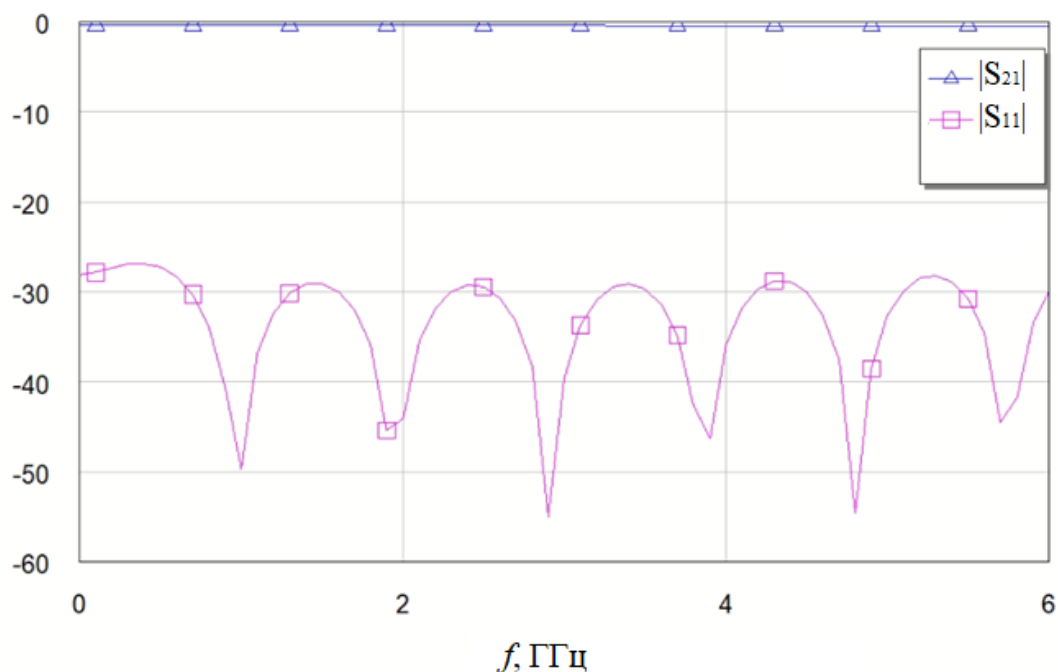


Рисунок 2.1 – Частотная характеристика модели МПЛ

Печать микрополосковых линий проходила с использованием принтера Voltera V-One. Для печати использовалось сопло диаметром 300 мкм.

Спекание линий проходило при температуре 125 °С в течении 20 минут. Далее была измерена ширина полученной линии. На рисунке 2.2 показана ширина напечатанной линий.



Рисунок 2.2– Ширина МПЛ

На рисунке 2.3 показана профилограмма микрополосковой линии.

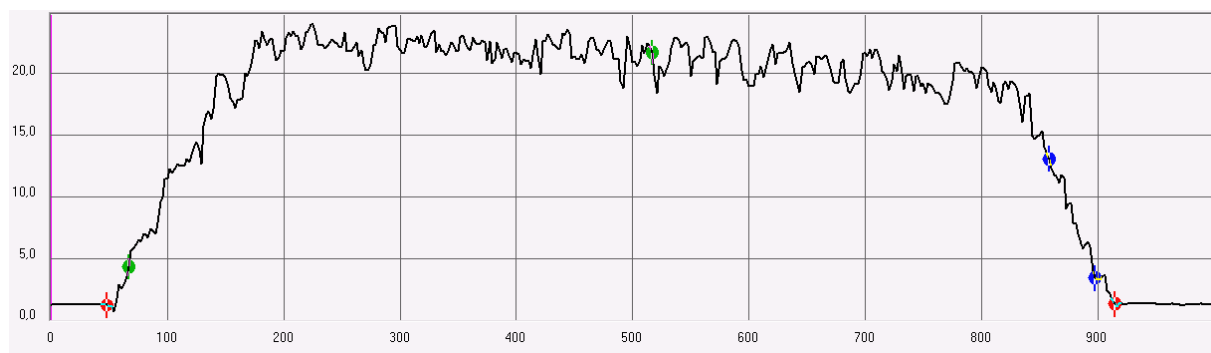


Рисунок 2.3 – Профилограмма МПЛ

Измерение частотной зависимости коэффициентов передачи и отражения измерялись на Obzor-804. Полученные значения S-параметров были импортированы в AWR и построены графики для сравнения характеристик модели и измерения МПЛ (рисунок 2.4 и 2.5).

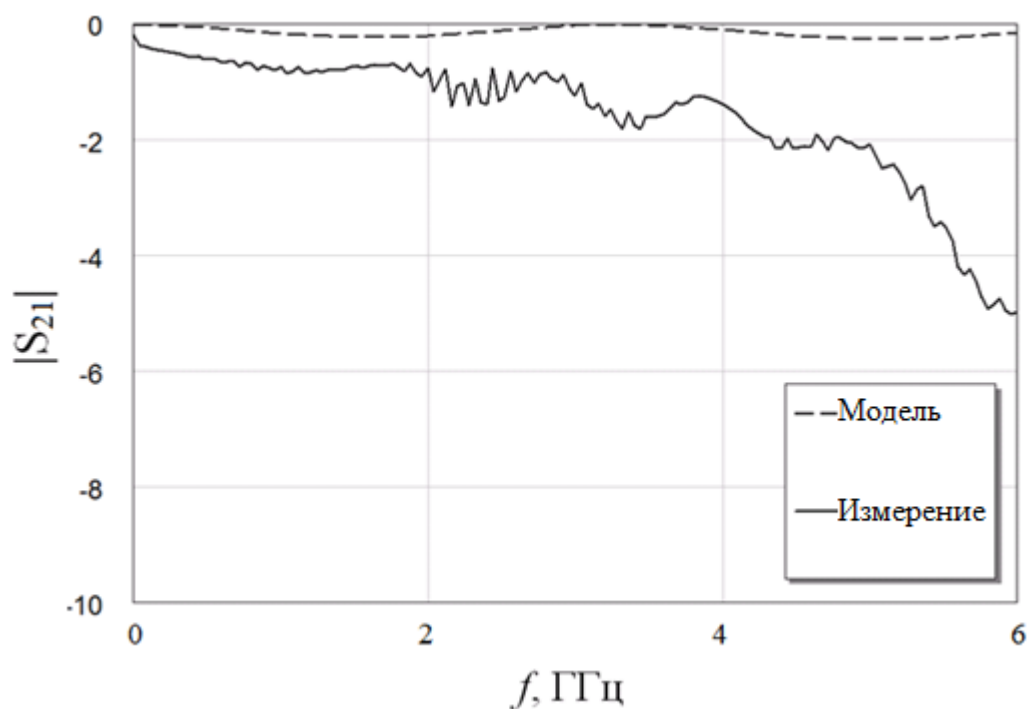


Рисунок 2.4 – Частотная зависимость модуля коэффициента передачи сигнала

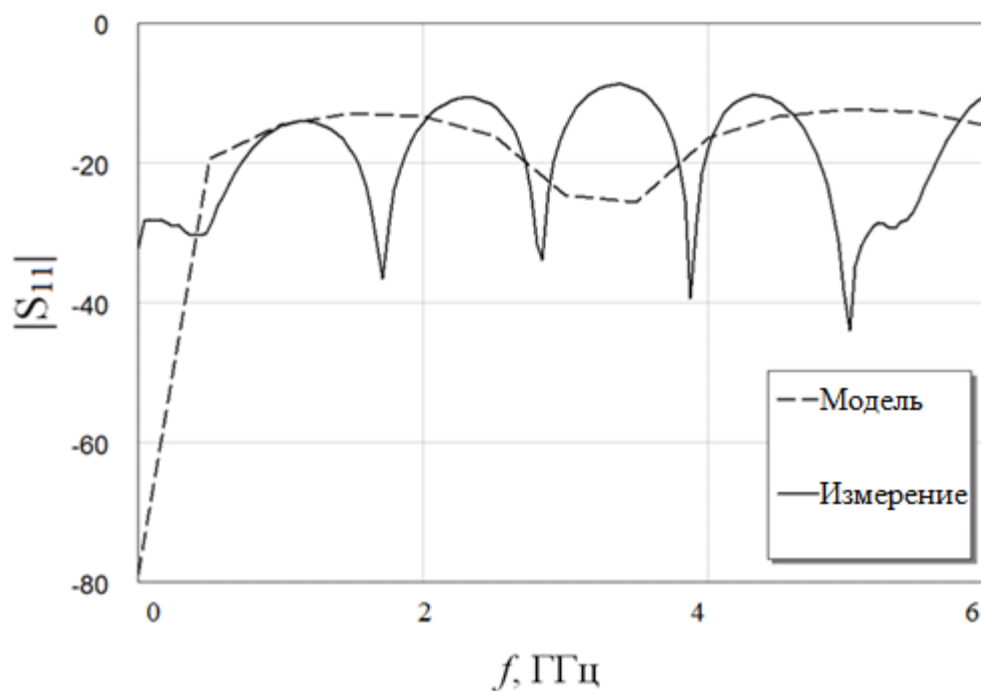


Рисунок 2.5 – Частотная зависимость модуля коэффициента отражения сигнала

Определенное расхождение расчетных и измеренных значений $|S_{21}|$ и $|S_{11}|$ на частотах обусловлено тем, что при расчете учитывались теоретические параметры материалов, а не действительные значения, полученные при подготовке паст. Исходя из этого, необходимо провести экстракцию

параметров так, чтобы модель соответствовала измеренным характеристикам. Для этого была построена МПЛ, которая учитывает: волновое сопротивление, относительную эффективную диэлектрическую проницаемость, потери. В результате экстракции удалось добиться схожести частотных характеристик при значениях, показанных на рисунке 2.6.

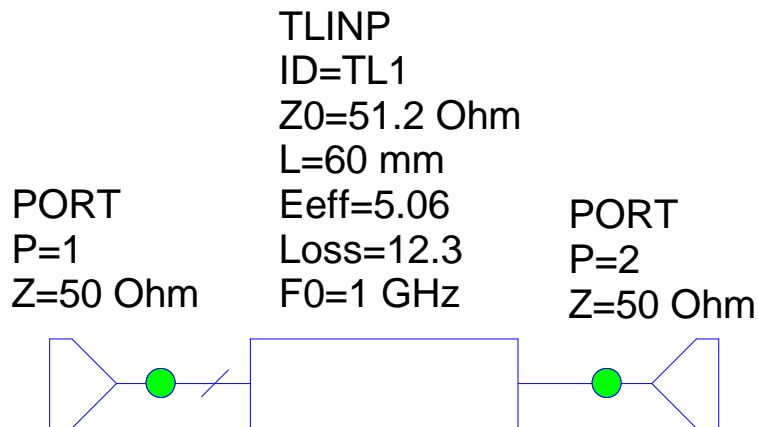


Рисунок 2.6 – Модель МПЛ с учетом частотных параметров

Полученные частотные характеристики при экстракции приведены на рисунках 2.7 и 2.8.

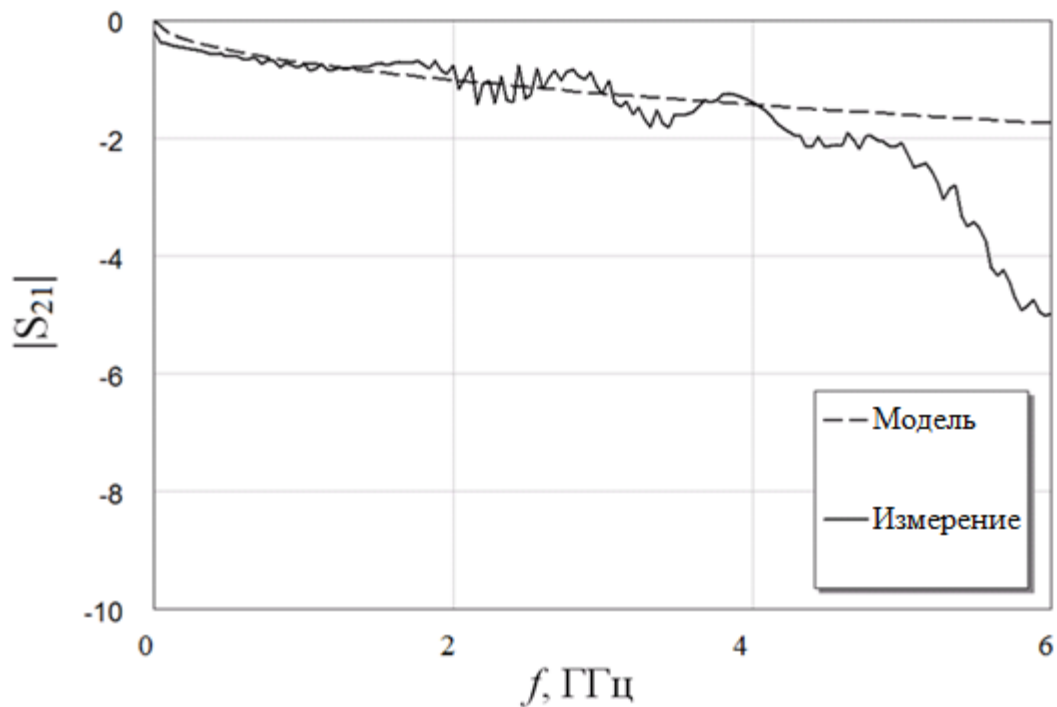


Рисунок 2.7 – Частотная зависимость модуля коэффициента передачи сигнала

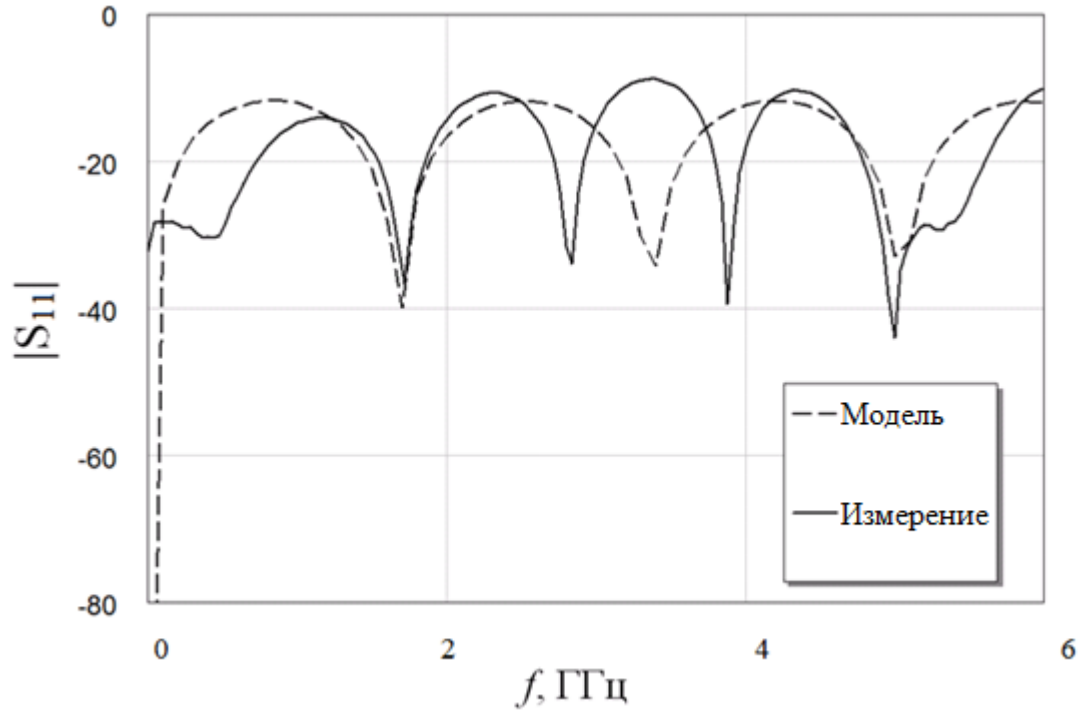


Рисунок 2.8 – Частотная зависимость модуля коэффициента отражения сигнала

Для уточнения модели в схему были добавлены емкости, которые эквиваленты разъемам, припаянным к микрополосковой линии (рисунок 2.9).

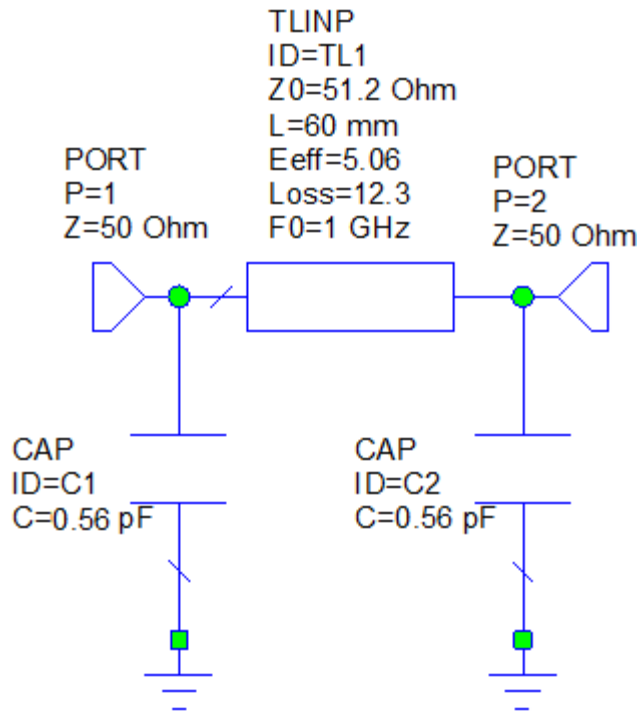


Рисунок 2.9 – Модель микрополосковой линии с учетом разъемов

На рисунках 2.10 и 2.11 показаны частотные зависимости после добавления емкости.

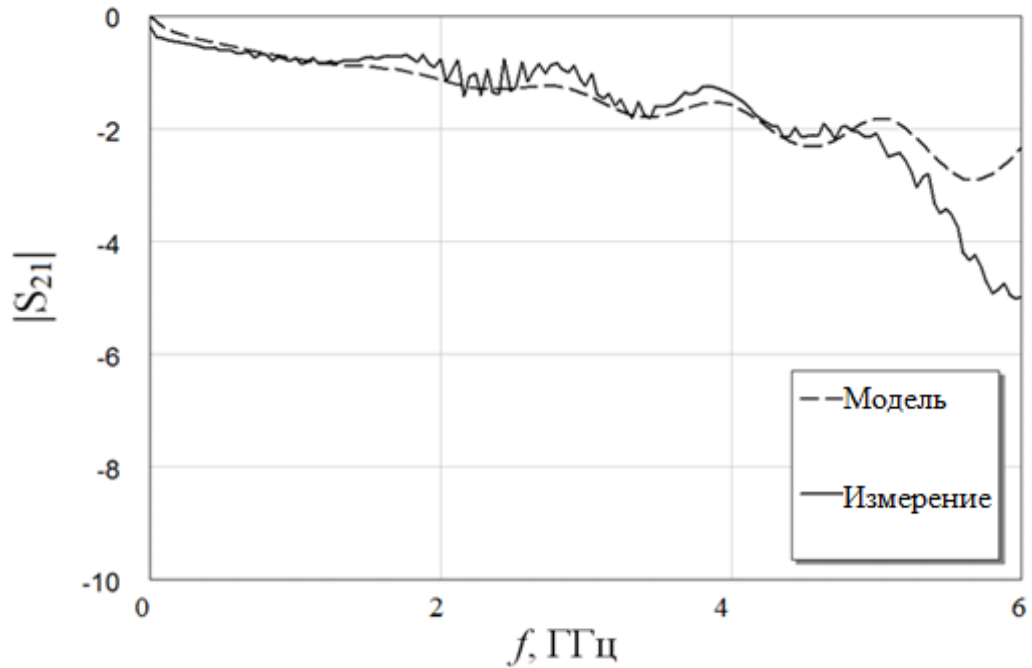


Рисунок 2.10 – Частотная зависимость модуля коэффициента передачи сигнала

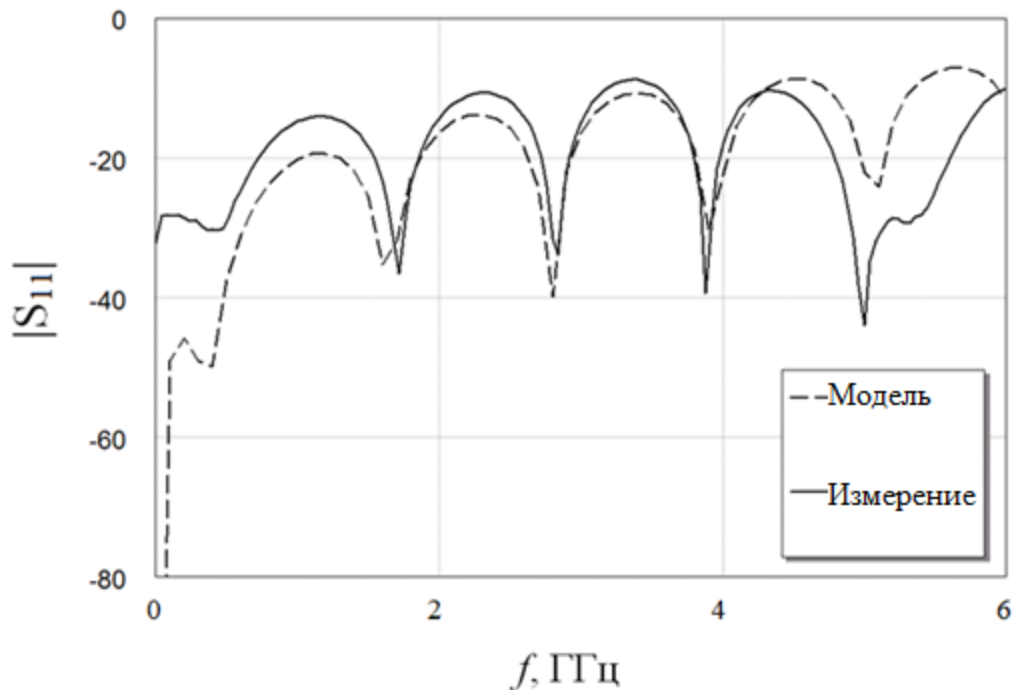


Рисунок 2.11 – Частотная зависимость модуля коэффициента отражения сигнала

Как видно из рисунков 2.10 и 2.11 паразитная емкость положительно сказалась на уточненной модели. Однако для практического использования

узлов с потерями равными 12,3 дБ/м является не допустимым. Полученные результаты опубликованы в работе [61].

Далее для исследования частотных параметров были выбраны проводящие высокотемпературные пасты ПП-17 и ППС-2-2 (ООО «Элма Пасты», Россия) для трафаретной печати и низкотемпературная проводящая паста Conductor 2 («Voltera», Канада), разработанная для прямой печати. В соответствии с техническими условиями спекание паст ПП-17 и ППС-2-2 проводится при температуре 850 °С в течение 7 минут. Спекание Conductor 2 проводится при температуре 180 °С в течение 30 минут.

После моделирования из представленных паст были изготовлены МПЛ и проведена экстракция параметров. Печать МПЛ проводилась на керамических подложках ВК-100. Изначально были проведены измерения геометрических размеров напечатанных МПЛ и в результате ширина всех линий составляет 1,2 мм, а длина равна 60 мм. Результат печати МПЛ показан на рисунке 2.12.

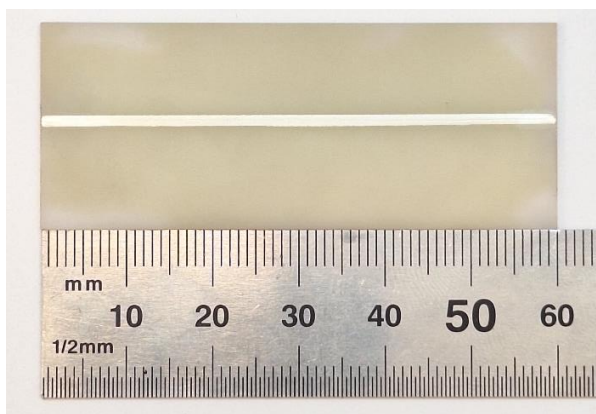


Рисунок 2.12 – МПЛ, напечатанная пастой ППС-2-2

Полученные частотные зависимости модуля коэффициента передачи напечатанных МПЛ показаны на рисунке 2.13.

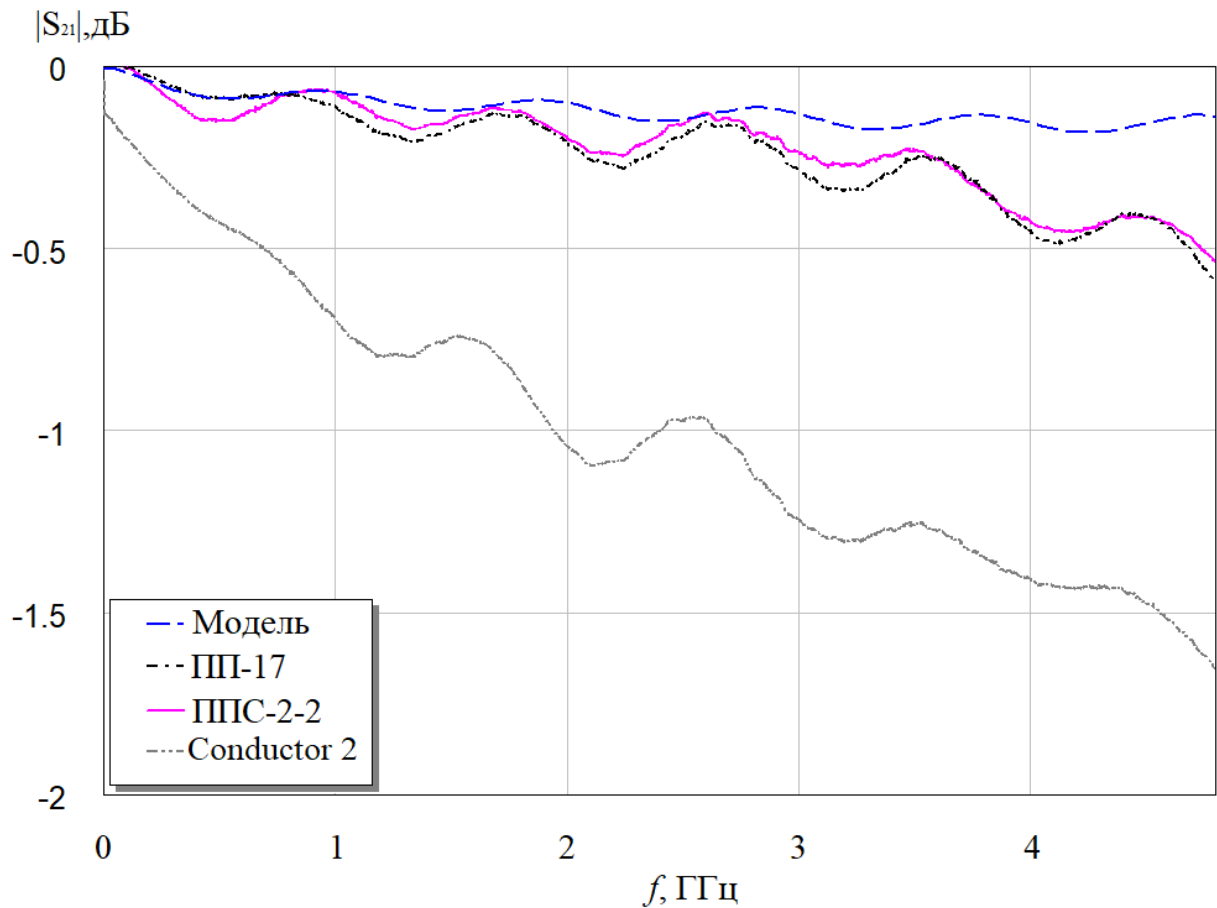


Рисунок 2.13 – Частотная зависимость модуля коэффициента передачи МПЛ

Как видно из рисунка 2.13, частотная зависимость модели и МПЛ, напечатанных высокотемпературными пастами, в диапазоне до 3 ГГц совпадает, после с ростом частоты коэффициент передачи линий увеличивается. Коэффициент передачи МПЛ, напечатанной пастой Conductor 2, имеет большие потери по сравнению с высокотемпературными пастами.

По результатам экстракции были получены параметры, представленные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Частотные параметры проводящих паст

Параметр	Проводящие пасты		
	ПП-17	ППС-2-2	Conductor 2
Характеристическое сопротивление, Ом	42,8	42,5	46,4
Относительная эффективная диэлектрическая проницаемость	7.9		
Затухание, дБ/м	1,6	1,5	10,4

При сравнении полученных значений можно сделать вывод о том, что наименьшее затухание наблюдается у МПЛ, напечатанной пастой ППС-2-2. Затухание в МПЛ, напечатанной пастой ПП-17, близки к потерям МПЛ, напечатанной пастой ППС-2-2. Наибольшее затухание обнаружено у МПЛ, напечатанной низкотемпературной пастой Conductor 2. Потери в такой пасте составляют 10,4 дБ/м.

Полученные результаты опубликованы в работах [60, 61].

2.1.1 Проводниковые пасты для печати полосковых проводников

Для печати полосковых проводников по аддитивной принтерной технологии применяются проводниковые пасты. Основным свойством паст, определяющее ее поведение при движении, является вязкость. Вязкость характеризует внутреннее трение, которое возникает между слоями жидкости при ее движении. Чем больше трение, тем больше силы необходимо приложить, чтобы вызвать движение, так называемый «сдвиг» [69]. Вязкость жидкости определяет качество нанесения – в процессе печати вязкость должна быть достаточно низкой для экструзии, но в то же время должна стать высокой после нанесения для предотвращения растекания.

Примером пасты для аддитивной технологии печати является паста Conductor 2 (Voltera, Канада [70]). Основными параметром пасты является сопротивление и, согласно паспорту, составляет 2,4 мОм/□. Вязкость данной пасты составляет 50–100 Па·с. В наличии данного производителя есть паста АСІ с сопротивлением 2 мОм/□ и вязкостью 100 Па·с. Основным компонентом в пастах являются наночастицы серебра, в качестве связующего используется – моноэтиловый эфир диэтиленгликоля.

На микрофотографии поверхности пасты Conductor 2 при 2000-кратном увеличении (рисунок 2.3, а) обнаружены как относительно крупные спеченные гранулы размером от 1 до 8 мкм, так и более мелкие частицы размером менее 1 мкм. При большем увеличении (рисунок 2.14, б) наблюдаются отдельные

частицы размером от 30 до 200 нм, а также отчетливо различаются контуры частиц размером менее 100 нм, из которых состоят более крупные гранулы.

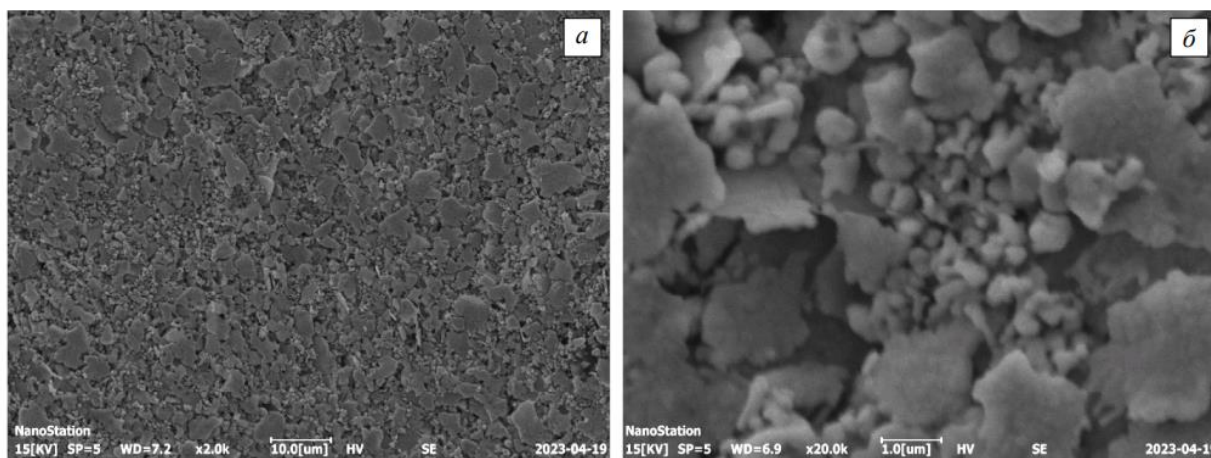


Рисунок 2.14 – Микрофотографии поверхности образца пасты Voltera Conductor 2

Наличие наноразмерных частиц, а также форма и положение отдельных агломератов под разными углами объясняют отсутствие блеска поверхности образца.

Кривая контура шероховатости покрытия на основе пасты Conductor 2 представлена на рисунке 2.15. Среднее арифметическое отклонение профиля Ra составляет 0,945 мкм, высота неровностей профиля по десяти точкам Rz – 5,265 мкм, наибольшая высота неровностей профиля $Rmax$ не превышает значения 6,6 мкм.

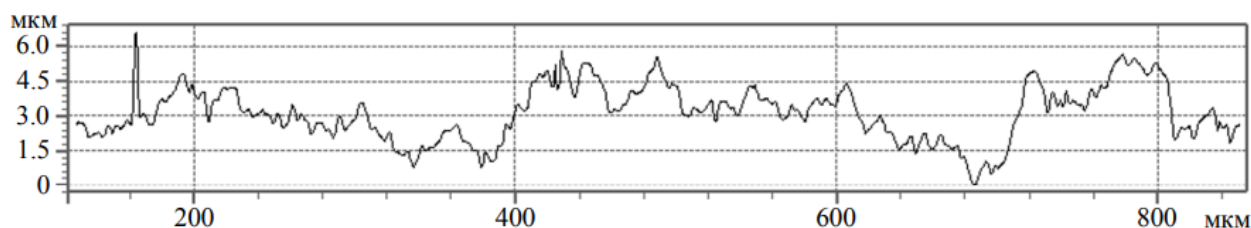


Рисунок 2.15 – Кривая контура шероховатости покрытия на основе пасты Conductor 2

Основной рынок паст сосредоточен на пастах, предназначенных для трафаретной печати. Однако применение таких паст для принтерной технологии затруднительно в связи с высокой вязкостью. Адаптировать пасты

для применения в принтерной технологии возможно путем модификации их вязкости разбавителем.

Для исследования применимости паст, используемых в трафаретной печати, была выбрана проводниковая паста ПП-17. Основным компонентом ПП-17 – это серебро. В соответствии с техническими условиями удельное поверхностное сопротивление составляет не более 7 мОм/□. В качестве связующего вещества используется этилцеллюлоза растворенная в терпинеоле. Для модификации пасты использовался терпинеол. Согласно техническим условиям на пасту, корректировка вязкости возможна путем добавления 0,05% масс. разбавителя от массы пасты с последующим перемешиванием шпателем в течение 15 минут и контролем вязкости.

Контроль вязкости паст осуществляется по диаметальному измерению пятна, образующегося из навески пасты при воздействии груза. При данном измерении вязкость характеризуется величиной, так называемой условной вязкостью. Навеску пасты располагают в центре стеклянной пластины, предварительно протертой изопропиловым спиртом или ацетоном, при этом паста должна занимать минимальную площадь. После навески пасты взвешивают и накрывают вторым чистым стеклом, в центре которого устанавливается груз массой 250 г. В таком состоянии навеску пасты выдерживают в течение 15 минут. По истечению времени измеряют, не разнимая стекло, диаметальный размер пятна в двух взаимоперпендикулярных направлениях и вычисляется среднее значение.

По вышеописанной методике была взята навеска проводниковой пасты ПП-17. В качестве эталонной вязкости использовалась навеска пасты от Conductor 2. Масса навески паст составила 0,15 г. В результате диаметр пятна Conductor 2 составил 27 мм, а пасты ПП-17 21 мм. По результатам измерений условной вязкости можно сделать вывод о том, что вязкость пасты ПП-17 ниже, чем вязкость Conductor 2. Следующим шагом необходимо подобрать количество разбавителя для достижения вязкости Conductor 2.

Модификация пасты ПП-17 проводилась терпинеолом объемом указанному в ТУ. После перемешивания пасты до однородного состояния была измерена условная вязкость. В результате добавления 0,05% масс. терпениола условная вязкость ПП-17 составляет 31 мм. В результате паста получилась с низкой вязкостью. В результате чего необходимо уменьшить количество добавляемого терпинеола.

Для следующего эксперимента модификации паст бралось 0,035% масс. терпениола. После перемешивания условная вязкость ПП-17 равна 28,5 мм.

В результате проведенных измерений был сделан вывод о том, что методика измерения условной вязкости дает относительные значения, которые нельзя сравнить с общепринятыми значениями динамической или кинетической вязкостями. Значения вязкости, полученные методом пятна, зависят от массы навески пасты.

Для измерения динамической вязкости использовался ротационный вискозиметр Anton Paar ViscoQC 300 при помощи шпинделей Heli Plus. Так как используемые пасты – это неньютоновская жидкость, то вязкость оценивается как зависимость от скорости сдвига. На рисунке 2.16 приведены зависимости для паст ПП-17.

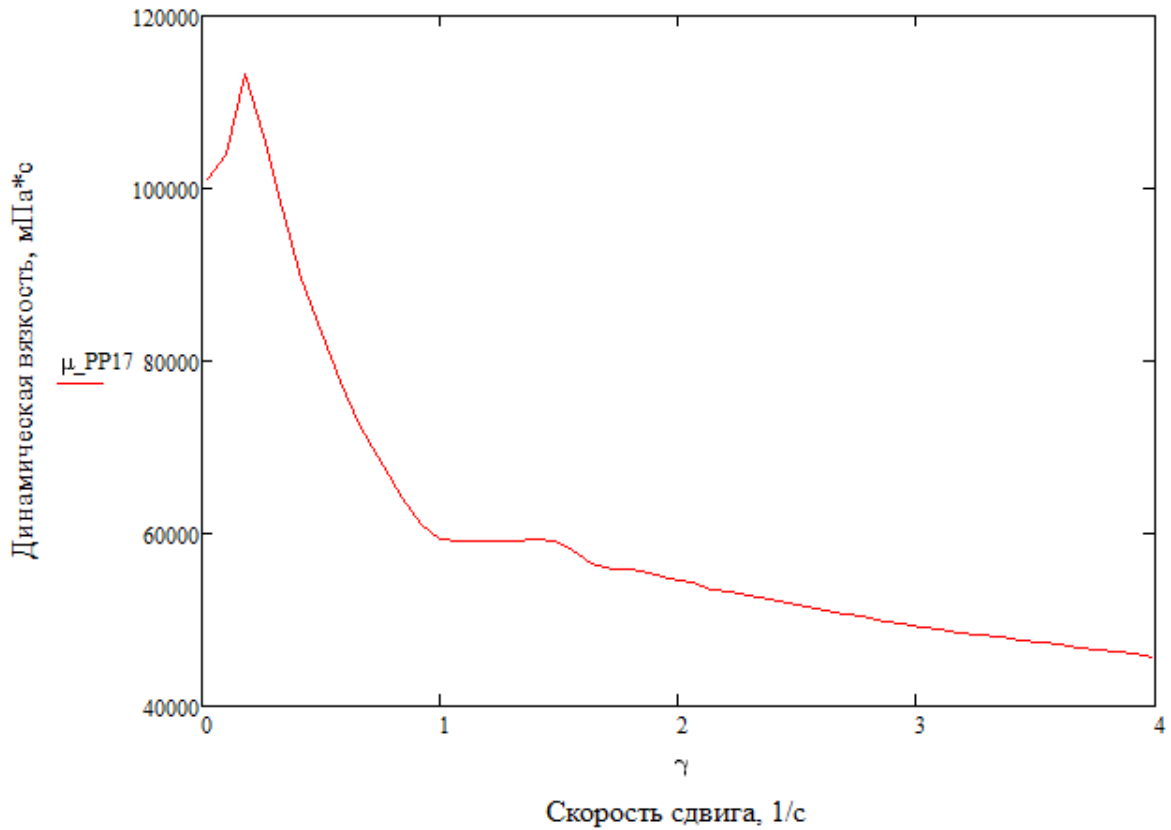


Рисунок 2.16 – Зависимость динамической вязкости от скорости сдвига

Исходя из полученного графика зависимости вязкости от скорости сдвига, пасты можно охарактеризовать как псевдопластичную неньютоновскую жидкость.

Также были проведены измерения распределения размера частиц порошка в пасте. Измерения проводились на анализаторе размера частиц Analysette 22 Nanotec. Результат измерения показан на рисунке 2.17.

