

Оригинальная статья / Original article

УДК 538.9

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-142-155>

Исследование технологии изготовления микрофлюидных чипов методом «мягкой» литографии

К.А. Матарыкин^{1✉}, Е.А. Соколов¹, Д.А. Калюжная¹, П.А. Ряполов¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: icego132@gmail.com

Резюме

Цель. Исследовать особенности технологии производства микрофлюидных чипов методом «мягкой» литографии, включая этапы: проектирования структуры каналов; изготовления форм различными методами на подложках из стекла, фольгированного текстолита и кремния; подбора необходимого полимера, режимов его полимеризации, обработки формы антиадгезивом, заливки компаундом, и последующего отделения, «активации» и последующего склеивания полученной заготовки с подготовленным стеклом.

Методы. Проведение экспериментов по фотолитографии осуществлялось при использовании монохроматического источника светового излучения *Anycubic Wash and Cure 2.0* на подложках фольгированного текстолита, предметного стекла и кремниевых пластин. Изготовление опалубки для конструктов было реализовано на принтере *FDM – FlyingBear Ghost 5*. В качестве полимерной основы использовался полидиметилсиликсан марок Силагерм 2104 и 2106. Для процесса склеивания применялась плазменная установка низкого давления *Diener PICO* с воздушной средой.

Результаты. Исследованы аспекты технологии изготовления микрофлюидных чипов методом «мягкой» литографии, рассмотрено влияние времени экспонирования, способа укрывания шаблоном для переноса, а также материала подложки. Проведены эксперименты с различными режимами полимеризации ПДМС, различными вариантами конструктов, исследованы их механические свойства. Изучено влияние давления газов в вакуумной камере при плазменной активации поверхности полимерной реплики на качество формирования структуры в микрофлюидном чипе.

Вывод. Результатом экспериментов стало определение кремниевой подложки как наилучшего материала мастер-формы для мягкой литографии. Определены параметры для упрощенного, удешевленного и безопасного плазменного склеивания реплики из ПДМС и стекла. Полученные результаты могут быть применены как протоколы изготовления микрофлюидных устройств силами малых исследовательских лабораторий.

Ключевые слова: микрофлюидика; полимеризация; лаборатория; микрофлюидный чип; мягкая литография.

Финансирование: Работа выполнена в рамках реализации программы стратегического академического партнерства «Приоритет-2030» (Соглашения № 075-15-2021-1155 и № 075-15-2021-1213).

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Исследование технологии изготовления микрофлюидных чипов методом «мягкой» литографии / К.А. Матарыкин, Е.А. Соколов, Д.А. Калюжная, П.А. Ряполов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 3. С. 142–155. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-142-155>.

Поступила в редакцию 21.08.2025

Подписана в печать 02.09.2025

Опубликована 30.09.2025

Research into the technology of manufacturing microfluidic chips using soft lithography

Konstantin A. Matarykin^{1✉}, Evgeniy A. Sokolov¹, Daria A. Kalyuzhnaya¹, Petr A. Ryapolov¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: icego132@gmail.com

Abstract

Purpose. To explore the specifics of microfluidic chip manufacturing technology using soft lithography, including the following stages: channel structure design; mold fabrication using various methods on glass, foil-clad PCB, and silicon substrates; selection of the required polymer, polymerization modes, mold treatment with a release agent, compound filling and subsequent separation, activation, and subsequent bonding of the resulting chip to the prepared glass.

Methods. Photolithography experiments were conducted using a monochromatic Anycubic Wash and Cure 2.0 light source on foil-clad PCB substrates, glass slides, and silicon wafers. Formwork for the constructs was fabricated using a FlyingBear Ghost 5 FDM printer. Silagerm 2104 and 2106 were used as PDMS. A Diener PICO low-pressure plasma system with an air environment was used for the bonding process.

Results. Photolithography studies were conducted to determine the exposure time, the method of covering the transfer template, and the substrate material. Experiments were conducted to create constructs and their viability. The effect of gas pressure in a vacuum chamber during plasma activation of the polymer replica surface was studied.

