

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 658.5.012.14

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-28-37>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Текущие возможности технологии прототипирования многослойных печатных плат на 3D-принтере

Д.С. Воруничев[®], К.Ю. Воруничева

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: vorunichev@mirea.ru

Резюме. Исследовано новое направление в 3D-печати – прототипирование односторонних, двухсторонних и многослойных печатных плат. Определены текущие возможности и ограничения технологии 3D-печати печатных плат. Проведен сравнительный анализ характеристик двух представленных в отрасли для прототипирования радиоэлектроники настольных 3D-принтеров, а также первой профессиональной машины DragonFly LDM 2020, являющейся минифабрикой по прототипированию многослойных печатных плат. Представлен первый практический опыт работы и печати на DragonFly LDM 2020, поставленном в мегалабораторию «3D-прототипирование и контроль многослойных печатных плат» Института радиотехнических и телекоммуникационных систем МИРЭА – Российского технологического университета. Получены первые образцы напечатанных на 3D-принтере электронных плат методом струйной печати. Рассмотрена аддитивная технология процесса изготовления многослойных печатных плат, представляющая собой печать двумя печатающими головками токопроводящими и диэлектрическими наночернилами с двумя системами отверждения: инфракрасная система спекания для токопроводящих чернил и УФ-система отверждения диэлектрических чернил. Приведен метод производства LDM (DragonFly Lights-out Digital Manufacturing – технология круглосуточного аддитивного производства) с необходимым техническим обслуживанием. Этот метод позволяет системе работать круглосуточно с минимальным участием человека, существенно увеличив производительность 3D-печати и расширяя возможности изготовления прототипов. Исследованы применяемые для 3D-печати многослойных печатных плат материалы и их характеристики: диэлектрические акрилатные наночернила (Dielectric Ink 1092 – Dielectric UV Curable Acrylates Ink) и проводящие чернила с наночастицами серебра (AgCite™ 90072 Silver Nanoparticle Conductive Ink). Проведенное исследование позволяет сравнить технологические нормы печатной электроники с традиционными методами изготовления многослойных печатных плат по ряду параметров.

Ключевые слова: 3D-печать, многослойные печатные платы, прототипирование, LDM, аддитивная технология, 3D-принтер электроники, наночернила

• Поступила: 02.07.2020 • Доработана: 21.10.2020 • Принята к опубликованию: 15.03.2021

Для цитирования: Воруничев Д.С., Воруничева К.Ю. Текущие возможности технологии прототипирования многослойных печатных плат на 3D-принтере. *Российский технологический журнал*. 2021;9(4):28–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-28-37>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Current capabilities of prototyping technologies for multilayer printed circuit boards on a 3D printer

Dmitry S. Vorunichev[®], Kristina Yu. Vorunicheva

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: vorunichev@mirea.ru

Abstract. A new direction in 3D printing was investigated – prototyping of single-sided, double-sided and multilayer printed circuit boards. The current capabilities and limitations of 3D printed circuit board printing technology were identified. A comparative analysis of the characteristics of two desktop 3D printers presented in the industry for prototyping radio electronics, as well as the first professional machine DragonFly LDM 2020, which is a mini-factory for prototyping multilayer printed circuit boards, was carried out. The first practical experience of working and printing on DragonFly LDM 2020 supplied to the megalaboratory “3D prototyping and control of multilayer printed circuit boards” of the Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems MIREA – Russian Technological University is presented. The first samples of electronic boards printed on a 3D printer by the method of inkjet printing were obtained. An additive technology for the production of multilayer printed circuit boards is considered: printing with two printheads with conductive and dielectric nano-ink with two curing systems: an infrared sintering system for conductive ink and a UV curing system for dielectric ink. The LDM (Dragonfly Lights-out Digital Manufacturing) production method with the necessary maintenance is presented. The method allows the system to work round-the-clock with minimal human intervention, significantly increasing the productivity of 3D printing and expanding the possibilities of prototyping. The materials used for 3D printing of multilayer printed circuit boards and their characteristics were investigated: dielectric acrylate nano-ink (Dielectric Ink 1092 – Dielectric UV Curable Acrylates Ink), conducting ink with silver nanoparticles (AgCite™ 90072 Silver Nanoparticle Conductive Ink). The research carried out allows us to compare the technological standards of printed electronics with traditional methods of manufacturing multilayer printed circuit boards for a number of parameters.

