

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-149-157>
УДК 544.6



Оригинальная статья

О. Л. Войтик*, К. И. Делендик, Н. В. Коляго, Е. В. Ковальчук, Л. Ю. Рошин

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь*

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕЦИЗИОННОГО
ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОСТРУКТУР ТИПА «КВАДРАТ»
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОТОЛИТОГРАФИИ И ЭЛЕКТРОХИМИИ**

Аннотация. Для повышения интенсивности охлаждения мощных электронных компонент в системах теплоотвода активно применяются теплообменные конструкции с микроструктурами, кроме того, они перспективны в электромеханических датчиках, микрофлюидных чипах для лаборатории на кристалле (LOC). Исследование направлено на решение ключевых проблем изготовления микроструктур, связанных с сохранением характерных их размеров при высоком аспектном соотношении. Представлен комбинированный метод получения прецизионных металлических микроструктур, сочетающий ультрафиолетовую пленочную сухую фотолитографию с электрохимическим осаждением из медных и никелевых сульфатных электролитов. Проведен сравнительный анализ скорости осаждения частиц металла, особенностей краевого эффекта при изготовлении никелевых и медных микроструктур, приводящих к слиянию элементов в плотные дендритные образования. Отмечено влияние формы токопроводящей рамки на качество, геометрию и равномерность роста слоев на подложке при горизонтальном осаждении в установке для электрохимической металлизации. Получены микроструктуры типа «квадрат» со следующими параметрами: высота 100 ± 5 мкм, характерный размер 180 ± 5 мкм и межэлементный шаг 90 ± 5 мкм при сохранении вертикальных боковых стенок, хорошей адгезии к подложке, минимизации дефектов при осаждении металлов и четкой воспроизводимости геометрии микроструктур. Разработанная технология обеспечивает формирование механически устойчивых микроструктур, способных выдерживать экстремальные гидродинамические нагрузки.

Ключевые слова: медные микроструктуры, никелевые микроструктуры, фотолитография, электрохимическое осаждение, электрохимия, теплообменная поверхность

Благодарности: работа выполнена при поддержке Государственной программы научных исследований «Энергетические и ядерные процессы и технологии» на 2021–2025 годы, подпрограмма «Энергетические процессы и технологии», задание 2.14.1 «Разработка системы термостабилизации и процессов ее интегрирования в активную фазированную антенную решетку».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Войтик Ольга Леонидовна* – заведующий лабораторией процессов переноса в микроструктурах Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0000-0002-7062-042X>, e-mail: voitik@itmo.by; *Делендик Кирилл Иванович* – старший научный сотрудник лаборатории процессов переноса в микроструктурах Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0000-0002-0023-3387>, e-mail: kdelendik@yahoo.com; *Коляго Наталья Владимировна* – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории процессов переноса в микроструктурах Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0009-0005-9834-530X>, e-mail: kolyago@hmti.ac.by; *Ковальчук Евгений Викторович* – стажер младшего научного сотрудника лаборатории процессов переноса в микроструктурах Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, e-mail: ukpocht@yandex.by; *Рошин Леонид Юрьевич* – младший научный сотрудник лаборатории процессов переноса в микроструктурах Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0000-0001-9050-4007>, e-mail: leonid-13-99@mail.ru

Вклад авторов: *Войтик Ольга Леонидовна* – создание концепции, анализ и обобщение результатов исследования; *Делендик Кирилл Иванович* – разработка методологии исследования, интерпретация результатов исследования;

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Коляго Наталья Владимировна – работа с текстом рукописи, анализ и обобщение результатов исследования; Ковальчук Евгений Викторович – разработка оснастки, проведение экспериментального исследования; Рошин Леонид Юрьевич – проведение экспериментальных исследований, оформление и редактирование текста рукописи.

Для цитирования: Совершенствование процесса прецизионного изготовления микроструктур типа «квадрат» с использованием фотолитографии и электрохимии / О. Л. Войтик, К. И. Делендик, Н. В. Коляго [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 2. – С. 149–157. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-149-157>

Поступила в редакцию: 03.11.2025

Доработанный вариант: 06.04.2026

Утверждена к публикации: 04.06.2026

Подписана в печать: 15.06.2026

Original article

Olga L. Voitik*, Kirill I. Delendik, Natalia V. Kolyago, Yauheni V. Kavalchuk, Leonid Yu. Roshchyn

*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
15, P. Brovka St., 220072, Minsk, Republic of Belarus*

IMPROVEMENT OF THE PROCESS OF PRECISION FABRICATION OF “SQUARE”-TYPE MICROSTRUCTURES USING PHOTOLITHOGRAPHY AND ELECTROCHEMISTRY

