

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники (ТУСУР)

Н.С. Рагимова, С.А. Артищев, Е.И. Тренкаль

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ПЕЧАТНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие

Томск
2026

УДК 621.38:539.23
ББК 32.971.32-046.22
Р14

Рецензент

Малютин Н.Д., профессор кафедры конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры ТУСУР, доктор технических наук, профессор

Рагимова, Н.С., Артищев, С.А., Тренкаль, Е.И.

Р14 Проектирование устройств печатной электроники: учебное пособие / Н.С. Рагимова, С.А. Артищев, Е.И. Тренкаль. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и. радиоэлектроники, 2026. – 164 с.

В учебном пособии рассматриваются ключевые вопросы аддитивного изготовления современной печатной электроники. Особое внимание уделяется составу и реологическим свойствам паст. Рассматриваются вопросы проектирования топологии планарных компонентов и СВЧ-узлов.

Пособие предназначено для студентов и аспирантов технических направлений подготовки, а также может быть полезно специалистам в области аддитивных технологий.

Одобрено на заседании кафедры КУДР, протокол №261 от 06.02.2026

УДК 621.38:539.23
ББК 32.971.32-046.22

© Рагимова Н.С. 2026
© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2026

Оглавление

Введение	4
1. Аддитивные технологии изготовления печатной электроники.....	5
1.1 Бесконтактная подача функционального материала	8
1.2 Контактная печать	14
Вопросы для самопроверки	17
1.3 Принтеры для изготовления печатной электроники	18
Вопросы для самопроверки	31
2. Классификация и анализ функциональных материалов, применяемых в аддитивной технологии печати	33
2.1 Реологические характеристики материалов для печати.....	37
2.2 Функциональные печатные материалы	54
Вопросы для самопроверки	61
3. Численное моделирование процесса экструзии паст	62
3.1 Описание физико-математической модели процесса экструзии	63
3.2 Результаты численного моделирования	67
3.3 Экспериментальное подтверждение результатов моделирования	71
Вопросы для самопроверки	73
3.4 Проводниковые пасты для печати полосковых линий	74
3.5 Определение разрешающей способности аддитивной принтерной технологии изготовления полосковых проводников.....	78
Вопросы для самопроверки	84
4. Конструкции и характеристики компонентов и полосковых устройств.....	86
4.1 Проектирование резисторов	86
4.2 Проектирование катушек индуктивности	93
4.3 Проектирование конденсаторов.....	100
4.5 Изготовление макетов односторонних тестовых плат.....	103
4.6 Изготовление многослойных тестовых плат	104
Вопросы для самопроверки	106
5. Применение аддитивной принтерной технологии для изготовления компонентов и СВЧ-устройств.....	108
5.1 Фильтры	116
Вопросы для самопроверки	129
5.2 Примеры применения аддитивной принтерной технологии для изготовления печатной электроники.....	130
Вопросы для самопроверки	145
Список использованных источников	148

Введение

Современный инженер-конструктор электронных устройств должен не только моделировать и рассчитывать, но и предвидеть, какие материалы и технологии могут быть использованы в его проекте. Данное пособие поможет разобраться в текущих возможностях аддитивной электроники, анализе материалов и методах проектирования, адаптированных под будущие вызовы отрасли.

Аддитивная печать позволяет послойно наносить проводящие, резистивные и диэлектрические материалы, создавая сложные структуры без использования дорогостоящих сетчатых трафаретов и фотошаблонов для травления. Это открывает новые горизонты в разработке гибких, растяжимых и биоинтегрируемых печатных плат и гибридных интегральных схем.

Развитие аддитивной печати электронных компонентов неразрывно связано с разработкой новых материалов. Традиционные чернила и пасты для струйной или экструзионной печати являются композитами с использованием наноматериалов, графена, металлоорганических соединений и полимерных матриц, обладающими высокой проводимостью, прочностью и термостойкостью.

Ключевая проблема при печати пастами через сопла малого диаметра (например, 100 мкм) – неконтролируемое растекание материала после осаждения. Степень растекания определяет не только ширину отдельного проводника, но и возможность объединения соседних элементов в сплошной полигон. На практике это выражается в выборе оптимальной топологии: печать «встык», с перекрытием или с зазором. Экспериментальные исследования показывают, что даже при стабильной толщине осажденных линий изменение межцентрового расстояния существенно влияет на целостность покрытия.

Данное учебное пособие предназначено для студентов и аспирантов, изучающих современные методы аддитивных технологий. В основу пособия положены результаты работ, выполненных на оборудовании для печати функциональными материалами. Каждый раздел содержит иллюстративный материал (включая микрофотографии напечатанных образцов) и вопросы для самопроверки.

Авторы надеются, что знакомство с материалом позволит читателю не только освоить конкретные технологические приемы, но и выработать системный подход к контролю качества при аддитивном формировании проводящих структур.

Авторы благодарны своим коллегам за помощь в подготовке материалов пособия.

1. Аддитивные технологии изготовления печатной электроники

Технологии непрерывно обновляются по мере развития науки и техники [1,2]. На данный момент тенденции развития современных производственных технологий включают три основных направления:

- переход от дискретных (циклических) технологий к непрерывным (поточным) производственным процессам, как наиболее эффективным и экономичным;
- внедрение замкнутых (безотходных) технологических циклов в составе производства, как наиболее экологически нейтральных;
- повышение наукоемкости новейших технологий, как наиболее приоритетных в бизнесе [3, 4].

Традиционные методы изготовления электроники основаны на субтрактивной технологии, которая имеет различные недостатки, включая необходимость химической подготовки, сложность технологического процесса, высокая стоимость оборудования, большое количество отходов. Напротив, аддитивная технология считается наиболее перспективной из-за явных преимуществ: сокращения времени производства и затрат на оборудование, а также снижения количества химических отходов, что позволяет изготавливать электронику с применением широкого диапазона гибких подложек, таких как ткани, бумага и полимерные пленки, что обеспечивает создание электронных компонентов и новых функциональных устройств.

При создании электронного компонента по технологии печати важную роль играет выбор материала и оборудования для его нанесения (рисунок 1.1), которые определяют основные параметры устройства, такие как:

- 1) ширина печатного элемента и геометрия структуры;
- 2) зазор между элементами структуры;
- 3) рабочий температурный диапазон;
- 4) электрические свойства;
- 5) механические свойства;
- 6) химическая стойкость;
- 7) способность к дальнейшей металлизации;
- 8) плотность поверхностного монтажа элементов;
- 9) длительность цикла производства и др.



Рисунок 1.1 – Факторы, определяющие качество печати

Факторы, определяющие качество печати, взаимосвязаны между собой. Для успешной реализации технологии печати электронных средств требуется их совместное исследование и решение задач по оптимизации печатных материалов и методов их нанесения.

Материалы для печати – сырье, необходимое для создания электронного узла или его элемента. Под материалами понимают: основание для печати (подложку), на которое проводится печать, и собственно функциональный материал, отвечающий за свойства изделия. Функциональный материал – это некоторое твердое вещество в виде нано- или микрочастиц и/или полимеров, взвешенных или растворенных в жидком либо текучем веществе. В зависимости от вязкости функциональный материал подразделяется на чернила и пасты. Функциональные материалы обладают проводящими, полупроводящими или диэлектрическими свойствами.

Оборудование для печати (установка или комплекс установок) позволяет дозировать, то есть выдавать частями, функциональный материал в требуемом объеме и в соответствии с заданным цифровым шаблоном рисунка печатной платы.

Области применения печатной электроники, требования к качеству изделия, особенности чернил и паст – все это привело к тому, что стали разрабатываться различные способы дозирования материала. Для систематизации имеющихся данных и выявления ключевых факторообразующих свойств, а также преимуществ и недостатков каждого из рассматриваемых способов приводится их классификация.

Одним из наиболее важных критериев классификации технологий печати является способ нанесения материалов на основание (см. рисунок 1.2): печать с использованием шаблонов или прямая подача функционального материала. В указанном толковании, печать при использовании шаблонов – значит с применением форм (трафаретов, заготовок), прямая подача – создание рисунка печатной платы из электронного файла.

Технологии печати при использовании шаблонов находят широкое применение в промышленном крупносерийном производстве: трафаретная печать (screen printing), флексография (flexography), офсетная печать (offset printing), глубокая печать (gravure printing) [8,9]. Однако следует отметить, что трафаретная печать нашла более широкое применение при изготовлении единичных электронных изделий или небольших партий.

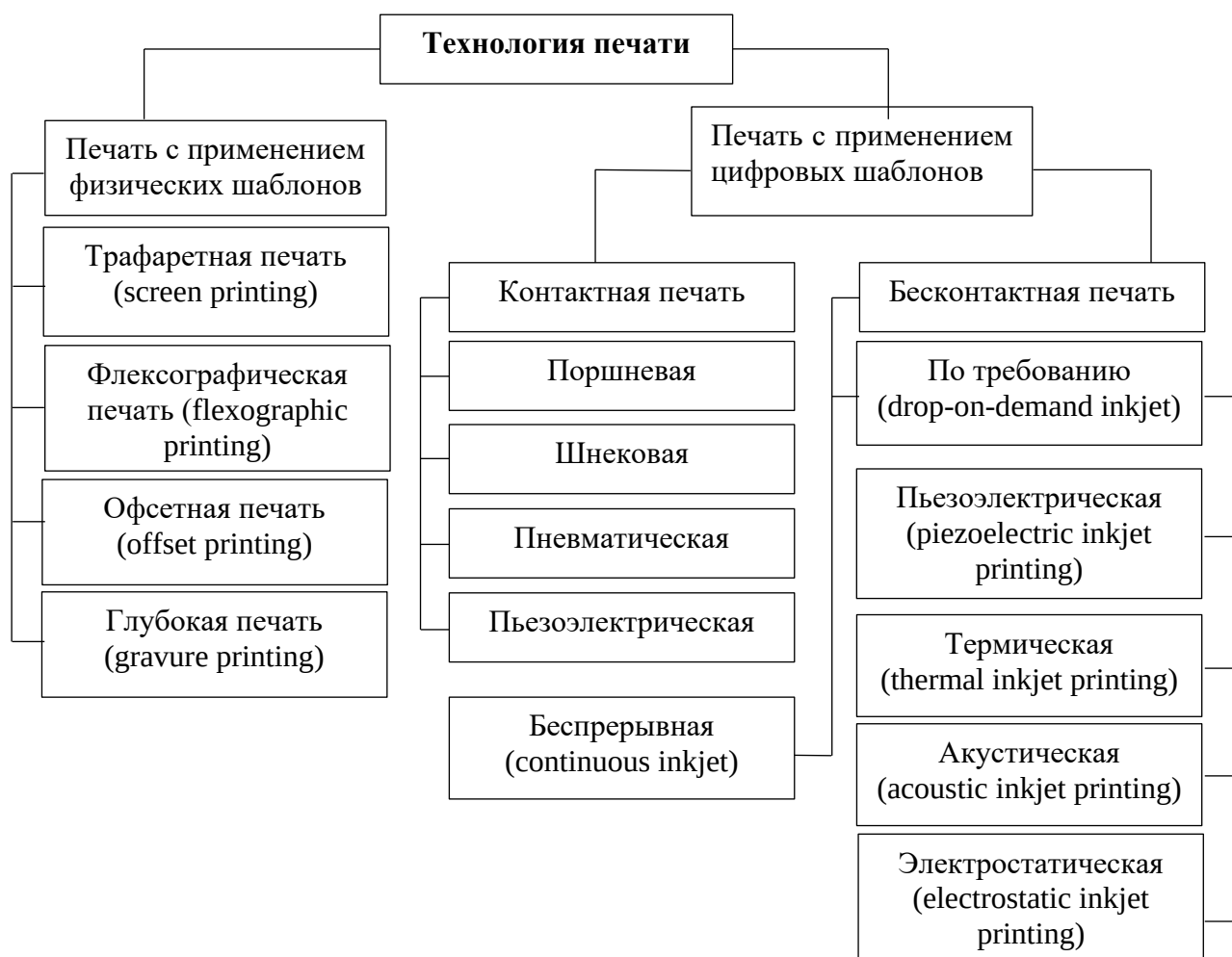


Рисунок 1.2 – Классификация технологии печати по способу нанесения функциональных материалов на основание изделия

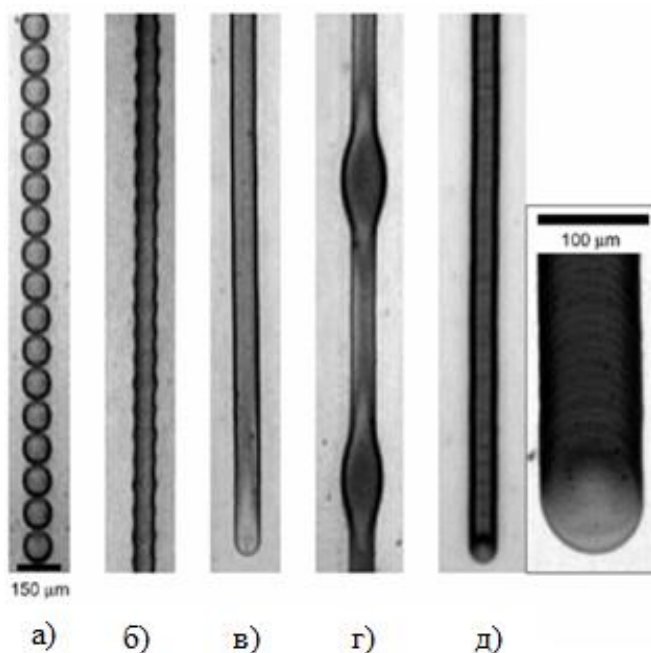
Для печати при прямой подаче функционального материала используются специализированные устройства (принтеры). Принтерная технология печати в сравнении с печатью при использовании шаблонов представляется более перспективной, так как позволяет исключить издержки, связанные с применением различных форм, штампов или трафаретов. Согласно предложенной классификации (см. рисунок 1.2), подача функционального материала в принтерной технологии разделяется на контактную и бесконтактную печать.

1.1 Бесконтактная подача функционального материала

При бесконтактной печати во время технологического процесса формирования рисунка печатной платы исключается взаимодействие поверхности подложки и печатающего элемента оборудования. Нанесение функционального материала происходит путем дистанционного образования капель и их выброса. Для данной технологии свойственно формирование растрового изображения (перекрытие-наложение отдельных капель).

Бесконтактную печать разделяют на непрерывную печать (continuous inkjet, CIJ) и печать по требованию (drop-on-demand inkjet, DoD). Главным отличием DoD от CIJ является то, что при DoD-печати капля летит по «прямой» траектории и обеспечивается контроль выдачи объема, а при CIJ-печати выдача капель непрерывна, а направление полета капли регулируется сторонним воздействием, например, электростатическим полем.

В целом, бесконтактные технологии печати основаны на едином фундаментальном принципе [9–22]: в печатающей головке создается избыточное давление в камере, заполненной жидким материалом с низкой вязкостью (обычно от 1 до 500 сПа), за счет применения специфического внешнего воздействия, характерного для каждого типа технологии – термического, пьезоэлектрического или электростатического. В камере формируется некоторый малый объем и выталкивается в выходное отверстие, то есть под действием избыточного давления жидкость вылетает из сопла в виде капли. После этого в камере создается пониженное давление, материал в объеме капли заполняет камеру. Цикл формирования и выброса капли повторяется с высокой скоростью, которая определяет производительность головки. Пример напечатанных линий приведен на рисунке 1.3.



- а) линии, состоящие из отдельных капель; б) линии, имеющие волнообразный характер;
в) равномерные линии, г) линии с уширением; д) линии с наложением капель.

Расстояние между каплями уменьшается слева направо

Рисунок 1.3 – Внешний вид напечатанных линий [10]

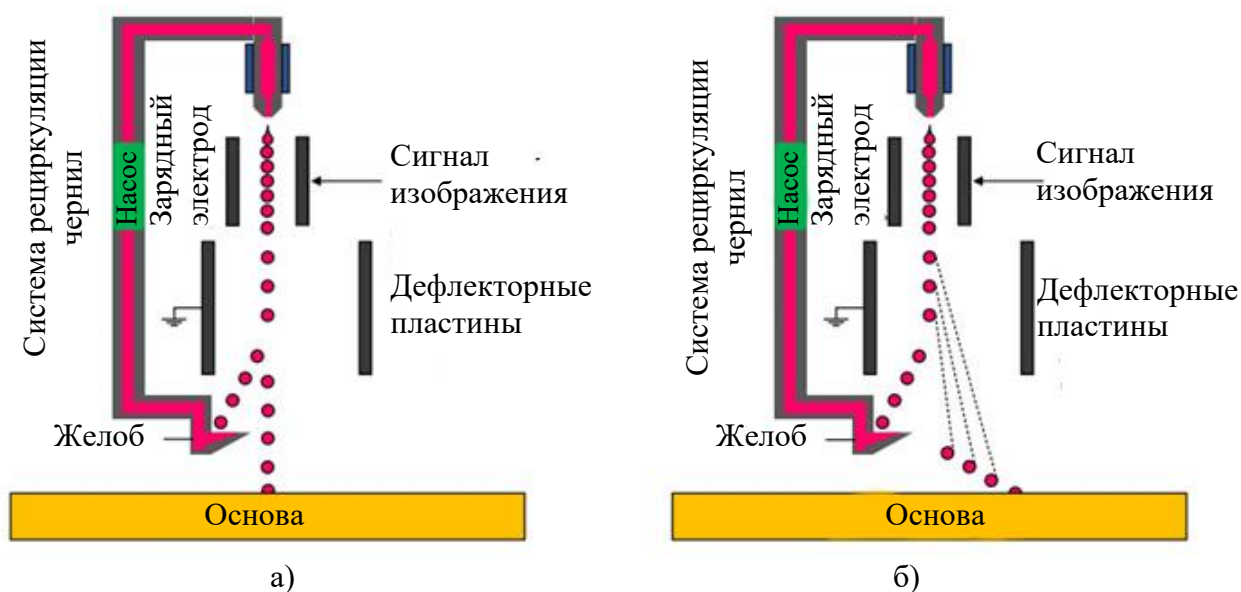
Преимуществами бесконтактной печати являются:

- формирование капель диаметром от 10 до 150 мкм;
- широкий спектр производственных масштабов, от прототипирования до крупномасштабного промышленного производства;
- потребление чернил и потери материала минимальны.

Однако бесконтактная технология имеет следующие недостатки:

- ограничение по используемым материалам для печати (по вязкости и химическому составу);
- загрязнение поверхности, вызванное неравномерным распылением материалов;
- закупоривание выходных отверстий печатающих головок;
- деградация чернил под термическим воздействием;
- возникновение эффекта «кофейного кольца»;
- неравномерность рельефа поверхности.

Метод струйной печати СІЈ можно дополнительно разделить на систему непрерывной струйной печати с двойным отклонением и систему непрерывной струйной печати с множественным отклонением (рисунок 1.4) [11].



а – система непрерывной струйной печати с бинарным отклонением; б – система непрерывной струйной печати с множественным отклонением

Рисунок 1.4 – Схема технологического процесса СИУ-печати

Хотя использование СИУ подразумевалось для изготовления печатной электроники [12], большинство его применений по-прежнему ограничено обычными приложениями, такими, как маркировка товаров. Большинство устройств печатной электроники основаны на струйной печати DoD.

Метод струйной печати DoD можно разделить на несколько различных типов в зависимости от его механизма активации: термический, пьезоэлектрический, акустический и электростатический (рисунок 1.5) [13]. Основной принцип работы различных типов струйной печати DoD заключается в формировании импульса давления, чтобы вытолкнуть каплю чернил из сопла [14].

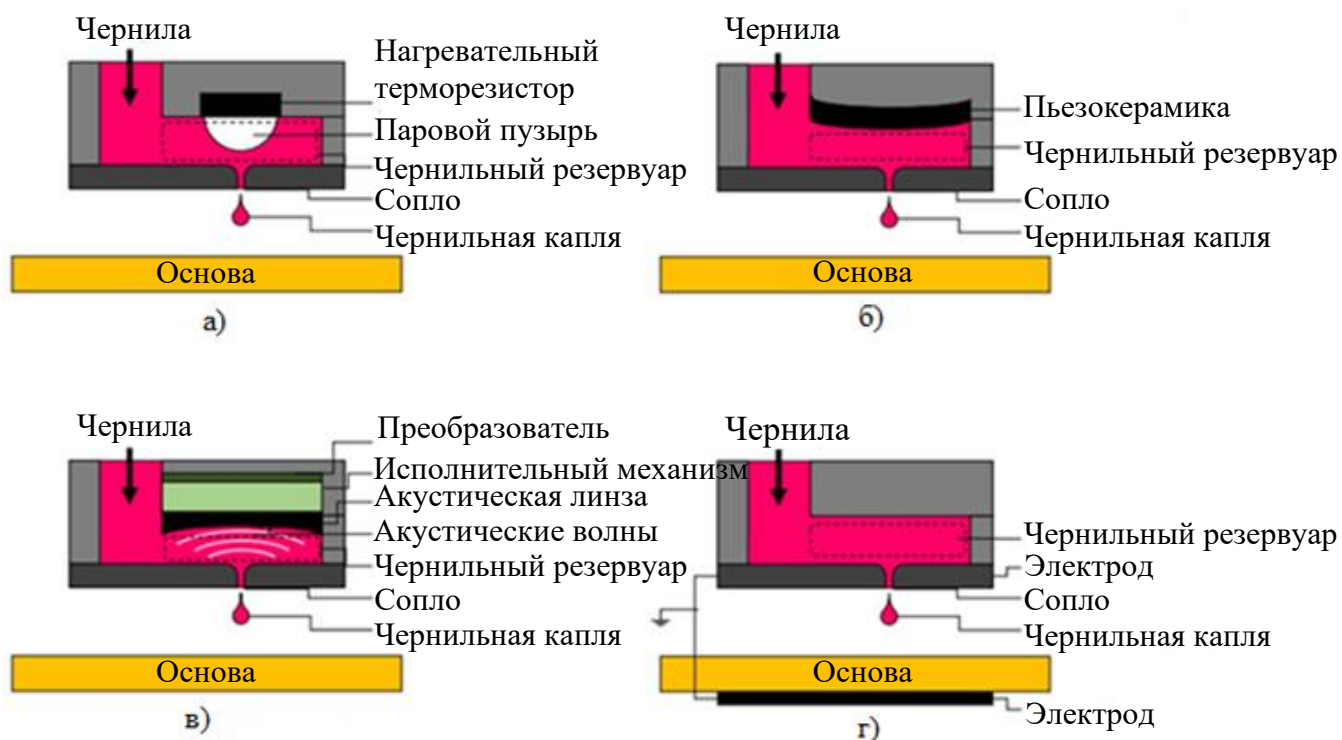
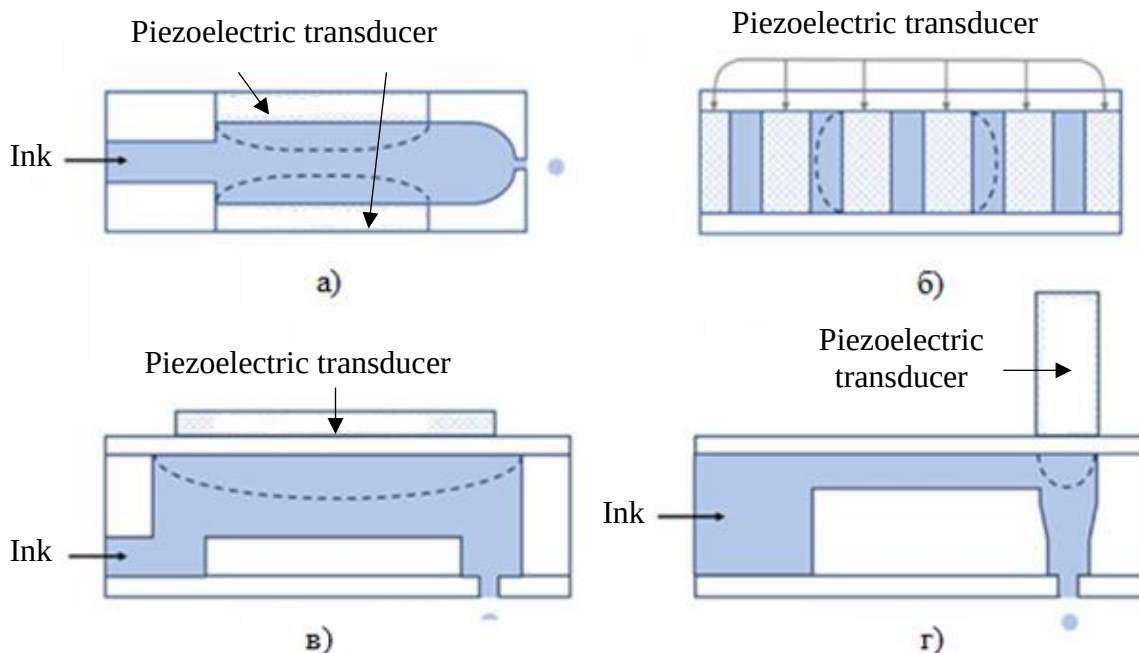


Рисунок 1.5 – Виды струйной печати

Тепловые и пьезоструйные печатающие головки широко используются для печати DoD. Для печатной электроники струйная печать с пьезоэлектрическим преобразователем (на основе цирконата-титаната свинца (PZT)) является более широко используемой технологией, поскольку она позволяет печатать различными чернилами на основе растворителя [15]. На рисунке 1.6 приведены типы струйных печатающих головок, основанных на пьезоэлектрическом преобразователе.



а) выдавливание, б) сдвиг, в) изгиб, г) толкание

Рисунок 1.6 – Типы струйных печатающих головок с пьезоэлектрическим преобразователем

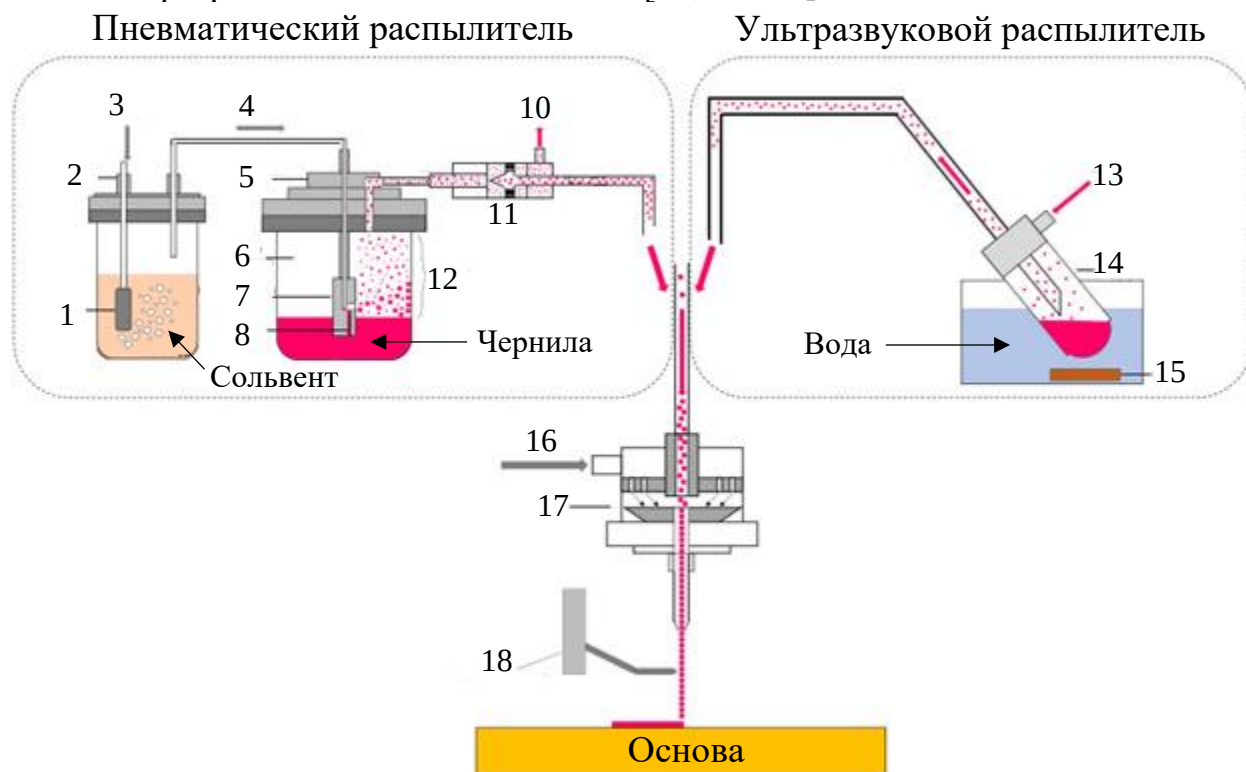
При пьезоструйной печати размер структуры на подложке зависит от диаметра капле, создаваемых печатающей головкой. Диаметр капли определяется диаметром печатающего сопла и импульсным сигналом, управляющим пьезоэлектрическим элементом [16].

Метод аэрозольной струйной печати представляет собой метод прямой печати на основе аэрозоля, способный создавать направленный коллимированный аэрозольный пучок для нанесения материалов на подложки [11, 17]. Обычно аэрозольный струйный принтер оснащается либо пневматическим, либо ультразвуковым распылителем (рисунок 1.7). Пневматический распылитель использует сжатый воздух, а ультразвуковой распылитель использует высокочастотные звуковые волны для распыления чернил. Из-за различных технологий распыления чернил, допустимая вязкость для каждого из распылителей тоже различается. Пневматический распылитель может работать с чернилами с вязкостью от 1 до 500 сП, тогда как ультразвуковой распылитель может работать только с чернилами с вязкостью от 1 до 15 сП [18].

Перед распылением мелкие капли образуются в специальном резервуаре для чернил. Обычно используется инертный азотный газ в качестве газ-носителя для переноса мелких капель из резервуара с чернилами в головку осаждения через трубку подачи жидкости [19]. В головке осаждения аэрозольные капли при помощи газовой оболочки коллимируются в плотный пучок. Этот механизм коллимации аэрозоля помогает значительно уменьшить ширину линии. Защитный газ также предотвращает контакт капель аэрозоля с внутренней стороной сопла и способствует удалению засорения сопла. Высокоскоростной поток коллимированных капель аэрозоля вместе с защитным газом выбрасывается из сопла и осаждается непосредственно на

подложку. Для контроля положения и времени осаждения используются прецизионная система управления движением и механический затвор [18, 20].

Процесс аэрозольной струйной печати позволяет наносить широкий спектр функциональных материалов для приложений печатной электроники, включая чернила с металлическими наночастицами, углеродные нанотрубки (УНТ), графен, диэлектрические материалы и проводящие полимеры [18,21]. Кроме того, процесс аэрозольной струйной печати также может наносить материалы непосредственно на неплоские и ортогональные поверхности. В литературе аэрозольный струйный принтер продемонстрировал способность достигать разрешения печати до 10 мкм [11, 17–21].



1 – пузырьковый распылитель; 2 – узел баброртера;
3 – сухой газ-носитель (азот); 4 – увлажненный газ-носитель следует в распылительную установку; 5 – распылительная установка; 6 – камера распыления; 7 – распылительная головка; 8 – капиллярная трубка; 9 – трубка подачи жидкости; 10 – выхлоп; 11 – виртуальный импактор; 12 – генерация пневматического аэрозоля; 13 – сухой газ-носитель (азот); 14 – стеклянная колба; 15 – преобразователь; 16 – оболоченный газ; 17 – головка осаждения; 18 – механический затвор

Рисунок 1.7 – Схема аэрозольной струйной печати с использованием как пневматического, так и ультразвукового распылителя [11]

В струйной печати используются чернила с низкой вязкостью, поэтому в их составе могут использоваться такие жидкости-носители, таких как вода или органические растворители, которые должны испаряться, чтобы оставить на подложке топологический рисунок.

1.2 Контактная печать

Контактная печать позволяет исключить факторы, которые оказывают влияние на формирование отдельных линий и сплошных полигонов. При контактной печати «контакт» – это жидкостный мост между соплом дозирующего устройства и поверхностью подложки [23, 24].

Как правило, при контактной печати ширина и геометрия печатного рисунка зависит от диаметра сопла дозирующего устройства. Чтобы уменьшить размер, необходимо соответственно уменьшить внутренний диаметр сопла. Следует учитывать, что диаметр сопла определяет допустимую вязкость функционального материала – чем меньше внутренний диаметр сопла, тем ниже требуется вязкость. Однако материалы с низкой вязкостью сильнее растекаются на поверхности подложки и ограничивают возможность изготовления узких печатных дорожек. В связи с этим представляет интерес исследования методов нанесения материалов с высокой вязкостью.

Толсто пленочная технология является достаточно распространенной технологией нанесения специальных паст (чернил высокой вязкости) различного назначения толщиной от 1 мкм. Пленка функционального слоя электронного элемента формируется за счет спекания этих паст после нанесения. Для образования равномерного слоя, а также для получения удовлетворительных электрических характеристик печатных рисунков, вязкость паст должна быть высокой (более 1000 мПа·с), а доля содержания твердого вещества от 60 масс. % [22]. На рисунке 1.8 показаны типичные способы дозирования паст при прямой контактной печати, включая пневматическое дозирование, поршневое дозирование, шнековое дозирование.

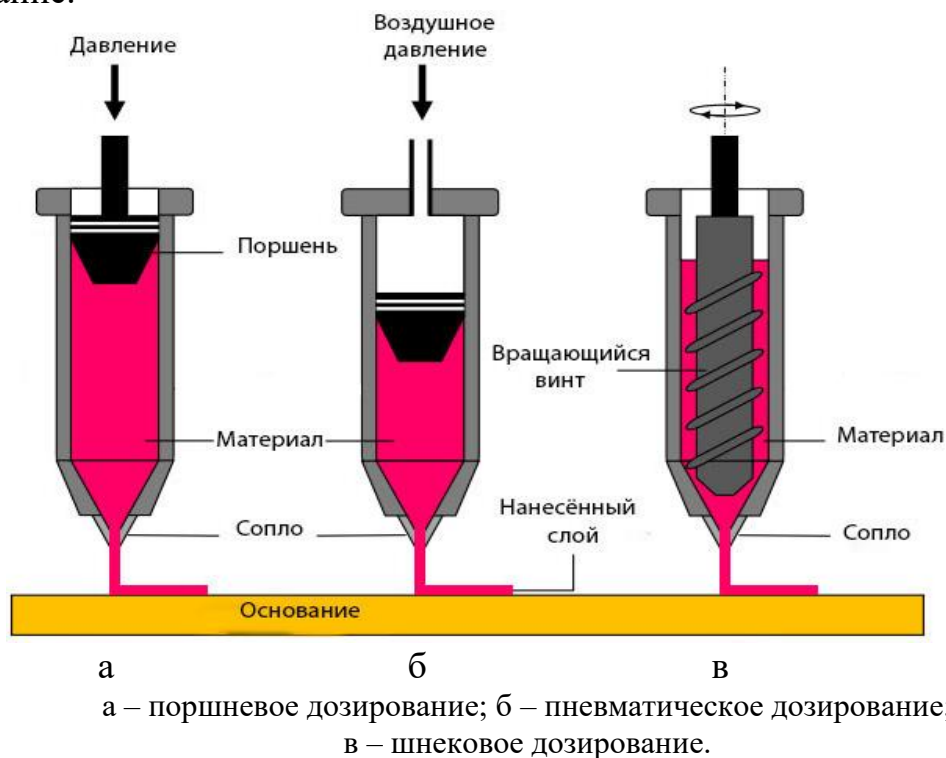


Рисунок 1.8 – Схема типичных систем контактного дозирования паст [11]

Поршневое дозирование использует поршень для выталкивания материала, находящегося внутри шприца (рисунок 1.8, а). Выдавливаемый объем и скорость потока паст связаны со смещением поршня внутри шприца. Объем выдаваемых паст и скорость экструзии связаны со скоростью перемещения поршня [25]; выбор вязкости зависит от мощности приводного двигателя и механической системы. Следует обратить внимание на то, что из-за сжимаемости материала реакция потока может задерживаться при запуске или остановке двигателя.

На рисунке 1.8 (б) показан пневматический способ дозирования, в котором к шприцу прикладывается давление воздуха для того, чтобы вытолкнуть функциональный материал из сопла. Сила давления и время воздействия воздухом на поршень определяют количество выдаваемого материала. Для печати непрерывных линий необходимо прикладывать давление в течение длительного времени, тогда как импульсы давления следует использовать для нанесения одиночных точек на подложку (точечная печать). Следует отметить, что на вязкость паст может влиять температура окружающей среды или высокие импульсы давления, которые могут изменить скорость потока паст в процессе дозирования.

Третий способ дозирования основан на шнековом механизме (рисунок 1.8, в). При вращении шнек создает выталкивающую силу, заставляя жидкость течь по резьбовой канавке для дозирования. Поток материала контролируется путем измерения угловой скорости вращающегося винта, но относительно поршневого дозирования, добиться точного контроля потока материала гораздо сложнее. Основным преимуществом данного дозирования является контроль остановки процесса дозирования: при остановке вращения шнека, процесс нанесения останавливается [11].

Улучшение процесса дозирования функционального материала можно добиться путем комбинирования способов: поршневого и шнекового дозирования, а также использования двухэкструдерного способа дозирования. Примером является устройство, отраженное в [26]. На рисунке 1.9 представлен комбинированный способ дозирования разных материалов.

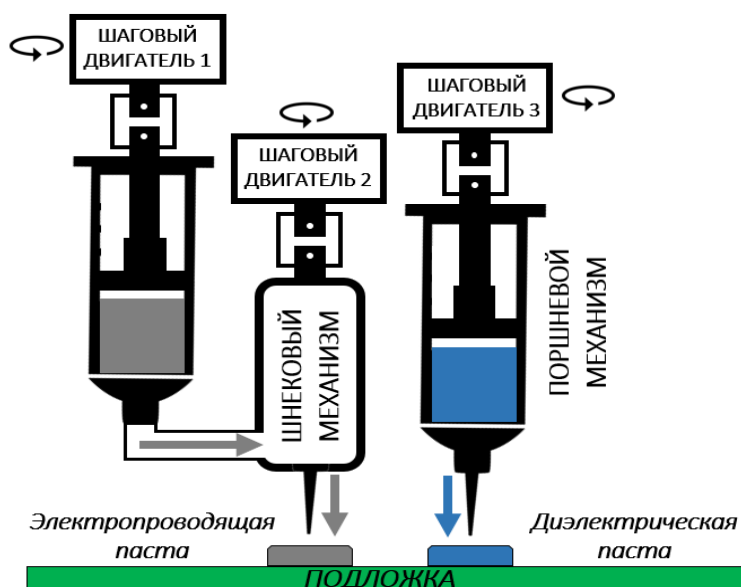


Рисунок 1.9 – Комбинация поршневого и шнекового способов дозирования

Совмещение поршневого и шнекового механизмов дозирования позволяет устранить недостатки присущие каждому из этих способов индивидуально. Поршневым дозатором осуществляется равномерная непрерывная подача функционального материала в резервуар шнекового дозатора, а непосредственное дозирование функционального материала на основание осуществляется шнеком.

Одним из методов контактной печати является электрогидродинамическая струйная печать. Данный метод использует электростатические силы для извлечения (или «вытягивания») струи из наконечника сопла для DoD и CIJ печати, как показано на рисунке 1.10, в то время как обычные методы струйной печати предполагают использование тепловой или механической энергии для «проталкивания» капли из сопла. [27]

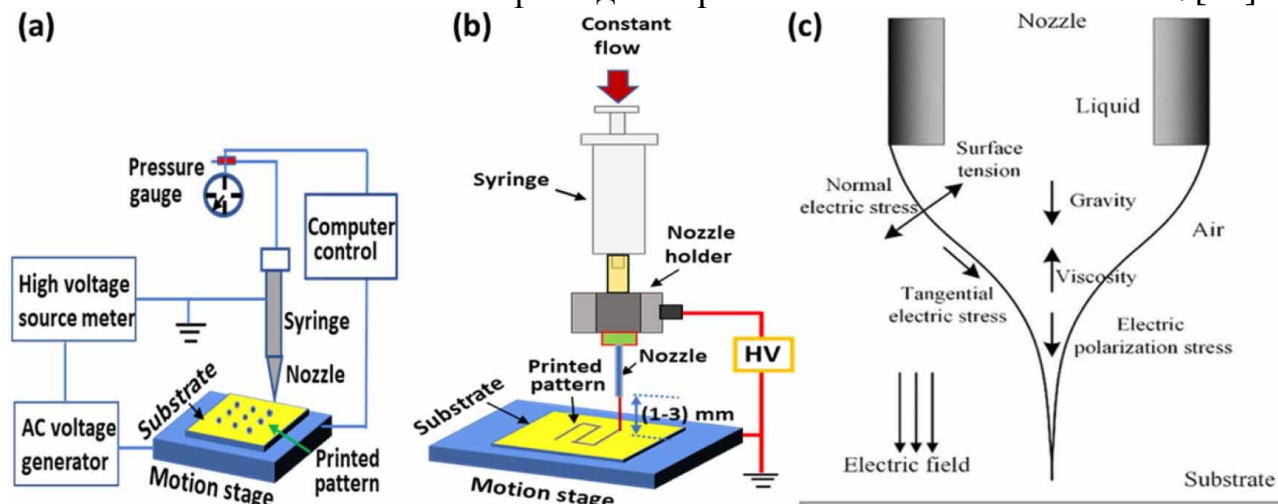


Рисунок 1.10 – Электрогидродинамическая струйная печать с высоким разрешением, схематическая иллюстрация струйной печати с каплей по требованию (а) и системы электроспиннинга в ближнем поле (б) и механизма струйной печати (с) [27]

При использовании обычной струйной печати выбрасываемая капля размером менее 0,1 мкл может не достичь подложки, поскольку ее

кинетическая энергия часто может быть слишком малой. Например, выбрасываемая струей маленькая капля диаметром в несколько микрон (например, капли-сателлиты) может парить в воздухе (или улетать от целевого положения) вместо того, чтобы осаждаться непосредственно на подложку. Особенностью данного метода является использование механизма притягивания капли с помощью электрического поля, что обеспечивает возможность переноса даже очень маленьких капель в целевое место на подложке.

Метод струйной печати можно разделить на два метода: DoD (рисунок 1.10, а); CIJ (рисунок 1.10, b) на основе электроспиннинга в ближнем поле (NFES). Основные принципы для этих двух режимов ЭГД аналогичны, но жидкостная система, рабочее напряжение, требования к вязкости чернил различаются в зависимости от режима печати.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое аддитивная технология в контексте изготовления электроники, и чем она отличается от традиционных субтрактивных методов (например, травления)?

2. Почему для струйной печати используются чернила, а для экструзии – паста? Объясните физическую причину.

3. Какой принцип лежит в основе аэрозольной печати? Как формируется слой проводящего материала?

4. Что означает термин «разрешение печати» в контексте аддитивных технологий? Какие факторы его определяют?

5. Сравните струйную, аэрозольную и поршневую печать по следующим параметрам:

- минимальная ширина линии;
- точность позиционирования;
- скорость печати;
- поддержка многослойности;
- требования к подложке.

6. В каких случаях экструзия предпочтительнее струйной печати, несмотря на более низкое разрешение?

7. Какие из перечисленных технологий позволяют печатать на термочувствительных подложках (например, полимерах)? Обоснуйте ответ.

8. Объясните, почему аэрозольная печать может использовать пасты с более высоким содержанием твердых частиц, чем струйная.

9. Как влияет вязкость пасты на процесс экструзии? Что произойдет, если вязкость слишком низкая?

10. Какие этапы обработки (послепечатная обработка) обязательны после печати пастой в любой из этих технологий?

11. Приведите примеры реальных применений каждой из трех технологий:

- струйная печать;

- аэрозольная печать;
- экструзия паст;

12. Почему при аэрозольной печати часто возникает эффект «спрей-разбрызгивания» на краях линий, и как его минимизировать?

13. Можно ли комбинировать несколько аддитивных технологий в одном производственном цикле? Приведите пример и объясните преимущества такого гибридного подхода.

14. Какой из методов имеет наибольший потенциал для масштабируемого производства в условиях промышленной линии? Обоснуйте с точки зрения скорости, надежности и стоимости.

15. Какие экологические и экономические преимущества дают аддитивные технологии по сравнению с традиционной печатной платой с травлением? Существуют ли у них скрытые недостатки?

1.3 Принтеры для изготовления печатной электроники

Применение 3D-печати в электронике можно разделить на два направления:

- 1) 3D-печать электронных компонентов: печатных плат, антенн и т.д.;
- 2) производство корпусов и другой вспомогательной оснастки для электроники.

Перед запуском печатной платы в серийное производство целесообразно ее испытать на работоспособность, что позволяет сделать путем прототипирования. Таким образом, потребность в 3D-принтере для изготовления печатных плат крайне высока для абсолютно всех предприятий и образовательных организаций, работающих в области электроники. Альтернативой 3D-принтера для изготовления печатных плат является изготовление плат вручную в домашних или лабораторных условиях. Данный процесс создания прототипа платы достаточно трудоемкий. Приготовление трафарета, травление, нагревание отнимают значительное количество времени и сил у разработчика, что замедляет процесс создания электронного устройства. Сегодня этим мало кто занимается, чаще обращаются к производственным компаниям. При заказе у производственных компаний, специализирующихся на изготовлении печатных плат, выполнения заказа и доставки придется ожидать несколько недель, а то и месяцев, при этом имея достаточно высокую стоимость одного прототипа платы. Зачастую заказы принимаются лишь от 10 единиц плат, а сроки изготовления в среднем составляют порядка 2-6 недель. 3D-принтер же позволяет изготовить прототип в одном экземпляре от 5 минут (в зависимости от сложности топологии).

На сегодняшний день 3D-печать применяется в электронике, а при производстве отдельных электронных компонентов у аддитивного производства есть значительные преимущества перед традиционными методами. В 2015 году был продан первый 3D-принтер профессионального уровня Nano Dimension DragonFly, предназначенный для аддитивного

производства печатных плат, внешний вид которого представлен на рисунке 1.11 [130].



Рисунок 1.11 – Первый 3D-принтер печатных плат

Несмотря на то, что процесс интеграции 3D-печати в производство электроники начался совсем недавно, академические исследования в этой области были выполнены относительно давно, и результаты этих работ (рисунок 1.12, [131]), во многом, послужили основой для создания профессиональных 3D-принтеров для печати электронных компонентов.

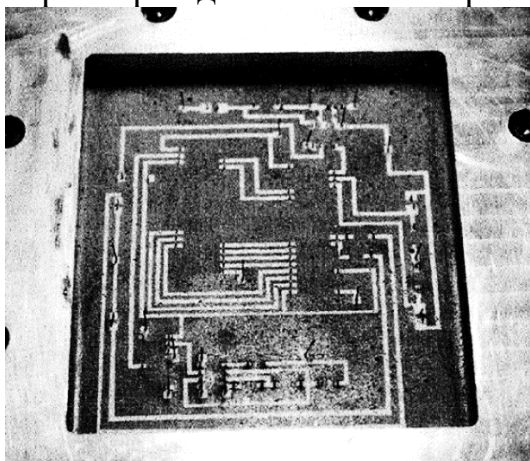


Рисунок 1.12 – Подложка с нанесенным методом термического напыления проводящим рисунком

В 2009 году исследователи из университета Иллинойса (США) разработали токопроводящие чернила на основе наночастиц серебра. При печати такие чернила экструдируются из микросопла и наносятся на полимерную подложку. Затем, при нагревании до 150 °С, связующее вещество испаряется, частицы серебра агломерируют, образуя сплошной массив, и напечатанные линии приобретают проводимость. Так появляется возможность создавать рисунок из проводников методом экструзии (Direct Ink Writing), соединяя ими другие электронные компоненты, что является основой конструирования большинства электронных устройств. Конструкция

экспериментальной установки для печати проводящими чернилами методом экструзии представлена на рисунке 1.13.

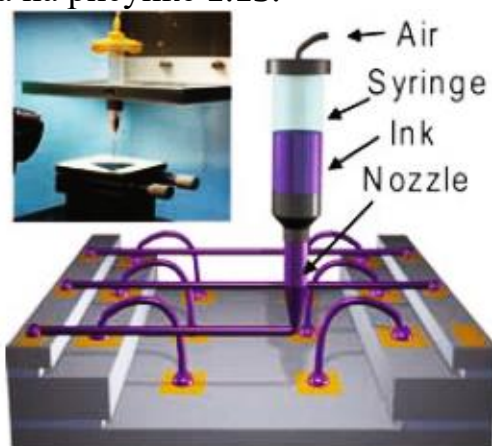


Рисунок 1.13– Конструкция экспериментальной установки для печати проводящими чернилами методом экструзии

Метод экструзии заключается в послойном формировании изделия путем экструзии пастообразного материала (в отличие от метода FDM, в котором экструдировается расплав материала). Как правило, вязкость такого материала существенно зависит от напряжения сдвига: при значительном напряжении сдвига вязкость невелика, и материал легко экструдирован из сопла; как только напряжение сдвига уменьшается, вязкость становится больше, поэтому формируемое на платформе изделие продолжает сохранять форму. Затем изделие может подвергаться дополнительной термической обработке, для придания большей механической прочности. Схематично метод экструзии представлен на рисунке 1.14.

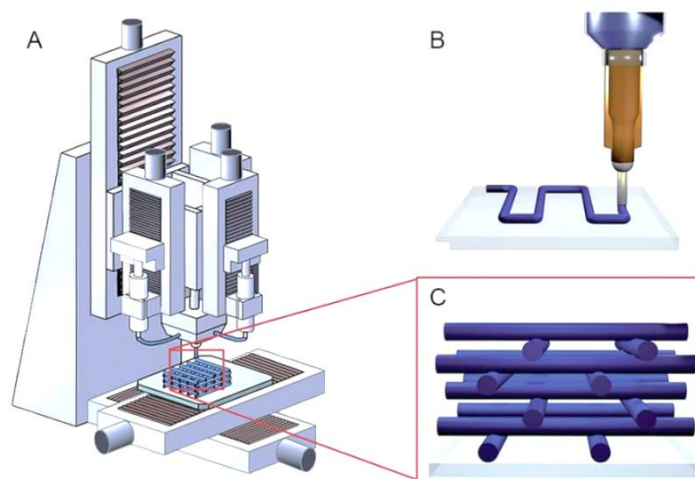


Рисунок 1.14 – Схематичное представление метода экструзии

В 2011 году, этой же группой исследователей, проводящие чернила с содержанием наночастиц серебра 72% по массе были использованы для 3D-печати миниатюрных антенн, потребность в которых возрастает с каждым годом, за счет повсеместного развития беспроводных технологий. Причем печать антенн была осуществлена на поверхности полусферы, а не на плоском столике: такой способ печати называется конформной 3D-печатью. Время

печати одной антенны, в зависимости от скорости, составляло от 0,5 до 3 часов. Для достижения максимальной проводимости, при данном составе чернил, напечатанная антенна подвергалась температурной обработке при 550 °С. Микрофотография наночастиц серебра в составе проводящих паст представлена на рисунке 1.15.

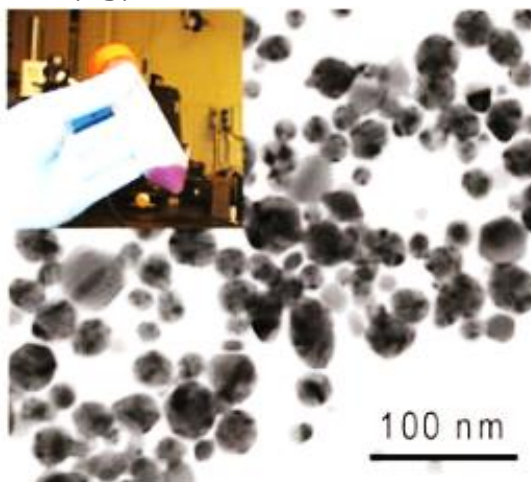


Рисунок 1.15 – Электронная микрофотография наночастиц серебра в составе проводящих паст

3D-печать значительно упрощает переход от классической планарной компоновки электронных устройств к объемной компоновке, что позволяет намного более эффективно использовать объем для плотной компоновки элементов. Такая компоновка наиболее актуальна в аэрокосмической отрасли. Примеры готовых изделий, изготовленных методом экструзии, представлены на рисунке 1.16.

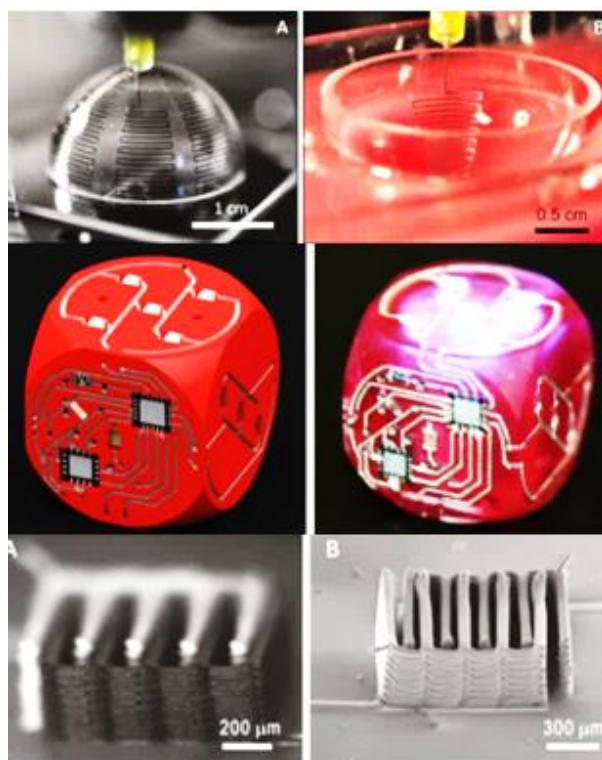


Рисунок 1.16 – Изделия, изготовленные методом экструзии

В настоящее время существует несколько компаний в области производства принтеров для изготовления печатной электроники. Большинство из них предлагает на своих установках изготовление лишь однослойных печатных плат. Для изготовления же многослойных плат используются массивные промышленные установки по высокой стоимости оборудования и материалов.