Keywords: 3D printing, multilayer printed circuit boards, prototyping, LDM, additive technology, 3D printer electronics, nano inks

• Submitted: 02.07.2020 • Revised: 21.10.2020 • Accepted: 15.03.2021

For citation: Vorunichev D.S., Vorunicheva K.Yu. Current capabilities of prototyping technologies for multilayer printed circuit boards on a 3D printer. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(4):28–37 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-28-37>

Financial disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Технология 3D-печати однотипными материалами, такими как термопласты или металлический порошок для прототипирования элементов конструкций, известна достаточно давно. Выпущена большая номенклатура промышленного оборудования от любительского до профессионального уровня, отлажен технологический процесс. По данному направлению наработан значительный опыт, позволяющий достоверно говорить о возможностях и ограничениях 3D-печати однотипными материалами. Современные возможности достаточны для

производства механических деталей, например, в машиностроении.

Однако до недавнего времени возможности 3D-печати прототипов электронных и радиоэлектронных средств были ограничены или недоступны вовсе ввиду сложности конструкций и необходимости поиска и применения многокомпонентных материалов, соответствующих по своим характеристикам конструктивным, технологическим и электрическим свойствам, предъявляемым к прототипам радиоэлектронных устройств на печатных платах. В настоящее время 3D-печать нашла применение и в радиоэлектронной отрасли для прототипирования устройств

на печатных платах [1]. Первый полнофункциональный 3D-принтер, позволяющий печатать даже самые сложные прототипы многослойных печатных плат непосредственно по производственным Gerber-файлам, выпущенным из электрических САД-систем автоматизированного проектирования, был поставлен на рынок в 2015 году. Технология имела существенные ограничения, но за 5 лет ее возможности продвинулись прорывным образом. Позволяющий печатать многослойные печатные платы 3D-принтер DragonFly израильской фирмы Nano Dimension за 5 лет поставлен уже более чем на 100 предприятий и организаций по всему миру, от научно-исследовательских организаций, производственных компаний, ведущих мировых университетов до военных предприятий. Однако известно, что по состоянию на конец 2020 года в Россию поставлено всего две такие машины. Машина DragonFly LDM в 2020 году была закуплена и установлена в МИРЭА – Российском технологическом университете в Институте радиотехнических и телекоммуникационных систем на кафедре конструирования и производства радиоэлектронных средств в рамках создания мегалаборатории «3D-прототипирование и контроль многослойных печатных плат». Она стала первой, введенной в эксплуатацию после пуско-наладочных работ в марте 2020 года, на которой были распечатаны образцы прототипов многослойных печатных плат.

У технологии 3D-принтера DragonFly LDM есть несколько конкурентов из США и Канады [2], но проведенный в данной статье сравнительный анализ показывает, что технология данных устройств существенно уступает ей по возможностям. Таким образом, можно утверждать, что 3D-принтер DragonFly LDM – единственная на сегодня в своем профессиональном классе машина, позволяющая печатать многослойные печатные платы сложной конфигурации, фактически с неограниченным числом слоев (существуют только физические ограничения рабочего стола). Кроме сравнительного анализа технических характеристик проведено исследование основных возможностей и ограничений технологического процесса 3D-печати многослойных печатных плат на основе практического опыта использования DragonFly LDM 2020. Рассмотрена аддитивная технология процесса изготовления многослойных печатных плат, представляющая собой печать двумя печатающими головками токопроводящими и диэлектрическими наночернилами с двумя системами отверждения: инфракрасная система спекания для токопроводящих чернил и УФ-система отверждения диэлектрических чернил. Приведен метод производства LDM (Dragonfly Lights-out Digital Manufacturing – технология круглосуточного аддитивного производства) с необходимым техническим обслуживанием, который позволяет системе работать

круглосуточно с минимальным участием человека, существенно увеличив производительность 3D-печати и расширяя возможности изготовления прототипов.

Цель работы – исследование новой технологии 3D-печати многослойных печатных плат, ее текущих возможностей и ограничений.

1. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ 3D-ПЕЧАТИ УСТРОЙСТВ НА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ

Возможность 3D-печати устройств на печатных платах появилась сравнительно недавно и отличается от освоенной в отрасли печати термопластами и металлическими порошками, прежде всего, необходимостью применения сложных многокомпонентных материалов и технологии их отверждения с конструкторскими, электрическими и технологическими характеристиками, близкими к традиционной технологии. Одним из первых законченных решений стало появление в 2015 году 3D-принтера V-One канадской фирмы Voltera, позволяющего быстро изготовить прототип печатной платы дизайн-центрам самостоятельно [3]. Традиционная технология изготовления печатных плат, как правило, на производственных мощностях контрактного производителя электроники, может длиться до нескольких недель. Кроме того, контрактное производство предполагает передачу производственных Gerber-файлов разработанного устройства третьей стороне, что несет некоторые риски интеллектуальной собственности. При использовании 3D-принтера Voltera V-One изготовление одной несложной односторонней печатной платы занимает около часа. В 2015 году компания Voltera вошла в список победителей престижной международной премии James Dyson Award.

