

# Возможность применения струйной 3D-печати для создания изделий одновременно с функциональными радиоэлектронными компонентами

**В статье рассмотрены перспективы применения струйной 3D-печати для создания уникальных радиоэлектронных средств. Напечатаны образцы в виде конденсаторов и токопроводящих дорожек. Произведен внутренний контроль геометрии конденсаторов. Осуществлена проверка печати минимального зазора между токопроводящими дорожками.**

**Владислав Жданкин**

v.jdankin@spbtech.ru

**Павел Ворона**

p.vorona@spbtech.ru

**Ксения Сизова**

k.sizova@spbtech.ru

**Введение**

Согласно исследованию IDTechEx, в 2020 году объем глобального рынка гибкой, печатной и органической электроники составил \$41,2 млрд и в течение ближайших пяти лет увеличится до \$55 млрд. При этом общий вклад отечественного производства в мировой рынок — всего около 1% [1, 2]. По прогнозу IDTechEx на 2022–2032 гг., к 2032 году интеграция электроники, изготовленной по аддитивным технологиям, вырастет до \$3,5 млрд [3]. Доктор Мэтью Дайсон, старший аналитик IDTechEx, оценивает сегмент проводящих чернил более чем в \$2 млрд [4]. Аппаратное обеспечение для 3D-печати достигнет пика размера рынка в \$9,9 млрд в течение десятилетия [5].

**Струйная 3D-печать**

На данный момент одним из перспективных векторов развития в дирекции Регионального инженерингового центра радиоэлектронного приборостроения (РИЦ РЭП), подразделения АО «Технопарк Санкт-Петербурга», рассматривается технология печатной электроники. Одним из направлений развития технологии печатной электроники является струйная 3D-печать. В качестве материалов для нее возможно использование чернил с различными свойствами. Для этого они должны иметь определенные значения вязкости, плотности, поверхностного натяжения и других параметров, в зависимости от требований к печатающей головке.

Сегодня струйная печать применяется для таких компонентов печатной электроники, как RFID-метки, антенны, элементы СВЧ-электроники, различные датчики и т. д. [6]. Как правило, при производстве подобных компонентов происходит нанесение од-

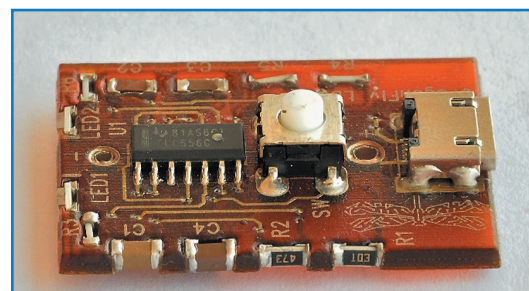
ного вида материала на подложку из диэлектрика. Использование нескольких материалов (токопроводящих и диэлектрических) позволяет создавать трехмерные элементы электроники и полупроводниковые приборы. Таким образом удается не только увеличить производительность, точность создания и функциональность изделий, но и добиться большей миниатюризации [7].

**Примеры изделий, изготовленных по технологии струйной 3D-печати**

Уменьшить размер изделия (печатной платы) можно, разместив компоненты в объеме изделия и по краям, припаяв к вертикальным контактным площадкам (рис. 1).

На рис. 2 показан многослойный полосовой фильтр. Использование гибкого межслойного расстояния позволило реализовать индуктивность и емкость в меньших размерах, в результате удалось в несколько раз уменьшить изделие [8].

На рис. 3 представлена фазированная антенная решетка, которая одновременно принимает или