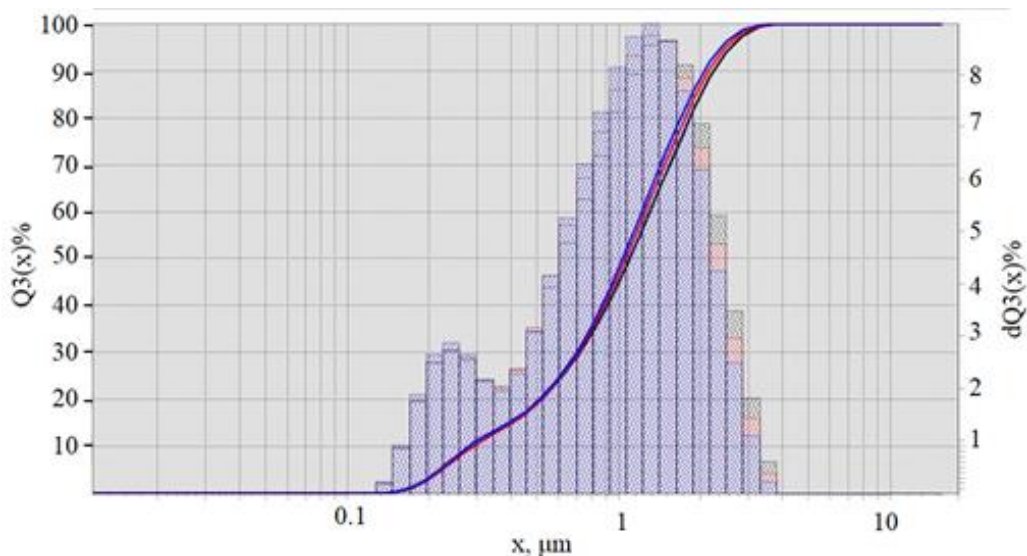


Рисунок 2.17 – Распределение размера частиц порошка в ПП-17

В результате средний арифметический диаметр частиц в пасте ПП-17 составляет 1,2 мкм.

Были проведены исследования оптических свойств и радиационной стойкости проводящих паст. Полученные экспериментальные исследования представлены в работах [71, 72].

2.1.2 Определение разрешающей способности аддитивной принтерной технологии изготовления полосковых проводников

Разрешающая способность аддитивной принтерной технологии зависит от таких параметров как давление, линейная скорость перемещения дозатора, расстояние между соплом и подложкой, вязкости используемых паст, смачиваемость поверхности, количество проходов по одной траектории (наслоение), межцентровое расстояния между линиями при построении траектории (слайсинг). Параметры давление, скорость перемещения, расстояние между соплом и подложкой, количество проходов являются настраиваемыми и управляемыми параметрами принтером. Основным параметром является вязкость, так как от ее значения зависит давление, создаваемое в шприце и скорость экструзии паст. Также вязкость влияет на растекание пасты по поверхности подложки, от этого и зависит количество проходов.

Для определения технологических режимов для изготовления проводников использовалась паста Conductive Ink. Выбор данной пасты обусловлен тем, что она разработана специально для принтера. В процессе печати для получения равномерного распределения пасты на подложке необходимо регулировать давление поршня и высоту картриджа. Давление поршня – это сила, с которой поршень воздействует на пасту во время печати. Излишне большое давление приводит к объединению проводников, недостаточное давление приводит к разрыву проводника.

Высота картриджа определяет зазор между подложкой и кончиком сопла. Если картридж установлен слишком высоко, то на кончике сопла образуются капли, которые неравномерно ложатся на подложку. При этом паста тонко дозируется и по форме не совпадает с движением сопла. Если сопло расположено очень низко, то возникают следующие трудности:

- ломается кончик сопла;
- повреждается подложка;
- рисунок растекается и получается размазанным.

Результат подобранного давления и высоты показан на рисунке 2.18. Однако подобранное давление приводится в условных единицах и необходимо его подбирать каждый раз.



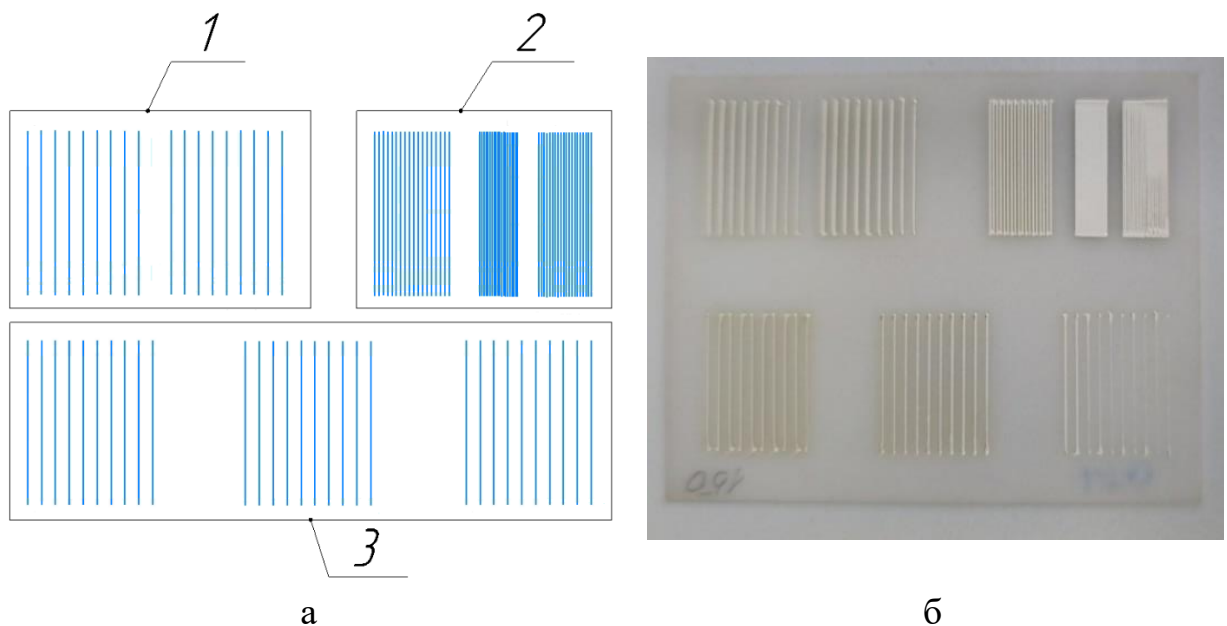
Рисунок 2.18 – Печать при подобранном давлении и высоте дозирования

В зависимости от геометрии топологического рисунка выбирается сопло с разной конфигурацией внутреннего диаметра. Стандартный набор сопел принтера Voltera V-One состоит из сопел с внутренним диаметром от 100 мкм до 225 мкм. Конусная конструкция сопла обеспечивает плавный поток вытекания пасты и предотвращает засорение при дозировании. Более высокая скорость потока позволяет снизить давление в поршне и сократить время дозирования. Гладкий внутренний канал подачи жидкости снижает турбулентность потока, предотвращая образование воздушных ловушек и капание жидкости, вызванное накоплением «противодавления». Недостатком таких сопел является хрупкость наконечника – наличие выступов рельефа на подложке приводит к повреждению иглы. Кроме того, это может произойти при чрезмерном давлении и прижиге иглы к подложке.

2.1.2.1 Определение разрешающей способности аддитивной принтерной технологии

Для определения разрешающей способности технологии печати была разработана тестовая плата. Разработанная тестовая плата включает в себя проводники для оценки достигаемых минимальных размеров по ширине, зазору между элементами и толщины (рисунок 2.19, а). Отдельно на плате располагается область для определения коэффициента перекрытия при формировании полигонов (рисунок 2.19, а). Также на разработанной плате предусмотрены проводники для оценки толщины при увеличении количества проходов (рисунок 2.19, а).

Для печати разработанной платы использовались сопла с внутренним диаметром 100 мкм, 150 мкм и 225 мкм и керамическая подложка со шлифованной поверхностью ВК-100. Результат печати показан на рисунке рисунок 2.19, б.



1 – область для оценки ширины с шагом 50 мкм; 2 – область для определения коэффициента перекрытия; 3 – область для оценки ширины и толщины с увеличением проходов.

Рисунок 2.19 – Цифровой файл разработанной платы (а) и напечатанный образец соплом 150 мкм (б)

При визуальном осмотре напечатанных образцов были обнаружены следующие дефекты:

- вначале и в конце каждого проводника наблюдаются точки;
- присутствует прерывистость проводников;
- наличие уширения в сечении проводника.

Область 1 представляет собой две группы проводников, у которых ширина линий увеличивалась с шагом 50 мкм (рисунок 2.20). Данный эксперимент позволяет определить коэффициент растекания, а также оценить возможности печати принтера.

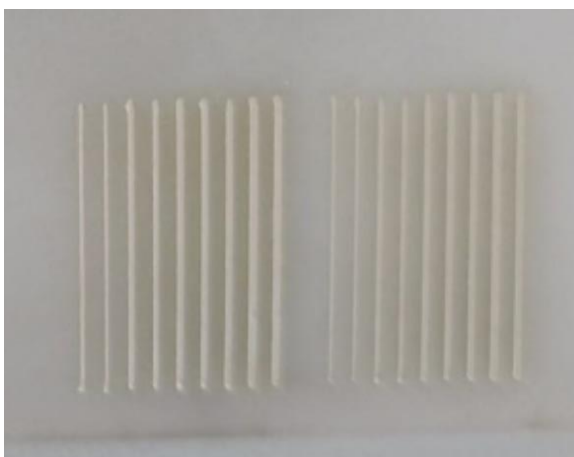


Рисунок 2.20 – Проводники для определения коэффициента растекания

На микроскопе была измерена ширина каждого проводника в нескольких точках. Результаты измерений для трех видов сопел приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Ширина проводников области 1

Заданное значение ширины, мкм	Полученная ширина проводника, мкм		
	100 мкм	150 мкм	225 мкм
100	147	182	259
150	150	170	269
200	159	178	256
250	147	243	248
300	168	296	203
350	243	369	347
400	248	371	319
450	357	454	425

По полученным значениям ширины проводника был построен график сравнения заданной ширины линии с полученным значением (рисунок 2.21).

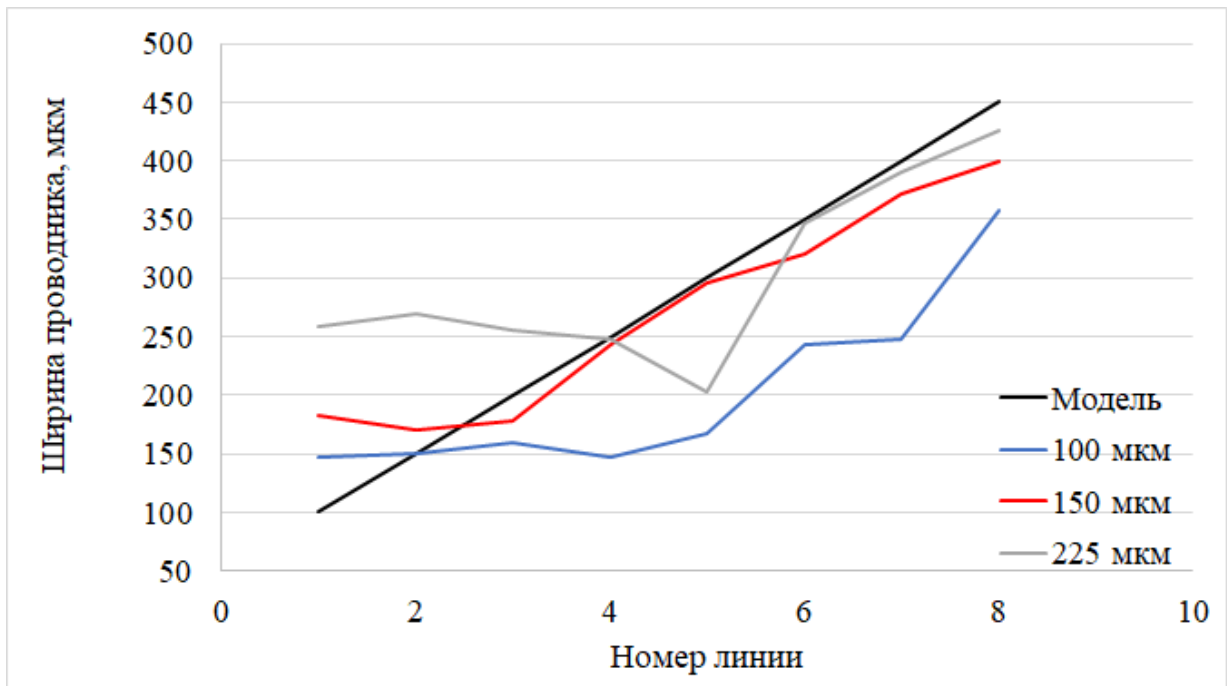


Рисунок 2.21 – Сравнение заданной и полученной ширины проводника

Также на профилометре была измерена толщина линий для трех диаметров сопел: 100 мкм, 150 мкм и 225 мкм. Полученные данные отображены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Толщина проводников

Номер линии	Толщина проводника, мкм		
	100 мкм	150 мкм	225 мкм
1	19	18	21
2	19	18	19
3	21	22	20
4	23	23	23
5	19	21	20
6	20	20	19
7	18	20	25
8	20	22	21

Как видно по результатам измерений, толщина проводников остается постоянной.

Далее были проведены измерения области 2 напечатанных образцов. На рисунке 2.22 представлены напечатанные образцы. Проводники, расположенные слева, напечатаны таким образом, что, начиная с первой линии следующая располагается рядом с ней встык. Проводники посередине

располагаются с наложением друг на друга в 50% для формирования цельного полигона. Проводники справа расположены на расстоянии 150 мкм друг от друга. Вышеописанные группы проводников помогают определить на каком расстоянии необходимо расположить проводники, чтобы получить цельный полигон.

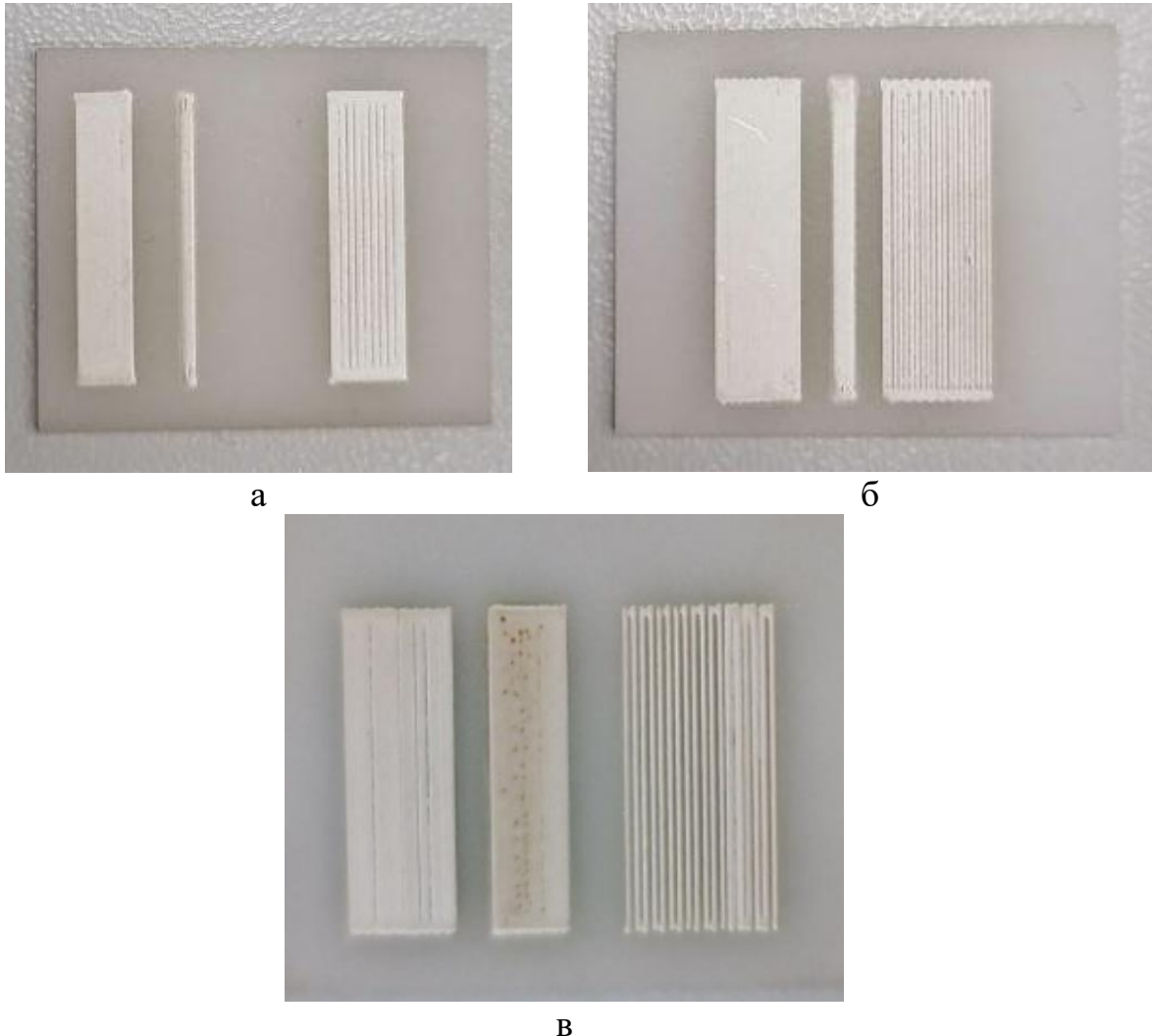


Рисунок 2.22 – Проводники, напечатанные соплом диаметром 100 мкм (а), 150 мкм (б) и 225 мкм (в) для определения коэффициента перекрытия

Как видно из эксперимента, проводники, расположенные встык, замкнулись. Проводники, расположенные с наложением в 50%, тоже замкнулись. Большинство проводников, расположенных на расстоянии 150 мкм, не замкнулись, но наблюдаются и линии, которые замкнулись полностью.

Ниже представлены результаты измерений проводников области 3. Проводники под номером 1, представленные на рисунке 2.23, напечатаны в

один слой, под номером 2 – в два слоя, под номером 3 – в три слоя. С помощью данного эксперимента можно понять на какую величину в среднем происходит растекание при увеличении количества слоев и насколько меняется толщина линий.

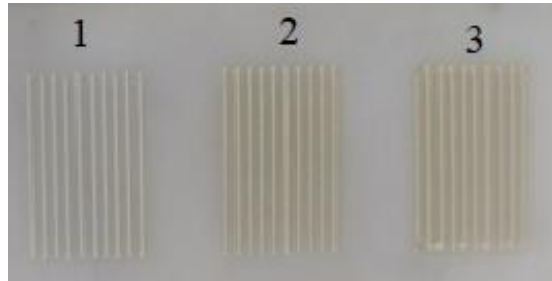


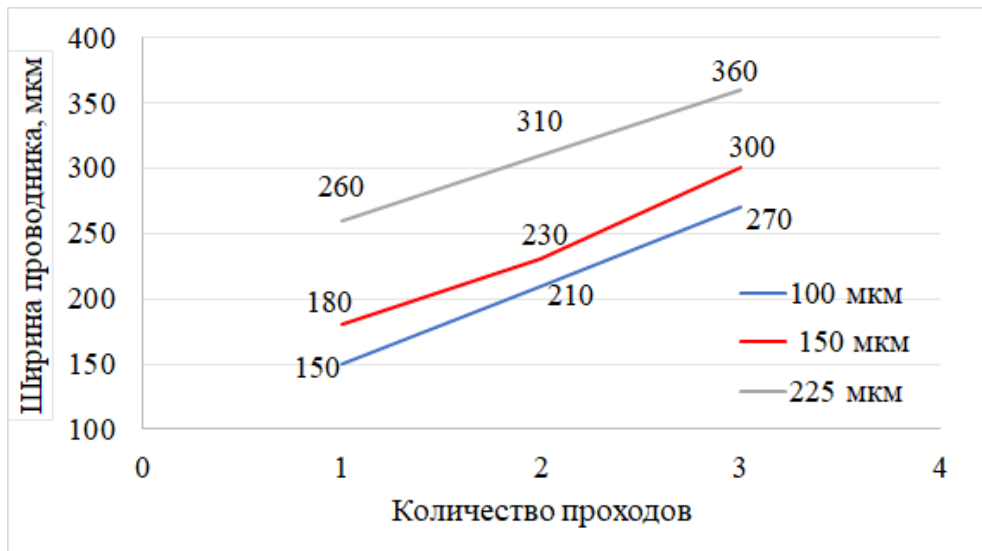
Рисунок 2.23 – Проводники области 3

По результатам измерений ширины проводников в нескольких точках были составлены таблица 2.4 и графики (рисунок 2.24), на которых показано, каким образом количество слоев влияет на ширину линии проводника для трех сопел: 100 мкм, 150 мкм и 225 мкм.

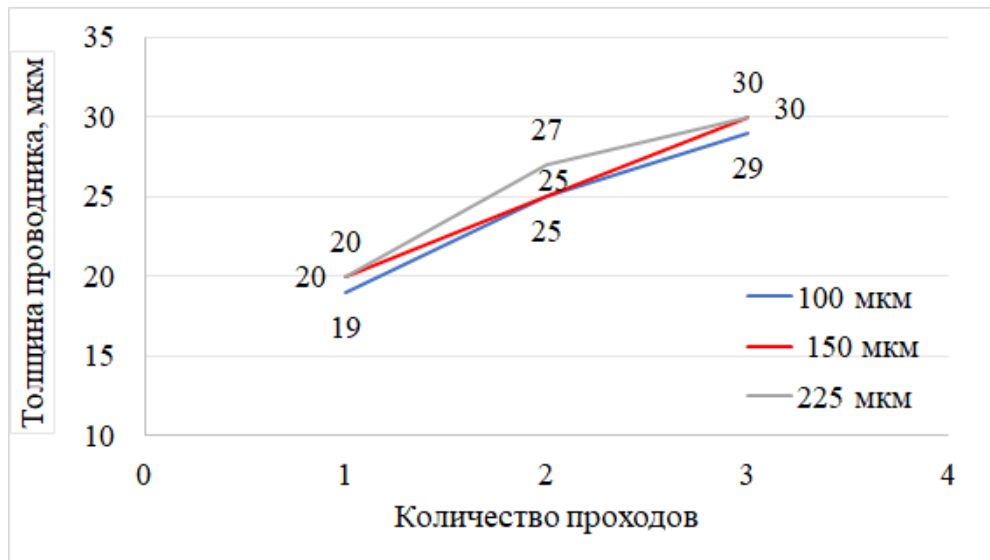
Таблица 2.4 – Средние значения ширины проводников для всех диаметров сопел

Кол-во слоев	Средняя ширина проводников, мкм			Средняя толщина проводников, мкм		
	100 мкм	150 мкм	225 мкм	100 мкм	150 мкм	225 мкм
1	150	180	260	19	20	20
2	210	230	310	25	25	27
3	270	300	360	29	30	30

На рисунке 2.24 представлен график зависимости ширины и толщины проводников от количества проходов.



а



б

Рисунок 2.24 – График зависимости ширины (а) и толщины (б) проводника от количества слоев

Как видно из рисунка 2.24 ширина и толщина проводника линейно увеличивается с увеличением проходов. Также можно сделать вывод о том, что изменение диаметра сопла не влияет на толщину.

Для устранения выявленных дефектов необходимо экспериментальным путем определить корректные режимы экструзии. Однако, в связи с тем, что необходимо каждый раз проводить подбор параметров по давлению и расстоянию между соплом и подложкой экспериментальным путем трудоемко определить данные параметры. Таким образом встала задача о построении

математической модели и проведении численного моделирования процесса экструзии паст.

2.2 Усовершенствование технологии принтерной печати на основе численного моделирования экструзии паст

При поршневой экструзии [6,73] используется поршень для выдавливания материала, находящегося внутри шприца. Выдавливаемый объем и скорость потока паст связаны со смещением поршня внутри шприца. Объем выдаваемых паст и скорость экструзии связаны со скоростью перемещения поршня [74]. Отметим, что применение паст с различной вязкостью зависит от мощности приводного двигателя и механической системы.

Для формирования структуры напечатанных пленок необходимо понимать процесс образования равномерного, непрерывного потока пасты, ее выхода из сопла и распределение по подложке. На качество напечатанных пленок влияет давление, создаваемое в шприце, скорость перемещения дозатора и расстояние между соплом и подложкой. Скорость экструзии паст зависит от реологических характеристик, таких как: вязкость, плотность, смачивание, и т.д. [75] На изменение вязкости паст может влиять температура окружающей среды или высокие импульсы давления, которые могут изменить скорость вытекания в процессе экструзии.

Скорость перемещения дозатора должна согласовываться с линейной скоростью вытекания паст из сопла [76]. Слишком высокая скорость потока по сравнению со скоростью перемещения дозатора приведет к чрезмерным деформациям формируемых пленок и, наоборот, к разрывам пленки [74]. При этом псевдопластичный характер поведения пасты усложняет процесс подбора режимов печати, поскольку при экструзии на некотором расстоянии от сопла вязкость пасты повышается вследствие чего растекание по подложке ухудшается. Таким образом, необходимо понимать от каких параметров

системы зависит процесс экструзии. Исследование данного процесса можно проводить экспериментально, или с помощью численного моделирования. Как правило, экспериментальное получение зависимостей печатающей системы от ее параметров и внешних характеристик является трудоемким, в первую очередь, с точки зрения времени, поэтому оно осуществляется для получения необходимых характеристик (таких как зависимости вязкости пасты от скорости сдвига) и проверки результатов численного моделирования.

Для численного моделирования экструзии паст использован подход, основанный на описании выдавливания из сопла пасты, состоящей из органического связующего (жидкости) и твердых частиц. Описание двухфазной среды жидкость-твердые частицы [77], выдавливаемой в воздух, целесообразно в случае существенных изменений плотности пасты, т.е. для достаточно мелких твердых частиц и сбалансированного концентрационного соотношения между ними и органическим связующим можно рассматривать пасту как неньютоновскую жидкость. Такой подход хорошо зарекомендовал себя при описании экструзии политетрафторэтиленовой пасты [78].

Данный подраздел посвящен исследованию экструзии пасты, состоящей из органического связующего (терпинеола) и порошка (частиц серебра), с целью определения оптимальных условий работы дозатора и параметров системы, предназначенной для создания компонентов и СВЧ-устройств. Паста рассматривается как неньютоновская жидкость, характерные свойства которой получены из эксперимента. Также известно, что в зависимости от того на каком расстоянии от сопла поместить подложку качество печати существенно меняется. С помощью численного моделирования можно получить зависимости физических характеристик пасты при экструзии от управляющих параметров системы, а также определить оптимальное расстояние от сопла, на котором необходимо располагать подложку при печати.

2.2.1 Описание физико-математической модели и методика эксперимента

В данной работе численное моделирование процесса экструзии осуществлялось посредством решения уравнения Навье-Стокса для двухфазной среды паста-воздух аналогично [78]:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \nabla \cdot (-p\mathbf{I} + \mathbf{K}) + \rho \vec{g} + \vec{F}_\sigma + \vec{F}_\theta, \quad (2.1)$$

где \vec{v} – скорость жидкости в точке пространства (поле скоростей), ρ – плотность, ∇ – оператор Набла, p – давление, \mathbf{I} – единичная матрица, \mathbf{K} – тензор вязких напряжений, \vec{g} – ускорение свободного падения, \vec{F}_σ – объемная сила, соответствующая поверхностному натяжению.

Тензор вязких напряжений в случае сжимаемой жидкости имеет вид:

$$\mathbf{K} = \mu(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T) - \frac{2}{3} \mu(\nabla \cdot \vec{v})\mathbf{I}, \quad (2.2)$$

где $\nabla \vec{v}$ – градиент скорости (тензор второго порядка), $(\nabla \vec{v})^T$ – означает транспонирование, μ – вязкость.

Применим уравнение (2.1) для описания поля скорости в двухфазной среде паста-воздух. В численной схеме граница между ними рассматривается как гладкая, а уравнение неразрывности можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \vec{v} = 0 \quad (2.3)$$

Воздух от пасты существенно отличается плотностью и вязкостью, следовательно, в выражениях (2.1) и (2.2) вязкость и плотность запишем в виде:

$$\rho = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1)\varphi, \quad (2.4)$$

$$\mu = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)\varphi, \quad (2.5)$$

где ρ_1, μ_1 – плотность и вязкость воздуха, ρ_2, μ_2 – плотность и вязкость пасты, φ – функцию уровня, которая равна нулю в области пасты и единице в воздухе.

Запишем уравнение на функцию уровня:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \bar{v} \nabla \varphi = \zeta \nabla \cdot \left(\varepsilon \nabla \varphi - \varphi(1-\varphi) \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \right) = 0, \quad (2.6)$$

где параметр ζ характеризует максимальную скорость, а параметр ε – толщину границы раздела фаз. Функция φ является непрерывной и гладкой вблизи границы раздела фаз.

В уравнении (2.1) присутствует объемная сила, соответствующая поверхностному натяжению, которая характеризует поведение пасты на границе раздела паста-воздух. Данную силу можно представить в следующем виде:

$$\vec{F}_\sigma = \sigma \delta \kappa \vec{n}, \quad (2.7)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения паста-воздух, $\delta = 6|\nabla \varphi| \cdot |\varphi(1-\varphi)|$ – гладкая аппроксимация дельта функции Дирака, κ – кривизна, \vec{n} – единичный вектор нормали к поверхности раздела фаз.

Для решения уравнения (2.1) необходимо построить соответствующую геометрию. Прототипом данной геометрии являлся поршневой дозатор. На рисунке 2.25, а представлено изображение дозатора в сборе, на рисунке 2.25, б его модель в разрезе вдоль вертикальной оси дозатора, а на рисунке 2.25, в расчетная область для численного моделирования в цилиндрической системе координат, которая соответствует внутренней геометрии дозатора заполненной пастой и области воздуха. На рисунке 2.25, в верхняя горизонтальная граница (область 7) соответствует горизонтальному сечению в области 2 рисунка 2.25, в на соответствующем расстоянии от сопла. Отметим, что основными геометрическими характеристиками внутренней области дозатора

являются: диаметр сопла – 0,1 мм и диаметр области подачи пасты (рисунок 2.25, в область 7) равный 12 мм.

Для получения численного решения уравнения (2.1) с учетом (2.3) и (2.6) необходимо задать начальные и граничные условия (ГУ). Будем считать, что в начальный момент времени дозатор полностью заполнен пастой (области 2 и 3 на рисунке 2.25, в), а область выдавливания является воздухом (область 4 на рисунке 2.25, в). Пусть на границе свободного пространства, соответствующего воздуху (ГУ-1, см. рисунок 2.25, в) избыточное давление (отклонение давления от атмосферного) равно нулю, т.е. давление равно атмосферному, а все проводимые расчеты соответствуют ситуации, в которой паста не доходит до этих границ. На верхней границе (ГУ-3, см. рисунок 2.25, в) зададим постоянную скорость подачи пасты $v_{in} = const$ (по нормали), что соответствует постоянной скорости поршня. На всех остальных границах (за исключением оси симметрии) соответствующих ГУ-2 (рисунок 2.25, в) необходимо задать условие непроницаемой стенки, которое записывается в следующем виде:

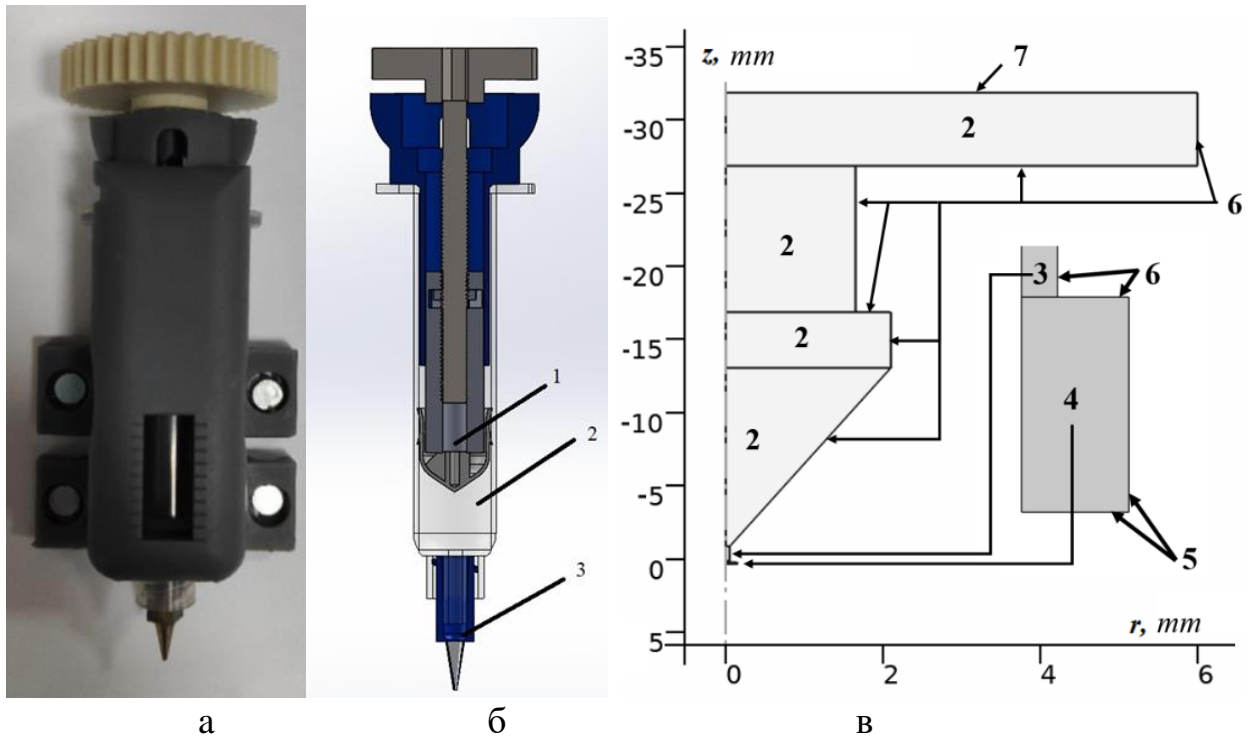
$$\vec{v} \cdot \vec{n} = 0, \quad (2.8)$$

$$\vec{n} \cdot \left(\varepsilon \nabla \varphi - \varphi (1 - \varphi) \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|} \right) = 0. \quad (2.9)$$

На границе паста-воздух-стенка дозатора в данном случае возникает сила \vec{F}_θ , направленная по нормали к поверхности паста-воздух:

$$\vec{F}_\theta = \sigma \delta(\vec{n}_{wall} \cdot \vec{n} - \cos(\theta)) \vec{n}, \quad (2.10)$$

где \vec{n}_{wall} – единичный вектор нормали к стенке дозатора. С учетом большой вязкости пасты и для скорости ее выдавливания данная сила несущественно влияет на общую картину, поэтому в расчетах контактный угол смачивания θ (2.10) взят равным $\pi/2$.



1 – поршень, 2 – паста внутри дозатора, 3 – сопло, 4 – область выдавливания (в начальный момент – воздух), 5 – свободное пространство (ГУ-1), 6 – стенки дозатора (ГУ-2), 7 – область подачи пасты (ГУ-3)
 Рисунок 2.25 – Поршневой дозатор (а); его 3D-модель (б); расчетная область модели, соответствующая области заполненной пастой и воздухом (в)

Плотность пасты определяется плотностью органического связующего ρ_c , плотностью твердых частиц ρ_d и их массовой долей ω :

$$\omega = \frac{m_d}{m_d + m_c}, \text{ т.е. } \rho_2 = \rho_d \omega + \rho_c (1 - \omega) \quad (2.11)$$

где m_d, m_c – массы порошка серебра и терпинеола соответственно.

Динамическая вязкость пасты определялась экспериментально с помощью ротационного вискозиметра ViscoQC 300 (Anton Paar, Австралия) в конфигурации Heli-Plus, с помощью которого получена зависимость динамической вязкости пасты от скорости сдвига $\dot{\gamma}$.

Данная зависимость хорошо описывается моделью Карро [78]:

$$\mu = \mu_{inf} + (\mu_0 - \mu_{inf}) (1 + (\lambda \dot{\gamma})^2)^{(n-1)/2}. \quad (2.12)$$

где $\mu_{inf}, \mu_0, \lambda, n$ – параметры модели Карро, определяемые при аппроксимации экспериментальных данных. Аппроксимация этой зависимости для $\omega = 0,7$ в

соответствии с моделью Карро (2.12) представлена на рисунке 2.26, при этом $\mu_{inf} = 0,053$ МПа, $\mu_0 = 0,241$ МПа, $\lambda = 1,151$ с, $n = 0,324$.

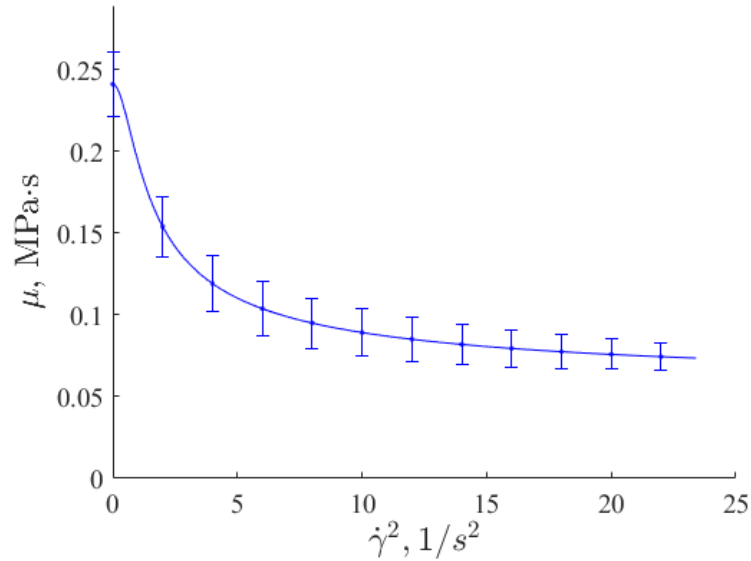


Рисунок 2.26 – Аппроксимация экспериментально полученной зависимости вязкости от квадрата скорости сдвига с моделью Карро (2.12)

Твердые частицы в пасте окружены органическим связующим, поэтому на границе с воздухом поверхностные явления определяются характеристиками этого связующего, следовательно коэффициент поверхностного натяжения пасты можно считать равным коэффициенту поверхностного натяжения органического связующего.

В таблице 2.5 – Характеристики пасты и воздуха представлены характеристики пасты и воздуха для численного моделирования.

Таблица 2.5 – Характеристики пасты и воздуха

Параметр	Значение	Ссылка
Плотность терпинеола ρ_c	930 кг/м ³	[79]
Плотность серебра ρ_d	10500 кг/м ³	[80]
Плотность воздуха ρ_1	1,28 кг/м ³	[81]
Динамическая вязкость воздуха μ_1	$1,81 \times 10^{-5}$ Па·с	[81]
Поверхностное натяжение терпинеола	0,033 Н/м	[79]

Моделирование экструзии пасты осуществлялось в пакете COMSOL Multiphysics 6.1. В этом исследовании использовались физические модули Laminar Flow, Level Set, а также расчетные модули Phase Initialization и Time-

Dependent. Использовался подход близкий к примененному в работе [78]. Для решения задачи был применен конечных элементов, при этом для каждой из областей подбиралось соответствующее разбиение и для каждой области подбиралась сетка конечных элементов с учетом доли частиц серебра в пасте (рисунок 2.27, б).

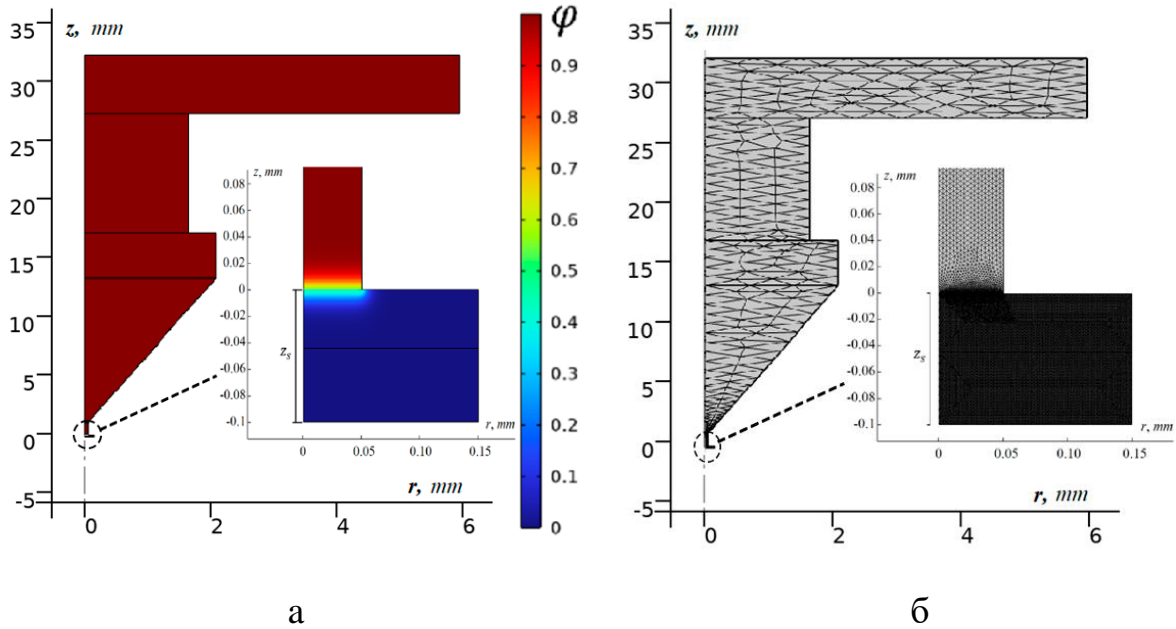


Рисунок 2.27 – Начальное распределение пасты в области расчета (а) и сетка, используемая для расчета (б)

2.2.2 Результаты численного моделирования

В результате численного моделирования получены пространственные распределения вязкости, скорости и избыточного давления (рисунок 2.28, а–в) для пасты при ее экструзии из сопла со скоростью подачи пасты $v_{in} = 1,3$ МКМ/с.