Conclusion. The experiments identified a silicon substrate as the best master mold material for soft lithography. Parameters for simplified, cost-effective, and safe plasma bonding of PDMS and glass replicas were determined. The results can be applied as protocols for the fabrication of microfluidic devices by small research laboratories.

Keywords: microfluidics; polymerization; laboratory; microfluidic chip; soft lithography.

Funding: The work was carried out within the framework of the implementation of the strategic academic leadership program "Priority-2030" (Agreements No. 075-15-2021-1155 and No. 075-15-2021-1213).

Conflict of interest: The Authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Matarykin K.A., Sokolov E.A., Kalyuzhnaya D.A., Ryapolov P.A. Research into the technology of manufacturing microfluidic chips using soft lithography. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2025;15(3):142–155. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-142-155>.

Received 21.08.2025

Accepted 02.09.2025

Published 30.09.2025

Введение

В современных условиях развития науки и технологий микрофлюидные системы занимают особое место среди инновационных решений в области физики, аналитической химии, биологии и медицины. Такие преимущества, как низкое энергопотребление, экономичное расходование реагентов, компактные размеры устройств и возможность быстрого проведения анализов [1], делают их незаменимыми инструментами в исследователь-

ских лабораториях. Особое внимание уделяется совершенствованию методов изготовления микрофлюидных устройств в условиях ограниченных ресурсов исследовательских лабораторий [2]. Микрофлюидика представляет собой междисциплинарную науку, изучающую закономерности поведения жидкостей и газов, движущихся по узким каналам внутри герметичных миниатюрных устройств – микроципов [3]. Данная технология позволяет работать с микроскопическими объемами

жидкостей, отдельными живыми клетками и наночастицами, обеспечивая высокую точность и воспроизводимость результатов [4]. Ключевым направлением исследований становится поиск альтернативных подходов к созданию мастер-форм, позволяющих существенно снизить затраты на производство и отказаться от использования дорогостоящего оборудования и чистых помещений [5].

Основным методом производства мастер-форм является мягкая литография (soft lithography), представленная группой исследователей под руководством Джорджа Вайтсайда в 1997 г. [6], которая стала революционным методом создания микроструктур. Технология базируется на использовании эластичных полимерных реплик, чаще всего изготовленных из полидиметилсилоксана (ПДМС), которые формируются с помощью жестких мастер-форм [7]. Метод нашел широкое применение при оперативном изготовлении прототипов микрофлюидных чипов для проведения исследований в различных областях [8]. При этом топология микрофлюидных чипов разрабатывается индивидуально под конкретные задачи исследования и включает сложную систему взаимосвязанных элементов: каналов, реакционных камер, клапанов, мембранны и функциональных микроструктур [9].

Традиционные методы создания мастер-форм, основанные на фотолитографии, несмотря на высокую точность, имеют существенные ограничения, в первую очередь высокую стоимость оборудования, необходимость работы в чистых помещениях [10]. Однако в настоящее время появился ряд работ, описывающих альтернативные методы производства мастер-форм без использования дорогостоящего оборудования [11]. Одним из популярных альтернативных методов

является 3D-печать микрофлюидных изделий [12].

Несмотря на большое количество работ, посвящённых данной тематике, они имеют ряд существенных недостатков: во-первых, в них используются оборудование и реактивы, не доступные или труднодоступные в современных условиях, во-вторых, описанные в них подходы не всегда приводят к положительным результатам в виде работающих чипов. Так что целью данной работы является экспериментальный обзор сложностей и технологических нюансов, возникающий при изготовлении микрофлюидных чипов методом «мягкой» литографии.

Материалы и методы

Изготовление мастер-форм для мягкой литографии проводилось с помощью фотолитографии. В качестве источника излучения использовалась полимеризация камера Wash and Cure 2.0 от компании Anycubic с длиной волны 405 нм. Установка обладает поворотной платформой с рабочей плоскостью 115×115 мм, защитным кожухом от внешнего ультрафиолета. Несмотря на совместное применение негативных жидких фоторезистов типа SU-8 (недоступен на территории РФ) или отечественного аналога фн-11с-фд ключевой недостаток для исследовательских лабораторий – токсичность. Этим обоснован выбор в пользу плёночных версий. В качестве чувствительного слоя был применен негативный сухой плёночный фоторезист ALPHO LIP640F от компании Eternal Materials Co с толщиной фотослоя в 40 мкм, чувствительный к излучению с длиной волны в диапазоне 365–405 нм. В качестве подложек применены: предметные стёкла $75 \times 25 \times 1,1$ мм от компании Apexlab, а также фольгированный стеклотекстолит, подверженный шлифованию зернистостью Р2000 (фракция 5–7 мкм).