Компания Voxel8 Inc. основана группой исследователей из университета Иллинойса, которые в 2011 году продемонстрировали возможность печати антенн проводящими чернилами. Яркий пример успешного внедрения результатов академических исследований в практически-значимые коммерческие продукты. Персональный 3D-принтер для производства электронных устройств – Voxel8 представлен на рисунке 1.17.



Рисунок 1.17 – 3D-принтер для производства электронных устройств Voxel8

Voxel8 в полной мере сочетает в себе функционал классического FDM-принтера и DIW-принтера (рисунок 1.18). Voxel8 не ориентирован на производство только печатных плат, это FDM-принтер с возможностью интегрирования в изделие произвольной формы электронных компонентов. Поскольку Voxel8 предназначен для полностью трехмерных электронных устройств, то для размещения электронных компонентов и соединения их проводниками используется специальный 3D-редактор Autodesk Project Wire, созданный совместными усилиями Autodesk и Voxel8.

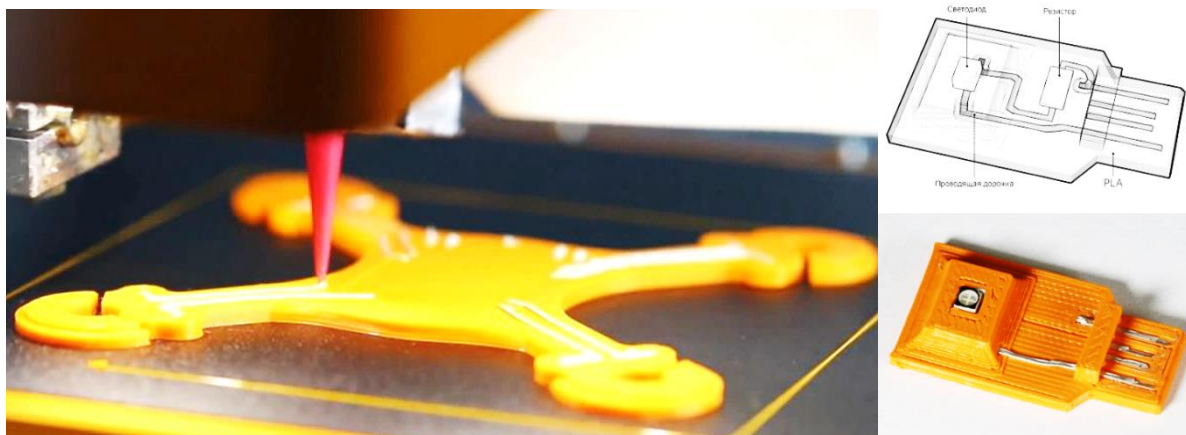


Рисунок 1.18 – Печать квадрокоптера с электронной схемой и USB светодиода посредством Voxel8

Project Wire позволяет импортировать 3D-модель будущего изделия без электронной составляющей. Далее пользователь, в среде Project Wire, размещает электронные компоненты в объеме изделия, и программа автоматически освобождает в модели место под них. Электронные компоненты можно выбирать из базы компонентов Project Wire. После размещения компоненты соединяются проводящими дорожками, направление и форму которых можно редактировать путем перемещения контрольных точек. Основа модели печатается из PLA. Принтер автоматически прерывает печать для ручного размещения в модели электронных компонентов. Для удобства монтажа, платформу принтера, вместе с изделием, можно снять. Затем печать возобновляется. Пример готового устройства, изготовленного на принтере, представлен на рисунке 1.19.



Рисунок 1.19 – Снимок напечатанного на Voxel8 квадрокоптера посредством томографии

Для исследования и изготовления печатной электроники по технологии пьезоструйной печати наибольшей популярностью пользуется принтер Dimatix Material Printer DMP-2850 произведенный компанией FUJIFILM Corporation (Япония) [132]. В данной модели принтера используются одноразовые картриджи с 12 соплами (дюзами). Принтер позволяет формировать капли с минимальным объемом 2,4 пл и минимальным диаметром 30 мкм. Для отслеживания вылета капель в принтере предусмотрен

стробоскоп. Фиксация подложек проводится с помощью вакуумного стола с функцией подогрева до 60 °С. На рисунке 1.20 приведена фотография принтера Dimatix DMP-2850.



Рисунок 1.20 – FUJIFILM Dimatix DMP-2850

Преимущества принтера Dimatix:

- высокое разрешение и точность печати;
- применение жестких и гибких подложек.

К недостаткам принтера можно отнести следующее:

- подбор типа и параметров сигнала, управляющего пьезоэлектрическими дозаторами, для каждого типа чернил [133];
- испарение чернил, что приводит к засорению дюз (сопел);
- невозможность использовать чернила содержащие частицы микронного размера [134].

В качестве принтера для профессиональной разработки прототипов печатных плат применяется Nano Dimension DragonFly 2020 Pro (рисунок 1.21, 1.22).



Рисунок 1.21 – Профессиональный принтер Nano Dimension DragonFly 2020 Pro

DragonFly 2020 Pro печатает не только проводящий рисунок платы, но и ее основу. Она печатается из диэлектрической смолы, по свойствам близкой к стеклотекстолиту FR4, поэтому изделие может быть любой формы и содержать монтажные отверстия. В отличие от персональных принтеров для изготовления печатных плат, DragonFly 2020 Pro использует технологию струйной печати, обеспечивающую высокую точность производства.

Плагин для SolidWorks позволяет назначить материалы для различных частей изделия, позиционировать изделие внутри камеры принтера, выполнить слайсинг и запустить печать.

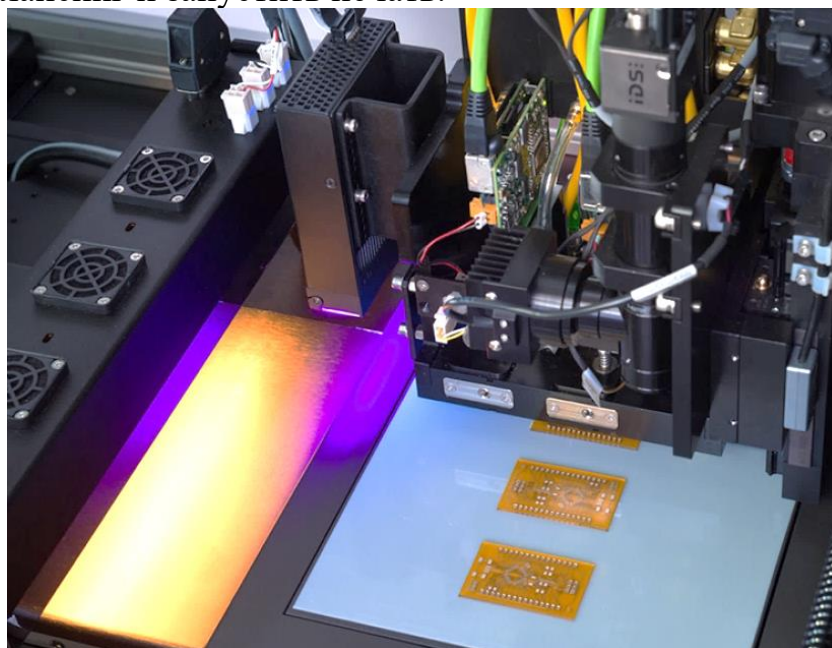


Рисунок 1.22 – Рабочая платформа Nano Dimension DragonFly 2020 Pro

Примеры изготовленных на Nano Dimension DragonFly 2020 Pro электронных устройств представлены на рисунке 1.23.

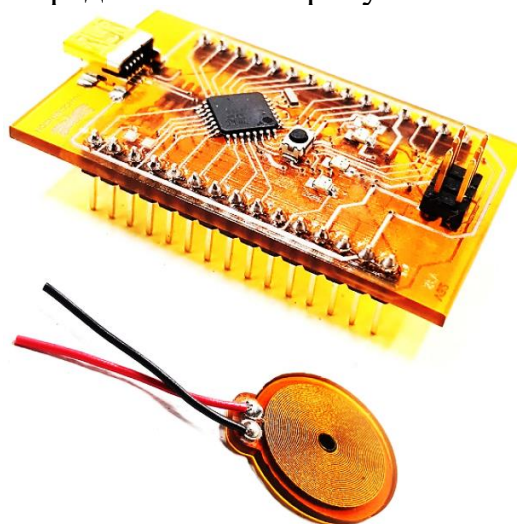


Рисунок 1.23 – Примеры изготовленных на Nano Dimension DragonFly 2020 Pro электронных устройств

Также разработчиком профессиональных 3D-принтеров для производства электроники является компания Optomes («Оптомек»). Для печати электронных компонентов компания предлагает технологию аэрозольного нанесения (Aerosol Jet). В принтерах, использующих эту технологию, чернила вначале попадают в камеру- атомайзер, где происходит их диспергирование во взвесь частиц диаметром 1-5 мкм. Затем, потоком газ-носителя, этот аэрозоль наносится на подложку. Данный метод напоминает метод лазерного наплавления (Directed Energy Deposition), используемого для печати металлами. Технология Aerosol Jet позволяет печатать резисторы, конденсаторы, антенны и тонкопленочные транзисторы. Электронные характеристики компонентов можно контролировать путем изменения параметров печати. Технология позволяет печатать на поверхностях различной природы: пластиковых, керамических и металлических. После нанесения чернила спекают светом. Внешний вид представлен на Aerosol Jet представлен на рисунке 1.24.



Рисунок 1.24 – Аэрозольный принтер Aerosol Jet

Optomes предлагает целый набор профессиональных 3D-принтеров, в которых реализована технология Aerosol Jet. В некоторых моделях принтеров данный метод совмещен с многоосевой системой позиционирования подложки, таким образом, электронные компоненты могут быть напечатаны на поверхности почти любой формы. Например, антенны могут быть напечатаны сразу на корпусе сотового телефона.

Voxel8 – решение для создания электроники изделия одновременно с корпусом и несущими конструкциями. Использование PLA может ограничивать применение этого принтера в ряде задач, в которых работа электроники связана с заметным тепловыделением, так как данный пластик не отличается высокой термостойкостью. Voxel8 может быть интересным вариантом для энтузиастов 3D-печати, мейкеров и образовательных учреждений. Но его цена, соответствующая скорее профессиональному

оборудованию, делает его более подходящим для функционального прототипирования изделий разработчиками. Специализация профессиональных 3D-принтеров Nano Dimension – производство прототипов печатных плат любой сложности. Область применения установок Optomes не ограничена прототипированием печатных плат: поддержка широкого набора чернил и материалов подложек для печати, возможность печати на сложных поверхностях и модульная конструкция делают эти системы гибким универсальным решением для разработки, прототипирования и производства электроники.

Использование шнекового дозатора предоставляет возможность эксплуатировать пасты широкого диапазона вязкости. Струйная технология у Nano Dimension позволяет формировать толсто пленочные элементы исключительно при большом количестве проходов во время печати топологии (при толщине слоя в 40 нм порядка 1000 проходов), при использовании шнекового дозатора количество операций в значительной степени сокращается вплоть до одного прохода (толщина слоя одного прохода шнекового дозатора составляет порядка 40 мкм). В свою очередь толсто пленочные элементы широко применяются в автомобильной промышленности, различных датчиках, космической электронике, для производства дискретных пассивных устройств, потребительской и бытовой электронике и различных измерительных системах.

Использование шнекового дозатора предоставляет возможность использовать пасты широкого диапазона вязкости. Одним из примеров принтеров, основанных на шнековом дозировании, является принтер Catalina компании GPD Global (США), представленный на рисунке 1.25 [135].



Рисунок 1.25 – Система дозирования материалов GPD Global Catalina

GPD Global Catalina – система дозирования, состоящая из робота, на котором установлен шнековый дозатор, контроллер для настройки шнекового дозирования и контроллера для управления температурой стола и пасты в шприце. Также в состав роботизированной системы входит техническое зрение. На принтере не предусмотрено устройство для спекания

функциональных материалов. К недостаткам GPD Global Catalina можно отнести высокую стоимость оборудования и сложное программное управление, требующее определенных знаний. Главный же недостаток, не смотря на более высокий класс устройства – невозможность изготовления многослойных печатных плат.

Компактный персональный принтер Voltera V-One является отличным решением для быстрого создания прототипов несложных печатных плат и их оптимизации. V-One следует классической планарной парадигме и будет полезен для любых предприятий, занятых проектированием или ремонтом электроники. Voltera V-One обладает большим потенциалом для применения в школах и технических вузах, так как позволяет быстро изготовить прототип платы и, таким образом, может быть легко интегрирован в учебный процесс.

Производство электропроводящего рисунка методом экструзии нашло применение в компактном персональном принтере V-One канадской компании Voltera, предназначенном для производства печатных плат (рисунок 1.26). Voltera V-One представляет собой многофункциональное устройство, сочетающее возможности 3D-принтера и фрезера с ЧПУ [136].

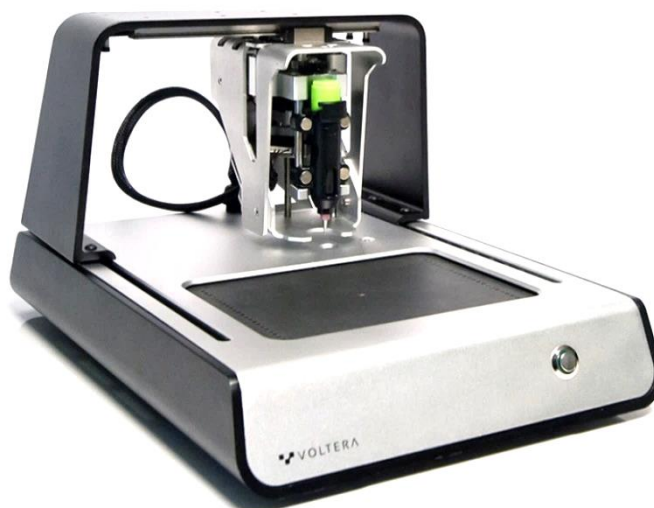


Рисунок 1.26 – Voltera V-One

На первом этапе производства печатной платы с помощью V-One, проект печатной платы в формате Gerber (*.gbr), созданный, например, с помощью программного пакета Eagle, загружается в ПО принтера (рисунок 1.27).

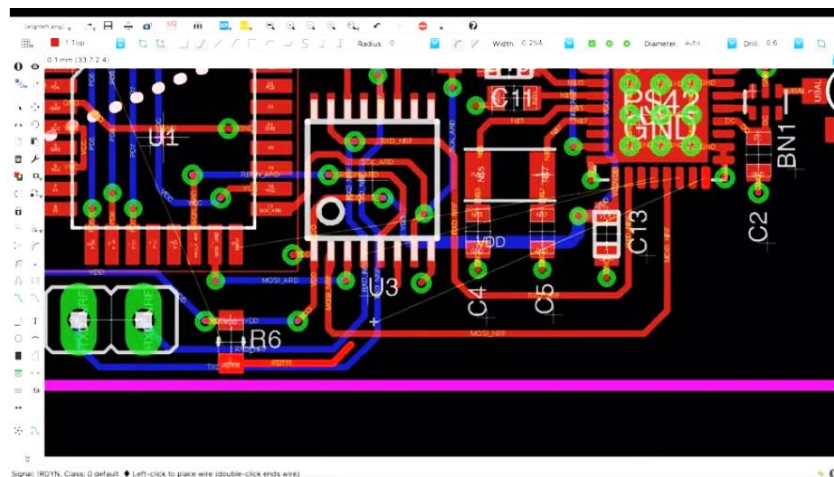


Рисунок 1.27 – Проект печатной платы в программе подготовки печати для Voltera V-One

Затем основа платы из текстолита закрепляется на нагреваемой платформе принтера с помощью линейных прижимов, после этого можно переходить к печати токопроводящего рисунка платы специальными чернилами, содержащими 90% частиц серебра. Электрические параметры таких чернил подходят для цифровых устройств и слаботочной электроники, работающих на частотах до 5 ГГц. Процесс печати проводящего рисунка печатной платы специальными чернилами с высоким содержанием серебра представлен на рисунке 1.28.



Рисунок 1.28 – Печать проводящего рисунка на принтере Voltera V-One

В ходе печати паста находится в сменном картридже-шприце с несложным механическим приводом подачи пасты. Одного картриджа хватает для печати дорожек суммарной длиной 100 метров, при ширине дорожки 0,2 мм. После того, как проводящий слой напечатан, плата переворачивается проводящим рисунком вниз и кладется на направляющие, для предотвращения касания поверхности платформы, которая нагревается для отверждения чернил. Под воздействием нагрева проводящий материал переходит из пастообразного в твердое состояние. Просушка чернил занимает около 30 минут. При включении нагрева платформы, боковые световые индикаторы принтера изменяют свой цвет с синего на красный, для предостережения оператора. V-One позволяет печатать двухслойные платы, которые содержат

два проводящих слоя. Смена картриджа, для печати другим материалом, не требует разборки и происходит очень быстро, за счет того, что картриджи установлены на магнитных креплениях.

После размещения электронных компонентов на плате, платформа нагревается и компоненты припаиваются к контактным площадкам. Если требуется изготовление двусторонней печатной платы, у которой проводящий рисунок с двух сторон текстолита, то V-One предоставляет возможность сверления отверстий в такой плате, с помощью специальной сверлильной головки. Сверлильная головка – это автономный модуль, питание которого подключается отдельно. Готовое электронное устройство, полностью изготовленное посредством Voltera V-One, представлено на рисунке 1.29.

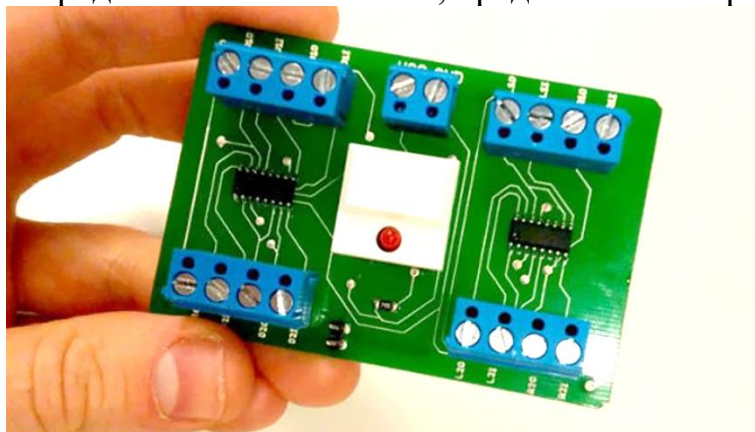


Рисунок 1.29 – Готовое электронное устройство, полностью изготовленное посредством Voltera V-One

Основным же недостатком стала невозможность применять данный принтер для изготовления многослойных печатных плат. Можно делать исключительно двусторонние печатные платы, переворачивая подложку после печати первого слоя. Затем, необходимо снова перевернуть, напечатать проводящие дорожки на обратной стороне платы и запечь. При загрузке в картридж вязкой пасты, поршневой дозатор не справляется с выдавливанием пасты через тонкое сопло и принтер дает сбой.

Следующую версию принтера компания Voltera выпустила в 2022 году. Внешний вид принтера Voltera NOVA изображен на рисунке 1.30. Данная версия принтера отличается от предыдущей возможностью использования гибких оснований для печати. Для этого термостол был заменен на стол с вакуумным прижимом. Основным преимуществом принтера NOVA является доработанный поршневой дозатор, вследствие чего расширен диапазон вязкости чернил.



Рисунок 1.30 – Внешний вид принтера Voltera NOVA

Также преимуществом принтера NOVA является наличие датчика давления, умного калибровочного зонда и камеры.

Вопросы для самопроверки

1. Что отличает принтеры для печатной электроники от обычных струйных или лазерных принтеров?
2. Почему в принтерах печатной электроники используются многофункциональные сопла (например, для проводящих и диэлектрических паст)?
3. Какие два основных типа печатаемых материалов используются в принтерах печатной электроники? Приведите примеры для каждого.
4. Почему для печати электроники важна точность позиционирования (аллигация слоев)? Как она обеспечивается в промышленных системах?
5. Сравните Nano Dimension DragonFly 2020 Pro и Voxel8 по следующим параметрам:
 - технология печати
 - количество печатающих головок
 - поддержка многослойных структур
 - максимальная разрешающая способность
 - типы подложек (гибкие/жесткие)
6. В чем принципиальное отличие Aerosol Jet от FUJIFILM Dimatix? Какая технология обеспечивает более высокое разрешение и почему?
7. Почему GPD Global Catalina позиционируется как система для «промышленного масштаба», в отличие от Voltera V-One?
8. Какие функции у Voltera V-One делают ее популярной в академических лабораториях? Почему Voltera Nova считается ее усовершенствованной версией?
9. Какой из перечисленных принтеров поддерживает одновременную печать проводящих и диэлектрических материалов без смены головки? Перечислите все такие модели.
10. Какова минимальная ширина линии, которую может печатать DragonFly 2020 Pro? Какой тип пасты для этого используется?

11. Какой максимальный размер печатной области имеет GPD Catalina? Как это влияет на его применение в производстве?
12. Почему FUJIFILM Dimatix не является полноценным «принтером», а скорее печатной головкой? Какие системы ее используют?
13. Какой тип встроенного сушки/отверждения используется в Voltera V-One?
14. Какой проект с использованием Voxel8 стал известен в СМИ? Почему он считается прорывным?
15. Почему Voltera V-One удобна для прототипирования?
16. Какие недостатки у Voltera V-One по сравнению с Nova? Почему компания выпустила обновленную версию?
17. Можно ли использовать FUJIFILM Dimatix как самостоятельную систему для печати печатных плат?
18. Какой из принтеров наиболее подходит для печати высокочастотных (RF) схем? Обоснуйте выбор с точки зрения разрешения, вязкости пасты и точности.
19. Какие из этих принтеров не требуют постобработки в печи (например, отверждения при 150–200°C)? Как это влияет на выбор подложек?

2. Классификация и анализ функциональных материалов, применяемых в аддитивной технологии печати

Материалы, используемые при изготовлении электронного устройства, определяют его функциональные свойства: электрические параметры, надежность, срок эксплуатации, габариты и др. Важным показателем являются электрические характеристики, одним из которых является проводимость.

В зависимости от характера действия на тела электрического поля их можно разделить на проводники, диэлектрики и полупроводники. Свойства тел и их поведение в электрическом поле определяются строением и расположением атомов в телах. В нормальном состоянии атом электрически нейтрален, так как число протонов, входящих в состав ядра атома, равно числу электронов, расположенных вокруг ядра и образующих «электронные оболочки» атома. Электроны внешней валентной оболочки определяют электропроводность вещества. Энергетические уровни внешних валентных электронов образуют валентную, или заполненную зону. В этой зоне электроны находятся в устойчивом связанном состоянии.

В качестве проводниковых материалов могут быть использованы как твердые тела, так и жидкости, а при соответствующих условиях и газы. К газообразным проводникам относятся пары веществ и газы при таком значении напряженности электрического поля, которое обеспечивает начало процесса ионизации молекул. В ионизированном газе перенос электрических зарядов осуществляется как электронами, так и ионами. Проводимость газов используется в различных газоразрядных приборах. К жидким проводникам относятся растворы и расплавы солей, кислот и щелочей, т.е. электролиты, в которых переносчиками электрических зарядов являются ионы. Они являются проводниками второго рода. К жидким проводникам относятся также расплавы металлов.

К твердым проводниковым материалам относятся металлы, их сплавы, контактные металлокерамические композиции и некоторые модификации углерода. Металлы в твердом состоянии являются кристаллическими веществами, для которых характерен особый вид металлической связи между атомами. Электропроводность металла, как в твердом, так и жидком состоянии обусловлена переносом электрических зарядов только электронами, поэтому твердые и жидкие металлы часто называют проводниками с электронной проводимостью, или проводниками первого рода [1].

Основным параметром для проводниковых материалов является величина удельного электрического сопротивления (ρ) как функция от температуры. Среди материалов электронной техники металлы и сплавы занимают одно из важнейших мест. Значение величины ρ у металлов в нормальных условиях отличаются друг от друга примерно в 100 раз. С повышением температуры величина ρ для металлов увеличивается. По роду применения в электротехнике они подразделяются на следующие группы:

- металлы с высокой проводимостью ($\rho \leq 0,1 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$) – серебро, медь, алюминий, золото и др., их используют для изготовления проводов, микропроводов, проводящих покрытий и пленок, различных токопроводящих деталей;
- конструкционные материалы – бронзы, латуни, алюминиевые сплавы и др., применяемые для изготовления различных токоведущих частей изделий;
- сплавы высокого сопротивления ($\rho \geq 0,3 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$) – предназначены для изготовления сопротивлений к измерительным приборам, реостатов и элементов нагревательных приборов, а также сплавы для термопар, компенсационных проводов и др.;
- контактные материалы – в основном бронзы и латуни, которые применяются для пар неразъемных, разрывных и скользящих контактов;
- материалы для пайки – сплав олова со свинцом в качестве припоя для лужения и пайки.

Диапазон удельных сопротивлений металлических проводников весьма узок и составляет от $0,016 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ для серебра до $1,6 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ для жаростойких железохромоалюминиевых сплавов. Электрическое сопротивление графита с увеличением температуры проходит через минимум с последующим постепенным повышением.

Чистая медь по электрической проводимости занимает второе место после серебра, обладающего из всех известных проводников наивысшей проводимостью. Высокая проводимость и стойкость к атмосферной коррозии в сочетании с высокой пластичностью делают медь основным материалом для изготовления проводов. Проводниковую медь получают из слитков путем гальванической очистки ее в электролитических ваннах.

Алюминий, благодаря своей коррозиопассивности и малой плотности (ниже в 3,3 раза, чем у меди), имея величину ρ , большую в 1,7 раза, чем у меди, также широко используется в электронной и электротехнической промышленности.

Известно, что с повышением температуры сопротивление металлов увеличивается. Это необходимо учитывать при выборе проводниковых материалов, поскольку они нагреваются при прохождении по ним электрического тока. В среднем температурный коэффициент сопротивления чистых металлов при комнатной температуре составляет $4 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Удельное сопротивление отдельных проводников при понижении температуры уменьшается, например: удельное сопротивление алюминия равно $0,05 \text{ нОм}\cdot\text{м}$ при температуре 20° К , т.е. в 524 раза меньше, чем при температуре 293° К .

При охлаждении до определенной критической температуры, близкой к абсолютному нулю, у многих проводников, кроме золота, меди, серебра и некоторых других металлов, электрическое сопротивление скачкообразно падает до нуля. Это свойство проводников называется сверхпроводимостью.

Широкое практическое применение в настоящее время находит явление сверхпроводимости, например, при сооружении трансформаторов, мощных электромагнитов, электрических машин, кабелей. Поддержание низких

температур связано пока с большими материальными затратами, так как при работе электроустановок и электрооборудования обходится слишком дорого. Применяя проводниковые материалы в электроустановках, обращают внимание на плотность применяемых материалов, их удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления, химические и механические свойства, температуру их плавления.

Различают проводниковые материалы по механическим свойствам: прочность при растяжении, изгибании, твердость, и т.п. При конструировании и проектировании электроустановок учитывают эти свойства. Химические свойства учитывают при выборе и применении проводниковых материалов. Например, если проводники требуется использовать в условиях повышенной влажности, то их помещают в герметические оболочки или даже в некоторых случаях защищают антикоррозионными покрытиями. Также выбирая проводники важно учитывать свойство соединения путем сварки и пайки.

В качестве проводников электрического тока могут быть использованы как твердые тела, так и жидкости, а при соответствующих условиях и газы. Важнейшими практически применяемыми в электротехнике твердыми проводниковыми материалами являются металлы и их сплавы.

К важнейшим параметрам, характеризующим свойства проводниковых материалов, относятся:

- 1) удельная проводимость (или обратная ей величина – удельное сопротивление);
- 2) температурный коэффициент удельного сопротивления ТК;
- 3) коэффициент теплопроводности
- 4) контактная разность потенциалов и термоэлектродвижущая сила (ЭДС);
- 5) работа выхода электронов из металла;
- 6) предел прочности при растяжении.

Температурный коэффициент линейного расширения проводников интересен не только при рассмотрении работы различных сопряженных материалов в той или иной конструкции (возможность растрескивания или нарушения вакуум-плотного соединения со стеклами, керамикой при изменении температуры и т.п.). Он необходим также и для расчета температурного коэффициента электрического сопротивления провода.

При плавлении большинство металлов демонстрирует рост удельного сопротивления, хотя у некоторых оно, напротив, уменьшается. Удельное сопротивление увеличивается при плавлении у тех металлов, у которых увеличивается объем, т. е. уменьшается их плотность, и, наоборот, у металлов, уменьшающих свой объем при плавлении, – галлия, висмута, сурьмы, удельное сопротивление уменьшается.

Диэлектриком называют вещество, которое не проводит электрический ток, следовательно, в этом веществе отсутствуют свободные заряженные частицы, т.е. таких заряженных частиц, которые способны свободно перемещаться по всему объему тела. Такими частицами могли бы быть

электроны, но в идеальном диэлектрике все электроны связаны с ядром атома, т.е. принадлежат отдельным атомам, и свободно перемещаться по телу не могут. Чтобы нарушить эту связь, нужны сильные воздействующие факторы, например нагрев до высоких температур. Существуют диэлектрики газообразные (газы, воздух), жидкие (масла, жидкие органические вещества) и твердые (парафин, полиэтилен, слюда, керамика и т.п.).

Диэлектрики обладают способностью пропускать через себя электростатическое поле. Проникая через диэлектрики, электростатическое поле ослабевает, но все-таки не до нуля, как это происходит в металлах. При наложении электрического напряжения в диэлектрике, представляющем сложную электрическую систему, протекают разнообразные электрические процессы, связанные с его поляризацией, электрической проводимостью. В случае очень большого напряжения может произойти разрушение диэлектрика, называемое пробоем. Эти процессы определяют свойства диэлектриков, а, следовательно, надежность их работы в радиоустройствах.

Диэлектрическая проницаемость – это физическая величина, характеризующая способность диэлектрической среды поляризоваться под воздействием внешнего электрического поля и уменьшать его напряженность. Она показывает, во сколько раз сила взаимодействия двух электрических зарядов в среде меньше, чем в вакууме.

В аддитивной технологии печати не следует упускать такие важные этапы, как обработка поверхности (очистка, формирование шероховатости: полировка, прокатка, абразивность), сушка и спекание (выпаривание связующего, плавление и спекание частиц металла или диэлектрика). Таким образом, из-за большого числа материалов, используемых в производстве электронной техники, крайне сложно предложить их универсальную классификацию. В работе [28] предлагается два основных способа классификации: по функциональному назначению и по основным физическим свойствам, определяющим их использование.

Подложка – основание для печати, поверхность которой подвергается различным видам обработки, в результате чего образуются слои с новыми свойствами или наращивается пленка другого материала [29].

Аддитивная технология печати позволяет использовать подложки широкой номенклатуры: от традиционных жестких (стеклотекстолит, кремний, керамика и т.д.) [30] до гибких оснований (бумага, полиэтиленнафталат, фольга и т.д.) [31–34]. Использование гибких оснований связано с развитием персональных радиоэлектронных систем и возможностью интеграции гибридных СВЧ-микросхем, а также patch-антенн [35] (или микрополосковых антенн в русскоязычных источниках [36]) в устройства любой формы.

В производстве гибридных СВЧ-микросхем используются диэлектрические и ферритовые подложки для обеспечения высокого качества передачи сигнала, минимизации потерь в линиях и рассеяния в материале.

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 свойств.

Также примечательными из-за магнитных свойств являются «ферриты». Ферриты – соединения оксида железа (Fe_2O_3) с более основными оксидами других металлов, являющиеся ферромагнетиками [39]. Широко применяются в качестве магнитных материалов в радиоэлектронике, радиотехнике и вычислительной технике, поскольку сочетают высокую намагниченность с полупроводниковыми или диэлектрическими свойствами [40]. 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.

2.1 Реологические характеристики материалов для печати

Реология (от греч. rheos – течение, поток и logos – слово, учение) – наука о деформациях и текучести вещества. Реология рассматривает процессы, связанные с необратимыми остаточными деформациями и течением разнообразных вязких и пластичных материалов, явления релаксации напряжений и т.д.

Изучение реологических свойств функциональных паст является важным этапом их производства, которое позволяет определить оптимальные условия и параметры для получения продукта с заданными характеристиками. Кроме того, реологические свойства пасты также влияют на ее механические, термические и физико-химические свойства.

Реологические свойства включают в себя следующие показатели [41]:

– деформация – изменение формы или размеров тела (или части тела) под действием внешних сил: при нагревании или охлаждении, изменении влажности и других воздействиях, вызывающих изменение относительного положения частиц тела. В твердых телах различают упругую деформацию (исчезающую после устранения воздействия, вызвавшего деформацию) и пластическую деформацию (остающуюся после удаления нагрузки). При деформации тела возникает сила, которая стремится восстановить прежние размеры и форму тела. Эта сила возникает вследствие электромагнитного взаимодействия между атомами и молекулами вещества. Ее называют силой упругости. Простейшим видом деформации является деформация на растяжение или сжатие, сдвиг, изгиб, кручение.

– упругость – способность тела после деформирования полностью восстанавливать свою первоначальную форму, т.е. работа деформирования равна работе восстановления. Упругие пасты возвращаются к исходной форме

после снятия нагрузки, в то время как пластичные пасты остаются деформированными [42];

– вязкость – способность тела оказывать сопротивление относительному смещению его слоев. Вязкое течение реализуется в истинно-вязких, ньютоновских жидкостях при любых, сколь угодно малых напряжениях сдвига. Полная вязкость жидкости складывается из ламинарной (ньютоновской), турбулентной и объемной вязкостей. При течении неньютоновских (аномально-вязких) жидкостей вязкость не остается постоянной величиной, она зависит от напряжения сдвига и градиента скорости. Вязкость зависит от состава пасты, размера и формы частиц, а также от температуры и скорости сдвига. Вязкость измеряется в паскаль-секундах (Па·с) и может быть определена с помощью ротационных или капиллярных вискозиметров;

– текучесть функциональной пасты – это свойство функциональных паст, которое определяет их способность к растеканию и заполнению неровностей на поверхности, на которую они наносятся. Текучесть функциональной пасты зависит от ее вязкости, температуры, давления и времени. Чем меньше вязкость пасты, тем выше ее текучесть. Однако, чрезмерная текучесть может привести к нежелательному растеканию пасты или ее вытеканию из зоны применения [43];

– адгезия – сила сцепления разнородных твердых или жидких тел, соприкасающихся своими поверхностями. Адгезия обусловлена физическим и химическим взаимодействием активных групп связующего с активными центрами на поверхности подложки. При низкой адгезии к поверхности материал будет легко отслаиваться, то есть покрытие будет недолговечным, с низкими защитными и механическими свойствами.

– временные характеристики функциональных паст, такие как время вжигания, время сушки и время стабилизации, играют важную роль в определении их эффективности и пригодности. Именно эти параметры определяют способность пасты к деформации под воздействием сил и сохранение своей формы.

Время спекания – это период, необходимый для того, чтобы функциональная паста превратилась из жидкого состояния в твердое. Этот параметр зависит от химического состава пасты, температуры окружающей среды и других условий, таких, как влажность и давление [44].

Время сушки – это период, в течение которого функциональная паста теряет летучие компоненты и становится достаточно твердой для обработки или эксплуатации. Время высыхания зависит от состава пасты, температуры окружающей среды и воздухообмена. Более короткое время высыхания может улучшить производительность и снизить временные затраты на производство;

– напряжение сдвига – это сила, действующая на единицу площади материала, которая вызывает деформацию сдвига. Для функциональных паст напряжение сдвига играет важную роль в процессах нанесения и растекания. Напряжение сдвига может быть измерено с помощью ротационных

вискозиметров, которые позволяют определить зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига;

– тиксотропия – это реологическое свойство, при котором вязкость материала уменьшается при механическом воздействии и возвращается к исходной вязкости после прекращения воздействия. Тиксотропия функциональных паст может быть полезна в различных аспектах их использования. Например, при нанесении пасты на поверхность, тиксотропия позволяет пасте легче растекаться и заполнять неровности, обеспечивая более равномерное покрытие. После нанесения, вязкость пасты восстанавливается, предотвращая растекание и обеспечивая контакт с поверхностью. Однако, чрезмерная тиксотропия может привести к проблемам при нанесении паст. Например, если вязкость пасты слишком сильно уменьшается при перемешивании или нанесении, это может вызвать трудности при точном контроле количества пасты и равномерности ее распределения [45];

– реопексия – это реологическое свойство материала, которое проявляется в увеличении вязкости при приложении напряжения сдвига или при длительном воздействии напряжения. Это свойство противоположно тиксотропии [46].

2.1.1 Фундаментальные аспекты получения микро- и наночастиц, используемых в пастах

Синтез порошка функциональной составляющей пасты является первой технологической операцией синтеза паст. Методы синтеза порошков весьма разнообразны, что позволяет широко варьировать их свойства. Это, в свою очередь, дает возможность наделять пасты требуемыми физическими, механическими и другие специальными свойствами.

Комплекс свойств порошка оказывает влияние не только на способ изготовления, но и на готовое изделие. При учете свойств подбирается способ синтеза порошка. Основные свойства порошков можно разделить на три группы: физические, химические и технологические [49].

Химические свойства включают в себя: химический состав материала, пирофорность и токсичность. Под химическим составом понимается содержание основного компонента порошка, а также различных добавок, механических примесей в процессе получения порошка и газов. Чистота порошка считается удовлетворительной при содержании основного материала 98 ... 99%. Примеси обычно представляют собой твердые растворы или химические соединения, из которых состоит материал. К механическим примесям относятся продукты износа дробильно-измельчающих агрегатов. Таким образом, химический состав порошка влияет не только на свойства пасты, но и на технологию его изготовления. Химический состав порошка характеризуется непостоянством, так как окисление порошка обычно происходит при хранении.

Пирофорность – это способность порошка самовоспламеняться на воздухе. В основном это зависит от химической природы металла, однако

большинство металлических порошков не представляют опасности самовоспламенения. Пирофорность зависит от состояния поверхности порошков. Оксидные пленки уменьшают ее. Влияние оказывает форма частиц, порошки с большей удельной поверхностью (например, дендритная форма) более склонны к самовозгоранию, чем, например, сферические порошки, которые имеют меньшую удельную поверхность [50].

Токсичность порошков металлов зависит от химического состава и степени окисления, размера частиц, концентрации, продолжительности воздействия, путей попадания в организм и т.д. Наиболее опасными являются ультрадисперсные порошки.

К физическим свойствам относят форму частиц, размер, гранулометрический состав, удельную поверхность частиц, плотность, микротвердость.

Форма частиц зависит от метода получения порошков и оказывает существенное влияние на их технологические свойства: плотность, прочность, проницаемость и др., а также на их однородность (рисунок 2.1) [51].

Исходя, из способа получения порошка можно получить различные формы частиц:

- 1) сферическая – диспергирование (распыление), испарение–конденсация;
- 2) каплеобразная – распыление;
- 3) губчатая – восстановление твердых оксидов;
- 4) осколочная – измельчение твердых материалов в шаровой вращающейся мельнице;
- 5) дендритная – электролиз.



Рисунок 2.1 – Форма частиц

На практике чаще всего применяют шихту (порошковую смесь), состоящую из частиц порошка с разным размером.

Существующие способы синтеза порошков позволяют получать порошки, размер частиц которых варьируется в довольно широком диапазоне. В то же время для получения пленки с постоянными размерами и свойствами необходимо, чтобы исходные порошки имели определенную зернистость. Порошок делится на пять категорий зернистости (таблица 2.1). Каждую из

этих категорий можно разделить на фракции. Путем смешивания порошков разных фракций в определенных пропорциях достигаются однородные свойства пленки. Относительное содержание фракции частиц различного размера называется гранулометрическим составом порошка.

Таблица 2.1 – Категории зернистости порошков

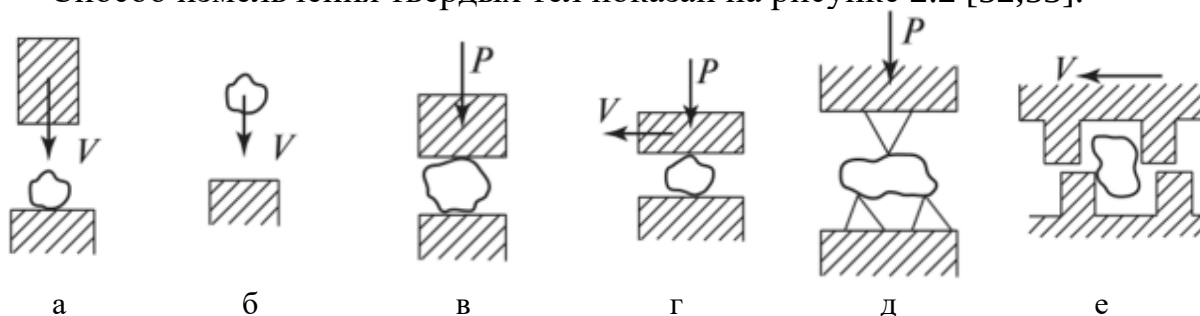
Категория зернистости порошка	Размер частиц, мкм
Грубая	150..500
Средняя	40..150
Тонкая	10..40
Средне-тонкая	0,5..10
Ультратонкая	менее 0,5

К технологическим свойствам относятся: насыпная плотность, текучесть, объем и плотность утряски.

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.

Способ измельчения твердых тел показан на рисунке 2.2 [52,53].



а – стесненный удар, б – свободный удар, в – раздавливание,
г – истирание, д – раскалывание, е – резание, P – нагрузка, V – скорость
Рисунок 2.2 – Получение порошка механическим способом

При ударе (рисунок 2.2, а, б) под действием динамических нагрузок в теле возникают напряжения, приводящие к его разрушению. При этом различают разрушение при стесненном и свободном ударе. Стесненный удар обеспечивается наличием нескольких рабочих органов, воздействующих на материал. Свободный удар происходит за счет столкновения с рабочим органом дробилки или другим измельчаемым материалов. Удар применяется в роторных и молотковых дробилках, молотковых и струйных мельницах, дезинтеграторах.

При раздавливании (рисунок 2.2, в) определяющим фактором является напряжение сжатия под действием статической нагрузки между рабочими органами. Раздавливание используется в щековых дробилках. При истирании (рисунок 2.2, г) основными разрушающими напряжениями являются напряжения сдвига. Истирание в сочетании с дроблением используется в валковых и шаровых мельницах, валковых и конусных дробилках. При раскалывании (рисунок 2.2, д) в теле возникают изгибающие напряжения; этот метод измельчения применяется в дискозубых дробилках. При измельчении материала комбинируются те или иные усилия. Раздавливание применяют при крупном и среднем дроблении, истирание – при тонком измельчении. В зависимости от физико-механических свойств материалов выбирают обычно методы измельчения, приведенные в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Комбинирование способов измельчения материала

Свойства материала	Метод измельчения
Твердый, хрупкий	Раздавливание, удар
Твердый, вязкий	Раздавливание
Хрупкий, средней твердости	Удар, раскалывание, истирание
Вязкий, средней твердости	Истирание и/или удар

Измельчение в твердом состоянии производится обычно в шаровых, вихревых, вибромельницах и мельницах планетарно-центробежного размола. В указанных мельницах, кроме вихревых, измельчение исходных материалов осуществляется путем дробления и истирания во вращающихся или вибрирующих барабанах между размалывающими телами (обычно стальные или твердосплавные шары). Следствием этого является загрязненность получаемых порошков продуктами истирания размалывающих тел и футеровки барабана [52].

Вихревые мельницы лишены отмеченного недостатка, при котором измельчение происходит в рабочей камере при мощном вихревом потоке, создаваемый пропеллерами, вращающимися в противоположных направлениях. Общим недостатком твердотельных методов измельчения является их низкая производительность.

Самым простым способом получения порошка из расплава является процесс гранулирования, при котором тонкая струя расплава охлаждается в воде после измельчения о ленту транспортера.

Другой метод, распыление, отличается от описанного выше тем, что он имеет более высокую производительность и возможность получения размер частиц порошка меньше, чем предыдущий метод.

Преимущества метода распыления:

- 1) стоимость порошка незначительно превышает стоимость материала;
- 2) порошки обладают хорошей спекаемостью и могут быть применены для изделий высокой плотности;
- 3) возможность получения комплексно-легированных порошков.

Недостатки метода распыления:

- 1) низкая чистота порошка вследствие окисленности поверхности частиц;

2) возможность распыления только металлов и сплавов, обладающих сравнительно низкой температурой плавления (ограничивается стойкостью огнеупорных материалов плавильных устройств).

Важным аспектом синтеза микрочастиц для паст является контроль гранулометрического состава, поскольку распределение размеров частиц существенно влияет на реологические свойства паст, плотность структуры и конечную электропроводность. Часто применяются бимодальные или мультимодальные системы, в которых более мелкие частицы заполняют промежутки между крупными, что приводит к снижению пористости и улучшению проводящих характеристик слоя после спекания. Такой подход широко используется в пастах для толстопленочной электроники и силовых электронных компонентов.

Таким образом, синтез микрочастиц для паст ориентирован на получение частиц с оптимальным сочетанием размера, формы и чистоты, обеспечивающим высокую технологичность печати и стабильные электрические свойства. В отличие от наночастиц, микрочастицы менее чувствительны к агломерации и условиям хранения, что делает их особенно привлекательными для промышленных применений, где допускается высокотемпературная обработка и требуется высокая надежность проводящих соединений.

В настоящее время существует две основные стратегии получения металлических наночастиц: «сверху вниз» и «снизу вверх» [54], как показано на рисунке 2.3. При подходе «сверху вниз» объемные, нитевидные или порошковые материалы расщепляются на металлические наночастицы. Напротив, при подходе «снизу вверх» металлические наночастицы можно не только получить из ионов или молекул-предшественников с помощью соответствующих восстановителей, но и сформировать путем разложения молекул-предшественников.

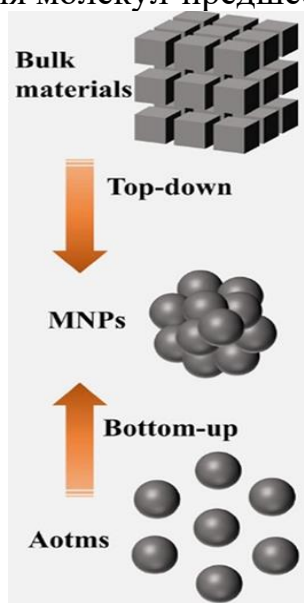


Рисунок 2.3 – Подходы «сверху вниз» и «снизу вверх»

Подход «сверху вниз» основан на уменьшении размеров исходного массивного материала или тонкой металлической пленки до наноуровня с использованием физических методов, таких как напыление, лазерная абляция или механическое измельчение. Эти методы позволяют получать наночастицы высокой чистоты, однако часто сопровождаются широким распределением размеров и высокой энергоемкостью процессов. В противоположность этому, подход «снизу вверх» предполагает формирование наночастиц из атомов или ионов металла в результате химических или физико-химических реакций, что обеспечивает лучший контроль размера, формы и морфологии частиц и делает данный подход наиболее распространенным для синтеза МНП, используемых в чернилах и пастах для печатной электроники.

Одним из подходов к синтезу металлических наночастиц для чернил, рассматриваемых в обзоре [54], являются физические методы в вакууме (рисунок 2.4). В этих методах металлический материал испаряется или выбивается с поверхности мишени в условиях высокого вакуума, после чего атому или кластеру металла создаются условия для конденсации и образования наночастиц при контролируемом охлаждении или на приемной поверхности/коллекторе в вакуумной камере. Такой вакуумный синтез позволяет получить чистые, хорошо кристаллические металлические наночастицы без использования химических восстановителей или стабилизаторов, что упрощает последующее формулирование чернил и снижает необходимость удаления органических включений перед спеканием. Вакуумные методы обеспечивают высокую степень контроля над составом и чистотой частиц, уменьшают загрязнение примесями и позволяют получать частицы с малым разбросом частиц по размеру, что обеспечивает стабильную проводимость после термообработки. Однако процесс требует сложного вакуумного оборудования и обычно используется в исследовательских целях или для получения исходных наноматериалов, которые затем дополнительно диспергируются для формирования чернил или паст.

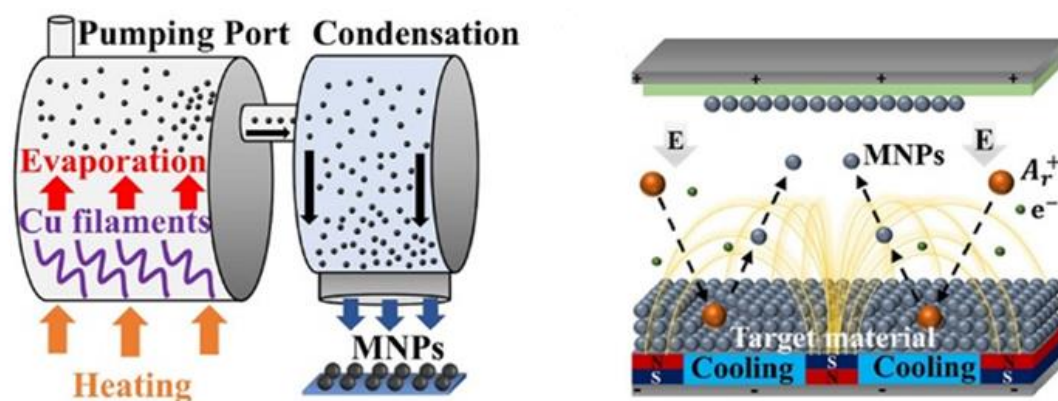


Рисунок 2.4 – Вакуумное термическое испарение и ионное распыление

Лазерная абляция заключается в создании металлических наночастиц путем лазерной абляции твердой мишени, находящейся в газообразном или жидком состоянии, и их сборе в виде порошка или раствора. По сравнению с

лазерной абляцией в газовой среде (воздухе или инертном газе) получение наночастиц в жидкостях более выгодно. При лазерной абляции в жидкостях можно контролировать распределение металлических наночастиц по размерам, регулируя время абляции, тип или концентрацию раствора. На рисунке 2.5 представлена схема лазерной абляции в жидкостях. Сначала лазерный луч передает энергию целевому материалу. За это время в результате испарения или сублимации из целевого материала образуются пары или ионы. Затем под действием охлаждающей жидкости образуются металлические наночастицы.

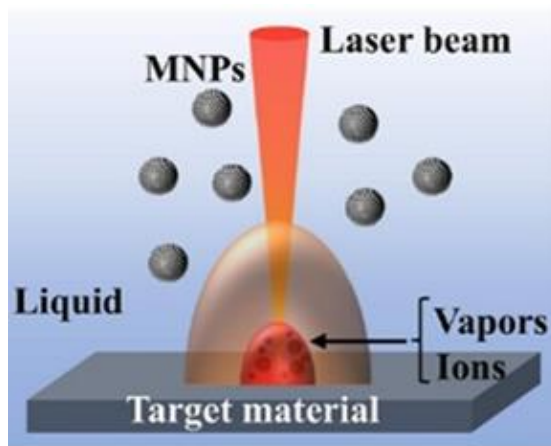


Рисунок 2.5 – Лазерная абляция в жидкостях

Химическое восстановление является наиболее распространенным методом синтеза металлических наночастиц для чернил. В этом подходе ионы металла (например, Ag^+ , Cu^{2+}) восстанавливаются до металла с использованием химических восстановителей в растворе (рисунок 2.6). Размер и морфология МНП регулируются выбором восстановителя, стабилизирующих агентов, концентраций и температурных условий. Данный метод хорошо масштабируется, позволяет получать устойчивые коллоидные дисперсии и широко применяется для производства проводящих чернил, хотя требует последующей термообработки для удаления органических стабилизаторов и достижения высокой электропроводности [55].



Рисунок 2.6 – Химическое восстановление

Фотовосстановление (рисунок 2.7) основано на использовании ультрафиолетового или видимого излучения для инициирования восстановления ионов металла в растворе или непосредственно в напечатанном слое. Под действием света образуются активные радикалы или возбужденные состояния, приводящие к формированию металлических наночастиц. Этот метод позволяет локально контролировать процесс синтеза, снижать температуру обработки и сочетать формирование наночастиц с процессом печати. Ограничениями являются необходимость фоточувствительных прекурсоров и сравнительно сложный контроль кинетики роста частиц.