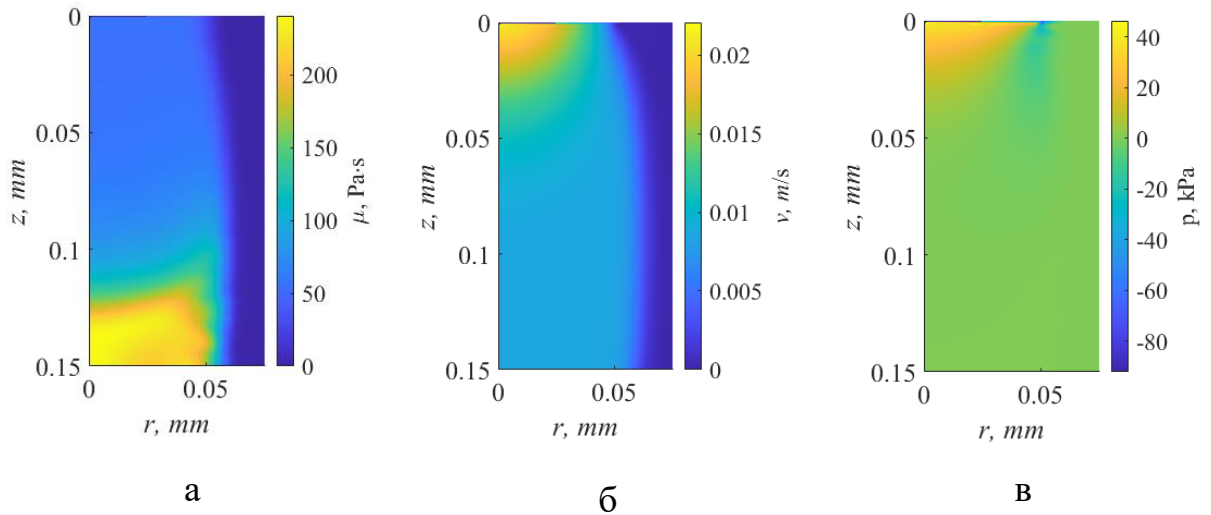
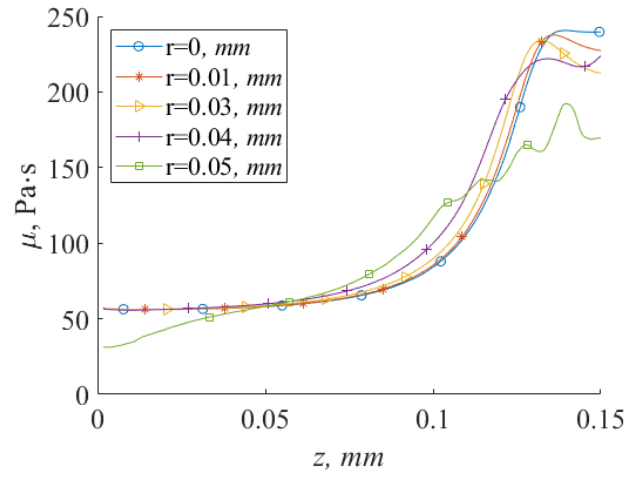
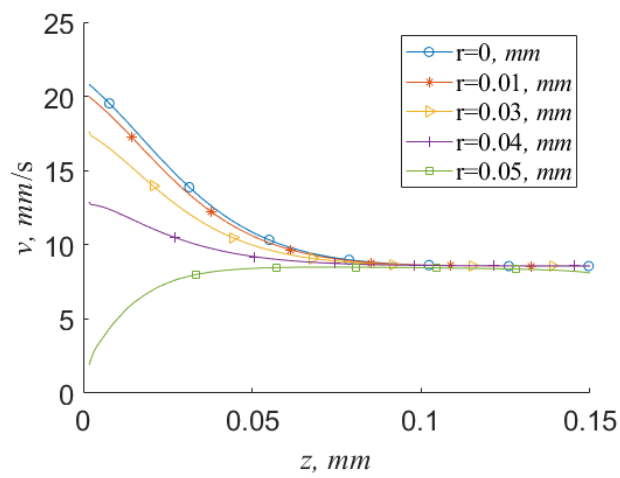


Рисунок 2.28 – Пространственные распределения вязкости (а), скорости (б) и избыточного давления (в) для пасты при ее выдавливании из сопла

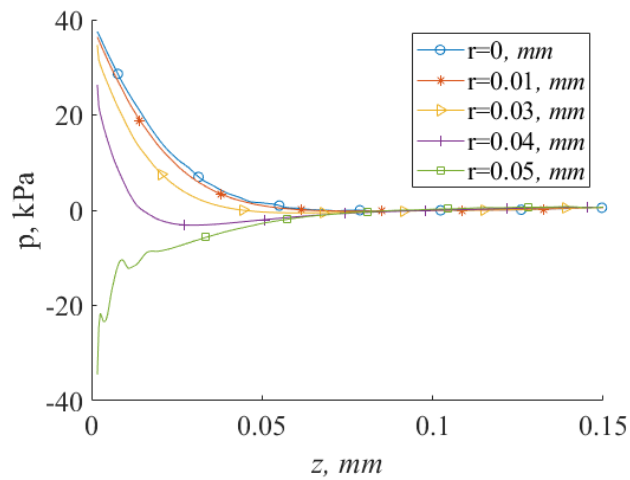
Из рисунка 2.28, а видно, что на расстоянии более 0,1 мм вязкость пасты существенно увеличивается, что обусловлено уменьшением скорости сдвига (рисунок 2.26), при этом скорость пасты (рисунок 2.28, б) становится практически постоянной начиная с расстояния 0,8 мм. На рисунке 2.29 показаны зависимости, соответствующие рисунку 2.28, для вязкости (рисунок 2.29, а), скорости (рисунок 2.29, б) и избыточного давления (рисунок 2.29, в) от расстояния до сопла для различных значений радиальной координаты, а рисунку 2.30 – зависимости, соответствующие рисунку 2.29, для вязкости (рисунок 2.30, а), скорости (рисунок 2.30, б) и избыточного давления (рисунок 2.30, в) от радиальной координаты для различных от расстояния до сопла.



а

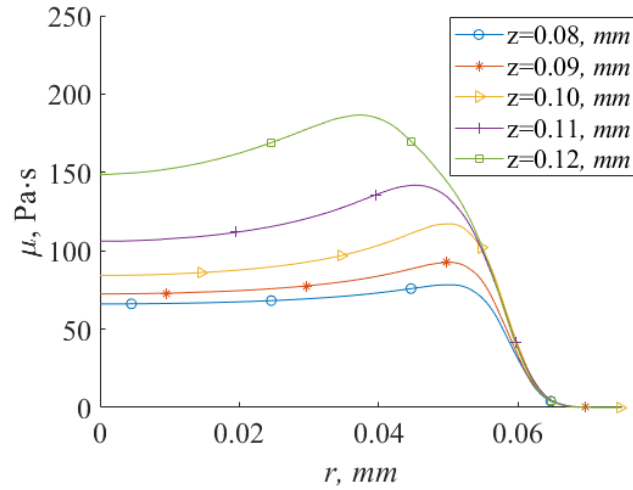


б

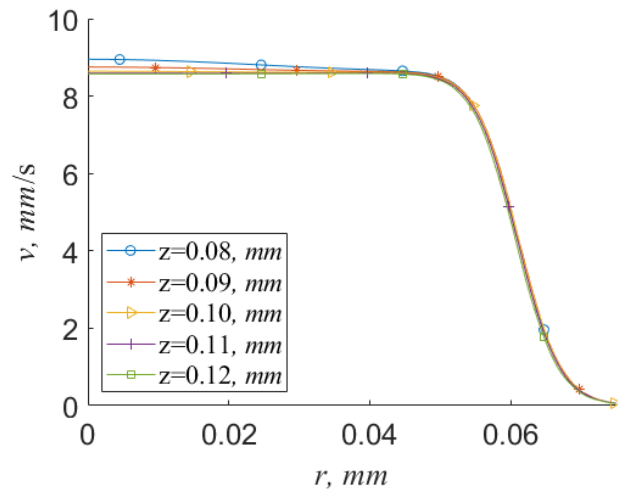


в

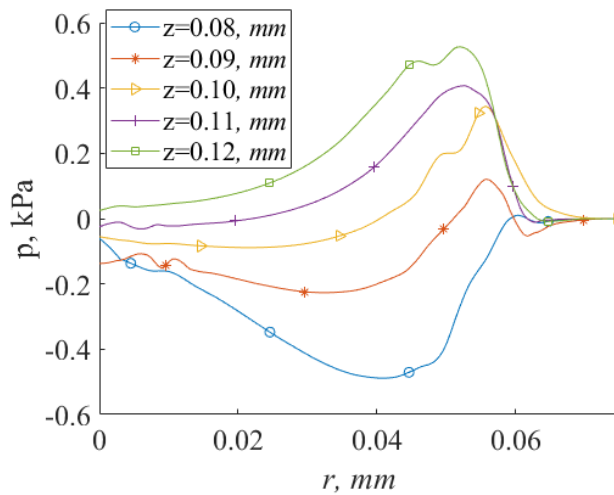
Рисунок 2.29 – Зависимости вязкости (а), скорости (б) и избыточного давления (в) от расстояния до сопла для различных значений радиальной координаты



а



б



в

Рисунок 2.30 – Зависимости вязкости (а), скорости (б) и избыточного давления (в) от радиальной координаты для различных значений расстояний до сопла

Из рисунка 2.29, а видно, что с увеличением расстояния от оси симметрии пасты вязкость на различных расстояниях от сопла ведет себя

противоположным образом. На выходе сопла ($z = 0$ мм) на его границе ($r = 0,05$ мм) вязкость существенно меньше, чем на оси симметрии. На расстоянии $z = 0,05$ мм вязкость в сечении, перпендикулярном оси симметрии практически одинакова, при $z > 0,05$ мм она начинает увеличиваться по мере удаления от оси, а начиная с $z = 0,10$ мм на расстоянии $r = 0,05$ мм от оси ведет себя немонотонно. В контексте применения экструзии пасты для печати дорожки на подложке (печатной плате) немонотонность вязкости приводит к волнообразной границе, т.е. при помещении подложки на расстояние $z > 0,10$ мм ширина дорожки будет меняться по мере выдавливания пасты. Например, из рисунка 2.30, а видно, что на расстояниях $z = 0,08$ мм, $z = 0,09$ мм и $z = 0,10$ мм максимум вязкости соответствует примерно одному и тому же значению радиальной координаты. На расстояниях $z = 0,11$ мм и $z = 0,12$ мм максимум смещается в сторону оси симметрии, а абсолютное значение вязкости существенно увеличивается, т.е. паста становится менее подвижной.

Из рисунка 2.29, б видно, что на выходе сопла ($z = 0$ мм) с увеличением расстояния от оси симметрии пасты скорость существенно уменьшается, что соответствует течению жидкости в трубе. С увеличением расстояния от сопла ($z = 0,09$ мм) скорость пасты при различных значениях радиальной координаты становится практически одинаковой (рисунок 2.30, б). Отметим, что избыточное давление ведет себя подобно скорости (рисунок 2.29, в и 2.30, в), среднее значение которого в сечении, перпендикулярном оси симметрии пасты на расстоянии от сопла $z = 0,10$ мм, близко к нулю, при этом его среднеквадратичное отклонение минимально, т.е. в этом сечении давление внутри пасты равно атмосферному.

Из сказанного следует, что оптимальным расстоянием при вязкости, представленной на рисунке 2.26 и параметрах из таблицы 2.5, а также при скорости подачи пасты $v_{in} = 1,3$ мкм/с оптимальным расстоянием, на котором необходимо помещать подложку при печати дорожек является $z = 0,10$ мм.

Меняя скорость подачи пасты v_{in} можно получить зависимости аналогичные представленным на рисунке 2.29, а, б и определить соответствующие оптимальное расстояние, на котором следует поместить подложку при печати дорожек. На рисунке 2.31 представлены соответствующие зависимости при различных значениях v_{in} на оси симметрии пасты.

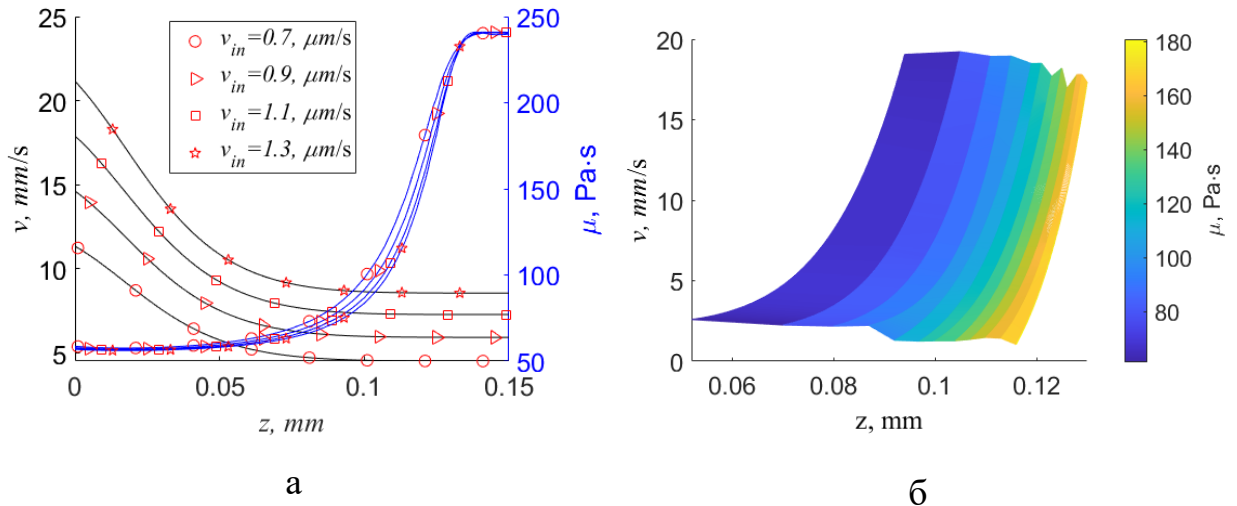


Рисунок 2.31 – Зависимости скорости и вязкости на оси симметрии пасты при различных значениях скорости подачи v_{in} (а) и карта вязкости на оси пасты при различных значениях ее скорости (б)

Из рисунка 2.31, а видно, что при уменьшении v_{in} оптимальное расстояние, на котором следует помещать подложку уменьшается, а диапазон расстояний от сопла, при котором печать будет стабильной, становится шире, в случае существенного увеличения v_{in} печать дорожек станет нестабильной. Также было отмечено, что с уменьшением v_{in} верхняя граница (по z) стабильной печати уменьшается (вязкость увеличивается), т.е. при слишком малой скорости подачи v_{in} расстояние между соплом и подложкой окажется слишком маленьким. На практике при печати это также создаст дополнительные трудности с выдерживанием малого расстояния между соплом и подложкой на всей ее площади. Рисунок 2.31 получен для фиксированных уровней вязкости, что позволяет получить расстояние, на котором необходимо поместить подложку при печати, чтобы вязкость пасты

имела конкретное значение. Из этого рисунка 2.31 видно, что с увеличением скорости пасты v (за счет увеличения скорости ее подачи v_{in}) изолинии вязкости имеют нелинейный вид относительно расстояния от сопла, причем в области высоких скоростей расстояние между этими линиями уменьшается.

2.2.3 Экспериментальное подтверждение результатов моделирования

Экспериментальное подтверждение полученных зависимостей проводилось на принтере Voltera V-One, который основан на поршневом принципе дозирования паст. Печать проводилась модифицированной пастой ПП-17. Согласно техническим условиям на пасты, спекание образцов проводится в две стадии: сушка при температуре 150 °С в течение 10 минут и спекание при 850 °С в течение 7 минут. Для оценки степени растекания модифицированной пасты была проведена печать дорожек при использовании сопла с внутренним диаметром 100 мкм.

Результат получаемых геометрических размеров при подобранных режимах (высота дозирования 0,1 мм, скорость 5 мм/с) Результат печати приведен на рисунке 2.32. Измерения ширины дорожек проводились на микроскопе МБС-10.

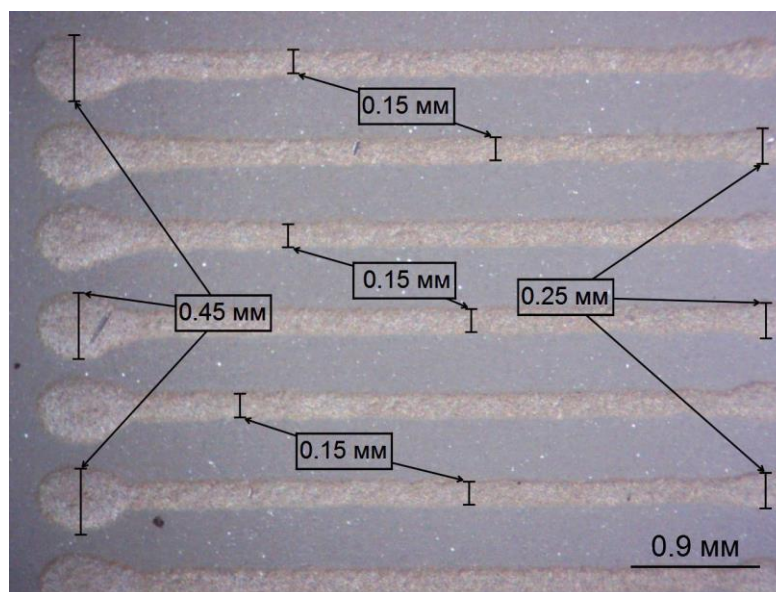


Рисунок 2.32 – Фотография напечатанных проводников

В результате проведенных измерений можно сделать вывод о том, что минимальная ширина проводника составляет 0,15 мкм. Однако, в начале и в конце каждой дорожки наблюдаются точки, причем точка в начале больше точки в конце. Наличие этих точек необходимо учитывать при проектировании топологии функционального устройства.

На рисунке 2.33 приведена микрофотография поверхности дорожек, которые были сделаны на электронном микроскопе СохетЕМ30+. Как видно из рисунка на поверхности наблюдаются поры.

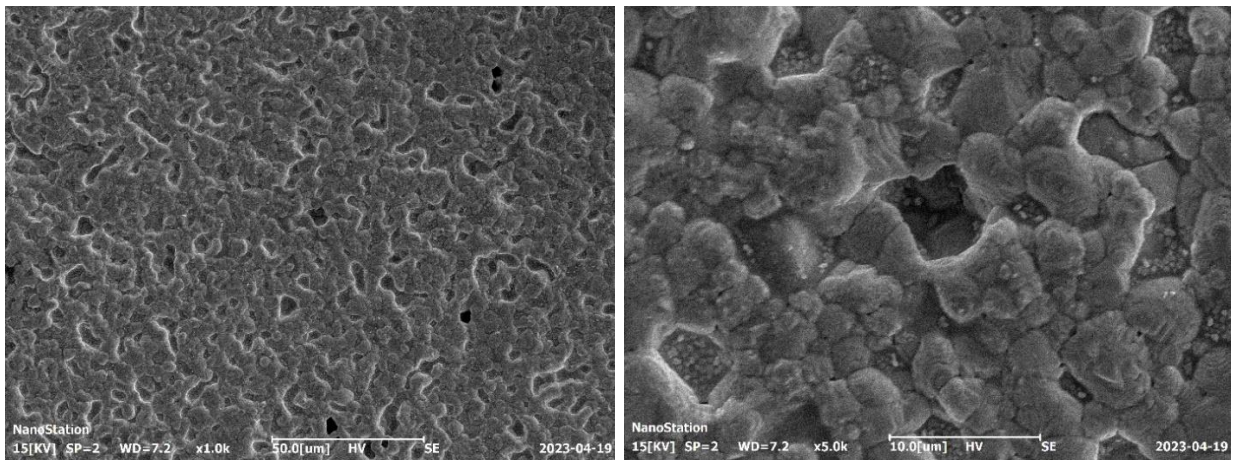


Рисунок 2.33 – Микрофотография поверхности

Измерения толщины и шероховатости напечатанных дорожек проводилось на профилометре Chotest Superview W1. Кривая контура шероховатости дорожек приведена на рисунке 2.34. Среднеарифметическое отклонение профиля Ra дорожек составляет 0,682 мкм, а высота неровностей $Rz = 4,479$ мкм.

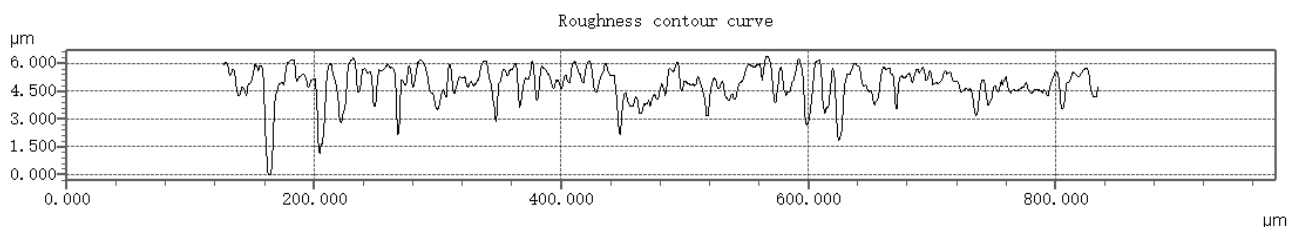


Рисунок 2.34 – Шероховатость поверхности проводника

Полученная профилограмма приведена на рисунке 2.35. Как видно из рисунка толщина дорожки составляет 20 мкм.

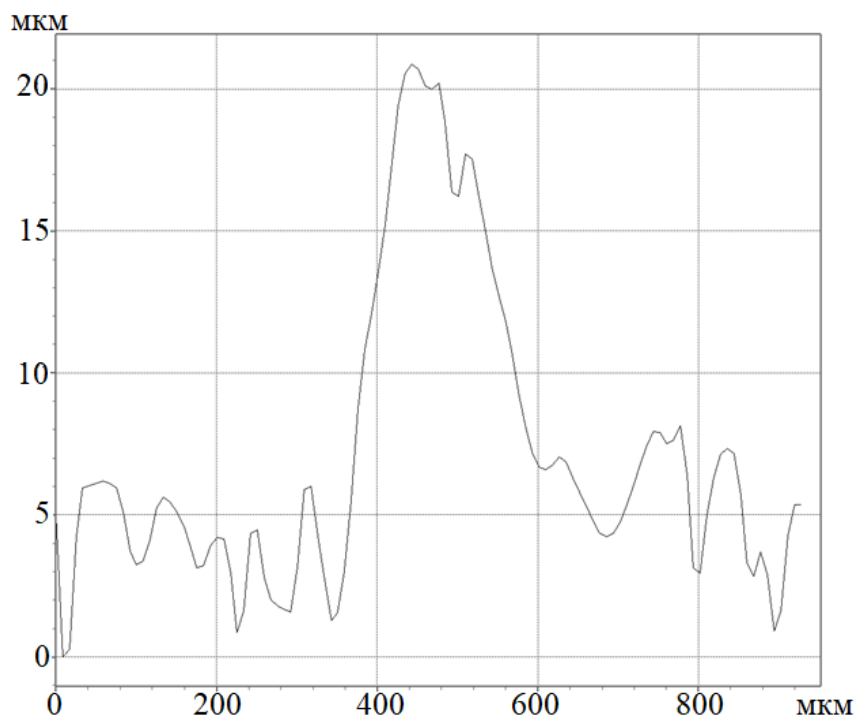


Рисунок 2.35 – Профилограмма проводника

2.3 Разработка и применение паст

Для изготовления компонентов и СВЧ-устройств применяются проводящие, диэлектрические, резистивные, ферритовые и др. пасты. Паста представляет собой суспензию порошка функционального материала и стеклофритты диспергированных в органической жидкости и/или растворе. Функциональный материал – это основа пасты, который наделяет пленки заданными электрическими свойствами. Постоянным компонентом пасты является стеклофритта, которая не испаряется в процессе сушки и вжигания. Добавление стеклофритты обуславливается формированием защитного слоя, объединяя частицы между собой тем самым упрочняя структуру. Стеклофритту также добавляют для увеличения адгезионной прочности толсто пленочного элемента с подложкой. Связующее и/или растворитель вводится для обеспечения заданного значения вязкости и однородности в процессе изготовления пасты. При отверждении материала связующее полностью удаляется из пленки.

Процесс получения паст приведен на рисунке 2.36.

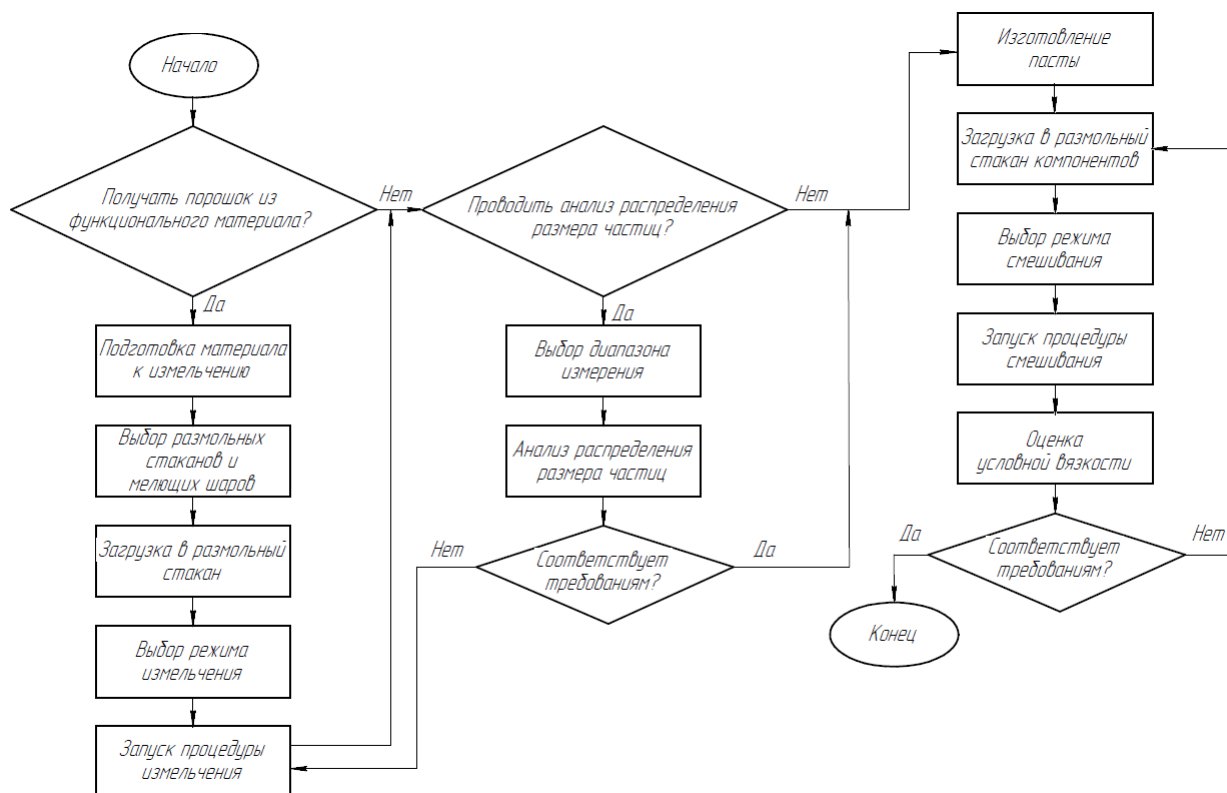


Рисунок 2.36 – Процесс изготовления паст

Первым этапом разработки паст является получение порошка функционального материала. Все способы получения порошков условно можно разделить на две группы: механические и физико-химические. К физико-химическим способам относятся следующие методы: восстановление, электролитический, карбонильный, а также специальные способы получения многокомпонентных порошков. Главной характеристикой механического способа является измельчение материала, которое осуществляется без изменения химического состава, в результате воздействия внешних сил. Механические способы, в свою очередь, делятся на две группы: измельчение в твердом состоянии и получение порошков из расплава материала.

Получение порошка проводилось методами дробления и истирания в планетарной шаровой мельнице PULVERISETTE 7 Premium Line. Для изготовления паст были проведены экспериментальные исследования по измельчению порошка легкоплавкого стекла, диоксида кремния и оксида алюминия. Получение порошка проводилось при скорости 850–1000 об/мин.

В результате была получена зависимость размера частиц порошка от длительности измельчения (рисунок 2.37).

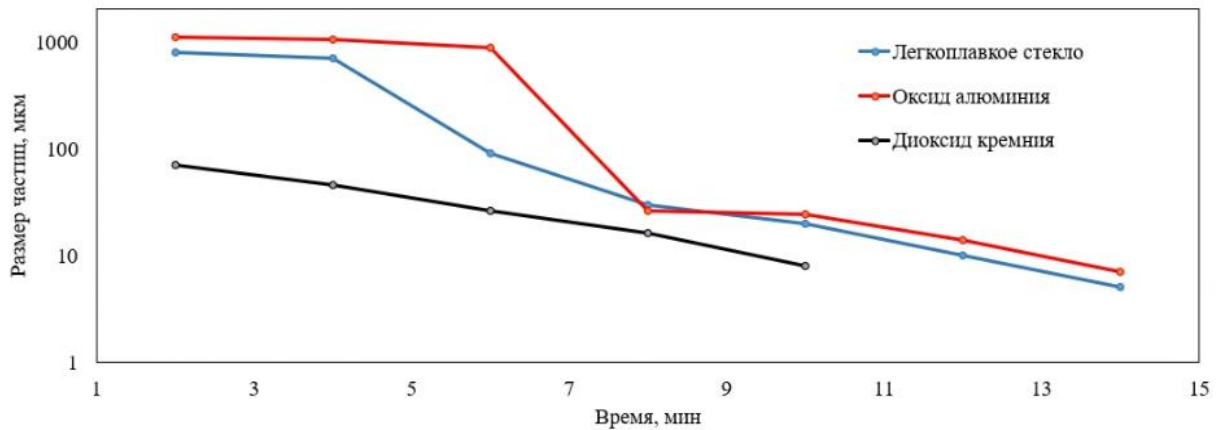


Рисунок 2.37 – Зависимость размера частиц порошка от времени измельчения

В связи с тем, что начальный размер порошка диоксида кремния был в десять раз меньше, чем порошок легкоплавкого стекла и оксида алюминия, то его измельчение произошло быстрее.

2.3.1 Изготовление диэлектрических паст

Для получения пасты необходимо использовать наполнитель и жидкую среду. Для отработки технологии приготовления пасты использовалось стекло и терпинеол. Для приготовления пасты использовался размольный стакан и шары из нержавеющей стали. Диаметр мелющих шаров равен 10 мм. При проведении первого эксперимента на дно стакана поместили шары, добавили порошок (15 мл) и терпинеол (15 мл). Время смешивания составляет 2 минуты при 500 оборотах. Паста получилась жидкой консистенции, которая не подходит под заявленные характеристики принтера. Паста с такой вязкостью будет вытекать из сопла, и растекаться на подложке. Также полученная паста не является однородной. Это может быть связано с тем, что при перемешивании использовались мелющие шары диаметром 10 мм. Таким образом, в дальнейшем необходимо использовать мелющие шары диаметром 5 мм.

При проведении второго эксперимента использовались мелющие шары 5 мм. Объем порошка из стекла составила 20 мл, а терпинеола 10 мл. Время перемешивания заняло 2 минуты при 500 оборотах. После чего в полученную пасту было добавлено 15 мл порошка. Время перемешивания также заняло 2 минуты при 500 об/мин. Однако полученная консистенция получилась слишком густой и возникла необходимость добавления 5 мл терпинеола. После добавления терпинеола пасту исследовали на вязкость. Результат оценки условной вязкости равен 24 мм. В результате всех проведенных итераций можно сделать вывод, что пропорция 35 мл к 15 мл является оптимальной для используемого принтера.

Далее проводились исследования диоксида кремния и органического связующего. В первом случае в состав входит порошок диоксида кремния (25 мл) и связка (раствор этилцеллюлозы в терпинеоле – 10 мл), а во втором случае порошок диоксида кремния (25 мл) и терпинеол (10 мл). Процесс смешивания занял две минуты при 1000 оборотах при использовании шаров 5 мм. После процесса получения пасты были проведены исследования на однородность пасты и оценка условной вязкости. Условная вязкость для пасты со связкой равна 27 мм, а для пасты с терпинелом 40 мм. Далее был запущен второй режим смешивания на две минуты при 1000 оборотах. Условная вязкость пасты со связкой равна 26,3, а пасты с терпинеолом равна 36,5 мм. Уменьшение условной вязкости предположительно связано с тем, что в процессе перемешивания пасты размольный стакан нагревается и органическое связующее испаряется.

При помощи принтера были напечатаны линии из полученной пасты. На рисунке 2.38 показаны напечатанные линии.



а



б

а – связка; б – терпинеол.

Рисунок 2.38 – Напечатанные линии

На рисунке 2.38 видно, что линии из пасты со связкой получились шире, предположительно это связано с тем, что растекаемость паст сильнее, чем у пасты с терпинеолом. Таким образом, в качестве органического связующего необходимо использовать связку.

Была изготовлена изоляционная паста, которая содержит в качестве основного функционального компонента легкоплавкое стекло С52-1. Характерной особенностью легкоплавкого стекла является высокая механическая прочность и термическая устойчивость. Наполнитель (35 мл) смешивался с органическим связующим на основе этилцеллюлозы и терпинеола (15 мл) в течение 60 минут при скорости 850 об/мин. В результате паста получилась с условной вязкостью 25 мм и однородной структурой. Для измерения адгезионной прочности пасты к керамической подложке были напечатаны квадраты 5х5 мм (рисунок 2.39). Сушка проводилась при $T = 200^{\circ}\text{C}$, t выдержки = 20 минут, вжигание при $T = 800^{\circ}\text{C}$, t выдержки = 15 минут.

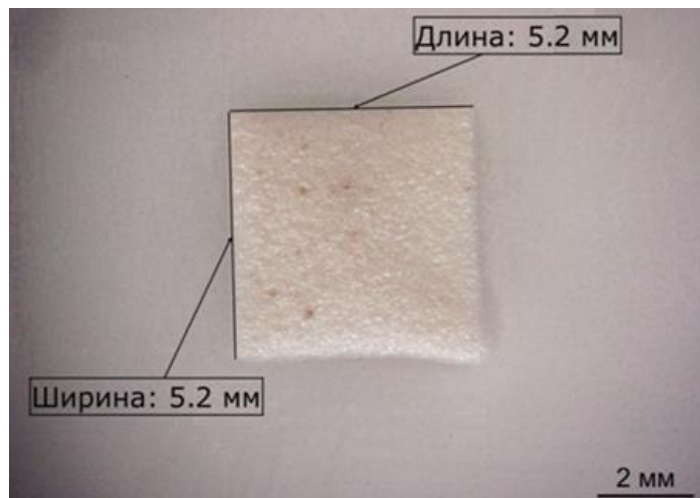


Рисунок 2.39 – Образец, напечатанный разработанной пастой для измерения адгезии

Измерение адгезии проводилось методом отрыва, результат составил 0,9 МПа. Для измерений использовался динамометр Мегеон – 03000D. Оценка диэлектрической проницаемости показала, что при таком соотношении компонентов значение равно 3,9 на частоте 2 МГц.

Для исследования тиксотропных свойств была изготовлена паста из легкоплавкого стекла С52-1 и технического углерода. Легкоплавкое стекло и

технический углерод равномерно перемешивали в планетарной микромельнице в течении двух минут при скорости 1000 об/мин.

В состав пасты входит: легкоплавкое стекло С52-1 (35 мл), технический углерод (10 мл) и органическое связующее (10 мл). Смешивание до однородной консистенции происходило в течении шести минут при 1000 об/мин. После смешивания было замечено, что паста получилось с большим значением вязкости. Было принято решение добавить пять мл связующего. Запустили режим смешивания в две минуты при 1000 об/мин. В результате получилась паста с большой вязкостью, добавили пять мл терпинеола. Запустили режим в две минуты при 1000 об/мин. После смешивания добавили еще пять мл связующего и запустили режим перемешивания. В результате смешивания паста получилась однородной. Результат печати после вжигания показан на рисунке 2.40.



Рисунок 2.40 – Напечатанные линии после вжигания

Однако были замечены отдельные частицы технического углерода и сделано предположение, что времени перемешивания пасты недостаточно. Оценка диэлектрической проницаемости показала, что при таком соотношении компонентов значение равно 3,4 на частоте 2 МГц.

Для диэлектрических паст основной характеристикой является диэлектрическая проницаемость. Для оценки диэлектрической проницаемости необходимо изготовить пасту с заданным значением. В качестве наполнителя используется оксид алюминия с диэлектрической проницаемостью 9,8.

Порошок оксида алюминия (37,5 мл) и стекла (3 мл) смешивался в течении пяти минут при 850 об/мин. После перемешивания наполнителя добавлялось органическое связующее (14,5 мл). Процесс получения пасты

составил 60 минут при 850 об/мин. На 32 минуте измельчения было замечено, что паста получается слишком вязкой и добавили 3 мл связующего.

Паста имеет условную вязкость 27 мм и однородную структуру. Для измерения адгезионной прочности к керамической подложке были напечатаны квадраты размером 5х5 мм (рисунок 2.41). Термопрофиль: спекание $T = 200^{\circ}\text{C}$, t выдержки = 20 минут; спекание $T = 800^{\circ}\text{C}$, t выдержки = 20 минут.

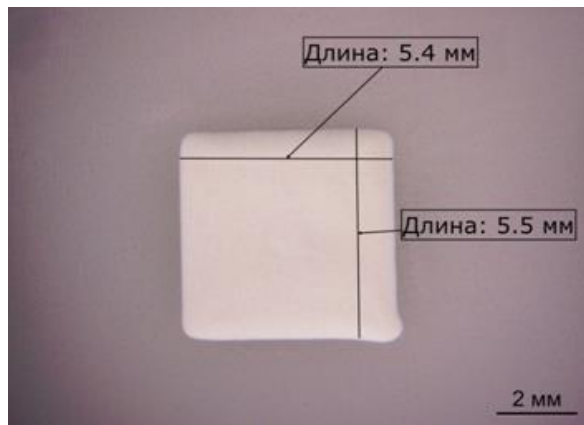


Рисунок 2.41 – Образец, напечатанный пастой из оксида алюминия

Результат измерения адгезии равен 1,3 МПа. Оценка диэлектрической проницаемости показала, что при таком соотношении компонентов значение равно 9,6 на частоте 2 МГц.

При изготовлении пасты из сегнетоэлектрика использовался титанат бария (BaTiO_3), оксид алюминия (Al_2O_3), легкоплавкое стекло С52-1 и органическое связующее (раствор этилцеллюлозы в терпинеоле). Соотношение компонентов показано в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Соотношение компонентов пасты

Компонент	Количество, мл
Титанат бария	25
Оксид алюминия	1
Легкоплавкое стекло	1
Органическое связующее	12

Для смешивания порошка титаната бария с оксидом алюминия и легкоплавким стеклом использовались размольный стакан и шары из нержавеющей стали. Время смешивания 10 минут при скорости 500 об/мин.

Такое значение скорости связано с тем, что в процессе перемешивания частицы титаната бария могут проагломерировать. После того, как порошок перемешался, добавили органическое связующее. Запустили режим смешивания: 10 минут при скорости 500 об/мин. После смешивания наблюдалась нехватка связующего, добавили 15 мл связки. Запустили цикл смешивания четыре минуты при скорости 500 об/мин. Вязкость пасты после смешивания также являлась неудовлетворительной, было принято решение добавить 10 мл связки и запустили повторный цикл смешивания. Итоговое количество связующего составило 37 мл. Режим смешивания после добавления связующего: 120 минут при скорости 500 об/мин.

Была проведена оценка полученной пасты на условную вязкость. Условная вязкость равна 26,5 мм. Для оценки пасты на адгезионную прочность к керамической подложке были напечатаны квадраты размером 5x5 мм (рисунок 2.42). Температурный режим задавался следующий: сушка 20 минут при температуре 200°C и спекание 15 минут при температуре 1000°C.