**Рис. 1.** Плата с установленными сбоку и вставленными в ее объем компонентами

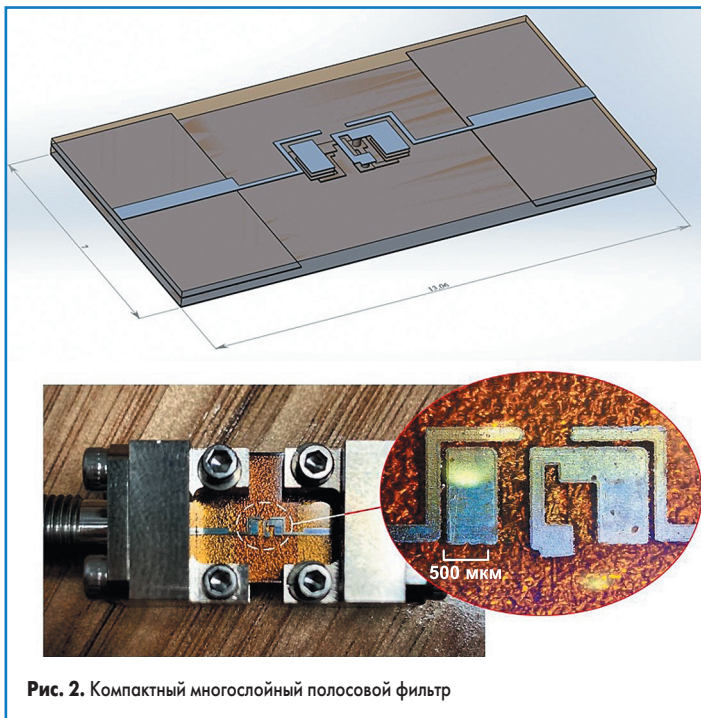


Рис. 2. Компактный многослойный полосовой фильтр

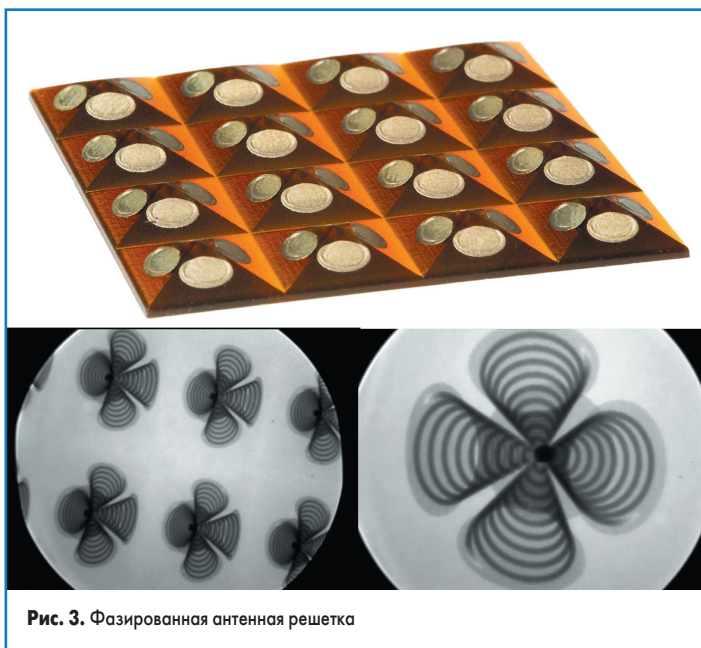


Рис. 3. Фазированная антенная решетка

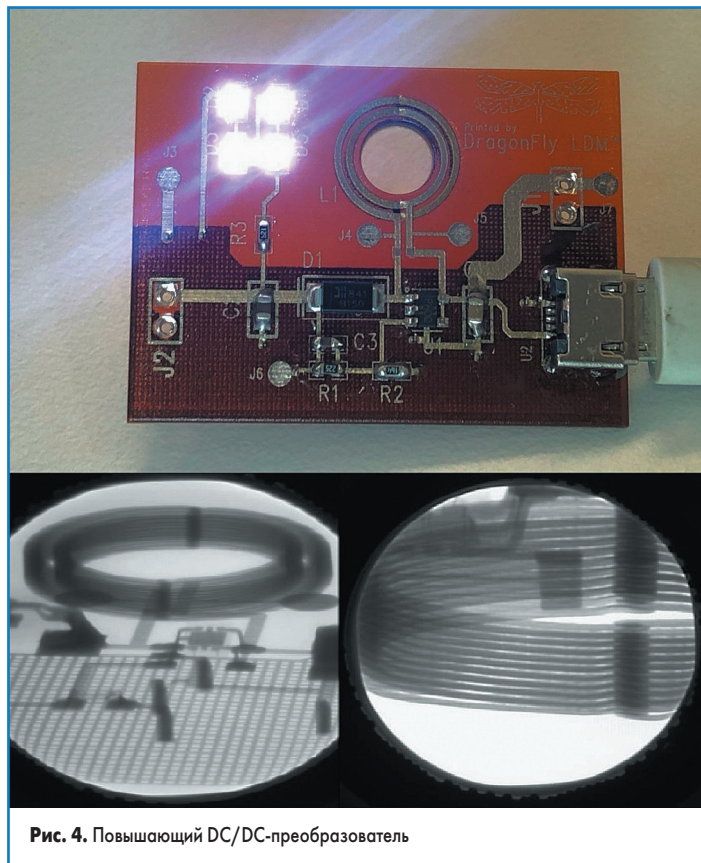


Рис. 4. Повышающий DC/DC-преобразователь

Таблица. Технологические возможности DragonFly 2020 Pro

Технология	Струйная печать
Количество печатающих головок	2, по одной для каждого типа чернил: проводящие (на основе наночастиц серебра) и диэлектрические чернила
Диэлектрическая проницаемость (Dk)	2,5
Тангенс угла диэлектрических потерь (Df)	18.5e-3
Электропроводность по отношению к меди	От 5% до 30%
Точность, мкм	1
Формат файлов	Gerber, STL
Максимальный объем изделия, мм	160×160×3
Минимальная высота напечатанного изделия, мм	0,7
Минимальная толщина токопроводящего слоя, мкм	17
Минимальная толщина диэлектрического слоя, мкм	35
Минимальный зазор между токопроводящими элементами, мкм	110
Минимальная рекомендуемая ширина дорожки, мкм	110

передает сигналы в четырех направлениях. Напечатанная антенна может иметь любую комбинацию передатчиков и приемников, а каждый источник излучения пирамидальной структуры — иметь различную частоту и интенсивность [9].

Плата, изображенная на рис. 4, представляет собой повышающий преобразователь (с 5 до 18 В), питающий четыре светодиода. Повышающее преобразование достигается с помощью набора из двух concentрических катушек по 20 витков, изготовленных одновременно с платой. Печать катушки в едином цикле с печатной платой позволяет добиться более стабильных характеристик в отличие от применения классической технологии создания моточных изделий.