Abstract. Currently microstructured heat exchangers are widely used in heat dissipation systems to increase the cooling intensity of high-power electronic components. They also hold promise for electromechanical sensors and microfluidic chips for laboratory-on-a-chip (LOC). This research aims to address key manufacturing challenges associated with maintaining the characteristic dimensions of microstructures at high aspect ratios. A combined method for fabricating precision metal microstructures is presented on the basis of ultraviolet dry film photolithography with electrochemical deposition from copper and nickel sulfate electrolytes. A comparative analysis of the metal particle deposition rate and the edge effect characteristics during the fabrication of nickel and copper microstructures leading to the fusion of elements into dense dendritic formations is carried out. The influence of the conductive frame shape on the quality, geometry, and uniformity of layer growth on the substrate during horizontal deposition in an electrochemical metallization system is noted. Square-type microstructures with height of $100 \pm 5 \mu\text{m}$, characteristic size of $180 \pm 5 \mu\text{m}$, and interelement pitch of $90 \pm 5 \mu\text{m}$ is obtained, while maintaining vertical sidewalls, good adhesion to the substrate, minimization of defects during metal deposition and precise reproducibility of the microstructure geometry. The developed technology ensures the formation of mechanically stable microstructures capable of withstanding extreme hydrodynamic loads.

Keywords: copper microstructures, nickel microstructures, photolithography, electrochemical deposition, electrochemistry, heat exchange surface

Acknowledgments: the work was supported by the State Program of Scientific Research “Energy and Nuclear Processes and Technologies”, Subprogram “Energy Processes and Technologies” for 2021–2025, Task 2.14.1 “Development of thermal stabilization system and processes for its integration into an active phased antenna array”.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Information about the authors: *Olga L. Voitik* – Head of the Laboratory of Transfer Processes in Microstructures at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-7062-042X>, e-mail: voitik@itmo.by; *Kirill I. Delendik* – Senior Researcher of the Laboratory of Transfer Processes in Microstructures at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-0023-3387>, e-mail: kdelendik@yahoo.com; *Natalia V. Kolyago* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher of the Laboratory of Transfer Processes in Microstructures at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0009-0005-9834-530X>, e-mail: kolyago@hmti.ac.by; *Yauheni V. Kavalchuk* – Intern of Junior Researcher of the Laboratory of Transfer Processes in Microstructures at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: ykpocht@yandex.by; *Leonid Yu. Roshchyn* – Junior Researcher of the Laboratory of Transfer Processes in Microstructures at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0000-0001-9050-4007>, e-mail: leonid-13-99@mail.ru

Contribution of the authors: *Olga L. Voitik* – conceptualization, analysis and generalization of the results; *Kirill I. Delendik* – methodology, interpretation of the results; *Natalia V. Kolyago* – review and editing, analysis and generalization of the results; *Yauheni V. Kavalchuk* – development of the equipment, experimental investigation; *Leonid Yu. Roshchyn* – experimental investigation, writing and formatting of the text of the manuscript.

For citation: Voitik O. L., Delendik K. I., Kolyago N. V., Kavalchuk E. V., Roshchyn L. Yu. Improvement of the process of precision fabrication of “square”-type microstructures using photolithography and electrochemistry. *Vestsi Natsyyanal’nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 2, pp. 149–157 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-149-157>

Received: 03.11.2025

Modified: 06.04.2026

Approved for publication: 04.06.2026

Signed to the press: 15.06.2026

Введение. С каждым годом проблема отвода тепла от энергонагруженной электроники обостряется: тепловые потоки растут, размеры уменьшаются, компоновка уплотняется, форм-фактор усложняется – все это критично сказывается на производительности, надежности, долговечности и безопасности оборудования. Увеличение тепловыделения на небольшой площади стимулирует развитие двухфазных устройств с высоким коэффициентом теплообмена. К теплообменным поверхностям предъявляется ряд требований: высокие значения коэффициента теплообмена и критического теплового потока, технологичность и масштабируемость процесса изготовления. Перспективным направлением интенсификации является структурирование теплообменной поверхности. Прирост коэффициента теплоотдачи на микроструктурированных поверхностях по сравнению с плоскими и гладкими поверхностями при кипении составляет 3–7 раз [1–4].

Современные тенденции в микро- и нанотехнологиях демонстрируют устойчивый рост требований к прецизионному изготовлению функциональных микроструктур для применения в микроэлектронике, MEMS-устройствах, микрофлюидных системах [5–7].

Среди технологий получения упорядоченных металлических микроструктур следует выделить набирающую популярность технологию 3D-печати (3DP, LOM, FDM/FFF, SLS и DMLS, SLM и EBM, CLAD, EBF₃) [8]. Существенными преимуществами 3D-печати являются универсальность, простота в обращении, точность печати, хорошая воспроизводимость результатов, способность обрабатывать широкий спектр материалов, возможность изготавливать функциональные и геометрически сложные 3D-структуры. Тем не менее послойное наращивание материалов приводит к ступенчатости боковых поверхностей микродеталей и возникновению межслойного несовпадения, что может обуславливать анизотропность механических свойств [9].