Основные характеристики 3D-принтера Voltera V-One представлены в таблице 1.

В 2016 году было представлено решение от компании Botfactory из США – Squink, а вскоре появилась и вторая, улучшенная модель SV2, позволившая осуществлять 3D-печать с более тонким допуском, на более высокой скорости и имеющая рабочую область большего размера [4]. В настоящее время модель SV2 представлена линейкой из трех вариантов исполнения. Базовая версия «SV2-starter» по соотношению цены и характеристик находится на уровне 3D-принтера Voltera V-One. Версия «SV2-enhanced» получила улучшенные характеристики печати, но при этом стоимость увеличилась примерно на 50% по сравнению с базовой версией. Профессиональное решение «SV2-Professional» имеет не только еще более высокие характеристики 3D-печати, но и возможность изготавливать прототипы многослойных печатных плат до 6 слоев, что существенно увеличивает возможность прототипирования сложных

устройств (другие рассмотренные устройства позволяют изготавливать только односторонние и двухсторонние печатные платы). Стоимость решения «SV2-Professional» в 2.5 раза выше базовой версии модели. Стоит отметить, что все рассмотренные модели устройств имеют настольное исполнение, что является существенным преимуществом. Основные

характеристики 3D-принтеров SV2 и трех вариантов его исполнения представлены в табл. 1.

Представителем совершенно другого класса является 3D-принтер DragonFly LDM 2020 израильской фирмы Nano Dimension, позволяющий изготавливать сложные многослойные печатные платы и являющийся, по сути, минифабрикой.

Таблица 1. Сравнительный анализ 3D-принтеров печатных плат

Параметр	Модель V-ONE	Модель SV2-starter	Модель SV2-enhanced	Модель SV2-Professional
Производитель	Voltera (Канада)	Botfactory (США)	Botfactory (США)	Botfactory (США)
Фото				
Печать токопроводящей схемы	Да Диспенсером (только высокие проводники)	Да Струйная печать	Да Струйная печать	Да Струйная печать (включая резистивные чернила, позволяющие печатать встроенные компоненты)
Печать диэлектрика	Нет	Да Струйная печать	Да Струйная печать	Да Струйная печать
Печать многослойных плат	Нет	Нет	Нет	Да (1–6 слоев)
Метод формирования межслойных переходов	Сверление/фрезерование + установка заклепок	3D-печать для заполненных отверстий + установка заклепок для сквозных отверстий	3D-печать для заполненных отверстий + установка заклепок для сквозных отверстий	3D-печать для заполненных отверстий + установка заклепок для сквозных отверстий
Возможность делать глухие/ скрытые отверстия	Нет	Нет	Нет	Да
Нанесение паяльной пасты диспенсером	Да	Да	Да	Да
Нанесение токопроводящего клея	Неизвестно	Да	Да	Да
Оплавление	Интегрировано в установку	Не интегрировано	Не интегрировано	Не интегрировано
Установка компонентов	Нет	Да В наличии видеокамера для совмещения, а также магазин компонентов	Да В наличии видеокамера для совмещения, а также магазин компонентов	Да В наличии видеокамера для совмещения, а также магазин компонентов
Минимальный проводник	200 мкм	200 мкм	200 мкм	200 мкм
Отверстия (минимальные)	400 мкм под заклепку	400 мкм под заклепку 600 мкм заполненное	400 мкм под заклепку 600 мкм заполненное	400 мкм под заклепку 600 мкм заполненное
Шаг выводов	0.65 мм (печать)	0.61 мм	0.51 мм	0.41 мм
Компоненты	Неизвестно	SOIC, SSOP, TSOP Type II (20–54), TSSOP (8–38), QFP (0.8 mm)	SOIC, SSOP, TSOP Type II (20–86), TSOP Type I, TSSOP (8–64), QFP (0.5 mm)	SOIC, SSOP, TSOP Type II (20–86), TSOP Type I, TSSOP (8–80), QFP (0.4 mm)
Размер печати	128 × 105 мм	152 × 117 мм	152 × 117 мм	152 × 117 мм
Сопrotивление	12mΩ/Sq * *Комментарий изготовителя: указано для 70 мкм высоты проводника	40 mOhms/square (указано для невысоких проводников)	40 mOhms/square (указано для невысоких проводников)	40 mOhms/square (указано для невысоких проводников)
Гарантия на оборудование	1 год	2 года	2 года	2 года

2. ТЕКУЩИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ НА 3D-ПРИНТЕРЕ DRAGONFLY LDM 2020