Поверхности подложек были очищены и обезжириены в среде изопропилового спирта от компании ООО АО «Реахим».

Перед экспонированием происходило нанесение фоторезиста на поверхность подложек. Слой полиэтилентерефталата отсоединялся и плёнка наносилась на очищенную плоскость без допущения складок и воздушных пузырей. После этого паяльным феном при температуре 90–120°C удалялись растворители и повышалась адгезия с подложкой. Совмещая негативную маску для фотолитографии (разрешением 50800Dpi) и подготовленную подложку, проходило экспонирование [13]. После завершения засвечивания с поверхности фоторезиста удалялась полиолефиновая пленка, а после проводилось растворение неотверженного полимера в ёмкости с раствором 2–5% Na₂CO₃.

Для процессов формирования реплик из полидиметилсилоксана применялась опалубка из PETG пластика в дополнение к мастер-формам. Её изготовление было выполнено с помощью 3D-принтера типа

FDM – Ghost 5 от компании FlyingBear. В качестве антиадгезивного / разделительного слоя был применен BC-M от компании ООО «Пента Юниор». Его равномерное нанесение осуществлялось распылением на расстоянии по всей рабочей поверхности. В качестве материалов полимерной реплики микрофлюидного чипа использовался Силагерм 2104 и Силагерм 2106 – это прозрачные двухкомпонентные силиконовые компаунды. Их полимеризация происходит в течение 24 часов после смешивания частей при температуре не ниже 23°C. Для ускоренного процесса полимеризации применялось вакуумирование мембранным насосом Chemker 411 от компании Rocker Scientific в экскаторе на протяжении 2–3 мин для удаления пузырей газов с последующим термическим отверждением в сушильном шкафу If 25/350 vs2 компании АО «ЛОиП» при температуре 70°C в течение 1,5–2 часов [14]. Таблица 1 содержит основную информацию по свойствам применяемых полимеров.

Таблица 1. Технические характеристики Силагерм 2104 и 2106

Table 1. Technical characteristics of Silagerm 2104 and 2106

Техническая характеристика Technical specifications	Силагерм 2104 Silagerm 2104	Силагерм 2106 Silagerm 2106
Вязкость по вязкозиметру В3-1 (сопло 5,4 мм), с Viscosity according to the VZ-1 viscosity meter (5.4 mm nozzle), s	241–600	90–150
Прочность связи компаунда с металлом по подслою при отслаивании, кгс/см Bond strength of the compound to the metal in the sub-layer upon peeling, kgf/cm	0,3	0,3
Относительное удлинение при разрыве, % Relative elongation at break, %	80	110
Условная прочность при растяжении, МПа Conventional tensile strength, MPa	0,25	0,25
Отношение мономера к отвердителю Monomer to hardener ratio	100 к 4	100 к 5

На этапе склеивания реплик ПДМС с предметным стеклом была использована обработка плазменной установкой низкого давления PICO от компании Diener Electronic. В условиях низкого вакуума воздушной среды предварительно подготовленные поверхности стеклянных подложек последовательно очищались от неорганических и органических загрязнений хромовой смесью ($H_2SO_4 + K_2Cr_2O_4$).

Разделяя на пункты создание микрофлюидного чипа, можно выделить 7 характерных этапов:

- 1) создание мастер-формы различными методами (фотолитография на стекле, меди; использование протравленных структур на фольгированном стеклопокалите; 3D-печать на фотополимерном принтере);

- 2) подбор и нанесение антиадгезива на поверхность формы;

- 3) подбор необходимого полимера, режимов полимеризации;

- 4) заливка PDMS в мастер-форму и последующее отделение от шаблона, прорезание отверстий для каналов;

- 5) «активация» полученной реплики с очищенным (обезжиренным) предметным стеклом методом коронного разряда или кислородной плазмой (воздушной) в среде низкого вакуума;

- 6) «склеивание» активированных частей чипа;

- 7) установка креплений для капилляров.