Классическим способом получения микроструктур является LIGA-процесс (LIGA – Lithographie (литография), Galvanoformung (гальванопокрытие) и Abformung (формовка)), используемый для создания структур с высоким аспектным соотношением сторон [10]. Синхротронное рентгеновское излучение имеет большую мощность и сверхмалое расхождение электромагнитного пучка (не больше 0,006°), формируя ровные отвесные стенки у MEMS-конструкций [11]. Таким образом, данная технология имеет большие возможности. В качестве основных ее недостатков можно назвать необходимость использования уникальных источников синхротронного излучения и высокую стоимость расходных материалов.

В этом контексте стандартные технологии микроэлектроники – фотолитография и гальваника – продолжают занимать значимую позицию среди методов микрофабрикации в сравнении с альтернативными технологиями (3D-печать металлов [9; 12], микрофрезерование, электроэрозии, LIGA-процесс [10]). Они обеспечивают высокое разрешение (до субмикронного уровня) [13], отличную воспроизводимость и масштабируемость производства, более низкую себестоимость при серийном производстве, возможность создания многоуровневых структур за счет многослойного выравнивания и тентирования. Несмотря на перспективность технологии, существует ряд проблемных задач: сохранение вертикальности боковых стенок и обеспечение высокой адгезии к подложке при высоком аспектном соотношении характерных размеров микроструктур; минимизация дефектов кромок при осаждении металлов; сохранение геометрии структуры и равномерности по высоте от центра к краям подложки. Представленное исследование сфокусировано на преодолении данных проблем.

Цель данной работы – получение медных и никелевых микроструктур типа «квадрат» на медной подложке при высоком аспектном соотношении характерных размеров микроструктур и сохранении их геометрии.

Предлагаемые технологические решения имеют значительный потенциал при изготовлении микроструктурированных теплообменных поверхностей, где критически важны точность геометрии и воспроизводимость параметров.

Материалы и методы. В качестве подложек для получения микроструктур были использованы медные пластины марки М1 размером 190 × 130 × 1 мм. Заготовки подвергались механической шлифовке; полировке; очищались в мыльном растворе; подвергались трехэтапной очистке в органических и неорганических растворителях; химически полировались (CrO₃ – 480 г/л, H₂SO₄ – 35 г/л, T = 70 °C) с использованием качающей оснастки.

При формировании микроструктур заданной геометрии электрохимическим осаждением применялся негативный пленочный фоторезист марки P50100 толщиной 100 мкм для металлизации печатных плат. Фоторезист наносился на медную заготовку с помощью ламинатора сухого резиста RLM 419p (Германия), позволяющего производить нанесение фоторезиста сразу с обеих сторон подложки.

Эскизы фотошаблонов были выполнены в программе САМ 350 и после конвертации в формат Gerber позиционировались в программе Gerber2Bitmap¹. Контроль размеров элементов осуществлялся в View FPF, управление фотоплоттером – в Flimstar². Печать фотошаблонов производилась на растровом барабанном фотоплоттере Flimstar-Plus (Bungard, Германия) со следующим графическим разрешением: диаметр наименьшей инвертированной области (прозрачная точка в черной области) – 25 мкм; наименьшее расстояние между двумя линиями – 10 мкм; наименьшее расстояние между двумя областями – 18 мкм; наименьший элемент (точка/линия) – 5 мкм.

Для получения рисунка на заготовке с фоторезистом использовалась установка экспонирования EXP8000/12000 (Германия), предназначенная для промышленного производства и оснащенная ртутно-галогенными лампами мощностью 4000 Вт. Лампы располагались на расстоянии около 90 см от печатной платы, обеспечивая почти параллельный свет. Обрабатываемые заготовки фиксировались в вакуумной раме, которая загружалась в зону экспонирования. Каждая заготовка совмещалась с напечатанным фотошаблоном и комплект помещался в установку экспонирования. Интенсивность излучения подбиралась эмпирически.

Заготовки с рисунком проявлялись в растворе (K_2CO_3 – 0,8 %, $T = 28–32$ °C, $t = 10$ мин) при постоянном контроле его концентрации, времени проявления, температуры раствора, интенсивности покачивания заготовки. Проявленные заготовки задубливались в сушильном шкафу SNOL 58/350 (Литва) при температуре 70 °C в течение 10 мин. Контроль внешнего вида и качества рисунка осуществлялся на оптическом микроскопе Euromex DZ.1805 с цифровой камерой MC6.3 (Нидерланды).

На рис. 1 представлена блок-схема технологических этапов получения упорядоченных медных и никелевых микроструктур на медной подложке с использованием фотолитографических, химических и электрохимических процессов.

Все электрохимические процессы выполнялись в вытяжном шкафу с активной приточно-вытяжной вентиляцией и постоянной температурой лабораторного помещения порядка 20 ± 1 °C. Это обусловило стабильность условий для осаждения микроструктур.

Для решения поставленных задач в Институте тепло- и массообмена НАН Беларуси разработана установка электрохимической металлизации (рис. 2).