Израильская компания Nano Dimension была основана в 2012 году и специализируется на разработке 3D-печатных электронных систем и совершенствовании аддитивной технологии производственных процессов. Основным продуктом – первый 3D-принтер многослойных печатных плат и основанные на нанотехнологиях проводящие и диэлектрические чернила нового поколения. Первая машина – 3D-принтер DragonFly Nano Dimension – была поставлена в 2015 году, и за прошедшие 5 лет технология существенным образом была улучшена. Сегодня это полностью профессиональное решение, которое создает в индустрии 3D-печати целое новое направление – прототипирование многослойных печатных машин для радиоэлектронной промышленности. Всего на текущий момент поставлено уже более 100 таких машин на различные предприятия во всем мире. Однако в Россию пока было поставлено всего две такие машины, причем пуско-наладка произведена только у 3D-принтера, поставленного в МИРЭА – Российский технологический университет. Компанией Nano Dimension создано профессиональное сообщество по исследованию и

совершенствованию технологии непосредственно пользователями 3D-принтера DragonFly, в которое вошли сотрудники Института радиотехнических и телекоммуникационных систем и компании ООО «Остек-СТ». Существуют «доверенная» область знаний, гарантирующая результат и заявленные характеристики, и «исследуемая», в рамках которой происходит постоянное совершенствование технологии. Применяемый материал для 3D-печати многослойных печатных плат по своим характеристикам является близким к FR-4. В 2017 году компанией получен грант комитета MEIMAD Израильского управления инноваций для разработки технологии 3D-печати керамических материалов.

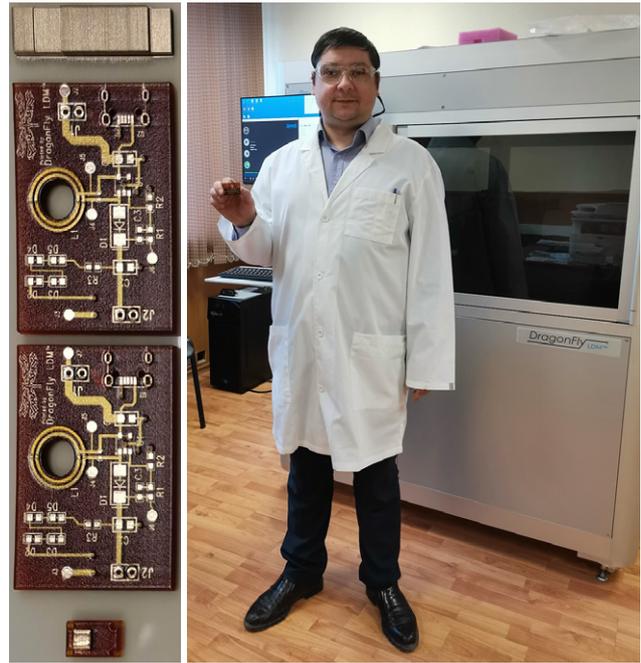
Актуальной задачей является исследование применения технологии, ее возможностей и ограничений на основе практического использования 3D-принтера DragonFly, поскольку анализ показывает сравнительно небольшое число имеющихся публикаций по теме исследования, которые, в основном, носят обзорный характер. Первый 3D-принтер DragonFly LDM 2020 многослойных печатных плат, пуско-наладка которого была выполнена в марте 2020 года в рамках мегалаборатории «3D-прототипирование и контроль многослойных печатных плат» Института радиотехнических и телекоммуникационных систем, показан на рис. 1.



Рис. 1. 3D-принтер DragonFly LDM 2020 мегалаборатории 3D-прототипирования и контроля многослойных печатных плат: установка DragonFly LDM 2020 (а); демонстрация технологии 3D-печати на установке DragonFly LDM 2020 (б)

После выполнения пуско-наладочных работ была успешно распечатана квалификационная плата, которая продемонстрировала стабильность и отлаженность технологического процесса 3D-печати многослойных печатных плат. Распечатанные первые образцы тестовых многослойных печатных плат (рис. 2) позволили провести первичное исследование основных возможностей и ограничений новой технологии. На основе практического использования 3D-принтера DragonFly LDM 2020 исследован метод производства LDM с необходимым техническим обслуживанием, позволяющий системе работать круглосуточно с минимальным участием человека, существенно увеличив производительность 3D-печати и расширяя возможности изготовления прототипов. Стоит отдельно отметить, что машина, которая работает круглосуточно, относится к системам непрерывного цикла. Для непрерывного цикла использования машина подключается через сертифицированный источник бесперебойного питания. Для обеспечения такого режима работы регулярно осуществляются три вида технического обслуживания машины: ежедневное, недельное и двухнедельное.