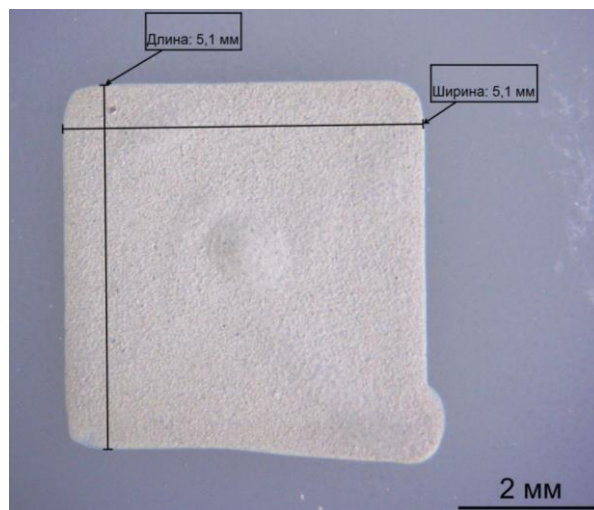


Рисунок 2.42 – Образец, напечатанный разработанной пастой из титаната бария

В результате измерения адгезионная прочность полученной пасты равна 3,4 МПа. Диэлектрическая проницаемость равна 284,6, а тангенс угла диэлектрических потерь $1 \cdot 10^{-4}$.

В таблице 2.7 приведена сводная таблица всех изготовленных паст и их характеристика.

Таблица 2.7 – Сводная таблица изготовленных паст

Наполнитель	Добавка	Связка	Соотношение компонентов, %	Время, мин	Скорость, об/мин	Термопрофиль	Условная вязкость, мм	Диэлектрическая проницаемость (2 МГц)	Адгезия к керамической подложке, МПа
Изоляционные пасты									
Стекло С52-1	–	ЭЦТ	70:30	60	850	200°С при 20 мин; 850°С при 15 мин.	25	3,9	0,9
Стекло С52-1	Технический углерод	ЭЦТ	50:15:35	12	1000	200°С при 30 мин; 800°С при 15 мин.	35	3,4	–
Функциональные пасты									
Оксид алюминия	Стекло С52-1	ЭЦТ	65:5:30	60	850	200°С при 20 мин; 800°С при 20 мин.	27	9,2	1,3
Титанат бария	Поликор ВК-100; Стекло С52-1	ЭЦТ	39:1,5:1,5:58	134	500	200°С при 20 мин; 1000°С при 20 мин.	26,5	284,6	3,4

2.4.1.1 Исследование зависимости диэлектрической проницаемости от вязкости пасты

Для нахождения зависимости диэлектрической проницаемости от условной вязкости было изготовлено пять образцов с разным процентным соотношением функционально материала и органического связующего. В таблице 2.8 приведено процентное соотношение компонентов пасты.

Таблица 2.8 – Процентный состав пасты

№ пасты	Функциональный материал (оксид алюминия), %	Органическое связующее, %
1	80	20
2	75	25
3	70	30
4	65	35
5	60	40

Режим смешивания пяти образцов: 30 минут при скорости 1000 об/мин.

Результат оценки условной вязкости показан на рисунке 2.43.

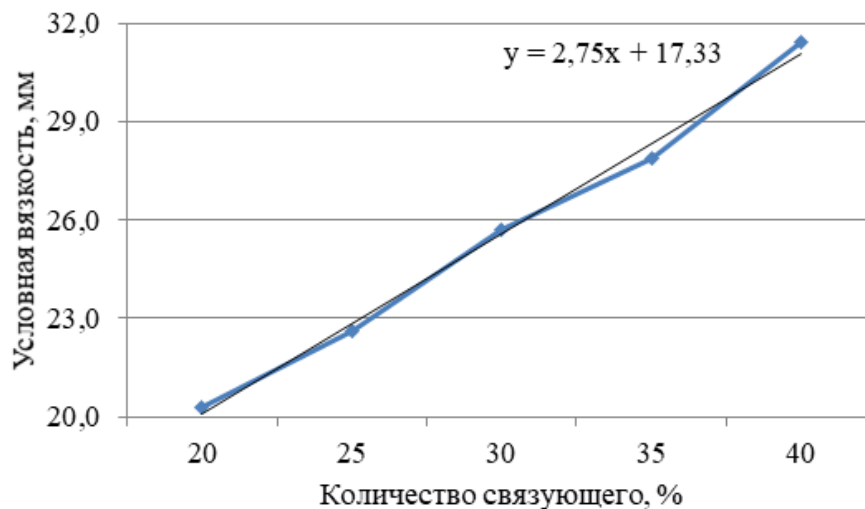


Рисунок 2.43 – Зависимость условной вязкости от процентного содержания связующего

Как видно из рисунка 2.43, чем больше связующего и меньше функционального материала, тем меньше условная вязкость. Для оценки диэлектрической проницаемости были напечатаны конденсаторы (рисунок 2.44). Температурный режим задавался следующий: время спекания 30 минут при температуре 200°C.

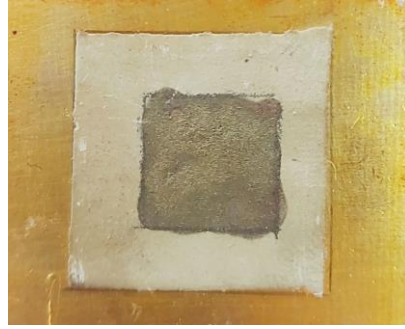


Рисунок 2.44 – Конденсатор из разработанной пасты на основе оксида алюминия
Результат расчета диэлектрической проницаемости показан на рисунке 2.45.

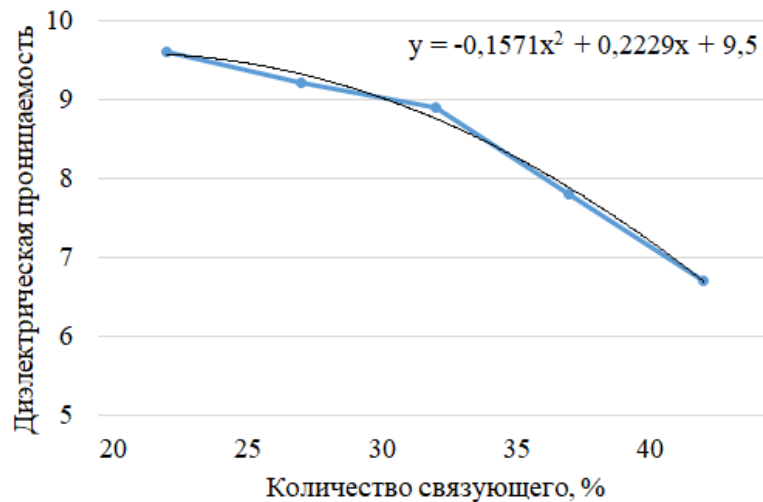


Рисунок 2.45 – Зависимость диэлектрической проницаемости от процентного содержания связующего вещества

В результате оценки диэлектрической проницаемости можно сделать вывод что, изменяя процентное содержание органического связующего в составе пасты можно варьировать диэлектрическую проницаемость.

Были проведены экспериментальные исследования оптических свойств полученной пасты и радиационной стойкости. Полученные результаты опубликованы в работах [72–85].

2.3.2 Разработка ферритовой пасты

Для исследования возможности изготовления СВЧ-устройств использовался порошок литий-цинкового феррита $\text{Li}_{0.4}\text{Fe}_{2.4}\text{Zn}_{0.2}\text{O}_4$. Исходя из ранее полученных результатов, было определено, что процентное соотношение компонентов не

должно превышать 80% масс порошка. Также было проведено комплексное исследование свойств замещенной никелевой шпинели, полученной по короткой технологической схеме [86].

Перед смешиванием пасты проводился анализ распределения размера частиц порошка при помощи лазерного анализатора Analysette 22 Nano Tec (Германия). На рисунке 2.46 показаны распределения в интегральной и дифференциальной форме. Модели распределения сформированы на основе трех независимых измерений для каждой выборки (каждая итерация показана своим цветом).

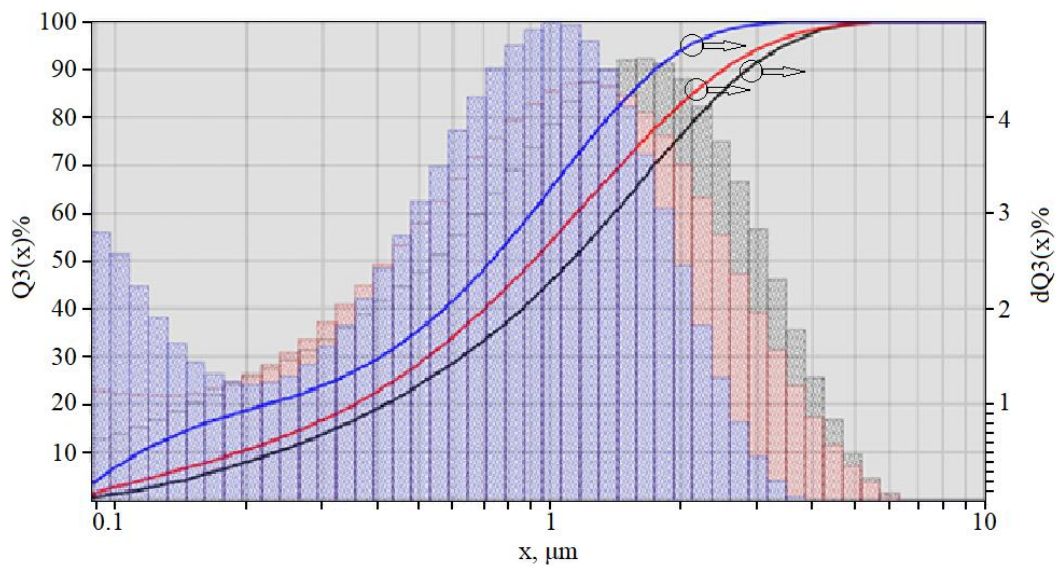


Рисунок 2.46 – Распределение размера частиц порошка литий-цинкового феррита в зависимости от объема (Q3)

Как видно из рисунка 2.46 средний размер частиц порошка составляет 1–3 мкм. Далее было получено семь образцов с различными низкотемпературными связующими и их комбинациями. Пропорции смешивания компонентов и их процентное соотношение представлены в таблице 2.9. Поскольку плотность и вязкость связующих разная, то процентное соотношения составов различны.

Таблица 2.9 – Пропорции смешивания компонентов пасты

Состав	Обр. №1	Обр. №2	Обр. №3	Обр. №4	Обр. №5	Обр. №6	Обр. №7
Порошок, г	11	7	7,1	8,1	6	5	5
Терпинеол, г	-	3,9	1	2,9	-	-	-
Этиленгликоль, г	2,55	-	-	-	-	-	-
Этилацетат, г	1,2	-	-	-	-	-	0,4
Глицерин, г	-	0,3	-	-	-	0,4	0,4

ПЭГ-400, г	-	-	2,2	-	2,1	2,1	1,7
Вязкость, мм	19±1	19±1	24±1	23±1	24±1	26±1	23±1

Для оценки полученных паст были проведены экспериментальные исследования качества экструзии и анализ получаемой поверхности пленок (рисунок .47). При экструзии паст важными настраиваемыми параметрами является скорость и начальное прикладываемое давление к пасте (kick), т.е. расстояние, на которое поршень опустится в первоначальный момент. В принтере Voltera V-One параметр kick создается поршнем. Диапазон настройки параметра kick составил 0,05–0,3 мм. Скорость экструзии варьировалась в диапазоне 100–300 мм/мин. Были напечатаны образцы и в результате наилучшее качество нанесения показали образец № 3 и образец №5.



Рисунок 2.47 – Экспериментальное определение режима печати, разработанной ферритовой пастой

Фотографии полученных образцов после сушки показаны на рисунке 2.48.

Сушка образцов проводилась в два этапа:

- 1) в инфракрасной печи при температуре 100 °С в течение 16 минут;
- 2) в муфельной печи при температуре 230 °С в течение 15 минут.



(а)



(б)

Рисунок 2.48 – Полученные образцы из паст № 3 (а) и № 5 (б)

Дефекты на поверхности начинают проявляться на этапе сушки и поэтому анализ поверхности проводился на образцах после проведения сушки [87]. Как видно из рисунка 2.48, а напечатанные образцы имеют трещины. На поверхности образцов, напечатанные пастой №5 (рисунок 2.48, б), наблюдаются поры, но трещины отсутствуют. На рисунке 2.49 представлены результаты электронной микроскопии. В таблице 2.10 приведены средние значения размеров пор для каждого образца, изготовленных из порошка литий-цинкового феррита.

Таблица 2.10 – Средние значения размера пор для образцов из порошка литий-цинкового феррита

Номер образца	Связующие вещества, входящие в изготовленных образцов	Среднее значение размера пор, мкм
1	этиленгликоль, этилацетат	1,52
2	терпинеол, глицерин	2,48
3	терпинеол, ПЭГ-400	1,78
4	терпинеол	1,28
5	ПЭГ-400	2,02
6	ПЭГ-400, глицерин	1,76
7	ПЭГ-400, этилацетат, глицерин	1,34

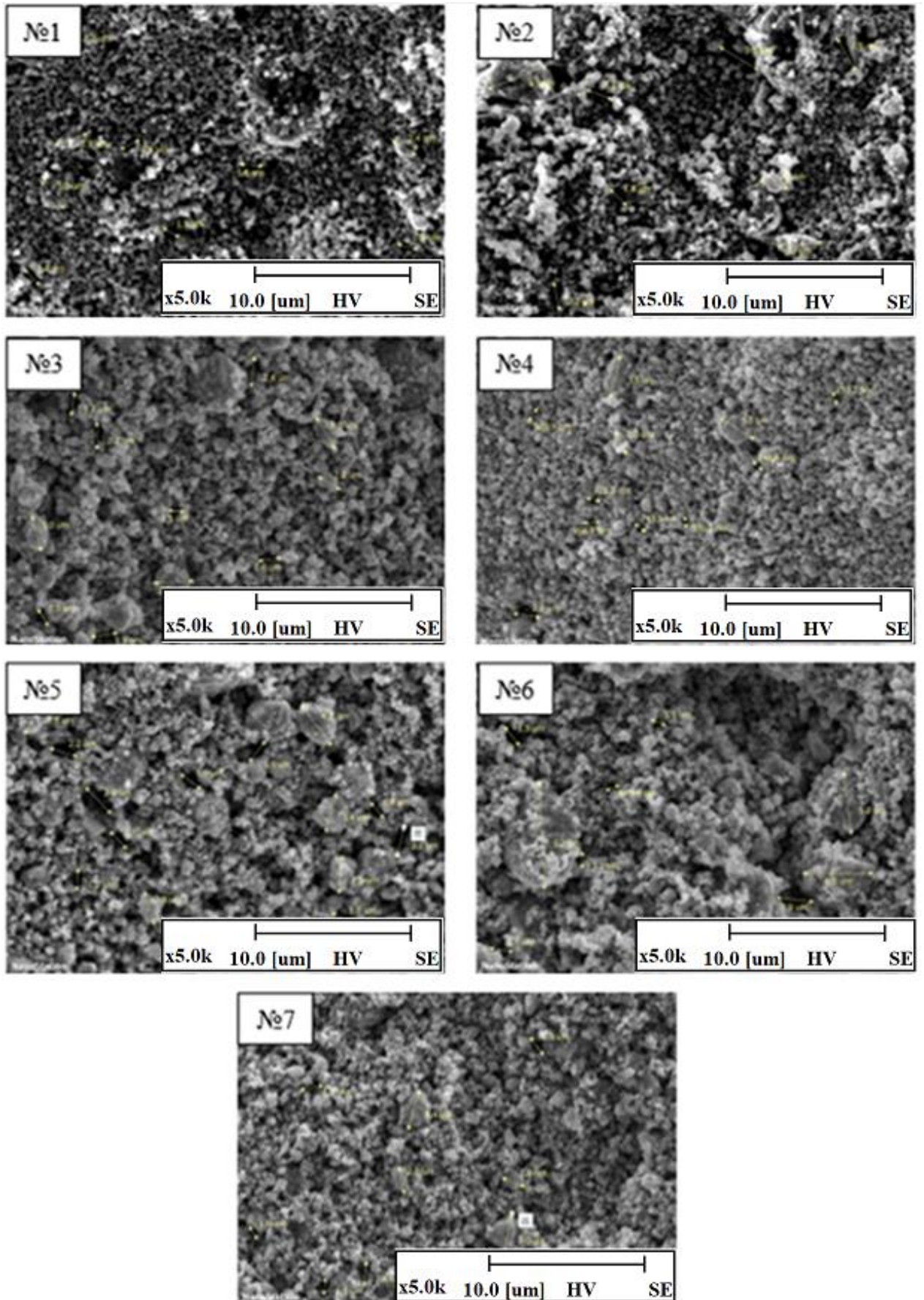


Рисунок 2.49 – Фотографии поверхности напечатанных образцов полученными пастами

Как видно из рисунка 2.49 на поверхности напечатанных образцов имеются поры и неоднородности. Самой равномерной поверхностью обладает образец №4. Исходя из измеренной пористости образцов, можно выделить образец на основе порошка литий-цинкового феррита и терпинеола (образец №4). Он обладает порами наименьшего размера.

Далее были проведены экспериментальные исследования подбора режимов сушки. Исследование режимов сушки является необходимым так как:

– режим сушки может значительно повлиять на структуру образцов, например, прочность и твердость;

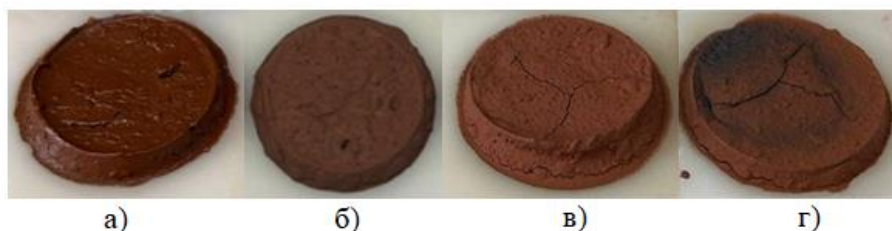
– правильно подобранные условия могут минимизировать образование дефектов, таких как трещины и поры.

В качестве объекта исследования использовался образец №4. Данная паста была выбрана поскольку обеспечивает оптимальную пористость поверхности и наилучшее качество экструзии. В таблице 2.11 приведены температурные режимы сушки.

Таблица 2.11 – Экспериментальные режимы сушки

Номер режима	Температура, °С	Время роста температуры, мин	Время выдержки при температуре, мин
1	200	13	15
2	230	15	15
3	250	16	15
4	270	18	15

На рисунке 2.50 показаны фотографии образцов после спекания.



а) режим № 1 (200 °С); б) режим № 2 (230 °С); в) режим № 3 (250 °С); г) режим № 4 (270 °С)

Рисунок 2.50 – Результаты спекания образцов из ферритовой пасты

В результате спекания при режиме № 1 температуры было недостаточно, и сушка образца не произошла, при режиме № 2 образец не имел трещин и обладал плотной структурой. На образце, сушка которого проводилась при режиме № 3

появились трещины. По образцу, высушенному на режиме № 4 видно, что в момент сушки начался процесс спекания образца.

На рисунке 2.51 представлены результаты измерения пористости образцов из ферритовой пасты на основе порошка литий-цинкового феррита, терпинеола и ПЭГ-400.

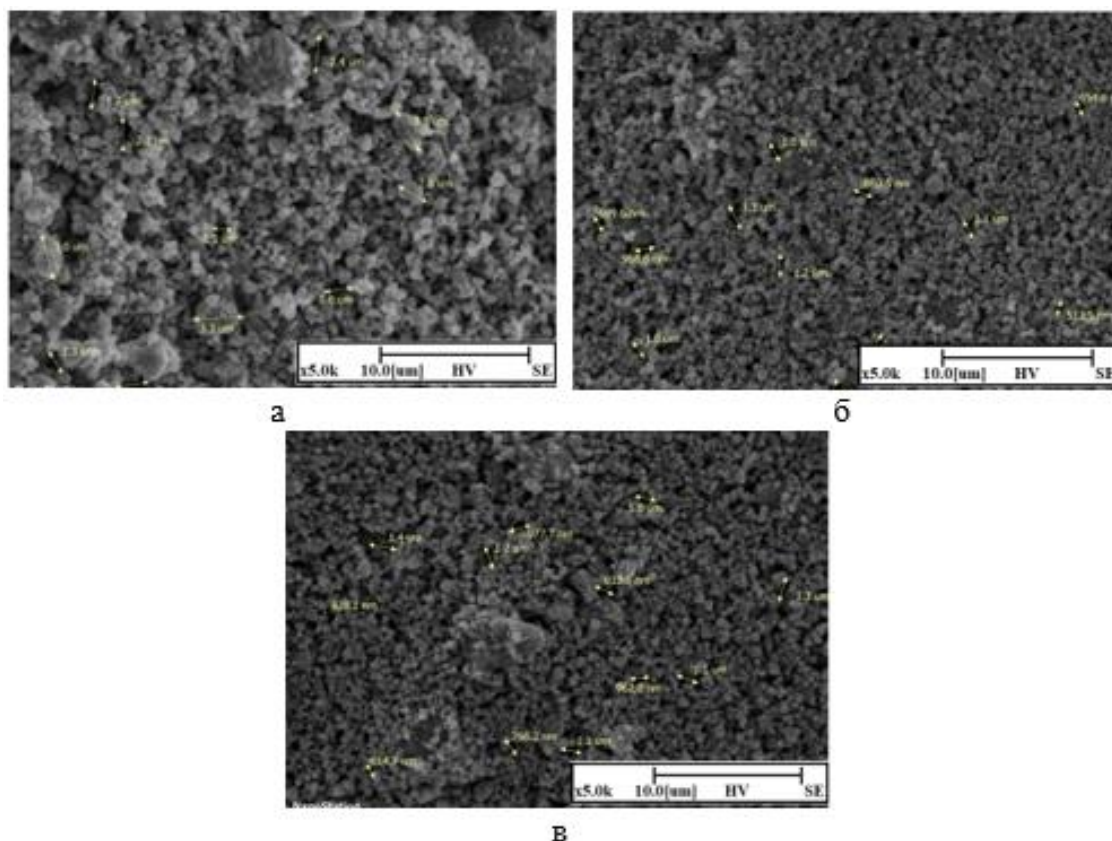


Рисунок 2.51 – Электронная микроскопия образцов после сушки при 230 °С (а); 250°С (б), 270 °С (в)

В таблице 2.12 приведены средние значения размера пор для каждого образца, изготовленного из порошка литий-цинкового феррита.

Таблица 2.12 – Средние значения размера пор образцов после сушки при разных режимах

Номер образца	Температура сушки, °С	Среднее значение размера пор, мкм
1	200	-
2	230	1,78
3	250	0,99
4	270	0,96

Приведена фотография поверхности феррита после спекания при 1100 °С в течение 6 часов (рисунок 2.52).

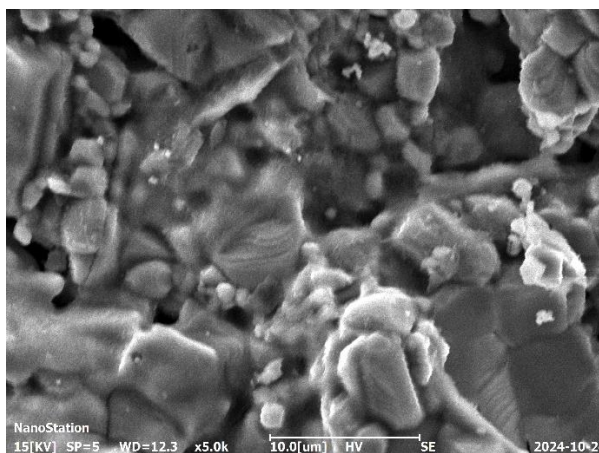


Рисунок 2.52 – Электронная микроскопия образца после спекания

2.4 Разработка рекомендаций по совершенствованию аддитивной принтерной технологии

На основании проведенных расчетов и экспериментальных исследований были выявлены существующие технологические ограничения изготовления компонентов и СВЧ-устройств с применением аддитивной принтерной технологии. В работе рассмотрены ключевые факторы, влияющие на качество печати. На основании полученных результатов сформулированы рекомендации по совершенствованию данной технологии, которые позволят разработать технологическое оборудование с учетом особенностей процесса экструзии вязких паст. При этом можно выделить несколько направлений оптимизации процесса, которые приводят к повышению качества печати.

Одним из таких направлений является оптимизация состава паст. В работе определены соотношения составов различных связующих веществ и функционального порошка, обеспечивающие вязкость, приемлемую для непрерывной равномерной экструзии. При этом продолжение исследований может привести к разработке новых формул проводниковых паст, которые обеспечивают более высокую проводимость, лучшую адгезию к подложке и устойчивость к

внешним воздействиям. Кроме того, предложенные соотношения связующего, могут быть использованы для разработки функциональных паст на основе диэлектрических, сегнетоэлектрических и ферритовых материалов.

Альтернативным направлением развития технологии является разработка технических средств, адаптированных под существующие материалы с учетом их вязкости, дисперсности, способа спекания (полимеризации) и т.д. В работе также рассмотрены и выявлены параметры, которые следует учитывать при технической реализации дозатора вязких паст.

2.4.1 Параметры материалов

Вязкость пасты. При выборе между жидкими чернилами и вязкими пастами для аддитивной печати проводниковых материалов важно учитывать несколько факторов, включая назначение, характеристики материала и требования к конечному продукту. Чернила с низкой вязкостью, используемые, как правило, в системах струйной печати лучше подходят для печати тонких пленок (менее 5 мкм), так как они могут обеспечить более высокую точность и разрешение. При этом поверхность, на которую производится печать должна быть как можно более гладкая (требуется полировка поверхности).

Вязкие пасты лучше подходят для печати более толстых слоев, что может быть необходимо для создания устройств с требованиями высокой прочности и устойчивости к механическим воздействиям. Вязкие пасты могут быть более подходящими для создания многослойных структур, где требуется хорошая адгезия между слоями. А также вязкие пасты могут лучше удерживаться на неровных или сложных поверхностях, обеспечивая хорошую адгезию и равномерное распределение материала.

На основании полученных в работе расчетно-экспериментальные результаты рекомендуется использовать пасты с динамической вязкостью 50–100 Па·с, что соответствует условной вязкости 25–29 мм.

Дисперсность и форма частиц порошка наполнителя пасты. Некоторые свойства пасты, такие как вязкость, текучесть и т.д. зависят от структуры порошка. Минимальный диаметр сопла дозатора ограничен возможностями технологии его изготовления. Так для поршневых и шнековых дозаторов используются сопла с диаметром свыше 70 мкм. Для обеспечения равномерной экструзии пасты без засорения сопла следует учитывать соотношение размера частиц порошка более 1:10 к диаметру сопла. При этом свойства связующего вещества должны обеспечивать возможность равномерного распределения порошка в объеме пасты без выпадения в осадок. В противном случае система дозирования пасты должна предусматривать возможность перемешивания и гомогенизации состава.

Прямое нанесение пасты на подложку по цифровой модели без использования физических трафаретов существенно упрощает процесс изготовления толсто пленочных устройств. Однако недостатком такого метода нанесения является неравномерность поверхности пленки и пористость. В трафаретной технологии данные дефекты проявляются в меньшей степени, т.к. присутствует механическое влияние движения ракеля при нанесении пасты. Снижение пористости полученных пленок обеспечит улучшение характеристик наносимых материалов, например, обеспечит повышение электропроводности проводниковых паст, повышение электрической прочности диэлектрических паст и т.д. Для достижения этих целей одним из возможных решений является использование наполнителя паст с чешуйчатой формой порошка.

2.4.2 Параметры технологического оборудования

Диаметр сопла. При создании топологического рисунка возникают задачи нанесения как одиночных линий, так и полигонов различной площади. При изготовлении одиночных линий представляет интерес не только обеспечение минимальной ширины проводника, но и в зависимости от задач требуется изготавливать проводники различной ширины. В отличие от субтрактивной технологии в данном случае изготовление произвольной ширины проводника

становится нетривиальной задачей. Простым способом изменения ширины проводника является использование сопла с нужным диаметром. На практике для использования доступны сопла с дискретным шагом изменения диаметра. Поэтому при проектировании топологии будущего устройства следует учитывать номенклатуру доступных на рынке вариантов сопел. Так в работе рассматриваются сопла с креплением типа Luer Lock, обеспечивающих возможность работы с большим давлением. На рынке сопла данного вида представлены с диаметром 50, 100, 150 мкм и т.д. Учитывая дисперсность существующих паст для трафаретной печати с размером частиц порошка до 10 мкм, следует выбирать сопло с диаметром от 100 мкм.

При использовании сопла с фиксированным размером диаметра, например, 100 мкм не представляется возможным за один проход изготовить проводник не кратный этому диаметру, например, 130 или 140 мкм. Это ограничение также следует учитывать при проектировании топологии.

Создание полигонов с использованием сопла малого диаметра требует многократного прохода дозатора по траектории, обеспечивающей заполнение всей площади полигона. При этом немаловажным становится вопрос с точки зрения алгоритма построения траектории в части расчета межосевого расстояния соседних проводников – должны ли они соединяться или накладываться друг на друга. Если накладываться, то насколько должно выдерживаться перекрытие.

По результатам проведенных исследований рекомендуется для обеспечения наиболее равномерной заливки полигона использовать перекрытие соседних линий на 50%. Аналогичный подход может быть использован для получения ширины проводников некратной диаметру сопла. При этом варьируя степень перекрытия можно настраивать более мелкий шаг увеличения ширины проводника. Однако при этом необходимо компенсировать объем пасты на единицу длины за счет изменения скорости перемещения дозатора и давления.

Давление (Скорость потока). Критически важным параметром для обеспечения равномерности ширины проводника в поперечном сечении является равномерная экструзия пасты. При снижении давления в дозаторе наблюдается

появление отдельных капель вместо непрерывного потока пасты. Это приводит к уменьшению ширины проводника и к появлению разрывов линии. Увеличение давления приводит к экструзии большого объема пасты в единицу времени, что приводит к увеличению ширины проводника. Для компенсации давления можно было бы задействовать изменение скорости перемещения дозатора, что повышает сложность технической реализации устройства дозирования. Для обеспечения равномерной непрерывной экструзии пасты следует осуществлять контроль давления в дозаторе. Наличие датчика давления позволит регулировать скорость подачи пасты.

При проведении расчетов и экспериментальных исследований было показано, что в момент начала экструзии необходимо создать избыточно давление, чтобы преодолеть силы поверхностного натяжения формируемой капли на выходе сопла. После этого давление в дозаторе снижается и именно его следует поддерживать в стационарном состоянии. Избыточное давление создает появление дефекта в виде растекания капли вначале печати. Одним из способов устранения данного дефекта предлагается реализовать технологическую зону для запуска печати с быстрым продолжением печати в зоне создания топологии. Аналогичный дефект проявляется в конце печати, когда сказывается инерционность системы при уменьшении давления. Для устранения растекания капли по окончании печати элемента рекомендуется использовать реверсивное движение пасты, т.е. разрежение давления в дозаторе в момент, когда расстояние до точки окончания печати составляет не менее трех диаметров сопла.

Скорость перемещения дозатора. Данный параметр может использоваться в качестве ключевого инструмента настройки технологических режимов, т.к. учитывает вязкость пасты, диаметр сопла, скорость потока и требуемую ширину проводника. В работе данный параметр определен при условии фиксации перечисленных параметров в некотором оптимальном значении или диапазоне. Для рассматриваемой технологической установки рекомендуется использовать скорость перемещения экструдера на уровне 300-500 мм/мин.

Зазор между соплом и поверхностью подложки. Для формирования равномерных и непрерывных топологических элементов необходимо постоянно выдерживать определенное расстояние между соплом и подложкой. Если расстояние слишком большое, то на кончике сопла образуются капли, которые неравномерно ложатся на подложку. При этом паста тонко дозируется и по форме не совпадает с движением сопла. Если сопло расположено очень низко, то возникают следующие трудности:

- ломается кончик сопла;
- повреждается подложка;
- рисунок растекается и получается размазанным.

Экспериментальные исследования показали, что оптимальный зазор между соплом и подложкой составляет 0,1 мм.

Дополнительные технические функции, способствующие повышению качества печати:

1. Контроль поверхности подложки для построения карты поверхности путем анализа поверхности на шероховатость и прямолинейность. Данный параметр важен для поддержания зазора между соплом и подложкой.

2. Термостатирование пасты в дозаторе и на подложке. Для контроля печати и растекания пасты необходимо поддерживать температуру. Также наличие термостатирования позволяет изменять вязкость пасты в дозаторе, т.к. увеличение температуры приводит к снижению вязкости.

3. Наличие N-дозаторов в системе для изготовления многослойных структур. Данная функция позволит в одном технологическом цикле изготовить многослойную печатную плату, так и устройство с различными материалами в структуре.

4. Техническое зрение. Данная функция необходима для позиционирования цифрового файла с топологией и для контроля напечатанных элементов.

5. Очистка сопла. В процессе печати частой проблемой выступает засорение сопла и для его очистки необходимо остановить печать и вручную

прочистить сопло. Наличие системы очистки сопла позволит автоматизировать данный процесс.

б. Датчик давления в дозаторе. Данная функция необходима для поддержания давления в процессе печати, а также с целью устранения возможных дефектов в начале и в конце топологического элемента.

С учетом предложенных рекомендаций коллективом лаборатории печатной электроники был разработан опытный образец принтера, обеспечивающий возможность изготовления одно-, двух- и многослойных печатных плат, гибридных интегральных схем, содержащих планарные компоненты (катушки индуктивности, резисторы, конденсаторы).

Модуль прецизионного дозирования является ключевым устройством принтера для изготовления технологической установки, поскольку он используется для нанесения по цифровой модели паст на подложку с требуемой точностью [88 – 90].

Преимуществом двухэкструдерного модуля дозирования является отсутствие необходимости обслуживания, настройки и калибровки дозаторов после нанесения каждого слоя. Нет необходимости в замене проводниковой пасты на диэлектрическую и наоборот, так как каждый дозатор предназначен для конкретного функционального материала, поэтому они могут быть заправлены одновременно.

Принцип работы разрабатываемого модуля дозирования материалов представлен на рисунке 2.53. Подразумевается модульное исполнение, при котором все составляющие компонуются в единой несущей конструкции и могут быть взаимозаменяемы, однако изготавливаются в качестве самостоятельных единиц. Вращение механизмов дозирования осуществляется посредством шаговых двигателей. Стрелками показаны направления движения проводниковой и диэлектрической паст по каналам. Поршневой механизм в системе используется как для самостоятельного дозирования пасты, так и для подачи материала в шнековый дозатор, откуда он более прецизионно наносится через сопло на подложку печатной платы.

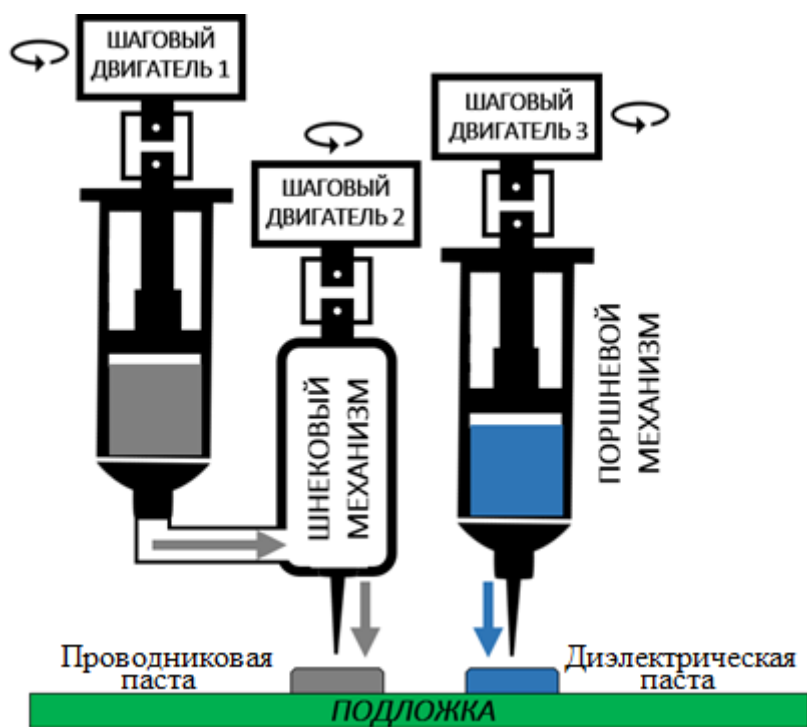


Рисунок 2.53 – Концепт разрабатываемого модуля дозирования материалов

Внешний вид разработанного макета технологической установки представлен на рисунке 2.54.

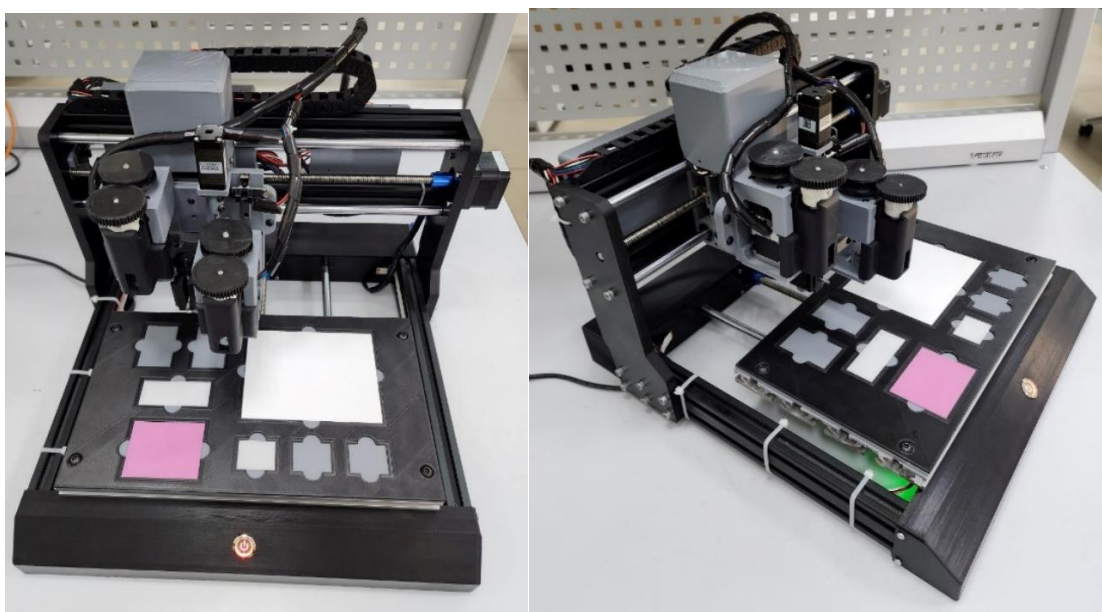


Рисунок 2.54 – Макет технологической установки

По данной разработанному макету получены свидетельства регистрации программы ЭВМ на программное обеспечение APCB PRINTER V. 2.1.1 [91].

2.5 Выводы

В результате выполнения численного моделирования, а также по результатам экспериментальных исследований определено, что при проектировании микрополосковой линии с требуемым характеристическим сопротивлением следует учитывать растекаемость паст на 50 мкм относительно диаметра используемого сопла.

С использованием уравнения Навье-Стокса для двухфазной среды описана математическая модель процесса экструзии паст, которая позволила определить граничные условия применения аддитивной принтерной технологии для изготовления полосковых проводников с достаточной однородностью геометрической формы при создании СВЧ-устройств.

Получены составы диэлектрических паст, вязкость которых адаптирована для использования в аддитивной принтерной технологии изготовления компонентов и СВЧ-устройств.

Сформулированы рекомендации по разработке технологического оборудования и технологии аддитивной принтерной печати.

3 Конструкции и характеристики компонентов и полосковых устройств

В данном разделе представлены исследования компонентов и полосковых устройств, изготовленных по аддитивной принтерной технологии. В основе содержания раздела положены результаты, опубликованные в работах [65, 92–94].

Основная цель помещенных здесь материалов – продемонстрировать возможности применения аддитивной принтерной технологии для изготовления функциональных устройств.

3.1 Фильтры

Полученные значения затухания (см. раздел 2.1) были применены при расчете микрополосковых фильтров. Микрополосковые фильтры представляют собой систему взаимодействующих резонаторов, каждый из которых, в свою очередь, представляет собой отрезок полосковой или микрополосковой линии [95]. Наибольшее применение нашли открытые (неэкранированные) микрополосковые резонаторы. Для изготовления фильтров была выбрана паста ППС-2-2, которая обладает наименьшими потерями.

Были проведены расчеты фильтров разного назначения – фильтр нижних частот (ФНЧ), фильтр верхних частот (ФВЧ) и полосно-пропускающий фильтр (ППФ).

В задаче моделирования использовалась среда AWR Design Environment. С помощью утилиты iFilter был произведен расчет фильтров. В диалоговом окне Design Options были заданы параметры подложки, минимальная ширина проводников и затухание в линии передачи.

На рисунке 3.1 показан напечатанный микрополосковый ФНЧ со ступенчатым импедансом.