Магнитная мешалка C-Mag HS7 Package (Германия) (1) с диапазонами нагрева от 50 до 500 °C и вращающего момента от 100 до 1500 об/мин обеспечивала перемешивание и нагрев электролита на протяжении всего процесса. Химический насос с керамическим винтом (2) проводил циркуляцию электролита в ванне для электрохимического осаждения со скоростью до 800 мл/мин, управление осуществлялось с помощью источника постоянного тока. Циркуляция поддерживала равномерное распределение температуры и концентрации электролита, что критически важно для однородности осаждения. Химический насос забирал подогретый электролит из нижней части ванны и подавал его в менее прогретую верхнюю часть. Электролит подавался через установленный в воронке фильтр, где фильтровался от анодного шлама и других механических загрязнений.

Использованная в установке гальваническая ванна (3) объемом 10 л выполнена из полипропилена, предназначена для медного и никелевого электролита. Перед началом процесса температура в ванне с электролитом выравнивалась с помощью магнитной мешалки (1) и циркуляционного насоса (2).

Анод (4) (для никеля – НПА-1, для меди – М1) был подвешен на расстоянии 50 мм над образцом, оставаясь равноудаленным от стенок гальванической ванны. Непосредственно перед установкой

¹ Изготовление фотошаблона: комплект технол. документации: ИУФГ.764416.300 / Ин-т тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. Мн., 2023. 12 л.

² Формирование микроструктур с использованием фотолитографических технологий: комплект технол. документации: ИУФГ.067329.300 / Ин-т тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. Мн., 2023. 26 л.

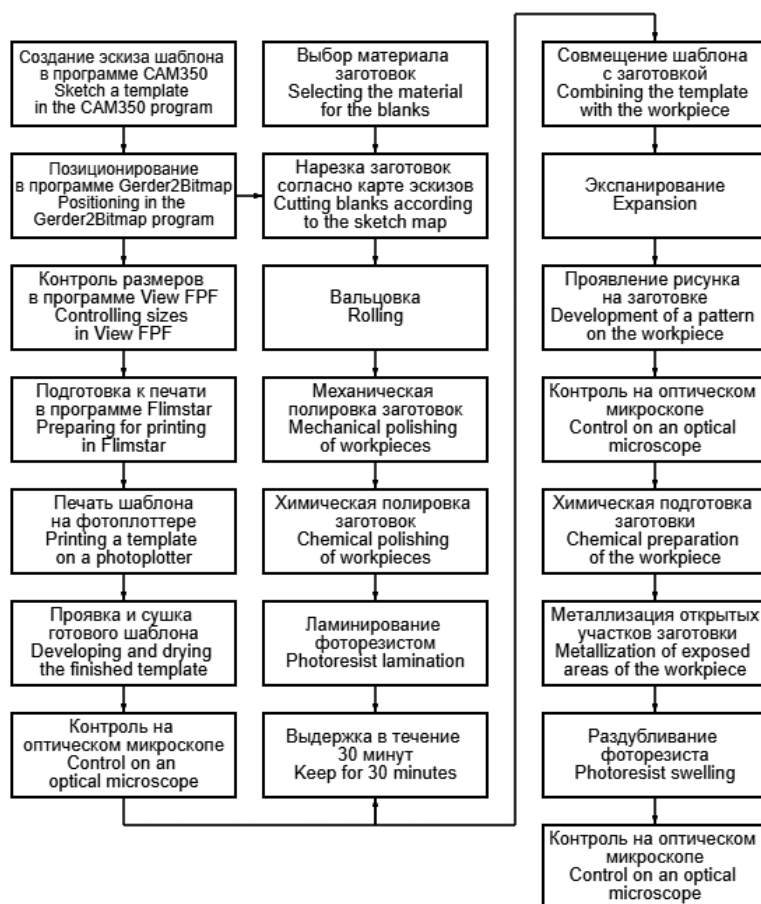


Рис. 1. Блок-схема технологии получения микроструктур типа «квадрат» на медной подложке
 Fig. 1. Block diagram of the technology for producing “square”-type microstructures on a copper substrate