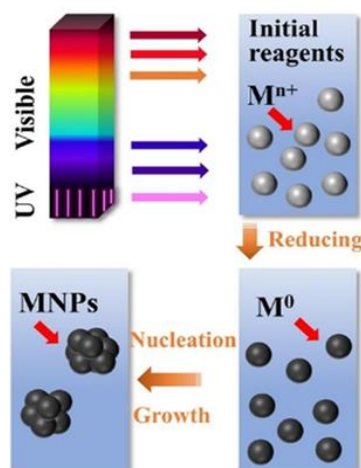


Рисунок 2.7 – Фотохимическое восстановление

Еще одним способом синтеза наночастиц является микроэмульсионный синтез [56, 57]. Микроэмульсионный синтез – это метод получения наночастиц, основанный на использовании термодинамически стабильных микроэмульсий – это гомогенные, прозрачные или слабо мутные системы, состоящие из:

- водной фазы (гидрофильная среда, содержащая предшественники);
- масляной фазы (гидрофобная среда, например, гексан, циклогексан);

– поверхностно-активного вещества (ПАВ) (например, Твин-80, СТАВ, АОТ);

– ко-ПАВ (опционально, например, бутанол — для стабилизации интерфейса).

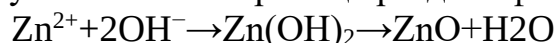
В таких системах образуются наноразмерные капли воды (диаметром 5–50 нм), диспергированные в масле, или наоборот – масляные капли в воде (обратные микроэмульсии). Эти капли действуют как нанореакторы, ограничивая рост частиц и обеспечивая узкий размерный распределение.

Например, для синтеза оксида цинка (ZnO) методом микроэмульсии используют следующий подход:

1. Подготовка обратной микроэмульсии. Водный раствор, содержащий соли цинка (например, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ или ZnCl_2), диспергируется в масляной фазе с ПАВом (например, АОТ – ди-2-этилгексилсульфосукцинат натрия) и ко-ПАВом.

2. Введение осадителя. В отдельную микроэмульсию вводят раствор щелочи (например, NaOH или NH_4OH). Затем обе микроэмульсии смешивают.

3. Реакция в нанореакторах. При смешивании ион Zn^{2+} из водной капли реагирует с OH^- из другой капли на границе раздела фаз:



Затем $\text{Zn}(\text{OH})_2$ термически или при комнатной температуре дегидратируется до ZnO.

4. Изоляция и промывка. После реакции микроэмульсия разрушается (например, добавлением этанола), и наночастицы ZnO осаждаются, промываются и высушиваются.

Преимущества микроэмульсионный синтеза [58, 59] является точный контроль размера (частицы получают размером 5–30 нм с узким распределением ($\text{PDI} < 0.1$)), минимальное загрязнение, так как реакция происходит в изолированных каплях, Можно получать сферические, палочковидные или шестигранные наночастицы, контролируя параметры (pH, температура, соотношение фаз) и полученные частицы легко диспергируются в органических растворителях (толуол, этилацетат) и подходят для полупроводниковых паст в OFET, TFT и сенсорах.

Однако у данного метода синтеза существуют следующие недостатки:

– высокая стоимость за счет использования ПАВов и больших объемов растворителей.

– сложность масштабирования производства.

– необходимость удаления ПАВ т.к. остатки ПАВ могут снижать подвижность носителей в полупроводнике.

Таким образом, независимо физического или химического метода конечным продуктом являются металлические наночастицы с заданным размером, морфологией и фазовым составом. Однако сами по себе наночастицы не могут быть непосредственно использованы в процессах печатной электроники. Для их практического применения требуется последующий этап формулирования проводящих чернил или паст,

включающий диспергирование наночастиц в жидкой среде, стабилизацию коллоидной системы и регулирование реологических свойств в соответствии с выбранной технологией печати. Именно этот этап определяет возможность печати материала, однородность осажденного слоя и конечные электрические характеристики проводящих структур.

Для получения проводящих чернил или паст синтезированные металлические наночастицы, как правило, диспергируют в подходящем растворителе или смеси растворителей с добавлением органических связующих и функциональных добавок. Растворитель выбирается с учетом метода печати (струйная, аэрозольная, трафаретная), требований к вязкости, поверхностному натяжению и скорости испарения. В качестве связующих и стабилизаторов широко применяются полимерные материалы (например, поливинилпирролидон, полиакрилаты, целлюлозные производные), которые предотвращают агломерацию наночастиц за счет стерических и электростатических эффектов и обеспечивают коллоидную стабильность системы [60–62].

При формировании чернил концентрация металлической фазы обычно составляет 5–30 %, что позволяет достичь низкой вязкости, необходимой для струйной или аэрозольной печати. В случае паст, предназначенных для трафаретной или цифровой печати, содержание металла значительно выше до 60–85 %, а в состав дополнительно вводятся высокомолекулярные связующие и реологические модификаторы для получения тиксотропных свойств и устойчивости формы напечатанного слоя [61, 63].

Важным этапом после печати является термическая, фотонная или лазерная обработка, направленная на удаление органических компонентов и спекание металлических наночастиц с образованием непрерывной проводящей сети. Наличие стабилизаторов, необходимых на стадии получения чернил, одновременно является фактором, ограничивающим электропроводность, поэтому оптимизация их типа и концентрации представляет собой компромисс между стабильностью чернил и эффективностью последующего спекания [60]. В ряде случаев применяются гибридные подходы, сочетающие наночастицы с микрочастицами или безчастичные прекурсоры, что позволяет улучшить плотность структуры частиц и снизить удельное сопротивление печатных проводников.

Таким образом, процесс получения проводящих чернил и паст на основе металлических наночастиц представляет собой многостадийную задачу, в которой синтез наночастиц, их поверхностная модификация, выбор органической матрицы и условия постобработки в совокупности определяют функциональные свойства материалов для печатной электроники.

2.1.2 Анализ и модификация реологических свойств паст на основе подбора связующего компонента

Глобальный рынок проводящих чернил и паст для электроники характеризуется высокой степенью конкуренции и доминированием

международных производителей, предлагающих широкий спектр продуктов, предназначенных для различных сегментов электронной промышленности. Данные материалы находят применение в производстве печатных плат, гибкой и растягиваемой электроники, сенсорных элементов, радиочастотных идентификационных меток (RFID), органических светодиодов (OLED), гибких дисплеев, а также в других перспективных направлениях, таких как носимая электроника и интернет вещей (IoT).

Ключевые игроки рынка специализируются на разработке и выпуске проводящих составов на основе таких металлов как серебро, медь, углеродные наноматериалы (графен, углеродные нанотрубки), а также гибридные системы, сочетающие различные функциональные компоненты. Такие материалы оптимизированы под различные технологии аддитивного изготовления, включая струйную печать, офсетную печать, флексографию, шелкографию и другие методы цифровой печати. Это позволяет обеспечивать высокую точность нанесения, стабильные электрические характеристики и совместимость с термолабильными подложками.

Среди лидеров отрасли выделяются такие компании, как DuPont, Heraeus, Samsung SDI, Applied Ink Solutions, Sun Chemical, Novacentrix, Fujifilm, Cabot Corporation и ряд других, активно инвестирующих в исследования и разработки с целью повышения эффективности, снижения стоимости и расширения области применения проводящих паст и чернил. Развитие рынка стимулируется растущим спросом на миниатюрные, гибкие и экономически эффективные решения в электронике, а также прогрессом в области печатной электроники и устойчивого производства. В таблице 2.3 представлены сведения по основным производителям паст.

Таблица 2.3 – Производители паст и чернил

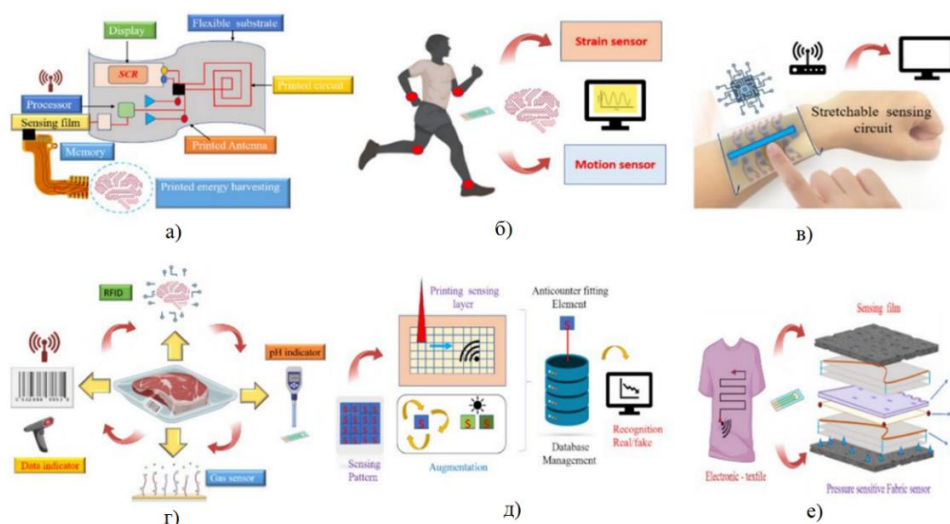
Название пасты / серии	Назначение / область применения	Производитель	Страна
Проводящие, резистивные и диэлектрические пасты	Формирование проводников, толсто пленочных резисторов, изоляционных слоев и межслойной изоляция в многослойных структурах	ООО «ЭЛМА-ПАСТЫ», ООО «Дельта Пасты»	Россия
Metalon Conductive Inks	Проводящие чернила для струйной и экранной печати, гибкая электроника	NovaCentrix	США
LOCTITE Conductive Inks (Ag, C)	Проводящие и функциональные чернила для печатной электроники	Henkel Electronic Materials	Германия
Thick-Film Conductor Pastes (Ag, Ag-Pd, Cu)	Пасты для толсто пленочной электроники и гибридных ИС	Heraeus Electronics	Германия
Conductive Inks & Epoxies	Проводящие пасты и эпоксидные материалы	Creative Materials Inc.	США
Silver Conductive Paste for Screen Printing	Пасты для экранной печати, сенсоры, токопроводящие дорожки	Foshan Longxin New Material Co., Ltd.	Китай

Название пасты / серии	Назначение / область применения	Производитель	Страна
Conductive Silver / Copper Inks (OEM)	Бюджетные проводящие чернила для прототипирования и ремонта	Китайские OEM-производители	Китай
Conductive Inks & Nanomaterials	Чернила и материалы для печатной электроники	AdNano Technologies Pvt. Ltd.	Индия

Современное состояние проводящих паст и чернил, применяемых в электронике, демонстрирует высокую степень технологической зрелости данных материалов в контексте их использования в традиционных приложениях – таких как печатные платы, гибкая электроника и RFID-устройства. Однако дальнейшее развитие отрасли требует поиска новых путей применения проводящих композитов, позволяющих реализовать принципиально новые функции, недоступные в рамках классических материалов.

В зависимости от технологии нанесения предъявляются различные требования к вязкости и характеру течения материала. Для струйной печати требуются низковязкие ньютоновские или слабо псевдопластичные чернила с вязкостью, как правило, в диапазоне 1–20 мПа·с и строго контролируемым поверхностным натяжением. В отличие от этого, пасты для цифровой и трафаретной печати должны обладать выраженными неньютоновскими свойствами, включая псевдопластичность и тиксотропию, что позволяет материалу легко течь под действием сдвига в процессе печати и быстро восстанавливать структуру после нанесения, предотвращая растекание и оседание слоя.

Основным инструментом модификации реологических свойств является подбор органической матрицы, включающей растворители, связующие полимеры и низкомолекулярные добавки. Растворители определяют базовую вязкость системы и кинетику испарения, тогда как полимерные связующие формируют пространственную сеть, обеспечивающую механическую прочность и адгезию напечатанного слоя к подложке. Наиболее широко применяются поливинилпирролидон, полиакрилаты, эпоксидные смолы, этилцеллюлоза и их производные, которые позволяют тонко регулировать вязкость и тиксотропные свойства паст и чернил. Использование подобных добавок приводит к расширению областей применения чернил, что и продемонстрировано на рисунке 2.8 [75].



а) гибкая и печатная электроника, б) мягкая робототехника, в) растягивающийся датчик, г) интеллектуальная упаковка, д) чернила для защиты от подделок, е) электронный текстиль

Рисунок 2.8 – Области применения проводящих чернил на полимерной основе

Дополнительную роль в управлении реологией играют реологические модификаторы и структурообразующие добавки, такие как органические загустители, поверхностно-активные вещества и диспергирующие агенты. Эти компоненты способствуют формированию устойчивых дисперсий частиц, предотвращают агломерацию и седиментацию металлических наполнителей, а также улучшают однородность течения материала. В пастах с высоким содержанием твердой фазы такие добавки критически важны для обеспечения печати и стабильности при хранении [76].

Существенное влияние на реологические характеристики оказывает гранулометрический состав металлического наполнителя. Использование бимодальных и мультимодальных систем частиц позволяет повысить плотность упаковки и снизить эффективную вязкость паст за счет заполнения пустот мелкими частицами между крупными. Такой подход не только улучшает реологию, но и положительно сказывается на электрических свойствах после спекания, снижая пористость и контактное сопротивление проводящего слоя [77–79].

Таким образом, модификация реологических характеристик паст и чернил представляет собой многофакторную задачу, в которой состав металлического наполнителя, органическая матрица и функциональные добавки подбираются комплексно с учетом требований конкретной технологии печати. Грамотно оптимизированные реологические свойства являются необходимым условием получения высококачественных проводящих структур с заданной геометрией и стабильными электрическими характеристиками.

В современной промышленности и научных исследованиях активно используют низкотемпературные связующие вещества, чьей ключевой функцией является сохранение структурной целостности и эксплуатационных

характеристик материалов при пониженных температурах. Одним из таких примеров является терпинеол, который широко используется в парфюмерии и фармацевтике из-за низкой температурой кипения и замерзания. Использование терпинеола обусловлено хорошей растворяющей способностью, что позволяет легко диспергировать активные компоненты в пасте, а также высокой стабильностью и совместимостью с различными материалами [64].

Широкое применение этиленгликоля обусловлено тем, что он обладает низкой вязкостью, смачиваемостью, хорошей растворимостью в воде и способностью образовывать водородные связи с другими компонентами [65].

Этилацетат (этиловый эфир уксусной кислоты) – широко применяемый в промышленности органический растворитель и связующее вещество. Представляет собой бесцветную легколетучую жидкость с температурой кипения порядка 77 °С, плотностью 0,897 г/см³ и ограниченной растворимостью в воде (8 г/100 мл). Низкая вязкость обеспечивает высокую проникающую способность и быстрое испарение. Химически стабилен в стандартных условиях, но подвергается гидролизу в кислой или щелочной среде [66].

Полиэтиленгликоль 400 (ПЭГ-400) – олигомерный представитель полиэфиров, широко применяемый в фармацевтике, косметике и химической промышленности. Представляет собой гигроскопичную жидкость с температурой плавления 52–60 °С и температурой кипения порядка 250 °С. Обладает высокой растворимостью в воде и полярных органических растворителях, способен к образованию азеотропных смесей. Ключевые свойства включают низкую токсичность, химическую стабильность и способность модифицировать реологию систем [67].

Глицерин (глицерол) – многоатомный спирт, широко используемый в качестве связующего, пластификатора и гигроскопичного агента в составах лаков, клеев, косметических и фармацевтических продуктов. Высокая вязкость и гигроскопичность обеспечивают стабилизацию дисперсных систем за счет удержания влаги и формирования водородных связей с частицами. Глицерин также проявляет хорошую растворяющую способность по отношению к полярным соединениям, способствуя однородности композиций и улучшению адгезивных свойств за счет электростатических и дисперсионных взаимодействий [68].

Этилцеллюлоза в терпинеоле – это популярный органический связующий компонент, используемый в производстве электропроводящих паст, диэлектрических материалов, красок и покрытий, где терпинеол выступает как растворитель для этилцеллюлозы, обеспечивая нужную консистенцию и летучесть, а после испарения остается пленкообразующая матрица ЭЦ, скрепляющая активные частицы. [69, 70]

В качестве дополнительных компонентов связующего вещества используются дифенилформамид (ДМФ) и терпинеол. Применение этих компонентов в связующем позволяет получить пасту с требуемыми

реологическими свойствами, обеспечивающими хорошее смачивание подложки и последующую хорошую адгезию покрытия, а также полностью удаляющиеся из покрытия при температуре отжига (350–450 °С), т.к. температура их кипения значительно ниже (153 °С и 226 °С соответственно). Терпинеол в смеси с ДМФ замедляет рекристаллизацию нафталина, что обеспечивает длительное сохранение реологических характеристик пасты [71].

В составе органического связующего для пасты, включающем этилцеллюлозу и терпинеол, дополнительно содержатся полибутилметакрилат и изоамилсалицилат [72]. Сочетание этилцеллюлозы, изоамилсалицилата, полибутилметакрилата и терпинеола позволяет получить органическое связующее с низкой температурой кристаллизации и малой скоростью испарения, обеспечивая за счет этого высокую жизнеспособность пасты. Кроме того, данное связующее позволяет повысить когезию пасты.

–Альфа-терпинеол применяется в качестве органического связующего в пастах для низкотемпературного спекания благодаря комплексу свойств: высокой летучести при умеренном нагреве, обеспечивающей полное удаление без углеродных остатков; оптимальной вязкости и тиксотропности, способствующим формированию однородного покрытия; а также способности стабилизировать суспензию металлических частиц, предотвращая их агломерацию. Это позволяет получить чистый спеченный серебряный слой с улучшенными функциональными характеристиками [73].

Тиксотропное поведение пасты определяется концентрацией и дисперсностью функционального материала, а также характером его взаимодействия с органическим связующим. В качестве пленкообразователя используется связующее этилцеллюлоза, которая обеспечивает необходимые вязкостные свойства и формирует адгезионную пленку, прочно связывающую проводник с подложкой, бутилкарбитацетат, как растворитель, гарантирует полную растворенность полимерного компонента и придает пасте требуемую текучесть и пластификаторы (стеарокс-6 и олеиновая кислота), которые снижают свободную поверхностную энергию частиц, улучшая смачиваемость порошка, подавляя коагуляцию и придавая эластичность конечному составу [74].

Реологические характеристики проводящих чернил и паст являются одним из ключевых факторов, определяющих их пригодность для конкретных методов печати, качество формируемых проводящих структур и воспроизводимость электрических свойств. Под реологией в данном контексте понимается совокупность свойств, характеризующих течение, деформацию и структурную устойчивость дисперсных систем под действием внешних нагрузок, таких как сдвиг, давление или гравитация. Модификация реологических параметров направлена на обеспечение стабильного процесса печати, предотвращение дефектов (растекание, спутниковые капли, обрывы линий) и сохранение геометрии напечатанного слоя до стадии сушки и спекания.

2.2 Функциональные печатные материалы

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 [80]. 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 [11].

Состав материала, размер частиц, форма частиц и процентное содержание твердых частиц являются параметрами, определяющими качество функционального материала [81]. 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 [82].

Используемые при печати компонента или целого устройства материалы влияют на качество готового изделия. Кроме того, 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 МОм/□.

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.

2.3.1 Диэлектрические функциональные материалы

Диэлектрический функциональный материал представляет собой чернила или пасты, обладающие электроизоляционными свойствами. Диэлектрические материалы находят применение во многих аспектах печатной электроники, включая защиту цепей, изоляцию слоев в многослойных структурах, изготовление конденсаторов и транзисторов [83–85]. 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) [86]. 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 чернил и 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 [85].

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 [87, 88] и конденсаторов [89, 90]. 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 меньшую петлю гистерезиса. 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 материалов, обладающих диэлектрическими свойствами и перспективой внедрения, является титанат бария стронция. Титанат бария-стронция [91] (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 $\text{Ba}_0{,}6\text{Sr}_0{,}4\text{TiO}_3$, были напечатаны на алюминиевой подложке и спекались при температуре 1100–1200 °С. Полученные пленки показали достаточно высокую однородность по поверхности и внутренней структуре. Также отмечалось, что качество структуры повышалось с увеличением температуры спекания (рисунок 2.9).

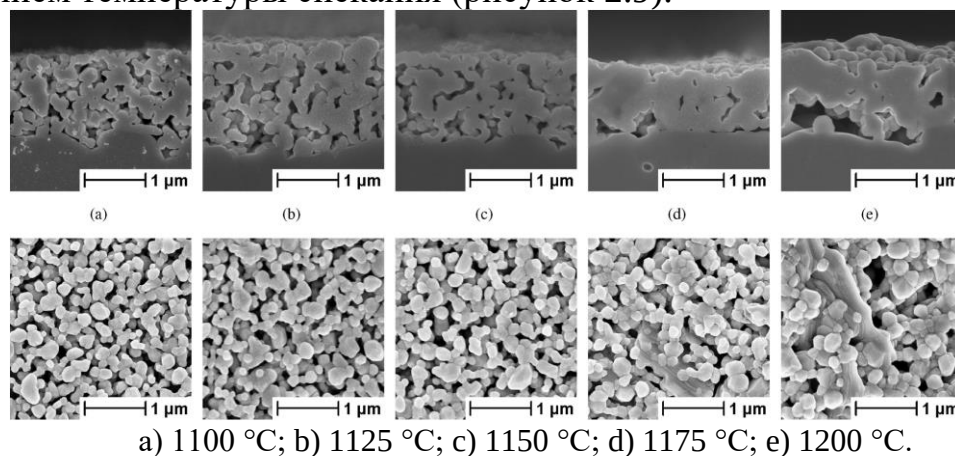


Рисунок 2.9 – Микрофотография структуры пленки BST при различных температурах

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

Перспектива развития отрасли синтеза новых материалов нацелена на получение полупрозрачных или прозрачных материалов. В [92] представлено описание оптически прозрачной метаповерхности из трехмерного печатного и жидкого диэлектрического материала для переключаемых функций поглощения и отражения в микроволновом диапазоне частот.

2.3.2 Проводящие функциональные материалы

Проводящие чернила и пасты представляют собой взвесь проводящего металлического порошка в жидкой среде. Проводящие чернила и пасты

используются для изготовления проводящих дорожек и рисунков в печатной электронике 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 [14]. Поэтому каждая металлическая наночастица должна быть инкапсулирована органическими добавками и стабилизаторами для образования стерического эффекта между отдельными частицами во избежание агломерации [93]. 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 [94]. Некоторые из широко используемых методов спекания включают: термическое спекание, спекание интенсивного импульсного света (IPL), инфракрасное (ИК) спекание, лазерное спекание, электрическое спекание, микроволновое спекание и т.д. 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 [11]. 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 [95]. 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 [96]. Тем не менее, разработка рецептов 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 [97]. 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 [98].

Биметаллическая наночастица «ядро/оболочка» представляет собой особый тип наночастиц, состоящих из двух разных материалов, в которых внутреннее «ядро» окружено внешней «оболочкой» из другого материала [99]. 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 [100]. 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 [97].

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 [14,100]. 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 микроstructures для лучшей электропроводности. Нанопроволоки 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. [100]

2.3.3 Ферритовые пасты

Ферриты – материалы на основе оксида железа в сочетании с оксидами других металлов. СВЧ-ферриты относятся к магнитным материалам специального назначения. Они используются в диапазоне длин волн от 1 м до 1 мм. Впервые ферриты как магнитные материалы были запатентованы Гильбертом в Германии в 1909 г., однако, из-за низкой магнитной проницаемости по сравнению с металлическими магнетиками, применения им не нашли. И только в 40-х годах Сноек получил СВЧ-ферриты, которые нашли широкое практическое применение. В составе СВЧ-ферритов основным компонентом является Fe_2O_3 . Однако, помимо Fe_2O_3 , в составе так же содержатся оксиды различных металлов, таких как Ni, Mn, Zn, Cd, Li, Bi и другие [102].

Применяемые в электронной технике магнитные материалы подразделяют на две основные группы: магнитотвердые и магнитомягкие.

К магнитотвердым относят материалы с большой коэрцитивной силой. Они перемагничиваются лишь в очень сильных магнитных полях и служат для изготовления постоянных магнитов.

К магнитомягким относят материалы с малой коэрцитивной силой и высокой магнитной проницаемостью. Они обладают способностью намагничиваться до насыщения в слабых магнитных полях, характеризуются узкой петлей гистерезиса и малыми потерями на перемагничивание. Магнитомягкие материалы используются в основном в качестве различных магнитопроводов: сердечников дросселей, трансформаторов, электромагнитов, магнитных систем электроизмерительных приборов [103].

Ферритовые пасты – это композиционные материалы, содержащие магнитные частицы как один из основных компонентов. Такие пасты отличаются магнитной проницаемостью и способностью к изменению магнитных свойств под воздействием внешнего магнитного поля. Это позволяет им быть эффективно использованными в магнитных устройствах, требующих контроля над магнитными свойствами материала.

Ферритовые пасты состоят из мелкодисперсных частиц различных ферромагнитных материалов, таких как железо, никель, кобальт и их сплавы. Размер частиц обычно составляет от нескольких нанометров до нескольких микрометров.

Структура ферритовых паст определяется размером и формой частиц, а также их распределением в дисперсионной среде. Оптимальная структура обеспечивает высокую магнитную восприимчивость и стабильность пасты.

Существует несколько методов получения ферритовых порошков, среди которых можно выделить следующие:

– химическое осаждение: включает в себя химические реакции, в результате которых образуются мелкодисперсные частицы ферромагнитного материала;

– электрохимическое осаждение: используется электролиз для получения ферромагнитных частиц на электродах;

– механическое диспергирование: заключается в измельчении крупных частиц ферромагнитного материала до требуемого размера с помощью механических методов, таких как ультразвуковая обработка, шаровая мельница и т.д.

Ферромагнитные материалы на основе оксидов металлов находят широкое применение в различных областях техники, таких как электроника, энергетика, медицина и т.д. [107–110]. Одним из примеров является ферритовый порошок $\text{Li}_{0,4}\text{Fe}_{2,4}\text{Zn}_{0,2}\text{O}_4$, который представляет собой сложный оксид, состоящий из лития, железа и цинка. Этот материал обладает магнитными свойствами, к которым относятся высокая магнитная восприимчивость, низкие потери на вихревые токи и хорошая химическая стабильность.

Магнитомягкие ферриты являются востребованными материалами для производства пассивных электронных компонентов, таких как планарные катушки индуктивности, фазовращатели, вентили, циркуляторы и др. Особенно активно используются ферримангнетики со структурой шпинели ($\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$, где $x = 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$) из-за высокой температуры Кюри, наличия резонансов доменной структуры и естественного ферромагнитного резонанса в диапазоне высоких частот. От синтеза ферритов зависят их магнитные и структурные свойства, которыми определяется область практического применения материалов [111].

Ферритовые пасты обладают рядом свойств, которые определяют их применение в различных областях. К основным свойствам можно отнести:

– магнитные свойства. Ферритовые пасты обладают высокой магнитной восприимчивостью и могут легко намагничиваться в присутствии внешнего магнитного поля;

– в зависимости от состава и структуры, ферритовые пасты могут обладать различной электропроводностью, что позволяет использовать их в качестве проводящих элементов в электронных устройствах;

– многие ферритовые пасты обладают высокой термической стабильностью и могут работать при повышенных температурах.

Одним из основных свойств ферритовых паст является возможность создания высокой индукции магнитного поля при небольших габаритах. Это делает их перспективным материалом для создания магнитных устройств, таких как электромеханические преобразователи, датчики магнитного поля и трансформаторы.

Благодаря высокой магнитной проницаемости и низкому магнитному сопротивлению, ферритовые пасты обеспечивают низкие потери энергии и высокую эффективность работы устройств на высоких частотах. Таким образом, ферритовые пасты являются важным материалом для создания современных электронных и магнитных устройств, обеспечивая им высокую производительность и надежность.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое реология пасты и почему она критически важна для печати электроники?
2. Какие три основных реологических параметра влияют на стабильность потока при inkjet-печати? Объясните, как каждый из них влияет на процесс.
3. В чем разница между неньютоновской и ньютоновской жидкостью? Приведите пример пасты для печатной электроники, которая является неньютоновской.
4. Почему для печати электроники по струйной технологии используются наночастицы вместо микро- или макрочастиц? Как это связано с разрешением и проводимостью?
5. Как влияет размер частиц на вязкость, стабильность суспензии и спекание после печати?
6. Опишите метод химического восстановления для получения наночастиц серебра. Какие восстановители и стабилизаторы используются?
7. Как работает лазерная абляция в производстве металлических нанопорошков? Каковы ее преимущества и недостатки по сравнению с химическими методами?
8. Что такое микроэмульсионный синтез? Как он применяется для получения наночастиц оксида цинка (ZnO) для полупроводниковых паст?
9. Объясните, почему механическое измельчение подходит для получения микропорошков, но не для нанопорошков.
10. Приведите пример состава проводящей пасты на основе серебра. Какие компоненты входят в состав, и какова роль каждого (наполнитель, связующее, растворитель, добавки)?
11. Что такое ферритовые пасты? Какие компоненты входят в их состав (например, $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$)? Какие устройства на их основе можно печатать?
12. Почему углеродные нанотрубки и графен становятся популярными в альтернативных проводящих пастах? Какие у них ограничения по сравнению с серебром?
13. Почему для струйной печати паста должна иметь низкую вязкость (10–20 мПа·с) и небольшое значение тангенса угла диэлектрических потерь?
14. Как влияет концентрация наполнителя на реологическое поведение пасты? Что происходит при превышении критической концентрации?
15. Какие добавки используются для улучшения адгезии пасты к подложке? Приведите примеры (например, силиканы, полиуретаны).
16. Почему время спекания и температура критичны для проводящих паст? Какие методы отверждения применяются (термическое, фотополимеризация, импульсное освещение)?
17. Сравните серебряные и медные пасты по проводимости, стоимости, устойчивости к окислению и требованиям к отверждению.
18. Какой тип пасты (проводящая/диэлектрическая/полупроводниковая) наиболее чувствителен к неправильному соотношению растворитель/связующее? Почему?

3. Численное моделирование процесса экструзии паст

При поршневой экструзии [22] 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 [112]. 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. [113] 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 [114]. Слишком высокая скорость потока по сравнению со скоростью перемещения дозатора приведет к чрезмерным деформациям формируемых пленок и, наоборот, к разрывам пленки [112]. 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 [115], 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 [116].

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.

3.1 Описание физико-математической модели процесса экструзии

В данной работе численное моделирование процесса экструзии осуществлялось посредством решения уравнения Навье-Стокса для двухфазной среды паста-воздух аналогично [116]:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \nabla \cdot (-p\mathbf{I} + \mathbf{K}) + \rho \vec{g} + \vec{F}_\sigma + \vec{F}_\theta \quad (3.1)$$

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, $\vec{F}_\sigma$ – объемная сила, соответствующая поверхностному натяжению.

Тензор вязких напряжений в случае сжимаемой жидкости имеет вид:

$$\mathbf{K} = \mu(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T) \quad (3.2)$$

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

Применим уравнение (3.1) 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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \vec{v} = 0 \quad (3.3)$$

Воздух от пасты существенно отличается плотностью и вязкостью, следовательно, в выражениях (5.1) и (5.2) вязкость и плотность запишем в виде:

$$\rho = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1)\phi \quad (3.4)$$

$$\mu = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)\phi \quad (3.5)$$

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:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{v} \nabla \phi = \zeta \nabla \cdot \left(\varepsilon \nabla \phi - \phi(1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) = 0 \quad (3.6)$$

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

$$\vec{F}_\sigma = \sigma \delta \kappa \vec{n} \quad (3.7)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения паста-воздух, δ – гладкая аппроксимация дельта функции Дирака, κ – кривизна, $\vec{n}$ – единичный вектор нормали к поверхности раздела фаз.

$$\delta = 6|\nabla\phi| \cdot |\phi(1 - \phi)|$$

Для решения уравнения (3.1) необходимо построить соответствующую геометрию. Прототипом данной геометрии являлся поршневой дозатор. На рисунке 3.1, а представлено изображение дозатора в сборе, на рисунке 3.1, б его модель в разрезе вдоль вертикальной оси дозатора, а на рисунке 3.1, в расчетная область для численного моделирования в цилиндрической системе координат, которая соответствует внутренней геометрии дозатора заполненной пастой и области воздуха. На рисунке 3.1, в верхняя горизонтальная граница (область 7) соответствует горизонтальному сечению в области 2 рисунка 3.1, 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 3.1, в область 7) равный 12 мм.

Для получения численного решения уравнения (3.1) с учетом (3.3) и (3.6) необходимо задать начальные и граничные условия (ГУ). Будем считать, что в начальный момент времени дозатор полностью заполнен пастой (области 2 и 3 на рисунке 3.1, в), а область выдавливания является воздухом (область 4 на рисунке 3.1, в). Пусть на границе свободного пространства, соответствующего воздуху (ГУ-1, см. рисунок 3.1, 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 3.1, 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 3.1, в) необходимо задать условие непроницаемой стенки, которое записывается в следующем виде:

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = 0 \quad (3.8)$$

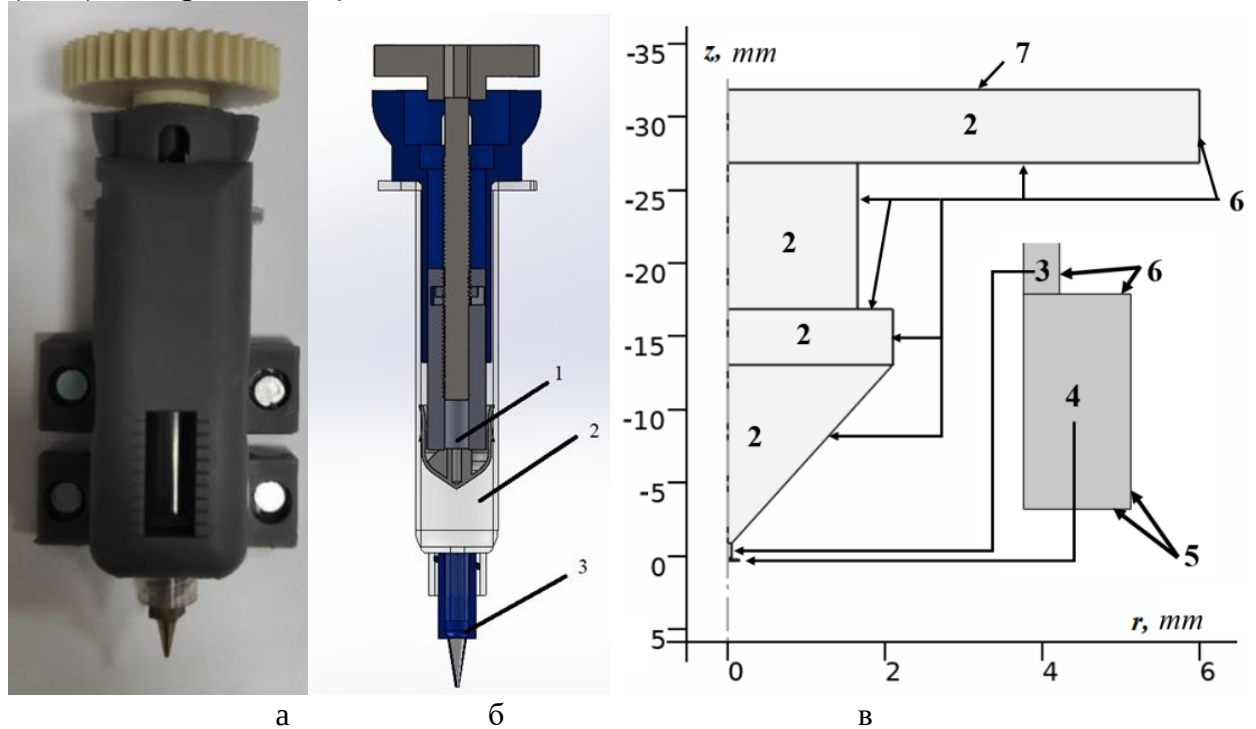
$$\vec{n} \cdot \left(\epsilon \nabla \phi - \phi(1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) = 0 \quad (3.9)$$

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

$$\vec{F}_\theta = \sigma \delta (\vec{n}_{wall} \cdot \vec{n} - \cos(\theta)) \vec{n} \quad (3.10)$$

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 (3.10) 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 3.1 – 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 :

$$\omega = \frac{m_d}{m_d + m_c}, \text{ т. е. } \rho_2 = \rho_d \omega + \rho_c (1 - \omega) \quad (3.11)$$

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 [116]:

$$\mu = \mu_{inf} + (\mu_0 - \mu_{inf})(1 + (\lambda \dot{\gamma})^2)^{(n-1)/2} \quad (3.12)$$

где μ_{inf} , μ_0 , λ , n – параметры модели Карро, определяемые при аппроксимации экспериментальных данных. Аппроксимация этой зависимости для $\omega = 0,7$ в соответствии с моделью Карро (3.12) представлена на рисунке 3.2, при этом $\mu_{inf} = 0,053$ МПа·с, $\mu_0 = 0,241$ МПа·с, $\lambda = 1,151$ с, $n = 0,324$.

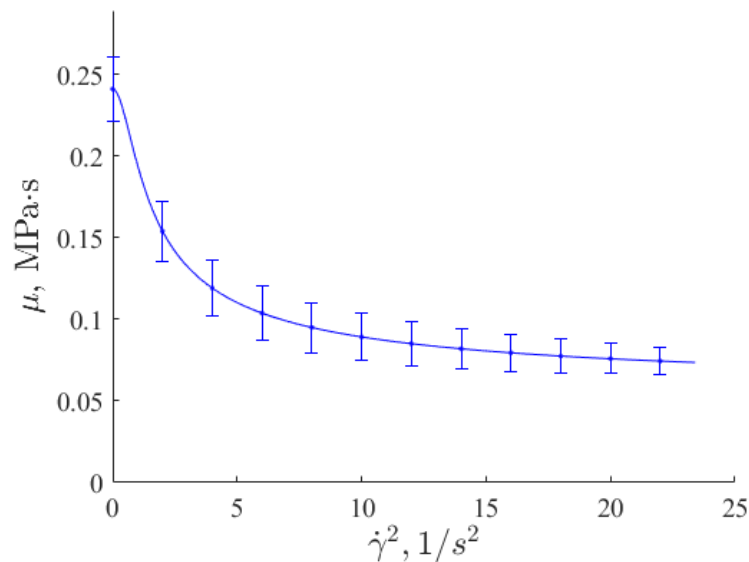


Рисунок 3.2 – Аппроксимация экспериментально полученной зависимости вязкости от квадрата скорости сдвига с моделью Карро (3.12)

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 3.1 представлены характеристики пасты и воздуха для численного моделирования.

Таблица 3.1 – Характеристики пасты и воздуха

Параметр	Значение	Ссылка
Плотность терпинеола ρ_c	930 кг/м ³	[117]
Плотность серебра ρ_d	10500 кг/м ³	[118]
Плотность воздуха ρ_l	1,28 кг/м ³	[119]
Динамическая вязкость воздуха μ_l	$1,81 \times 10^{-5}$ Па·с	[119]
Поверхностное натяжение терпинеола	0,033 Н/м	[117]

Моделирование экструзии пасты осуществлялось в пакете COMSOL Multiphysics 5.1. 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 [100]. 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 3.3, б).

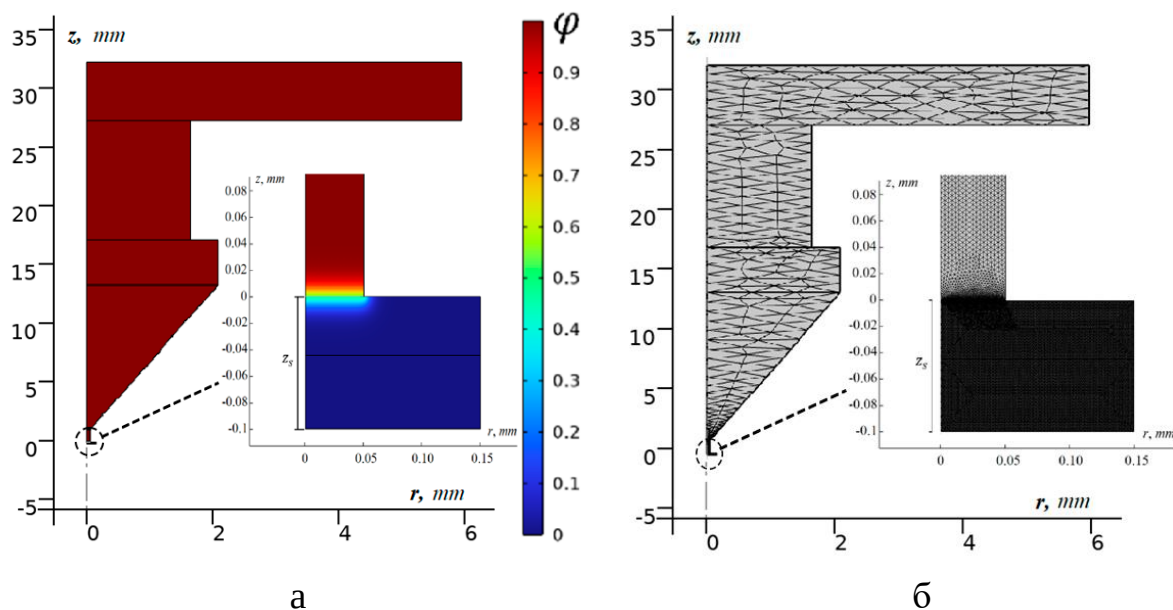


Рисунок 3.3 – Начальное распределение пасты в области расчета (а) и сетка, используемая для расчета (б)

3.2 Результаты численного моделирования

В результате численного моделирования получены пространственные распределения вязкости, скорости и избыточного давления (рисунок 3.4, а–в) для пасты при ее экструзии из сопла со скоростью подачи пасты $v_{in}=1,3$ мкм/с.

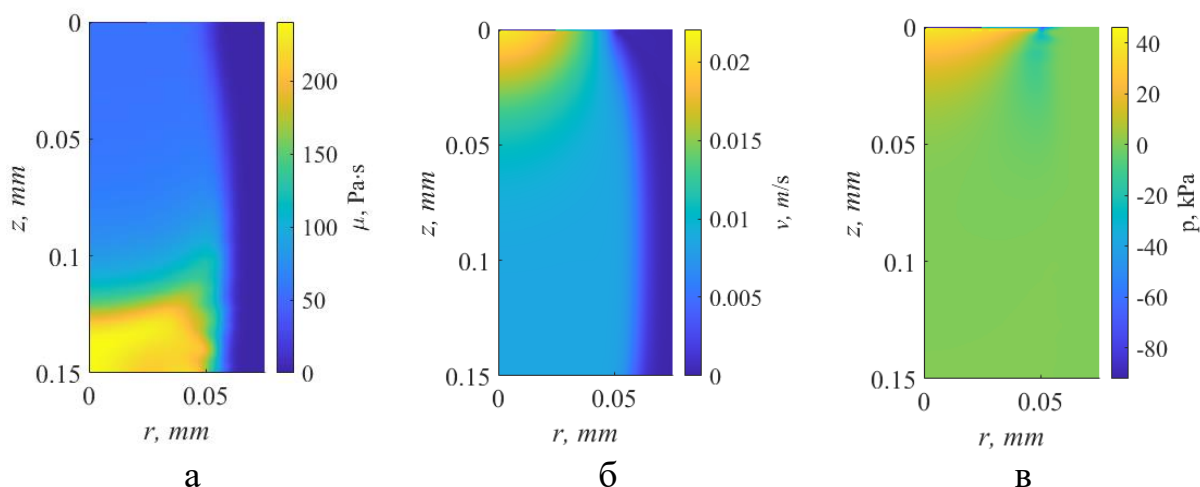


Рисунок 3.4 – Пространственные распределения вязкости (а), скорости (б) и избыточного давления (в) для пасты при ее выдавливании из сопла

Из рисунка 3.4, а видно, что на расстоянии более 0,1 мм вязкость пасты существенно увеличивается, что обусловлено уменьшением скорости сдвига (рисунок 3.4, б), при этом скорость пасты (рисунок 3.4, б) становится практически постоянной начиная с расстояния 0,8 мм. На рисунке 3.5 показаны зависимости, соответствующие рисунку 3.4, для вязкости (рисунок 3.5, а), скорости (рисунок 3.5, б) и избыточного давления (рисунок 3.5, в) от расстояния до сопла для различных значений радиальной координаты, а рисунку 3.6 – зависимости, соответствующие рисунку 3.5, для

вязкости (рисунок 3.6, а), скорости (рисунок 3.6, б) и избыточного давления (рисунок 3.6, в) от радиальной координаты для различных от расстояния до сопла.

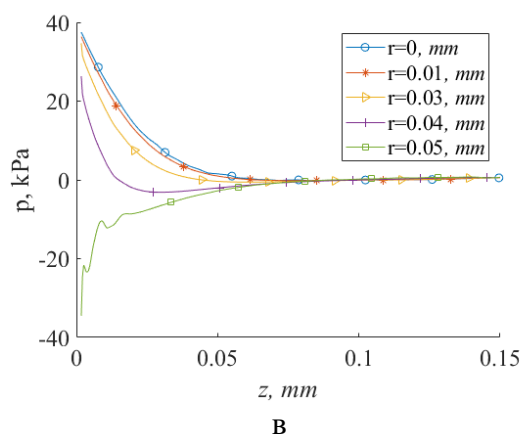
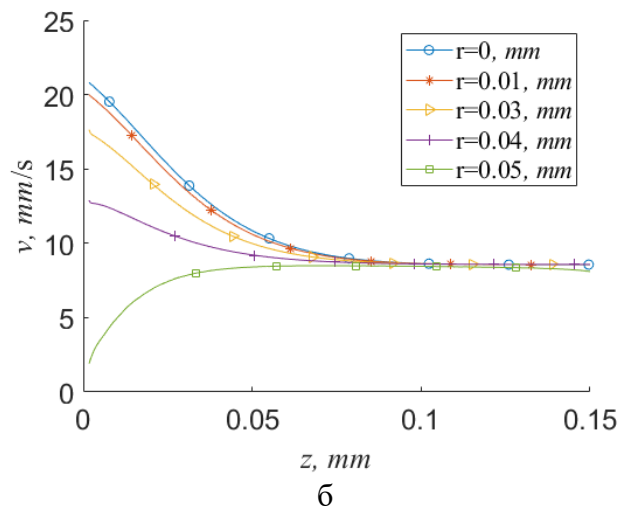
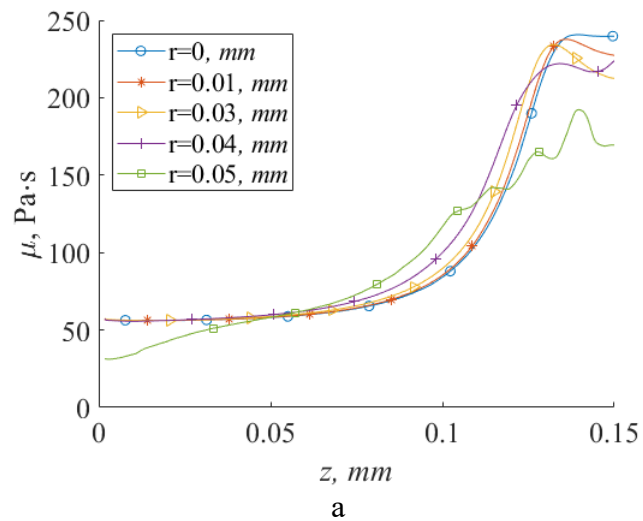
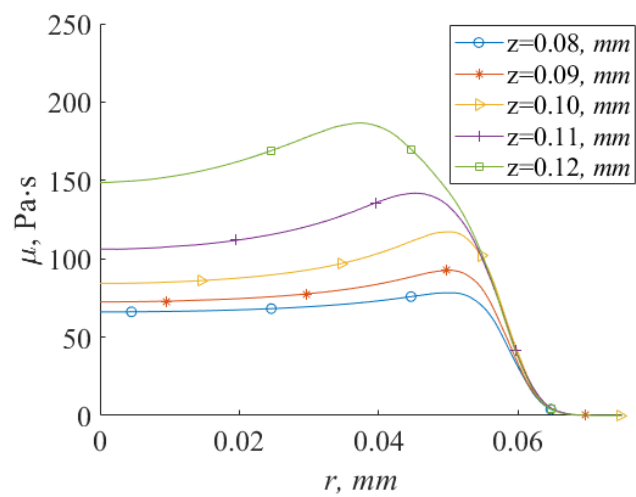
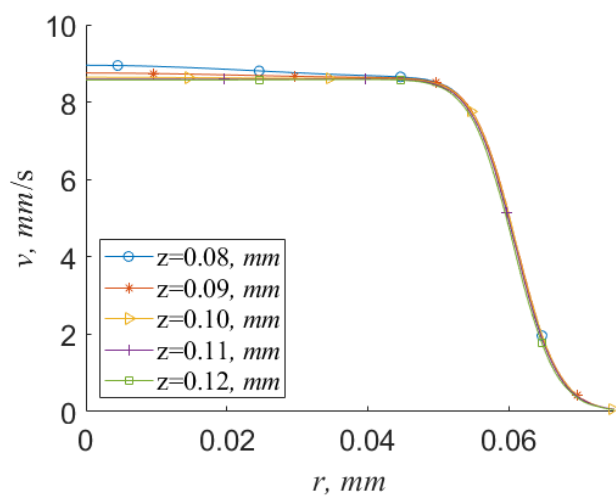


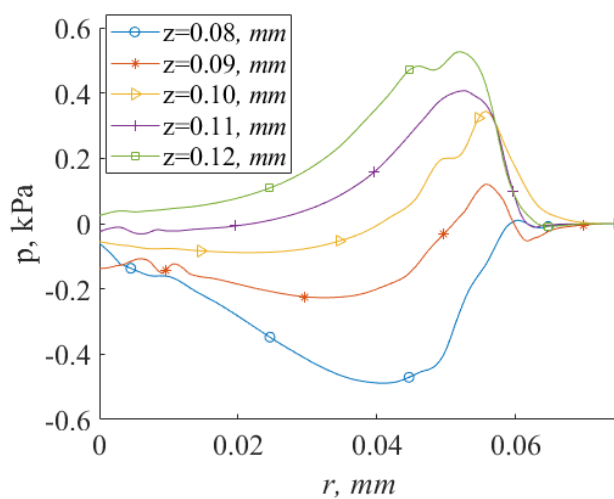
Рисунок 3.5 – Зависимости вязкости (а), скорости (б) и избыточного давления (в) от расстояния до сопла для различных значений радиальной координаты



а



б



в

Рисунок 3.6 – Зависимости вязкости (а), скорости (б) и избыточного давления (в) от радиальной координаты для различных значений расстояний до сопла

Из рисунка 3.5, 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 3.6, 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 3.5, 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 3.6, б). Отметим, что избыточное давление ведет себя подобно скорости (рисунок 3.5, в и рисунок 3.6, 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 3.2 и параметрах из таблицы 3.1, 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 3.5, а, б и определить соответствующие оптимальное расстояние, на котором следует поместить подложку при печати дорожек. На рисунке 3.7 представлены соответствующие зависимости при различных значениях v_{in} на оси симметрии пасты.

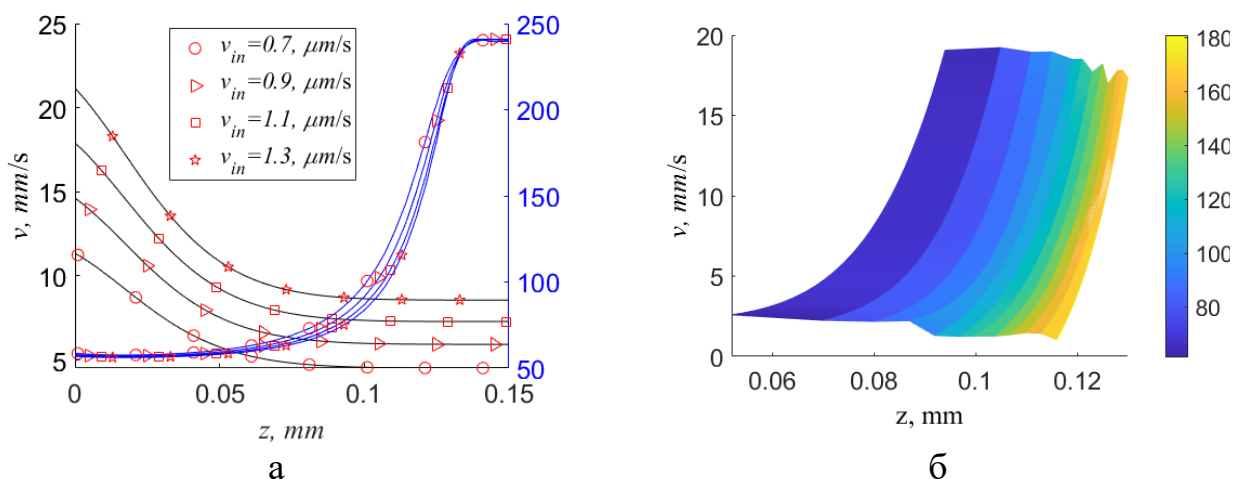


Рисунок 3.7 – Зависимости скорости и вязкости на оси симметрии пасты при различных значениях скорости подачи v_{in} (а) и карта вязкости на оси пасты при различных значениях ее скорости (б)

Из рисунка 3.7, 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 3.7 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 3.7 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.