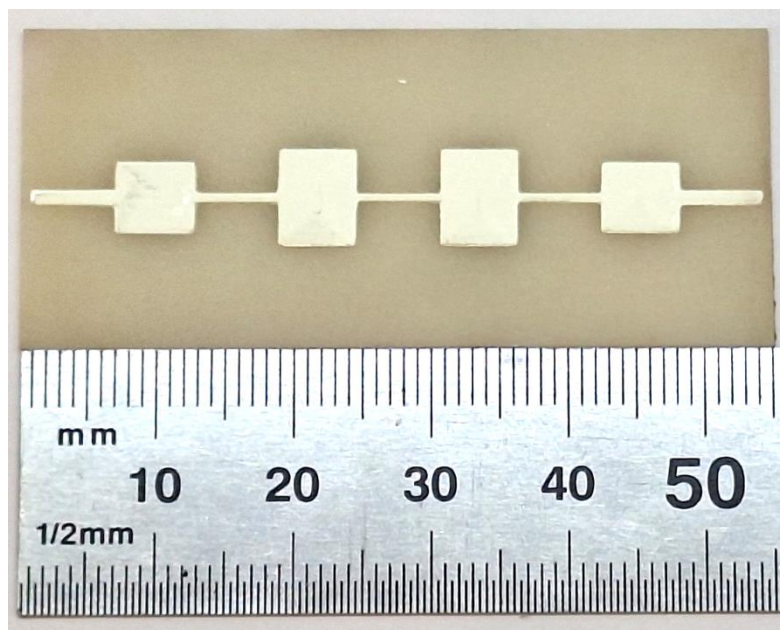


Рисунок 3.1 – Напечатанный фильтр нижних частот

На рисунке 3.2 показана частотная зависимость модели ФНЧ и напечатанного фильтра. Измерение частотных характеристик проводилось с помощью векторного анализатора Planar S-5048.

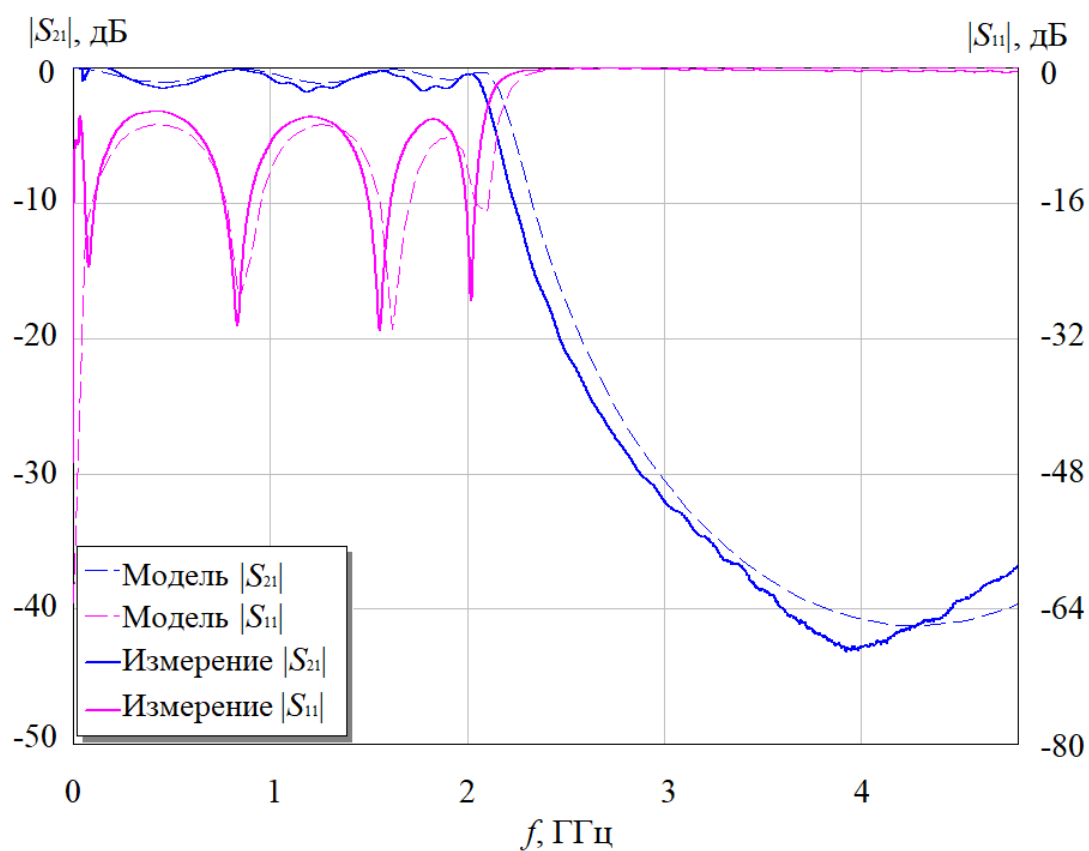


Рисунок 3.2 – Сравнение частотных характеристик модели и напечатанного фильтра

Как видно из рисунка 3.2 результаты измерения оказались схожи с результатами моделирования. Минимальные потери в полосе пропускания составляют около 1,5 дБ. Однако наблюдается незначительное смещение по частоте. Предположительно это может быть связано с изменением геометрических размеров при печати за счет растекания пасты. Для подтверждения данного заключения были проведены измерения ширины резонансных элементов топологического рисунка. В результате ширина изменилась на 0,1 мм. Полученные значения были внесены в модель и результат скорректированной модели приведен на рисунке 3.3.

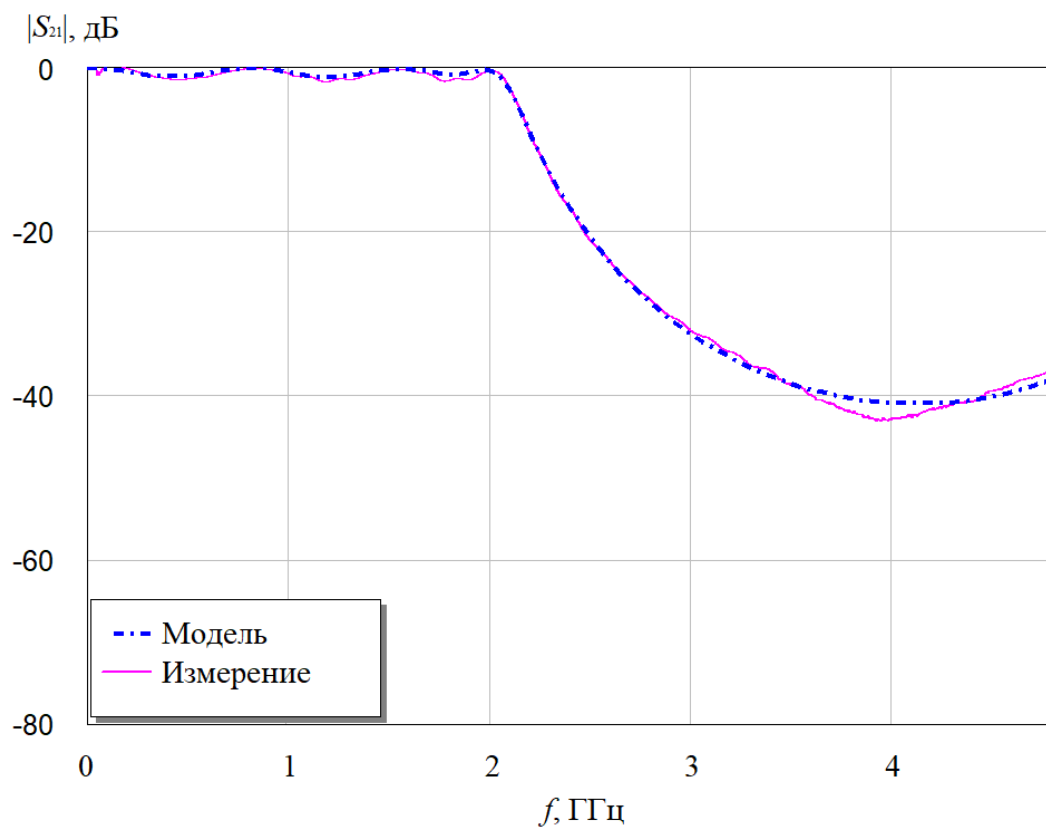


Рисунок 3.3 – Частотная зависимость модуля коэффициента передачи скорректированной модели и напечатанного фильтра

После корректировки геометрических размеров модели частотная зависимость совпала с измерениями ФНЧ.

Далее был изготовлен ФВЧ в микрополосковом исполнении, выполненный в виде резонансных элементов, на концах которых предусмотрены переходные отверстия на заземляющее основание (рисунок 3.4). Для упрощения технологии изготовления и для получения ФВЧ в одном технологическом цикле было принято

решение исключить переходные отверстия, а связь между резонаторами и заземляющим основанием обеспечить путем нанесения пасты на торце подложки.

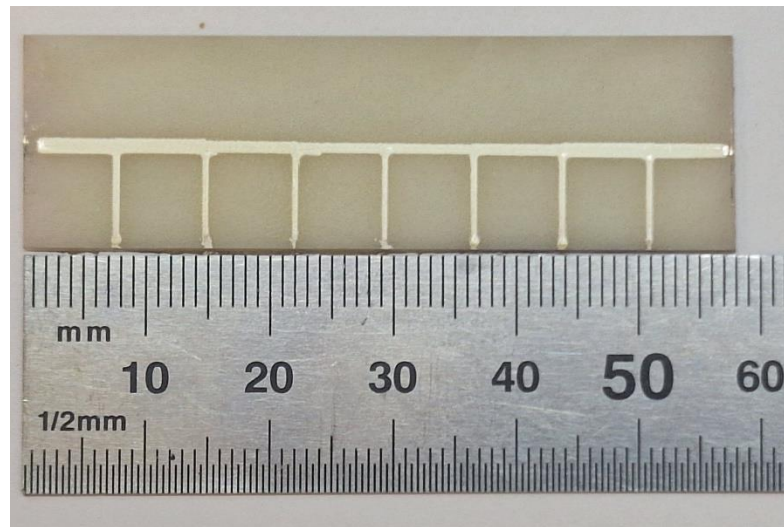


Рисунок 3.4 – Напечатанный ФВЧ

Сравнение расчетных и экспериментальных частотных характеристик показано на рисунке 3.5.

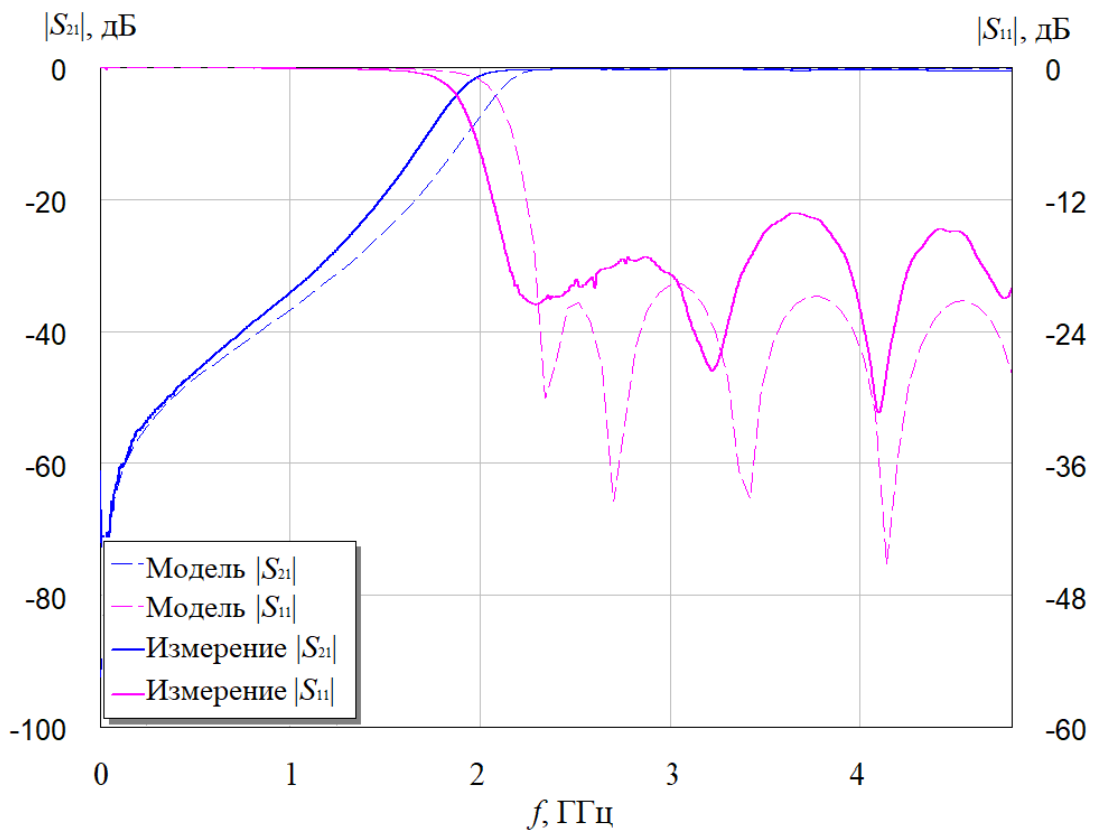


Рисунок 3.5 – Сравнение частотных характеристик модели и напечатанного ФВЧ

Измеренные частотные характеристики отличаются от характеристик, полученных при проектировании фильтра. Данное отличие связано с тем, что при

проектировании не было учтено увеличение длины резонаторов. Растекание пасты также привело к увеличению ширины резонаторных элементов. Минимальные потери в полосе пропускания составляют около 0,3 дБ. Результат корректировки модели показан на рисунке 3.6.

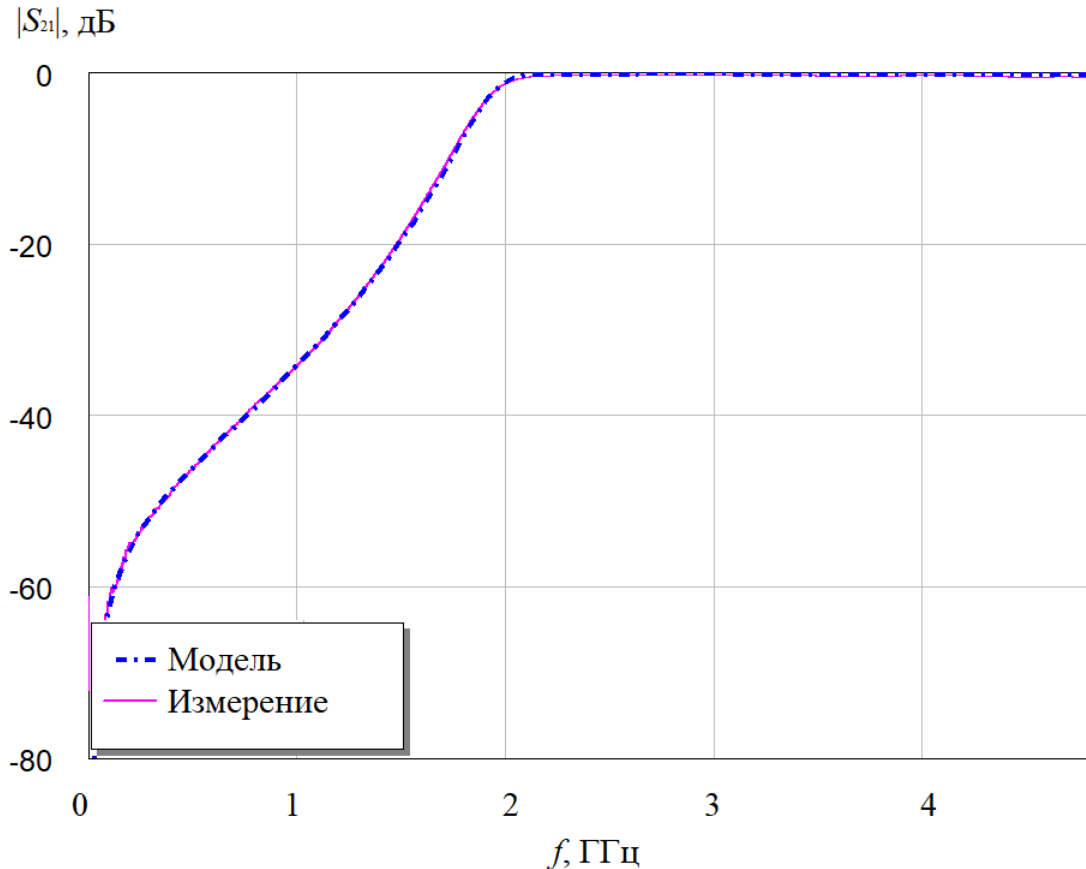


Рисунок 3.6 – Частотная зависимость модуля коэффициента передачи скорректированной модели и напечатанного ФВЧ

Как видно из рисунка 3.6, корректировка геометрических размеров позволила добиться совпадения экспериментальных и расчетных характеристик.

Для проектирования ППФ была выбрана структура с краевой связью. Фильтр был спроектирован на центральную частоту 2,4 ГГц и шириной полосы пропускания 0,2 ГГц (рисунок 3.7).

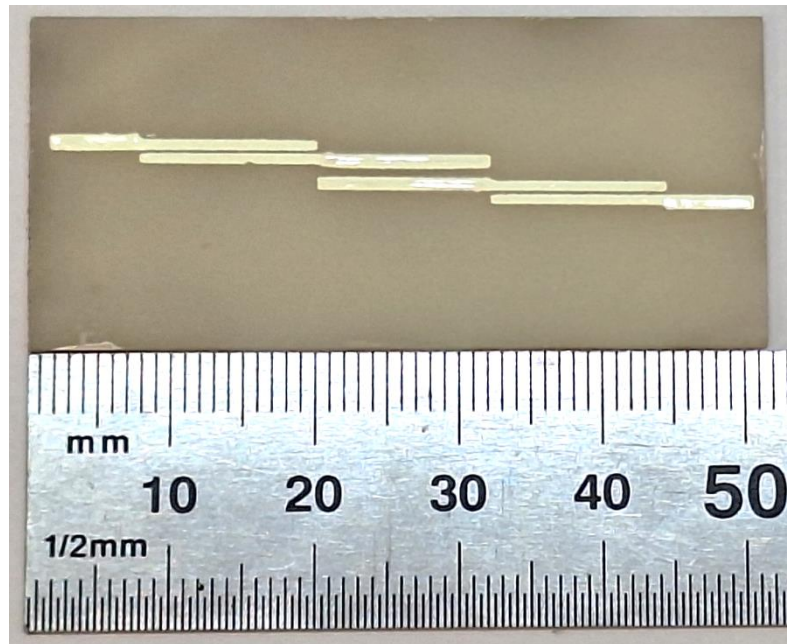


Рисунок 3.7 – Напечатанный ППФ

Сравнение расчетных и экспериментальных частотных характеристик показано на рисунке 3.8.

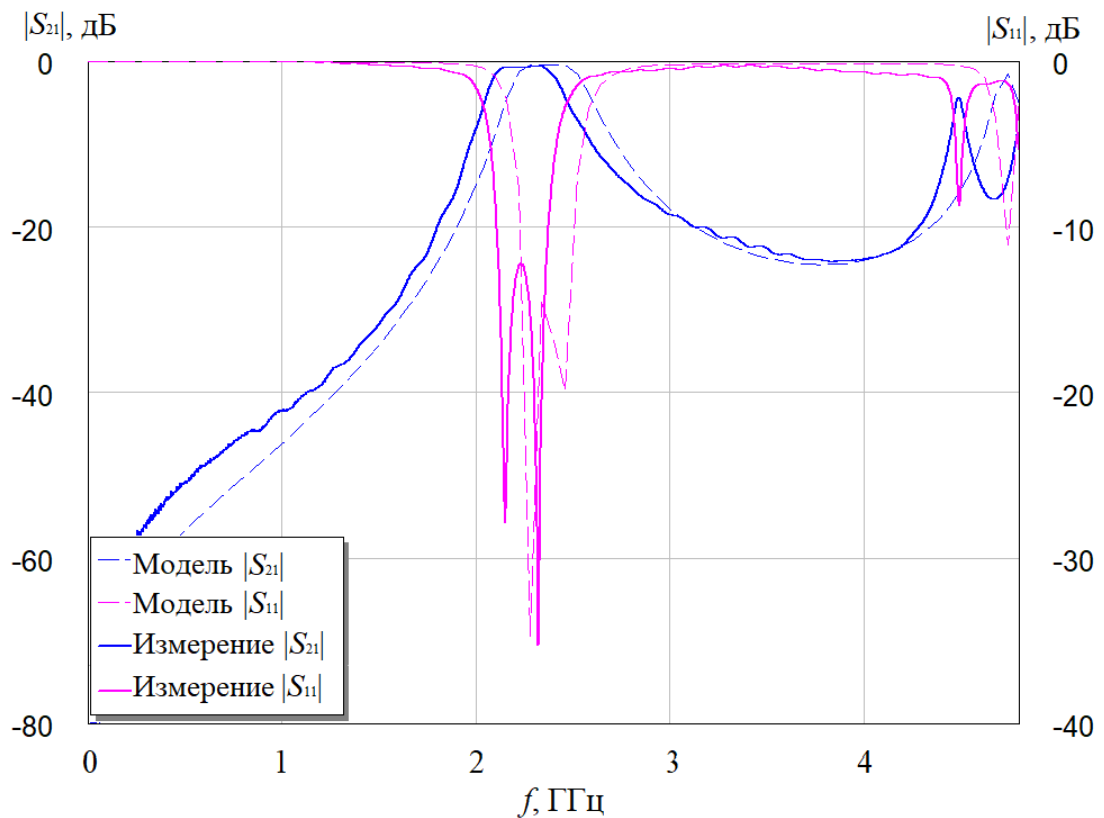


Рисунок 3.8 – Сравнение частотных характеристик модели и напечатанного ППФ

Результаты сравнения показывают, что частотная зависимость напечатанного фильтра имеет смещение центральной частоты на 0,1 ГГц.

Минимальные потери в полосе пропускания составляют около 0,5 дБ. При анализе геометрических размеров напечатанного ППФ было выявлено, что растекание пасты привело к увеличению ширины резонаторов, что соответственно повлияло на зазор между ними. При корректировке геометрически размеров в модели получилось добиться схожести графиков экспериментальных и расчетных характеристик. Полученная частотная зависимость коэффициента передачи показана на рисунке 3.9.

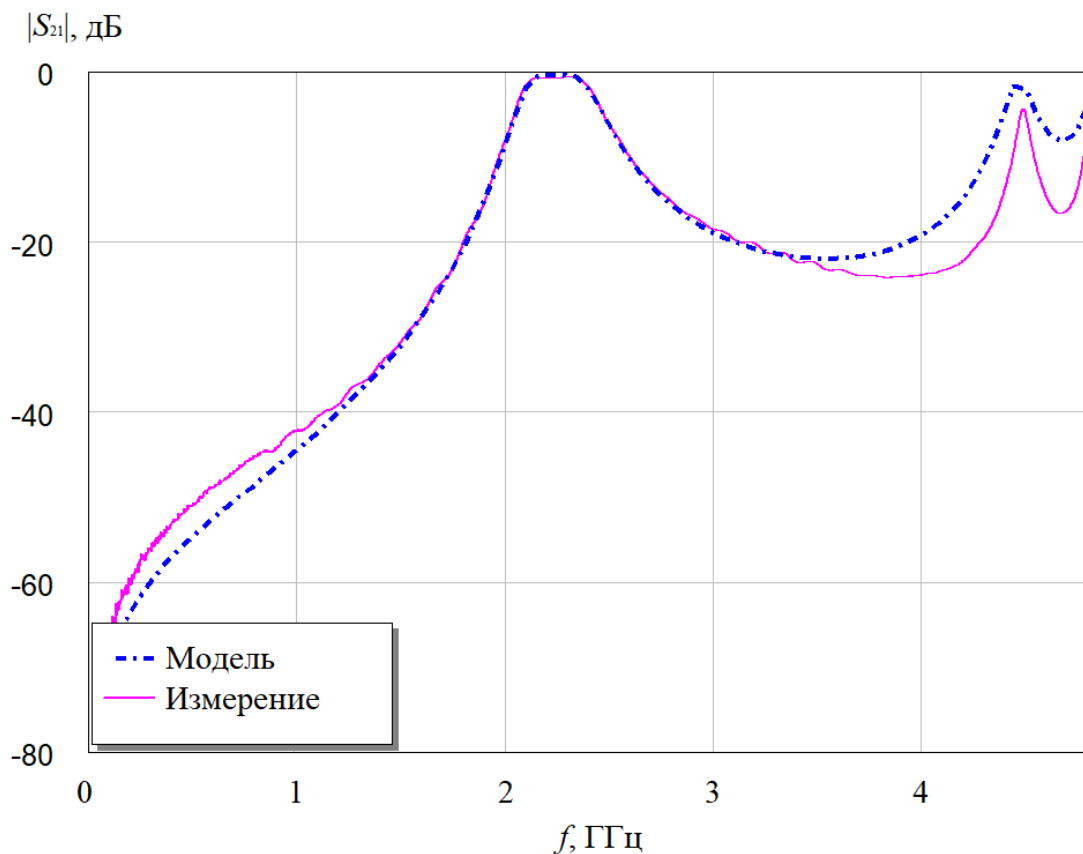


Рисунок 3.9 – Частотная зависимость модуля коэффициента передачи скорректированной модели и измерения ФВЧ

На основе экспериментальных образцов выявлено, что растекание паст при печати относительно исходного размера линий составляет не более 20%. Также растекание пасты приводит к рассогласованию микрополосковых линий. Для получения расчетных частотных параметров СВЧ-узлов предлагается уменьшать ширину топологических элементов с учетом растекания паст, а также возможно применение лазерной корректировки элементов после спекания.

Был напечатан ФНЧ на основе планарных компонентов [92]. В работе [96] описана печать планарных компонентов: катушка индуктивности, конденсатор и меандровый резистор. На основе полученных результатов проводилось моделирование фильтра. В качестве фильтра нижних частот был выбран LC-фильтр.

При расчете ФНЧ задавалась частота среза равная 100 МГц. В результате расчета LC-фильтр состоит из двух катушек индуктивности и конденсатора. На рисунке 3.10 показана схема фильтра с полученными значениями компонентов.

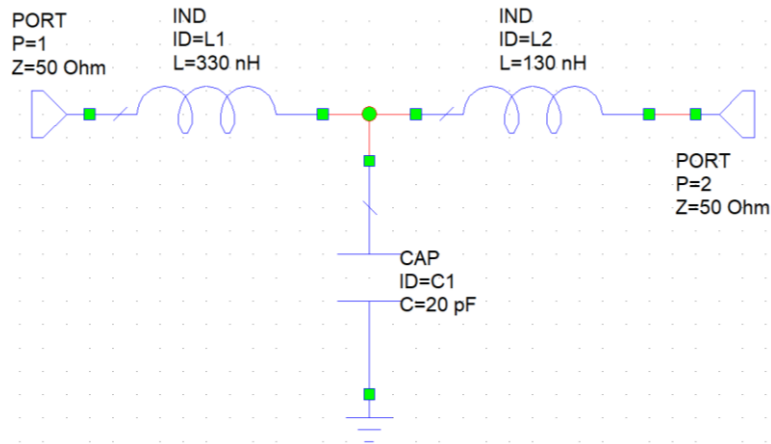


Рисунок 3.10 – Схема LC-фильтра

Частотный график вносимых и возвратных потерь приведен на рисунке 3.11.

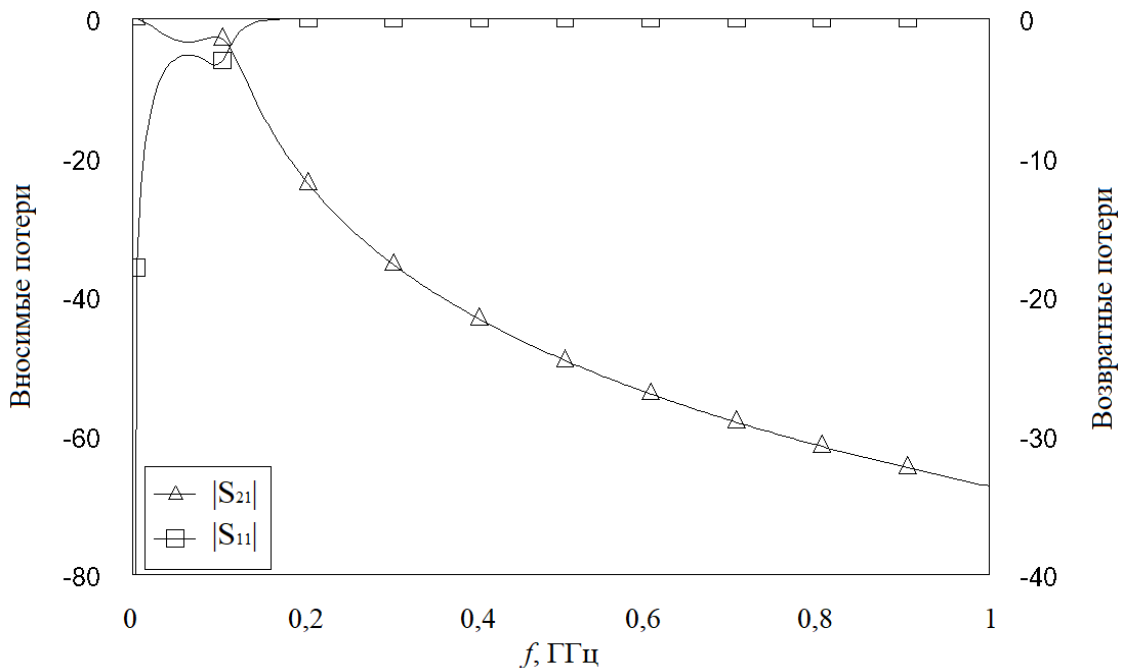


Рисунок 3.11 – Вносимые и возвратные потери смоделированного LC-фильтра

Принтерная технология подразумевает планарную печать, в результате появилась задача расчета катушек индуктивности для получения заданной индуктивности.

Планарные катушки индуктивности целесообразно выполнять в виде плоских спиралей круглой, квадратной или прямоугольной формы. Катушки изготавливают из проводящего материала, который наносится на изоляционный слой в многослойных печатных платах или на подложку. Так как квадратные катушки индуктивности позволяют получить более высокое значение индуктивности, по сравнению с круглыми, было принято решение печатать квадратные спиральные катушки индуктивности.

По результатам расчета ширина проводников составляет 0,2 мм. Внешний диаметр равен 10 мм.

Планарные конденсаторы выполняют в виде перекрывающихся друг друга участков проводящих и диэлектрических слоев. Чтобы получить емкость 20 пФ необходимо напечатать конденсатор толщиной до 1 мкм. По принтерной технологии изготовить такой невозможно, так как минимальная толщина слоя составляет 20 мкм. Поэтому было принято решение использовать керамический конденсатор.

Печать LC-фильтра проводилась на принтере Voltera V-One проводящей пастой. Для печати использовалось сопло с внутренним диаметром 150 мкм. Напечатанные катушки для фильтра показаны на рисунке 3.12.

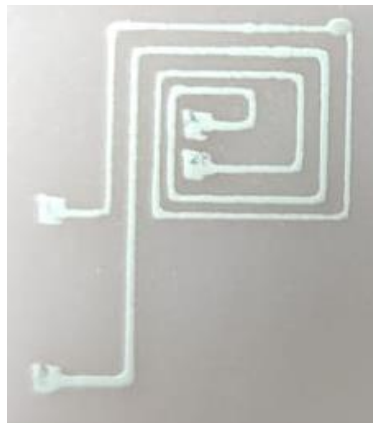


Рисунок 3.12 – Напечатанный LC-фильтр

После печати были измерены индуктивности катушек. В результате измерений индуктивность равна 336 нГн и 128 нГн. Геометрические размеры напечатанных катушек составляют: ширина проводников равна 0,2 мм, толщина 20 мкм. На рисунке 3.13 показана измеренная частотная зависимость напечатанного LC-фильтра.

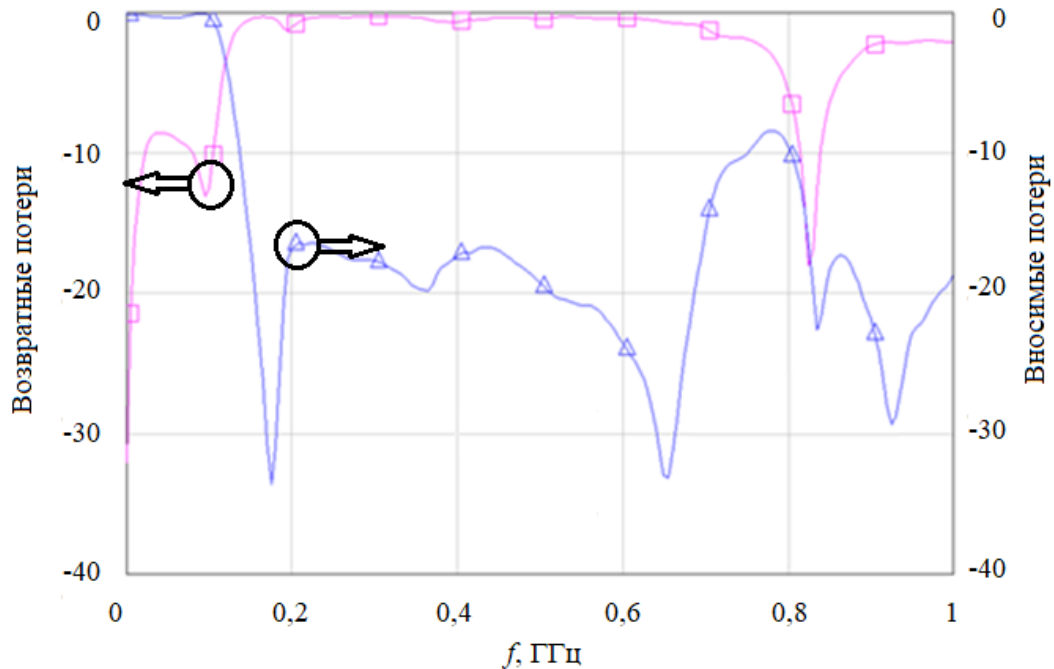


Рисунок 3.13 – Частотные зависимости напечатанного LC-фильтра

Далее был полностью напечатан LC-фильтр, схема такого фильтра показана на рисунке 3.14

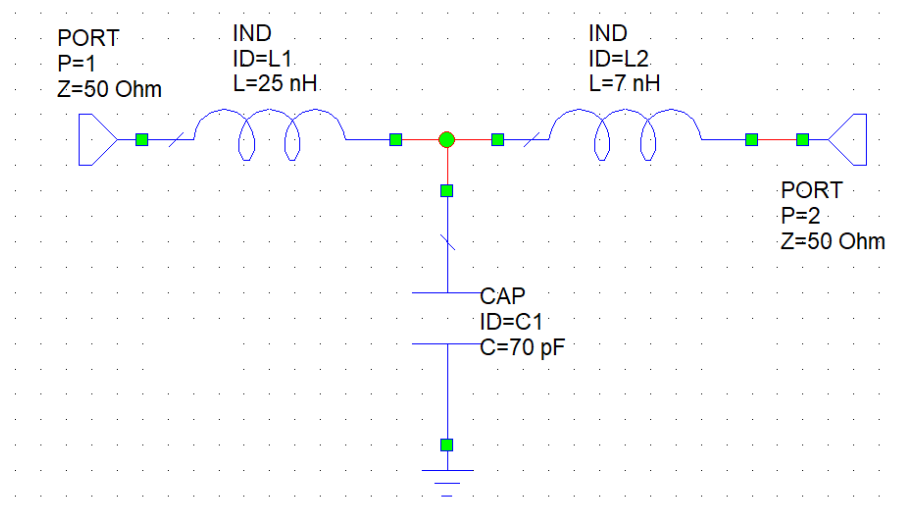


Рисунок 3.14 – Схема LC-фильтра

Расчетная частотная характеристика фильтра приведена на рисунке 3.15

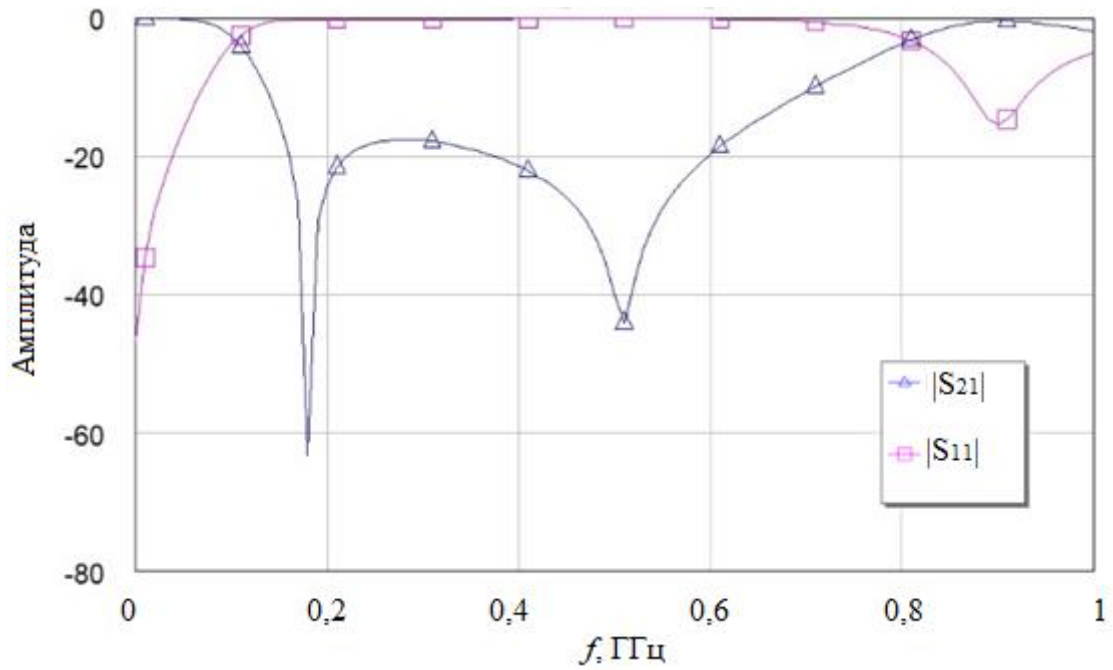


Рисунок 3.15 – Расчетная частотная зависимость LC-фильтра
 Результат печати LC-фильтра показан на рисунке .16

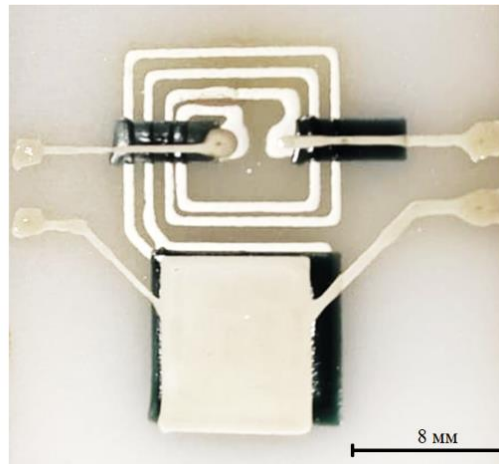


Рисунок 3.16 – Напечатанный LC-фильтр

Измеренная частотная характеристика напечатанного LC-фильтра показана на рисунке 3.13.

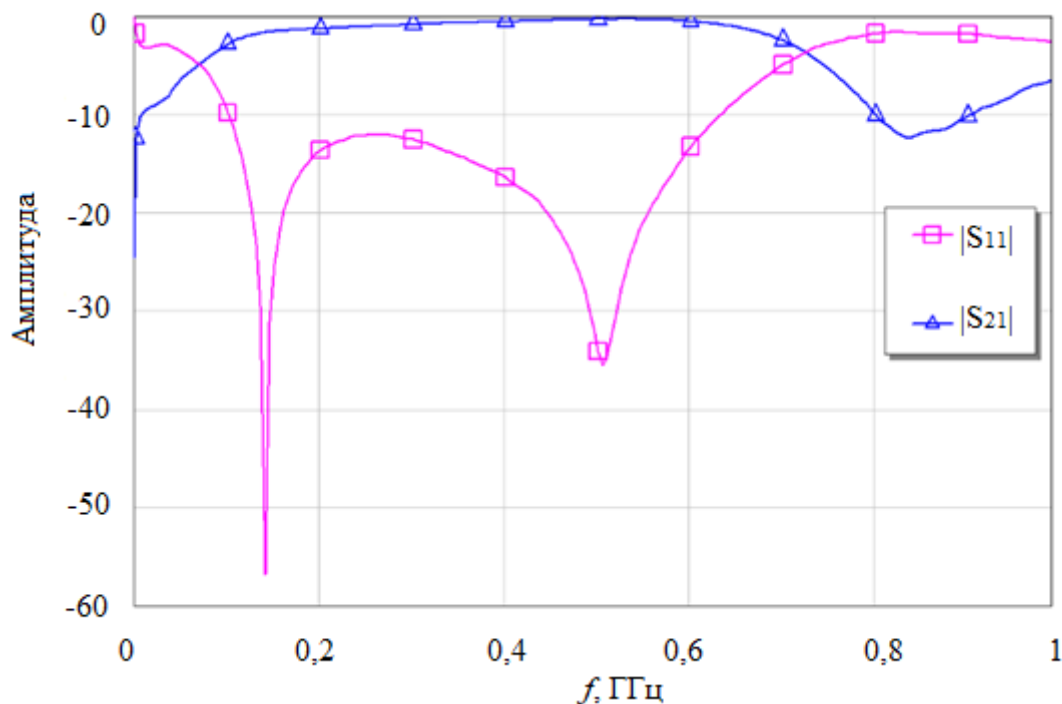


Рисунок 3.17 – Частотная характеристика напечатанного LC-фильтра

Полученная частотная характеристика напечатанного LC-фильтра показывает совпадение с моделью.

