



**УТВЕРЖДАЮ**

И.о. проректора по научной  
работе и инновациям ТУСУРа  
Д.Т.Н., доцент

*А.В. Медовник* А.В. Медовник  
18 » 11 2024 г

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Диссертация «Компоненты и СВЧ-устройства, изготавливаемые на основе  
аддитивной принтерной технологии» выполнена в федеральном  
государственном автономном образовательном учреждении высшего  
образования ТУСУР на кафедре конструирования узлов и деталей  
радиоэлектронной аппаратуры (КУДР).

В период подготовки диссертации соискатель Труфанова Наталья  
Сергеевна работала в ТУСУР в должности младшего научного сотрудника  
лаборатории печатной электроники «Аддитив», обучаясь в очной аспирантуре  
ТУСУР по направлению 2.2 «Электроника, фотоника, приборостроение и  
связь», профиль 2.2.14 «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

В 2018 г. окончила бакалавриат ТУСУР по специальности 11.03.03  
«Конструирование и технология электронных средств», в 2021 г. окончила  
магистратуру ТУСУР по специальности «Электроника и наноэлектроника».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2024 г. в ТУСУР.

Научный руководитель – кандидат технических наук Артищев Сергей  
Александрович работает доцентом на кафедре КУДР ТУСУР.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

### **Оценка выполненной соискателем работы.**

Диссертация Труфановой Н.С. является научно-квалификационной  
работой, в которой решается задача обеспечения возможности применения

аддитивной принтерной технологии для изготовления компонентов и СВЧ-устройств. В результате проведенных автором исследований разработаны научно-обоснованные решения, которые позволяют изготавливать однородные в поперечном сечении полосковые линии в режиме непрерывного нанесения вязких паст. При этом предложенные подходы по оптимизации аддитивной принтерной технологии позволяют изготавливать пассивные СВЧ-устройства, включая фильтры нижних/верхних частот и полосно-пропускающие, а также направленные ответвители со слабой боковой и сильной лицевой связью на различные диапазоны рабочих частот, включая L, S-диапазоны со средними вносимыми потерями менее 1 дБ. Предложенная оптимизация аддитивной принтерной технологии заключается в подобранной для паст с вязкостью 50–100 Па·с скорости перемещения дозатора 300–500 мм/мин.

#### **Актуальность темы и направленность исследования.**

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

В СВЧ-технике широкое применение находит технология трафаретной печати (LTCC, HTCC). Применение трафаретной печати сопряжено с рядом недостатков таких как дороговизна подготовки трафаретов и их совмещения; высокая трудоемкость операций; избыточный расход материалов; невозможность одновременного нанесения различных материалов.

Перспективной является принтерная технология с поршневым или шнековым дозированием материала на подложку при помощи специализированных устройств (принтеров) непосредственно по цифровой модели. Применение данной технологии позволит исключить изготовление трафаретов, снизить потери материала на формирование топологии, обеспечить



возможность изготовления многослойных ГИС в одном технологическом цикле и сократить время, обеспечить возможность быстрого прототипирования ГИС.

Применение прямой печати в задачах изготовления компонентов и узлов СВЧ-устройств является перспективным направлением. Во многом параметры СВЧ-компонентов, обеспечивающие качественную передачу и управление сигналом, зависят от четкости границ пленок, однородности внутренней структуры и геометрических параметров.

#### **Личное участие автора в получении результатов**

Все результаты работы получены автором лично или при его непосредственном участии в составе коллектива лаборатории печатной электроники, ТУСУР. Автор лично проводила математические расчеты, разрабатывала и изготавливала экспериментальные образцы СВЧ-узлов, проводила натурные эксперименты, разрабатывала составы паст, выполняла обработку экспериментальных данных.

#### **Степень достоверности результатов проведенных исследований**

Достоверность основных результатов работы подтверждается публикациями в рецензируемых журналах. Достоверность экспериментальных результатов подтверждается их совпадением с теоретическими расчетами.

#### **Новизна результатов проведенных исследований**

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

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

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

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

#### **Практическая значимость работы диссертации и использование полученных результатов**

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

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

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

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

Результаты диссертационной работы использованы в следующих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах:

1. «Разработка и исследование технологии аддитивного принтерного изготовления функциональных узлов и элементов интегральной электроники» (гос. задание FEWM-2022-0005, 2022-2024 г.)

2. «Разработка и исследование технологии изготовления многослойных гибридных интегральных схем с применением аддитивных методов принтерной печати» (Грант РНФ № 23-29-00400, 2023-2024 г.)



3. «Изготовление экспериментальных образцов с помощью прецизионного дозирования паст высокой вязкостью», Х/д 34/23, заказчик НИ ТПУ, г. Томск.

4. «Разработка и испытание опытного образца принтера печатных плат». (Грант Фонда содействия инновациям в рамках программы Старт. №373ГС1ЦТС10-D5/91112, 2024 г.)

### **Специальность, которой соответствует диссертация**

Диссертационная работа Труфановой Натальи Сергеевны по своему содержанию соответствует специальности 2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии», п.2 «Исследование характеристик антенн и микроволновых устройств для их оптимизации и модернизации, что позволяет осваивать новые частотные диапазоны, обеспечивать электромагнитную совместимость, создавать высокоэффективную технологию и т.д.», п.6 «Разработка и исследование новых технологий производства, настройки и эксплуатации антенных систем»

### **Ценность научных работ соискателя**

Часть работ опубликована в рецензируемом журнале, входящем в перечень ВАК, а также в сборниках трудов международных конференций, материалы которых цитируются базе данных Scopus.