Результаты и их обсуждение

В ходе подбора времени экспонирования на фольгированный текстолит был выявлен оптимальный режим 25 с. Полученные результаты по отверждению приведены в таблице 2. При проведении процесса соблюдалась слабая освещённость помещения, при этом использовался только монохроматический источник, не вызывающий активации процесса полимеризации фоторезиста.

Таблица 2. Определение времени экспонирования

Table 2. Determination of exposure time

Время экспонирования, с Exposure time, s	Реакция Reaction
5	Бледный неконтрастный полимеризованный участок, растворился на 100%
15	Контрастный полимеризованный участок, растворился на 70%
25	Контрастный полимеризованный участок, сохранил геометрию
35	Контрастный полимеризованный участок, проявилась область паразитного засвечивания (увеличенная геометрия)
45	Контрастный полимеризованный участок, не до конца растворимый не полимеризованный сектор

На рисунке 1, а продемонстрирована негативная маска для фотолитографии, используемая в процессе получения микрофлюидных чипов. Из представленного шаблона использовалась топология Т-образного чипа (рис. 1, б), что применимо

для генерации капель. Во время засветки и полимеризации фоторезиста исследованы режимы: в первом случае маска свободно располагалась над поверхностью подложки, в другом случае процесс протекал

под воздействием внешнего пресса, представляющего собой пластину оргстекла, размещенного поверх маски. Было установлено, что за счёт пресса контроль при-

легания лучше и минимально влияние паразитной засветки. В дальнейшем применялся этот режим.