3.3 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°C в течение 10 минут и спекание при 850°C в течение 7 минут. С целью количественной оценки степени растекания модифицированной пасты была реализована печать

токопроводящих дорожек с применением сопла, внутренний диаметр которого составлял 100 мкм.

Результат получаемых геометрических размеров при подобранных режимах (высота дозирования 0,1 мм, скорость 5 мм/с) Результат печати приведен на рисунке 3.8. Измерения ширины дорожек проводились на микроскопе МБС-10.

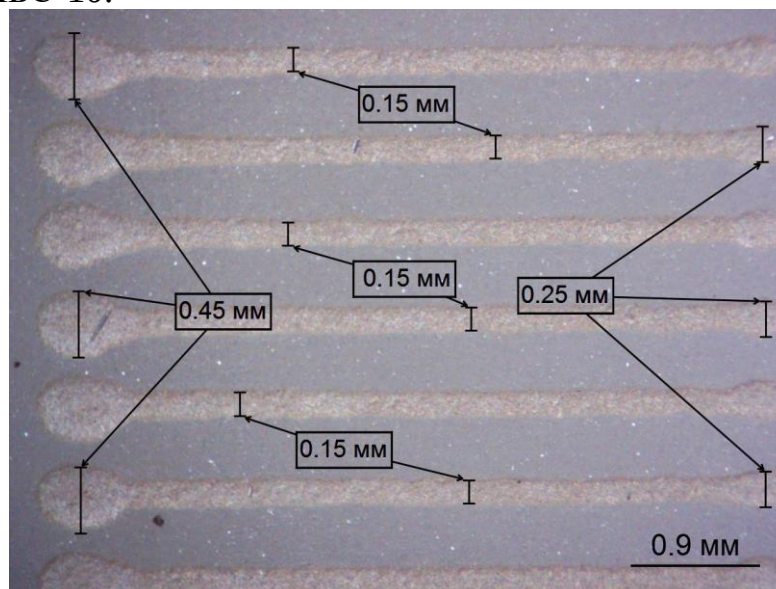


Рисунок 3.8 – Фотография напечатанных проводников

В результате проведенных измерений можно сделать вывод о том, что минимальная ширина проводника составляет 0,15 мм. 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 3.9 приведена микрофотография поверхности дорожек, которые были сделаны на электронном микроскопе СохетЕМ30+. Как видно из рисунка на поверхности наблюдаются поры.

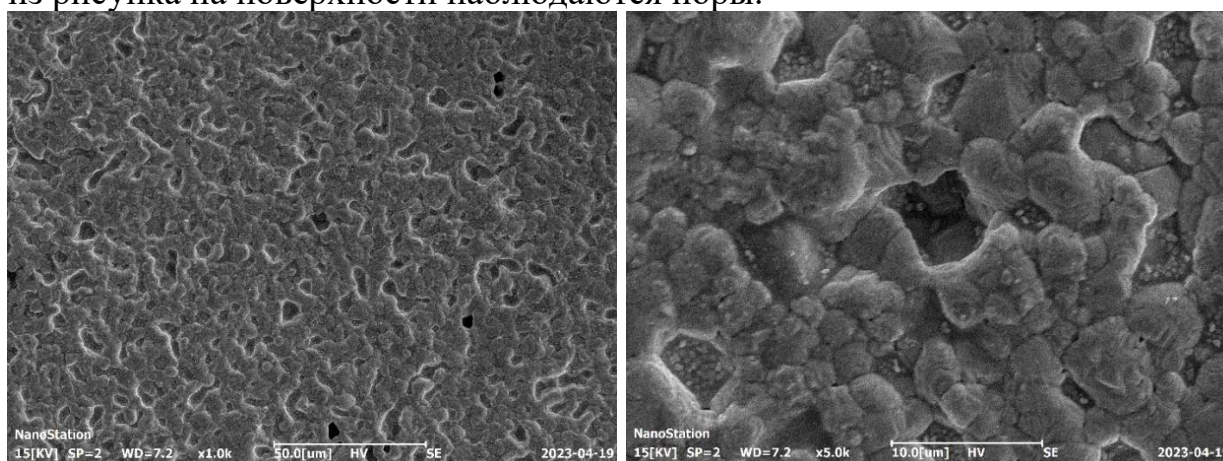


Рисунок 3.9 – Микрофотография поверхности

Измерения толщины и шероховатости напечатанных дорожек проводилось на профилометре Chotest Superview W1. Кривая контура

шероховатости дорожек приведена на рисунке 3.10. Среднеарифметическое отклонение профиля Ra дорожек составляет 0,682 мкм, а высота неровностей $Rz = 4,479$ мкм.

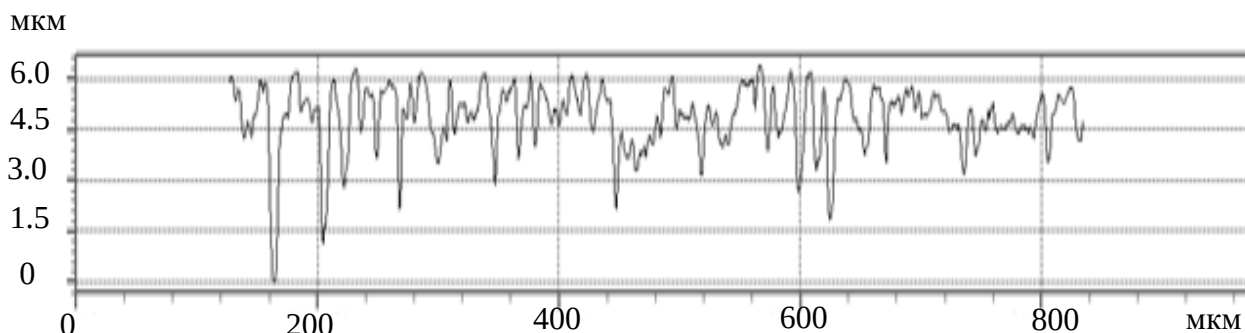


Рисунок 3.10 – Шероховатость поверхности проводника

Полученная профилограмма приведена на рисунке 3.11. Как видно из рисунка толщина дорожки составляет около 20 мкм.

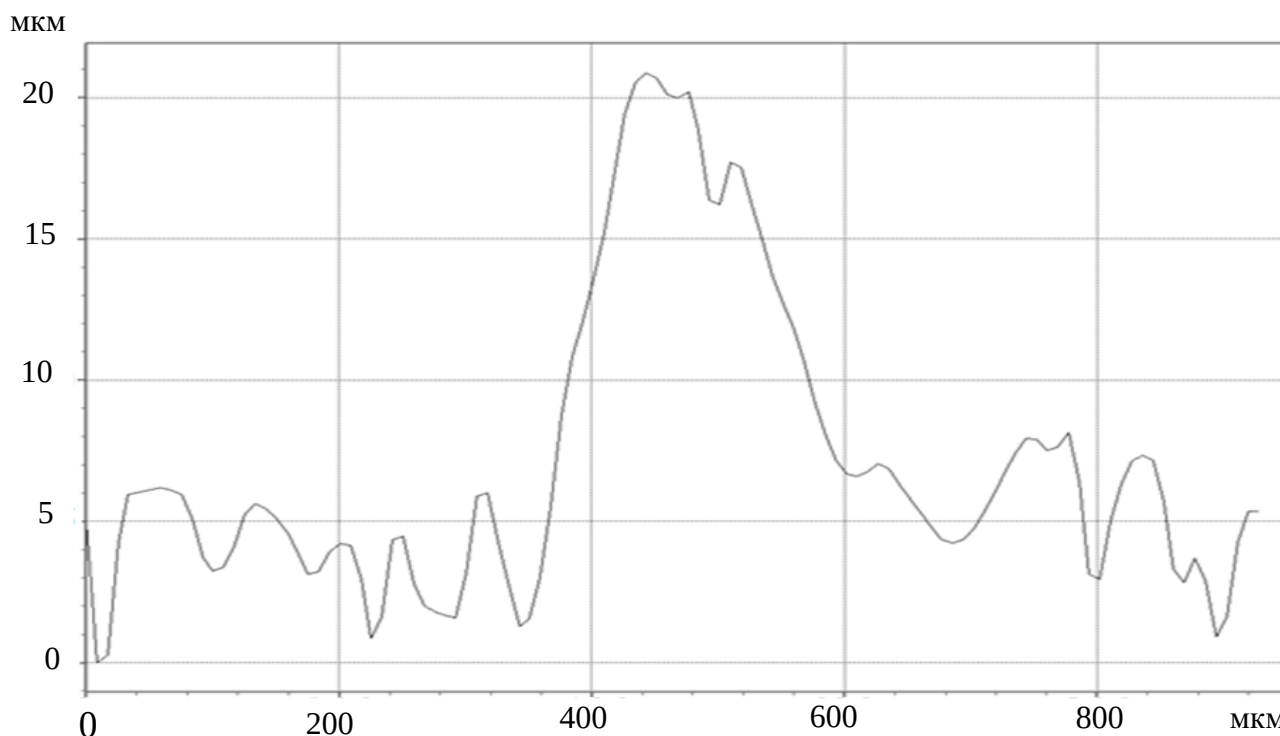


Рисунок 3.11 – Профилограмма проводника

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается суть поршневой экструзии? Как связаны перемещение поршня и объем выдавливаемой пасты?
2. Какие три основных технологических параметра напрямую влияют на качество напечатанной пленки?
3. Почему скорость перемещения дозатора должна согласовываться со скоростью вытекания пасты из сопла? К каким дефектам приводит их рассогласование?

4. Какие реологические характеристики пасты критически важны для процесса экструзии? Почему псевдопластичное поведение пасты усложняет настройку режимов печати?

5. Какое фундаментальное уравнение лежит в основе численной модели процесса экструзии?

6. Как в рассмотренной модели учитывается одновременное присутствие пасты и воздуха? Что такое "функция уровня" (level set) и как она определяется?

7. Как учитывается сила поверхностного натяжения на границе раздела паста-воздух?

8. Какая модель использована для описания зависимости вязкости пасты от скорости сдвига? Назовите ее параметры для исследуемой пасты.

9. Как изменяется вязкость пасты по мере ее удаления от сопла? Объясните, чем вызвано это изменение.

10. Как меняется профиль скорости пасты от расстояния между выходом пасты из сопла ($z=0$) до $z=0,10$ мм? Какое наблюдается поведение?

11. Какое оптимально расстояние между соплом и подложкой и почему? Какие три фактора (вязкость, скорость, давление) подтверждают этот выбор?

12. Как изменение скорости подачи пасты влияет на оптимальное расстояние до подложки и стабильность процесса печати?

13. Сравните расчетный диаметр сопла (0,1 мм) с полученной экспериментально минимальной шириной дорожки (0,15 мм). Чем можно объяснить это расхождение?

14. Как реологические свойства пасты (вязкость, зависимость от скорости сдвига) влияют на гидродинамику процесса экструзии?

15. Какие преимущества вы видите численного моделирования для оптимизации технологического процесса по сравнению с чисто экспериментальным подходом?

16. Как задаются начальные и граничные условия для решения системы уравнений Навье-Стокса в данной постановке задачи?

3.4 Проводниковые пасты для печати полосковых линий

Для печати полосковых линий 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» [120]. 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 [121]). 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 3.12, 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 3.12, 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.

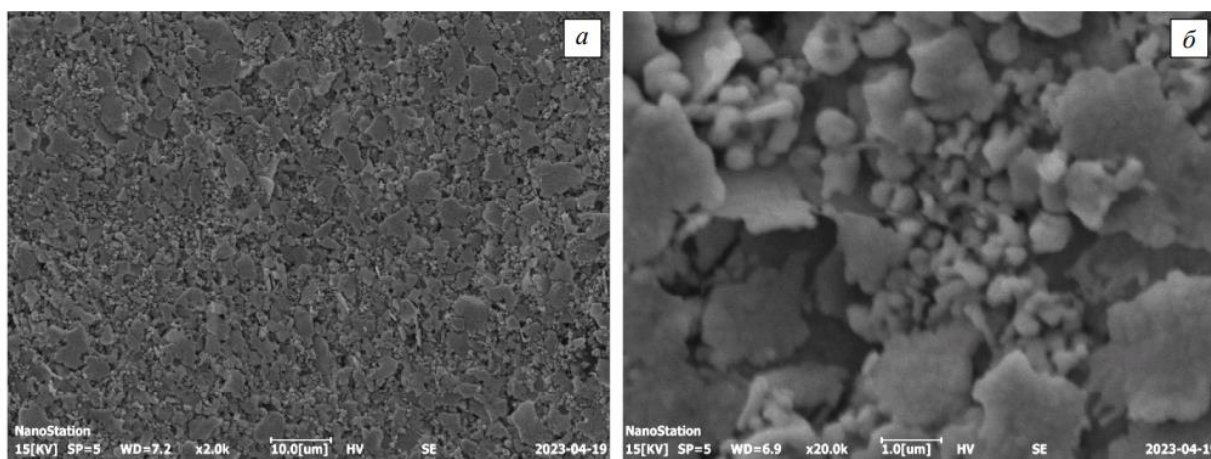


Рисунок 3.12 – Микрофотографии поверхности образца пасты Voltera Conductor 2

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 3.13. 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.

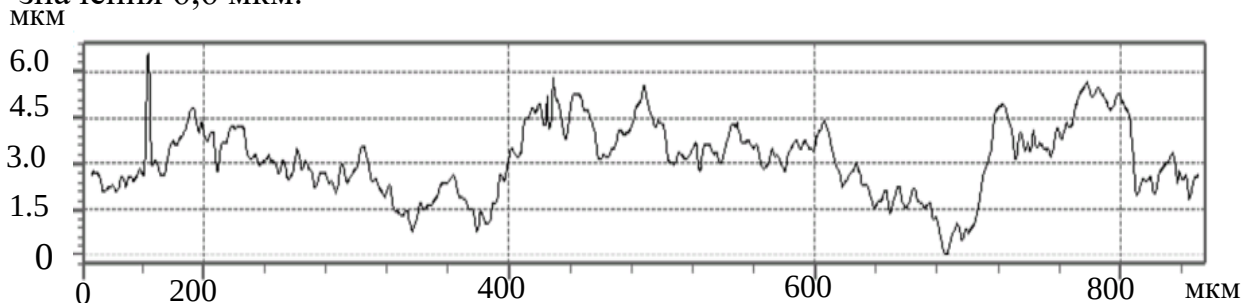


Рисунок 3.13 – Кривая контура шероховатости покрытия на основе пасты Conductor 2

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

Контроль вязкости паст осуществляется по диаметральному 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 навеску 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, диаметральный 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 мас. % терпинеола 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 мас. % терпинеола. 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 3.14 приведена зависимость динамической вязкости от скорости сдвига пасты ПП-17.

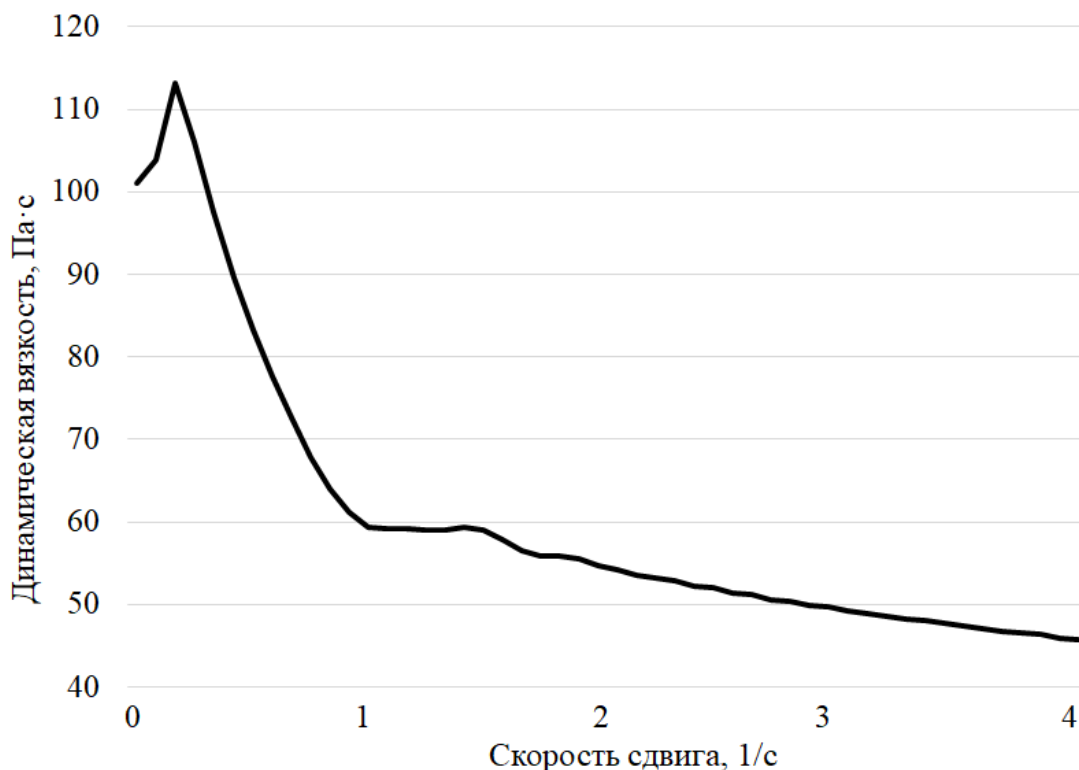


Рисунок 3.14 – Зависимость динамической вязкости от скорости сдвига

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 3.15.

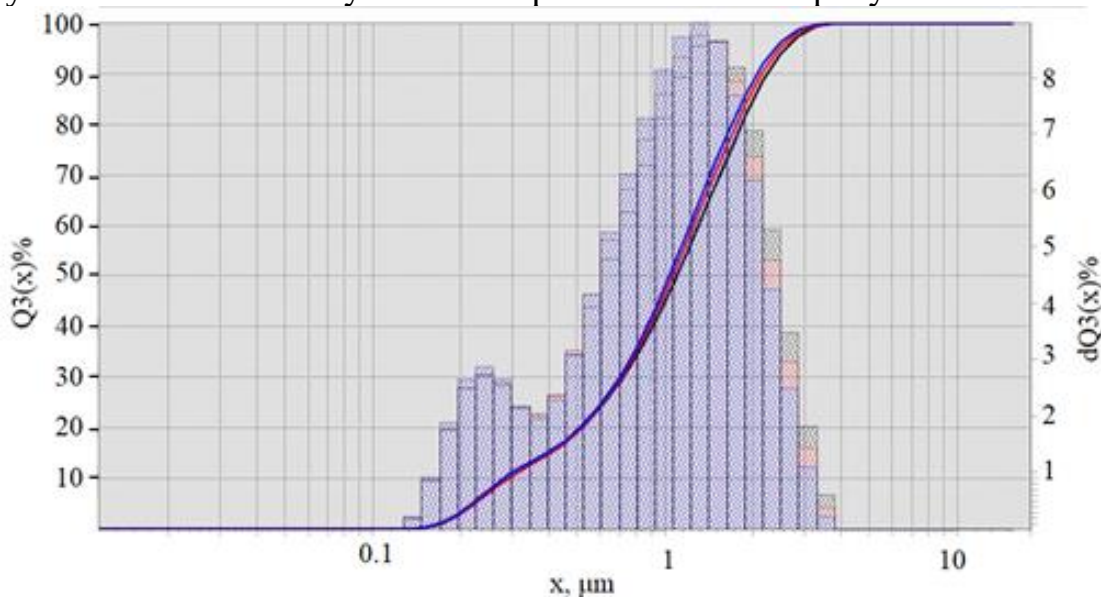


Рисунок 3.15 – Распределение размера частиц порошка в ПП-17

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

3.5 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 3.16. Однако подобранное давление приводится в условных единицах и необходимо его подбирать каждый раз.

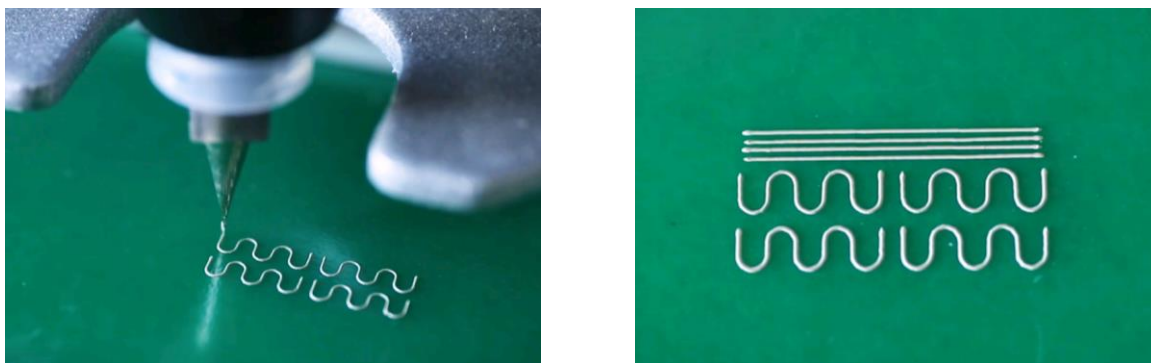


Рисунок 3.16 – Печать при подобранном давлении и высоте дозирования

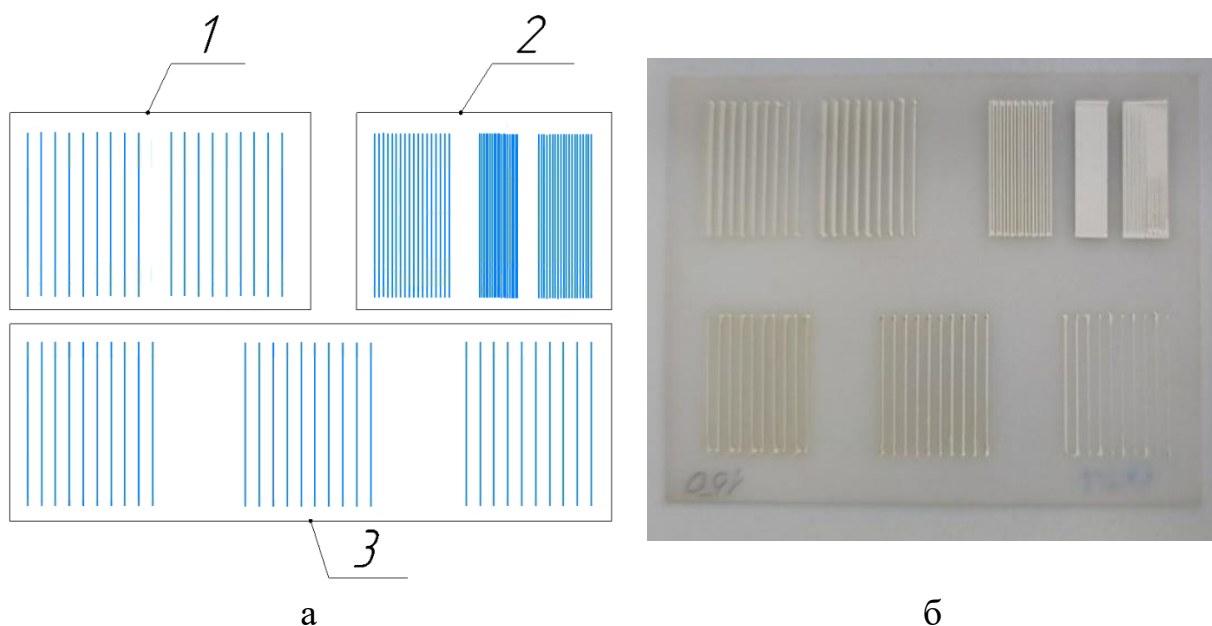
В зависимости от геометрии топологического рисунка выбирается сопло с разной конфигурацией внутреннего диаметра. Стандартный набор сопел принтера Voltera V-One состоит из сопел с внутренним диаметром от 100 мкм до 225 мкм (рисунок 3.17). Конусная конструкция сопла обеспечивает плавный поток вытекания 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.



Рисунок 3.17 – Сопла с разной конфигурацией внутреннего диаметра

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 3.19 а). Отдельно на плате располагается область для определения коэффициента перекрытия при формировании полигонов (рисунок 3.19, а). Также на разработанной плате предусмотрены проводники для оценки толщины при увеличении количества проходов (рисунок 3.19, 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 3.19, 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 3.18 – Цифровой файл разработанной платы (а) и напечатанный образец соплом 150 мкм (б)

При визуальном осмотре напечатанных образцов были обнаружены следующие дефекты:

- в начале 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 3.20). Данный эксперимент позволяет определить коэффициент растекания, а также оценить возможности печати принтера.

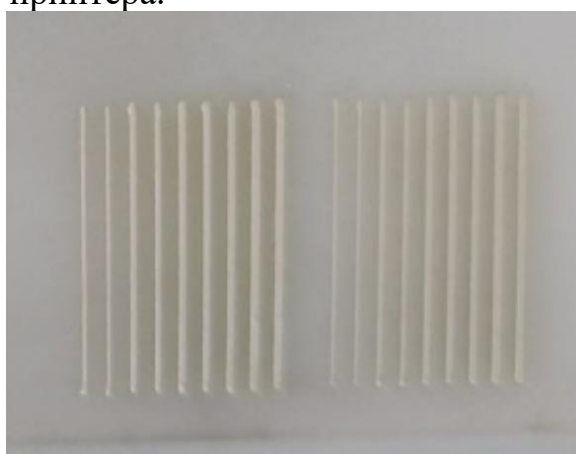


Рисунок 3.19 – Проводники для определения коэффициента растекания

На микроскопе была измерена ширина каждого проводника в нескольких точках. Результаты измерений для трех видов сопел приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – 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 3.21).

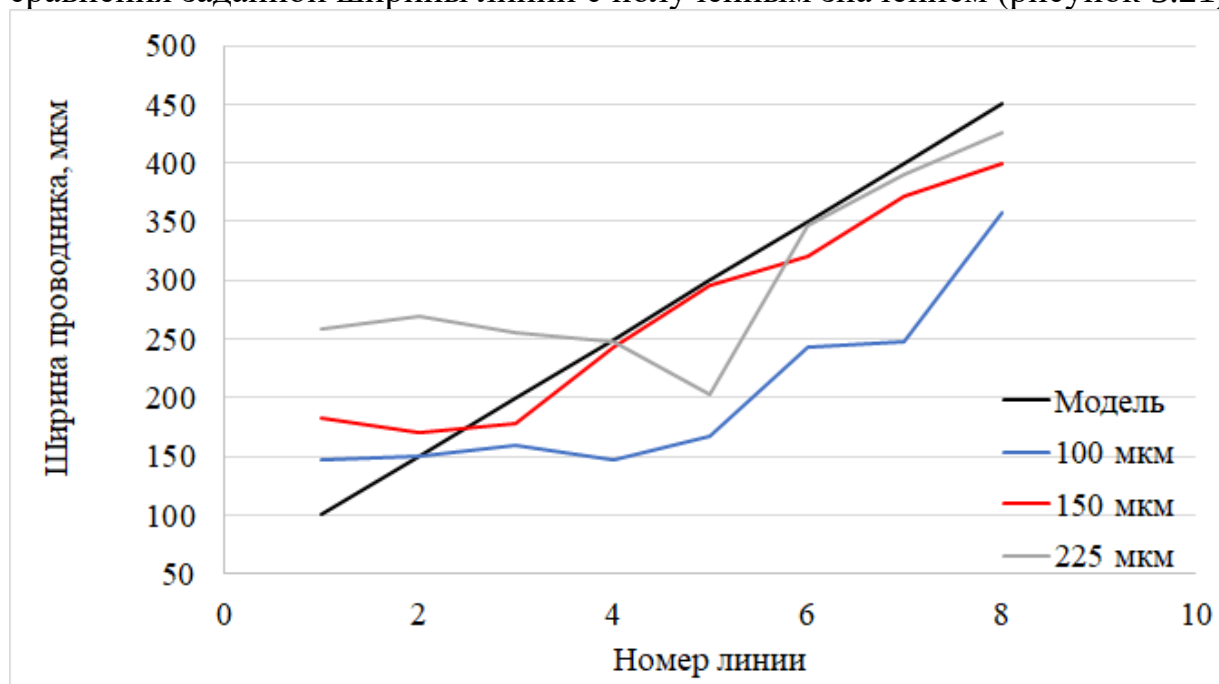


Рисунок 3.20 – Сравнение заданной и полученной ширины проводника

Также на профилометре была измерена толщина линий для трех диаметров сопел: 100 мкм, 150 мкм и 225 мкм. Полученные данные отображены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Толщина проводников

Диаметр сопла, мкм	Толщина проводника, мкм							
	Линия №1	Линия №2	Линия №3	Линия №4	Линия №5	Линия №6	Линия №7	Линия №8
100	19	19	21	23	19	20	18	20
150	18	18	22	23	21	20	20	22
225	21	19	20	23	20	19	25	21

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о стабильности геометрических параметров печати – толщина сформированных проводников остается неизменной во всем исследуемом диапазоне.

На рисунке 3.21 представлены напечатанные образцы. Проводники (область 2), 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.

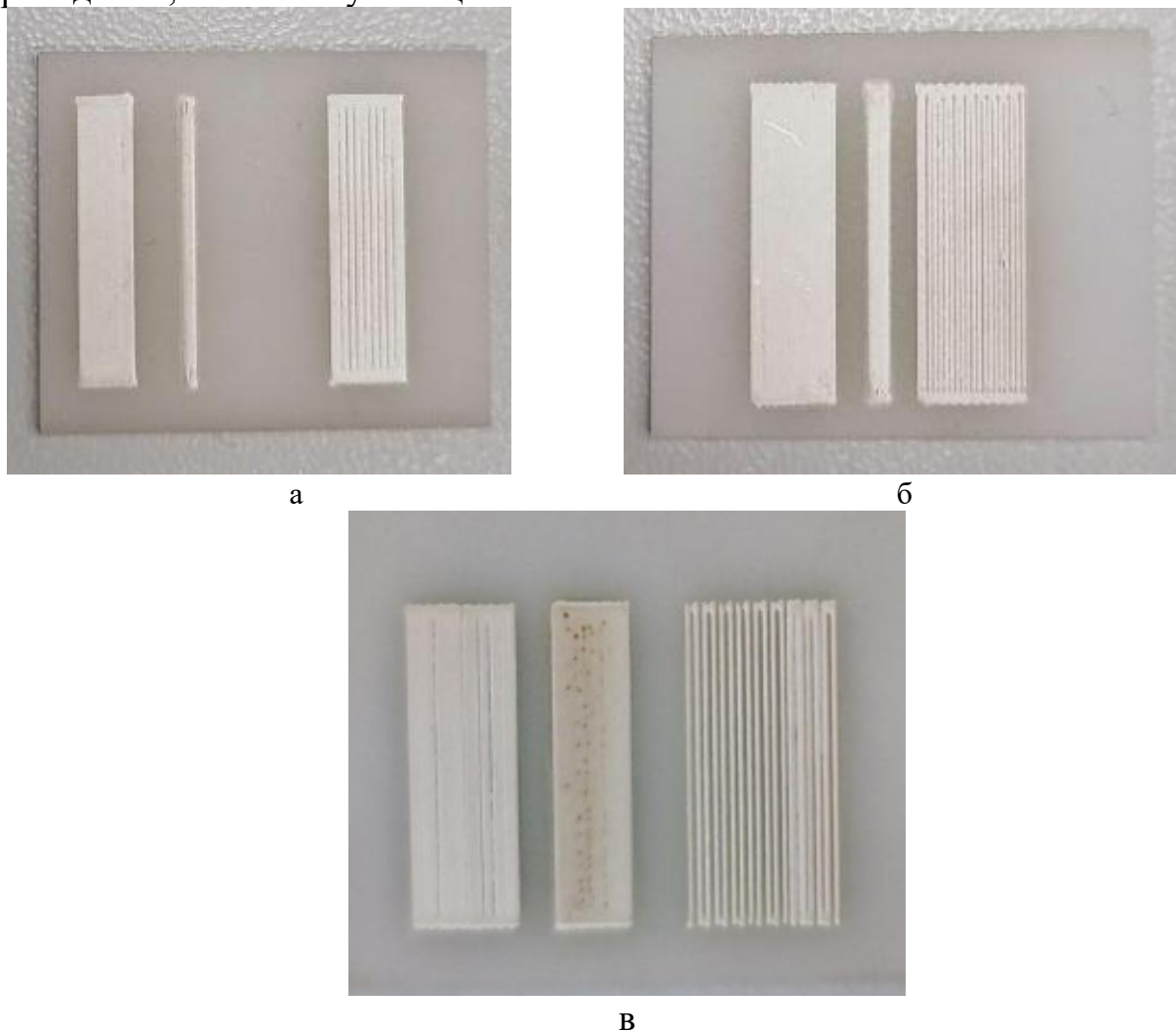


Рисунок 3.21 – Проводники, напечатанные соплом диаметром 100 мкм (а), 150 мкм (б) и 225 мкм (в) для определения коэффициента перекрытия

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 3.22, 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.

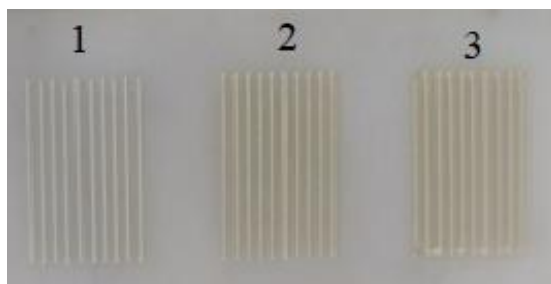


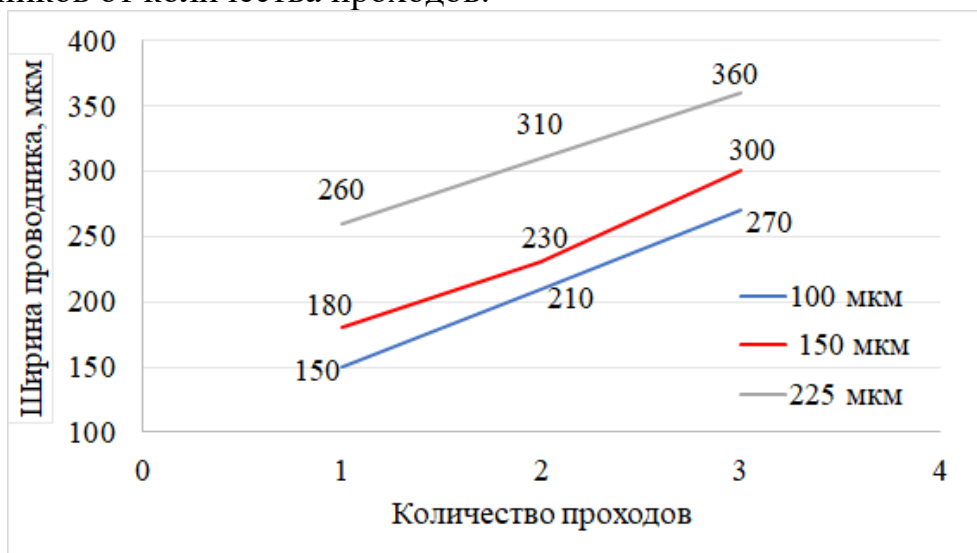
Рисунок 3.22 – Проводники области 3

По результатам измерений ширины проводников в нескольких точках были составлены таблица 3.4 и графики (рисунок 3.23), на которых показано, каким образом количество слоев влияет на ширину линии проводника для трех сопел: 100 мкм, 150 мкм и 225 мкм.

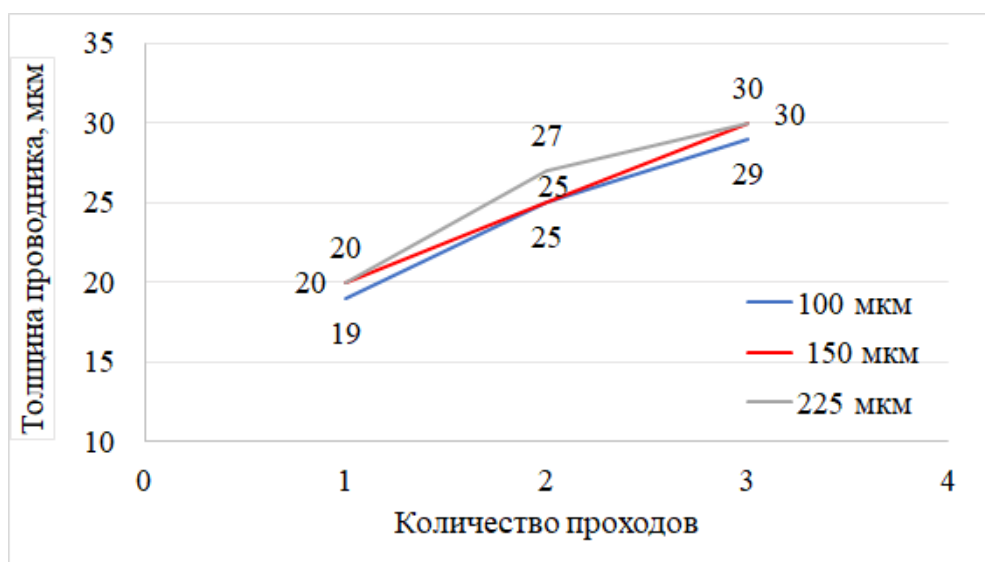
Таблица 3.4 – Средние значения ширины проводников для всех диаметров сопел

Диаметр сопла, мкм	Средняя ширина проводников, мкм			Средняя толщина проводников, мкм		
	1 слой	2 слоя	3 слоя	1 слой	2 слоя	3 слоя
100	150	210	270	19	25	29
150	180	230	300	20	25	30
225	260	310	360	20	27	30

На рисунке 3.23 представлен график зависимости ширины и толщины проводников от количества проходов.



а



б

Рисунок 3.23 – График зависимости ширины (а) и толщины (б) проводника от количества слоев

Как видно из рисунка 3.23 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.

Вопросы для самопроверки

1. Какое основное свойство пасты определяет ее поведение при движении в процессе печати?
2. Каким двум противоречивым требованиям должна удовлетворять вязкость пасты в процессе аддитивной печати? (Объясните, почему это важно).
3. Каков основной компонент проводниковых паст, рассмотренных в тексте? Какое вещество используется в качестве связующего для паст Conductor 2 и ПП-17?
4. Что показала микрфотография пасты Conductor 2 при большом увеличении? Опишите размеры наблюдаемых частиц и гранул.
5. Чем объясняется отсутствие блеска у поверхности образца, напечатанного пастой Conductor 2?
6. Почему пасты, предназначенные для трафаретной печати, часто не подходят для принтерной технологии? Как можно решить эту проблему?

7. Опишите методику измерения «условной вязкости» с помощью груза и стеклянных пластин. Что измеряется в результате?

8. По результатам первоначального измерения условной вязкости: какая паста оказалась более вязкой – ПП-17 или Conductor 2? (Обоснуйте ответ, сравнив диаметры пятен).

9. какие преимущества методики измерения условной вязкости? Назовите ее главный недостаток.

10. Каким прибором выполнено измерение динамической вязкости, и почему для паст важно измерять зависимость вязкости от скорости сдвига?

11. Какой характер имеет динамическая вязкость пасты ПП-17 с ростом скорости сдвига? К какому типу жидкостей (ньютоновская или неньютоновская) ее можно отнести и почему?

12. Можете ли объяснить, почему меняется вязкость пасты в процессе печати?

13. Какая связь между микроструктурой пасты (размер частиц) и ее макроскопическими свойствами (шероховатость, внешний вид)?

14. Что значит псевдопластичный (неньютоновский) характер течения пасты, и как это свойство влияет на процесс печати?

15. Используя данные из текста (средний диаметр частиц ПП-17 – 1.2 мкм, наличие частиц менее 100 нм у Conductor 2), предположите, как размер частиц может влиять на вязкость пасты и качество печати (разрешение, шероховатость).

16. Перечислите основные параметры, от которых зависит разрешающая способность аддитивной принтерной технологии. Какие из них являются настраиваемыми параметрами принтера?

17. Каковы последствия установки излишне большого и недостаточного давления поршня во время печати?

18. Опишите проблемы, возникающие при неправильной установке высоты картриджа (сопла слишком высоко или слишком низко).

19. Каковы преимущества и недостатки конических сопел, используемых в принтере Voltera V-One?

20. Как внутренний диаметр сопла влияет на процесс печати? Почему для разных топологических рисунков выбирают сопла с разным диаметром?

21. Какие три основных дефекта могут быть обнаружены при визуальном осмотре напечатанных образцов?

22. Как проводился эксперимент по определению коэффициента растекания? Что показывал график сравнения заданной и полученной ширины линии?

23. Какие три способа расположения проводников сравнивались в эксперименте? Каковы были результаты по их замкнутости?

24. Как увеличение количества проходов (слоев) влияет на ширину и толщину проводника? Зависит ли толщина от диаметра сопла?

25. Какие выводы были сделаны на основе измерений толщины линий для сопел разного диаметра?

4. Конструкции и характеристики компонентов и полосковых устройств

В данном разделе представлены исследования компонентов и полосковых устройств, изготовленных по аддитивной принтерной технологии. Представленные узлы демонстрируют возможности применения аддитивной принтерной технологии для изготовления функциональных устройств.

4.1 Проектирование резисторов

В данном разделе показана возможность автоматизации процесса проектирования и расчета габаритных размеров резистивных компонентов, изготавливаемых методом принтерной печати. Для этого необходимо решить следующие задачи: разработать алгоритм расчета геометрических размеров резистивных компонентов прямоугольной формы и формы типа меандр по входным параметрам в среде Matlab; разработать алгоритм графического отображения полученных геометрических размеров; сравнить результаты расчета в среде Matlab с результатами измерения сопротивления изготовленных компонентов.

Программное обеспечение Matlab позволяет использовать широкий набор инструментов, специально предназначенных для решения задач в области электротехники, электроники и физики. Также Matlab позволяет расширять функциональность с помощью пользовательских функций и скриптов, а также интеграции с другими программными продуктами на основе языка C++.

За основу методики расчета взят алгоритм расчета толсто пленочных элементов методом трафаретной печати [122, 123] с последующей перестройкой под параметры принтерной печати. Среди таких параметров можно выделить: $b_{\min}$ – минимальная ширина резистора, обусловленная геометрическими размерами сопла; $l_{\min}$ – минимальная длина резистора, обусловленная перемещением сопла; Δ – размер области растекания пасты. Остальные параметры, используемые в расчете указаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры печати и электрофизические характеристики резистивного компонента

Параметр	Наименование	Единицы измерения
R	Сопротивление	Ом
$\rho_{\square}$	Удельное поверхностное сопротивление пасты	Ом/ $\square$
K_f	Коэффициент формы резистора	–
P	Рассеиваемая мощность резистора	Вт
P_0	Удельная рассеиваемая мощность резистора	Вт/мм ²
Δ	Размер области растекания пасты	мм
$b_{\min}$	Минимальная ширина резистора	мм
$l_{\min}$	Минимальная длина резистора	мм
B	Рассчитанная ширина резистора	мм
L	Рассчитанная длина резистора	мм

С учетом требований по разработке и компоновке электронных компонентов печатные элементы должны занимать минимальную площадь при обеспечении заданных электрофизических параметров. Поэтому в основе расчета используются значения коэффициента формы резистора: $K_f=0,1-1$ для резистора прямоугольной формы с соотношением сторон $L \leq B$; $K_f=1-10$ для резистора прямоугольной формы с соотношением сторон $L \geq B$; $K_f \gg 10$ для резистора типа меандр. Резисторы имеющие $K_f < 0,1$ не могут быть технологически синтезированы.

Для резисторов с соотношением сторон $L > B$ расчет геометрии резистора начинается с расчета его ширины по условию

$$B \geq \max\{b_{\min}, b_p\} \quad (4.1)$$

Минимальный технологический размер резистора $b_{\min}$ определяется используемым соплом при печати. Значение b_p определяется с учетом максимальной рассеиваемой мощности и коэффициентом запаса по мощности K_p :

$$b_p = \left(K_p \frac{P}{P_0} \right)^{0,5} \quad (4.2)$$

После расчета ширины резистора размер корректируется. Итоговая ширина резистора определяется из разрешенного ряда значений и выбирается значение близкое к числу из ряда. Данный ряд значений определяется как сумма ширины размера сопла $b_{\min}$ и растекания пасты Δ . После расчета ширины определяется длина резистора:

$$L = \frac{B}{K_f} \quad (4.3)$$

На рисунке 4.1 представлены входные данные программы Matlab с результирующим значением сопротивления. На рисунке 4.2 представлены геометрические размеры рассчитываемого резистора.

```
Введите R [Ом]: 10
Введите rho [Ом/кв]: 20
Введите P [Вт]: 1
Введите P0 [Вт/мм2]: 0.5
Введите растекание пасты Delta [мм]: 0
Введите минимальную ширину пленки B [мм]: 0.125
Резистор с геометрией L<B
Суммарное значение Rres = 9.838007e+00
```

Рисунок 4.1 – Входные данные для расчета геометрии резистора с соотношением сторон $L \leq B$ и результирующее сопротивление

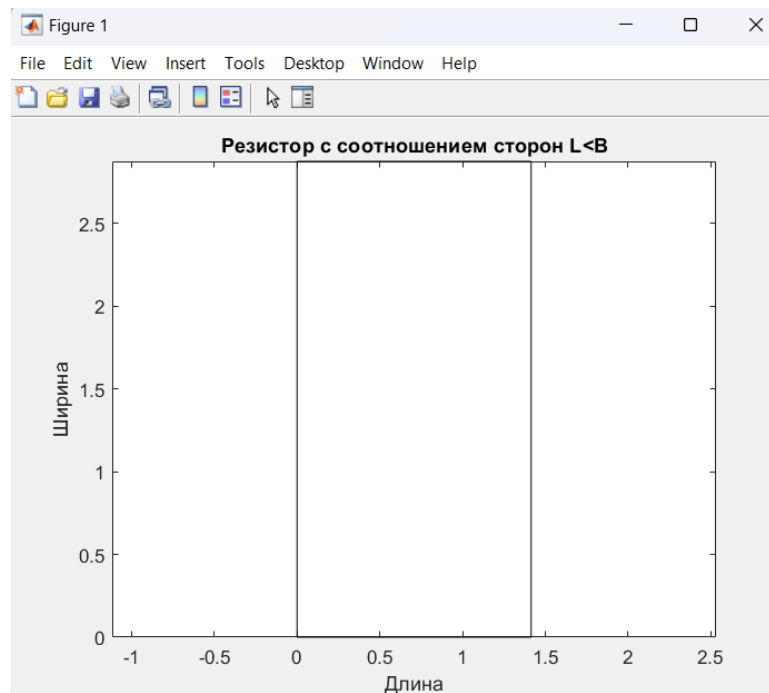


Рисунок 4.2 – Результат расчета и рисование резистора с соотношением сторон $L \leq B$

Для резисторов с соотношением сторон $L < B$ сначала проводится расчет длины, которой соответствует максимальная рассеиваемая мощность с последующим расчетом ширины:

$$L = l_p = \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0.5} \quad (4.4)$$

$$B = \frac{L}{K_f} \quad (4.5)$$

Учитывая, что длина резистора не ограничена минимальным размером сопла, корректировка осуществляется по ширине резистора. Корректировка ширины производится из разрешенного ряда значений. При этом программа выдает новое значение сопротивления резистора. На рисунке 4.3 представлены входные данные программы Matlab. На рисунке 7.4 представлены геометрические размеры рассчитываемого резистора.

```
Введите R [Ом]: 100
Введите rho [Ом/кв]: 50
Введите P [Вт]: 1
Введите P0 [Вт/мм2]: 0.5
Введите растекание пасты Delta [мм]: 0
Введите минимальную ширину пленки B [мм]: 0.125
Резистор с геометрией L>B
```

Рисунок 4.3 – Входные данные для расчета геометрии резистора с соотношением сторон $L > B$

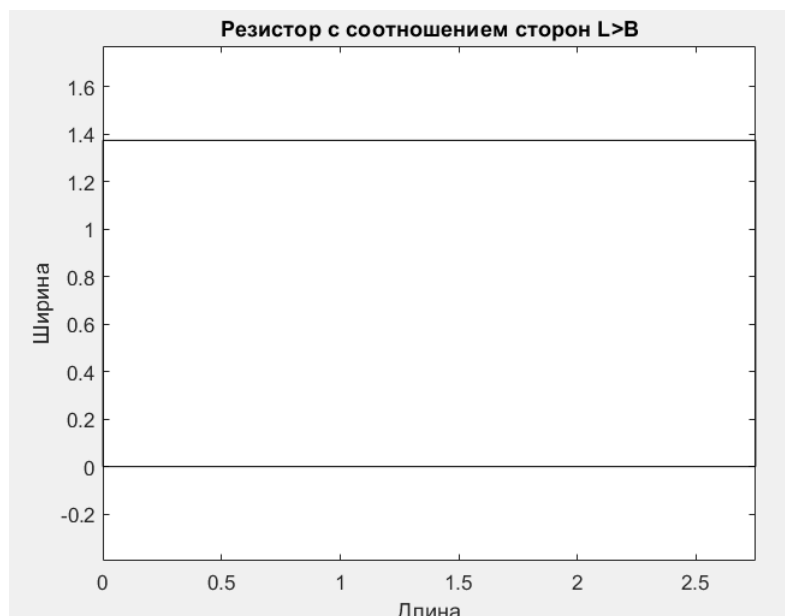


Рисунок 4.4 – Результат расчета и рисование резистора с соотношением сторон $L > B$

Расчет резистора типа меандр и его рисование осуществляется в полуавтоматическом режиме. При полуавтоматическом режиме производится расчет части резистора, имеющего форму квадрата. После оператор задает направление рисования при помощи клавиш: 1 – влево; 2 – вниз; 3 – вправо. При каждом нажатии клавиши осуществляется перерасчет коэффициента формы и выводится сопротивление резистора. При достижении рассчитанного коэффициента его округление до ближайшего целого числа. После производится расчет ширины меандра с последующим расчетом длины по формулам (4.1–4.3).