Можно расположить вертикально интегральные схемы, напечатав посадочные места на разных уровнях залегания. Пример

показан на рис. 5. Получаем более высокую плотность, чем традиционное расположение на печатной плате, поскольку можно устанавливать и соединять интегральные схемы друг над другом.

В плате предусмотрена комбинация межсоединений высокой плотности и переходных отверстий для создания вертикально размещенных интегральных схем. Таким образом можно установить микросхемы разных размеров, от малых до больших.

В настоящий момент существует возможность изготовления трехмерных радиоэлектронных изделий с помощью 3D-принтера израильской фирмы NanoDimension, модель DragonFly 2020 Pro. Один из 3D-принтеров находится на территории Технопарка Санкт-Петербурга в РИЦ РЭП. В таблице показаны характеристики данного принтера и его технологические возможности.

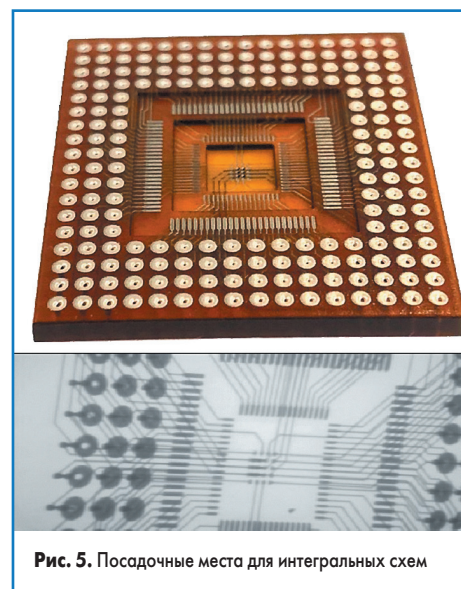


Рис. 5. Посадочные места для интегральных схем

Используя технологию струйной печати, можно не только создавать трехмерную топологию печатных плат, но и печатать радиоэлектронные элементы одновременно с проводниками печатной платы. Таким образом можно уменьшить объем разрабатываемого устройства, повысить точность создания критичных элементов, а свободный объем изделия использовать для размещения компонентов.

### Изготовление конденсаторов

Рассмотрим возможность размещения функциональных радиоэлектронных элементов в объеме печатной платы и проверим характеристики 3D-принтера на примере конденсаторов. При создании СВЧ-устройств очень важно правильно подобрать характеристики конденсаторов, которые будут использоваться в цепях и антенных трактах, обеспечить отсутствие дополнительных наводок и потерь.