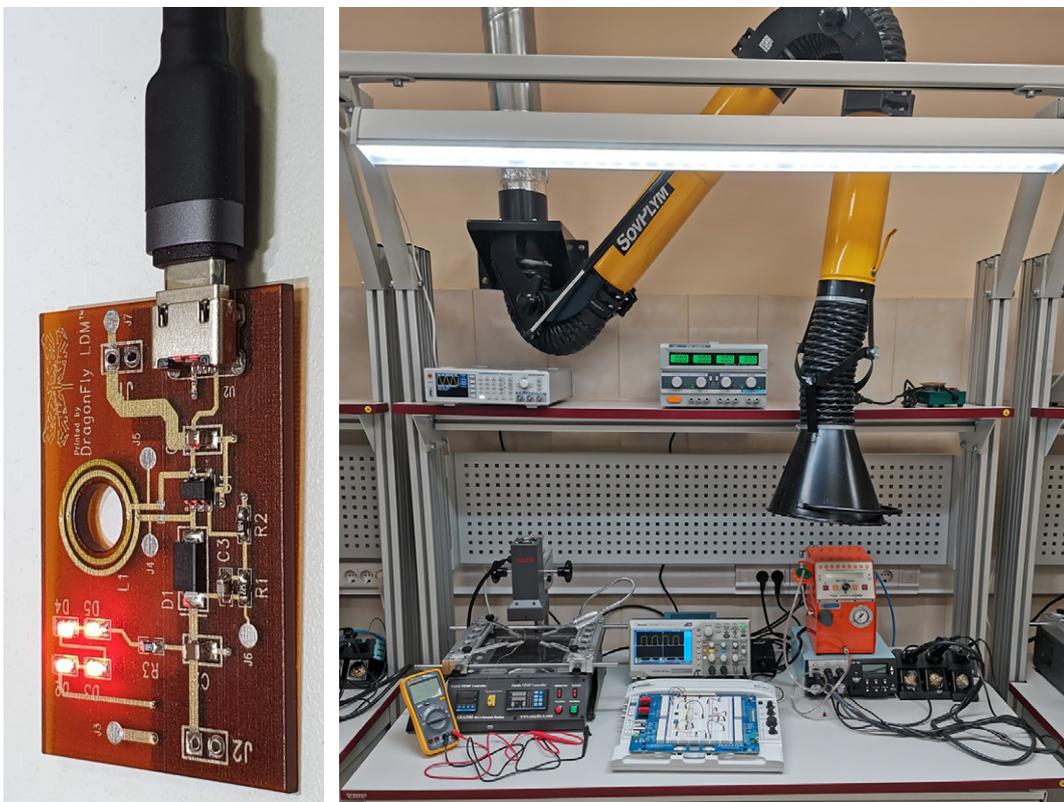
После 3D-печати первых образцов многослойной печатной платы, содержащей встроенные печатные компоненты (трансформатор), был произведен монтаж в лаборатории сборки и монтажа



(а) (б)

Рис. 2. Первые распечатанные образцы печатных плат (а) и демонстрация верификации на соответствие параметров печати (б)

радиоэлектронных средств кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств (рис. 3), который подтвердил работоспособность



(а) (б)

Рис. 3. Монтаж первой 20-слойной платы с печатным многослойным ВЧ-трансформатором в лаборатории сборки и монтажа радиоэлектронных средств: собранный образец печатного узла (а); оборудование, на базе которого осуществлялся монтаж и тестирование печатного узла (б)