На рисунке 4.5 представлены входные данные программы Matlab для расчета меандра. При реализации алгоритма расчета программа пересчитывает коэффициент формы и сопротивление резистора и при достижении заданного значения коэффициента формы и сопротивления осуществляется выход из программы (рисунок 4.6). На рисунке 4.7 представлены геометрические размеры рассчитываемого резистора.

```
Введите R [Ом]: 1600
Введите rho [Ом/кв]: 150
Введите P [Вт]: 1
Введите Po [Вт/мм2]: 4
Введите растекание пасты Delta [мм]: 0
Введите минимальную ширину пленки B [мм]: 0.125
Резистор с геометрией типа меандр
```

Рисунок 4.5 – Входные данные программы для расчета резистора типа меандр

```

Суммарное значение Rres = 600
Введите направление движения (1 - влево, 2 - вниз, 3 - вправо, 5 - вверх): 3
Рисуем квадрат вправо
Суммарное значение kf: 5.00
Суммарное значение Rres = 750
Введите направление движения (1 - влево, 2 - вниз, 3 - вправо, 5 - вверх): 3
Рисуем квадрат вправо
Суммарное значение kf: 6.00
Суммарное значение Rres = 900
Введите направление движения (1 - влево, 2 - вниз, 3 - вправо, 5 - вверх): 2
Рисуем квадрат вниз
Суммарное значение kf: 7.00
Суммарное значение Rres = 1050
Введите направление движения (1 - влево, 2 - вниз, 3 - вправо, 5 - вверх): 2
Рисуем квадрат вниз
Суммарное значение kf: 8.00
Суммарное значение Rres = 1200
Введите направление движения (1 - влево, 2 - вниз, 3 - вправо, 5 - вверх): 3
Рисуем квадрат вправо
Суммарное значение kf: 9.00
Суммарное значение Rres = 1350
Введите направление движения (1 - влево, 2 - вниз, 3 - вправо, 5 - вверх): 3
Рисуем квадрат вправо
Суммарное значение kf: 10.00
Суммарное значение Rres = 1500
Введите направление движения (1 - влево, 2 - вниз, 3 - вправо, 5 - вверх): 5
Рисуем квадрат вверх
Суммарное значение kf: 11.00
Суммарное значение Rres = 1650
kf достиг заданного значения, программа завершена

```

Рисунок 4.6 – Отображение хода программы при расчете резистора типа меандр

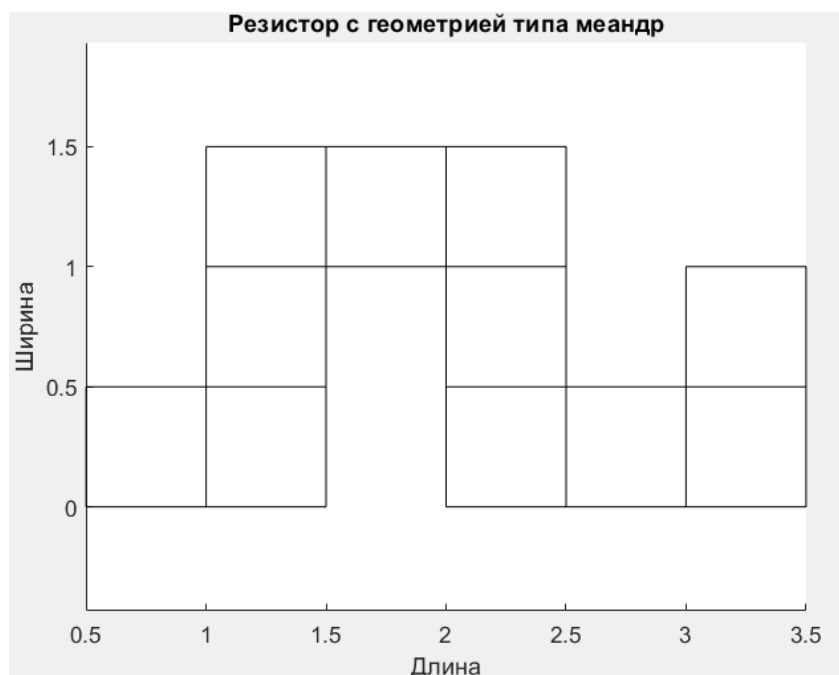
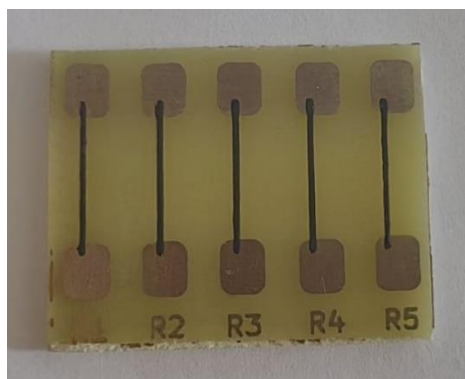
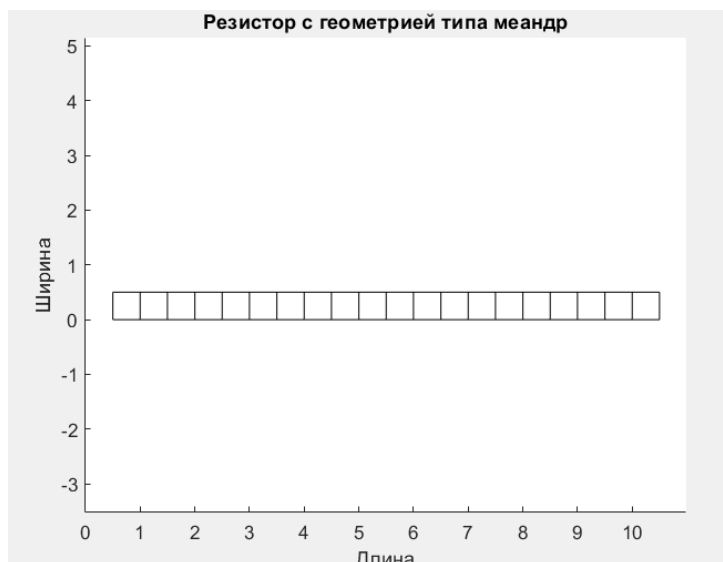


Рисунок 4.7 – Внешний вид рассчитанного резистора в окне программы Matlab

Далее представлен пример верификации результатов расчета программы. Для этого рассмотрен экспериментальный образец резистора с коэффициентом формы $K_f = 20$ на основе полимерной углеродной пасты марки ПУРП-0,05 с поверхностным сопротивлением $\rho_{\square} = 50 \text{ Ом}/\square$ при толщине слоя отвержденного слоя 14–22 мкм. На рисунке 4.8 представлен внешний вид изготовленных резисторов с шириной $B = 0,5 \text{ мм}$ и длиной $L = 10 \text{ мм}$ и его топология в программе Matlab.



а



б

а – внешний вид изготовленных резисторов; б – топология резистора в программе Matlab
Рисунок 4.8 – Резистор типа меандр

Сопротивление изготовленных образцов R и рассчитанное $\rho_{\square}$ представлено в таблице 4.2 Поверхностное сопротивление изготовленных резисторов рассчитывалось по формуле:

$$\rho_{\square} = \frac{R}{K_f} \quad (4.6)$$

Таблица 4.2 – Параметры изготовленных резисторов

№ резистора	B , мм	L , мм	K_f	R , Ом	$\rho_{\square}$, Ом/□
1	0,5	10	20	452	22,60
2				441	22,05
3				423	21,15
4				435	21,75
5				453	22,65

Полученные значения $\rho_{\square}$ меньше заявленной в ТУ на пасты. Причиной этому может являться большая толщина отвержденного слоя. Если использовать в качестве истинного значения $\rho_{\square}$ полученное при измерении четырехзондовым методом, то оно имеет допуск $\pm 30\%$ [125]. Тогда верификация является успешной, если рассчитанное значение $\rho_{\square}$ по формуле (4.6) укладывается в допуск $\pm 30\%$ от истинного значения, полученного при измерении четырехзондовым методом.

Учитывая, что геометрические размеры резистора сравнимы с межзондовым расстоянием, значения $\rho_{\square}$ будут больше, чем теоретические значения. Это происходит вследствие того, что ток растекается в меньшем объеме и сила тока в образце понижается по сравнению с расчетной. Поэтому необходимо введение поправочных коэффициентов, учитывающие конечную площадь резистора.

Результаты измерения представлены в таблице 4.3. Расчет $\rho_{\square}$ осуществлялся по формуле, представленной в работе [124]. Поправочный

коэффициент с учетом геометрии резистора и расстояния между зондами $k = 0,9994$.

$$\rho_{\square} = \frac{U}{I} k \quad (4.7)$$

Таблица 4.3 – Результаты измерения поверхностного сопротивления четырехзондовым методом

№ резистора	I , мА	U , В	$\rho_{\square}$, Ом/□
1	0,020	0,357	17,83
2		0,349	17,44
3		0,360	17,99
4		0,345	17,23
5		0,354	17,69

Среднее значение поверхностного сопротивления при измерении четырехзондовым методом составило $\rho_{\square} \approx 18$ Ом/□. Тогда верхний и нижний предел допуска $\rho_{\square}$ составит 23,4 и 12,6 Ом/□. Полученные ранее значения $\rho_{\square}$ рассчитанные по формуле (4.7) находятся в рассчитанном допуске полученном четырехзондовым методом представленные в таблице 4.3. Для окончательной верификации программы необходимо пересчитать топологию резистора с учетом нового истинного значения $\rho_{\square} \approx 18$ Ом/□ для других значений сопротивления резистора. В таблице 4.4 представлены геометрические размеры и номиналы изготовленных резисторов. На рисунке 4.9 представлены результаты верификации изготовленных резисторов и номиналов резисторов, рассчитанных в программе Matlab.

Таблица 4.4 – Геометрические размеры и номиналы изготовленных образцов

Образец	Расчетное значение, Ом	Измеренное сопротивление, Ом	Ширина резистора, мм	Длина резистора, мм
R_1	170	196	0,37	3,48
R_2	120	109	0,53	
R_3	60	42	1	
R_4	40	33	1,4	

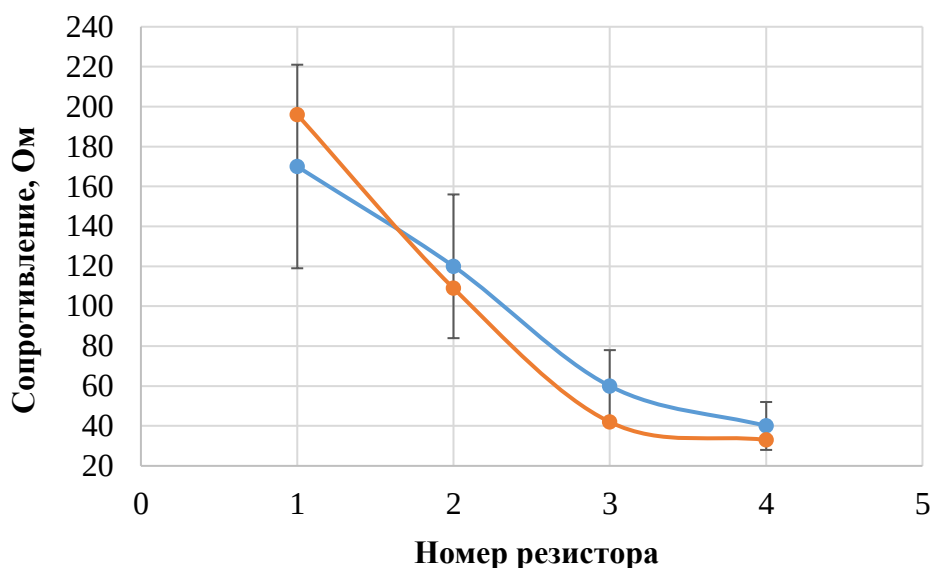


Рисунок 4.9 – Результаты верификации программы

4.2 Проектирование катушек индуктивности

Планарная катушка индуктивности – электронный компонент, который представляет собой плоскую катушку индуктивности, изготовленную на плоской подложке с помощью технологий, применяемых при изготовлении печатных плат и интегральных схем. Она состоит из нескольких витков проводника, свернутых в спираль на плоскую поверхность, что позволяет ей занимать меньше места на печатной плате [126].

Обычно катушки индуктивности выполняют с круглой, квадратной формой витков или в форме меандра и многоугольника [127–129]. Примеры таких катушек приведены на рисунке 4.10.

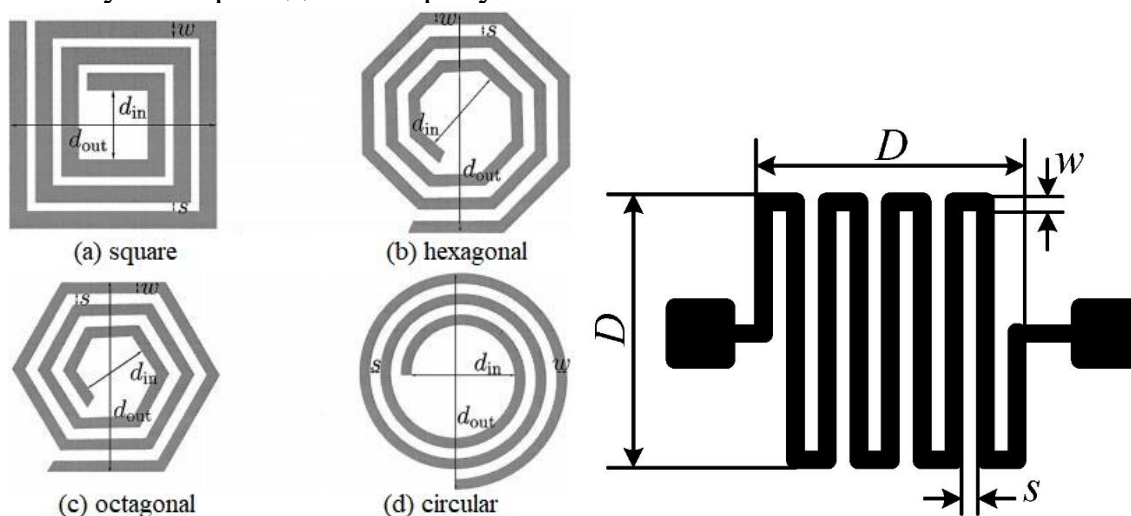


Рисунок 4.10 – Виды планарных катушек индуктивности

В контексте разработки и проектирования планарных катушек наиболее важные характеристики – это индуктивность и сопротивление. Последнее определенно должно быть очень низким, так как любое сопротивление уменьшает эффективность катушки. Индуктивность, напротив, для эффективной связи с другими системами должна быть высокой.

Планарные катушки названы так из-за того, что все их части (витки) находятся практически на одной плоскости (т. е. они почти плоские). Они занимают намного меньше места, чем другие индукторы, и поэтому подходят для практических любых приложений с ограничениями по размерам, что очень актуально, к примеру, в микроэлектромеханических системах (МЭМС) или в имплантированных медицинских устройствах, например, сердечных насосах. Такие катушки могут изготавливаться как на жестких, так и на упругих подложках, и, следовательно, могут быть интегрированы как на классические печатные платы, так и на элементы для гибкой электроники.

Благодаря этим качествам, планарные катушки находят применение в различных областях, в основном, в высокочастотных приложениях. Некоторые примеры использования:

- дистанционный мониторинг состояния здоровья;
- беспроводная передача энергии;

- радиочастотная идентификация;
- индукционный нагрев.

Расчет катушки индуктивности проводится с помощью формулы:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot D_{avg} \cdot C_1 \cdot \left(\ln \left(\frac{C_2}{\varphi} \right) + C_3 \cdot \varphi + C_4 \cdot \varphi^2 \right)}{2} \quad (4.8)$$

где L – индуктивность, Гн; μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; N – число витков катушки; D_{avg} – средний диаметр катушки, м; C_1, C_2, C_3, C_4 , – коэффициенты, зависящие от формы катушки; φ – коэффициент заполнения.

Средний диаметр катушки вычисляется по формуле:

$$D_{avg} = \frac{D + d}{2} \quad (4.9)$$

где D – внешний диаметр катушки, м; d – внутренний диаметр катушки, м.

Внешний диаметр катушки можно найти, используя формулу:

$$D = 2 \cdot W \cdot N + d \quad (4.10)$$

где W – ширина дорожки, м.

Коэффициент заполнения можно вычислить по формуле:

$$\varphi = \frac{D - d}{D + d} \quad (4.11)$$

Коэффициент заполнения φ показывает как заполнено пространство катушки. При малых значениях φ катушка выглядит «пустой» ($D \approx d$); при значениях φ , приближающихся к единице, катушка полностью заполнена витками ($D \gg d$).

Далее описаны примеры практической реализации представленного расчета для круглых и квадратных катушек индуктивности. В расчете рассматривается круглая катушка с 4 витками, внутренний диаметр которой составлял 2,5 мм, ширина дорожки 250 мкм. Значения коэффициентов, зависящих от формы катушки, были приняты равными $C_1=1$, $C_2=2,46$, $C_3=0$, $C_4=0,2$. Внешний диаметр катушки получился 4,5 мм, коэффициент заполнения – 0,286. Расчетная индуктивность составила 76,33 нГн.

Индуктивность этих катушек рассчитывалась по формуле (4.7). Внутренний диаметр был принят равным 6,5 мм, число витков – 4, расстояние между проводниками – 2 мм, коэффициенты зависящие от формы катушки, были приняты равными $C_1=1,27$, $C_2=2,07$, $C_3=0,18$, $C_4=0,13$. Внешний диаметр рассчитывался по формуле:

$$D = d + W \cdot 2 \cdot N + S \cdot 2(N - 1) \quad (4.12)$$

где S – расстояние между проводниками, м.

Значение диаметра составило 20 мм. Коэффициент заполнения рассчитывался по формуле (4.11) и составил 0,519. Полученная индуктивность составила 260,7 нГн. Ее изображение приведено на рисунке 4.11.

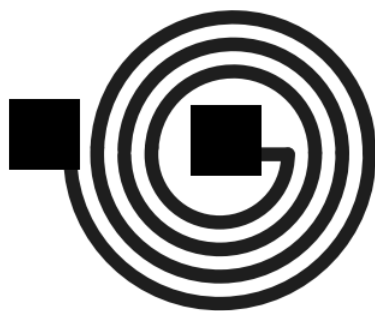


Рисунок 4.11 – Планарная катушка круглой формы

На рисунках 4.12, 4.13 представлены образцы изготовленные на принтере Voltera V-One с использованием сопла диаметром 225 мкм.

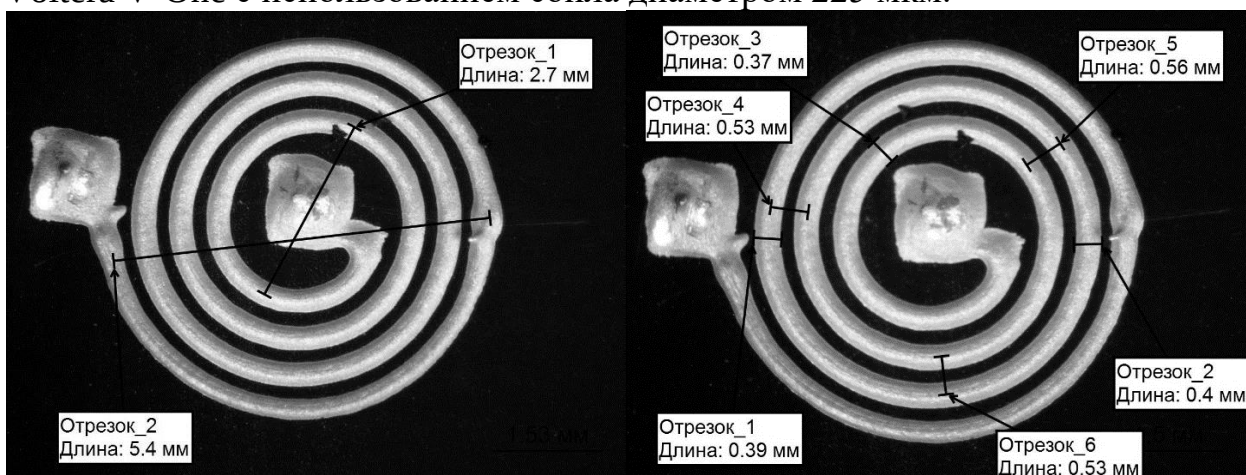


Рисунок 4.12 –Геометрические размеры катушки

Сравнение измеренных значений напечатанной образца с исходной топологией показало, что внешний диаметр увеличился на 0,9 мм, внутренний – на 0,2 мм. В среднем ширина дорожки увеличилась на 0,13 мм, расстояние между дорожками составило 0,54 мм. Индуктивность полученной катушки составила 54 нГн, что на 22,33 нГн меньше, по сравнению с рассчитанной.

Изготовлены образцы планарных катушек квадратной формы. Печать происходила на том же принтере, диаметр сопла которого был 225 мкм. Топология печаталась на подложке размером 60×24 (рисунок 4.13).

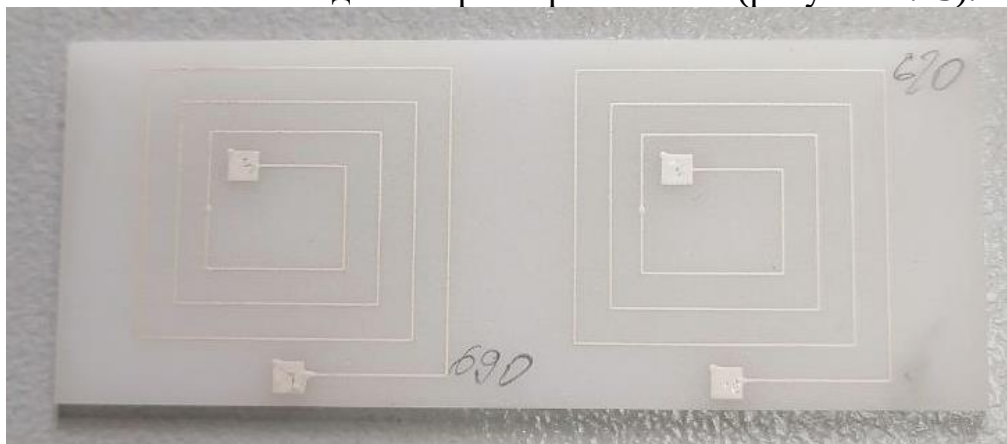


Рисунок 4.13 – Результаты печати квадратных катушек индуктивности

Измерения расстояния между проводниками и ширины проводников первой катушки приведены на рисунке 4.14.

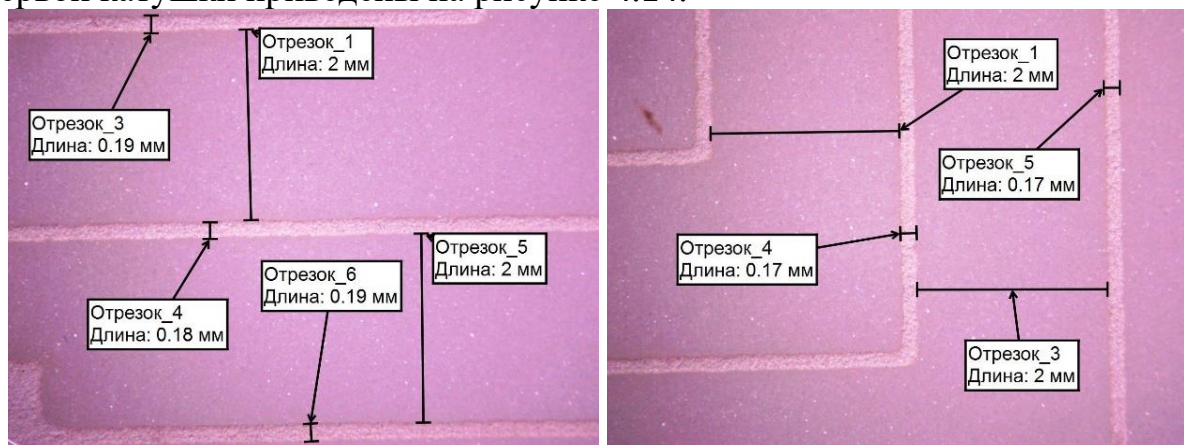


Рисунок 4.14 – Измерение ширины проводника и расстояния между ними

Внутренний диаметр катушек увеличился на 0,3 мм, ширина проводника катушки в среднем уменьшилась на 0,07 мм, расстояние между проводниками уменьшилось на 0,02 мм.

Индуктивность первой катушки составила 690 нГн, что на 429,3 нГн больше по сравнению с рассчитанным. Индуктивность второй катушки – 620 нГн, что больше на 359,3 нГн. Между собой индуктивности отличаются на 60 нГн.

Однако помимо рассмотренных вариантов планарных катушек возможно изготовление более сложных конструкций, например, многослойных планарных катушек. Для демонстрации возможностей технологии была предпринята попытка создания планарного трансформатора с использованием рассмотренных ранее планарных катушек индуктивности.

В среде MathCAD были рассчитаны индуктивности двух катушек круглой формы. Первая катушка, состоящая из 11 витков, будет являться входной катушкой трансформатора, а вторая, состоящая из 5 витков – выходной.

Внешний диаметр входной катушки был принят равным 20 мм, внутренний диаметр – 5,3 мм, расстояние между проводниками – 0,45 мм. Коэффициент заполнения катушки составил 0,581, а индуктивность – 1,453 мкГн. Внешний диаметр выходной катушки был принят равным 11,6 мм, внутренний – 5,3 мм, расстояние между проводниками 0,45 мм. Коэффициент заполнения катушки составил 0,373, а индуктивность – 254,1 нГн. Топология планарного трансформатора, построенная в Altium Designer, представлена на рисунке 4.15. При создании топологии использовалось 7 последовательных слоев печати.

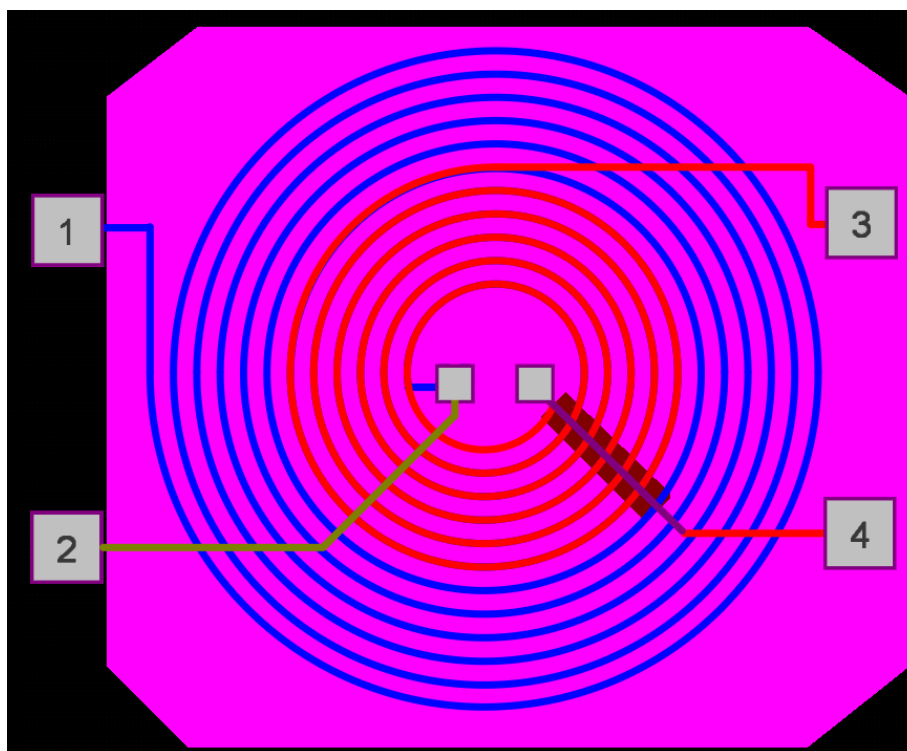


Рисунок 4.15– Топология планарного трансформатора

Планарный трансформатор был изготовлен на принтере печатных плат Voltera V-One. Использовалась проводниковая паста ПП-17 и диэлектрическая паста ПД-12. Печать проводниковой пасты производилась пластиковым соплом диаметром 225 мкм, диэлектрической – металлическим соплом тем же диаметром (225 мкм).

На подложке проводящей пастой был нанесен первый слой, представляющий собой планарную катушку индуктивности, которая выполняет роль первичной обмотки. Напечатанная первичная катушка индуктивности представлена на рисунке 4.16.



Рисунок 4.16 – Первичная катушка планарного трансформатора

Индуктивность катушки получилась равной 1,95 мкГн.

На микроскопе Альтами были измерены геометрические параметры катушки индуктивности:

- внешний диаметр – 2 см;
- размер большой контактной площадки – $2,07 \times 2,17$ мм;
- размер переходной контактной площадки – $1,21 \times 1,33$ мм;
- среднее расстояние между проводниками – 0,4 мм;
- средняя ширина проводника – 0,34 мм.

Далее был напечатан диэлектрический слой для исключения замыкания катушек индуктивности в трансформаторе. Результат печати диэлектрического слоя представлен на рисунке 4.17.

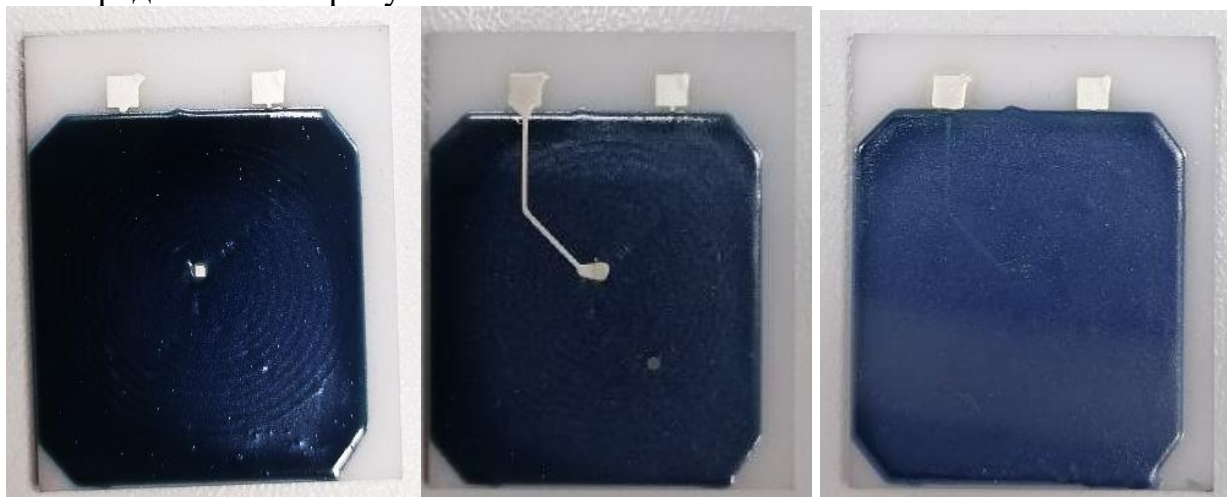


Рисунок 4.17 – Нанесение 2, 3 и 4 слоев

На оптическом профилометре Chotest Superview W1 была исследована поверхность подложки с нанесенными слоями для определения неравномерности рельефа в разных частях подложки. Профилограмма представлена на рисунке 4.18.

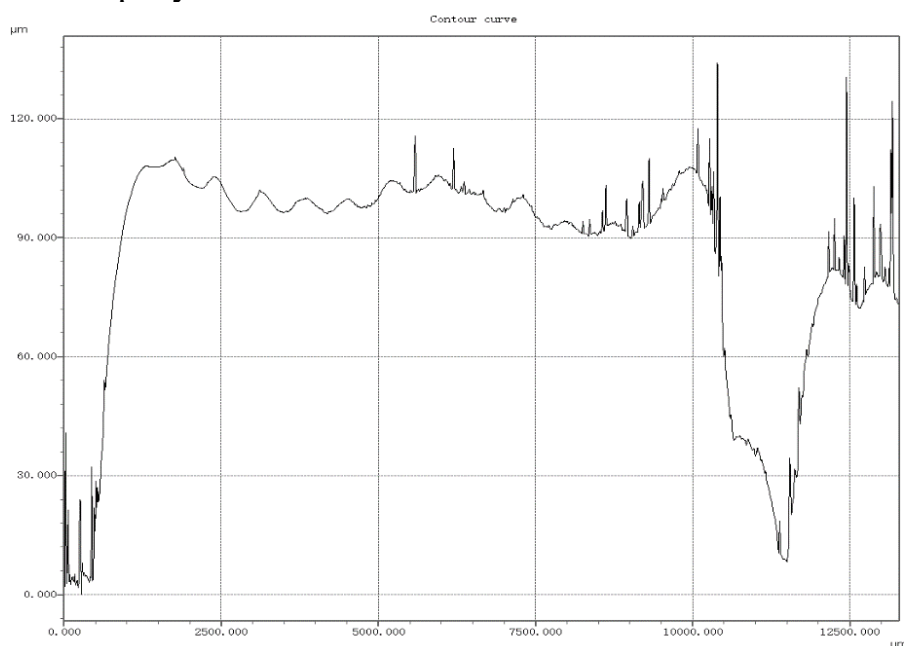


Рисунок 4.18 – Профилограмма

В данном случае измерялся диапазон от края подложки до контактной площадки, находящейся внутри катушки индуктивности. Как видно из рисунка 5.18 вначале графика высота близка к нулю. Отсюда можно сделать вывод, что в этом месте находилась подложка. Затем примерно через 1000 мкм высота увеличилась до 110 мкм. В этом месте начинается диэлектрический слой и продолжается до 10500 мкм. Волнообразные неровности на этом участке вызваны тем, что под слоем диэлектрика находятся витки катушки индуктивности, которые имеют определенную высоту и также тем, что технология печати имеет некоторые несовершенства. Резкий спад высоты до 40 мкм обусловлен отверстием в слое диэлектрика и расположением в этом месте контактной площадки. Далее высота падает практически до нуля, что объясняется тем, что здесь заканчивается контактная площадка, и на этом месте только подложка. Затем высота снова увеличивается примерно на ту же высоту, что и слой диэлектрика ранее, значит здесь заканчивается отверстие, и продолжается слой диэлектрика.

Далее был нанесен проводник, соединяющий контактную площадку внутри катушки с контактной площадкой, к которой в последующем будет происходить подключение к трансформатору. Также для выравнивания высоты отверстия был наращен столбик контактной площадки.

Далее была напечатана вторичная катушка индуктивности. Полученная катушка показана на рисунке 4.19.

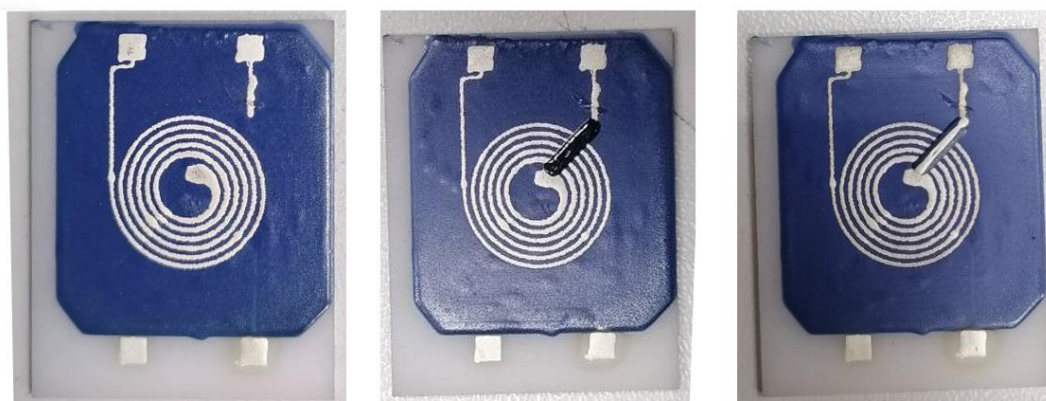


Рисунок 4.19 – Нанесение 5, 6 и 7 слоев

Индуктивность катушки получилась равной 425 нГн. На микроскопе Альтами были измерены геометрические параметры катушки индуктивности:

- внешний диаметр – 10,7 мм;
- размер большой контактной площадки – $2,37 \times 2,36$ мм;
- размер переходной контактной площадки – $1,56 \times 1,58$ мм;
- среднее расстояние между проводниками – 0,45 мм;
- средняя ширина проводника – 0,48 мм.

При печати второй катушки индуктивности возникли дефекты из-за наслоения пасты так как возникает большая разница в высоте, что осложняет равномерную печать проводников. После был нанесен слой диэлектрика для

вывода проводника вторичной катушки индуктивности с контактной площадкой.

В последнем слое был напечатан вывод катушки индуктивности, который соединяется с выходной контактной площадкой с помощью проводника.

С помощью векторного анализатора характеристик цепей была измерена АЧХ трансформатора, представленная на рисунке 4.20.

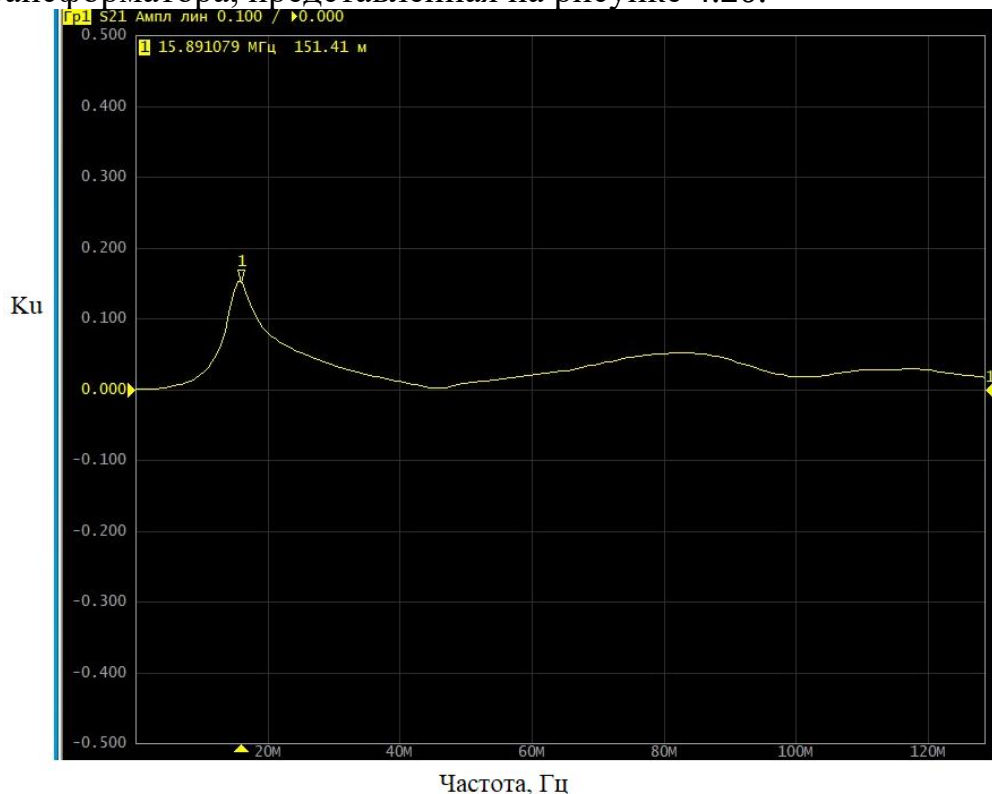


Рисунок 4.20 – АЧХ трансформатора

Как видно из рисунка 4.20, наблюдается более высокое значение коэффициента передачи на частоте 15 МГц, что говорит о возможности создания высокочастотных планарных трансформаторов.

4.3 Проектирование конденсаторов

Пленочные конденсаторы представляют собой важный элемент в области электрических и электронных устройств, обеспечивая эффективное накопление и распределение электрической энергии. Методике проектирования и расчета таких конденсаторов, включая выбор материалов, геометрические параметры и электрические характеристики является известной и широко применяемой.

При проектировании пленочного конденсатора критически важным является выбор диэлектрического материала. Наиболее распространенными являются полиэтилен, полипропилен и полистирол, которые обладают хорошими диэлектрическими свойствами и высокой устойчивостью к электрическим полям. Выбор конкретного материала зависит от требуемых

характеристик, таких как диэлектрическая проницаемость, температура эксплуатации и механическая прочность.

Геометрические параметры конденсатора включают толщину пленки, площадь электродов и расстояние между ними. Площадь электродов рассчитывается в зависимости от необходимой емкости и выбранного диэлектрика. Формула для расчета емкости пленочного конденсатора имеет вид:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} \quad (4.13)$$

где C – емкость конденсатора; ε – диэлектрическая проницаемость материала; S – площадь электродов; d – расстояние между электродами.

Эта формула позволяет определить необходимую площадь электродов для достижения заданной емкости. Другие электрические характеристики конденсатора, такие как максимальное напряжение, ток утечки и температурный коэффициент, также могут быть рассчитаны формулам, представленным ниже. Максимальное рабочее напряжение определяется с учетом пробивного напряжения диэлектрика:

$$U_{max} = E_{пр} h \quad (4.14)$$

где $E_{пр}$ – пробивное напряжение диэлектрика; h – толщина пленки.

Ток утечки можно оценить по формуле:

$$I_{ут} = U / R_{ут} \quad (4.15)$$

где $I_{ут}$ – ток утечки; U – напряжение на конденсаторе; $R_{ут}$ – сопротивление утечки.

Конструкция пленочного конденсатора включает в себя электроды, размещенные параллельно друг другу, с пленкой диэлектрика между ними. При изготовлении тестовых образцов таких конденсаторов использована диэлектрическая паста ПД-12 и проводящая паста ПП-17. Напечатанные образцы конденсаторов представлены на рисунке 4.21.

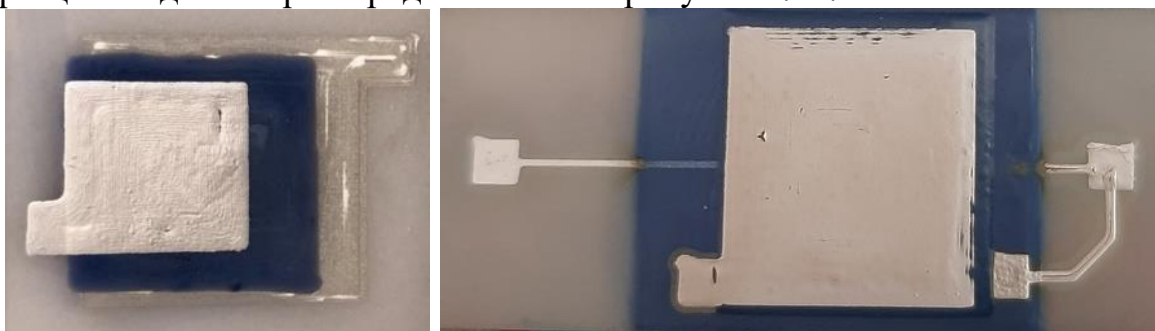


Рисунок 4.21 – Напечатанные образцы конденсаторов

Однако помимо плоскопараллельных конденсаторов применяют и конструкцию встречно-штыревых конденсаторов. Как правило их емкость оказывается меньше при аналогичной площади, занимаемой на подложке. Поэтому их используют преимущественно в высокочастотных схемах. С учетом технологических ограничений нанесения материала с помощью принтера (ширина проводника и зазор между проводниками) были

разработаны тестовые топологии таких конденсаторов с разной длиной обкладок: 10 мм, 15 мм и 20 мм соответственно, не изменяя других параметров. Топологии конденсаторов представлены на рисунке 4.22.

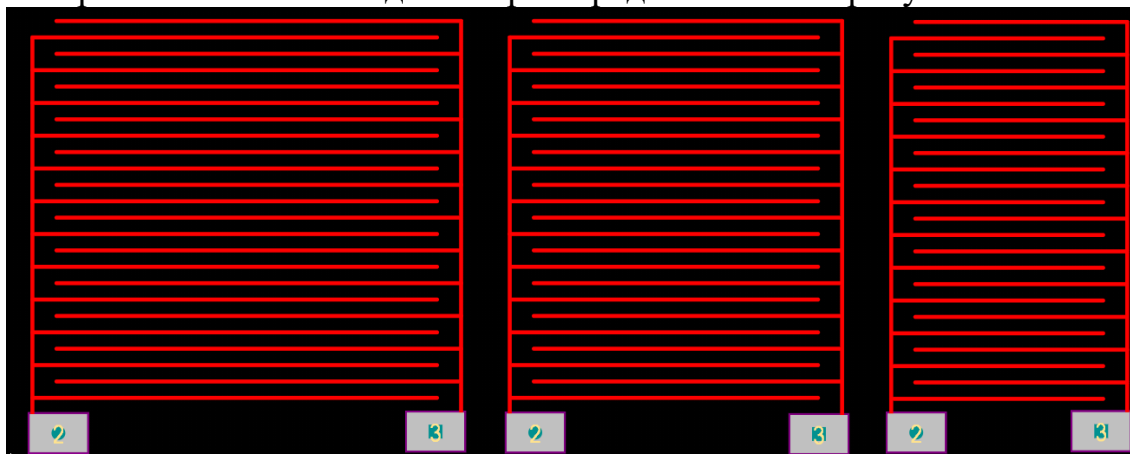


Рисунок 4.22 – Тестовые топологии встречно-штыревых конденсаторов.

На подложке размером 60×24 мм были напечатаны три конденсатора, представленные рисунке 4.23.



Рисунок 4.23 – Изготовленные планарные встречно-штыревых конденсаторы

Емкость конденсатора с длиной обкладок 10 мм (справа) составила 9,7 пФ, 15 мм – 13,9 пФ (в центре), 20 мм – 18,8 пФ (слева). С увеличением длины обкладок емкость конденсатора меняется пропорционально. Кроме того, емкость зависит от количества штырей в структуре, а также от зазора между ними.

Результатом расчета является формирование топологии с определенными габаритными размерами, обеспечивающими заданную емкость (рисунок 4.24).

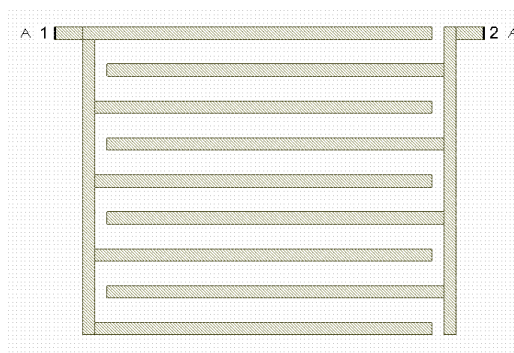


Рисунок 4.24 – Пример расчета структура конденсатора на 5 пФ

С помощью полученной модели была составленa библиотека конденсаторов для номиналов с шагом 1 пФ. Параметры рассчитанных топологий представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Параметры встречно-штыревых конденсаторов

Емкость, пФ	Ширина, мм	Длина, мм	Ширина дорожки, мм	Расстояние между дорожками, мм	Общее количество штырей
5	9,1	7,5	0,3	0,6	9
6	9,1	9,3			11
10	11,2	12,9			15
11	11,2	14,7			17
12	13,7	12,9			15
13	13,2	14,7			17
14	13,9	15,6			18
15	15,1	15,8			18
17	15,3	16,5			19
18	16,1	17,4			20
19	17,2	16,5			19
20	17,1	18,3			21

4.5 Изготовление макетов односторонних тестовых плат

Для оценки минимально достижимых размеров и степени растекания пасты была разработана тестовая плата (рисунок 4.25), которая включает в себя проводники разных размеров и форм, круглые и квадратные контактные площадки (КП) разных размеров.

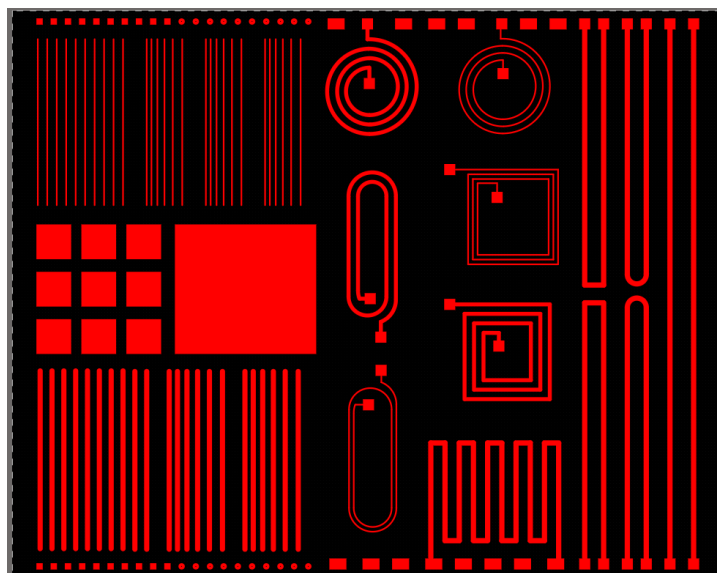
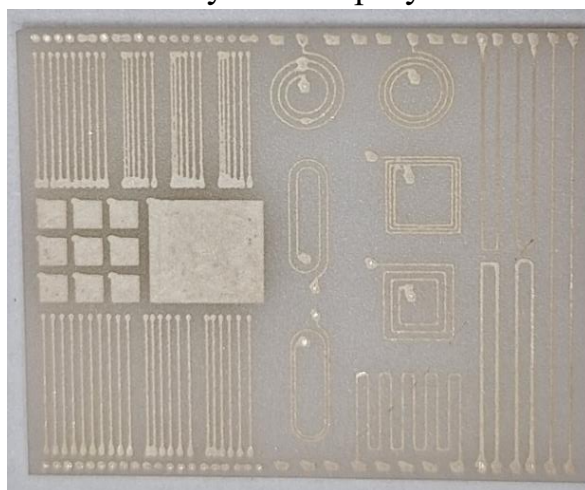
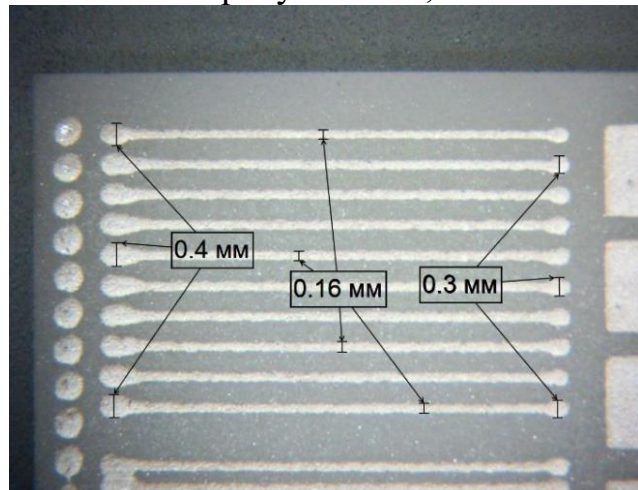


Рисунок 4.25 – Тестовая плата для определения минимальных размеров

Печать тестовой платы проводилась соплом с внутренним диаметром 100 мкм. Полученный результат печати показан на рисунке 4.26, а.



а



б

Рисунок 4.26 – Тестовая плата вид общий (а) и проводники (б)

Как видно из рисунка 4.26, а большинство проводников в начале линий получились замкнутыми. Данный дефект связан со способом дозирования паст и устранить его возможно при проектировании печатных плат путем заведения проводника в контактную площадку. Рисунок 4.26, б демонстрирует, что минимально достижимая ширина проводников составляет 0,16 мм. Как видно из рисунка 4.26, а полученные КП имеют круглую форму. Исходя из этого был сделан вывод, что принтер не обеспечивает прямоугольность при 0,3х0,3 мм.

4.6 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 [111]. Для печати использовалось сопло с внутренним диаметром 150 мкм.

Формирование топологии металлических проводников проводилось проводящей пастой ПСП-2, Дельта-Пасты (Россия). 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 4.27 показаны фотографии слоев при поэтапной печати МПП.

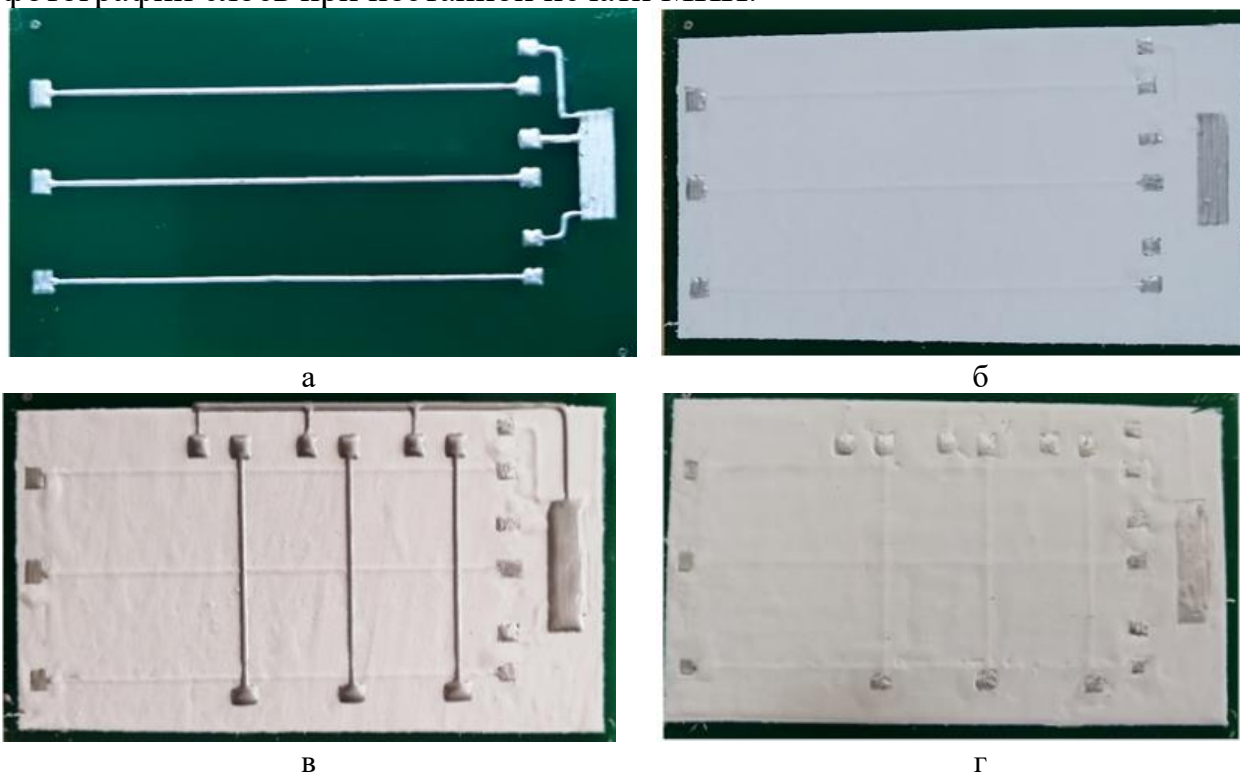


Рисунок 4.27 – Печать МПП: а – печать первого проводящего слоя; б – печать первого диэлектрического слоя; в – печать второго проводящего слоя; г – печать второго диэлектрического слоя

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 4.28 показана готовая плата и ее функционирование при переключении светодиодов.