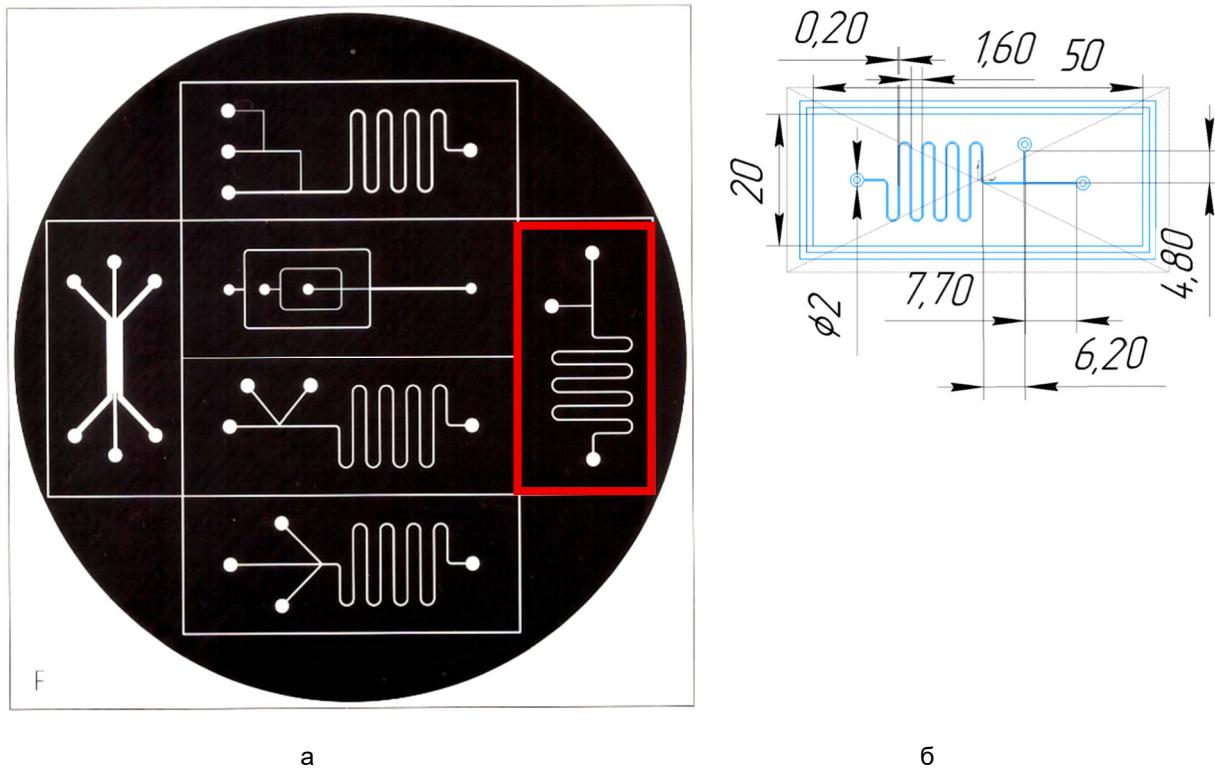


Рис. 1. Используемый шаблон: а – негативный шаблон; б – чертёж конфигурации

Fig. 1. The template used: a – negative template; б – configuration drawing

Полученные заготовки мастер-форм подвергались мокрому травлению, в результате чего на поверхности стеклотекстолита оставалась топология каналов из медной фольги, соответствующая размерам рисунка 1, б, с толщиной 100 мкм. Для формирования реплики ПДМС был собран конструкт, изображённый на рисунке 2, представляющий собой подготовленную мастер-форму,ложенную в опалубку, созданную при помощи FDM-печати с применением пластика PETG. Перед заливкой полимера конструкт обрабатывался разделительной восковой смазкой, после высыхания которой форму наполняли ПДМС.

По окончании процесса полимеризации опалубка разбиралась, силиконовая реплика отделялась от мастер-формы с помощью скальпеля и с помощью ручного пробойника прорезались отверстия. Внешний вид полученных реплик ПДМС изображён на рисунке 3. Поверхность характеризуется чёткими границами каналов и однородной структурой. Разводы связаны с типом литья полимера, а краевые изменения рельефа вызваны перемещением ещё не застывшего компаунда на заготовке, а также усадкой материала [15]. При многократном использовании заготовка постепенно становилась более шероховатой, а рельеф стеклоткани забивался воском с ВС-М.



Рис. 2. Конструкт из мастер-формы и опалубки, обработанный восковой разделительной смазкой и залитый ПДМС

Fig. 2. A construct made from a master mold and formwork, treated with a wax release agent and filled with PDMS



Рис. 3. Внешний вид полученных реплик

Fig. 3. Appearance of the obtained replicas

Для склеивания предметного стекла, очищенного от всех типов загрязнителей, и полимерной реплики применялась плазменная установка низкого давления Diener PICO. Процесс активации проведён в воздушной атмосфере, т. к. использование чистого кислорода взрывоопасно и повышает конечную стоимость изделия.

Процесс плазменного склеивания сводится к тому, что поверхность ПДМС окисляется. Это приводит к появлению силанольных групп (OH), которые при соединении образуют ковалентные силоксановые связи ($\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$). Таким образом, получается активированная полимерная поверхность, способная к связи с предметным стеклом, которое также было обработано плазмой [16].

Подготовленные поверхности подвергались плазменной обработке в течение 60 с при мощности генератора 160 Вт (рис. 4), после чего ещё 60 с установка возвращала давление в камеру. Было исследовано 2 режима: давление в 50 Па (рис. 4, а) и давление 100 Па (рис. 4, б). Из изображения 4, б видно, как в местах геометрического искривления (изгибы, кромки) наблюдается повышение плотности плазмы, что негативно сказывается на качестве обработки поверхности. В связи с этим применение повышенного давления из расчёта на больший процент содержания кислорода не оправдан. Помимо активации поверхности происходило дополнительное очищение поверхности с помощью механического выбивания молекул и атомов загрязнений высокоенергетическими ионами плазмы.