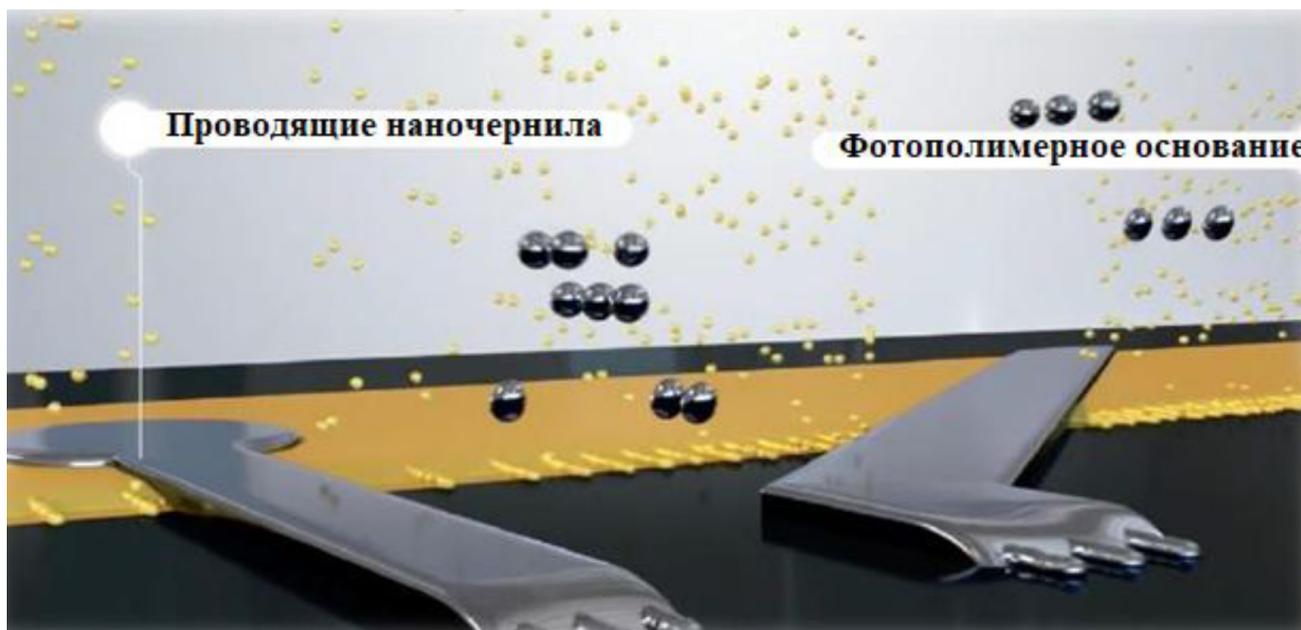


Рис. 4. Токопроводящие и диэлектрические наночернила [7]

изделия и стабильность технологического процесса 3D-печати. Запланирован эксперимент по исследованию конструкционных характеристик, изготовленных по новой технологии прототипов многослойных печатных плат и методов и средств улучшения параметров и технологии. Исследуются физико-химические характеристики наночернил на предмет улучшения их токопроводящих свойств; ведется микровизионный металлографический анализ структуры проводящих и непроводящих элементов конструкции по методам исследования «в светлом поле» и «в темном поле».

Текущие возможности технологии прототипирования многослойных печатных плат на 3D-принтере DragonFly LDM 2020 позволяют обеспечить защиту оригинальных радиотехнических изделий для дизайн-центров, поскольку прототипирование не передается третьей стороне – контрактному производителю электроники. 3D-принтер DragonFly LDM 2020, по сути, является мини-фабрикой, которую можно развернуть у разработчика без организации промышленного производства. Сам распечатанный прототип новой разработки позволяет провести проверку идеи, схемы и монтажа устройства. Прототипирование устройств на многослойных печатных платах применимо для различных отраслей: бытовая электроника, телекоммуникации, автомобильная промышленность, спецприменения и ОПК, авиационная и космическая промышленность, медицина. Существенное сокращение сроков прототипирования «от идеи до устройства» позволяет за несколько часов получить готовый прототип изделия [5]. Технологические нормы технологии:

- минимальная ширина проводник/зазор: 100 мкм;
- минимальная толщина слоя: 10 мкм;
- максимальная толщина слоя: 3 мм;
- диаметр капли диэлектрика: 3 мкм;
- диаметр капли токопроводящих чернил: 50 нм;
- диаметр сквозных отверстий: 400 мкм;
- диаметр неметаллизированных отверстий, 400 мкм;
- диаметр глухих отверстий: <200 мкм;
- максимальные размеры платы: 200 × 200 × 3 мм;
- время печати платы: от 3 до 20 часов (примерно, зависит от заполнения платы);
- максимальная температура пайки: 140 °С.

При тонкой печати диэлектрический материал может быть использован для однократного сгиба, а сама печать не является планарной и может быть объемной. Послойная печать слоев позволяет применять в технологии встроенные компоненты. Выбор формы аддитивной 3D-печати не ограничен, что позволяет изготавливать изделия различной сложной геометрии, в том числе осуществлять монтаж компонентов на торцах печатной платы. Некоторые компоненты, например, такие как конденсаторы, могут быть распечатаны непосредственно на самой плате [6].

Основными элементами принтера являются две печатающие головки и две системы отверждения. Печатающая головка для нанесения токопроводящих чернил дополнена инфракрасной системой спекания, а диэлектрических чернил – УФ-системой отверждения (рис. 4).

В табл. 2 представлены параметры токопроводящих наночернил, а в табл. 3 – параметры диэлектрических чернил [7].