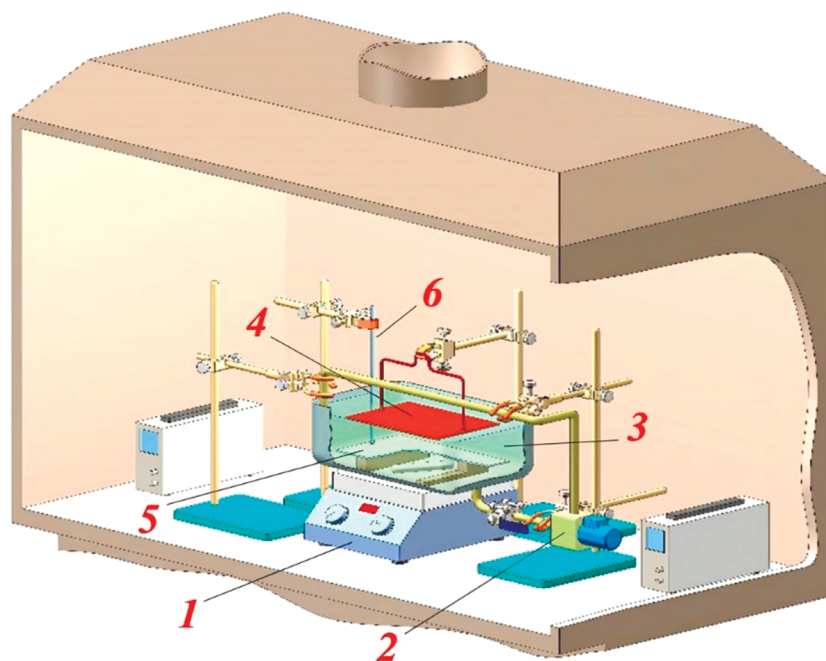


Рис. 2. Установка для электрохимической металлизации: 1 – магнитная мешалка C-Mag HS7 Package; 2 – химический насос; 3 – ванна с электролитом; 4 – анод; 5 – катод; 6 – вибромотор
 Fig. 2. Installation for electrochemical metallization: 1 – magnetic stirrer C-Mag HS7 Package; 2 – chemical pump; 3 – electrolyte bath; 4 – anode; 5 – cathode; 6 – vibration motore

анода в эту ванну с электролитом проводилась его чистка щеткой под горячей водой, после чего осуществлялась активация в кювете с 10%-ным раствором азотной кислоты для никелевого анода и в 12%-ном растворе соляной кислоты для медного анода.

Катодом (5) выступила подложка с размером рабочей области 70×70 мм. Катод был установлен на расстоянии 3 см от дна гальванической ванны и лежал на керамических подставках, не препятствующих работе магнитной мешалки. Вибромотор (6) был подключен к выступающему Г-образному изолированному контакту рамки. Создаваемые вибрации удаляли с поверхности структуры небольшие пузырьки водорода, препятствующие равномерному росту металла.

В результате исследований нами подобраны составы электролитов и рабочих режимов, представленные в таблице. Высота структур оценивалась на двойном микроскопе типа МИС-11 (Россия).

Электролиты для электрохимического осаждения микроструктур при плотности тока 1 A/dm^2 , температуре $20\text{--}30^\circ\text{C}$

Electrolytes for electrochemical deposition of microstructures at a current density of 1 A/dm^2 and a temperature of $20\text{--}30^\circ\text{C}$

Состав электролита для осаждения Ni Composition of electrolyte for Ni deposition		Состав электролита для осаждения Cu Composition of electrolyte for Cu deposition	
Компонент Component	Концентрация, г/л Concentration, g/l	Компонент Component	Концентрация, г/л Concentration, g/l
NiSO ₄	175	H ₂ SO ₄	70
Na ₂ SO ₄	60	CuSO ₄	250
MgSO ₄	40	C ₂ H ₅ OH	10
NaCl	9		
H ₂ BO ₄	25		

Результаты работы и их обсуждение. Разработанный технологический процесс, сочетающий прецизионную фотолитографию и электрохимическое осаждение, обеспечил формирование регулярных массивов квадратных микроструктур со следующими контролируемыми геометрическими параметрами: высота – 100 ± 5 мкм, характерный размер – 180 ± 5 мкм и межэлементный шаг – 90 ± 5 мкм. Процесс реализован на медных подложках размером 190×130 мм с эффективной рабочей зоной 70×70 мм (рис. 3, 4).

При стандартных процессах металлизации микроструктуры такого размера растут неравномерно. При вертикальном осаждении и соблюдении параметров по температуре, перемешиванию, составу электролита разница по высоте верхних и нижних микроструктур может отличаться в 1,5–2 раза, наблюдаются сильное перерастание за окна фоторезиста, а также частичное отслаивание от подложки осажденного металла. Особенно ярко выражен краевой эффект на нижних краях рабочей области.

Для решения данной проблемы подложка была расположена горизонтально. Это позволило улучшить равномерность осаждения по всей площади при тех же условиях осаждения.

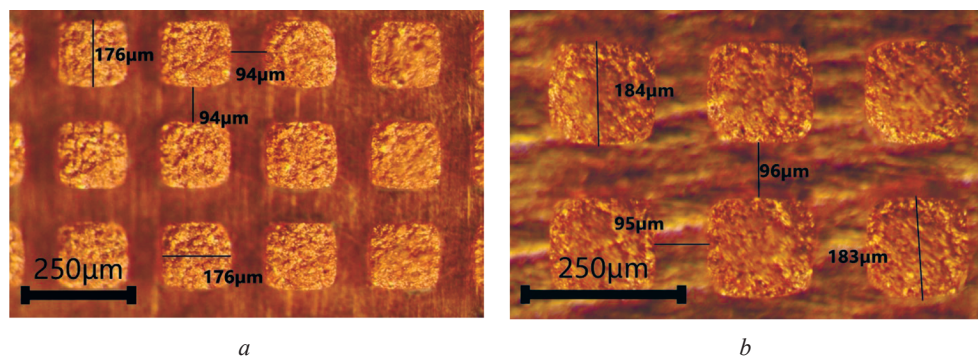


Рис. 3. Медные микроструктуры $(180 \pm 5) \times (180 \pm 5)$ мкм с шагом 90 ± 5 мкм: а – увеличение $120\times$; б – увеличение $160\times$
Fig. 3. Copper microstructures $(180 \pm 5) \times (180 \pm 5)$ µm with a step of 90 ± 5 µm: а – magnification $120\times$; б – magnification $160\times$