Конденсаторы состоят из параллельных слоев проводящих пластин с диэлектриком между ними. Таким образом, для их изготовления нам достаточно двух видов чернил. Можно изготовить до 50 слоев диэлектрика, что позволяет использовать конденсаторы различной емкости в зависимости не только от площади обкладок, но и от их количества.

Размещение конденсаторов в печатной плате позволяет сократить время на установку компонентов, уменьшить место на поверхности платы для размещения других радиоэлектронных компонентов, рассчитать конденсатор с необходимой емкостью, а также уменьшенным разбросом номинальной емкости [10].

3D-модели конденсаторов, созданных в SolidWorks, изображены на рис. 6. Подготовка к печати производилась во встроенной программе 3DUI для принтера DragonFly.

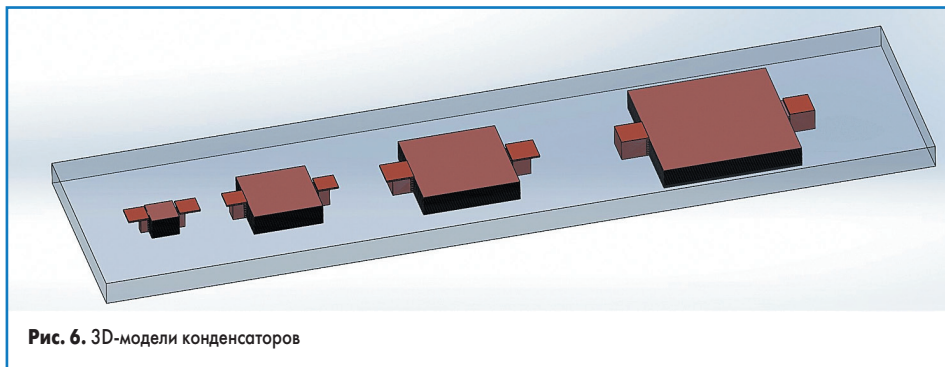


Рис. 6. 3D-модели конденсаторов

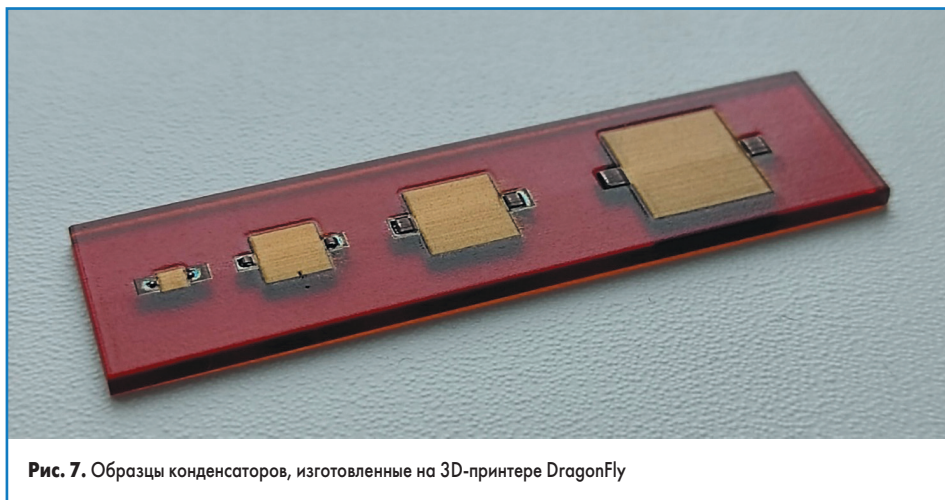


Рис. 7. Образцы конденсаторов, изготовленные на 3D-принтере DragonFly

На рис. 7 представлена плата с опытными образцами конденсаторов, изготовленных на 3D-принтере DragonFly.

Контроль внутренней геометрии конденсаторов осуществлен на установке рентгеновского контроля YXLON Cheetah EVO с возможностью ламинографии. На рис. 8 видны обкладки конденсатора и нарушение геометрии соединений обкладок с контактными площадками. Данный феномен возникает из-за усадки чернил при затвердевании, когда толщина изделия составляет 250–300 мкм.

При усадке образуются углубления, которые алгоритм принтера заполняет дополнительными диэлектрическими чернилами. На этом примере показана некорректная работа алгоритма, так как были нарушены правила проектирования изделия для данного оборудования.