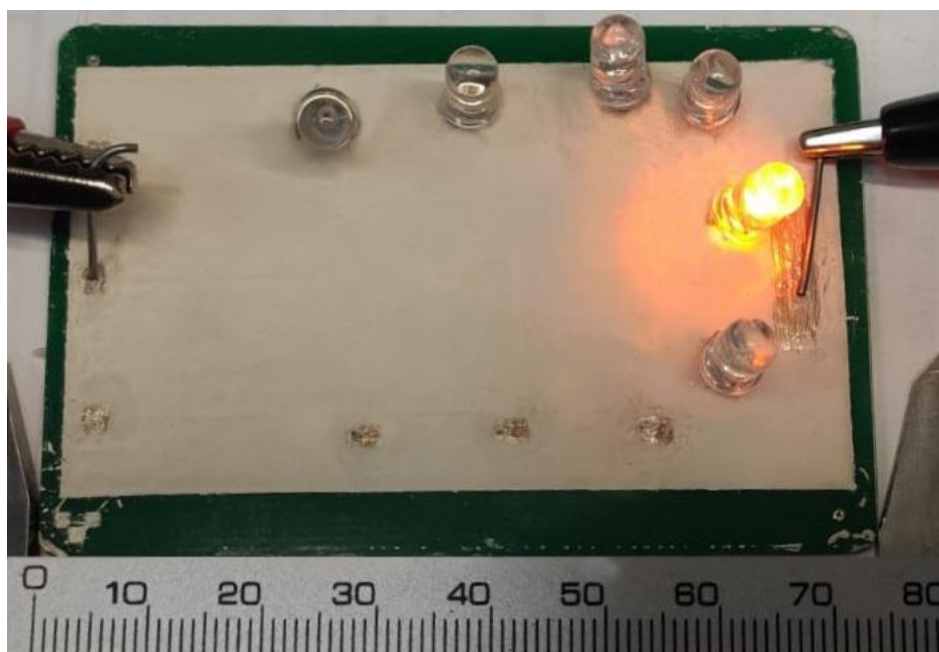


Рисунок 4.28 – МПП в сборе со светодиодами

Вопросы для самопроверки

1. Что такое коэффициент формы резистора (K_f)? Какие диапазоны K_f соответствуют резисторам прямоугольной формы ($L \leq B$, $L \geq B$) и резисторам типа «меандр»?
2. Как проводилась верификация программы? Какой номинал резистора был изготовлен и измерен первоначально?
3. Понимаете ли вы различия в алгоритмах расчета резисторов разной геометрии ($L \geq B$, $L \leq B$, меандр)?
4. Что такое планарная катушка индуктивности и каковы ее основные преимущества? Приведите примеры ее применения.
5. Как рассчитываются внешний диаметр катушки (D) и коэффициент заполнения (F)? Что показывает коэффициент заполнения?
6. Опишите конструкцию и назначение каждого слоя в изготовленном планарном трансформаторе. Сколько всего слоев было использовано?
7. Назовите ключевые этапы и параметры при проектировании пленочного конденсатора.
8. Запишите формулу для расчета емкости плоского конденсатора. Как с ее помощью определяется необходимая площадь обкладок?
9. В чем заключается особенность (преимущество и недостаток) встречно-штыревой конструкции конденсатора по сравнению с плоскопараллельной? Где ее преимущественно применяют?
10. Видите ли вы общие технологические проблемы (растекание, наслоение), влияющие на точность изготовления всех типов компонентов?
11. Опишите основной дефект, наблюдавшийся на напечатанных тестовых платах. В чем заключается его причина и каков метод его устранения на этапе проектирования?

12. Какой минимальный размер ширины проводника был достигнут?
13. Опишите общий технологический процесс изготовления МПП методом принтерной печати. Каковы ключевые этапы? Почему диэлектрический слой печатался в два прохода? Какую толщину это позволило достичь и какую проблему решало?
14. Что такое «топология диэлектрического слоя содержит окна»? Какую функцию выполняют эти окна?
15. Какое назначение у переходного отверстия в конструкции МПП?

5. Применение аддитивной принтерной технологии для изготовления компонентов и СВЧ-устройств

Для определения характеристик полосковых проводников, изготовленных из проводящих паст, которые используются в трафаретной технологии, использовалась методика экстракции параметров [91]. 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 следующие параметры подложки: 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°C . 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 5.1.

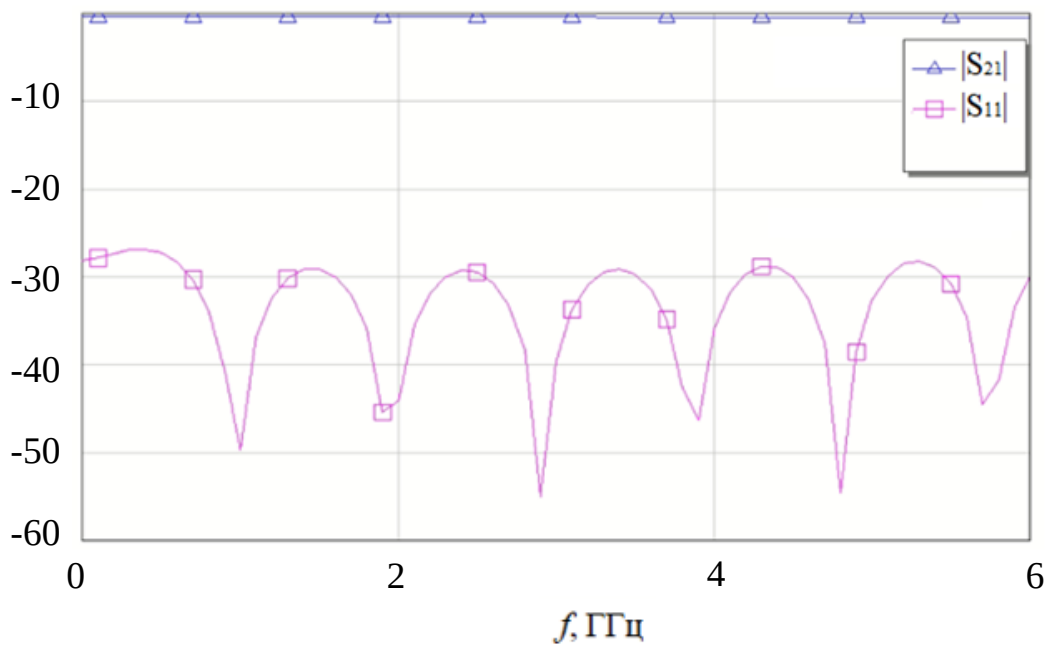


Рисунок 5.1 – Частотная характеристика модели МПЛ

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 5.2 показана ширина напечатанной линий.



Рисунок 5.2– Ширина МПЛ

На рисунке 5.3 показана профилограмма микрополосковой линии.

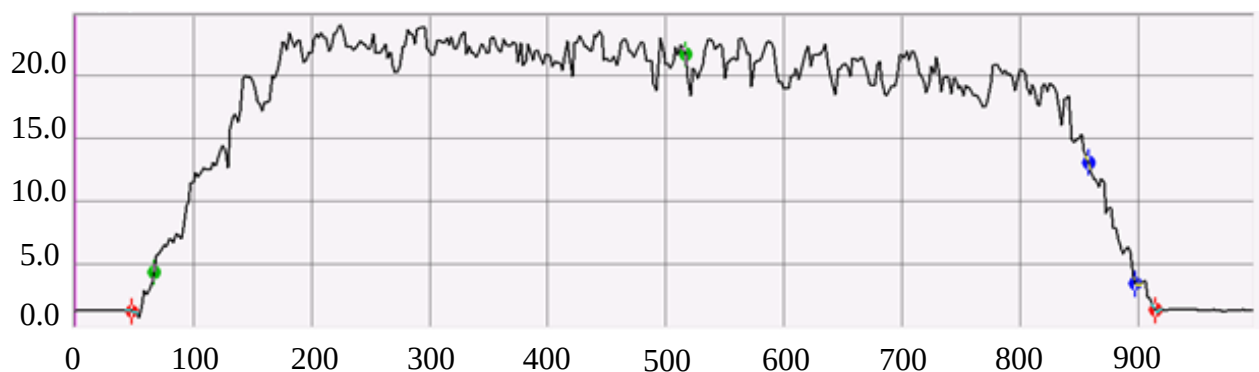


Рисунок 5.3 – Профилограмма МПЛ

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 5.4 и рисунок 5.5).

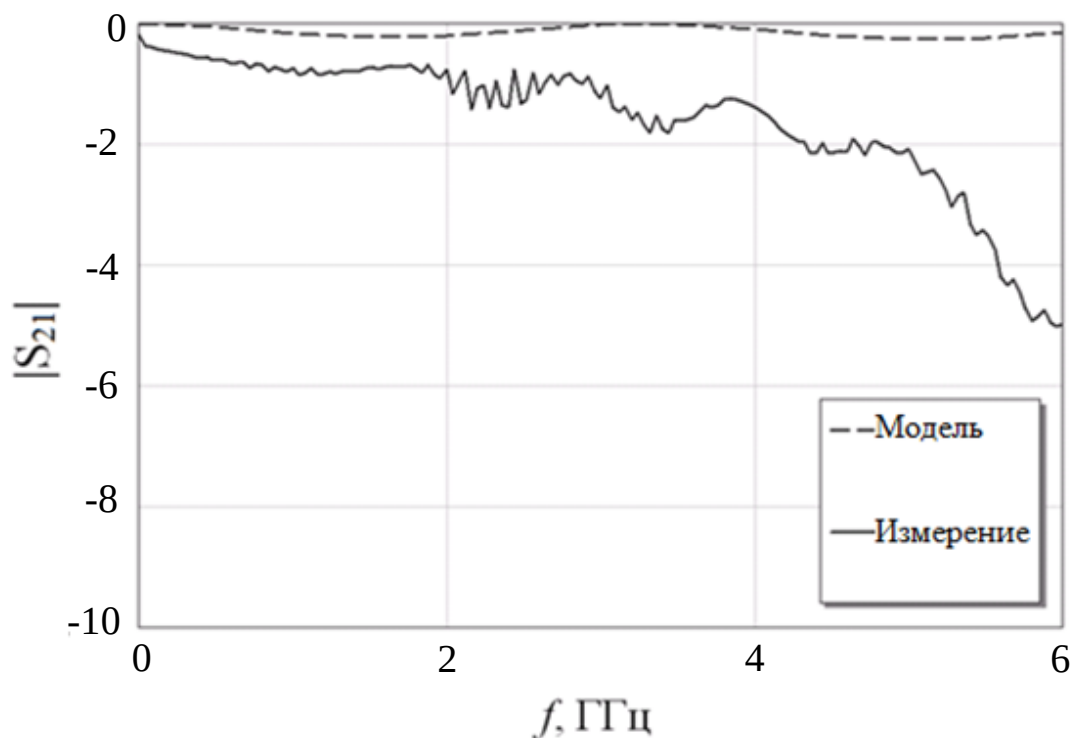


Рисунок 5.4 – Частотная зависимость модуля коэффициента передачи сигнала

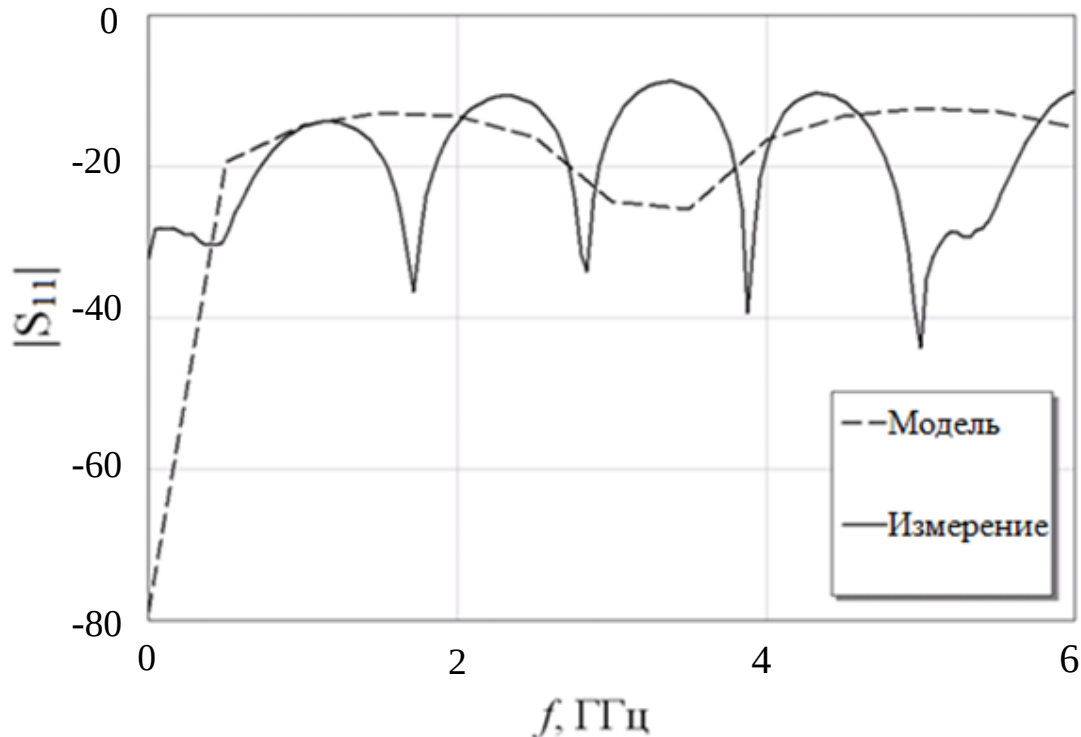


Рисунок 5.5 – Частотная зависимость модуля коэффициента отражения сигнала

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 5.6.

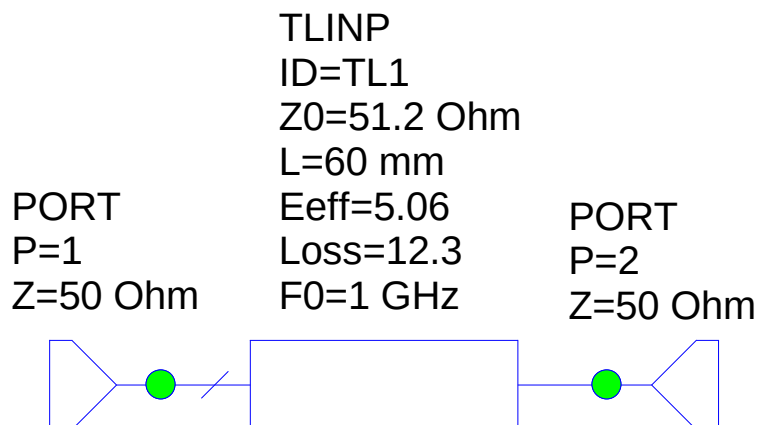


Рисунок 5.6 – Модель МПЛ с учетом частотных параметров

Полученные частотные характеристики при экстракции приведены на рисунках 5.7 и 5.8.

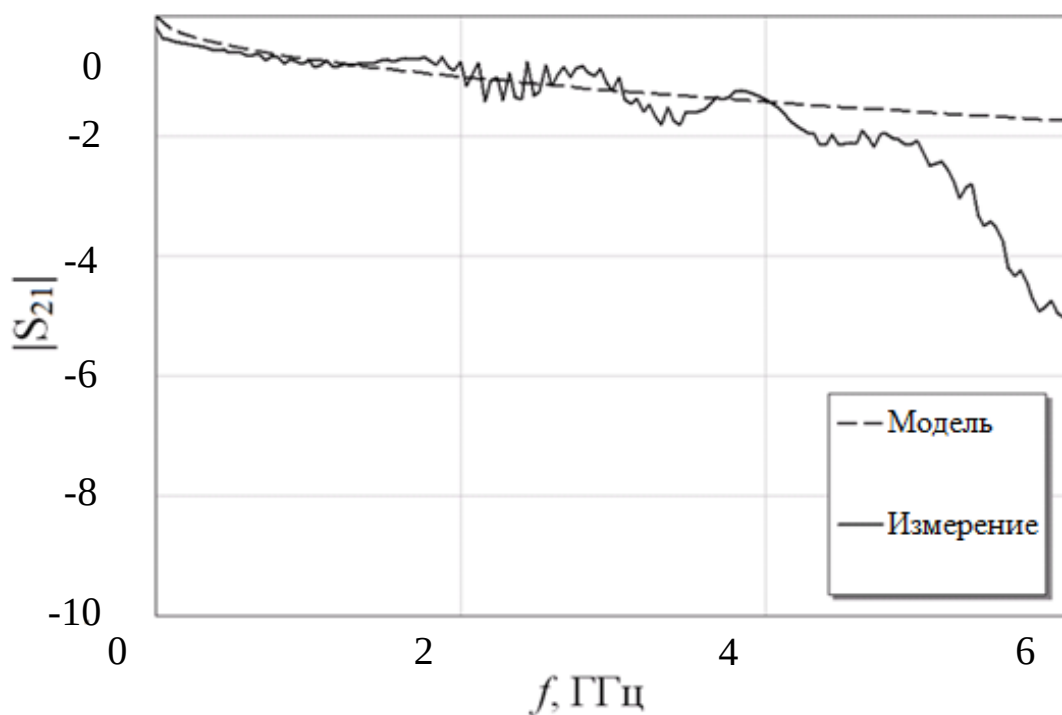


Рисунок 5.7 – Частотная зависимость модуля коэффициента передачи сигнала

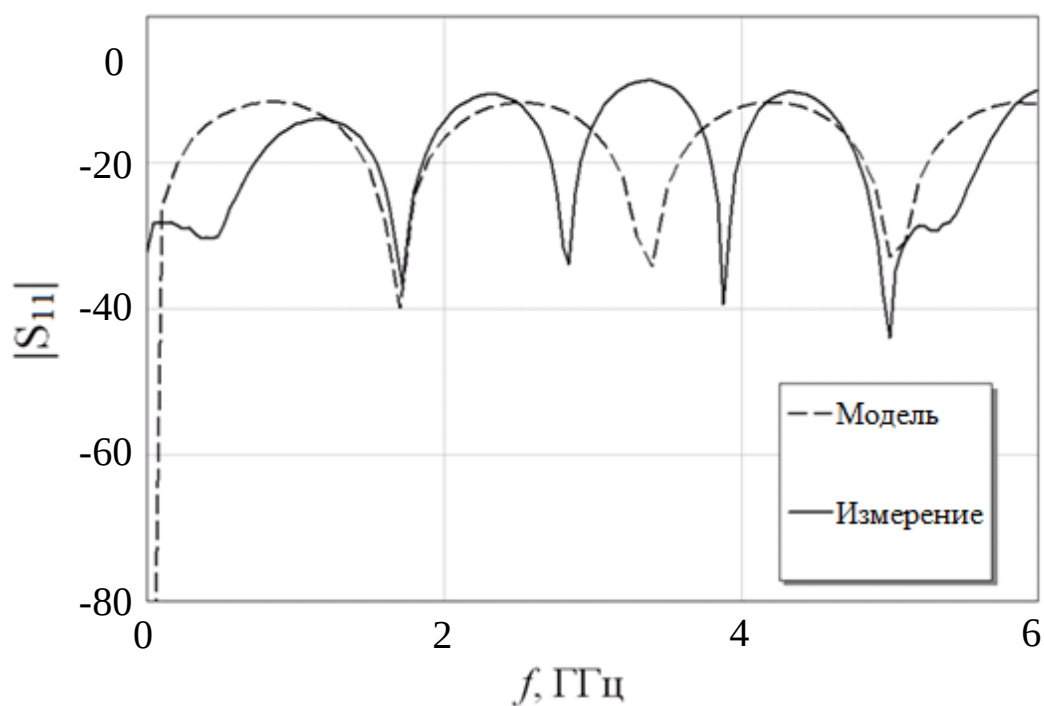


Рисунок 5.8 – Частотная зависимость модуля коэффициента отражения сигнала

Для уточнения модели в схему были добавлены емкости, которые эквиваленты разъемам, припаянным к микрополосковой линии (рисунок 5.9).

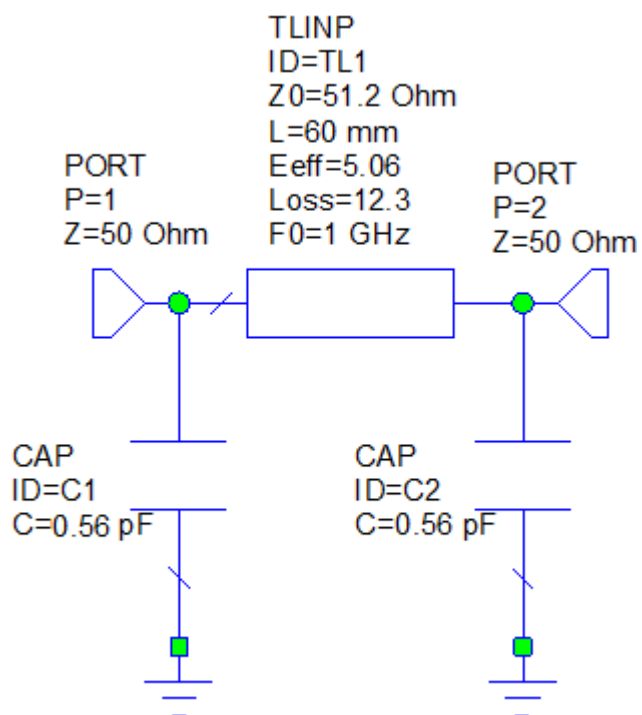


Рисунок 5.9 – Модель микрополосковой линии с учетом разъемов

На рисунках 5.10 и 5.11 показаны частотные зависимости после добавления емкости.

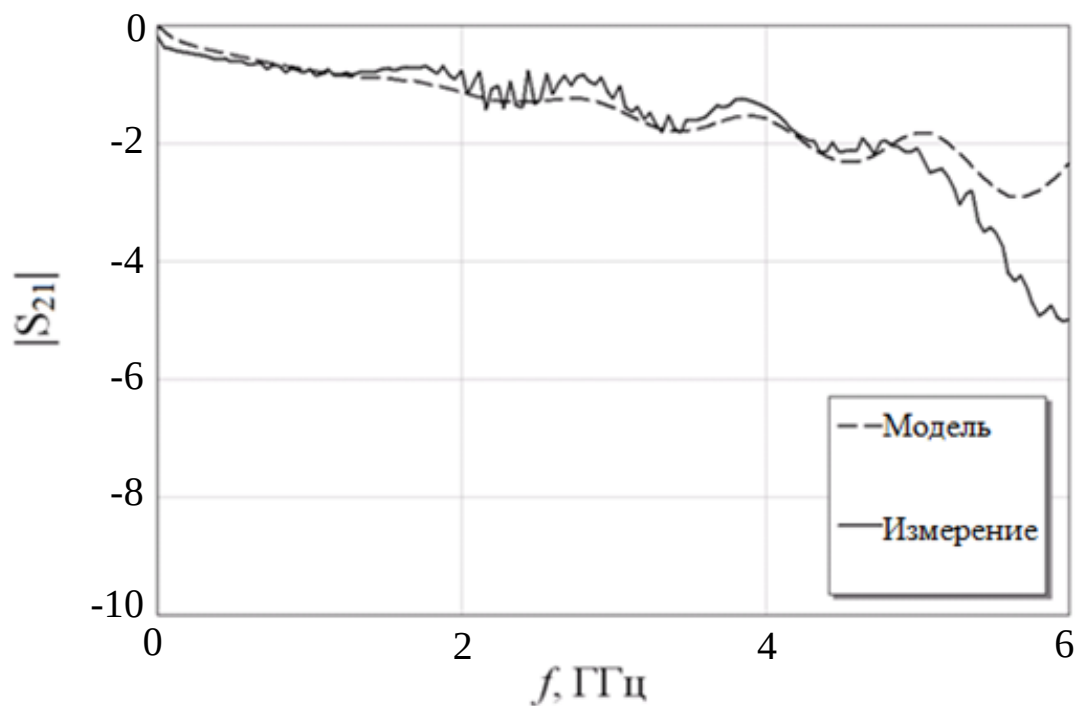


Рисунок 5.10 – Частотная зависимость модуля коэффициента передачи сигнала

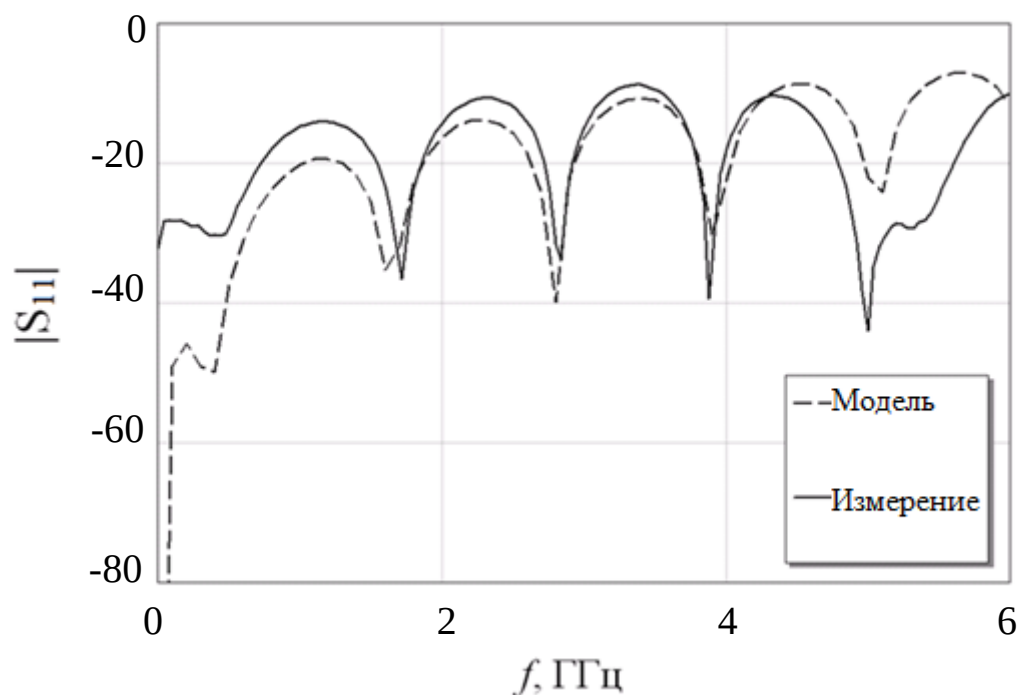


Рисунок 5.11 – Частотная зависимость модуля коэффициента отражения сигнала

Как видно из рисунков 5.10 и 5.11 паразитная емкость положительно сказалась на уточненной модели. Однако для практического использования узлов с потерями равными 12,3 дБ/м является не допустимым [92].

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 5.12.

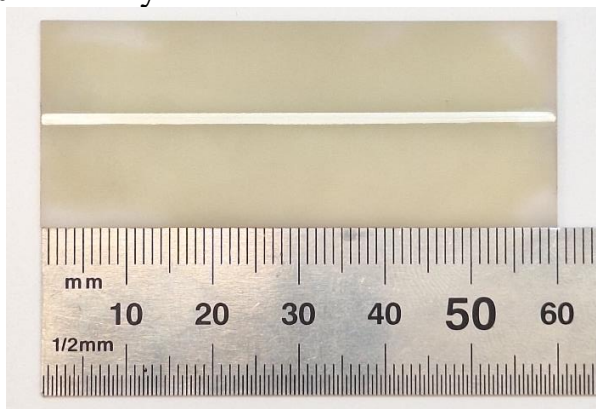


Рисунок 5.12 – МПЛ, напечатанная пастой ППС-2-2

Полученные частотные зависимости модуля коэффициента передачи напечатанных МПЛ показаны на рисунке 5.13.

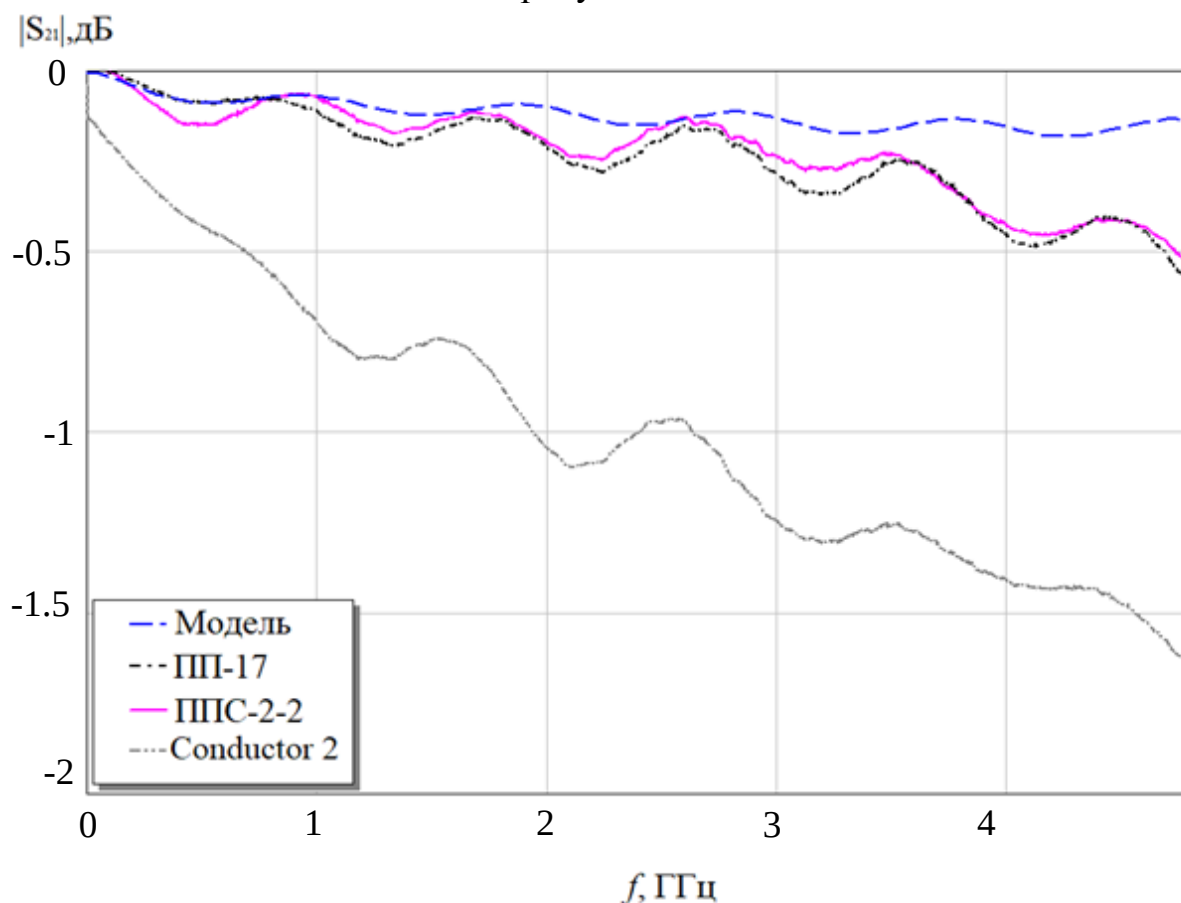


Рисунок 5.13 – Частотная зависимость модуля коэффициента передачи МПЛ

Как видно из рисунка 5.13, 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 5.1.

Таблица 5.1 – Частотные параметры микрополосковых линий, изготовленных из различных 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.

5.1 Фильтры

Полученные значения затухания (см. раздел 5) 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 [112]. Наибольшее применение нашли открытые (неэкранированные) микрополосковые резонаторы. Для изготовления фильтров использовалась паста ППС-2-2, которая обладает наименьшими потерями. Показаны 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 5.14 показан напечатанный микрополосковый ФНЧ со ступенчатым импедансом.

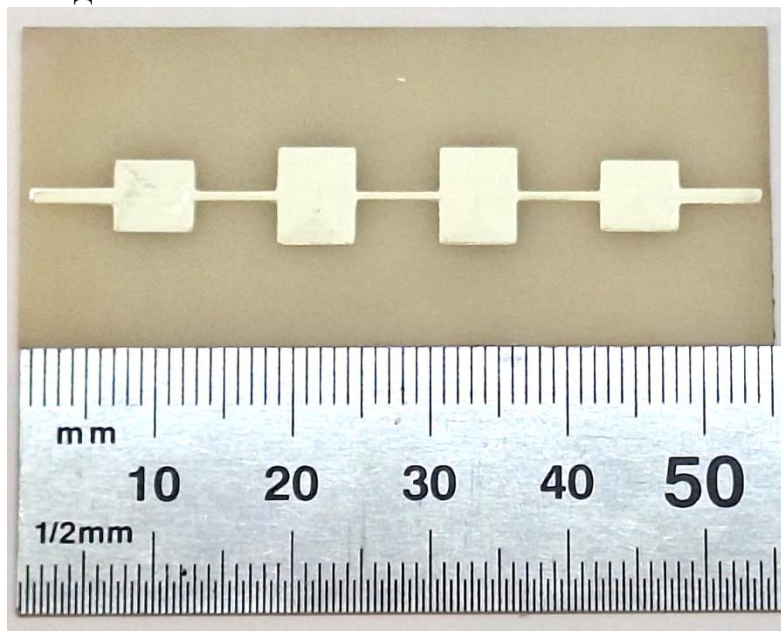


Рисунок 5.14 – Напечатанный фильтр нижних частот

На рисунке 5.15 показана частотная зависимость модели ФНЧ и напечатанного фильтра. Измерение частотных характеристик проводилось с помощью векторного анализатора Planar S-5048.

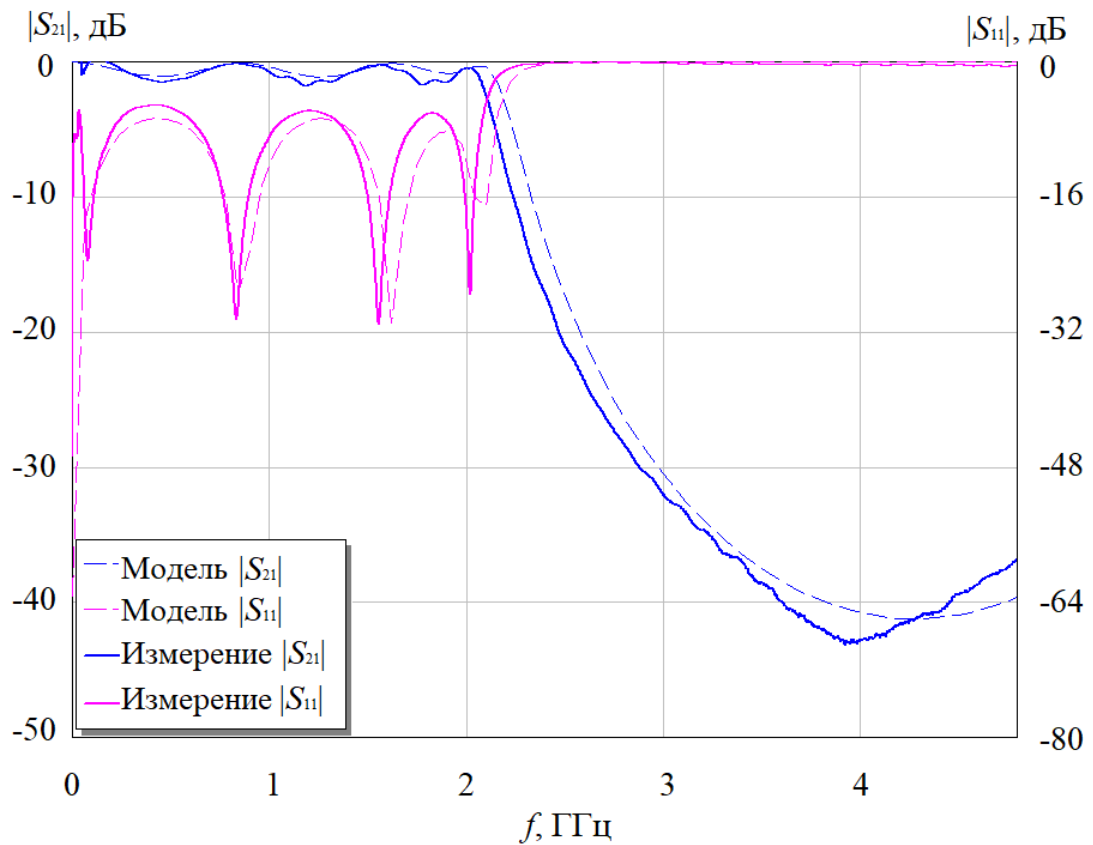


Рисунок 5.15 – Сравнение частотных характеристик модели и напечатанного фильтра

Как видно из рисунка 5.15 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 5.16.

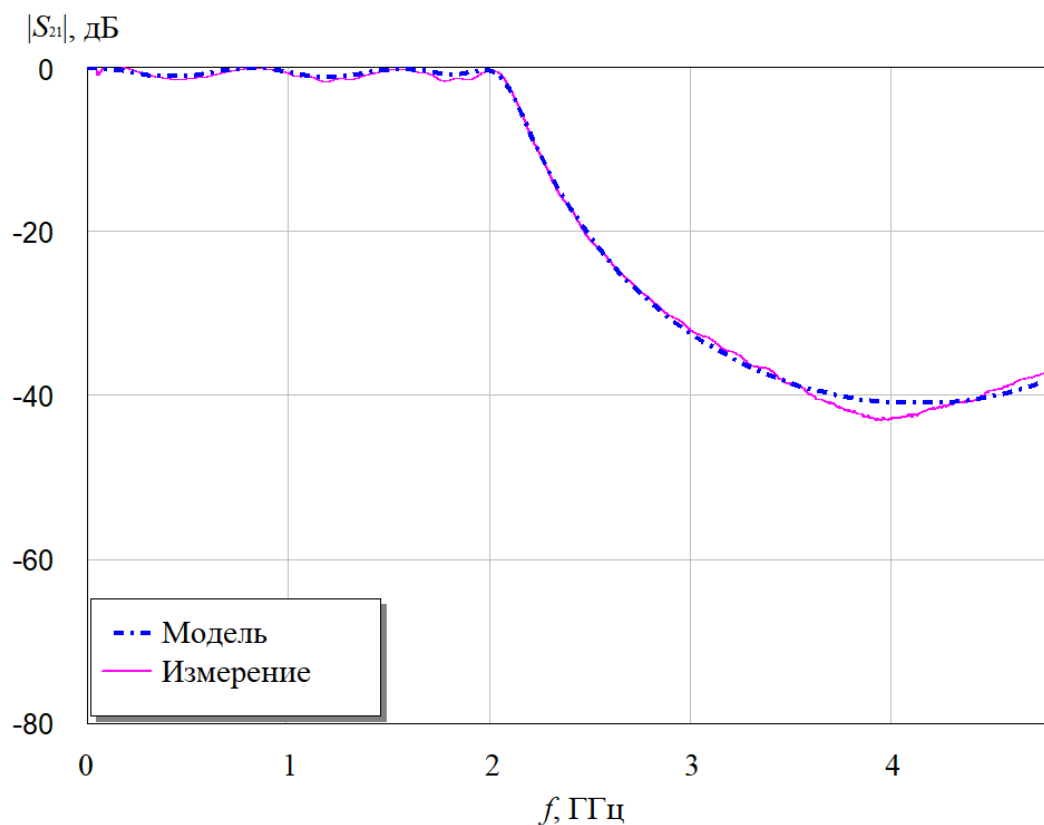


Рисунок 5.16 – Частотная зависимость модуля коэффициента передачи скорректированной модели и напечатанного фильтра

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

На рисунке 5.17 показан пример изготовления ФВЧ в микрополосковом исполнении, который выполнен в виде резонансных элементов и на концах предусмотрены переходные отверстия на заземляющее основание. Для упрощения технологии изготовления и для получения ФВЧ в одном технологическом цикле было исключены переходные отверстия, а связь между резонаторами и заземляющим основанием обеспечить путем нанесения пасты на торце подложки.

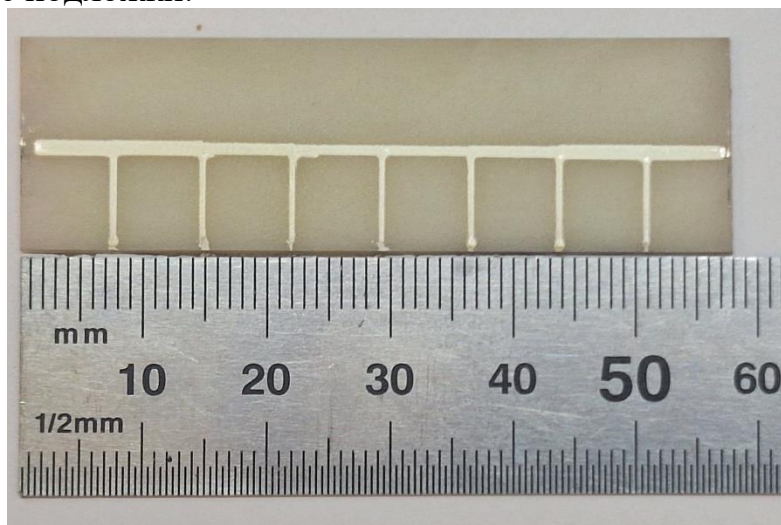


Рисунок 5.17 – Напечатанный ФВЧ

Сравнение расчетных и экспериментальных частотных характеристик показано на рисунке 5.18.

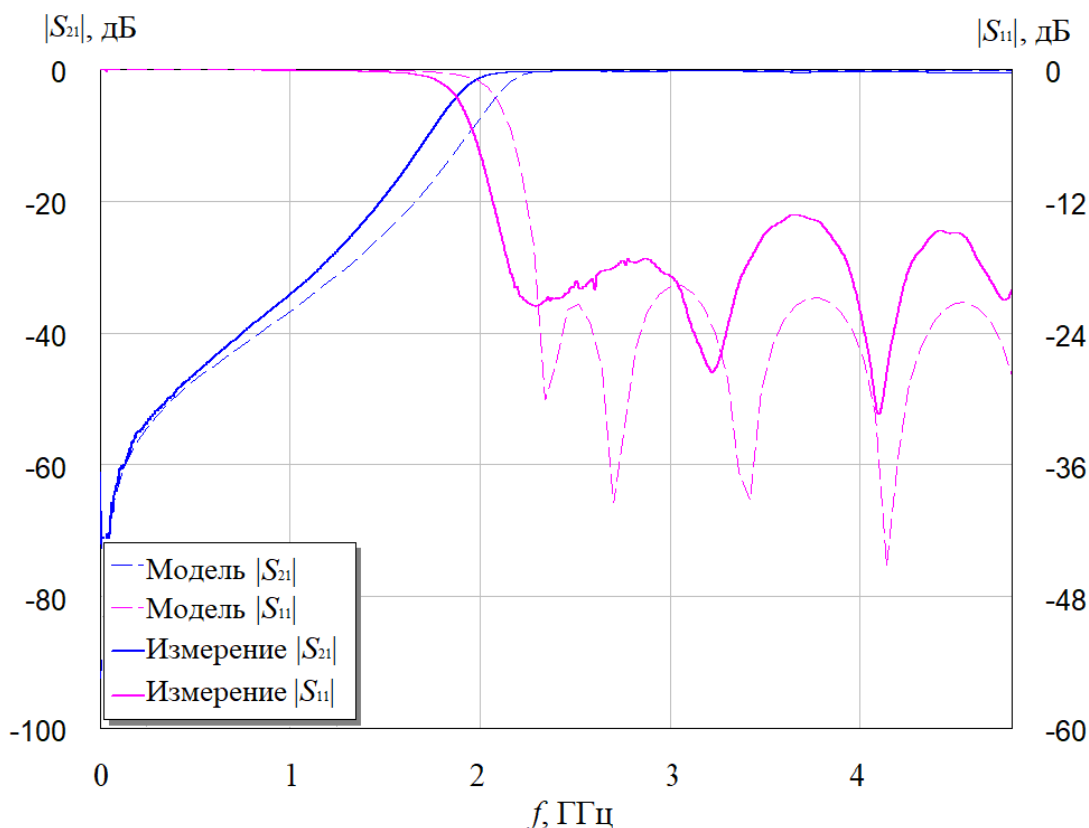


Рисунок 5.18 – Сравнение частотных характеристик модели и напечатанного ФВЧ

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 5.19.

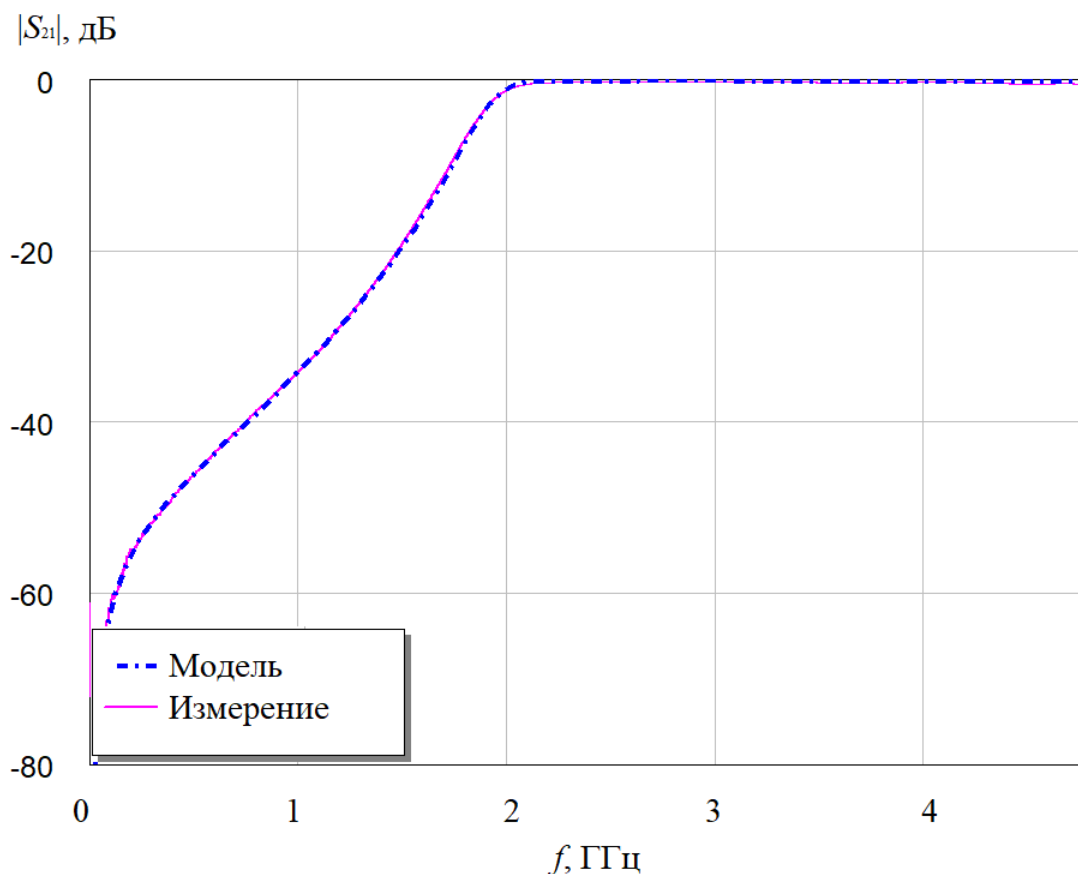


Рисунок 5.19 – Частотная зависимость модуля коэффициента передачи скорректированной модели и напечатанного ФВЧ

Как видно из рисунка 5.19, корректировка геометрических размеров позволила добиться совпадения экспериментальных и расчетных характеристик.

Для проектирования ППФ показана структура с краевой связью. Фильтр спроектирован на центральную частоту 2,4 ГГц и шириной полосы пропускания 0,2 ГГц (рисунок 5.20).

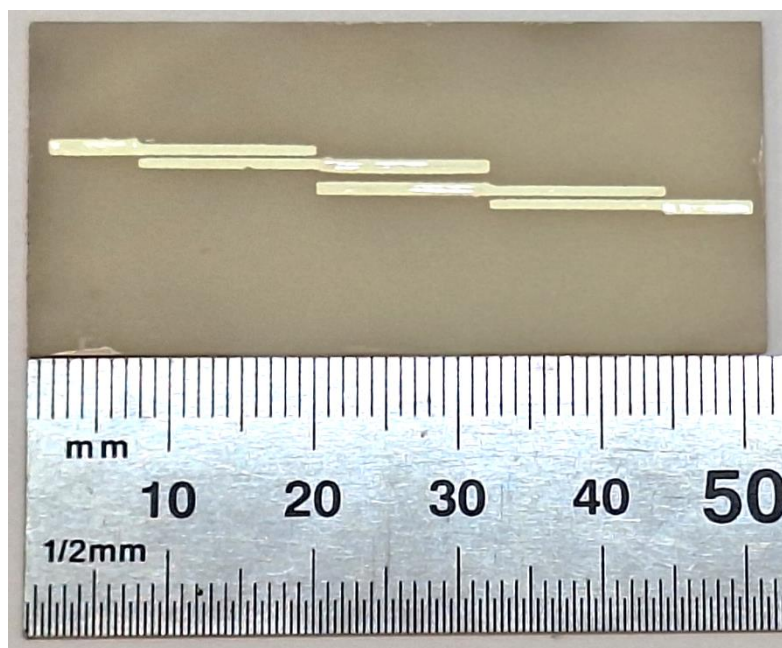


Рисунок 5.20 – Напечатанный ППФ

Сравнение расчетных и экспериментальных частотных характеристик показано на рисунке 5.21.

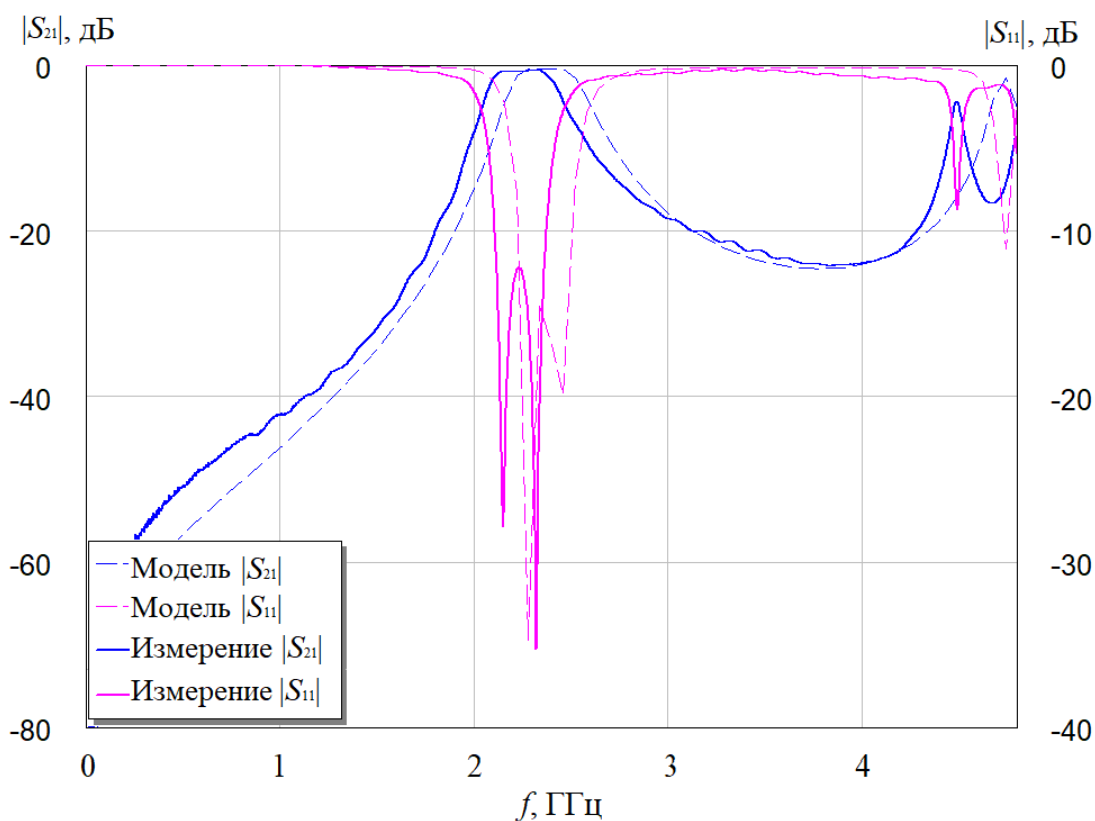


Рисунок 5.21 – Сравнение частотных характеристик модели и напечатанного ППФ

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 геометрических размеров в модели получилось добиться схожести графиков экспериментальных и расчетных характеристик. Полученная частотная зависимость коэффициента передачи показана на рисунке 5.22.

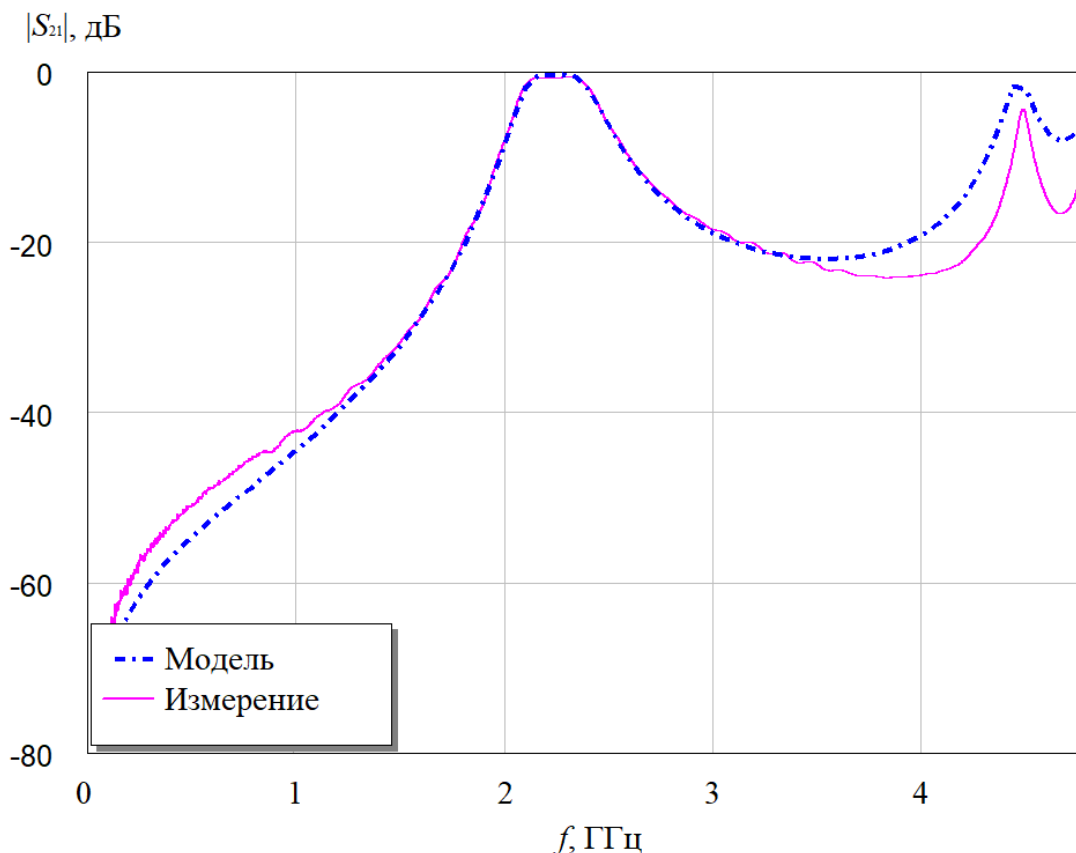


Рисунок 5.22 – Частотная зависимость модуля коэффициента передачи скорректированной модели и измерения ФВЧ

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 [172]. В работе [173] 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 5.23 показана схема фильтра с полученными значениями компонентов.