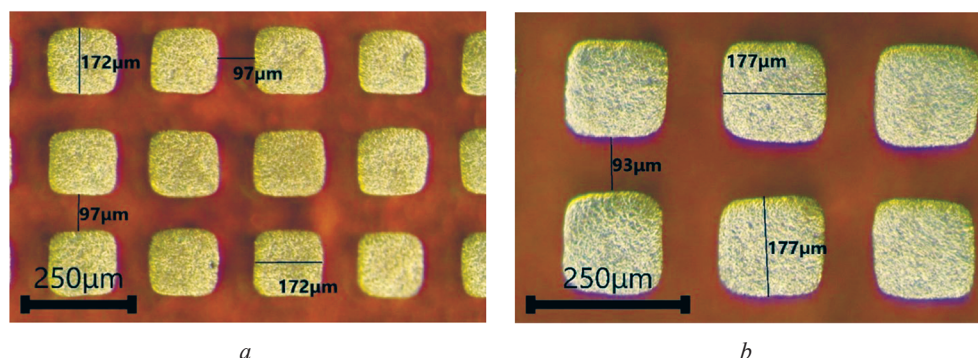


Рис. 4. Никелевые структуры $(180 \pm 5) \times (180 \pm 5)$ мкм с шагом 90 ± 5 мкм: *a* – увеличение $120\times$; *b* – увеличение $160\times$
 Fig. 4. Nickel structures $(180 \pm 5) \times (180 \pm 5)$ μm with a step of 90 ± 5 μm : *a* – magnification $120\times$; *b* – magnification $160\times$

Тем не менее, наблюдался краевой эффект, локализованный к центру рабочей области размером 7–10 мм. Лишь использование рамки с током и определенное положение позволило свести краевой эффект к величинам погрешности ± 5 мкм по всей рабочей области.

Монтаж рамки производился с помощью восьми ножек на расстоянии 1 мм от подложки. Девятая ножка представляла собой Г-образный изолированный контакт, который поднимался над электролитом по длинной стороне и подключался к источнику постоянного тока. Ножки рамки припаивались к краям подложки на заранее открытые окна. После этого остатки жидкого флюса удалялись в горячей воде, образец высушивался в сушильном шкафу при температуре 60°C в течение 5 мин. Затем внешнюю рамку и ножки покрывали химически стойким лаком и сушили при комнатной температуре в течение 4 ч. Учитывая продолжительность процесса осаждения, дополнительно края и ножки были закрыты изолирующей лентой, препятствующей пробою лака и фоторезиста.

До использования рамки наблюдалось краевое разрастание микроструктур с последующим слиянием элементов в плотные дендритные образования. Ветвистая структура полностью затягивала собой пленочный фоторезист и оказывалась существенно выше необходимой высоты (рис. 5, *a*). Рамка позволила локально увеличить площадь контакта в тех местах, где на пластину воздействует максимальный ток, забирая на себя излишки (рис. 5, *b*). В результате осаждаемый металл равномерно распределился на поверхности пластины, а геометрия микроструктур сохранилась на протяжении всего процесса.

Продолжительность электрохимического осаждения для электролита никелирования составила около 6 ч, этого было достаточно для получения микроструктур толщиной порядка 100 мкм по всей рабочей области подложки. Скорость осаждения была равна $16,6$ мкм/ч. Для получения

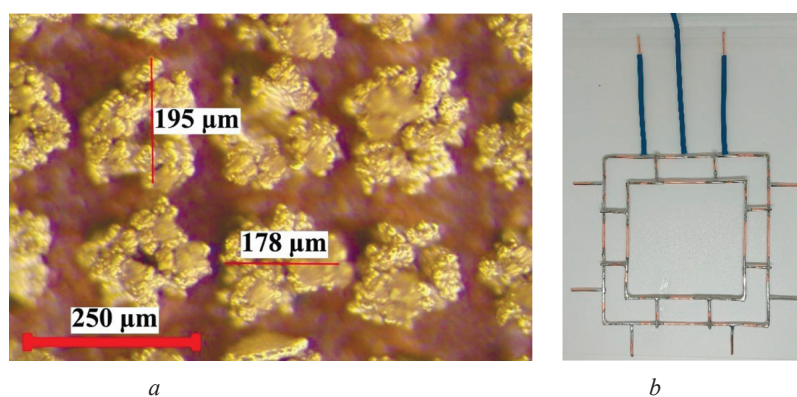


Рис. 5. Никелевые дендритные структуры, образующиеся на краях рабочей области подложки без использования токопроводящих рамок, увеличение $120\times$ (*a*), и токопроводящая рамка, используемая для электрохимических процессов (*b*)

Fig. 5. Nickel dendritic structures formed at the edges of the working area of the substrate without the use of conductive frames magnification $120\times$ (*a*), and conductive frame used for electrochemical processes (*b*)

аналогичных микроструктур с использованием медного электролита понадобилось порядка 30 ч, при этом скорость осаждения составила 3,33 мкм/ч. Осаждение меди производилось с прерыванием через каждые 2 ч для удаления с поверхности структуры хрупких механических осадков и дендритных частиц кисточкой с синтетическим ворсом.