При правильном построении геометрии конденсаторов и учитывая технологические возможности DragonFly 2020 Pro, возможно создание компонентов для дальнейшего использования в печатаемых изделиях.

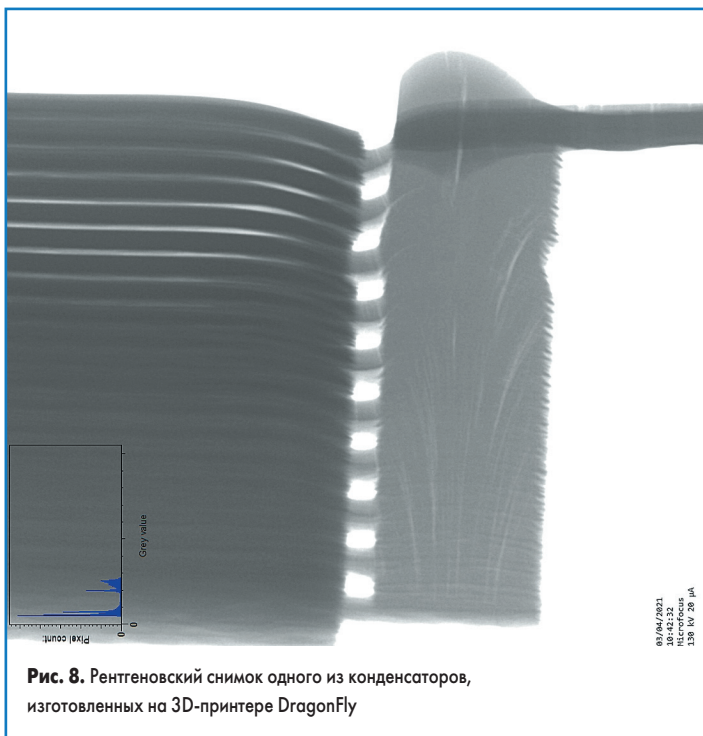


Рис. 8. Рентгеновский снимок одного из конденсаторов, изготовленных на 3D-принтере DragonFly

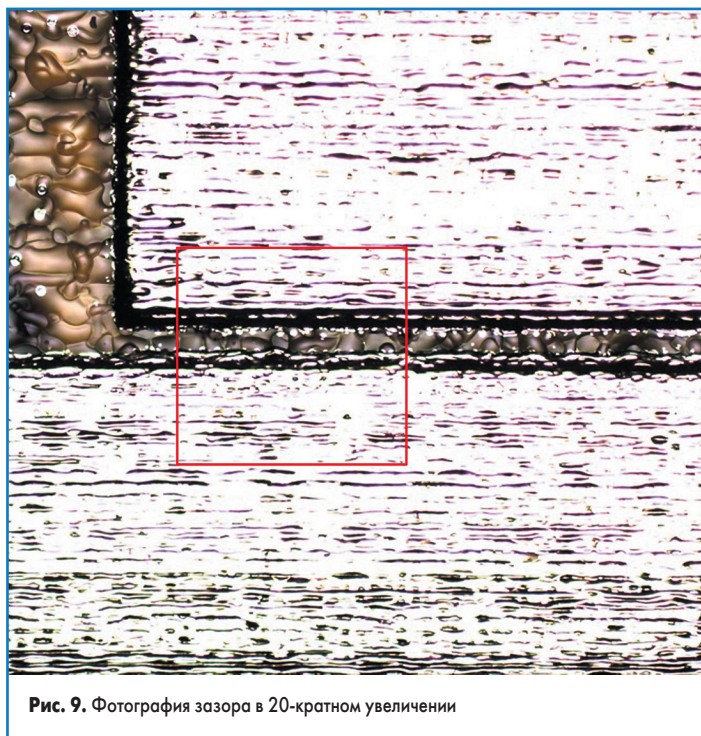


Рис. 9. Фотография зазора в 20-кратном увеличении

## Измерение высоты токопроводящей дорожки при помощи оптического профилеметра BW-S505

Для проверки параметров правил проектирования для принтера были напечатаны две токопроводящие дорожки высотой 17 мкм на подложке из диэлектрических чернил с минимальным зазором 110 мкм. Высота диэлектрического слоя составляет 0,5 мм.