Таблица 2. Параметры токопроводящих наночернил

Параметр	Значение
Торговая марка	AgCite™ 90072 Silver Nanoparticle Conductive Ink
Внешний вид (цвет, форма)	Серая суспензия
Содержание металла (серебро)	50%
Диаметр частиц, нм	50
Вязкость [Па·с]	20
Плотность [г/мл]	1.82
Поверхностное натяжение [мН/м]	31
Температура спекания, °С	Минимальная, 140 Максимальная, 170
Проводимость (серебряные наночастицы) [См/м при 20 °С, σ]*	$3.15 \cdot 10^6 - 2.52 \cdot 10^7$
Максимальная температура оплавления припоя, °С	165
Максимальная температура для ручной пайки, °С	220
Шероховатость	Верхняя поверхность, менее 2 мкм Нижняя поверхность, менее 0.25 мкм
Условия хранения, °С	18–22
Срок годности	1 год

* Проводимость серебра – $6.30 \cdot 10^7 \sigma$ (См / м) при 20 °С.

Таблица 3. Параметры диэлектрических наночернил

Параметр	200 МГц	500 МГц	1 ГГц	2 ГГц	5 ГГц	10 ГГц	15 ГГц	20 ГГц
Диэлектрическая проницаемость (Dk)	2.80	2.81	2.81	2.80	2.78	2.76	2.75	2.78
Тангенс угла диэлектрических потерь (Df)	0.000	0.004	0.006	0.011	0.012	0.013	0.013	0.012

При необходимости предусмотрена процедура перевода машины в режим длительного ожидания (до 3 недель) или ее полной консервации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хесин С. 3D-принтер DragonFly – революционное решение для изготовления многослойных печатных плат. *Электроника: наука, технология, бизнес.* 2018;179(8):134–136. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2018.179.8.134.136>
2. Фрицлер К.Б., Принц В.Я. Методы трехмерной печати микро- и наноструктур. *Успехи физических наук.* 2019;189(1):55–71. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.11.038239>
3. Смирнова О., Боброва Ю., Моисеев К. Анализ методов 3D-печати для изготовления печатных плат: общие положения. Часть 1. *Технологии в электронной промышленности.* 2020;124(8):20–25.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было исследовано новое направление в 3D-печати – прототипирование многослойных печатных плат [8]. На основе практического использования первого 3D-принтера многослойных печатных плат определены основные возможности и ограничения технологии. Представлен первый практический опыт работы и печати на DragonFly LDM 2020 в мегалаборатории «3D-прототипирование и контроль многослойных печатных плат» Института радиотехнических и телекоммуникационных систем МИРЭА – Российского технологического университета. Приведен метод производства LDM с необходимым техническим обслуживанием, который позволяет системе работать круглосуточно с минимальным участием человека, существенно увеличив производительность 3D-печати и расширяя возможности изготовления прототипов. Исследованы применяемые для 3D-печати многослойных печатных плат материалы и их характеристики, близкие по параметрам к FR-4. Запланирован эксперимент по исследованию конструкционных характеристик, изготовленных по новой технологии прототипов многослойных печатных плат и методов и средств улучшения параметров и технологии. Исследуются физико-химические характеристики наночернил на предмет улучшения их токопроводящих свойств; ведется микровизионный металлографический анализ структуры проводящих и непроводящих элементов конструкции по методам исследования «в светлом поле» и «в темном поле» [9–15].

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

REFERENCES

1. Khesin S. DragonFly 3D Printer is a revolutionary solution for the manufacture of multilayer printed circuit boards. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business.* 2018;179(8):134–136 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2018.179.8.134.136>
2. Fritsler K.B., Prinz V.Y. 3D printing methods for micro- and nanostructures. *Physics-Uspekhi.* 2019;62(1):54–69. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.11.038239> [Fritsler K.B., Prints V.Ya. Metody trekhmernoi pechati mikro- i nanostruktur. *Uspekhi fizicheskikh nauk.* 2019;189(1):55–71 (in Russ.).]