Фоторезист P50100 удалялся в 10%-ном растворе аммиака со всех участков подложки, кроме зон с микроструктурой, с периодическим погружением на 30–40 с в течение 5 мин. Для полного удаления остатков фоторезиста требовалось механическое воздействие щеткой с ворсом средней жесткости.

С целью проверки устойчивости к кавитации подложки с микроструктурами подвергались воздействию ультразвука (УЗ) в УЗ-ванне с дистиллированной водой. Продолжительность каждого процесса составила 20 мин с частотой 40 кГц при температуре воды $T_b = 50$ °С. Дополнительные испытания были проведены с использованием точечного УЗ-воздействия на микроструктуры с использованием низкочастотного ультразвукового диспергатора (частота 22 кГц, время обработки 20 мин при температуре воды $T_b = 50$ °С). В результате испытаний медные и никелевые микроструктуры показали устойчивость к УЗ-кавитации, сохранение геометрических параметров, отсутствие областей отслоения и видимых повреждений. Контроль осуществлялся на оптическом микроскопе с цифровой камерой.

Полученные результаты подтверждают, что разработанная технология обеспечивает формирование механически устойчивых микроструктур, способных выдерживать экстремальные гидродинамические нагрузки.

Заключение. Предложен комбинированный метод изготовления прецизионных металлических микроструктур, сочетающий стандартные фотолитографические технологии с электрохимическим осаждением. Установлено, что разработанные режимы металлизации подложек позволяют получить структуры с контролируемыми геометрическими параметрами: высотой 100 ± 5 мкм, поперечным размером 180 ± 5 мкм, межэлементным шагом 90 ± 5 мкм и с вертикальными боковыми стенками. Существенным преимуществом является сохранение геометрии микроструктур, их равномерность по высоте от центра к краям относительно всей рабочей области, хорошая адгезия к подложке, минимизация дефектов при осаждении металлов.

Такие микроструктуры могут применяться при производстве микроканальных систем охлаждения, электромеханических датчиков, микрофлюидных чипов для лаборатории-на-кристалле (LOC).

Работа вносит весомый вклад в решение проблемы микрофабрикации – преодоления разрыва между наноразмерной точностью и микроразмерной функциональностью металлических структур.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение более сложных геометрических структур микронного размера, изучение их точностных характеристик, оптимизации процесса получения микроструктур, улучшение методики удаления отработанного пленочного фоторезиста в межструктурных зонах, изучение стойкости и долговременной стабильности микроструктур при циклических нагрузках и комбинированных воздействиях (температура + вибрация + коррозия).

Список использованных источников

1. Enhancing liquid-vapor phase-change heat transfer with micro/nano-structured surfaces / Xiuliang Liu, Jianye Yang, Qifan Zou [et al.] // ACS Nano. – 2025. – Vol. 19, № 10. – P. 9513–9589. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c15277>
2. Микропрофилированные поверхности для сверхтонких испарительно-конденсационных устройств / О. Л. Войтик, К. И. Делендик, Н. В. Коляго [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2023. – Т. 96, № 7. – С. 1901–1908. <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02857-z>
3. Flow boiling instability characteristics in microchannels with porous-wall / L. X. Zong, G. D. Xia, Y. T. Ji [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – Vol. 146. – Art. ID 118863. <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2019.118863>
4. Володин, О. А. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях / О. А. Володин, Н. Печеркин, А. Павленко // Теплофизика высоких температур. – 2021. – Т. 59, № 2. – С. 280–312. <https://doi.org/10.31857/S0040364421020149>
5. Advances of materials science in MEMS applications: A review / N. Hossain, M. Z. Al Mahmud, A. Hossain [et al.] // Results in Engineering. – 2024. – Vol. 22. – Art. ID 102115. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102115>