Контроль минимального зазора выполнен при помощи оптического профилеметра W-S505 (рис. 10). Технология измерения профиля основана на методе оптической интерферометрии. На рис. 11 изображен полученный профиль зазора, где по оси Y (Height) показана высота токопроводящих дорожек, а по оси X (Length) — ширина зазора.

Несмотря на растекание стенок токопроводящих дорожек при сплавлении чернил, минимального зазора в 110 мкм оказалось достаточно, чтобы избежать замыкания токопроводящих дорожек. Предложенного минимального зазора между двумя токопроводящими элементами достаточно для данной технологии.

### Заключение

Дальнейшее развитие технологии струйной 3D-печати в рамках работы РИЦ РЭП предусмотрено в нескольких направлениях. На 3D-принтере DragonFly 2020 Pro планируется освоение печати катушек индуктивности, датчиков и других компонентов для формирования элементной базы новой технологии. В частности, планируется отработка технологии изготовления многослойных печатных плат (до 32 слоев). В дополнение к этому запланирована работа в направлении технологической совместимости напечатанных изделий со «стандартной» электроникой.

Помимо струйного 3D-принтера DragonFly 2020 Pro, рентгеновской установки YXLON Cheetah EVO и профилеметра BW-S505, РИЦ РЭП оснащен струйным 3D-принтером CeraPrinter F-Series, который позволяет печатать в том числе гибкую электронику.

На гибридном принтере CeraPrinter F-Series планируется выполнение работ, связанных с апробацией новых функциональных материалов с различными свойствами и методов их нанесения, а также закрепления на различных типах подложки. Например, на данном оборудовании доступна печать керамики при выполнении определенных технологических условий и требований к свойствам чернил.

Кроме перечисленного выше, планируется разработка и создание напечатанных элементов СВЧ-устройств, таких как антенны, фильтры верхних и нижних частот, направленные ответвители, и других изделий.

С целью импортозамещения и помощи заказчикам в освоении технологии печатной электроники РИЦ РЭП предлагает собственные технологические и инженерные ресурсы в разработке и производстве печатной электроники.