Для исследования фильтров, напечатанные разными материалами были рассчитаны шпилечные фильтры с центральной частотой 2 ГГц. На рисунке 3.18 показан напечатанный фильтр пастой ППС-2-2.

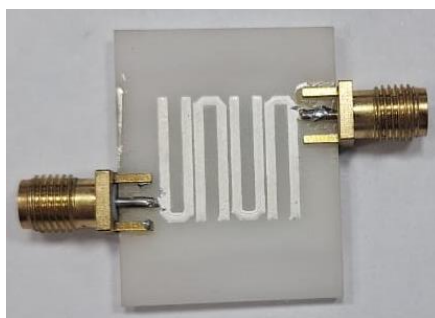


Рисунок 3.18 – Напечатанный шпилечные фильтры пастой ППС-2-2

Измерения частотных характеристик напечатанных фильтров проводились на векторном анализаторе цепей Планар Обзор-804. Полученные значения S-параметров были импортированы в AWR DE и построены графики сравнения характеристик модели и измерения (рисунок 3.19, 3.20).

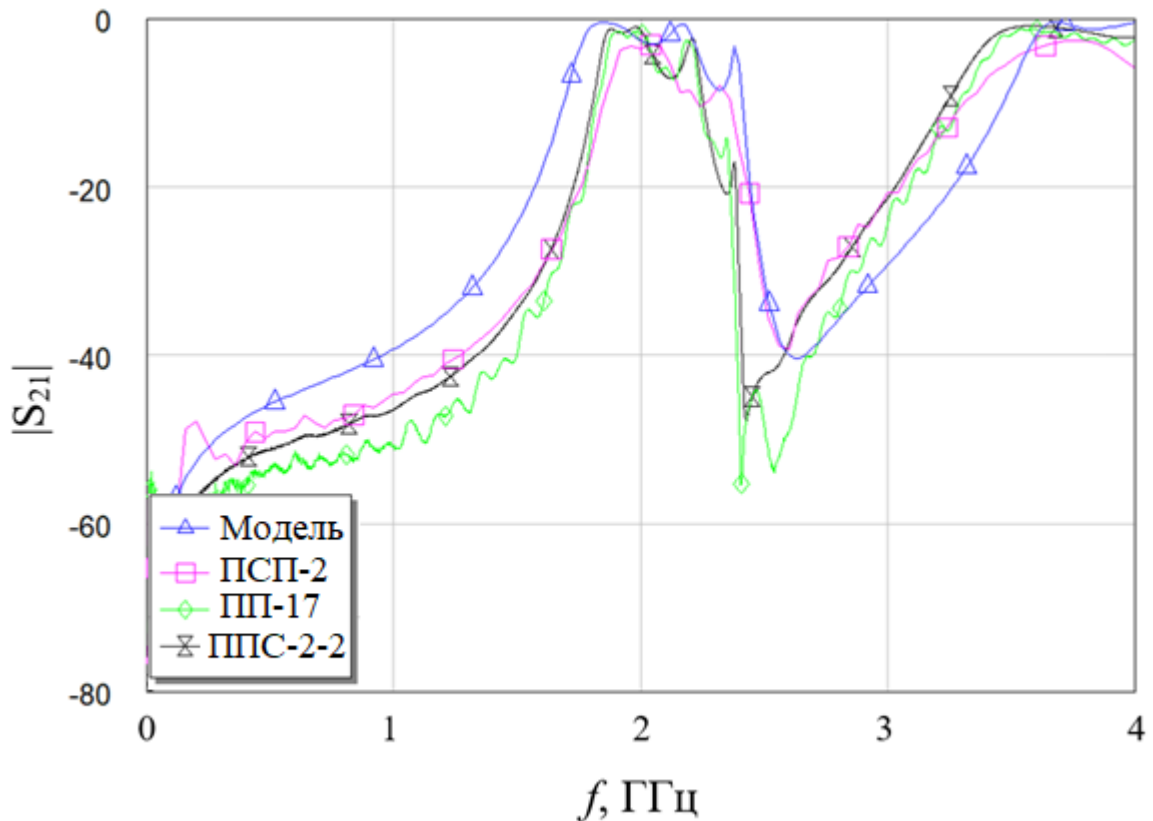


Рисунок 3.19 – Сравнение частотных зависимостей модуля коэффициента передачи сигнала

Как видно из графика сравнений коэффициентов передачи (рисунок 3.19) напечатанные фильтры, имеют более узкую ширину полосы пропускания по сравнению с моделью. Потери фильтра ПСП-2 составляют минус 3,5 дБ на центральной частоте 2 ГГц. Потери фильтра ПП-17 составляют минус 1,7 дБ на центральной частоте 2 ГГц. Потери фильтра ППС составляют минус 1,4 дБ на центральной частоте 2 ГГц.

На графиках коэффициентов передачи наблюдаются провалы – у ПСП-2 на частоте 2,2 ГГц, у ПП-17 и ППС на частоте 2,1 ГГц.

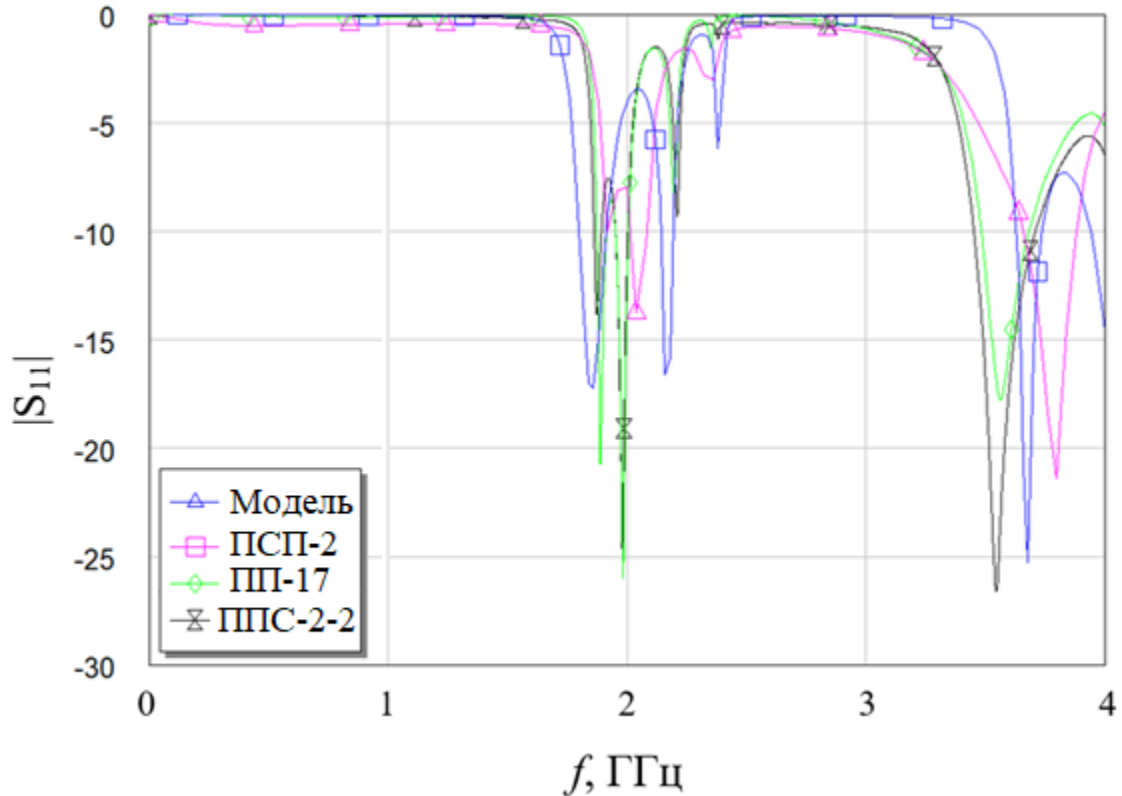


Рисунок 3.20 – Сравнение частотных зависимостей модуля коэффициента отражения сигнала

Сравнение коэффициентов отражения напечатанных фильтров с моделью показывает хорошее совпадение с моделью (рисунок 3.20). Однако у фильтров ПП-17 и ППС присутствует резонансы до минус 25 дБ, которые отсутствуют у модели. У модели резонансы на центральной частоте составляют минус 17 дБ. Наименьшие резонансы наблюдаются у ПСП-2 и составляют минус 14 дБ.

В результате проведенной работы были напечатаны фильтры из проводящих паст ПСП-2, ПП-17 и ППС. Полученные частотные зависимости показывают хорошее совпадение с моделью. Наименьшие потери на центральной частоте 2 ГГц наблюдаются у пасты ППС и составляют минус 1,4 дБ. Наибольшие потери на центральной частоте 2 ГГц наблюдаются у пасты ПСП-2 и составляют минус 3,5 дБ.

Полученные результаты были внедрены в учебный процесс кафедры конструирования узлов и деталей РЭА Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Приложение А).

3.2 Направленные ответвители

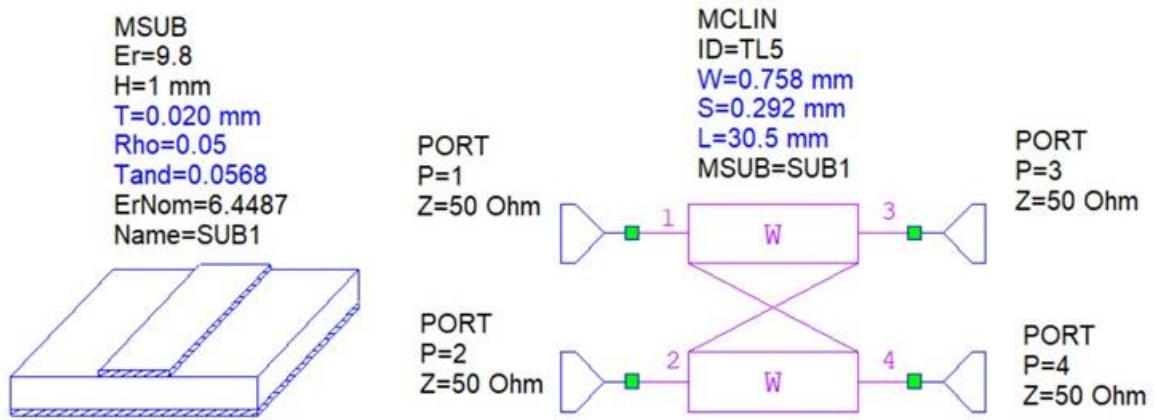
В работе [5] показан способ определения электрических параметров линии передачи, изготовленной методом печати серебросодержащими пастами. Предложенная методика проектирования СВЧ-узлов для аддитивного производства заключается в определении параметров материалов, используемых для печати, путем экстракции их по изготовленному макету микрополосковой линии и учете этих параметров в модели. Полученные значения используются в данной работе при проектировании НО.

Моделирование НО с боковым типом связи проводилось в системе автоматизированного проектирования (САПР) AWR Design Environment. С помощью программы TXline, исходя из заданных геометрических и электрических параметров, проведен расчет параметров модели СВЧ-узла и определены значения недостающих параметров.

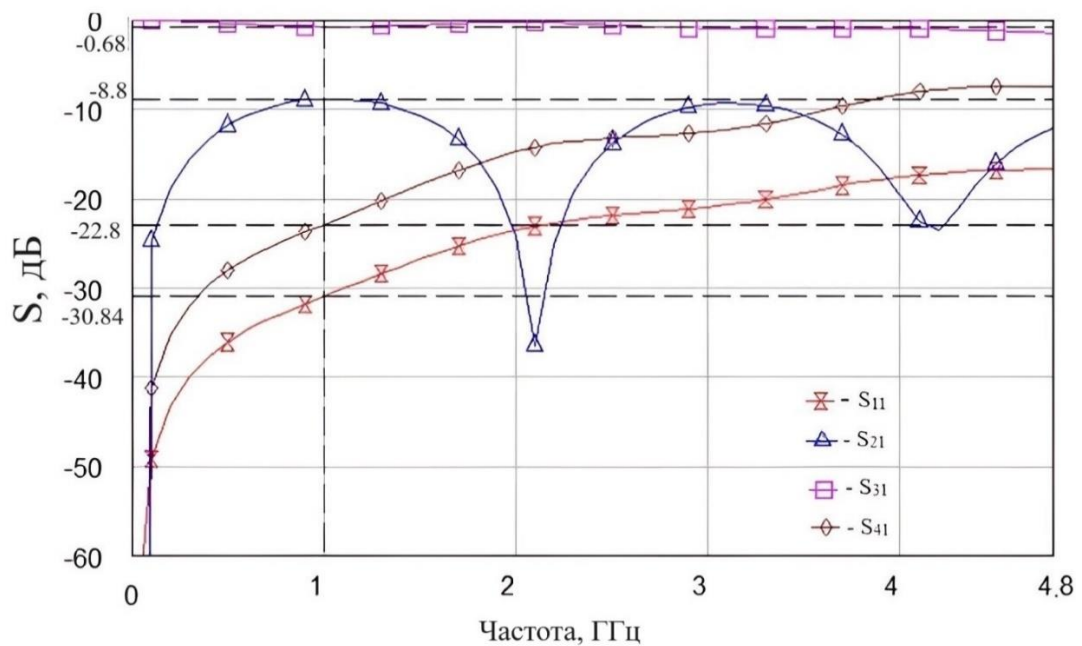
Для связанных линий характерны два разных режима возбуждения волн – четный и нечетный режим, для каждого из которых характерны свои электрические характеристики. Волновое сопротивление связанных микрополосковых линий зависит от волнового сопротивления при четном и нечетном режимах возбуждения. Волновое сопротивление связанных МПЛ, промоделированных в TXline составляет:

$$Z_0 = \sqrt{Z_E \cdot Z_O} = \sqrt{73,5 \cdot 34} = 50 \text{ (Ом)}$$

Данное соотношение волновых сопротивлений достигается при размерах связанных линий 0,75 мм и расстоянии между линиями 0,3 мм. Расчет выполнен для подложки из оксида алюминия ВК-96 с диэлектрической проницаемостью 9,8. На рисунке 3.21 представлена модель НО и его рассчитанные частотные характеристики с учетом корректировки геометрических параметров напечатанных линий (фактические размеры незначительно отличаются от расчетных, что объясняется растеканием пасты при печати).



а



б

Рисунок 3.21 – Модель (а) и частотные характеристики модели НО (б)

С помощью аддитивной технологии изготовлен направленный ответвитель на связанных микрополосковых линиях передачи с боковым типом связи. Для изготовления НО использованы проводящие пасты ПТСП-Д2 производства ООО «Дельта-пасты» (г. Зеленоград). Спекание паст проводилось при температуре 175°C в течение 20 минут. На рисунке 3.22 представлен внешний вид изготовленного НО.

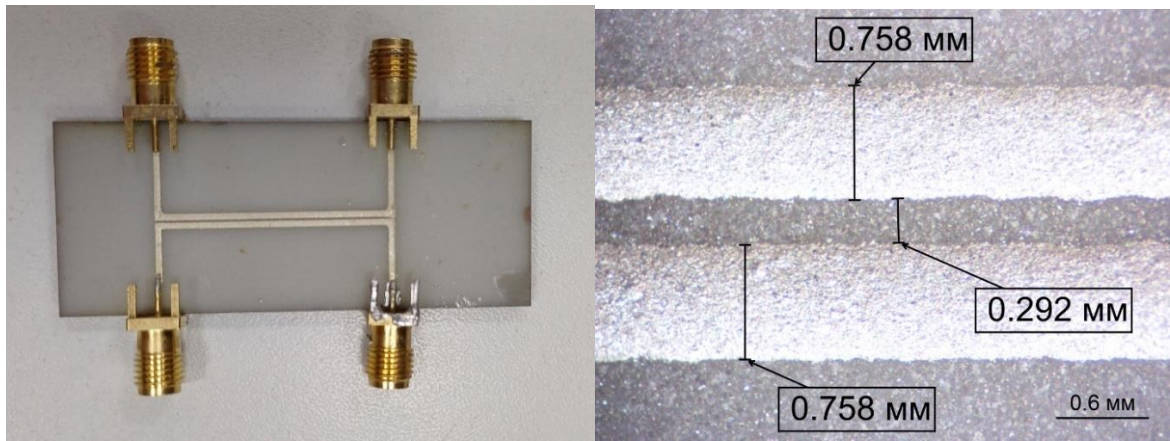


Рисунок 3.22 – Напечатанный направленный ответвитель с боковой связью

На рисунке 3.23 представлен график зависимости переходного ослабления от частоты. На рабочей частоте 1 ГГц ослабление составило минус 10 дБ.

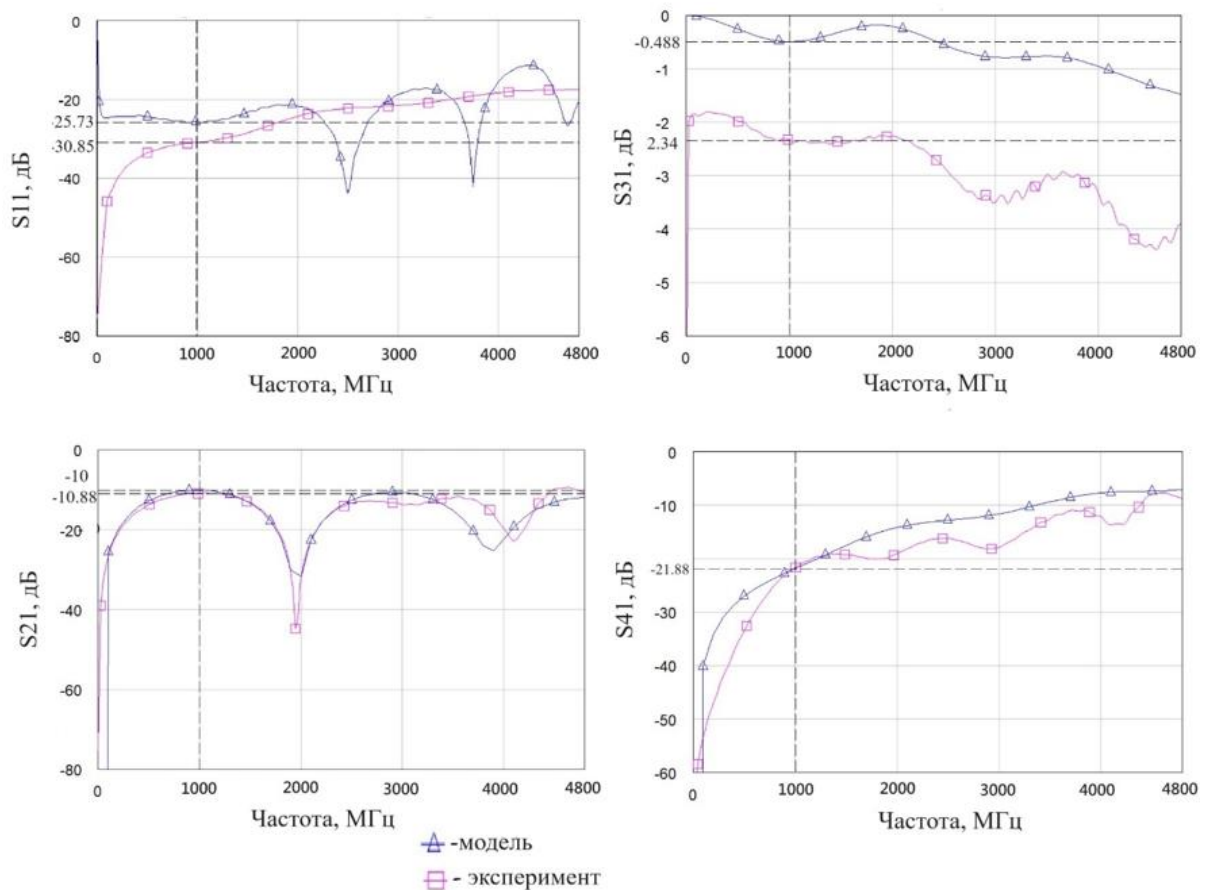


Рисунок 3.23 – Частотные характеристики НО

Результаты сопоставления экспериментальной частотной зависимости с расчетной показывают удовлетворительное совпадение графиков частотных характеристик полученного направленного ответвителя.

Были проведены исследования НО с лицевой связью. Такой напечатанный НО показан на рисунке 3.24.

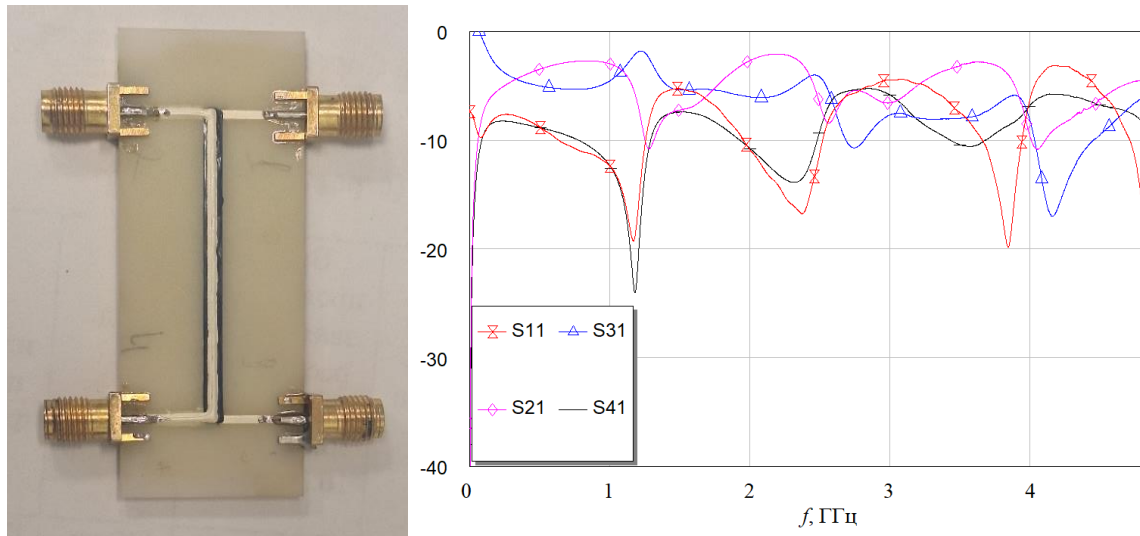


Рисунок 3.24 – Напечатанный НО с лицевой связью и его частотные характеристики

Также интерес представляет изготовление широкополосного НО. Для реализации такого НО в конструкции учитывалась боковая и лицевая связь. Напечатанный НО и его частотная характеристика показана на рисунке 3.25.

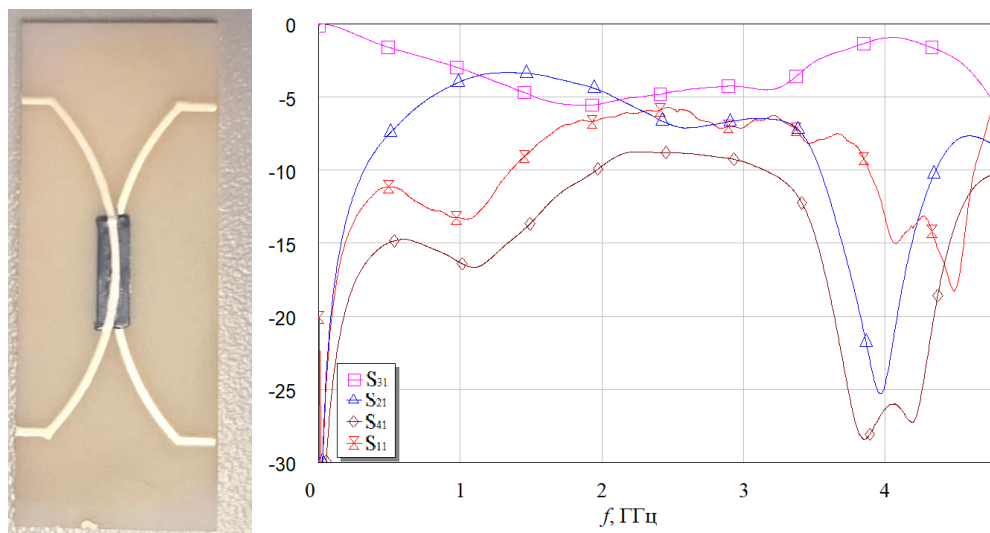


Рисунок 3.25 – Напечатанный НО с боковой и лицевой связью

Далее были проведены экспериментальные исследования поперечно-направленного ответвителя на связанных линиях. Схема и конструкция исследуемого поперечно-направленного ответвителя (ПоНО) на СЛ изображены на рисунке 3.26. На схеме (рисунок 3.26, а) показано, что на рабочих частотах сигнал не доходит прямо до конца (порт 4) возбуждаемой опорной линии (порт 2), а уходит

поперек во вторую верхнюю линию – на ее ближний и дальний концы (порты 1 и 3); отсюда и название «поперечно-направленный». Это достигается только в структурах с сильно неоднородным диэлектриком, где проницаемости различаются более чем в 10–16 раз и обеспечивается трехкратное отношение скоростей нормальных волн. Еще одной особенностью этой структуры (рисунок 3.26, б) является то, что хотя она и симметрична относительно поперечной плоскости между ближним и дальним концами отрезка СЛ (рисунок 3.26, г), а также относительно продольной вертикальной плоскости (рисунок 3.26, в), но, тем не менее, отличается межлинейной асимметрией, так как несимметрична относительно межлинейной продольной горизонтальной плоскости. Отсюда и свойство трансформации импеданса. Кроме того, на выходных портах 1 и 3 ПоНО сигнал имеет равные амплитуды и разность фаз 90 град., что позволяет определить его как квадратурный мост.

Итак, в целом ПоНО на СЛ функционирует как трансформирующий квадратурный мост, выполненный на многослойной структуре (рисунок 3.26, б), в которой опорная линия образована заземленным основанием 1, нижним диэлектрическим слоем 2 и нижней металлической полоской 3, а верхняя линия образована той же нижней металлической полоской 3, верхним керамическим бруском 4 с высокой диэлектрической проницаемостью и верхней металлической полоской 5, имеющей с нижней полоской 3 горизонтально-лицевую 3-децибельную связь, при этом опорная линия имеет электрическую длину 90 град. и импеданс 50 Ом, согласованный с системным импедансом, а верхняя линия имеет электрическую длину 270 град. и импеданс 25 Ом, в два раза меньший системного, что обеспечивает двукратную межлинейную трансформацию импеданса, равную амплитуду квадратурных выходных сигналов и поперечную направленность ответвителя.

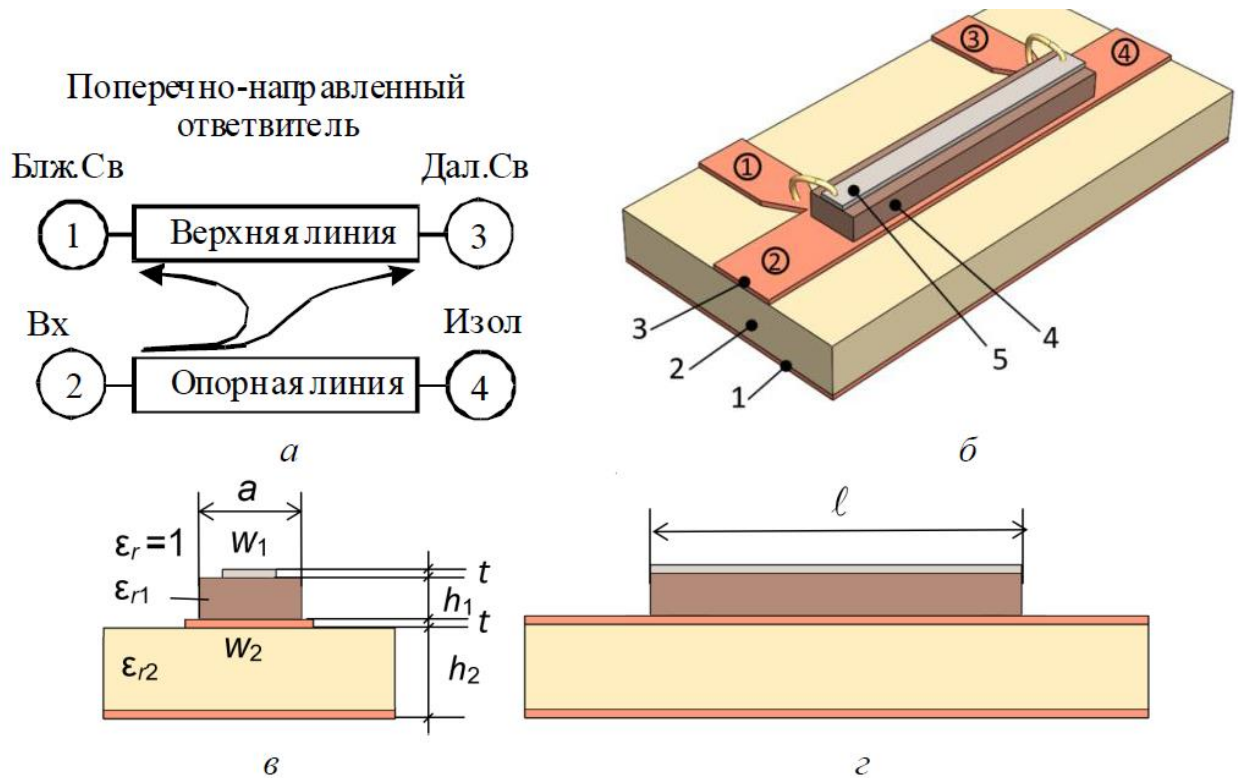


Рисунок 3.26 – Схема (а) и конструкция ПоНО на СЛ — общий вид (б);
поперечное сечение (в); вид сбоку (г).

При моделировании конструкции СЛ учитывались следующие основные параметры (рисунок 3.26, в, г): a – ширина керамического бруска; w_1 – ширина верхней полоски; w_2 – ширина опорной полоски; h_1 – толщина керамического бруска; h_2 – толщина нижней платы; t – толщины металлических полосок; l – длина отрезка линий; ϵ_{r1} , ϵ_{r2} , ϵ_{r3} – диэлектрические проницаемости материалов нижней платы, керамического бруска и окружающего пространства соответственно. Благодаря симметрии СЛ относительно продольной вертикальной плоскости сначала моделировалась лишь одна (правая) половина структуры. Потом в расчете всей структуры из-за параллельного соединения со второй половиной (левой) погонные емкости удваивались, а погонные индуктивности соответственно уменьшались вдвое.

В качестве исходных данных для квазистатического анализа и численных расчетов ПоНО на СЛ были взяты следующие геометрические размеры СЛ (w_1 w_2 h_1 h_2 t l) = (1,5 3,5 1,5 1,5 0,035 30) мм и диэлектрические проницаемости материалов и окружающей среды (ϵ_{r1} ϵ_{r2} ϵ_{r3}) = (46 3,4 1), при этом ширина бруска a не ограничивалась. С этими данными методом численных конформных

преобразований, реализованном в компьютерной программе *Lines_Modelling_Toolbox*, были вычислены погонные и модальные параметры СЛ, которые оказались следующими: элементы матрицы погонных емкостей $(L_{11} \ L_{22} \ L_{12}) = (0,5483 \ 0,2705 \ 0,1781)$ мкГн/м; погонные емкости $(C_{11} \ C_{22} \ C_{12}) = (682,3 \ 780,3 \ 671,5)$ пФ/м; характеристические сопротивления $(Z_{11} \ Z_{22} \ Z_{12}) = (63,67 \ 46,69 \ 42,16)$ Ом; модальные диэлектрические проницаемости $(\epsilon_{rc} \ \epsilon_{r\pi}) = (2,71 \ 28,39)$; модальные напряжения СЛ $(R_c \ R_\pi) = (0,9792-0,2679)$.

Далее были рассчитаны шесть частотных зависимостей S -параметров ответвителя на отрезке СЛ: $|S_{11}|, |S_{22}|$ – возвратные потери верхней и опорной линий соответственно; $|S_{13}| = |S_{31}|, |S_{24}| = |S_{42}|$ – межпортовая изоляция в верхней и в опорной линиях соответственно; $|S_{12}| = |S_{21}| = |S_{34}| = |S_{43}|, |S_{14}| = |S_{41}| = |S_{23}| = |S_{32}|$ – межлинейная связь на ближнем и дальнем концах СЛ соответственно, показанных на рисунке 3.27. Из расчетных графиков, характеризующих ПоНО (рисунок 3.27), видно, что центральная частота близка к 1,5 ГГц.

Заметим, что некоторые сложности при измерениях ПоНО на отрезке СЛ будет доставлять межлинейная импедансная несимметрия. Здесь опорная и верхняя линии (вместе с их согласованными нагрузками) имеют различающиеся импедансы 50 и 25 Ом соответственно. В расчетах это учесть несложно, однако при измерениях в стандартном 50-омном тракте необходимы дополнительные меры. К ним можно отнести следующее: а) изготовить оснастку с согласующими трансформаторами на четвертьволновых отрезках линий передачи; б) выполнить математическое моделирование существующей оснастки, реализующей расчетное преобразование импеданса порта и исключение перемычек на концах верхней линии после измерений. Оба способа видятся довольно трудоемкими, поэтому лучше пойти иным путем и выполнить два расчетных прогона по единой модели ПоНО (рисунок 3.27): первый, с согласованными нагрузками на портах, т. е. опорная и верхняя линии нагружаются на свои согласованные 50 и 25 Ом соответственно; второй, со стандартными 50-омными нагрузками на всех портах, т. е. опорная 50-омная линия оказывается нагруженной согласованно, а верхняя 25-омная линия при 50-омных нагрузках оказывается слабонагруженной.

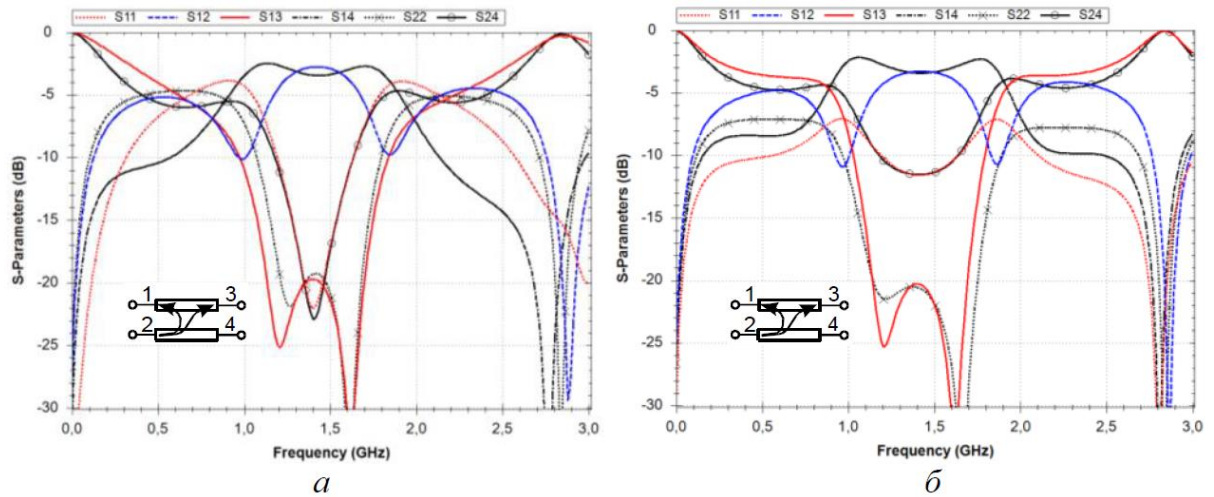


Рисунок 3.27 – Рассчитанные частотные зависимости S -параметров ПоНО на отрезке СЛ: а) с согласованными нагрузками; б) со стандартными 50-омными нагрузками, где опорная линия согласована, а верхняя линия слабонагружена

Сопоставляя все шесть графиков частотных зависимостей S -параметров, полученных из двух прогонов (рисунок 3.27, а, б), замечаем, что лишь два из них – возвратные потери верхней линии $|S_{11}|$ и межпортовая изоляция в опорной линии $|S_{24}|$ – в первом и втором прогонах различаются ощутимо. Однако можно обоснованно предположить, что последующие результаты измерений в стандартном 50-омном тракте, совпадая с расчетными графиками второго прогона в правом поле (рисунок 3.27, б) после математического преобразования импеданса портов и исключения перемычек совпадут с графиками первого прогона в левом поле при согласованных нагрузках (рисунок 3.27, а).

Остальные четыре параметра – возвратные потери опорной линии $|S_{22}|$; межпортовая изоляция в верхней линии $|S_{13}|$; межлинейные связи на ближнем и дальнем концах $|S_{12}| = |S_{34}|$ и $|S_{14}| = |S_{23}|$ соответственно – при вариации нагрузочных импедансов различаются несущественно, поэтому эти расчетные данные будут реально сопоставимыми с результатами измерений в стандартном 50-омном тракте и не будут нуждаться в дополнительных математических преобразованиях.

Для проверки работоспособности предложенного решения был изготовлен макет ПоНО на отрезке СЛ длиной 30 мм (рисунок 3.28, а), который имел те же физические параметры, что и в расчетах: $(a \ w_1 \ w_2 \ h_1 \ h_2 \ t \ l) = (3,5 \ 1,5 \ 3,5 \ 1,5 \ 1,5 \ 0,035 \ 30)$ мм; $(\epsilon_{r1} \ \epsilon_{r2} \ \epsilon_{r3}) = (46 \ 3,4 \ 1)$, за исключением ширины бруска, которая в расчетах не ограничивалась. Материал опорной платы — *RO4003C (Rogers)* с габаритами

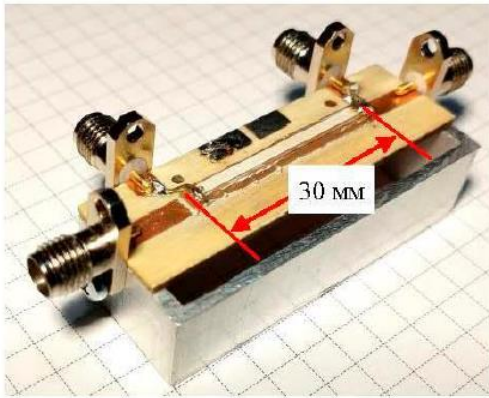
15×50×1,5 мм³, керамический брусок — В46 (ООО «Керамика», Санкт-Петербург) с габаритами 3,5×30×1,5 мм³. Микрополосковая линия была напечатана на керамическом бруске с помощью проводящей пасты ППС-2-2 и сопла с внутренним диаметром 225 мкм.

Процедура измерений ПоНО на СЛ выполнялась с помощью векторного анализатора цепей *Planar S5048* в два этапа: 1) предварительный, в котором верхняя линия находилась в режиме холостого хода, и ответвитель сводился к двухпортовому устройству с портами 2 и 4 (см. рисунок 3.26, а); 2) полные измерения четырехпортового моста в стандартном тракте.

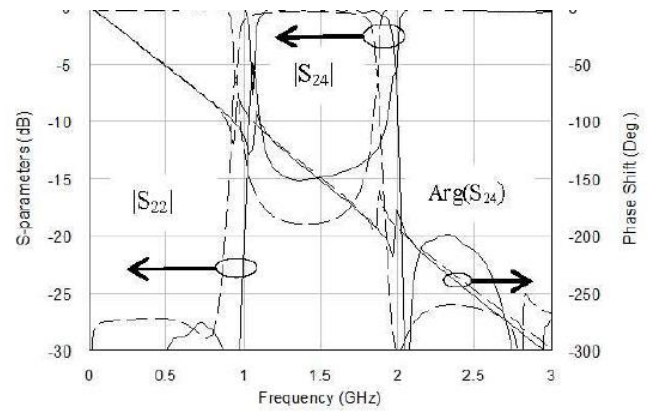
На рисунке 3.28, б показаны рассчитанные и предварительно измеренные частотные характеристики ПоНО на СЛ, у которого концы верхней линии находятся в режиме холостого хода (без смонтированных на порты перемычек), а опорная линия, работая на проход, соединяется с входным и выходным 50-омными портами с помощью согласованных подводящих микрополосковых линий (МПЛ) с длинами по 10 мм каждая. Все рассчитанные и измеренные зависимости – $|S_{22}|$, $|S_{42}|$, $\text{Arg}(S_{42})$ возвратных и вносимых потерь, а также вносимого фазового сдвига, соответственно, в опорной линии с учетом длины подводящих линий близки с приемлемой погрешностью (6–10 % по частоте), хотя точность расчетов можно повысить, учтя ширину керамического бруска.

При этом важно отметить две особенности этих предварительных измерений (рисунок 3.28, б): а) опорная линия на центральной частоте 1,5 ГГц имеет фазовый сдвиг 150 град. с учетом длины подводящих МПЛ (по 10 мм с каждого конца, т. е. всего 20 мм), которые вносят дополнительный фазовый сдвиг 60 град. Однако при исключении подводящих линий (т. е. минус 60 град.) расчетная фаза возвращается точно к 90 град. на центральной частоте с неизменными графиками всех амплитудно-частотных характеристик; б) полоса рабочих частот опорной линии ограничена двумя резонансами, создаваемыми верхней ненагруженной линией на керамическом бруске. Учитывая, что низкочастотный полуволновый резонанс (около 1 ГГц) возникает при электрической длине верхней разомкнутой линии 180 град., а высокочастотный резонанс (около 2 ГГц) – при 360 град., следует, что на

центральной частоте (1,5 ГГц) она имеет среднюю электрическую длину 270 град., что можно интерпретировать как фазовую квадратуру на центральной частоте между выходными портами верхней линии.