**Основное содержание работы опубликовано** в 28 печатных работах, в т.ч. 3 статьи в журналах из перечня рекомендованных ВАК, 10 статей индексируемые в базах данных Scopus и Web of Science, 14 работ, опубликованы в материалах международных конференций. Получено 3 свидетельства регистрации программы ЭВМ. Список публикаций:

#### *Статьи в журналах из перечня ВАК:*

1. Применение аддитивной принтерной технологии для изготовления многослойных печатных плат / **Н.С. Труфанова** и др. // Нанотехнологии: разработка, применение - XXI век. Vol. 14. – № 4. 2022. – С. 37–44.

2. Поперечно-направленный ответитель на связанных линиях с накладным керамическим бруском / А. Н. Сычев, С. А. Артищев, Н. Ю.

Рудный, Н. С. Труфанова // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2024. – Vol. 7. – № 3. – pp. 473–484.

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

*Публикации, индексируемые в Scopus и WoS*

4. Microwave carbon elements / E. A. Ivanchikova, A. G. Loschilov, I. A. Ekimova, N. S. Trufanova et al. // 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.

5. Technique for extraction of electric frequency parameters of conductive ink / N.S. Trufanova et al. // IOP Publishing, 2022. – Vol. 2291. – №. 1. – pp. 012015.

6. Expanding the horizon of additive printing technologies application in the technique of coupled strip lines with heterogeneous dielectric filling A. G. Loschilov, T. T. Thanh, G. A. Malyutin, N. S. Trufanova et al. // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – IEEE, 2022. – pp. 256–261.

7. Manufacturing of Hybrid Integrated Circuits Using Additive Printer Technology / N.S. Trufanova et al. // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russian Federation, 2022. – pp. 1–5.

8. On the possibility of obtaining thermal control coatings for spacecraft by printing / M. M. Mikhailov, A. N. Lapin, S. A. Yuryev, V. A. Goronchko, S. A. Artishchev, N. S. Trufanova et al. // Materials Chemistry and Physics. – 2023. – Т. 310. – pp. 128472.

9. Optical Properties of the Dielectric Coating Manufactured by an Additive Method / M. M. Mikhailov, A. N. Lapin, S. A. Yuryev, V. A. Goronchko, S. A. Artishchev, N. S. Trufanova et al. // Russian Physics Journal. – 2024. – Т. 67. – №. 1. – pp. 87–93.



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

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

12. Focusing of a Paste Flow Upon Exposure to an External Electromagnetic Field / **N. S. Trufanova** et al. // Russian Physics Journal. – 2024. – T. 67. – №. 2. – pp. 229–235.

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

14. Study of the photo-stability of ceramic thermal control coating based on aluminium oxide / M. M. Mikhailov, A. N. Lapin, S. A. Yuryev, V. A. Goronchko, S. A. Artishchev, **N. S. Trufanova** et al. // Ceramics International. – 2024. – T. 50. – №. 21. – pp. 41039–41043.

*Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ*

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669436 Российская Федерация. Программа для управления блоком питания гальванической ванны: № 2022668144: заявл. 07.10.2022: опубл. 20.10.2022 / С.А. Артищев, И.Г. Ковалев, **Н.С. Труфанова**, С.А. Айрих.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023688146 Российская Федерация. Программное обеспечение для управления инфракрасной камерой спекания печатных плат, изготовленных аддитивным методом: № 2023687527: заявл. 13.12.2023: опубл. 20.12.2023 / Э.Р. Рагимов, **Н.С. Труфанова**, С.А. Артищев, Р.М. Гадиров.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665740 Российская Федерация. APCB Printer v. 2.1.1: № 2024662982: заявл. 10.06.2024: опубл. 05.07.2024 / С.А. Артищев, И.М. Макаров, К. Логинов, **Н.С. Труфанова**, Э.Р. Рагимов.

### *Материалы конференций*

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

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

20. **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.

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

22. **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.

23. **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.

24. Чепко Т.А. Изготовление диэлектрических паст с заданными характеристиками / Т.А. Чепко, **Н.С. Труфанова**, А. С. Труфанова // Материалы докладов международной научно-технической конференции



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

25. Автоматизированный стенд для измерения прецизионных линейных перемещений / **Н. С. Труфанова** и др. // Материалы докладов международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск: Издательство «В-Спектр».– 2022. – С. 93–95.

26. Автоматизированная гальваническая ванна с функцией контроля плотности тока / **Н. С. Труфанова** и др. // Материалы докладов международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск: Издательство «В-Спектр».– 2022. – С. 103–105.

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

28. Оценка производительности двухэкструдерной системы дозирования вязких паст / **Н. С. Труфанова** и др. // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР по материалам международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2023». – Томск: Издательство «В-Спектр».– 2023. – С. 203–206.

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

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

По своему содержанию, объему проведенных научных исследований, научной новизне, научной и практической значимости, количеству и качеству публикаций, достоверности полученных результатов, работа Труфановой Н.С. соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.


Диссертация «Компоненты и СВЧ-устройства, изготавливаемые на основе аддитивной принтерной технологии» Труфановой Натальи Сергеевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Заключение принято на расширенном экспертном научном семинаре кафедры конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры.


Присутствовало на заседании 14 чел. Результаты голосования: «за» - 13 чел., «против» - 1 чел., «воздержалось» - 1 чел.

Протокол № 252 от «18» 11 2024 г.

Председатель  
Докт. техн. наук, профессор каф. КУДР

 Э.В. Семенов

Секретарь  
Канд. техн. наук, доцент каф. КУДР

 А.А. Бомбизов