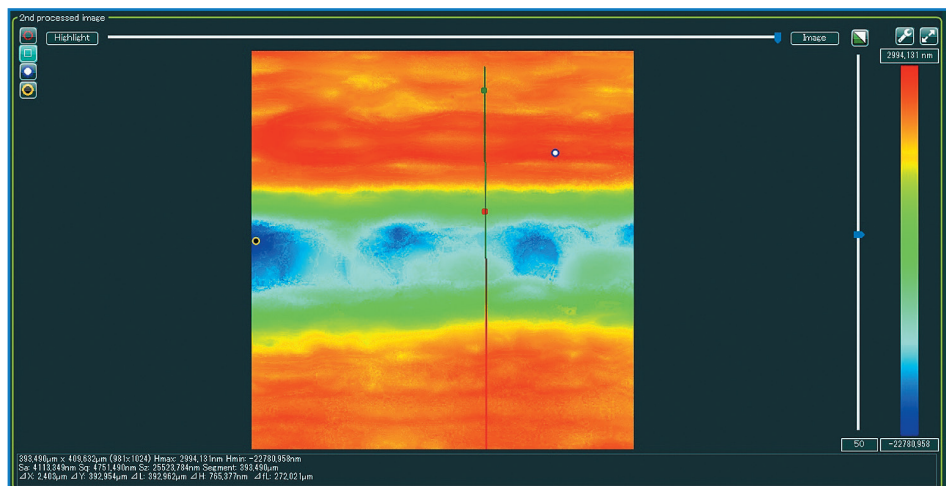


Рис. 10. Карта высот

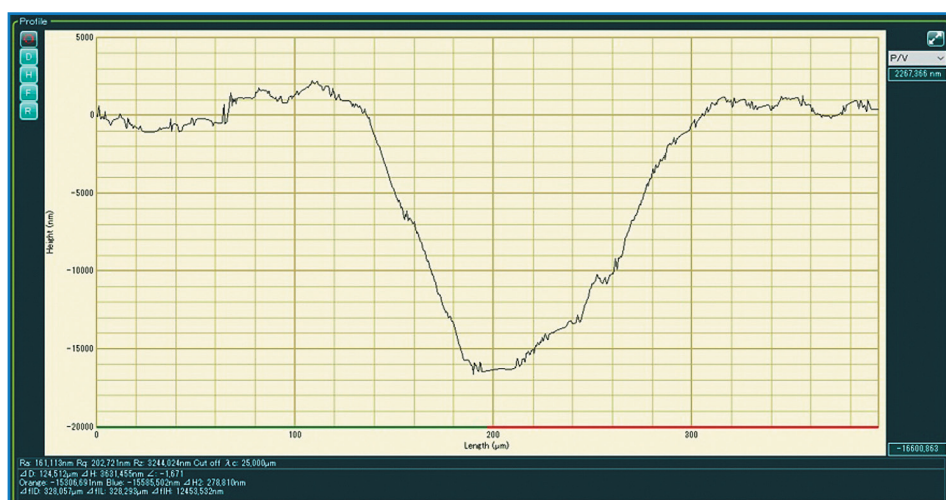


Рис. 11. Профиль зазора

В распоряжении РИЦ РЭП имеется измерительный участок с комплектом необходимого оборудования Rohde & Schwarz (векторный анализатор ZNB40, безэховая камера DST200, анализаторы спектра, источники питания и т. д.), а также другим испытательным и технологическим оборудованием, позволяющим быстро прототипировать печатные платы и электронные устройства (инструменты для поверхностного монтажа, фрезеровки и 3D-печати двухслойных печатных плат).

Изначально 3D-печать использовалась для сокращения времени разработки за счет изготовления прототипов изделий. Это не всегда целесообразно из-за высокой цены на токопроводящие чернила. В состав токопроводящих чернил входят наночастицы серебра, что делает серебросодержащие чернила дорогим материалом для печатной электроники. Решением данной проблемы может стать переход от серебра к меди. Однако данную задачу не удастся решить, поскольку медь гораздо более активна, чем серебро, и относительно быстро окисляется на воздухе, образуя изолирующий оксид меди. Применение различных технологических подходов, например печать в инертной атмосфере, не уменьшает стоимость печати и снижает долговечность изделия. На данный момент серебро остается

основным материалом для токопроводящих чернил.

Сейчас 3D-печать может быть использована для производства уникальных изделий, с индивидуальными характеристиками, и небольших партий изделий, которые невозможно и нецелесообразно изготавливать традиционными методами. Она помогает создавать изделия с трехмерной компоновкой и в отличие от традиционных методов с планарной компоновкой элементов позволяет сократить размер, вес конечного изделия, увеличить точностные характеристики и уменьшить время производства изделия.

### Литература

1. [www.idtechex.com/en/research-report/flexible-printed-and-organic-electronics-2020-2030-forecasts-technologies-markets/687](http://www.idtechex.com/en/research-report/flexible-printed-and-organic-electronics-2020-2030-forecasts-technologies-markets/687)
2. [www.it-world.ru/news-company/releases/178262.html](http://www.it-world.ru/news-company/releases/178262.html)
3. [www.idtechex.com/en/research-report/3d-electronics-additive-electronics-2022-2032/860](http://www.idtechex.com/en/research-report/3d-electronics-additive-electronics-2022-2032/860)
4. [www.printedelectronicsnow.com/contents/view\\_online-exclusives/2022-03-16/the-conductive-ink-market-is-showing-growth/?widget=listSection](http://www.printedelectronicsnow.com/contents/view_online-exclusives/2022-03-16/the-conductive-ink-market-is-showing-growth/?widget=listSection)

5. [www.idtechex.com/en/research-report/3d-printing-hardware-2022-2032-technology-and-market-outlook/853](http://www.idtechex.com/en/research-report/3d-printing-hardware-2022-2032-technology-and-market-outlook/853)
6. Мартынова А. Н., Михайлиди А. М. Обзор возможностей цифровой печати для создания изделий электроники и «умной» упаковки. Материалы V Всероссийской научно-технической конференции. Омск, 2020.
7. Бородин С. М. Общие вопросы проектирования радиоэлектронных средств. Учебн. пос. Ульяновск, УлГТУ, 2007.
8. 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. No. 7.
9. [www.linkedin.com/pulse/sphere-phased-array-antenna-valentin-storz?trk=articles\\_directory](https://www.linkedin.com/pulse/sphere-phased-array-antenna-valentin-storz?trk=articles_directory)
10. Жданкин В. Н., Кирик Д. И. Использование объема печатной платы для размещения компонентов при аддитивном производстве. Сб. научных статей АПИНО 2021. Т. 3. СПб., 2021.