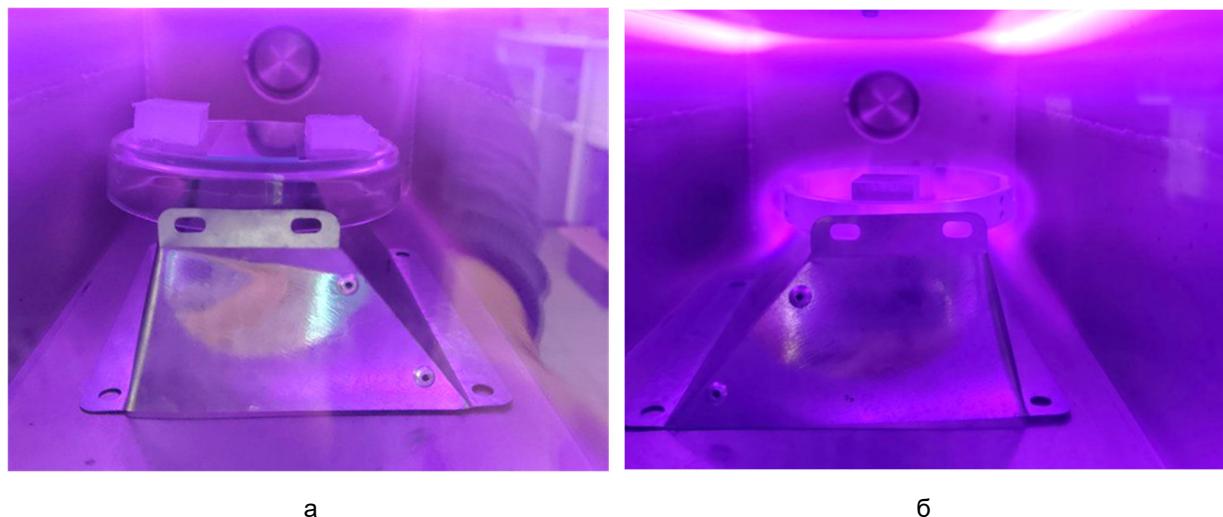


Рис. 4. Процесс активации в установке Diener PICO: а – активация при 50 Па; б – активация при 100 Па

Fig. 4. Activation process in the Diener PICO installation: a – activation at 50 Pa; b – activation at 100 Pa

В качестве маркера контроля функционализации поверхности служит естественное повышение гидрофильтности поверхности силиконовой реплики. Изначально материал обладает гидрофобно-

стью (рис. 5, а), но после функционализации плазмой контактный угол меняется как на рисунке 5, б. При контакте с атмосферой в течение часа свойства возвращаются в исходное состояние.

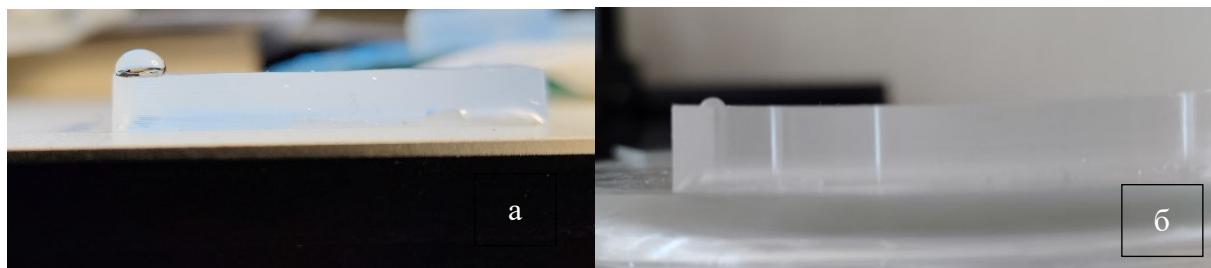


Рис. 5. Гидрофильтность и гидрофобность поверхности PDMS: а – гидрофобность; б – гидрофильтность

Fig. 5. Hydrophilicity and hydrophobicity of the PDMS surface: a – hydrophobicity; b – hydrophilicity

Для склеивания активированные поверхности реплики и предметного стекла совмещали обработанными сторонами, сначала с воздействием внешнего давления, а в поздних экспериментах без него. Приложение дополнительного давления негативно оказывается на качестве конечного изделия. Во время экспериментов было обнаружено, что давление распространяется неравномерно и приводит к склеиванию лишь части поверхности (рис. 6, в). Причина такого дефекта описана на рисунке 6, а, где изображён разрез

конструкта с залитым полимером. Вследствие сетчатой структуры стеклотекстолита (рис. 6, б) происходит перенос этой топологии на реплику. Это хорошо проявляется при отделении полимера от стекла. Такая особенность материала мастер-формы создавала ряд проблем с адгезией и топологией каналов.