а



б

Рисунок 3.28 – Фото макета ПоНО на СЛ (а). Рассчитанные (штриховые) и измеренные (сплошные) частотные зависимости возвратных $|S_{22}|$ и вносимых $|S_{42}|$ потерь и вносимой фазы $\arg(S_{42})$ опорной линии при ненагруженной верхней линии (б)

Далее, после монтажа двух перемычек, соединяющих концы верхней линии ПоНО со своими подводящими линиями с оконечными портами (рисунок 3.28, а), были произведены полные измерения четырехпортового моста в стандартном 50-омном тракте (рисунок 3.29).

Измеренные в 50-омном тракте частотные характеристики ПоНО на СЛ длиной 30 мм (рисунок 3.29, а) оказались достаточно близкими к расчетным (рис. 2, б) и имели следующие значения:

1. Полоса рабочих частот 1,2–1,7 или $1,48 \pm 0,22$ ГГц, т. е. 30 %.
2. Амплитудный баланс между выходными портами 1 $|S_{12}|$ и 3 $|S_{32}|$, 2,3–5,7 или $4,0 \pm 1,7$ дБ.
3. Фазовый баланс между выходными портами 1 и 3 $\text{Arg}(S_{32}/S_{12})$, 89 ± 1 град.
4. Возвратные потери верхней линии и изоляция опорной линии при стандартных 50-омных нагрузках $|S_{11}|$, $|S_{42}|$, более 7 дБ.
5. Возвратные потери опорной линии и изоляция верхней линии при стандартных 50-омных нагрузках $|S_{22}|$, $|S_{31}|$, более 20 дБ.
6. Импеданс опорной и верхней линий 50 и 25 Ом соответственно.

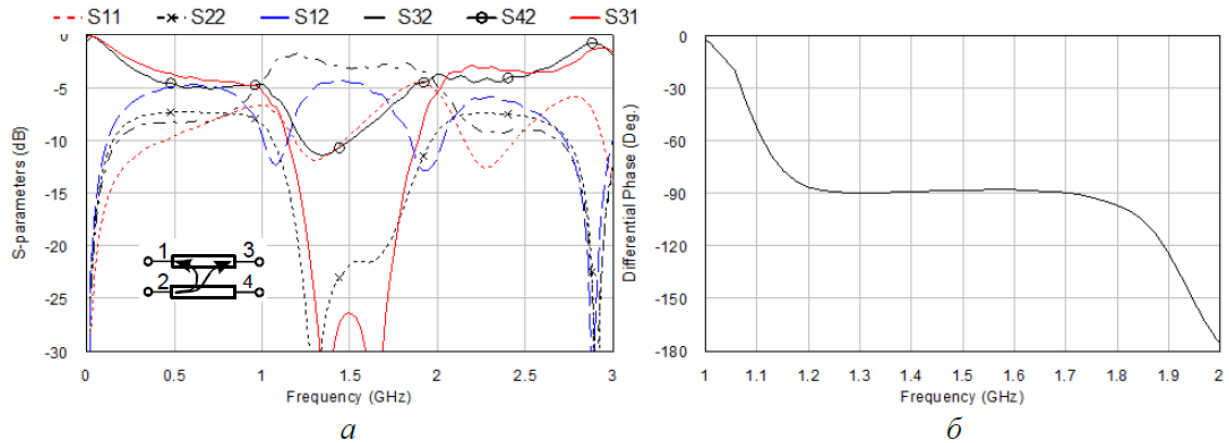


Рисунок 3.29 – Измеренные частотные зависимости модулей S -параметров (а) и разности фаз между 1 и 3 портами ПоНО на СЛ (б)

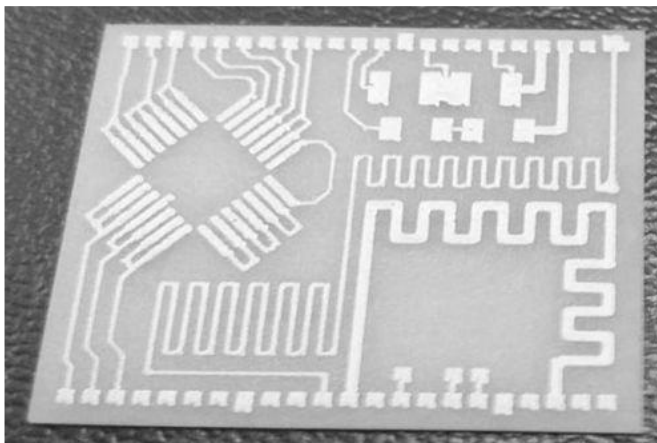
Здесь возвратные потери верхней линии и межпортовая изоляция в опорной линии соответственно (худший случай при стандартных несогласованных нагрузках на портах 1 и 3; рисунок 3.29, а) после математического преобразования (согласования) импеданса портов и исключения перемычек приблизятся к характеристикам первого прогона в левом поле при согласованных нагрузках (см. рисунок 3.27, а).

Остальные четыре параметра (рисунок 3.29, а) – возвратные потери опорной линии $|S_{22}|$; межпортовая изоляция в верхней линии $|S_{13}|$; межлинейные связи на ближнем и дальнем концах $|S_{12}| = |S_{34}|$ и $|S_{14}| = |S_{23}|$ соответственно – при рассогласовании нагрузочных импедансов на портах 1 и 3 изменяются пренебрежимо мало, поэтому эти параметры, измеренные в стандартном 50-омном тракте, не требуют дополнительных математических преобразований.

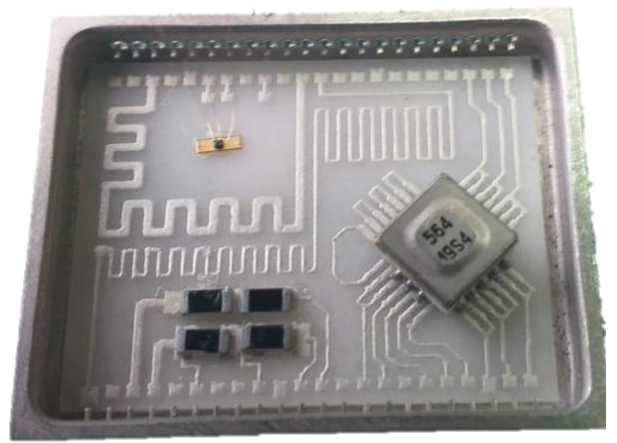
3.3 Изготовление макетов односторонних тестовых плат

В данном разделе представлены результаты исследования возможности изготовления керамических печатных плат на принтере Voltera V-One (поршневое дозирование). В работе были использованы пасты ПСП-2 и ПП-17, производства предприятий ООО «НПП Дельта-пасты» и ООО «Элма-пасты», а также пасты Conductor 2, производства Voltera.

Была проведена печать тест-платы. Топология платы имеет несколько элементов, в том числе монтажные контакты для микросхемы и чип-резисторов, меандры различной с шириной дорожек, ряды внешних контактных площадок с двух сторон платы. Размеры элементов платы выполнены в пределах допуска КД. На рисунке 3.30, а представлен результат изготовления тест-платы с использованием пасты ПСП-2. Далее на тест-плату монтировались радиокомпоненты (рисунок 3.30, б).



а



б

Рисунок 3.30 – Напечатанная тест-плата (а) и в сборе с радиокомпонентами (б)

На рисунке 3.31 показана тест-плата, при печати которой использовалась паста Conductive Ink (Voltera).

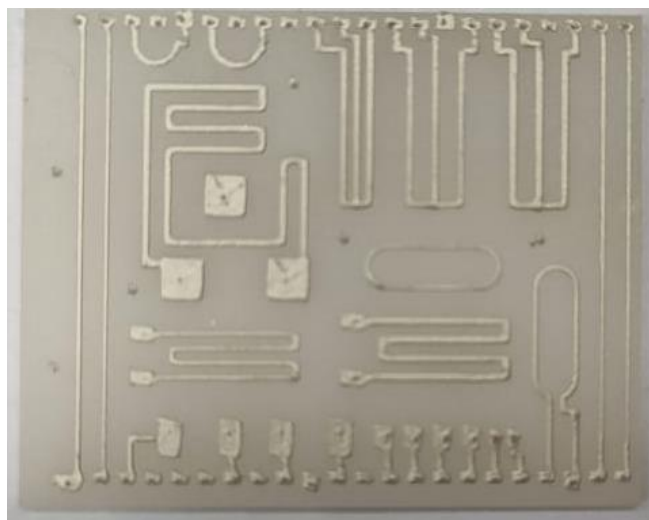


Рисунок 3.31– Тест-плата напечатанная на Voltera V-One

Дефектом топологии, представленной на рисунке 3.31, является образование пиков в центре контактных площадок, которые формируются за счет неравномерного количества проходов дозатора по малой площади. В то время,

как устройство GPD Global исключает образование пиков. Устранение данного недостатка при печати на устройстве Voltera V-One возможно путем корректировки количества проходов, однако не гарантирует полного исключения.

Далее были проведены испытания тест-платы. В результате проведенных испытаний было проведено сопоставление результатов с техническими требованиями, которые используются на предприятии АО «НПЦ «Полюс». Результат сопоставления представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результат испытаний тест-платы

Параметр	Технические требования	Значение фактическое
Удельное поверхностное сопротивление, мкОм/□	2,5–7,0	~2
Электрическое сопротивление между проводниками, Ом	1×10^8	1×10^8
Адгезия проводников, кГС/мм ²	1,2	1,8
Свариваемость, г	7	~20
Воздействие к смене температур (Адгезия)	5 циклов	5 циклов
	1,2	1,8
Испытание на влагостойкость (Уд сопротивление)	2,5-7,0	1,90

В процессе изготовления образцов был выявлен ряд вопросов, подлежащих решению:

- решение вопроса перемешивания пасты и загрузки в картридж дозатора принтера, чтобы избежать появления пузырьков воздуха в объеме пасты и обеспечить однородность нанесенного слоя;

- необходимость изготовления промежуточного технологического рисунка с учетом погрешности нанесения и растекания паст.

Для уменьшения удельного сопротивления возможно дополнительно увеличивать толщину проводников с использованием гальванического наращивания [97]. Результаты исследования гальванического наращивания меди на пластиковые образцы приведены в работах [98–101].

Далее была напечатана SMD-плата. На рисунке 3.32 показан результат печати. Была изготовлена партия SMD-плат в количестве 5 штук.

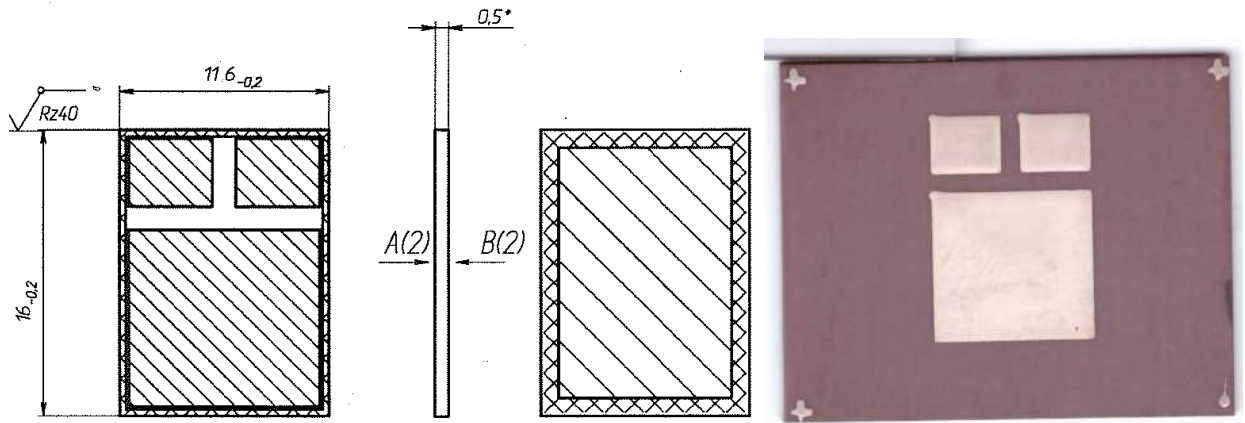


Рисунок 3.32 – SMD-плата

Как видно из рисунка 3.32 на плате имеются дефекты в виде точек в верхнем левом углу каждого элемента. Этот дефект объясняется тем, что в начале печати в дозаторе создается избыточное давление путем нагнетания, отсюда и появление первой капли. После выхода на стационарный режим дозирования первая капля уменьшается, но не исчезает. Удаление дефекта первой точки возможно путем корректировки лазера. В таблице 3.2 приведены испытания SMD-платы.

Таблица 3.2 – Испытания SMD-платы

Параметр	Значение
Визуальный контроль	Поры, царапины, пылинки
Толщина пленки, мкм	18
Отклонение линейных размеров проводников (КД), площадок (Длина, ширина), мм	а) 4,1 x 4,1 (0,3) б) 10,2 x 10,9 (0,3)
Отклонение линейных размеров (КД) зазоров, мм	а) 1,2 (-0,1) б) 1,2 (-0,1)
Среднее отклонение толщины, мкм	16-20 (± 2)
Адгезия, Н/м ² (кГс)	1,8-2,0
Удельное поверхностное сопротивление, Ом/□	0,003
Сопротивление изоляции зазора, Ом	10 ⁸
Электрическая прочность, кВ/мм	1500
Термоциклы, 5 циклов	Адгезия – удовл. Уд сопр. – 0,03 Ом/□, паяемость – удовл.
Влагостойкость, °С/ 96% 4 суток	Адгезия – удовл., уд сопр. – 0,03 Ом/□, паяемость – <u>удовл.</u>

Была проведена печать силовой платы. Напечатанная КПП приведена на рисунке 3.33.

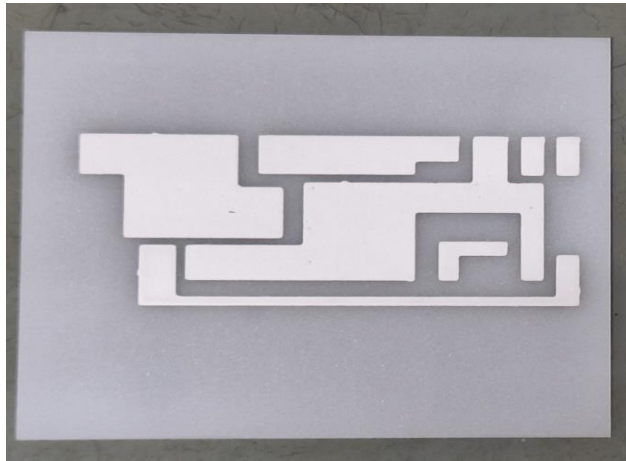


Рисунок 3.33– Напечатанная силовая плата

Напечатанная силовая плата получилась достаточно хорошая, однако по контуру элементов наблюдаются незначительные выступы. В таблице 3.3 приведены испытания платы.

Таблица 3.3 – Испытания силовой платы

Параметр	Значение
Проверка внешнего вида	Выступы в углах, в линиях, большие радиусы во внутренних углах
Проверка размеров (Длина x Ширина x Толщина), мм	60,0 (52 _{-0,2}) 30,0 (22 _{-0,2}) 0,482 +0,016
Проверка допусков элементов, мкм	±20
Удельное поверхностное сопротивление, Ом/кв	0,0016
Сопротивление изоляции, Ом	∅10 ⁹
Проверка адгезии, Н	12
Влагостойкость, 4 суток	Адгезия – удовл., уд сопр. – 0,03 Ом/□, паяемость – удовл.

3.4 Изготовление многослойных тестовых плат

Технология изготовления многослойных печатных плат представляет собой поочередное нанесение проводниковых и диэлектрических слоев с промежуточным вжиганием. Была напечатана многослойная печатная плата [65]. Для печати использовалось сопло с внутренним диаметром 150 мкм. Формирование топологии металлических проводников проводилось проводящей

пастой ПСП-2, Дельта-Пасты (Россия). Паста ПСП-2 является полимерной серебросодержащей с температурой спекания 125 °С в течение 25 минут. Преимуществом данной пасты является низкая температура спекания, что расширяет возможности выбора подложек (стеклотекстолит, полиэтилентерефталат, полиимид и т.д.). Для печати изоляционного слоя применялась диэлектрическая паста ПДЗП-ГП, Дельта-Пасты (Россия). Спекание пасты ПДЗП-ГП проходило при температуре 125 °С в течение 30 минут.

В итоге было напечатано два проводящих слоя и два диэлектрических слоя. Топология диэлектрического слоя содержит окна под контактные площадки на нижележащем проводящем слое. На рисунке 3.34 показаны фотографии слоев при поэтапной печати МПП.

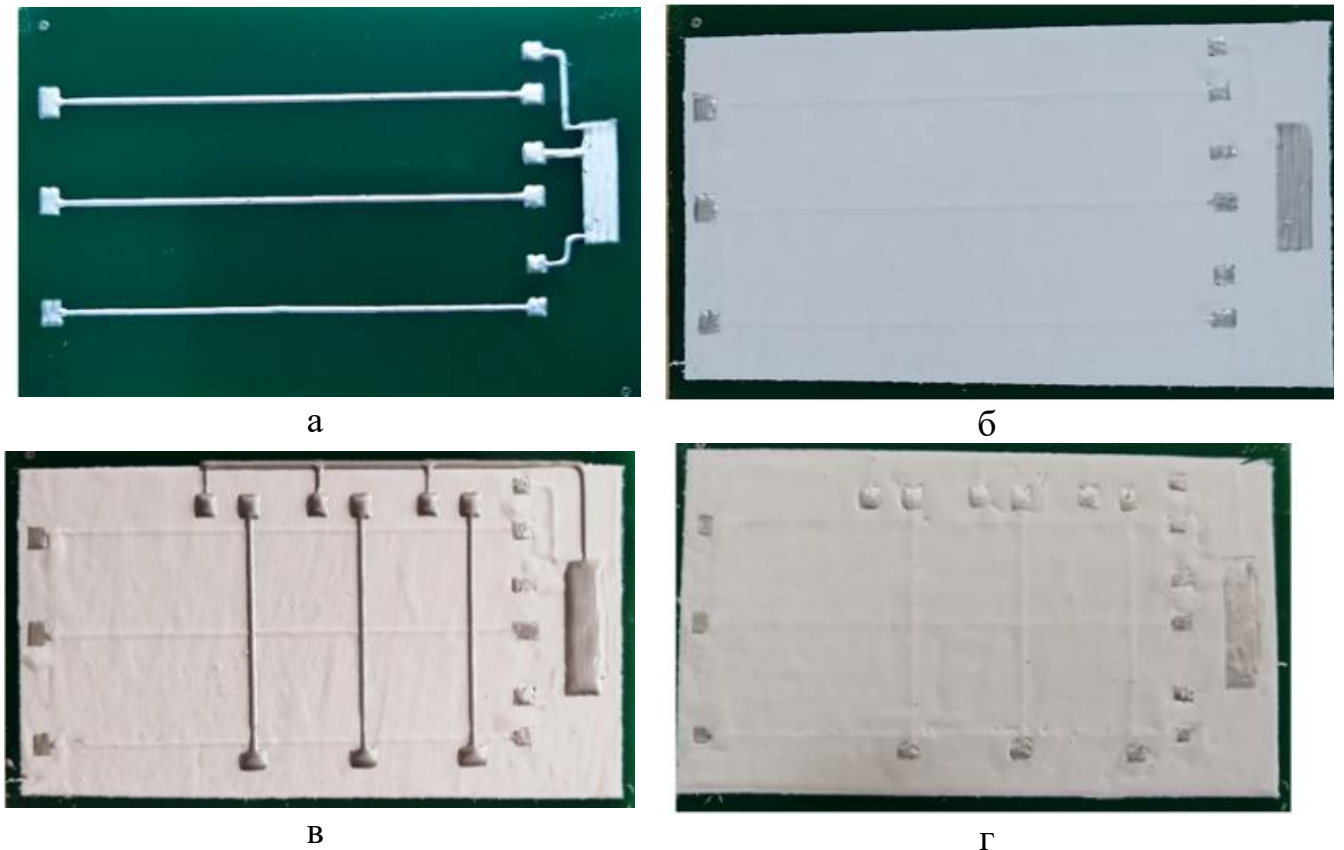


Рисунок 3.34 – Печать МПП: а – печать первого проводящего слоя; б – печать первого диэлектрического слоя; в – печать второго проводящего слоя; г – печать второго диэлектрического слоя

Проводники были напечатаны шириной 0,3 мм, а их толщина составляет 20 мкм. Сопротивление напечатанных проводников составляет 300 мОм. Чтобы обеспечить изоляцию проводников и исключить пробой диэлектрика,

изоляционный слой печатался в два прохода, что позволило увеличить толщину слоя до 35 мкм. На напечатанной плате используется одно переходное отверстие, предназначенное для межслойного соединения проводников и контактных площадок.

После спекания всех слоев на плату монтировались светодиоды. На рисунке 3.35 показана готовая плата и ее функционирование при переключении светодиодов.

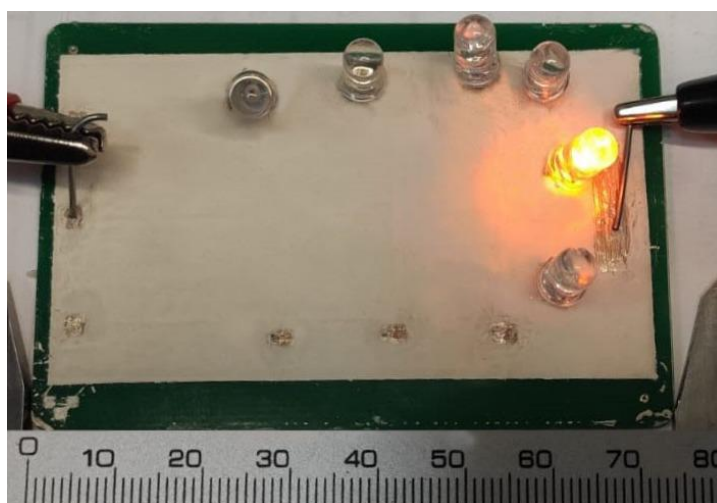


Рисунок 3.35 – МПП в сборе со светодиодами

Для печати многослойной структуры была предоставлена предприятием АО «НПЦ «Полюс» топология планарного трансформатора. Плата планарного трансформатора представляет собой восьмислойную неразборную проводниковую конструкцию с переходными контактами, соединяющими слои, а также с межслойной диэлектрической изоляцией с перфорацией для переходных контактов. Для печати применялись пасты ПП-17 и ПД-12. Для печати использовалось сопло с внутренним диаметром 100 мкм. На рисунке 3.36 показана печать первого слоя.

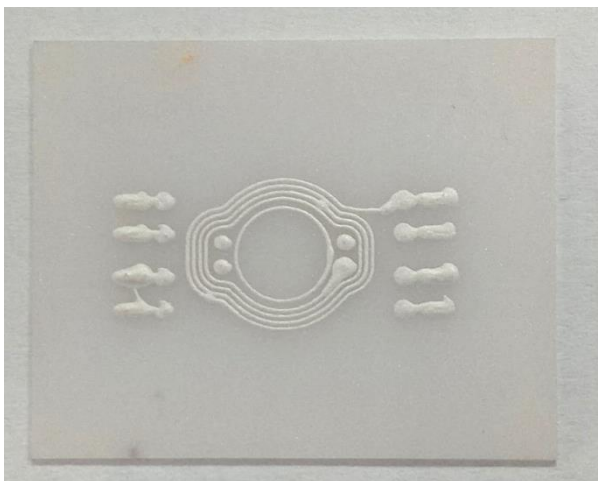


Рисунок 3.36 – Печать первого проводникового слоя

После вжигания был напечатан второй диэлектрический слой. Результат печати показан на рисунке 3.37.

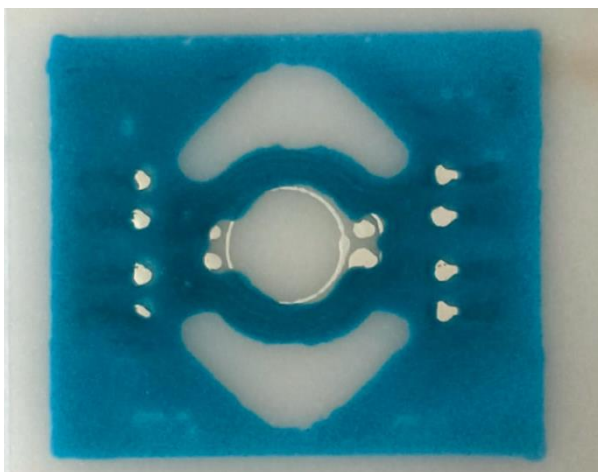


Рисунок 3.37 – Печать диэлектрического слоя

После первой итерации печати были сформулированы следующие предложения по изменению топологии:

- сделать цельные контактные площадки;
- круглые контактные площадки заменить на квадратные;
- утолщение проводников при соединении с контактной площадкой не влияют на ожидаемый конечный результат. Поэтому было предложено сделать одинаковую ширину катушки.

- увеличить размер окон под контактные площадки в диэлектрическом слое.

После корректировки топологии была проведена печать первого проводникового слоя. На рисунке 3.38 показана фотография напечатанного слоя.

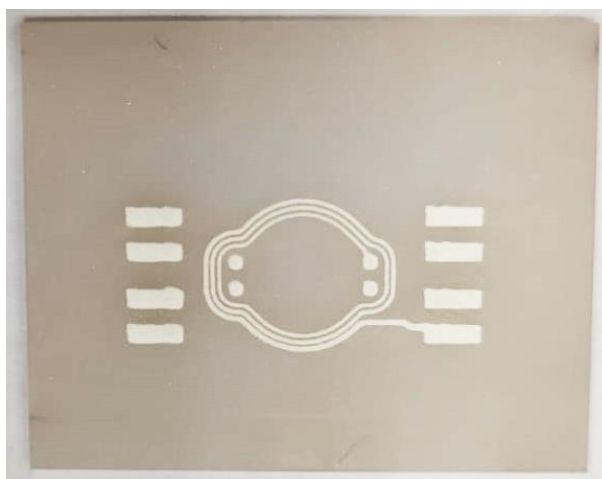


Рисунок 3.38– Первый проводниковый слой трансформатора

После изготовления первого слоя топологии были измерены ширины линии напечатанной катушки в 12 точках, а также измерены толщины и профиль пленок. На рисунке 3.39 показаны измеренные значения, на рисунке, на рисунке 3.40 представлен пример профилограммы линий.

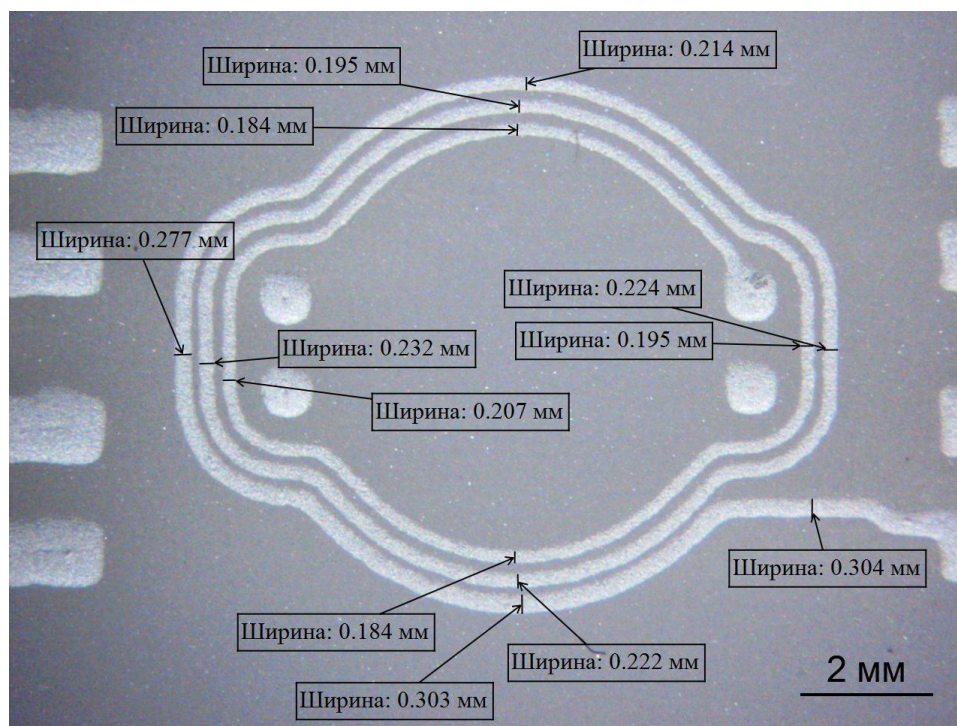


Рисунок 3.39 – Геометрические размеры проводникового слоя

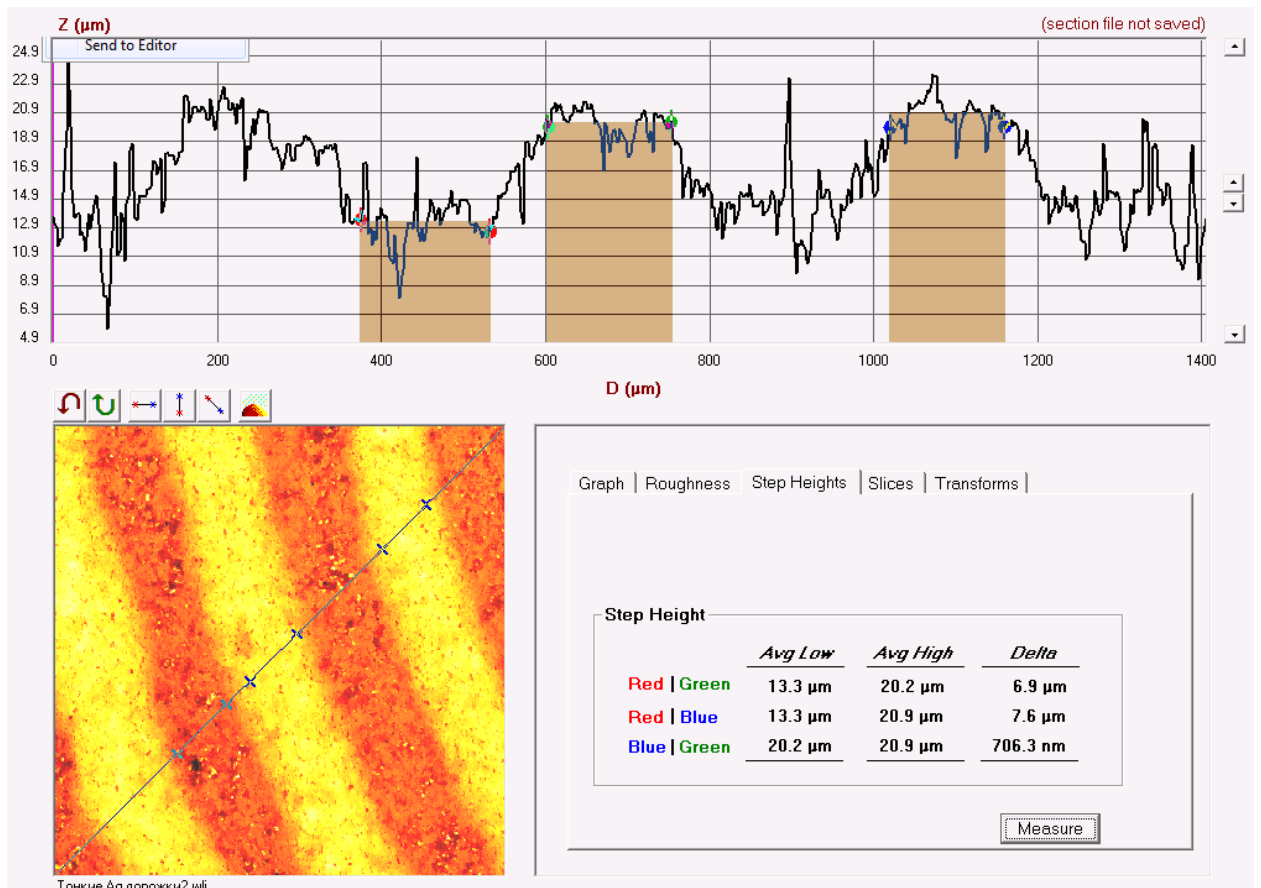


Рисунок 3.40 – Пример профилограммы линий катушки

Следующим слоем был напечатан диэлектрический слой, покрывающий всю площадь трансформатора, за исключением контактных площадок. На рисунке 3.41 представлен результат печати диэлектрического слоя, на котором синий слой – диэлектрик, серебряный слой – проводник.

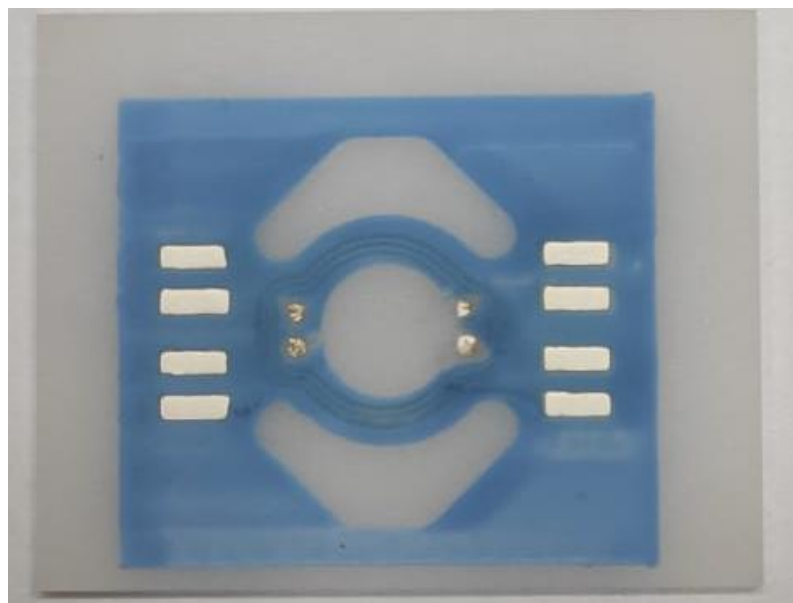


Рисунок 3.41 – Диэлектрический слой

На рисунке 3.42 приведена профилограмма на границе подложка-диэлектрик.

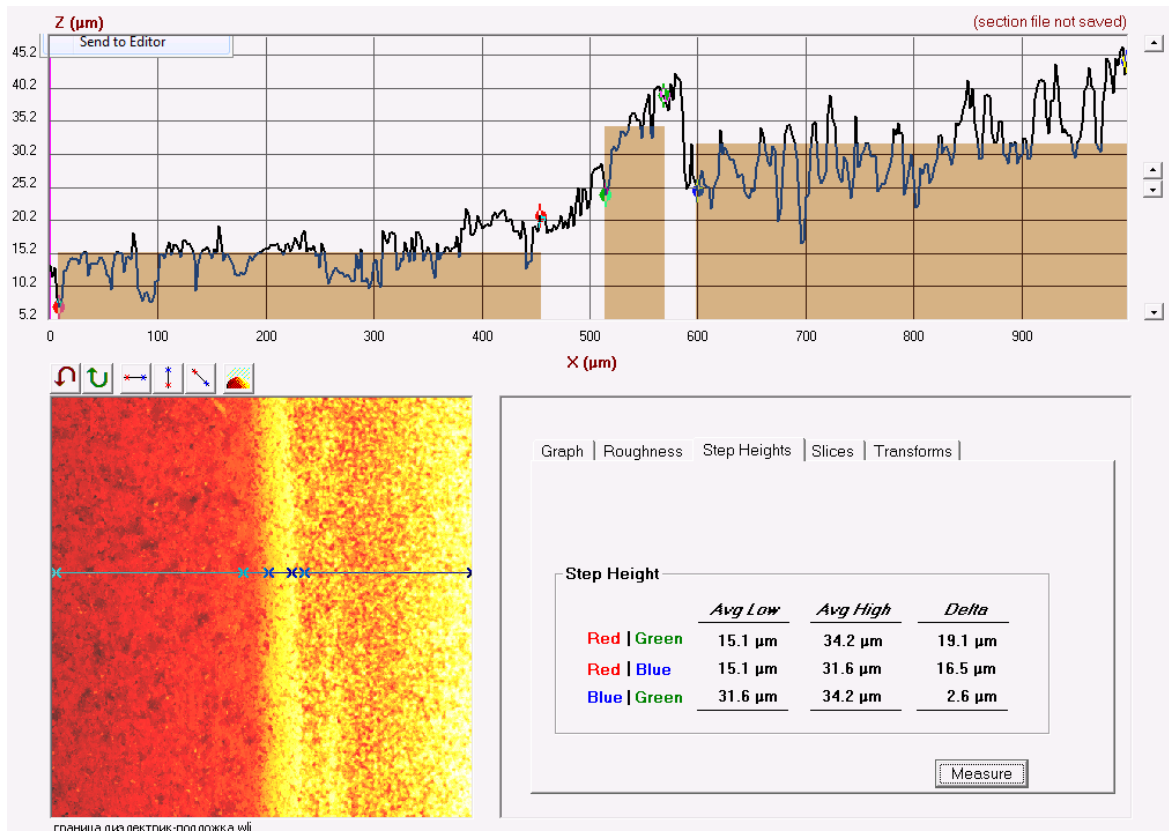


Рисунок 3.42 – Профилограмма диэлектрического слоя

При анализе полученного диэлектрического слоя был сделан вывод о том, что в связи с растеканием пасты окна в слое для дифференциации контактных площадок необходимо увеличить. В соответствии с топологией зазор между проводящей контактной площадкой и диэлектрическим слоем составляет 0,18 мм. Для этого была разработана и напечатана топология, которая учитывает разные размеры окон в диэлектрическом слое. В первом случае окно в диэлектрическом слое было увеличено на 0,085 мм. Во втором случае окно было увеличено в два раза. Результат печати показан на рисунке 3.43.

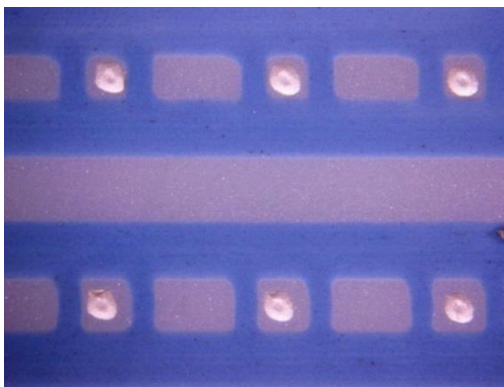


Рисунок 3.43 – Окна в диэлектрическом слое

В результате измерения геометрических размеров был сделан вывод, что с учетом растекания проводниковых и диэлектрических паст достаточно увеличить зазор на 0,085 мм. После увеличения окон в топологии диэлектрического слоя, была проведена печать (рисунок 3.44).

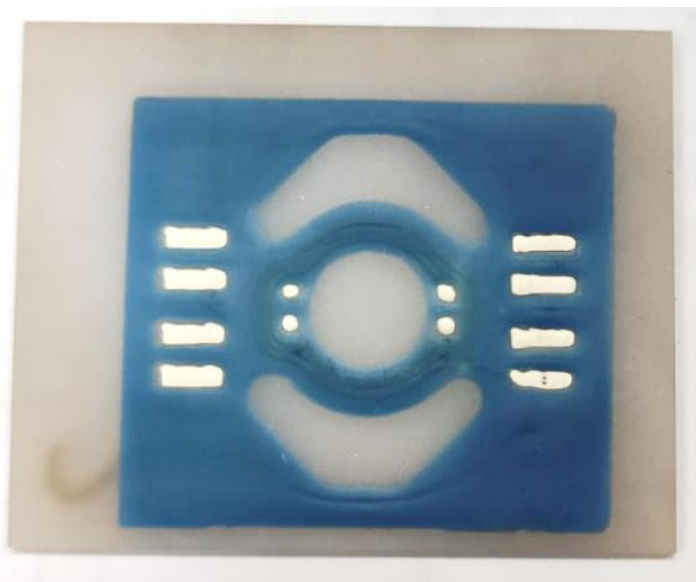


Рисунок 3.44 – Напечатанный по исправленной топологии диэлектрический слой

Так как толщина слоя и его равномерность значительно влияют на качество дозирования паст, а также во избежание поломки сопла отдельной итерацией печати необходимо было наращивать контактные площадки, это видно на профилограмме (рисунок 3.45).