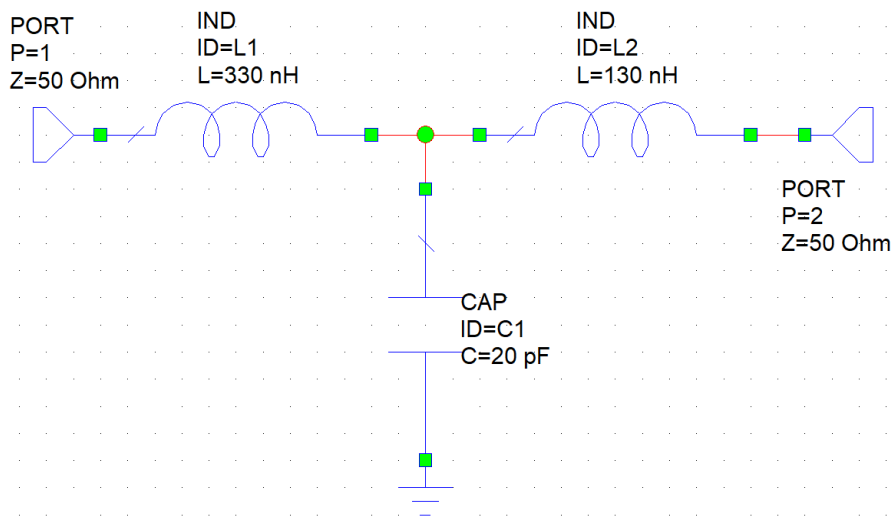


Рисунок 5.23 – Схема LC-фильтра

Частотный график вносимых и возвратных потерь приведен на рисунке 5.24.

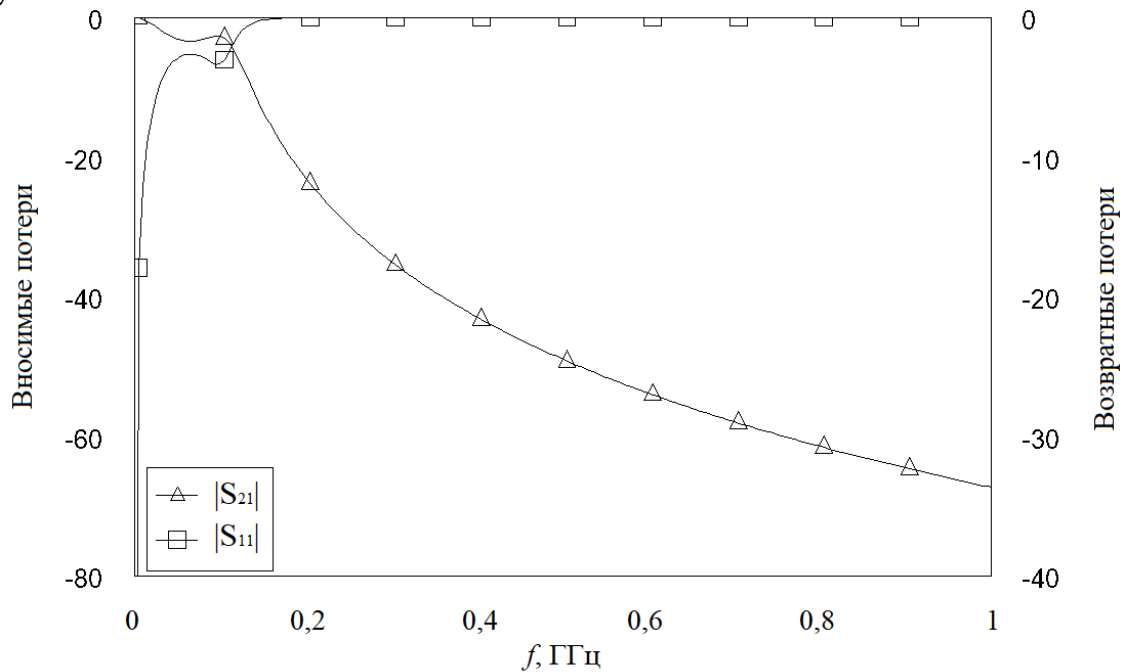


Рисунок 5.24 – Вносимые и возвратные потери смоделированного LC-фильтра

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 5.25.

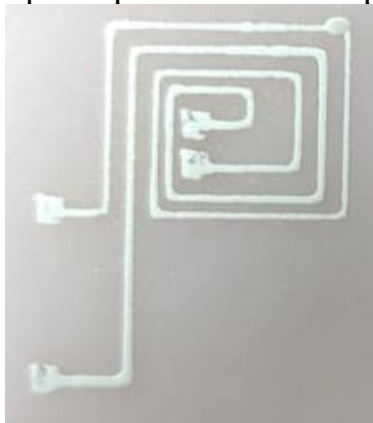


Рисунок 5.25 – Напечатанный LC-фильтр

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 5.26 показана измеренная частотная зависимость напечатанного LC-фильтра.

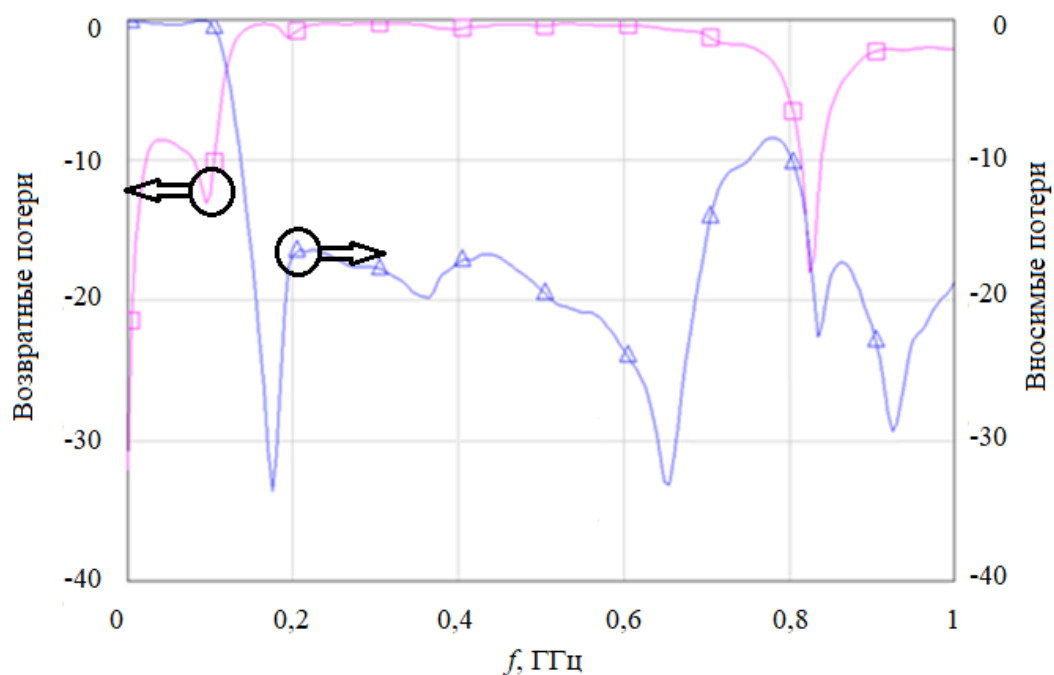


Рисунок 5.26 – Частотные зависимости напечатанного LC-фильтра

Далее был полностью напечатан LC-фильтр, схема такого фильтра показана на рисунке 5.27

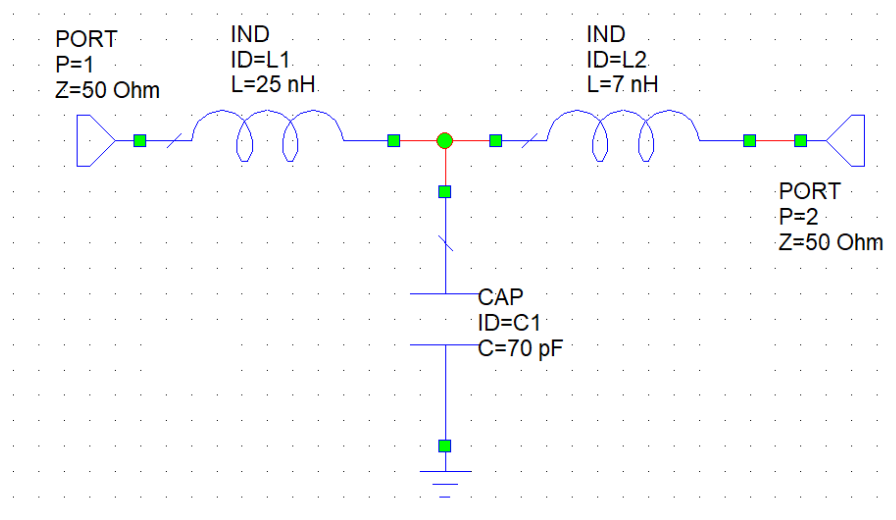


Рисунок 5.27 – Схема LC-фильтра

Расчетная частотная характеристика фильтра приведена на рисунке 5.28

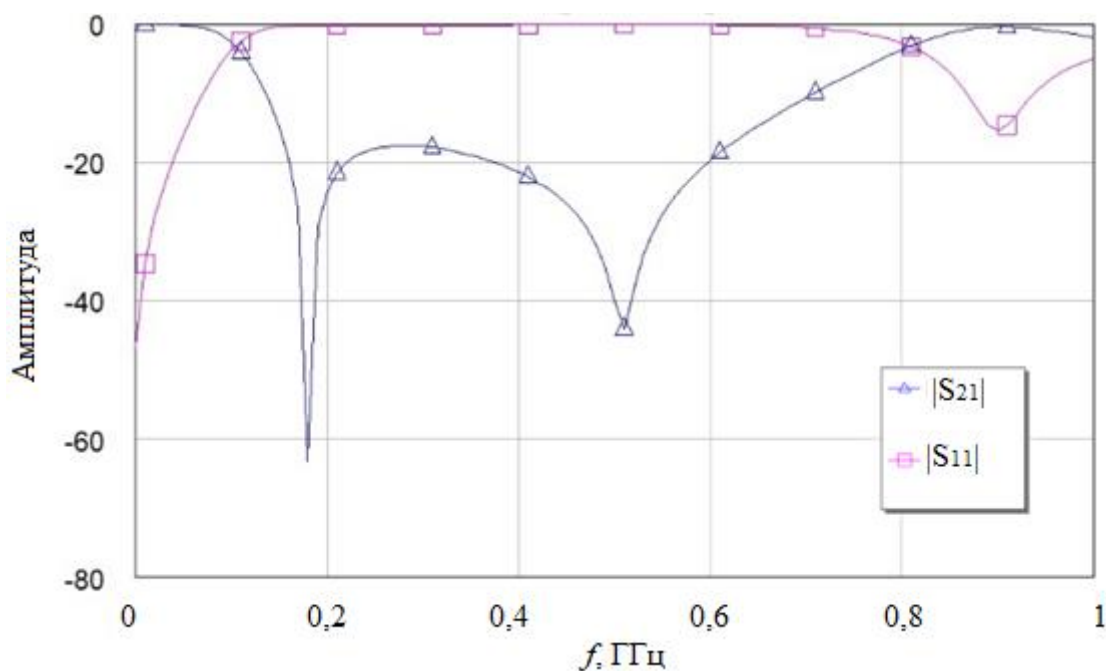


Рисунок 5.28 – Расчетная частотная зависимость LC-фильтра

Результат печати LC-фильтра показан на рисунке .29

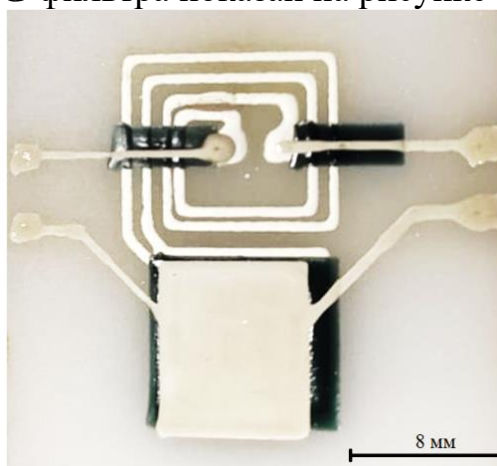


Рисунок 5.29 – Напечатанный LC-фильтр

Измеренная частотная характеристика напечатанного LC-фильтра показана на рисунке 5.26.

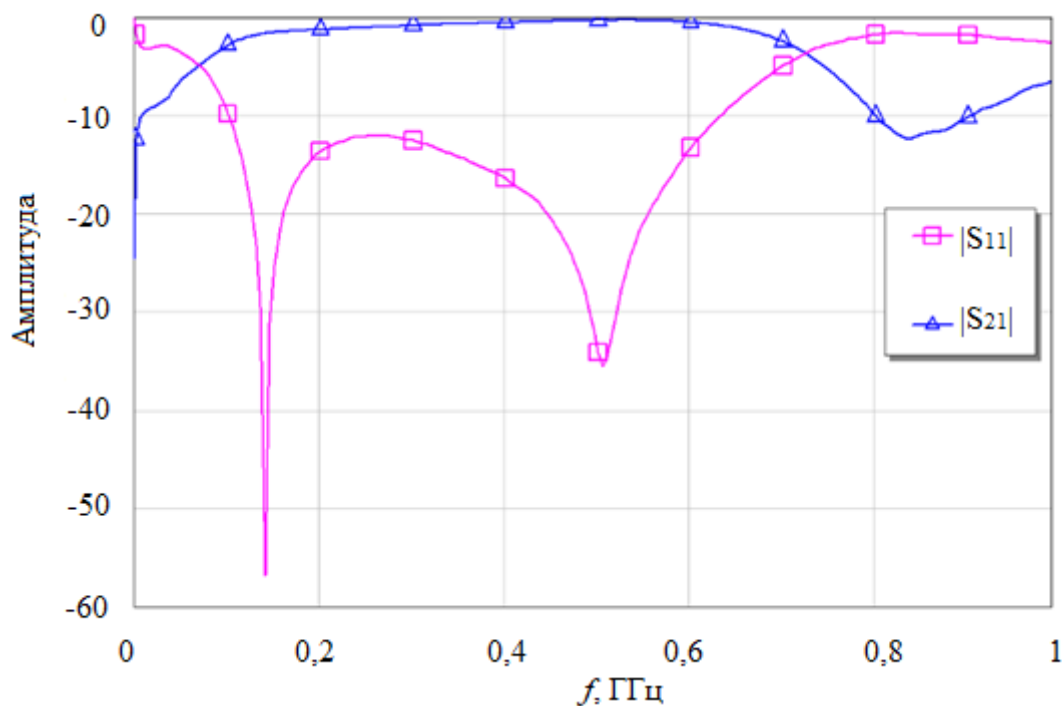


Рисунок 5.30 – Частотная характеристика напечатанного LC-фильтра

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

Для исследования фильтров, напечатанные разными материалами были рассчитаны шпильчные фильтры с центральной частотой 2 ГГц. На рисунке 5.31 показан напечатанный фильтр пастой ППС-2-2.

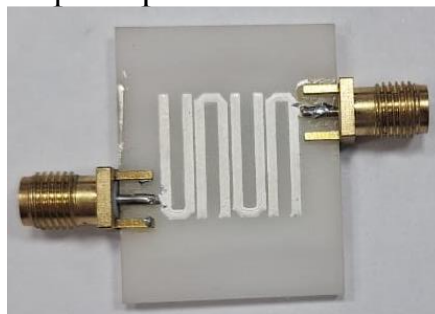


Рисунок 5.31 – Напечатанный шпильчные фильтры пастой ППС-2-2

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 5.32, 5.33).

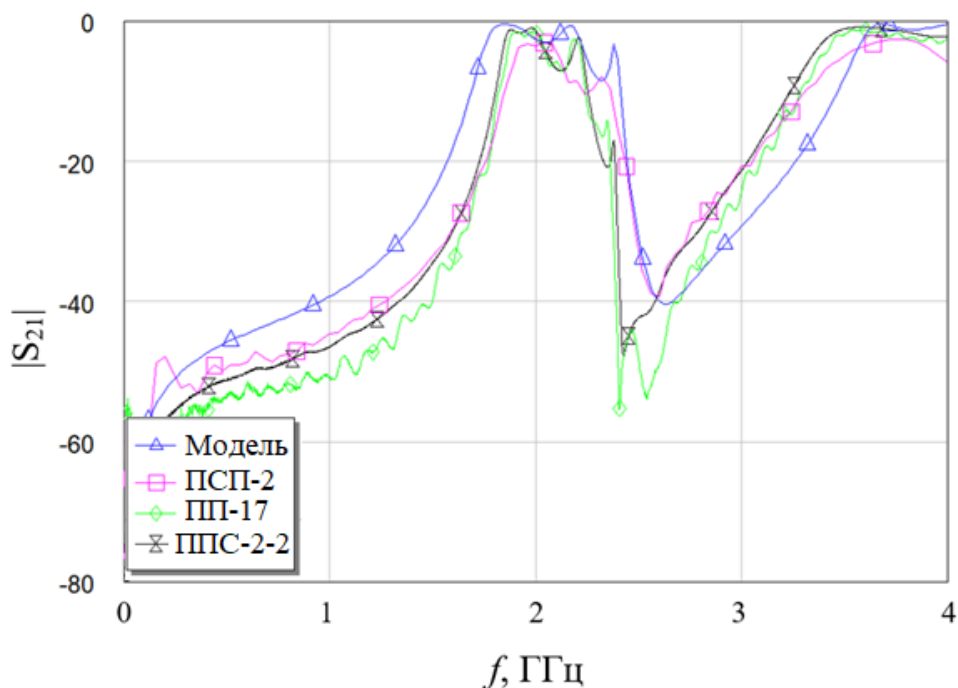


Рисунок 5.32 – Сравнение частотных зависимостей модуля коэффициента передачи сигнала

Как видно из графика сравнений коэффициентов передачи (рисунок 5.32) 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.

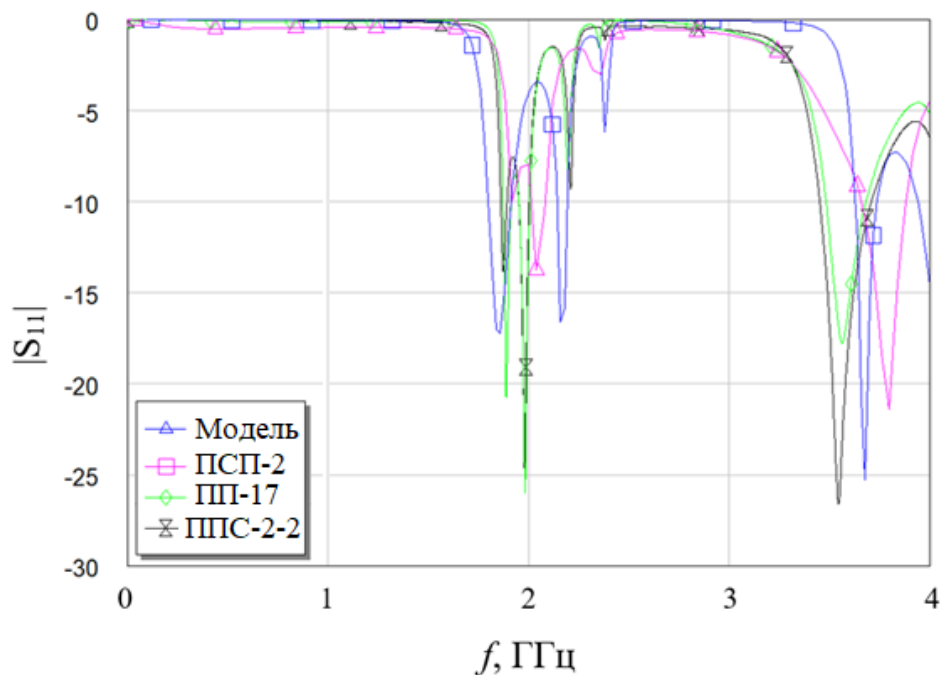


Рисунок 5.33 – Сравнение частотных зависимостей модуля коэффициента отражения сигнала

Сравнение коэффициентов отражения напечатанных фильтров с моделью показывает хорошее совпадение с моделью (рисунок 5.33). Однако у фильтров ПП-17 и ППС присутствуют 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.

Вопросы для самопроверки

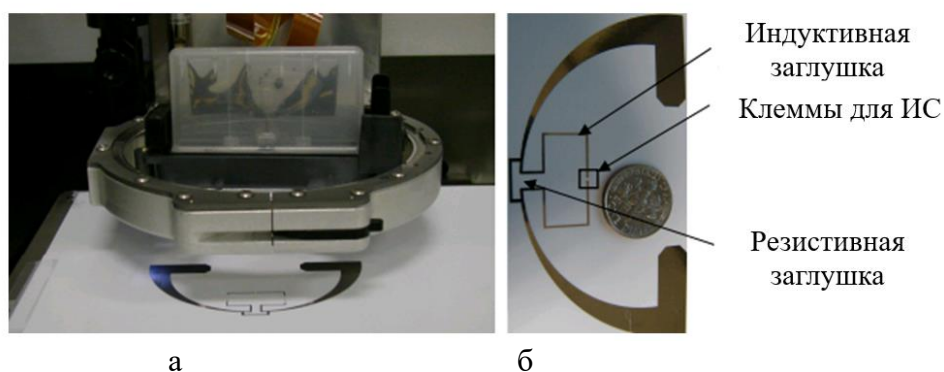
1. Для чего применяется методика экстракции параметров в работе и какие характеристики проводящей пасты требуется определить?
2. В чем состоит расчетно-экспериментальный метод проектирования, упомянутый в тексте? Какие этапы в нем обязательны?
3. Какими параметрами подложки обеспечивается волновое сопротивление?
4. Как изменения ширины и толщины печатного проводника влияют на волновое сопротивление, согласование и затухание на частоте?
5. Что такое микрополосковый фильтр? Из каких основных элементов он состоит?
6. Как изначально была выполнена конструкция ФВЧ (Рисунок 7.33)? Какое технологическое упрощение было внесено в его изготовление и почему?
7. Какой тип структуры был выбран для ППФ? Какие были заданы центральная частота и ширина полосы пропускания?
8. Можете ли вы объяснить, почему для разных типов фильтров (ФНЧ, ФВЧ, ППФ) использовались разные топологии?
9. Из каких элементов состоит LC-фильтр нижних частот? Какая была задана частота среза?
10. Почему для печати были выбраны квадратные спиральные катушки, а не круглые? Каковы были их расчетные геометрические параметры (ширина проводника, внешний диаметр)?
11. Для чего изготавливались шпильчатые фильтры из разных проводящих паст?
12. Какие потери (значение коэффициента передачи S_{21}) на центральной частоте 2 ГГц были у фильтров из разных паст? Какая паста показала наилучший результат?
13. Видите ли вы преимущества и ограничения протонной технологии для создания как распределенных (микрополосковых), так и сосредоточенных (LC) элементов?

5.2 Примеры применения аддитивной принтерной технологии для изготовления печатной электроники

Одним из устройств, которое может быть изготовлено с применением технологии печати как способа изготовления радиокомпонента, является RFID-антенна или 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 [137].

RFID-антенна может быть изготовлена с помощью принтерной технологии, что 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 [138, 139] описаны результаты исследований изготовления RFID-метки методом струйной печати.

Согласно [138], по струйной технологии была напечатана RFID-антенна на бумажном основании размером 8,2х4,5 см. На рисунке 5.34 представлены процесс изготовления (а) и готовый макет изделия (б).



а) процесс изготовления; б) готовый макет.

Рисунок 5.34 – Макет RFID-антенны

Представленная антенна была рассчитана на центральную частоту 914 МГц (рисунок 5.35). Эффективность излучения, согласно представленным данным, составила 92%.

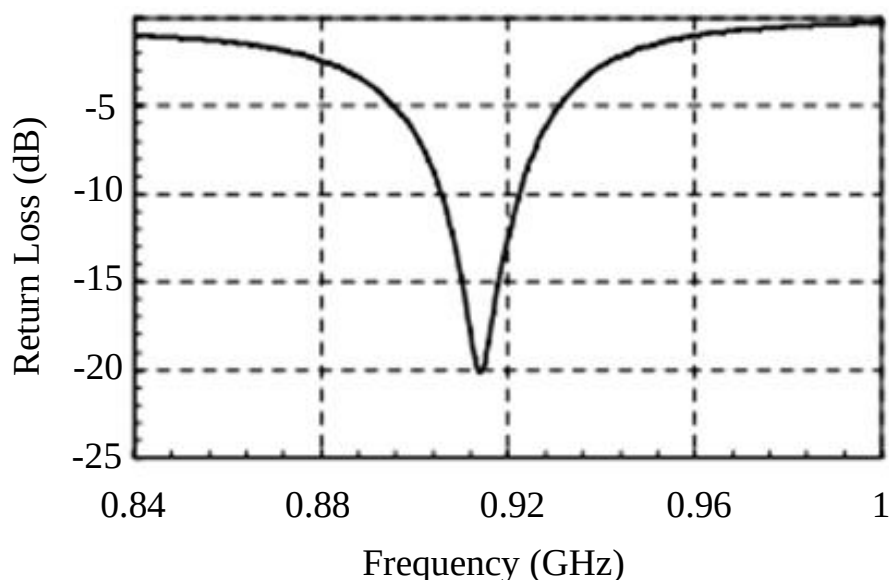


Рисунок 5.35 – График обратных потерь RFID-антенны

В [139] 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 5.36.

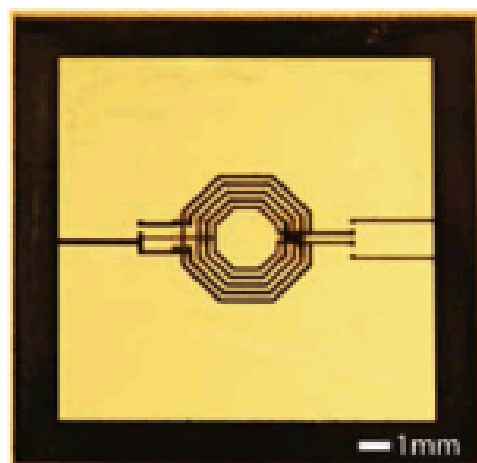
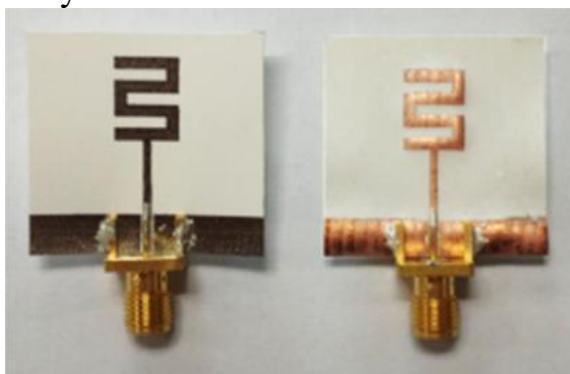


Рисунок 5.36 – Оптическая микрофотография симметрирующего трансформатора

Усиление симметрирующего трансформатора составляет -1,7 дБ на рабочей частоте 1,4 ГГц, при этом в согласованном режиме 67% входной мощности передается на выход.

Еще одним примером стало сравнение двух антенн (рисунок 5.37), изготовленных двумя разными технологиями [140]. 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 5.37 – Меандровые антенны

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

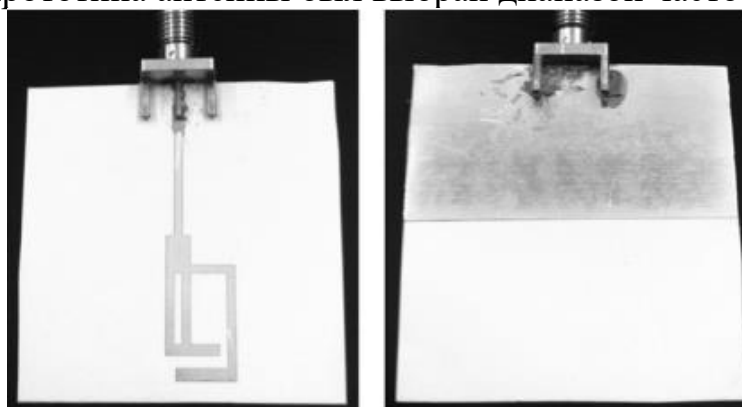
Результаты измерений показали:

- образцы на основе меди обладают примерно сопоставимыми значениями электропроводности (10^5 – 10^6 См/м), что и для 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 [141] приводится компактная двухдиапазонная печатная антенна, напечатанная на бумажной подложке (рисунок 5.38). 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)

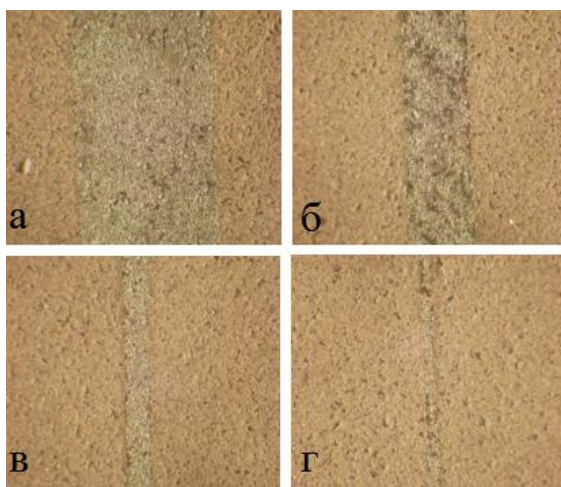
а) топологический слой; б) заземляющий слой

Рисунок 5.38 – Прототип двухдиапазонной антенны

Печать проводилась в пять слоев проводящими серебряными чернилами (размер наночастиц, диспергированных в углеводородном растворителе,

составил 10 нм). Отжиг 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. Напечатанная антенна имеет два рабочих диапазона 2,4 и 3,4 ГГц. Измеренные полосы пропускания составляют 15,2 и 23,7% соответственно.

В [142] представлено применение технологии струйной печати для изготовления микрополосковых линий на перестраиваемых сегнетоэлектрических керамико-полимерных композитах, работающих в субтерагерцовом диапазоне. В качестве керамико-композитного материала для подложки использовались следующие материалы: BaCO₃ (CHEMPUR, Польша), SrCO₃ (CHEMPUR, Польша), TiO₂ (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 проводилось при температуре 180 °C в течение 20 минут. На рисунке 5.39 представлены снимки линий.



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

Рисунок 5.39 – Микрофотографии микрополосковых линий, нанесенных на керамико-полимерную подложку

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 субтерагерцовом диапазоне.

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.

В [143] 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 статье [144] 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 5.40).

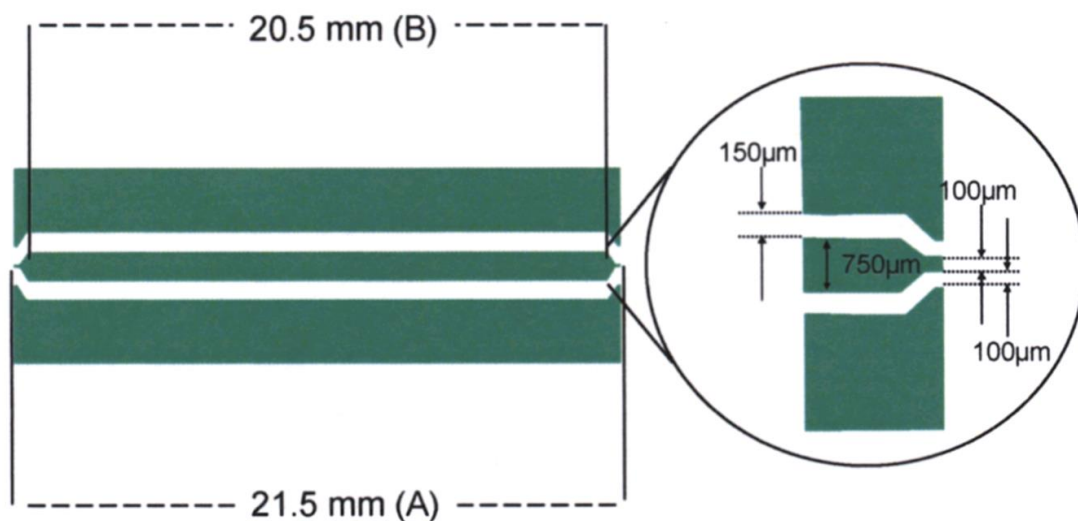


Рисунок 5.40– Выполнение конического перехода копланарных линий

На рисунке 5.41 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.

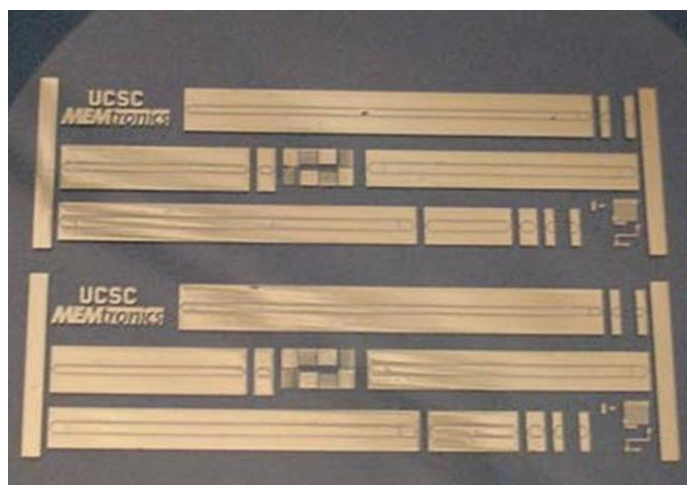


Рисунок 5.41 – Напечатанные линии на стеклянной подложке

В [145] представлен беспроводный сенсорный модуль (рисунок 5.42). 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.

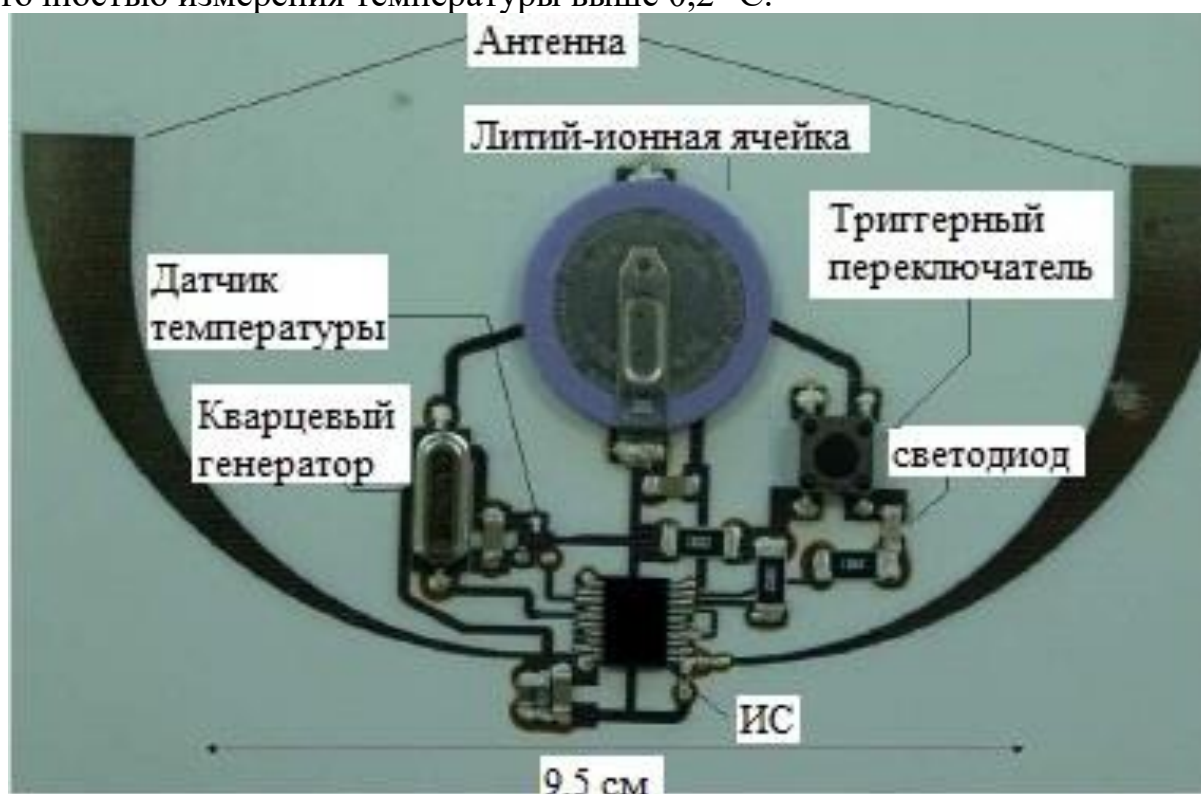


Рисунок 5.42 – Прототип беспроводного сенсорного модуля

В [146] 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 5.43 показаны монопольная и дипольная антенны.

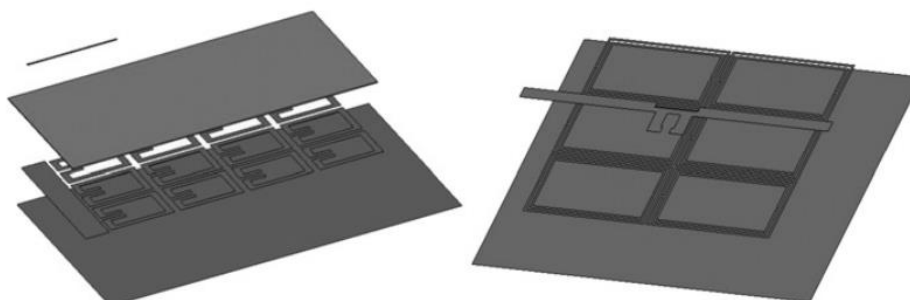
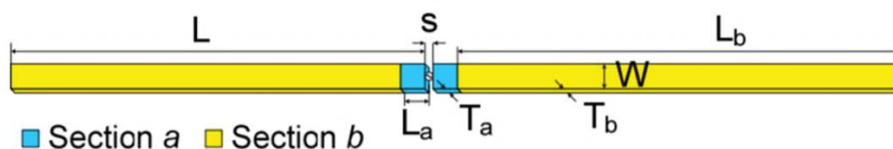


Рисунок 5.43 – Монопольная и дипольная антенны

Напечатанные монопольную и дипольную антенны можно охарактеризовать частотой 2,36–2,61 ГГц. На частоте 2,45 ГГц усиление антенны обеспечивается около 9 дБи.

В статье [147] 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 5.44 показана конструкция дипольной антенны.



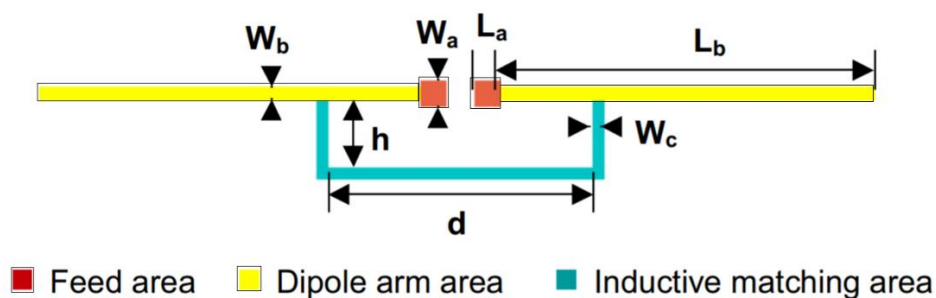
L , L_b – длина плеча антенны; L_a – длина области подключения питания; T_a – толщина области подключения питания; T_b – толщина плеча антенны; W – ширина антенны; S – зазор между плечами.

Рисунок 5.44 – Конфигурация дипольной антенны

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 [148] приводится также дипольная антенна. Отличительной особенностью данной работы от [147] является то, что добавлена индуктивная цепь согласования импеданса. Конструкция дипольной антенны состоит из

области питания, области плеч диполя и цепи индуктивного согласования (рисунок 5.45). 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 5.45 – Дипольная антенна

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 [149] приводится 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 5.46 приведена напечатанная антенна.

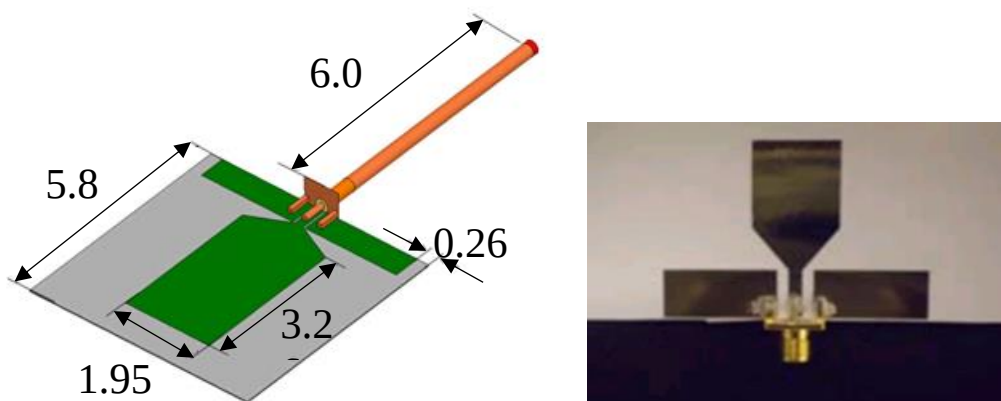


Рисунок 5.46 – Сверхширокополосная антенна

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

В работе [150] представлена гибридная система, которая включает в себя высокочастотную катушку и две сверхвысокочастотные антенны для приложений беспроводной передачи энергии (рисунок 5.47). 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.

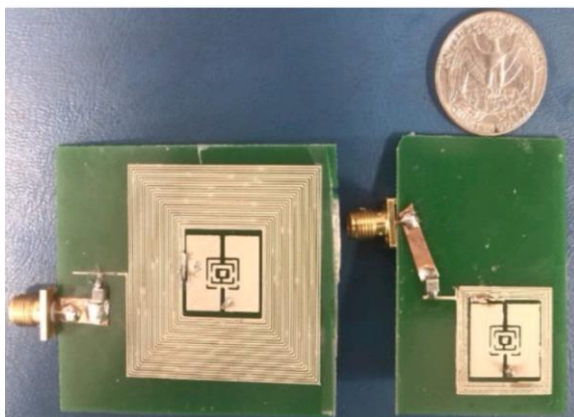
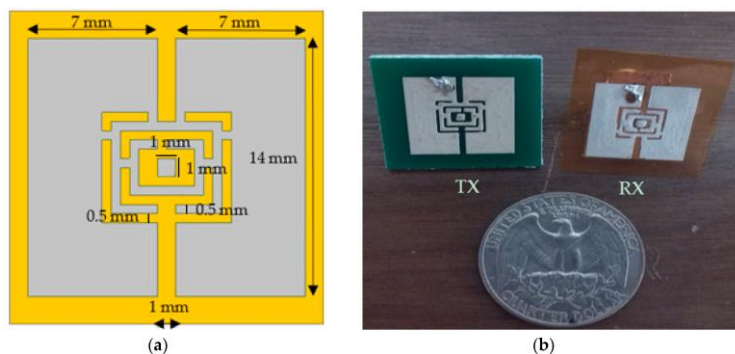


Рисунок 5.47 – Напечатанная антенна

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 [151] 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 5.48). Приемная антенна напечатана на гибкой подложке на основе полиимида, 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 5.48 – Напечатанные антенны

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 [152] представлена антенна, изготовленная методом струйной печати на подложке из ПЭТ (рисунок 5.49). Для печати этой антенны использовался

струйный принтер Brother MFC-J430W, серебряные чернила с размером наночастиц около 20 нм.

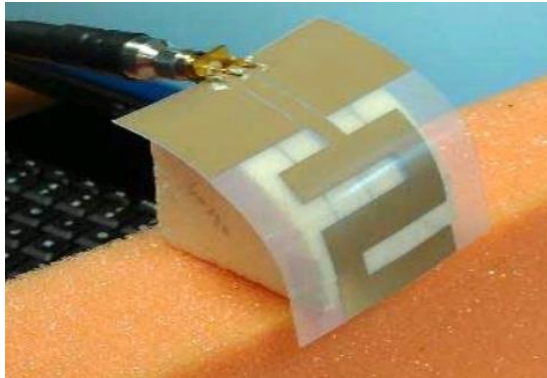
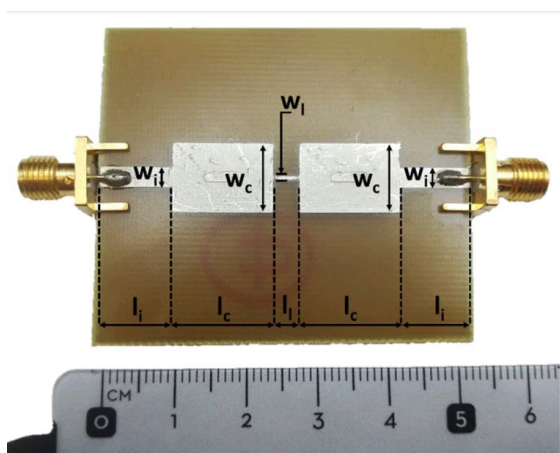


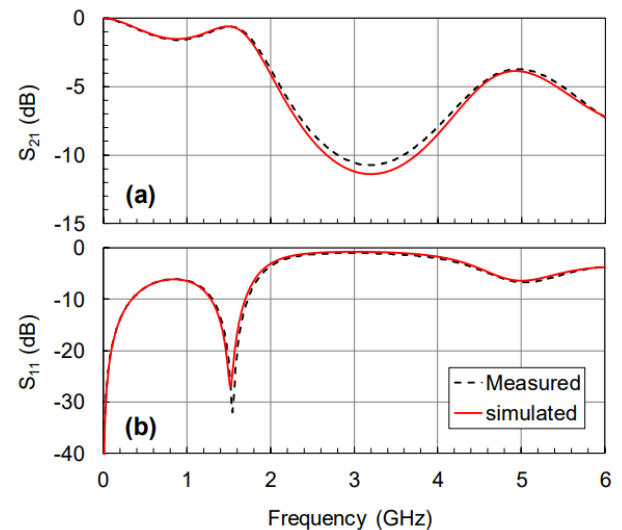
Рисунок 5.49 – Z-образная антенна

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.

В работе [153] 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, представленный на рисунке 5.50.



а

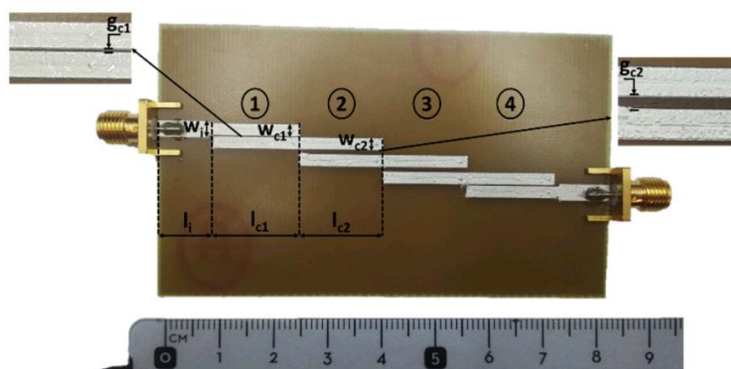


б

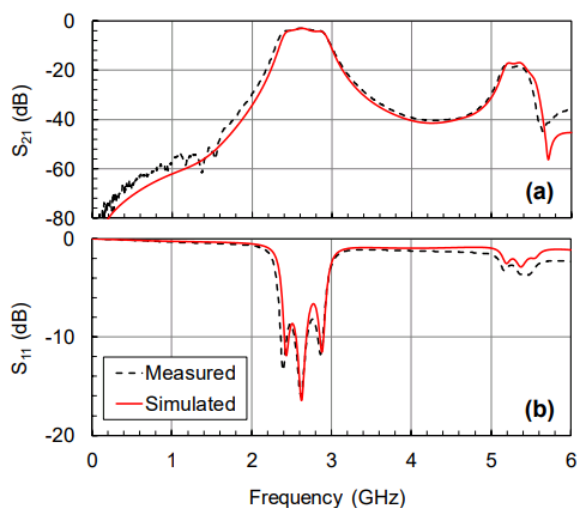
Рисунок 5.50 – Напечатанный ступенчатый фильтр нижних частот (а) и сравнение результатов моделирования и измерения (б)

Как видно из рисунка 5.50, б результаты моделирования и измерения совпадают.

Вторым примером рассматривается четвертьволновый полосовой фильтр третьего порядка с центральной частотой 2,7 ГГц (рисунок 5.51).



а



б

Рисунок 5.51 – Напечатанный полосовой фильтр и его частотная зависимость коэффициента передачи и отражения

Исходя из рисунка 5.51, 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.

Третьим примером в статье приводится широкополосная антенна размером 40x36 мм, которая имеет всенаправленное излучение и максимальное усиление 6,6 дБи (рисунок 5.52).

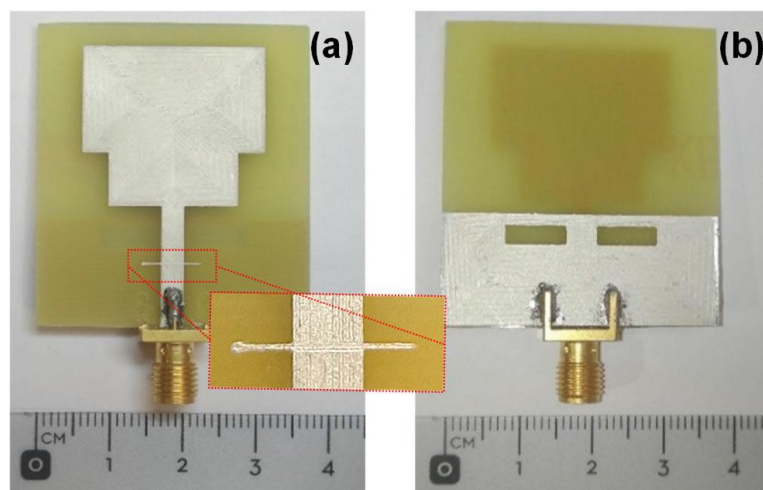


Рисунок 5.52 – Напечатанная СШП-антенна

На рисунке 5.53 показано сравнение результатов измерений и моделирования в диапазоне от 1 до 12 ГГц для печатной антенны и медной антенны, изготовленной травлением.

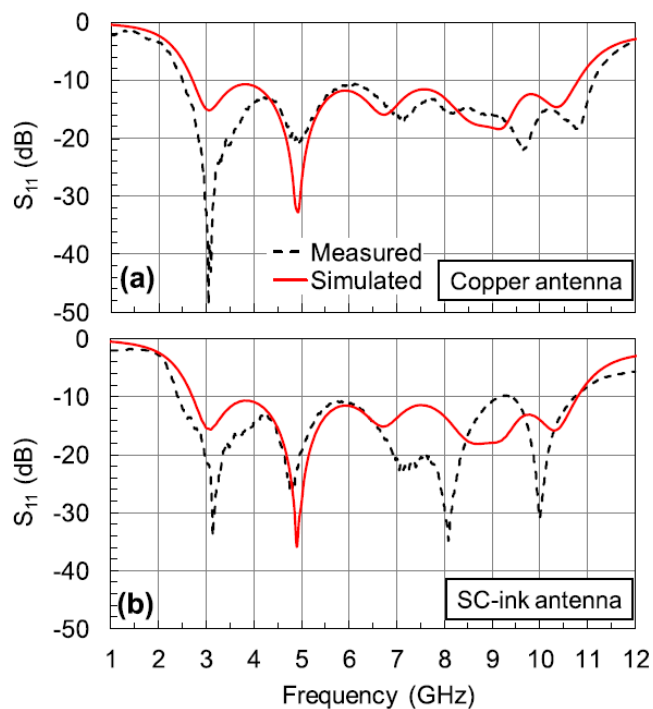


Рисунок 5.53 – Частотная зависимость коэффициента отражения для медной (a) и серебряной антенн (b)

Как видно из рисунка 5.53, моделируемые параметры S_{11} двух антенн показывают очень небольшие различия, демонстрируя, что более низкая проводимость серебра не является проблемой. При сравнении измерений антенн, изготовленных по разной технологии, наблюдается, что на низких и средних частотах обе антенны показывают очень похожие отклики. Также несколько иное поведение демонстрирует напечатанная антенна на более высоких частотах (8 и 10 ГГц), наблюдаются минимумы, которые отсутствуют в медной антенне. Это может быть связано со способом печати, при котором

поперечные резонаторы должны быть под углом 45° при ширине 0,3 мм. Как видно из рисунка 3.20 угол резонаторов не выдерживается.