4. Cook B., Tehrani B., Cooper J., Kim S., Tentzeris M., *et al.* Integrated printing for 2D/3D flexible organic electronic devices. In book: *Handbook of Flexible Organic Electronics*. Cambridge: Woodhead Publishing; 2015. P. 199–216. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-035-4.00008-7>
5. Хесин С. 3D-принтер DragonFly – революция в изготовлении многослойных печатных плат. *Вектор высоких технологий*. 2018;4(39):38–41.
6. Butt J. Exploring the interrelationship between additive manufacturing and industry 4.0. *Designs*. 2020;4(2):13. <https://doi.org/10.3390/designs4020013>
7. DragonFly LDM. Inks user guide NanoDimension. Ness Ziona: Nano Dimension technologies document. 2020. 52 p. URL: <https://www.nano-di.com/ame-dragonfly-ldm-2-0>
8. Fried S. 3D printing technologies for electronics. *Journal of the Imaging Society of Japan*. 2017;56(6):617–620. <https://doi.org/10.11370/isj.56.617>
9. Костин М.С., Воруничев Д.С., Корж Д.А. Контрреинжиниринг радиоэлектронных средств. *Российский технологический журнал*. 2019;7(1):57–79 <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-57-79>
10. Vorunichev D.S., Kostin M.S., Zamuruev S.N. Classification of methods of reverse engineering in the configuration management of original high-tech radio electronic products. In: *2018 IEEE International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS)*, 24–28 Sept. 2018. <https://doi.org/10.1109/ITMQIS.2018.8524910>
11. Иванов В.С., Гладкий Д.А., Воруничев Д.С. LPKF-LDS-технология производства трехмерных схем на пластиках. *Российский технологический журнал*. 2021;9(1):48–57. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-48-57>
12. Ежов В., Елисеев Н., Ковалевский Ю., Мейлицев В. Productronica и Semicon Europa 2019: автоматизация и скорость. Часть 2. *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2020;193(2):32–59. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2020.193.2.32.58>
13. Лангау Л., Очур О. Прототипирование печатных плат с помощью аддитивных технологий. *Технологии в электронной промышленности*. 2020;124(8):26–27.
14. Дрор А. 3D-печать: высокое качество и малые объемы производства. *Технологии в электронной промышленности*. 2020;124(8):28–29.
15. Dong Y., Bao C., Kim W.S. Sustainable additive manufacturing of printed circuit boards. *Joule (Cell Press)*. 2018;(2):579–582. <http://dx.doi.org/10.1016/j.joule.2018.03.015>
3. Smirnova O., Bobrova J., Moiseev K. Analysis of 3D printing methods for the manufacture of printed circuit boards: general provisions. Part 1. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti = Technologies in the Electronic Industry*. 2020;124(8):20–25 (in Russ.).
4. Cook B., Tehrani B., Cooper J., Kim S., Tentzeris M., *et al.* Integrated printing for 2D/3D flexible organic electronic devices. In book: *Handbook of Flexible Organic Electronics*. Cambridge: Woodhead Publishing; 2015. P. 199–216. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-035-4.00008-7>
5. Khesin S. DragonFly 3D printer is a revolution in multilayer PCB manufacturing. *Vektor vysokikh tekhnologii = The Hi-Tech Vector Research and Practice Journal*. 2018;4(39):38–41 (in Russ.).
6. Butt J. Exploring the interrelationship between additive manufacturing and industry 4.0. *Designs*. 2020;4(2):13. <https://doi.org/10.3390/designs4020013>
7. DragonFly LDM. Inks user guide NanoDimension. Ness Ziona: Nano Dimension technologies document. 2020. 52 p. Available from URL: <https://www.nano-di.com/ame-dragonfly-ldm-2-0>
8. Fried S. 3D printing technologies for electronics. *Journal of the Imaging Society of Japan*. 2017;56(6):617–620. <https://doi.org/10.11370/isj.56.617>
9. Kostin M.S., Vorunichev D.S., Korzh D.A. Counterreengineering of electronic devices. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2019;7(1):57–79 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-57-79>
10. Vorunichev D.S., Kostin M.S., Zamuruev S.N. Classification of methods of reverse engineering in the configuration management of original high-tech radio electronic products. In: *2018 IEEE International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS)*, 24–28 Sept. 2018. <https://doi.org/10.1109/ITMQIS.2018.8524910>
11. Ivanov V.S., Gladky D.A., Vorunichev D.S. LPKF-LDS technology for the production of three-dimensional schemes on plastics. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(1):48–57 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-48-57>
12. Ezhov V., Eliseev N., Kovalevsky Yu., Meylitsev V. Productronica and Semicon Europa 2019: automation and speed. Part 2. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2020;193(2):32–59 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2020.193.2.32.58>
13. Langau L., Ochur O. Prototyping printed circuit boards using additive technologies. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti = Technologies in the Electronic Industry*. 2020;124(8):26–27 (in Russ.).
14. Dror A. 3D printing: high quality and low production volumes. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti = Technologies in the Electronic Industry*. 2020;124(8):28–29 (in Russ.).
15. Dong Y., Bao C., Kim W.S. Sustainable additive manufacturing of printed circuit boards. *Joule (Cell Press)*. 2018;(2):579–582. <http://dx.doi.org/10.1016/j.joule.2018.03.015>

Об авторах

Воруничев Дмитрий Сергеевич, старший преподаватель, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: vorunichev@mirea.ru.

Воруничева Кристина Юрьевна, магистрант, кафедра управления качеством и сертификации Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: krab83@list.ru.

About the authors

Dmitry S. Vorunichev, Senior Lecturer, Department of Design and Production of Radio-Electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: vorunichev@mirea.ru.

Kristina Yu. Vorunicheva, Master Student, Department of Quality Management and Certification, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: krab83@list.ru.