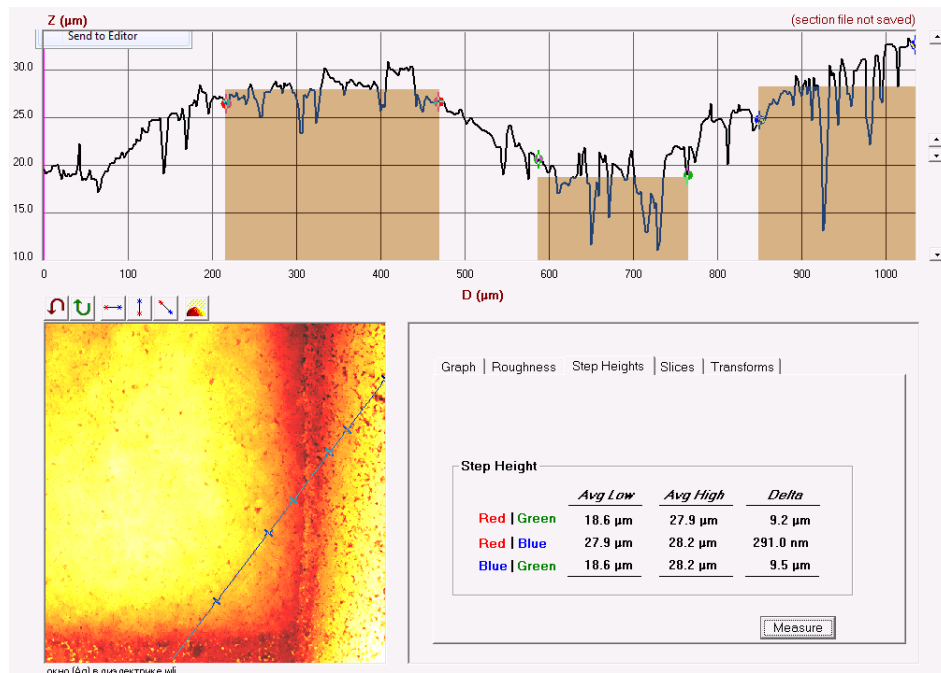


Рисунок 3.45 – Профилограмма контактной площадки и диэлектрического слоя

Как видно из рисунка 2.17 толщины проводящего слоя и диэлектрического, относительно зазора между ними, одинаковы. После наращивая контактных площадок была осуществлена печать второго проводникового слоя. Результат печати приведен на рисунке 3.46.

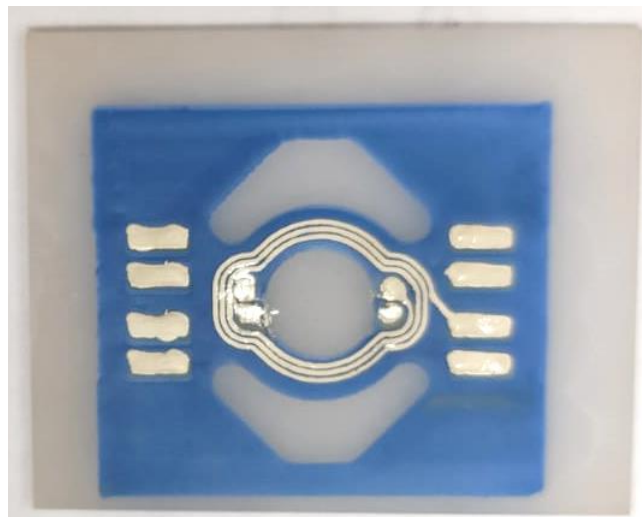


Рисунок 3.46 – Напечатанный второй проводящий слой

После вжигания второго проводникового слоя были измерены электрические параметры катушки: индуктивность $L=155$ нГн и сопротивление $R=2,6$ Ом. В дальнейшей работе планируется напечатать еще семь проводникового слоев.

Была напечатана двухслойная КПП. Данная плата представляет собой два проводниковых слоя и один диэлектрический слой. Общий вид платы представлен на рисунке 3.47.

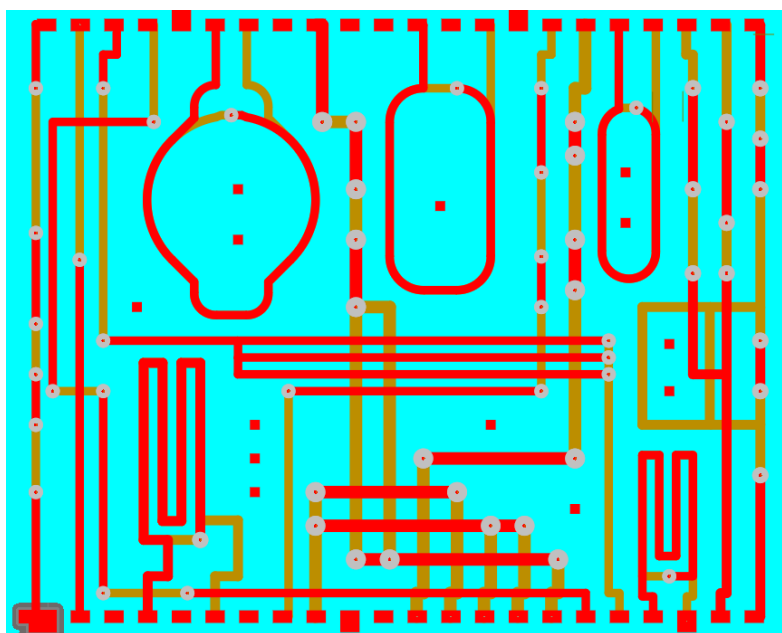


Рисунок 3.47 – Двухслойная плата

Первый слой демонстрирует хорошо напечатанный первый проводящий слой. На данном слое отсутствуют замыкания, разрывы и т.д. После анализа полученной геометрии была продолжена печать. Далее наносился диэлектрический слой. При печати диэлектрического слоя возникли трудности с его нанесением – паста сильно растекалась и перекрывала контактные площадки. Для достижения оптимального распределения пасты по поверхности пришлось вручную корректировать степень заполнения. При анализе полученного рисунка было выявлено, что полученный диэлектрический слой имеет повышенный рельеф в областях, где присутствуют контактные площадки нижележащего слоя.

С наличием полученного рельефа была продолжена печать. Следующим шагом печатались контактные площадки, так называемые столбики, с целью выравнивания толщины. Далее печатался второй проводниковый слой. При печати которого было замечено, что растекание пасты по диэлектрику увеличилось по сравнению с подложкой из-за чего замыкались контактные площадки. Исходя из этого было принято решение отдельно печатать контактные площадки и остальной рисунок печатной платы.

В результате нанесения второго слоя большинство проводников замкнулись между собой, хотя в жидком состоянии до вжигания замыканий не наблюдалось. В результате был сделан вывод о том, что в процессе вжигания паста продолжает растекаться, несмотря на наличие предварительной сушки.

Были проведены испытания полученных тестовых плат, результат которых приведен в таблице 3.4. Проводились испытания по измерению удельного сопротивления проводников, электрическому сопротивлению между проводниками, адгезии и т.д.

Таблица 3.4 – Результат испытаний двухслойной платы

Параметр	Технические требования	Значение фактическое	Примечание
Удельное поверхностное сопротивление, мкОм/кв	2,5–7,0	~2	
Электрическое сопротивление между проводниками, Ом	1×10^8	1×10^8	
Адгезия проводников, кГС/мм ²	1,2	1,8	
Свариваемость, гр.	7	~20	Проволока ЗлПд 2,5 диам 0,050
Стойкость к перепайкам (3 крат)	3 крат	3 крат	ПСР 3-58 ОС
Воздействие к смене температур (Адгезия) (5 циклов)	5 циклов 1,2	5 циклов 1,8	55 +85 С кГС/мм ²
Испытание на влагостойкость (Уд сопротивление)	2,5-7,0	1,90	+40 влажность 98% 4 суток

По результатам испытаний можно сделать вывод о том, что полученные КПП соответствуют техническим требованиям.

На основании полученных результатов и внедрения аддитивной принтерной технологии в АО «НПЦ «Полюс» был создан участок аддитивной печати многослойных керамических печатных плат. Данный результат подтверждается актом внедрения (Приложение А).

3.5 Выводы

Показано, что применение параметров, полученных при экстракции, а также учет растекания пасты при проектировании СВЧ-устройств, обеспечивает совпадение частотных характеристик модели и напечатанных фильтров нижних/верхних частот и полосно-пропускающих.

Предложена и реализована новая структура, совмещающая функции квадратурного моста и трансформатора импеданса, построенная на импеданс-трансформирующем поперечно-направленном ответвителе на основе несимметричных связанных линий с неоднородным диэлектриком. Многослойная структура состоит из микрополосковой линии на органической подложке ($\epsilon=3,4$) с накладным керамическим бруском, имеющим высокую диэлектрическую проницаемость ($\epsilon=46$), на котором линии с горизонтальной лицевой связью, имея трехкратное отношение скоростей нормальных волн, поддерживают режим поперечной направленности и двукратную трансформацию импеданса.

Показано применение аддитивной принтерной технологии для изготовления однослойных и многослойных печатных плат. На основе практического применения технологии приведены результаты послойной печати многослойных печатных плат.

С определенными технологическими режимами аддитивной принтерной технологии получены пассивные СВЧ-устройства, такие как фильтры нижних/верхних частот и полосно-пропускающие, а также направленные ответвители со слабой боковой и сильной лицевой связью со средними вносимыми потерями менее 1 дБ в диапазоне рабочих частот, включая L, S-диапазоны.

Заключение

В диссертационной работе содержится решение проблемы получения однородных и непрерывных полосковых линий по аддитивной принтерной технологии для создания компонентов и узлов антенных систем. Получены следующие основные результаты.

Определено, что при проектировании микрополосковой линии с требуемым характеристическим сопротивлением следует учитывать растекаемость паст на 50 мкм относительно диаметра используемого сопла.

С использованием уравнения Навье-Стокса для двухфазной среды описана математическая модель процесса экструзии паст, которая позволила определить граничные условия применения аддитивной принтерной технологии для изготовления полосковых проводников с достаточной однородностью геометрической формы при создании СВЧ-устройств.

Получены составы диэлектрических паст, вязкость которых адаптирована для использования в аддитивной принтерной технологии изготовления компонентов и СВЧ-устройств.

Показано, что применение параметров, полученных при экстракции, а также учитывая растекание пасты при проектировании СВЧ-устройств, позволило обеспечить совпадение частотных характеристик модели и напечатанных фильтров нижних/верхних частот и полосно-пропускающих.

Предложена и реализована новая структура, совмещающая функции квадратурного моста и трансформатора импеданса, построенная на импеданс-трансформирующем поперечно-направленном ответвителе на основе несимметричных связанных линий с неоднородным диэлектриком. Многослойная структура состоит из микрополосковой линии на органической подложке ($\epsilon=3,4$) с накладным керамическим бруском, имеющим высокую диэлектрическую проницаемость ($\epsilon=46$), на котором линии с горизонтальной лицевой связью, имея трехкратное отношение скоростей нормальных волн, поддерживают режим поперечной направленности и двукратную трансформацию импеданса.

Показана возможность применения аддитивной принтерной технологии для изготовления односторонних и многослойных печатных плат. На основе практического применения технологии приведены результаты послойной печати.

С определенными технологическими режимами аддитивной принтерной технологии получены пассивные СВЧ-устройства, такие как фильтры нижних/верхних частот и полосно-пропускающие, а также направленные ответвители со слабой боковой и сильной лицевой связью со средними вносимыми потерями менее 1 дБ в диапазоне рабочих частот, включая L, S-диапазоны.

Вышесказанное позволяет утверждать, что в работе решена задача обеспечения возможности применения аддитивной принтерной технологии для создания, прототипирования и топологической настройки толсто пленочных компонентов и СВЧ-узлов, что вносит существенный вклад в развитие сферы аддитивного производства электроники и СВЧ-техники для применения в антенных системах.

Список литературы

1 Беляев Б.А. Широкополосная микрополосковая антенна с полосно-пропускающим фильтром на шпильковых резонаторах / Б.А. Беляев, А.С. Волошин, Н.В. Морозов, Р.Г. Галеев // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41. – №. 5. – С. 65–73.

2 Zuo J. An integrated approach to RF antenna-filter co-design / J. Zuo, X. Chen, G. Han, L. Li, W. Zhang // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2009. – Т. 8. – С. 141–144.

3 Шершнев С. И. Особенности LTCC-технологии для СВЧ-применений / С.И. Шершнев, Т.Е. Кокшаров, М.А. Ваганов // Радиотехнические, оптические и биотехнические системы. Устройства и методы обработки информации: Сборник докладов Первой Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 14–22 апреля 2020 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2020. – С. 109–112.

4 Divakaran N. Comprehensive review on various additive manufacturing techniques and its implementation in electronic devices / N. Divakaran, J.P. Das, A.K. PV, S. Mohanty, A. Ramadoss, S.K. Nayak // Journal of Manufacturing Systems. – 2022. – Vol. №. 62. – pp. 477–502.

5 Hassan K. Functional inks and extrusion-based 3D printing of 2D materials: a review of current research and applications / K. Hassan, M. J. Nine, T. T. Tung, N. Stanley, P.L. Yap, H. Rastin, D. Losic // Nanoscale. – 2020. – Vol. 12. – №. 37. – pp. 19007–19042.

6 Tan H.W. 3D printed electronics: Processes, materials and future trends / H.W. Tan, Y.Y.C. Choong, C.N. Kuo, H.Y. Low, C.K. Chua // Progress in Materials Science. – 2022. – Vol. 127. – 100945 p.

7 Гадиров Р.М. Моделирование процесса струйной принтерной печати низковязких жидкостей / Р. М. Гадиров, А.В. Одод, Г.Ю. Назарова, А.Е. Курцевич, Т.Н. Копылова // Известия вузов. Физика. – 2018. – Т. 61. – №. 10. – С. 3–8.

8 Одод А.В. Принтерная печать органических светодиодов на основе спирторастворимых полифлуоренов / А.В. Одод, Т. А. Солодова, А.Е. Курцевич, Д.М. Ильгач, А.В. Якиманский, В. Буртман, Р.М. Гадиров // Известия вузов. Физика. 2017. – Т. 60. – № 12. – С. 167–171.

9 Kim S. Inkjet-printed electronics on paper for RF identification (RFID) and sensing // Electronics. – 2020. – Vol. 9. – №. 10. – pp. 1636.

10 Cook B.S. Inkjet catalyst printing and electroless copper deposition for low-cost patterned microwave passive devices on paper / B.S. Cook, Y. Fang, S. Kim, T. Le, W.B. Goodwin, K.H. Sandhage, M.M. Tentzeris // Electronic Materials Letters. – 2013. – Vol. 9. – pp. 669–676.

11 Abutarboush H.F., Shamim A. Wide frequency independently controlled dual-band inkjet-printed antenna // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2014. – Vol. 8. – №. 1. – pp. 52–56.

12 Kim S. Inkjet-printed antennas, sensors and circuits on paper substrate / S. Kim, B. Cook, T. Le, J. Cooper, H. Lee, V. Lakafosis, M.M Tentzeris // IET microwaves, antennas & propagation. – 2013. – Vol. 7. – №. 10. – pp. 858–868.

13 Shaker G. Inkjet printing of ultrawideband (UWB) antennas on paper-based substrates / G. Shaker, S. Safavi-Naeini, N. Sangary, M.M. Tentzeris, // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2011. – Vol. 10. – pp. 111–114.

14 RFID-метка [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/RFID> (дата обращения 01.03.2022).

15 Rida A., Yang L., Tentzeris M.M. Design and characterization of novel paper-based inkjet-printed UHF antennas for RFID and sensing applications / Proc. IEEE Int. Antennas Propag. Symp. – USA. – pp. 2749–2752.

16 Cook B.S. Inkjet-printed, vertically-integrated, high-performance inductors and transformers on flexible LCP substrate / IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., – Jun. 2014, – pp. 1–4.

17 Merilampi S.L. The Effect of Conductive Ink Layer Thickness on the Functioning of Printed UHF RFID Antennas / S.L. Merilampi, T. Bjorninen, A. Vuorimaki, L. Ukkonen, P. Ruuskanen, L. Sydanheimo // Proceedings of the IEEE. – Vol. 98, №. 9, September 2010. – pp. 1610–1619.

18 Abutarboush H.F., Shamim A. Wide frequency independently controlled dual-band inkjet-printed antenna // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2014. – Vol. 8. – №. 1. – pp. 52–56.

19 Tentzeris M.M. Inkjet-printed paper/polymer-based RFID and Wireless Sensor Nodes: The final step to bridge cognitive intelligence, nanotechnology and RF? / M.M. Tentzeris; A. Rida; A. Traille; H. Lee; V. Lakafosis; R. Vyas // 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium. – 2011.

20 Pongpaibool P, Wallada W., Siwamogsatham S. A Thickened-and-Widened Feed Dipole Antenna for Printed UHF RFID // Third International Conference on Consumer Electronics: National Electronics and Computer Technology Center. – Berlin. –2013. – pp. 93–97.

21 Pongpaibool P, Wallada W., Siwamogsatham S. A Thickened-and-Widened Feed Dipole Antenna with an Inductive Matching Loop for a Printed UHF RFID Tag // National Electronics and Computer Technology Center. – 2014. – pp. 2092–2096.

22 Haerinia M., Noghianian S. Design of Hybrid Wireless Power Transfer and Dual Ultrahigh-Frequency Antenna System // URSI EM Theory Symposium. –2019. – p 4.

23 Haerinia M., Noghianian S. A Printed Wearable Dual-Band Antenna for Wireless Power Transfer // Sensors 2019 (19). – pp. 10.

24 Paracha K.N. Low-Cost Printed Flexible Antenna by Using an Office Printer for Conformal Applications / K.N. Paracha, S.K.A. Rahim, H.T. Chattha, S.S. Aljaafreh, S.Rehman, Y.C Lo // International Journal of Antennas and Propagation. – 2018. – pp. 8.

25 Weremczuk J. The ink-jet printing of microstrip lines on ferroelectric ceramic-polymer composites and its characterization in sub-THz range / J. Weremczuk,

G. Tarapata, R. Jachowicz // Proc. SPIE 8902, Electron Technology Conference – 2013. – Poland. – April 2013. – pp. 89021V-1–89021V-6.

26 Friederich A. Microstructure and microwave properties of inkjet printed barium strontium titanate thick-films for tunable microwave devices / A. Friederich, C. Kohler, M. Nikfalazar, A. Wiens, M. Sazegar, R. Jakoby, W. Bauer, J.R. Binder // Journal of the European Ceramic Society 2014. – 34.– pp. 2925–2932.

27 Azucena O. Inkjet Printing of Passive Microwave Circuitry / O. Azucena; J. Kubby; D. Scarbrough; C. Goldsmith // 2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – 2008. – pp. 1075–1078.

28 Blanco-Angulo C. Low-cost direct-writing of silver-based ink for planar microwave circuits up to 10 GHz / C/ Blanco-Angulo; A. Martínez-Lozano; J. Arias-Rodríguez; A. Rodríguez-Martínez; J.M. Vicente-Samper; J.M. Sabater-Navarro //IEEE Access. – 2023. – VOL. 11. – C. 4010–4022.

29 Li M. Compact multilayer bandpass filter using low-temperature additively manufacturing solution / M. Li, Y. Yang, F. Iacopi, M. Yamada, J. Nulman //IEEE Transactions on Electron Devices. – 2021. – VOL. 68. – №. 7. – pp. 3163–3169.

30 Zhou H. A triple-layer structure flexible sensor based on nano-sintered silver for power electronics with high temperature resistance and high thermal conductivity / H. Zhou, K. Guo, S. Ma, C. Wang, X. Fan, T. Jia //Chemical Engineering Journal. – 2022. – Vol. 432. – pp. 134431.

31 Correia V. Design and fabrication of multilayer inkjet-printed passive components for printed electronics circuit development / V. Correia, K.Y. Mitra, H. Castro, J.G. Rocha, E. Sowade, R.R. Baumann, S. Lanceros-Méndez //Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Vol. 31. – pp. 364–371.

32 Hardin J.O. All-printed multilayer high voltage capacitors with integrated processing feedback / J.O. Hardin, C.A. Grabowski, M. Lucas, M.F. Durstock, J.D. Berrigan //Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 27. – pp. 327–333.

33 Gupta N., Mishra A. Selection of substrate material for hybrid microwave integrated circuits (HMICs) // ENERGETIKA. 2016. – Vol. 62. – No. 1–2. – pp. 78–86.

34 Leenen M.A.M. Printable electronics: Flexibility for the future / M.A.M. Leenen, V. Arning, H. Thiem, J. Steiger, R. Anselmann // Phys. Status Solidi A. – Vol. 206. – No. 4. – pp. 588–597.

35 Beedasy V., Smith P.J. Printed Electronics as Prepared by Inkjet Printing: Review / MDPI: Materials 2020. – Vol. 13. – pp. 704.

36 Wong K.L. Compact and broadband microstrip antennas // NY. John Wiley & Sons. 2002, – pp. 325.

37 Диэлектрики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://femto.com.ua/articles/part_1/1096.html (дата обращения: 24.07.2024).

38 Li Z. Synthesis and characterization of PTFE/(Na_xLi_{1-x})_{0.5}Nd_{0.5}TiO₃ composites with high dielectric constant and high temperature stability for microwave substrate applications / Z. Li, Y. Yuan, M. Yao, L. Cao, B. Tang, S. Zhang // Ceramics International. – 2019. – VOL. 45. – №. 17. – pp. 22015–22021.

39. Huang X. Conductive substrates-based component tailoring via thermal conversion of metal organic framework for enhanced microwave absorption performances / X. Huang, Y. Ma, H. Lai, Q. Jia, L. Zhu, J. Liu, B. Quan // Journal of Colloid and Interface Science. Part 2., 15 February 2022. – pp. 323–1333

40 Устинов А., Кочемасов В., Хасьянова Е. Ферритовые материалы для устройств СВЧ-электроники. Основные критерии выбора //Электроника: наука, технология, бизнес. – 2015. – №. 8. – С. 86–92.

41 Копылова О.С., Урядов Н.В. Применение ферритов в сверхвысокочастотных устройствах //Лучшая научно-исследовательская работа 2018. – 2018. – С. 41–44.

42 Wiklund J. A review on printed electronics: Fabrication methods, inks, substrates, applications and environmental impacts / J. Wiklund, A. Karakoc, T. Palko, H. Yigitler, K. Ruttik, R. Jantti, J. Paltakari // Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2021. V. 5. – №. 3. – pp. 89.

43 Tan H.W. Metallic nanoparticle inks for 3D printing of electronics / H.W. Tan, J. An, C.K. Chua, T. Tran, //Advanced Electronic Materials. – 2019. – Vol. 5. – №. 5. – pp. 1800831.

44 Varghese J., Sebastian M.T. Dielectric Inks //Microwave Materials and Applications 2V Set. – 2017. – pp. 457–480.

45 Zhou Y., Han S. T., Roy V.A.L. Nanocomposite dielectric materials for organic flexible electronics //Nanocrystalline Materials. – Elsevier. – 2014. – pp. 195-220.

46 Kaija K. Inkjetting dielectric layer for electronic applications / K. Kaija, V. Pekkanen, M. Mantysalo, S. Koskinen, J. Niittynen, E. Halonen, P. Mansikkamaki //Microelectronic Engineering. – 2010. – Vol. 87. – №. 10. – pp. 1984–1991.

47 Khan Y. A new frontier of printed electronics: flexible hybrid electronics / Y. Khan, A. Thielens, S. Muin, J. Ting, C. Baumbauer, A.C. Arias, //Advanced Materials. – 2020. – Vol. 32. – №. 15. – pp. 1905279.

48 Gaikwad A.M. Identifying orthogonal solvents for solution processed organic transistors / A.M. Gaikwad, Y. Khan, A.E. Ostfeld, S. Pandya, S. Abraham, A.C, Arias // Organic Electronics. – 2016. – Vol. 30. – pp. 18–29.

49 Chang J. Fully printed electronics on flexible substrates: High gain amplifiers and DAC / J. Chang, X. Zhang, T. Ge, J. Zhou //Organic Electronics. – 2014. – Vol. 15. – №. 3. – pp. 701–710.

50 Friederich A. Microstructure and microwave properties of inkjet printed barium strontium titanate thick-films for tunable microwave devices / A. Friederich, C. Kohler, M. Nikfalazar, A. Wiens, M. Sazegar, R. Jakoby, W. Bauer, J.R. Binder // Journal of the European Ceramic Society 2014. – 34.– pp. 2925–2932.

51 Hutchings I M., Martin G.D. (ed.). Inkjet technology for digital fabrication. – Chichester, UK: Wiley, 2013. – pp. 372.

52 Perelaer J., Schubert U.S. Novel approaches for low temperature sintering of inkjet-printed inorganic nanoparticles for roll-to-roll (R2R) applications //Journal of Materials Research. – 2013. – Vol. 28. – №. 4. – pp. 564–573.

53 Lall, P., Effect of Sintering Time and Sintering Temperature on the Mechanical and Electrical Properties of Aerosol-Jet Additively Printed Electronics / P. Lall, N. Kothari, A. Abrol, S. Ahmed, J. Suhling, B. Leever, S. Miller //2019 18th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). – IEEE, – 2019. – pp. 956–964.

54 Tan H.W., Tran T., Chua C.K. A review of printed passive electronic components through fully additive manufacturing methods //Virtual and Physical Prototyping. – 2016. – V. 11. – №. 4. – pp. 271–288.

55 Sun J. Recent advances in controlling the depositing morphologies of inkjet droplets / J. Sun, B. Bao, M. He, H. Zhou, Y. Song //ACS applied materials & interfaces. – 2015. – V. 7. – №. 51. – pp. 28086–28099.

56 Goh G.L., Additively manufactured multi-material free-form structure with printed electronics / G.L. Goh, S. Agarwala, G.D. Goh, H.K.J. Tan, L. Zhao, T.K. Chuah, W.Y. Yeong //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – V. 94. – №. 1. – pp. 1309–1316.

57 Hoerber J. Approaches for additive manufacturing of 3D electronic applications / J. Hoerber, J. Glasschroeder, M. Pfeffer, J. Schilp, M. Zaeh, J. Franke //Procedia CIRP. – 2014. – V. 17. – pp. 806–811.

58 M. Gilliam, Handbook of Manufacturing Engineering and Technology (Ed: A.Y.C. Nee), Springer, London. – 2015. – pp. 99–124.

59 Rajan K. Silver nanoparticle ink technology: state of the art / K. Rajan, I. Roppolo, A. Chiappone, S. Bocchini, D. Perrone, A. Chiolerio //Nanotechnol. – 2016. – Vol. 9. – pp. 1–13.

60 Труфанова Н.С., Артищев С.А. Методика экстракции электрических частотных параметров проводящих чернил // САПР и моделирование в современной электронике: Сборник научных трудов V Международной научно-практической конференции, Брянск, 21–22 октября 2021 года. – Брянск: Новый формат, 2021. – С. 54–57.

61 Труфанова Н.С., Труфанова А.С. Определение пропускной способности поршневого дозатора проводящих паст // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2020. – №. 1-1. – С. 157–160.

62 Trufanova N.S. Technique for extraction of electric frequency parameters of conductive ink / N.S. Trufanova, S.A. Artishchev, E.R. Ragimov, A.G. Loschilov, A.M. Malysenko // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. – Vol. 2291. – №. 1. – pp. 012015.

63 Gadirov R.M. Numerical modeling of the process of extrusion of high-viscosity pastes / R.M. Gadirov, A.V. Borisov, N.S. Trufanova, E.R. Ragimov, S.A. Artishchev // Eurasian Physical Technical Journal. – 2024. – V. 21. – № 1(47). – pp. 114–123.

64 Gadirov R.M. Simulation of extrusion of high-viscosity pastes by a piston dosing mechanism / R.M. Gadirov, A.V. Borisov, N.S. Trufanova, S.A. Artishchev, A.G. Loschilov // Russian Physics Journal. – 2024. – V. 67. – pp. 179–187.

65 Trufanova N.S. Focusing of a paste flow upon exposure to an external electromagnetic field / N.S. Trufanova, A.V. Borisov, R.M. Gadirov, S.A. Artishchev, E.R. Ragimov // Russian Physics Journal. – 2024. – V. 67. – № 2. – P. 229–235.

66 Труфанова Н.С. Применение аддитивной принтерной технологии для изготовления многослойных печатных плат / Н.С. Труфанова, Э.Р. Рагимов, С.А. Артищев, А.Г. Лоцилов // Нанотехнологии: разработка, применение - XXI век. – 2022. – Т. 14. – № 4. – С. 37–44.

67 Труфанова А.С., Труфанова Н.С. Исследование технологии изготовления диэлектрической пасты // Сборник избранных статей по материалам международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2021». – Томск: Издательство "В-Спектр". – 2021. – Ч. 1. – С. 165–168.

68 Чепко Т.А., Труфанова Н.С., Труфанова А.С. Изготовление диэлектрических паст с заданными характеристиками // Материалы докладов международной

научно-технической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск: Издательство «В-Спектр». – 2021. – С. 154–157

69 Матвеев В. Н., Кирсанов Е. А. Вязкость и структура дисперсных систем // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. – 2011. – VOL. 52. – №. 4. – С. 243–276.

70 The future additive electronic| Voltera [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.voltera.io/> (дата обращения: 24.07.2024).

71 Михайлов М.М. Оптические свойства и радиационная стойкость печатного покрытия на основе серебра. М.М. Михайлов, А.Н. Лапин, С.А. Юрьев, С.А. Артищев, В.А. Горончко, Н.С. Труфанова, Д.С. Федосов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2023. – Т. 66. – № 10. – С. 23–30.

72 Mikhailov M.M. On the possibility of obtaining thermal control coatings for spacecraft by printing / M.M. Mikhailov, A.N. Lapin, S.A. Yuryev, V.A. Goronchko, S.A. Artishchev, N.S. Trufanova, O.A. Mikhailova, D.S. Fedosov // Materials Chemistry and Physics. – 2023. – Vol. 310. – pp. 128472.

73 Kwon K.S. Review of digital printing technologies for electronic materials / K.S. Kwon, M.K. Rahman, T.H. Phung, S.D. Hoath, S. Jeong, J.S. Kim // Flexible and Printed Electronics. – 2020. – VOL. 5. – №. 4. – pp. 043003.

74 Li W. Extrusion-on-demand methods for high solids loading ceramic paste in freeform extrusion fabrication / W. Li, A. Ghazanfari, M.C. Leu, R.G. Landers // Virtual and Physical Prototyping. – 2017. – Vol. 12. – №. 3. – pp. 193–205.

75 Chen X. B., Kai J. Modeling of positive-displacement fluid dispensing processes // IEEE transactions on electronics packaging manufacturing. – 2004. – V. 27. – No. 3. – pp. 157–163.

76 Bruneaux J., Therriault D., Heuzey M.C. Micro-extrusion of organic inks for direct-write assembly // Journal of Micromechanics and Microengineering. – 2008. – Vol. 18. – №. 11. – pp. 115020.

77 Chauchat J. SedFoam-2.0: a 3-D two-phase flow numerical model for sediment transport / J. Chauchat, Z. Cheng, T. Nagel, C. Bonamy, T. J. Hsu // *Geoscientific Model Development*. – 2017. – V. 10. – No. 12. – pp. 4367–4392.

78 Schmidt G.A. Viscosity characterization and flow simulation and visualization of polytetrafluoroethylene paste extrusion using a green and biofriendly lubricant / G.A. Schmidt, Y.J. Lin, Y. Xu, D. Wang, G. Yilmaz, L.S. Turng, // *Polymer Engineering & Science*. – 2021. – V. 61. – No. 4. – pp. 1050–1065.

79 Shen F. Composite electrode ink formulation for all solid-state batteries / F. Shen, M.B. Dixit, W. Zaman, N. Hortance, B. Rogers, K.B. Hatzell // *J. Electrochem. Soc.* – 2019. – V. 166. – No. 14. – pp. A3182.

80 Slistan-Grijalva A., Classical theoretical characterization of the surface plasmon absorption band for silver spherical nanoparticles suspended in water and ethylene glycol / A. Slistan-Grijalva, R. Herrera-Urbina, J.F. Rivas-Silva, M. Ávalos-Borja, F.F. Castellón-Barraza, A. Posada-Amarillas, // *Physica E Low Dimens. Syst. Nanostruct.* – 2005. – V. 27. – No. 1–2. – pp. 104–112.

81 El-Said M., Bhuse V., Arendsen A. An empirical study to investigate the effect of air density changes on the DSRC performance // *Procedia computer science*. – 2017. – V. 114. – pp. 523–530.

82 Mikhailov M.M. Optical Properties of the Dielectric Coating Manufactured by an Additive Method / M.M. Mikhailov, A.N. Lapin, S.A. Yuryev, S.A. Artishchev, V.A. Goronchko, N.S. Trufanova, O.A. Mikhailova, D.S. Fedosov // *Russian Physics Journal*. – 2024. – T. 67. – №. 1. – pp. 87–93.

83 Mikhailov M.M. Radiation Resistance of a Spacecraft Coating Obtained by 3D Printing / M.M. Mikhailov, S.A. Artishchev, A.N. Lapin, S.A. Yuryev, V.A. Goronchko, N.S. Trufanova, O.A. Mikhailova, D.S. Fedosov // *Cosmic Research*. – 2024. – T. 62. – №. 3. – pp. 242–246.

84 Mikhailov M.M. Study of the photo-stability of ceramic thermal control coating based on aluminium oxide / M.M. Mikhailov, S.A. Artishchev, A.N. Lapin, S.A. Yuryev,

V.A. Goronchko, N.S. Trufanova, D.S. Fedosov // *Ceramics International*. – 2024. – Т. 50. – №. 21. – pp. 41039–41043.

85 Михайлов М.М. Получение радиационностойких отражающих покрытий методом принтерной печати / М.М. Михайлов, С.А. Артищев, А.Н. Лапин, С.А. Юрьев, В.А. Горончко, Н.С. Труфанова, О.А. Михайлова, Д.С. Федосов // *Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии: Тезисы докладов Международной конференции, Томск, 11–14 сентября 2023 года.* – Томск: Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, 2023. – С. 496–497.

86 Карева К.В. Комплексное исследование свойств замещенной никелевой шпинели, полученной по короткой технологической схеме / К.В. Карева, А.С. Сураев, Н.С. Труфанова, Д. В. Вагнер // *Двадцать восьмая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ-28): Материалы конференции. Информационный бюллетень. Сборник тезисов докладов.* В 1 т., Новосибирск, 01–06 апреля 2024 года. – Новосибирск: Ассоциация студентов-физиков и молодых учёных России, 2024. – С. 123–124.

87 Программное обеспечение для управления инфракрасной камерой спекания печатных плат, изготовленных аддитивным методом № 2023688146 / Рагимов Э.Р., Труфанова Н.С., Артищев С.А., Гадиров Р.М.

88 Рагимов Э.Р. Автоматизированный стенд для измерения прецизионных линейных перемещений / Э.Р. Рагимов, С.А. Артищев, Н. С. Труфанова, Н.В. Пасека // *Материалы докладов международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления».* – Томск: Издательство «В-Спектр». – 2022. – С. 93–95.

89 Рагимов Э.Р. Оценка производительности двухэкструдерной системы дозирования вязких паст / Э.Р. Рагимов, Н.С. Труфанова, А.Т. Игнатьева, С.А. Артищев // *Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР по материалам*

международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2023». – Томск: Издательство «В-Спектр». – 2023. – С. 203–206.

90 Рагимов Э.Р., Труфанова Н.С., Артищев С.А. Разработка принтера для изготовления печатных плат аддитивным методом с применением прецизионного устройства дозирования материалов / Н. С. Труфанова, // Сборник статей XVI Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения». – 2023. – С. 257–259.

91 APCB PRINTER V. 2.1.1 № 2024662982 / Артищев С.А., Макаров И.М., Логинов К., Труфанова Н.С., Рагимов Э.Р.

92 Сычев А.Н. Поперечно-направленный ответвитель на связанных линиях с накладным керамическим бруском / А.Н. Сычев, С.А. Артищев, Н.Ю. Рудый, Н.С. Труфанова // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2024. – Vol. 7. – № 3. – pp. 473–484.

93 Trufanova N.S. Manufacturing of Hybrid Integrated Circuits Using Additive Printer Technology / N.S. Trufanova, S.A. Artishchev, A.G. Loschilov, E.R. Ragimov // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russian Federation, 2022. – pp. 1–5.

94 Труфанова Н.С., С.А. Артищев, Черкашин А.В. Переходные отверстия многослойных печатных плат по аддитивной принтерной технологии // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР по материалам международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2023». – Томск: Издательство «В-Спектр». – 2023. – С. 199–203.

95 Сержантов А.М. Резонансные полосковые структуры и частотно-селективные устройства на их основе с улучшенными характеристиками: дис. д-ра техн. наук. – Красноярск, 2015. – 316 с.

96 Труфанова Н.С., Труфанова А.С. Исследование возможности изготовления планарных компонентов методом принтерной печати // Сборник избранных статей

по материалам международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2020». – Томск: Издательство "В-Спектр". – 2021.– Ч. 1. – С. 162–164.

97 Программа для управления блоком питания гальванической ванны: программа для ЭВМ №2022669436 / С.А. Артищев, И.Г. Ковалев, Н.С. Труфанова, С.А. Айрих.

98 Ivanchikova E.A. Microwave carbon elements / E.A. Ivanchikova; A.G. Loschilov; I.A. Ekimova; N.S. Trufanova; V.N. Fedorov; A.S. Trufanova // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2020), Virtual, Tomsk, Russia, 14–26 сентября 2020 года. – Virtual, Tomsk, Russia: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 1349-1353.

99 Иванчикова Е.А., Труфанова А.С., Труфанова Н.С. Отработка технологии полировки пластиковых изделий, изготовленных методом FDM-печати // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2020. – №. 1-1. – С. 133–135.

100 Труфанова Н.С., Труфанова А.С., Иванчикова Е.А. Исследование возможности применения токопроводящего пластика для 3D-печати СВЧ-устройств // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2020. – №. 1-1. – С. 160–162.

101 Артищев С.А. Автоматизированная гальваническая ванна с функцией контроля плотности тока / С.А. Артищев, С.С. Петров, И.Г. Ковалев, Н.С. Труфанова // Материалы докладов международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск: Издательство «В-Спектр». – 2022. – С. 103–105.

Приложение А. (справочное)
Акты о внедрении результатов работы



АКТ

об использовании (внедрении) результатов диссертационной работы

Труфановой Натальи Сергеевны

в АО «НППЦ «Полус»

Конструкторско-технологическая секция научно-технического совета АО «НППЦ «Полус» рассмотрела и составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Труфановой Натальи Сергеевны на соискание ученой степени кандидата технических наук использованы при выполнении мероприятий по плану новых технологий, а именно:

- технология аддитивной принтерной печати керамических печатных плат;
- технологическая установка аддитивного принтерного изготовления функциональных узлов и элементов интегральной электроники;
- технологическая документация (технические требования к керамическим печатным платам (КПП), технологический процесс изготовления и программа и методики испытаний КПП).

Объекты внедрения были получены в рамках выполнения программы совместных исследований «Разработка оборудования и технологии принтерного изготовления печатных плат», договор №25/760 от 16.12.2021. Изготовлена тестовая керамическая печатная плата со следующими характеристиками: минимальная ширина проводника – 200 мкм, минимальный зазор между проводниками – 200 мкм, толщина проводника – 20 мкм и удельным сопротивлением равным 2 мОм/□. Достижение таких характеристик обеспечивает возможность изготовления КПП для силовых монтажных плат, вторичных источников питания и т.д.

В результате внедрения аддитивной принтерной технологии в АО «НППЦ «Полус» создан участок аддитивной печати многослойных керамических печатных плат. Применение аддитивного принтерного изготовления КПП позволит сократить время и трудоемкость изготовления изделий предприятия. Полученные результаты возможно использовать при создании образцов аппаратуры, разрабатываемой в АО «НППЦ «Полус».

Начальник отдела №12

А.П. Ануфпиев

Начальник цеха №12

С.Е. Маракулин

Ведущий инженер-технолог

В.П. Парначев

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе и
международной деятельности
П.В. Сенченко
2024 г.

М.П.



АКТ

об использовании (внедрении) результатов диссертационной работы
Труфановой Натальи Сергеевны
в учебном процессе кафедры конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники
(ТУСУР)

Комиссия в составе проректора по учебной работе и международной деятельности ТУСУР Сенченко П.В., исполняющего обязанности заведующего кафедрой КУДР Артищев С.А. и доцента каф. КУДР Славникова М.М. составила настоящий акт о том, что в учебном процессе каф. КУДР ТУСУР (г. Томск) использованы результаты диссертационной работы Труфановой Натальи Сергеевны на соискание ученой степени кандидата технических наук в виде изготовленных по аддитивной принтерной технологии планарных компонентов для исследования частотных характеристик пассивных СВЧ-устройств.

Разработанные и напечатанные Труфановой Н.С. планарные компоненты используются при выполнении лабораторных работ в учебном процессе при подготовке студентов по направлению 11.03.03 – «Конструирование и технология электронных средств».

Таким образом, внедрение планарных компонентов в учебный процесс позволяет студентам кафедры КУДР осваивать особенности проектирования и функционирования СВЧ-узлов, изготовленных с применением современных технологий производства.

И.о. зав. кафедрой КУДР, канд.техн. наук

 С.А. Артищев

Доцент каф. КУДР

 М.М. Славникова