В результате полоса пропускания напечатанной антенны составляет 8,2 ГГц (между 2,4 и 10,6 ГГц). Сравнение медной и серебряной антенны показало, что они имеют очень схожие характеристики. Также было обнаружено, что более низкая проводимость используемых паст по сравнению с медью привела к снижению усиления всего на 0,3 дБ.

В статье [141] 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 5.54 показан напечатанный многослойный фильтр.

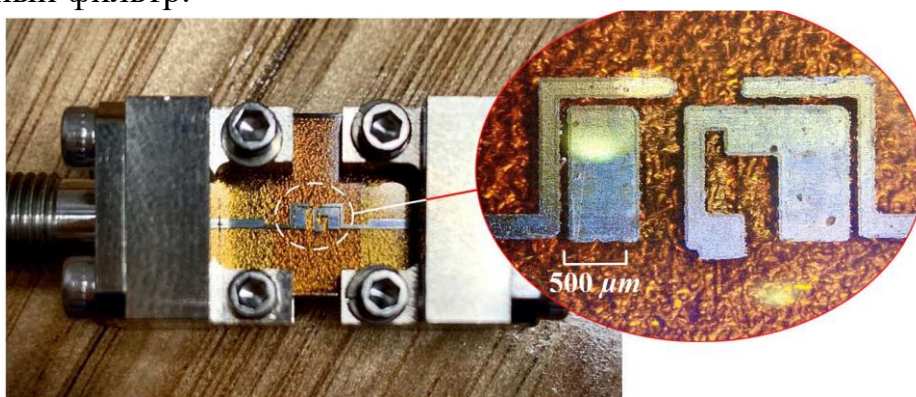


Рисунок 5.54 – Многослойный полосовой фильтр

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 [155] 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 5.55 приведен напечатанный датчик $16 \times 5 \times 0,125$ мм.

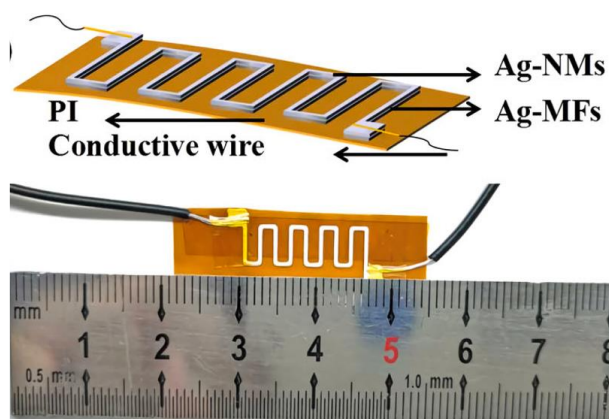
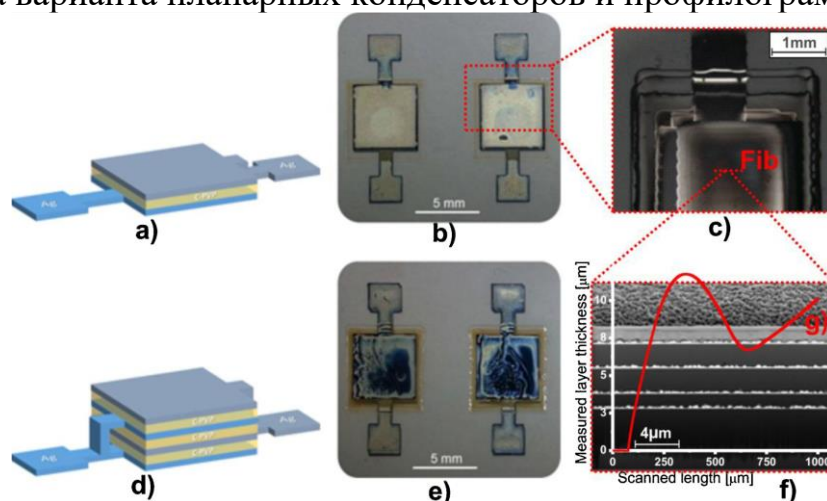


Рисунок 5.55 – Напечатанный трехслойный датчик

В результате объемное сопротивление напечатанного датчика составляет $1,37 \cdot 10^{-5}$ Ом·см, его теплопроводность $39 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. Также датчик исследовали на растяжение и изгиб при 25°C и 250°C . При изгибе до 100° – изменения сопротивления $\Delta R/R_0$ составили 0,43 и 0,45; при растяжении на 2,5 % значения $\Delta R/R_0$ составили 0,31 и 0,18 при 25°C и 250°C , соответственно.

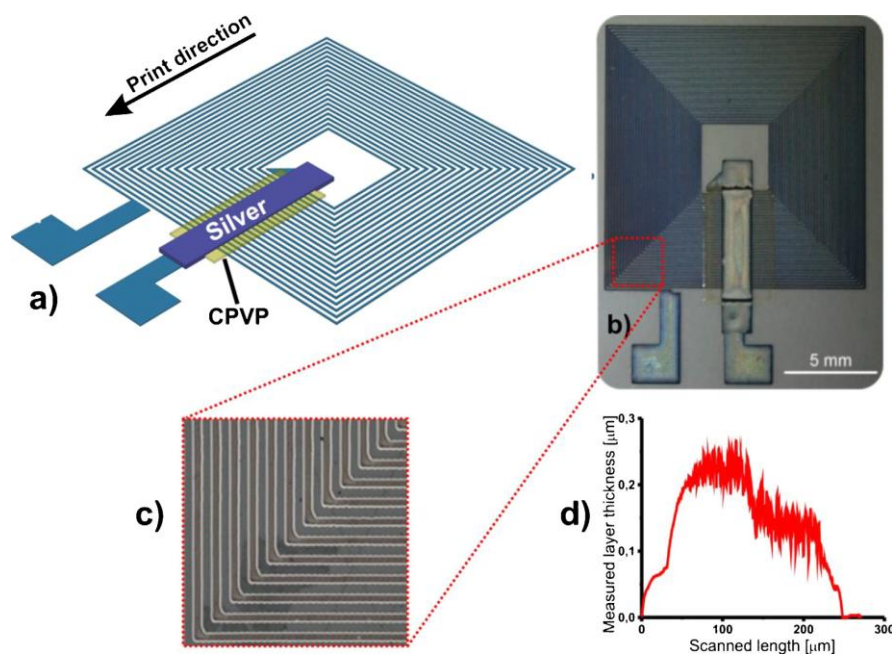
Печать планарных компонентов рассматривалась в работах [156,157]. В работе [156] описано применение струйной технологии для изготовления конденсаторов, катушек индуктивности и резисторов. На рисунке 5.56 показано два варианта планарных конденсаторов и профилограмма.



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

Рисунок 5.56 – Планарные конденсаторы

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 5.57 приведена напечатанная катушка индуктивности и ее профилограмма.

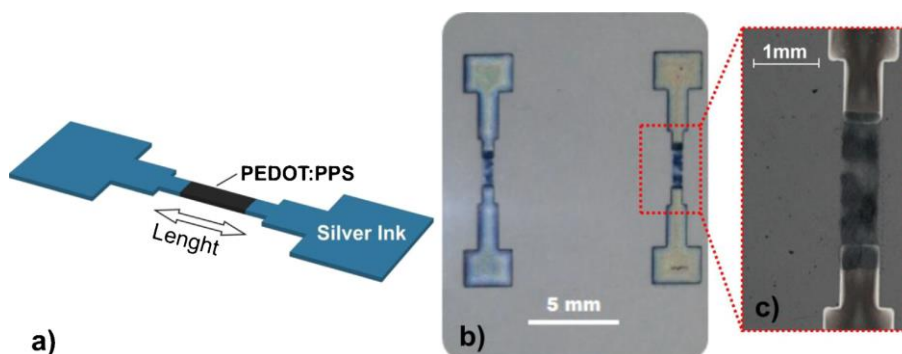


a) – схематическое изображение катушки; b) – напечатанная катушка; c) – витки катушки;
d) – профилограмма

Рисунок 5.57 – Планарная катушка индуктивности

Напечатанная катушка состоит из 25 витков, что соответствует 1 м. Геометрические размеры напечатанной катушки индуктивности составляют $14 \times 14 \text{ м}^2$ 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 5.58.



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

Рисунок 5.58– Планарные резисторы

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 [157]. Печать проводилась из шприца под давлением, создаваемым насосом, с

применением диэлектрических чернил РММА и серебряных чернил. На рисунке 5.59 показано схематическое изображение высоковольтного конденсатора и результат печати.

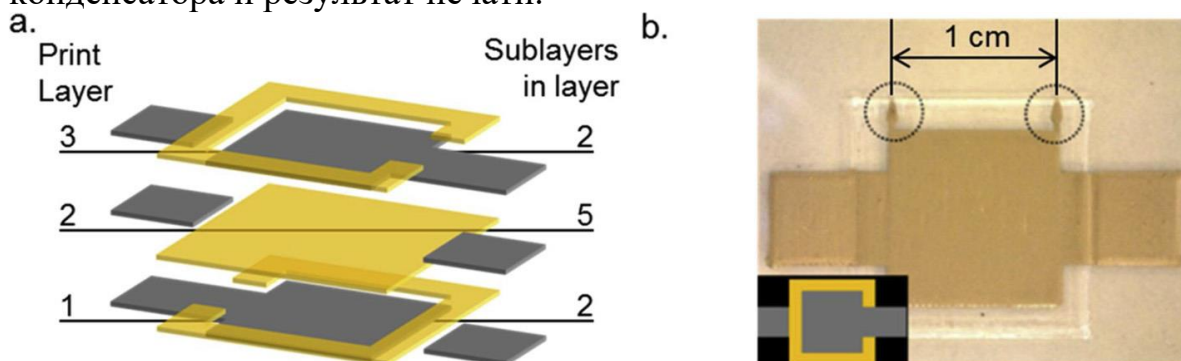


Рисунок 5.59 – Схематичное представление высоковольтного конденсатора (слева) и напечатанный конденсатор (справа)

Напечатанный конденсатор имеет емкость 322 пФ при 1 кГц и напряжение пробоя 1000 В. Печатная схема, изготовленная с применением такого конденсатора, представлена на рисунке 5.60.

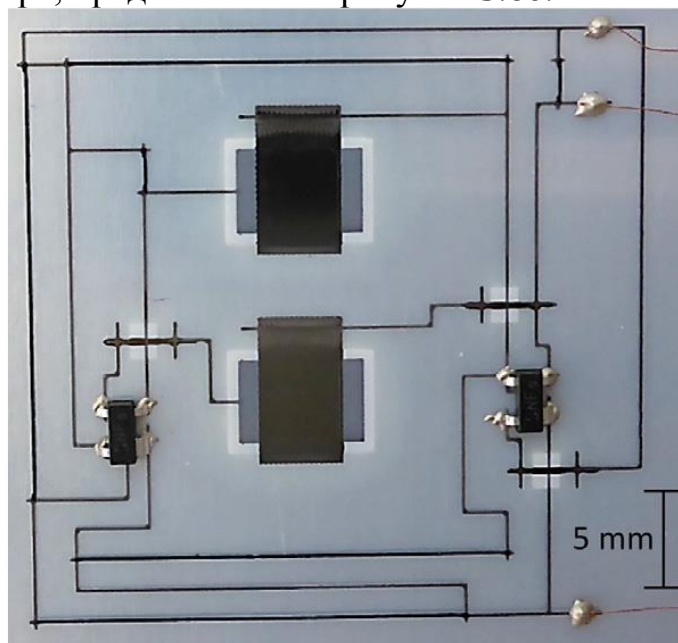


Рисунок 5.60 – Пример изготовления гибридной интегральной схемы

Вопросы для самопроверки

1. Какие ограничения струйной печати делают ее непригодной для изготовления высокочастотных (например, S-диапазон) микрополосковых фильтров? Как можно эти ограничения преодолеть?

2. Почему, согласно результатам, медные образцы имеют электропроводность «сопоставимую» с серебряными образцами, хотя у массивных металлов проводимость отличается? Какие факторы печатного слоя могут это объяснить (пористость, связующее, окисление, неполное спекание)?

3. Почему для присоединения SMA-разъемов к антеннам использовали проводящую серебросодержащую эпоксидную смолу, а не пайку?

4. Какие возможные источники ошибок в измерениях вносит слой проводящего клея при подключении SMA (добавочная индуктивность/емкость, неоднородность контакта, микрозазоры)?

5. Какая аддитивная принтерная технология использовалась в каждом примере (струйная печать/аэрозольная печать/трафаретная/дозирование/экструзия и т.п.)? Чем это подтверждается в тексте?

6. Какова минимальная достигнутая ширина проводника (линии) в образцах: укажите значение в мкм/мм и где оно указано?

7. Какая геометрия поперечного сечения проводника подразумевается (прямоугольная/с «валиками» по краям/куполообразная)? Это обсуждается или видно по микрофото/профилометрии?

8. Какова толщина проводящего слоя (в мкм) для каждой технологии? Каким методом она измерялась (профилометр, микрошлиф и т.п.)?

9. Сколько проходов печати потребовалось для достижения необходимой толщины? Менялась ли ширина при увеличении числа проходов?

10. Какое поверхностное сопротивление ($\Omega/\square$) указано или может быть рассчитано по толщине и электропроводности?

11. По данным удельная электропроводность 10^5 – 10^6 См/м: посчитайте ожидаемое сопротивление участка дорожки заданной длины при вашей толщине и ширине. Сходится ли это с измерениями (если они приведены)?

12. Какие именно проводящие материалы применялись (серебряные чернила/медные чернила/паста/наночастицы/флейки)? Указан ли состав/тип (nanoparticle, flake-based)?

13. На какой подложке печатали (PET, PI/каптон, FR-4, керамика и т.п.)? Какова ее толщина и ϵ_r /потери (если указано)?

14. Требовалась ли предварительная обработка поверхности (плазма, полировка, шлифовка)? Как обработка влияет на адгезию/растекание?

15. Какая температура и время сушки/спекания/отверждения применялись для серебряных и медных образцов (раздельно)?

16. Как режим отверждения влияет на итоговую электропроводность (10^5 – 10^6 См/м)? Есть ли в тексте зависимость «температура/время $\rightarrow$ проводимость»?

17. Ограничивала ли подложка максимальную температуру отверждения? Как это отразилось на проводимости и потерях?

18. Как в примере задана ширина микрополоски для 50 Ом (или другого Z0)? Какие параметры подложки и толщины металла использовались в расчете?

19. Как изменение ширины дорожки на $\pm$ (например, 50–100 мкм или несколько %) влияет на S11/обратные потери по модели? Указана ли чувствительность?

20. Для трансформатора с потерями $-1,7$ дБ: какие технологические параметры (ширина, толщина, проводимость, шероховатость, качество переходов) наиболее вероятно дают основной вклад в эти потери?

21. Какие технологические дефекты описаны/подразумеваются (разрывы, пористость, «кофейное кольцо», трещины после сушки)? Какой дефект сильнее всего влияет на проводимость и на СВЧ-потери?

Список использованных источников

- 1 Некрасов С. И., Некрасова Н. А. Философия науки и техники: тематический словарь. – Орел: ОГУ. 2010.
- 2 Technology // Encyclopædia Britannica. Encyclopædia Britannica Online. Encyclopædia Britannica Inc., 2016. Web. 08 янв. 2016.
- 3 Электроника // Эклибрис – Яя. – М. : Советская энциклопедия, 1978. – (Большая советская энциклопедия : [в 30 т.] / гл. ред. А. М. Прохоров ; 1969–1978, т. 30).
- 4 Экономика и управление производством: учеб. пособие / И.П. Воробьева, О.С. Селевич; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – 191 с.
- 5 Chung S, Cho K and Lee T 2019 Recent progress in inkjet-printed thin-film transistors Adv. Sci. 6 1–27
- 6 Alamán J. et al. Inkjet printing of functional materials for optical and photonic applications //Materials. – 2016. – V. 9. – No. 11. – P. 910.
- 7 Jurgen Willmann, Daniel Stocker, Edgar Dorsam, “Characteristics and evaluation criteria of substrate-based manufacturing. Is roll-to-roll the best solution for printed electronics?” // Organic Electronics, 15 (2014). – P. 1631–1640.
- 8 Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review / Saleem Khan, Leandro Lorenzelli, Ravinder S. Dahiya // IEEE Sensors Journal. – June 2015. – P.3164–3185.
- 9 Ashok Sridhar, Thomas Blaudeck, Reinhard R. Baumann. Inkjet Printing as a Key Enabling Technology for Printed Electronics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/236074091_Inkjet_Printing_as_a_Key_Enabling_Technology_for_Printed_Electronics, свободный (дата обращения 10.11.2025).
- 10 Soltman D., Subramanian V. Inkjet-printed line morphologies and temperature control of the coffee ring effect //Langmuir. – 2008. – V. 24. – No. 5. – P. 2224–2231.
- 11 Tan, H. W., Choong, Y. Y. C., Kuo, C. N., Low, H. Y., Chua, C. K. 3D printed electronics: Processes, materials and future trends // Progress in Materials Science. – 2022. – V. 127. – P. 100945.
- 12 Mei J., Lovell M. R., Mickle M. H. Formulation and processing of novel conductive solution inks in continuous inkjet printing of 3-D electric circuits //IEEE transactions on electronics packaging manufacturing. – 2005. – V. 28. – No. 3. – P. 265–273.
- 13 Fuh, J. Y. H., Sun, J., Li, E. Q., Li, J., Chang, L., Hong, G. S., Thian, E. S. Micro-and Bio-rapid prototyping using drop-on-demand 3D printing //Handbook of Manufacturing Engineering and Technology; Nee, A., Ed.; Springer: London, UK. – 2014. – P. 2567–2583.

- 14 Hutchings I. M., Martin G. D. (ed.). Inkjet technology for digital fabrication. – Chichester, UK: Wiley, 2013. – P. 372.
- 15 Magdassi S. Chemistry of Inkjet Inks Singapore World Scientific Publishing Co // Pvt. Ltd. – 2010. – P. 3–18.
- 16 Gengenbach, U., Ungerer, M., Koker, L., Reichert, K. M., Stiller, P., Allgeier, S., Hagenmeyer, V. Automated fabrication of hybrid printed electronic circuits //Mechatronics. – 2020. – V. 70. – P. 102403.
- 17 Akhatov I, Hoey J, Swenson O, Schulz D. Aerosol flow through a long micro-capillary: collimated aerosol beam. Microfluid Nanofluid // Microfluidics and Nanofluidics. – 2008. – V. 5. – P. 215–224.
- 18 Hedges M., Marin A. B. 3D Aerosol jet printing-Adding electronics functionality to RP/RM //DDMC 2012 conference. – 2012. – P. 1–5.
- 19 Wadhwa A. Run-time ink stability in pneumatic aerosol jet printing using a split stream solvent add back system // Rochester Institute of Technology. – 2015.
- 20 Landgraf M, Reitelshofer S, Franke J, Hedges M. Aerosol jet printing and lightweight power electronics for dielectric elastomer actuators //2013 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC). – IEEE. – 2013. – P. 1–7.
- 21 Fan C, Pavlidis S, Papapolymerou J, Yung Hang C, Kan W, Zhang C. Aerosol jet printing for 3-D multilayer passive microwave circuitry //2014 44th European Microwave Conference. – IEEE, 2014. – P. 512–515.
- 22 Review of digital printing technologies for electronic materials / Kye-Si Kwon, Md Khalilur Rahman, Thanh Huy Phung, Stephen D Hoath, Sunho Jeong, Jang Sub Kim // Flexible and Printed Electronics. – 2020. – P. 54.
- 23 Larson B.J. Controlled deposition of picoliteramounts of fluid using an ultrasonically driven micropipette / B.J. Larson, S.D. Gillmor, M.G. Lagally // Review of Scientific Instruments. – 2004. – No 75. – P. 832–836.
- 24 Zang Z., Tang X., Liu X., Lei X. and Chen W. Fabrication of high quality and low cost microlenses on a glass substrate by direct printing technique //Applied Optics. – 2014. – V. 53. – No. 33. – P. 7868–7871.
- 25 Dixon B. D., Kazalski J., Murch F. and Marongelli S. Practical issues concerning dispensing end effectors Circuits Assem. – 1997. – P. 36–40
- 26 Способ и устройство для изготовления печатной платы / Заявление о выдаче патента Российской Федерации на изобретение. Регистрационный номер 2022130784. Дата подачи: 26.11.2022.
- 27 Chen X. B., Kai J. Modeling of positive-displacement fluid dispensing processes //IEEE transactions on electronics packaging manufacturing. – 2004. – V. 27. – No. 3. – P. 157–163.
- 28 Материалы современной электроники / В. Ф. Марков, Х. Н. Мухамедзянов, Л. Н. Маскаева // Учебное пособие: Уральский федеральный университет, 2014. – 274 с.
- 29 Подложка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%B4%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%BA%D0%B0> (дата обращения: 19.07.2025).

- 30 Navneet Gupta, Abhinav Mishra. Selection of substrate material for hybrid microwave integrated circuits (HMICs) // ENERGETIKA. 2016. – V. 62. – No. 1–2. – P. 78–86.
- 31 M. A. M. Leenen, V. Arning, H. Thiem, J. Steiger, and R. Anselmann, “Printable electronics: Flexibility for the future,” *Phys. Status Solidi A*, – V. 206, no. 4, pp. 588–597, Apr. 2009.
- 32 J. M. Nassar et al., “Paper skin multisensory platform for simultaneous environmental monitoring,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 1, no. 1, Apr. 2016.
- 33 Direct ink writing of flexible electronic circuits and their characterization / Muhammad Abas, Qazi Salman Khalid, Dr. Aqib Mashood Khan, Khalid Rahman // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (2019) 41:563. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-2066-3>.
- 34 Vimanyu Beedasy, Patrick J. Smith. Printed Electronics as Prepared by Inkjet Printing: Review / *MDPI: Materials* 2020, 13, 704; doi:10.3390/ma13030704.
- 35 Wong K.L. Compact and broadband microstrip antennas // NY. John Wiley & Sons. 2002, – P. 325.
- 36 Панченко Б.А., Нефедов Е.И. Микрополосковые антенны // М.: Радио и связь. 1986, – С. 144.
- 37 Диэлектрики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://femto.com.ua/articles/part_1/1096.html (дата обращения: 24.07.2019).
- 38 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 / Zongting Li, Ying Yuan, Minghao Yao, Lei Cao, Bin Tang, Shuren Zhang // *Ceramics International*, 1 December 2019. -Volume 45. - Issue 17, Part A. - Pages 22015-22021. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.07.216>
- 39 Ферромагнетики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B5%D1%80%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B8> (дата обращения: 24.07.2019).
- 40 Ферриты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B5%D1%80%D1%80%D0%B8%D1%82%D1%8B> (дата обращения: 24.07.2019).
- 41 Реология/краткий курс лекций для студентов 2 курса направления подготовки 35.03.07 Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции / Сост.: Н.Л. Моргунова / ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2018. С. 43.
- 42 Dealy, J. M. Melt rheology and its role in plastics processing: theory and applications/ Dealy, J. M. , Wissbrun, K. F. / Van Nostrand Reinhold. 1990. P.24-53.
- 43 Tarasov A. E., Malkov G. V., Bubnova M. L. Influence of Curing Conditions on the Properties of Epoxy Resin-Based Composites / *Various Technological Processes*. 2016. V. 88. P. 2015–2020.

- 44 Tokita M. The Potential of Spark Plasma Sintering (SPS) Method for the Fabrication on an Industrial Scale of Functionally Graded Materials / *Advances in Science and Technology*. 2010. V. 63. P. 322–331.
- 45 Пивинский Ю.Е Реология дилатантных и тиксотропных дисперсных систем. - РИО СПбГТИ (ТУ). - 2001. - 174с.
- 46 Фридрихсберг, Д. А. Курс коллоидной химии: Учебник. 4-е изд., испр./ Д.А. Фридрихсберг. – Л.: «Лань», 2010. – 416 с.: ил. ; Фридрихсберг, Д. А. Курс коллоидной химии. / Д.А. Фридрихсберг. – Л.: Химия, 1984. – 368 с.
- 47 Pajor-Świerzy A. et al. The conductive properties of ink coating based on Ni–Ag core–shell nanoparticles with the bimodal size distribution // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2020. – V. 31. – №. 15. – P. 12991-12999. – Текст : непосредственный.
- 48 Majee S. et al. Low temperature chemical sintering of inkjet-printed Zn nanoparticles for highly conductive flexible electronic components // *npj Flexible Electronics*. – 2021. – V. 5. – №. 1. – P. 14. – Текст : непосредственный.
- 49 Гропянов, А.В. Порошковые материалы: учебное пособие / А.В. Гропянов, Н.Н. Ситов, М.Н. Жукова // Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД. – СПб., 2017. – 74 с. – Текст : непосредственный.
- 50 Громов А. А. и др. Горение нанопорошков металлов. – 2008. – Текст : непосредственный.
- 51 Классификация методов получения порошков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pandia.ru/text/80/218/25607-6.php> (дата обращения: 04.05.2025). – Текст : электронный.
- 52 Gupta P. K. Chemical metallurgy: principles and practice. – John Wiley & Sons, 2006. – Текст : непосредственный.
- 53 Suryanarayana P. Mechanical alloying and milling // *Progress in materials science*. – 2001. – V. 46. – №. 1-2. – P. 1–184. – Текст : непосредственный.
- 54 Cai R. et al. Metallic nanoparticle inks for flexible printed electronics // *FlexMat*. – 2025. – Текст : непосредственный.
- 55 Fernandes I. J. et al. Silver nanoparticle conductive inks: synthesis, characterization, and fabrication of inkjet-printed flexible electrodes // *Scientific reports*. – 2020. – V. 10. – №. 1. – P. 8878. – Текст : непосредственный.
- 56 Rahman, M.R.M.A. Microemulsion-mediated synthesis of ZnO nanoparticles: a review / M.R.M.A. Rahman, M.A.A. Rahman, M.M. Rahman // *Journal of Nanoparticle Research*. – 2018. – V. 20(5). – P. 123
- 57 Kim S.K. Synthesis of ZnO nanoparticles via reverse microemulsion for printable semiconductor inks / S.K. Kim, J.H. Lee, H.J. Kim // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2020. – V. 560. – P. 187–196
- 58 Zhang Y. Shape-controlled synthesis of ZnO nanoparticles using microemulsion: role of surfactant and co-surfactant / Y. Zhang, L. Wang, X. Chen // *Crystal Growth & Design*. – 2019. – V. 19(7). – P. 4110–4119
- 59 Silva da M.L.R. Printable ZnO semiconductor inks for thin-film transistors: from synthesis to device performance / M.L.R. da Silva, R.F. S. Andrade, C.A.M. de Oliveira // *Advanced Electronic Materials*, 2021, 7(4), 2001025

60 Kamyshny A., Magdassi S. Conductive nanomaterials for printed electronics // small. – 2014. – V. 10. – №. 17. – P. 3515-3535. – Текст : непосредственный.

61 Derby B. Inkjet printing of functional and structural materials: fluid property requirements, feature stability, and resolution // Annual Review of Materials Research. – 2010. – V. 40. – №. 1. – P. 395-414. – Текст : непосредственный.

62 Perelaer J., De Gans B. J., Schubert U. S. Ink-jet printing and microwave sintering of conductive silver tracks //Advanced materials. – 2006. – V. 18. – №. 16. – P. 2101-2104.

63 Walker S. B., Lewis J. A. Reactive silver inks for patterning high-conductivity features at mild temperatures // Journal of the American Chemical Society. – 2012. – V. 134. – №. 3. – P. 1419-1421. – Текст : непосредственный.

64 Петрова А.П. Наполнители для токопроводящих клеев / Новости материаловедения. Наука и техника, 2017, №5–6 (28), – С. 47–55.

65 Недорезов В.Г. Создание керметных резистивных материалов с минимальным значением температурного коэффициента сопротивления // Материаловедение. 2002. – №6 (63). – С. 23–26. – Текст : непосредственный.

66 Караев А.К. Температурная зависимость сопротивления толстопленочных резисторов с учетом сегрегации частиц проводящей фазы/ Конструкции из композиционных материалов / Всерос. науч.-исслед. ин-т межотраслевой информации. 2006. – № 4. – С. 212–215. – Текст : непосредственный.

67 Шольц Н.Н., Пискарев К.А. Ферриты для радиочастот. – М.-Л.: Энергия. – 1966, 259 с. – Текст : непосредственный.

68 Дадашев, Р. Р. Плотность и поверхностное натяжение глицерина и этанола технической чистоты / Р. Р. Дадашев, С. И. Дадашев, Л. М. Мисирова // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2021. – № 5-9 (73). – С. 36-40– Текст : непосредственный.

69 Лозинский, Н. С. Влияние органических связующих на процессы формирования и электрофизические свойства рутениевых резисторов / Н. С. Лозинский, Я. А. Мороз // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2021. – № 1. – С. 83-92. – Текст : непосредственный.

70 Патент № 2832458 С1 Российская Федерация, МПК C03C 8/22, H01B 3/12, G02B 1/10. Фотостойкое керамическое печатное терморегулирующее покрытие и способ его получения : заявл. 02.05.2024 : опубл. 24.12.2024 / М. М. Михайлов, А. Н. Лапин, С. А. Юрьев [и др.] – Текст : непосредственный.

71 Патент № 2083064 С1 Российская Федерация, МПК H05K 3/12. способ изготовления электропроводящих серебряных покрытий : № 5031835/07 : заявл. 10.03.1992 : опубл. 27.06.1997 / В. А. Сальский, Е. Б. Михайлова, Г. А. Кондратова ; заявитель Кемеровский государственный университет. – Текст : непосредственный.

72 Авторское свидетельство № 1760890 А1 СССР, МПК H01B 3/12. Органическое связующее пасты для трафаретной печати : № 4854825/07 : заявл. 22.05.1990 : опубл. 10.01.1997 / А. Н. Ивлюшкин, А. Б. Покрываило, В. Л. Устьянцев [и др.]. – Текст : непосредственный.

73 Патент № 2837862 С1 Российская Федерация, МПК H01B 1/24. Токопроводящая паста для низкотемпературного спекания и способ получения токопроводящей пасты : заявл. 30.09.2024 : опубл. 07.04.2025 / С. А. Солонин, А. В. Исайкин, Ю. М. Селиванова ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "СолидКоннект". – Текст : непосредственный.

74 Патент № 2177183 С1 Российская Федерация, МПК H01B 1/02, H01B 1/20. Токопроводящая паста на основе порошка серебра, способ получения порошка серебра и органическое связующее для пасты : № 2000130383/09 : заявл. 05.12.2000 : опубл. 20.12.2001 / Н. П. Данилина, А. Н. Ивлюшкин, Н. Н. Людвиговская [и др.] ; заявитель Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт газоразрядных приборов "Плазма". – Текст : непосредственный.

75 Fatima S. et al. Polymer-based conductive ink: a comprehensive review // Polymer Bulletin. – 2025. – P. 1-49. – Текст : непосредственный.

76 Lewis J. A. Colloidal processing of ceramics //Journal of the American Ceramic Society. – 2000. – V. 83. – №. 10. – P. 2341–2359. – Текст : непосредственный.

77 Han H. G., Seo D. S., Lee J. K. Preparation of conductive silver paste using bimodal particles // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2008. – V. 8. – №. 10. – P. 5576-5580. – Текст : непосредственный.

78 Olhero S. M., Ferreira J. M. F. Influence of particle size distribution on rheology and particle packing of silica-based suspensions //Powder Technology. – 2004. – V. 139. – №. 1. – P. 69–75. – Текст : непосредственный.

79 Yu Z. et al. Preparation of bimodal silver nanoparticle ink based on liquid phase reduction method //Nanomaterials. – 2022. – V. 12. – №. 3. – P. 560. – Текст : непосредственный.

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

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

82 Шибаев П. Б. К вопросу о влиянии характера химической связи на физические силы Ван-дер-Ваальса и температуру Дебая монолитных металлических веществ и металлов, образованных наночастицами / Шибаев П. Б., Сироткин Р. О., Сироткин О. С. // Вестник Казанского технологического университета. 2014. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o>

vliyanii-haraktera-himicheskoy-svyazi-na-fizicheskie-sily-van-der-vaalsa-i-temperaturu-debaya-monolitnyh-metallicheskih.

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

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

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

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

87 Li, J., Tang, W., Wang, Q., Sun, W., Zhang, Q., Guo, X., Yan, F. Solution-processable organic and hybrid gate dielectrics for printed electronics //Materials Science and Engineering: R: Reports. – 2018. – Vol. 127. – PP. 1-36.

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

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

90 Kang B. J., Lee C. K., Oh J. H. All-inkjet-printed electrical components and circuit fabrication on a plastic substrate //Microelectronic Engineering. – 2012. – Vol. 97. – PP. 251-254.

91 Microstructure and microwave properties of inkjet printed barium strontium titanate thick-films for tunable microwave devices / A. Friederich, C. Kochler, M. Nikfalazar and etc. // Journal of the European Ceramic Society 2014. – 34.– P. 2925–2932.

92 Heijun Jeong, Eiyong Park, Sungjoon Lim. Three-dimensional printed and fluidic dielectric material optically transparent metasurface for switchable absorption and reflection functionality in microwave frequency region // Waves in Random and Complex Media, 28 Apr 2022. doi.org/10.1080/17455030.2022.2058712

93 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.

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

- 95 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.
- 96 Sun, J., Bao, B., He, M., Zhou, H., & Song, Y. Recent advances in controlling the depositing morphologies of inkjet droplets //ACS applied materials & interfaces. 2015. V. 7. №. 51. PP. 28086-28099.
- 97 Goh, G. L., Agarwala, S., Goh, G. D., Tan, H. K. J., Zhao, L., Chuah, T. K., & Yeong, W. Y. Additively manufactured multi-material free-form structure with printed electronics //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. V. 94. №. 1. PP. 1309-1316.
- 98 Hoerber, J., Glasschroeder, J., Pfeffer, M., Schilp, J., Zaeh, M., & Franke, J. Approaches for additive manufacturing of 3D electronic applications //Procedia CIRP. 2014. V. 17. PP. 806-811.
- 99 M. Gilliam, Handbook of Manufacturing Engineering and Technology (Ed: A. Y. C. Nee), Springer, London. 2015. PP. 99–124.
- 100 Rajan K, Roppolo I, Chiappone A, Bocchini S, Perrone D, Chiolerio A. Silver nanoparticle ink technology: state of the art. Nanotechnol. 2016. Vol. 9. PP. 1–13.
- 101 Polymer-based smart materials by printing technologies: Improving application and integration / J. Oliveiraa, V. Correia, H. Castrob, P. Martinsa, S. Lanceros-Mendez // Additive Manufacturing 21 (2018). – p.269-283.
- 102 Шольц Н.Н., Пискарев К.А. Ферриты для радиочастот. – М.-Л.: Энергия. – 1966, 259 с.
- 103 Классификация веществ по магнитным свойствам [Электронный ресурс]: магнитные материалы. URL: <https://goo.su/oZTX8w> (дата обращения: 05.03.2024).
- 104 Zhang, Y. Synthesis and characterization of $\text{Li}_{0.4}\text{Fe}_{2.4}\text{Zn}_{0.2}\text{O}_4$ ferrite powder by solid-state reaction method / Journal of Alloys and Compounds, 2015, №649, P.1022–1027.
- 105 Wang, L. Magnetic properties of $\text{Li}_{0.4}\text{Fe}_{2.4}\text{Zn}_{0.2}\text{O}_4$ ferrite prepared by sol-gel method / Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, №429, P.194–199.
- 106 Ong B. H. $\text{Li}_{0.4}\text{Fe}_{2.4}\text{Zn}_{0.2}\text{O}_4$ ferrite as a potential material for energy storage applications / Journal of Materials Science: Materials in Electronics, №29(18), P. 158–163.
- 107 Разработка и исследование ферромагнитной пасты повышенной вязкости / И. Ю. Брагин, П. Л. Лекомцев, Л. А. Пантелеева [и др.] / Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического университета. 2020. № 6 (109). С. 36–48.
- 108 Заполняющая паста: пат. 1684301 СССР. №4713864/05/ Ткачик Н.Г., Гаврик Е.К.; заявл. 10.05.1989; опубл. 15.10.1991.
- 109 Магнитная паста для магнитопорошковой дефектоскопии: пат. 832441 СССР. №2797227/25-28/ Лисицин С.М., Шуваева Э.М.; заявл. 06.07.1979; опубл. 23.05.1981.

110 Состав магнитной суспензии для рабочего слоя носителя магнитной записи: пат. 1730111 СССР. №4472297/05 Моисеенко Е.В., Трунова Р.С., Терехова Л.А.; заявл. 05.07.1988; опубл. 30.04.1992.

111 Канева К.В., Сураев А.С., Труфанова Н.С. Комплексное исследование свойств замещенной никелевой шпинели, полученной по короткой технологической схеме / Двадцать восьмая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых. 2024. С.123–124.

112 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.

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

114 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.

115 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.

116 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

117 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.

118 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

119 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.

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

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

122 Колосницын Б. С. Расчет параметров элементов интегральных микросхем : учебное пособие / Б. С. Колосницын, Д. А. Котов. — Минск, 2017. 68 с. – Текст : непосредственный.

123 Поляков В.И., Стародубцев Э.В. Проектирование гибридных тонкопленочных интегральных микросхем: учебное пособие по дисциплине «Конструкторско-технологическое обеспечение производства ЭВМ» – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2013. – 80 с. – Текст : непосредственный.

124 Smits F. M. Measurement of sheet resistivities with the four-point probe //Bell System Technical Journal. – 1958. – Т. 37. – №. 3. – С. 711-718. – Текст : непосредственный.

125 Пасты полимерные ТУ 6365-007-59839838-2004 [Электронный ресурс] : ООО "НПП ДЕЛЬТА-ПАСТЫ". URL: <http://www.depa.ru/TU%20PURP%20007.pdf> (дата обращения: 15.12.2024). – Текст : электронный.

126 Кочемасов, В. Современные индуктивные радиокомпоненты часть 1 / В. Кочемасов, С. Хорев // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2022. – № 2(213). – С. 142-153. – Текст : непосредственный.

127 Козлов, К. В. Конструктивные особенности монтажа для элементной базы по направлению тонкопленочных пассивных элементов гибридной схемы / К. В. Козлов // Научные тенденции: Вопросы точных и технических наук : Сборник научных трудов по материалам XVI международной научной конференции, Санкт-Петербург, 12 апреля 2018 года. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Международная Объединенная Академия Наук, 2018. – С. 12-13. – Текст : непосредственный.

128 Борейко, Д. А. Исследование параметров катушек индуктивности, выполненных по LTCC технологии / Д. А. Борейко, Т. С. Дьяченко, А. И. Тюменцев // Техника радиосвязи. – 2012. – № 17. – С. 73-83. – Текст : непосредственный.

129 Колосницын Б. С., Котов Д. А. Расчет параметров элементов интегральных микросхем: учебно-методическое пособие. – 2017. [Электронный ресурс]: Репозиторий БГУИР. URL: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/13283/> (дата обращения 22.12.2024). – Текст : электронный.

130 Обзор применения 3D-печати в электронике [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/top3dshop/blog/424413>.

131 J. Beck, F. Prinz, D. Siewiorek, L. E. Weiss “Manufacturing mechatronics using thermal spray shape deposition”, Proc. Solid Freeform Fabrication Symp., 1992, pp. 272-279

132 Dimatix Materials Printer DMP-2850 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.fujifilm.com/ru/ru/business/inkjet-solutions/inkjet-technology-integration/dmp-2850>

133 Chuang M. Y. Inkjet printing of Ag nanoparticles using dimatix inkjet printer, No 2 //University of Pennsylvania. – 2017.

134 Abbas A., Bajwa I. Inkjet Printing of Ag Nanoparticles using Dimatix Inkjet Printer, No 1 //Protoc. Rep. – 2017.

135 Benchtop Dispense System Robot [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://gpd-global.com/benchtop-dispense-system.php>

- 136 Voltera V-One: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.voltera.io/>
- 137 RFID-метка [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/RFID> (дата обращения 01.03.2022).
- 138 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., – Honolulu, – HI, – USA, – Jun. 2007, – 2749–2752 pp.
- 139 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, – P. 1–4 .
- 140 Inkjet Catalyst Printing and Electroless Copper Deposition for Low-Cost Patterned Microwave Passive Devices on Paper [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://citeweb.info/20130113044> (дата обращения: 01.03.2022).
- 141 Wide frequency independently controlled dual-band inkjet-printed antenna [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6715625/> (дата обращения: 05.03.2022).
- 142 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. – P. 89021V-1– 89021V-6.
- 143 The Effect of Conductive Ink Layer Thickness on the Functioning of Printed UHF RFID Antennas / Sari Linnea Merilampi, Toni Bjorninen, Antti Vuorimäki, Leena Ukkonen, Pekka Ruuskanen, and Lauri Sydanheimo // Proceedings of the IEEE. – Vol. 98, №. 9, September 2010. – P. 1610–1619.
- 144 Inkjet Printing of Passive Microwave Circuitry / Oscar Azucena; Joel Kubby; Derek Scarbrough; Chuck Goldsmith // 2008 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – 2008. – P. 1075–1078.
- 145 Inkjet-printed paper/polymer-based RFID and Wireless Sensor Nodes: The final step to bridge cognitive intelligence, nanotechnology and RF? / Manos M. Tentzeris; Amin Rida; Anya Traille; Hoseon Lee; Vasilis Lakafosis; Rushi Vyas // 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium. – 2011.
- 146 Inkjet-printed antennas, sensors and circuits on paper substrate / Kim S, Cook B, Le T // IET Microwaves, Antennas and Propagation. – 7(10). – 2013. – P. 858–868
- 147 A Thickened-and-Widened Feed Dipole Antenna for Printed UHF RFID / Pornanong Pongpaibool, Werayuth Wallada, Siwaruk Siwamogsatham // Third International Conference on Consumer Electronics: National Electronics and Computer Technology Center. – Berlin. –2013. – |P. 93–97.
- 148 A Thickened-and-Widened Feed Dipole Antenna with an Inductive Matching Loop for a Printed UHF RFID Tag / Pornanong Pongpaibool, Werayuth Wallada, Siwaruk Siwamogsatham // National Electronics and Computer Technology Center. – 2014. – P 2092–2096.

149 Inkjet Printing of Ultrawideband (UWB) Antennas on Paper-Based Substrates / George Shaker, Safieddin Safavi-Naeini, Nagula Sangary, Manos M. Tentzeris // IEEE Antennas and wireless propagation letters. – VOL. 10. – 2011. – P 111–114.

150 Design of Hybrid Wireless Power Transfer and Dual Ultrahigh-Frequency Antenna System / Mohammad Haerinia and Sima Noghianian // URSI EM Theory Symposium. –2019. – p 4.

151 A Printed Wearable Dual-Band Antenna for Wireless Power Transfer / Mohammad Haerinia, Sima Noghianian // Sensors 2019 (19). – P 10.

152 Low-Cost Printed Flexible Antenna by Using an Office Printer for Conformal Applications / Kashif Nisar Paracha, Sharul Kamal Abdul Rahim, Hassan Tariq Chattha, Saqer Saleh Aljaafreh, Sabih ur Rehman, Yew Chiong Lo // International Journal of Antennas and Propagation. – 2018. – P 8.

153 Blanco-Angulo, C., Martínez-Lozano, A., Arias-Rodríguez, J., Rodríguez-Martínez, A., Vicente-Samper, J. M., Sabater-Navarro, J. M., & Ávila-Navarro, E. (2023). Low-cost direct-writing of silver-based ink for planar microwave circuits up to 10 GHz. IEEE Access, 11, P. 4010-4022.

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

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

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

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

158 Труфанова Н.С. Методика экстракции электрических частотных параметров проводящих чернил / Н.С. Труфанова, С.А. Артищев // 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.

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

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

161 The future additive electronic| Voltera [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.voltera.io/>

162 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 ученых (ВНКСФ-28): Материалы конференции. Информационный бюллетень. Сборник тезисов докладов. В 1 т., Новосибирск, 01–06 апреля 2024 года. – Новосибирск: Ассоциация студентов-физиков и молодых ученых России, 2024. – С. 123–124.

163 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023688146. Программное обеспечение для управления инфракрасной камерой спекания печатных плат, изготовленных аддитивным методом / Рагимов Э.Р., Труфанова Н.С., Артищев С.А., Гадиров Р.М. – Заявка № 2023687527. Дата поступления 13.12.2023 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20.12.2023 г.

164 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669436. Программа для управления блоком питания гальванической ванны / С.А. Артищев, И.Г. Ковалев, Н.С. Труфанова, С.А. Айрих. – Заявка № 2022668144. Дата поступления 07.10.2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20.10.2022 г.

165 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.

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

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

168 Артищев С.А. Автоматизированная гальваническая ванна с функцией контроля плотности тока / С.А. Артищев, С.С. Петров, И.Г. Ковалев, Н.С.

169 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.

170 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.

171 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.

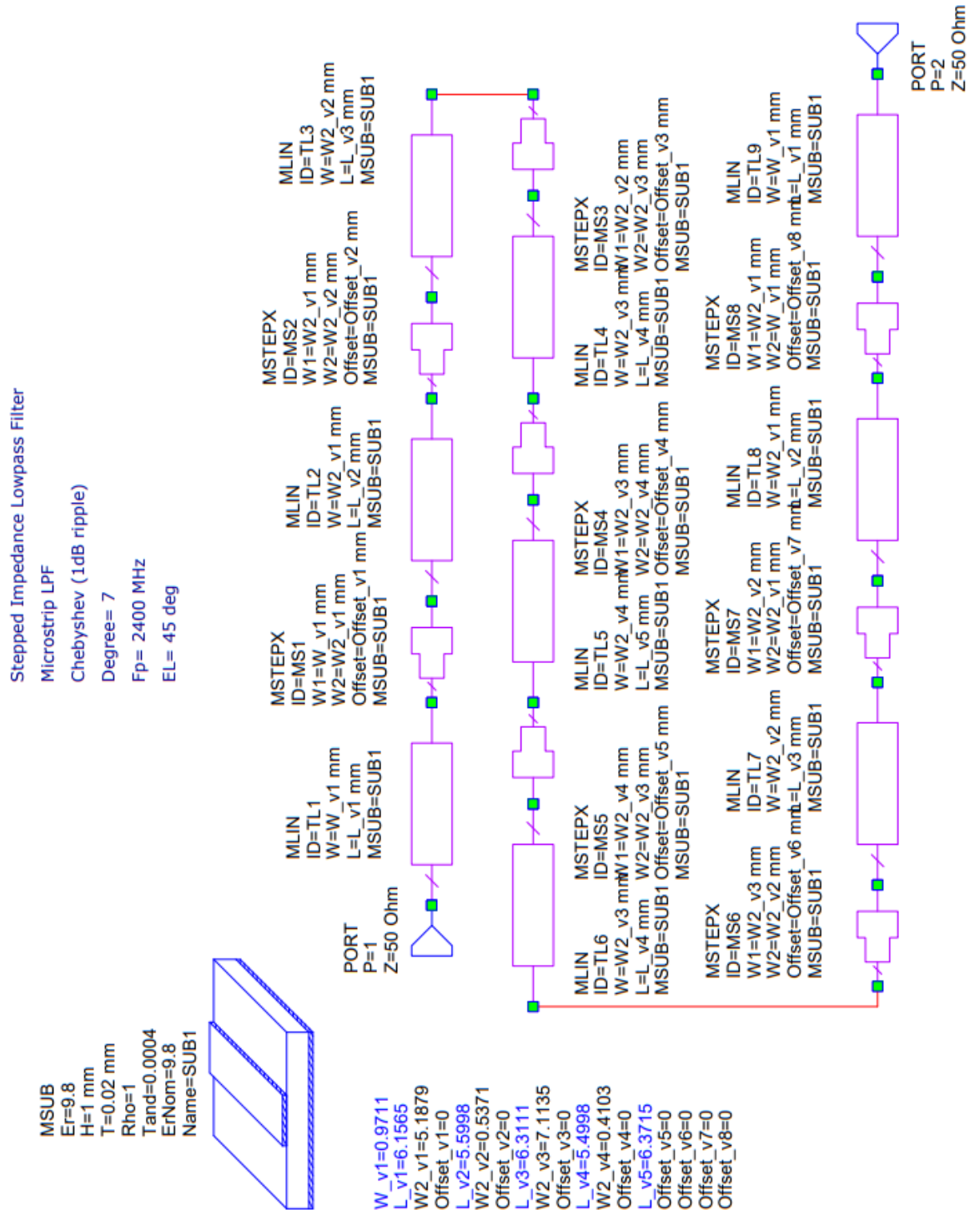
172 Trufanova, N.S. Manufacturing of Hybrid Integrated Circuits Using Additive Printer Technology / N.S. Trufanova, S.A. Artishchev, A.G. Loschilov, E.R. Ragimov // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russian Federation, 2022. – pp. 1–5.

173 Труфанова Н.С. Исследование возможности изготовления планарных компонентов методом принтерной печати / Н.С. Труфанова, А.С. Труфанова // 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.

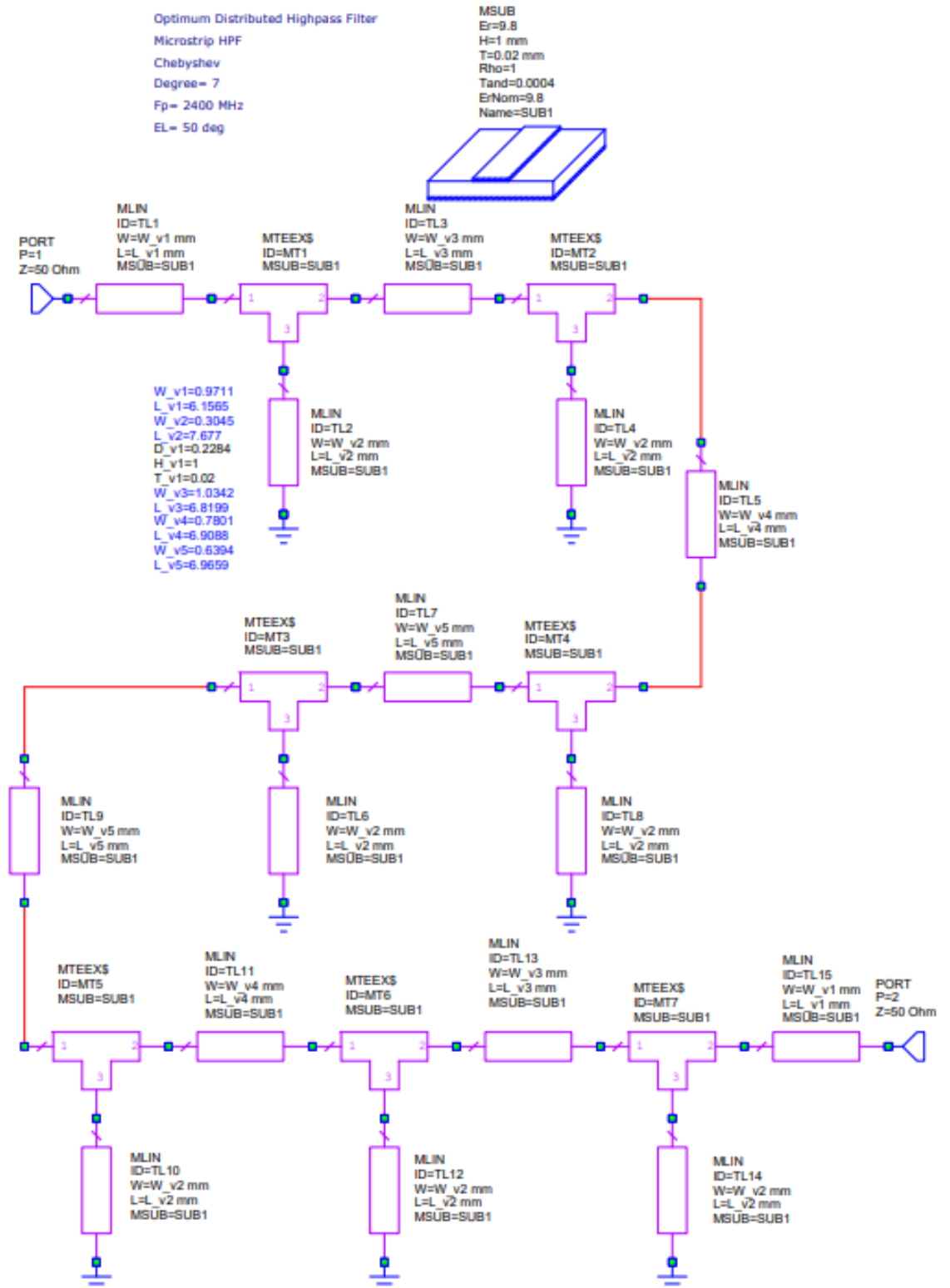
Приложение А

Схемы моделей фильтров

Модель фильтра нижних частот



Модель фильтра верхних частот



Модель полотно-пропускающего фильтра