После анализа результатов было принято решение использовать фольгированный текстолит без травления, а каналы формировать за счет слоя фоторезиста.

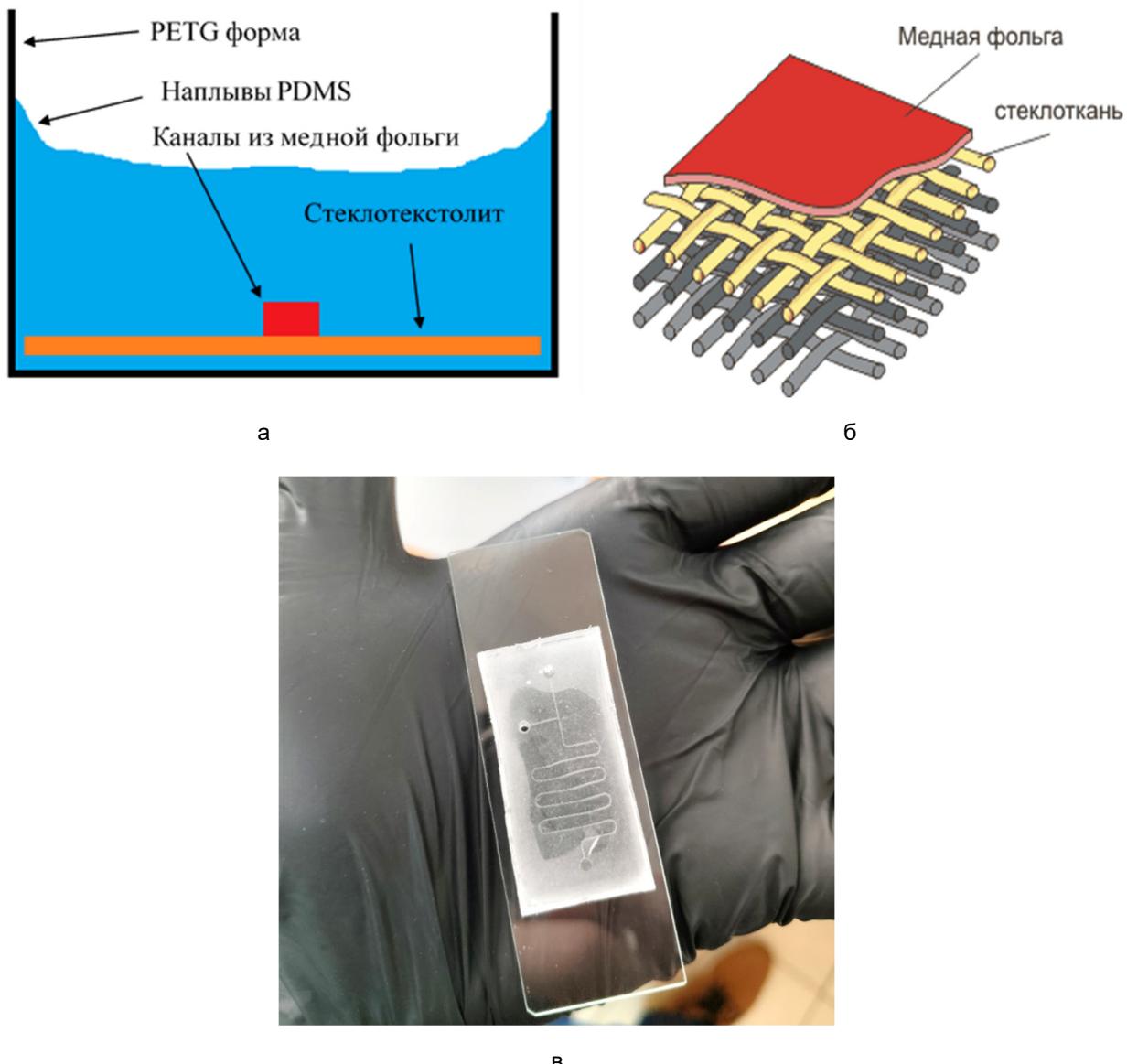
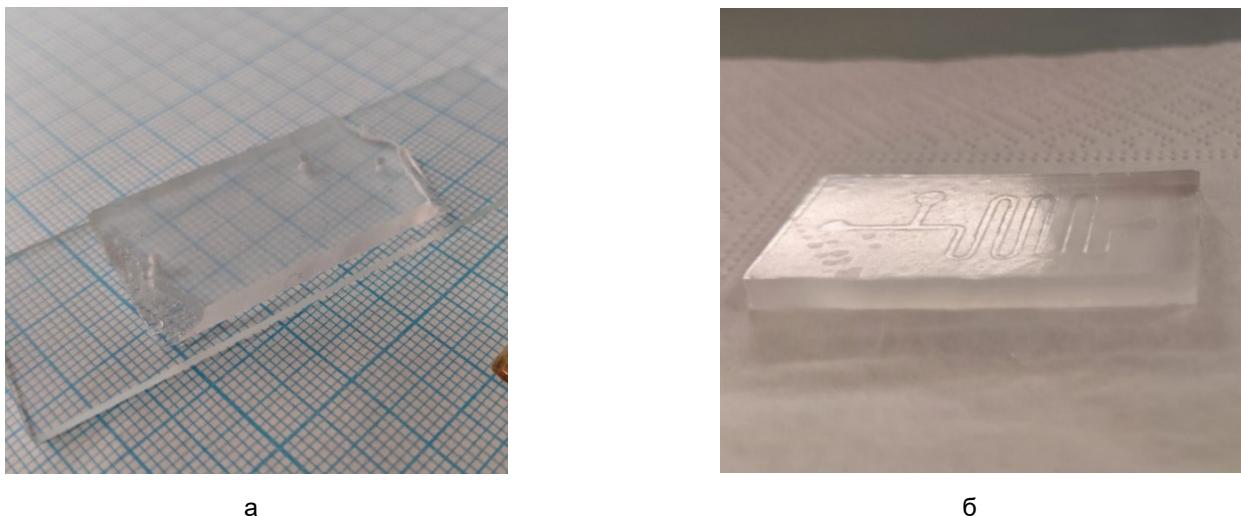