6. Reliability of MEMS inertial devices in mechanical and thermal environments: A review / Yingyu Xua, Shuibin Liu, Chunhua He [et al.] // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10, iss. 5. – Art. ID e27481. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27481>
7. Mahammadrafeeq, M. Microelectronic materials, microfabrication processes, micromechanical structural configuration based stiffness evaluation in MEMS: A review / M. Mahammadrafeeq, K. B. M. Swamy // *Microelectronic Engineering*. – 2022. – Vol. 263. – Art. ID 111854. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2022.111854>
8. Control of grain structure, phases, and defects in additive manufacturing of high-performance metallic components / T. Mukherjee, J. W. Elmer, H. L. Wei [et al.] // *Progress in Materials Science*. – 2023. – Vol. 138. – Art. ID 01153. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101153>
9. Балановский, А. Е. Технология роботизированного аддитивного производства изделий сложной геометрической формы из металла / А. Е. Балановский, В. Ю. Конюхов, Р. Р. Хакимов // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2025. – Т. 81, № 1. – С. 54–60. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2025-1-54-60>
10. Реализация терагерцовых фильтров высоких частот на основе цельнометаллических микроструктур с использованием глубокой рентгенолитографии / А. Н. Генцелев, С. А. Кузнецов, Ф. Н. Дульцев [и др.] // *Автометрия*. – 2019. – Т. 55, № 2. – С. 14–27. <http://doi.org/10.15372/AUT20190202>
11. Шелованова, Г. Н. Современные проблемы микро- и наноэлектроники: учеб. пособие / Г. Н. Шелованова; Сиб. федер. ун-т, Ин-т инж. физики и радиоэлектроники. – Красноярск: СФУ, 2017. – 126 с.
12. Лазерные аддитивные технологии в машиностроении: учеб. пособие / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров, Р. С. Третьяков; под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – 280 с.
13. Анализ современного состояния исследований по управлению смачиваемостью наноструктурированных поверхностей / Л. Ю. Рошин, О. Л. Войтик, К. И. Делендик [и др.] // *Тепло- и массообмен – 2021: сб. науч. тр.* / [редкол.: О. Г. Пенязков (гл. ред.) и др.]. – Мн.: Ин-т тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2022. – С. 209–231.

References

1. Xiuliang Liu, Jianye Yang, Qifan Zou, Yongyan Hu, Pengkun Li, Li Tan, Nenad Miljkovic, Ronggui Yang. Enhancing liquid-vapor phase-change heat transfer with micro/nano-structured surfaces. *ACS Nano*, 2025, vol. 19, no. 10, pp. 9513–9589. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c15277>
2. Voitik O. L., Delendik K. I., Kolyago N. V., Penyazkov O. G., Roshchin L. Yu. Microprofiled surfaces for hyperfine evaporative-condensing units. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2023, vol. 96, no. 7, pp. 1867–1874. <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02857-z>
3. Zong L. X., Xia G. D., Ji Y. T., Liu L., Ma D. D., Wang J. Flow boiling instability characteristics in microchannels with porous-wall. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 146, art. ID 118863. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118863>
4. Volodin O. A., Pecherkin N. I., Pavlenko A. N. Heat transfer enhancement at boiling and evaporation of liquids on modified surfaces – A Review. *High Temperature*, 2021, vol. 59, iss. 2–6, pp. 405–432. <https://doi.org/10.1134/S0018151X21020140>
5. Hossain N., Al Mahmud M. Z., Hossain A., Rahman Md Kh., Islam Md S., Tasnim R., Mobarak Md H. Advances of materials science in MEMS applications: A review. *Results in Engineering*, 2024, vol. 22, art. ID 102115. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102115>
6. Yingyu Xua, Shuibin Liu, Chunhua He, Heng Wu, Lianglun Cheng, Guizhen Yan, Qinwen Huang. Reliability of MEMS inertial devices in mechanical and thermal environments: A review. *Heliyon*, 2024, vol. 10, iss. 5, art. ID e27481. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27481>
7. Mahammadrafeeq M., Swamy K. B. M. Microelectronic materials, microfabrication processes, micromechanical structural configuration based stiffness evaluation in MEMS: A review. *Microelectronic Engineering*, 2022, vol. 263, art. ID 111854. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2022.111854>
8. Mukherjee T., Elmer J. W., Wei H. L., Lienert T. J., Zhang W., Kou S., DebRoy T. Control of grain structure, phases, and defects in additive manufacturing of high-performance metallic components. *Progress in Materials Science*, 2023, vol. 138, art. ID 01153. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101153>
9. Balanovskii A. E., Konyukhov V. Yu., Khakimov R. R. Technology of robotic additive manufacturing of metal products with complex geometric shapes. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, 2025, vol. 81, no. 1, pp. 54–60 (in Russian). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2025-1-54-60>
10. Gentslev A., Kuznetsov S., Dultsev F., Goldenberg B., Zelinsky A., Kondratyev V., Tanygina D. Implementation of terahertz high-pass filters based on all-metal microstructures using deep X-ray lithography. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 115–125. <https://doi.org/10.3103/S875669901902002X>
11. Shelovanova G. N. *Modern Problems of Micro- and Nanoelectronics: A tutorial*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2017. 126 p. (in Russian).
12. Grigor'yants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I., Tret'yakov R. S. *Laser Additive Technologies in Mechanical Engineering*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ. House, 2018. 280 p. (in Russian).
13. Roshchyn L. Yu., Voitik O. L., Delendik K. I., Kolyago N. V., Kovalchuk E. V., Bykova E. P., Bondarenko A. V. Analysis of the current state of research on wettability control of nanostructured surfaces. *Teplo- i massopereenos – 2021: sbornik nauchnykh trudov* [Heat and Mass Transfer – 2021: A Collection of Scientific Papers]. Minsk, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus Publ., 2022, pp. 209–231 (in Russian).