Рис. 6. Результаты склеивания чипа, дефекты конструкта с мастер-формой: а – проблема «наплывов» полимера; б – структура стеклотекстолита; в – первый изготовленный чип

Fig. 6. Results of gluing the chip, defects of the design with the master mold: a – the problem of polymer “bursts”; б – the structure of the fiberglass; в – the first manufactured chip

Внешний вид топологии каналов представлен на рисунке 7. Доказано, что полученная шероховатость заготовки ПДМС была достаточна для равномерного бездефектного склеивания, что видно на рисунке 7, а. Разорванные торцы указывают на значительное приложение внешнего механического усилия. Помимо этого, появилась проблема антиадгезив-

ного слоя, частицы которого приводили к образованию мутной поверхности реплики и к дефекту рельефа (повышению шероховатости) (рис. 7, б). Сама высота канала в 40 мкм оказалась недостаточной для формирования структуры, при склеивании большая часть топологии слипалась с подложкой.



а

б

Рис. 7. Внешний вид каналов и адгезионные качества полученного чипа: а – полученный чип; б – вид топологии каналов.

Fig. 7. External appearance of the channels and adhesion properties of the obtained chip:
a – obtained chip; b – view of the channel topology

Проблемой также стала подготовка подложки, что занимала много времени и имела не лучшие показатели адгезии с плёночным фоторезистом. Для повышения эффективности было предложено использование стеклянных поверхностей для фотолитографии. Проведённые экспе-

рименты, иллюстрированные рисунком 8, показывают ещё меньшую адгезию и меньшую полимеризацию в сравнении с предыдущими испытаниями. Позже выяснилось, что стеклянным и кремниевым поверхностям нужен слой адгезива – гексаметилдисилазан [17].

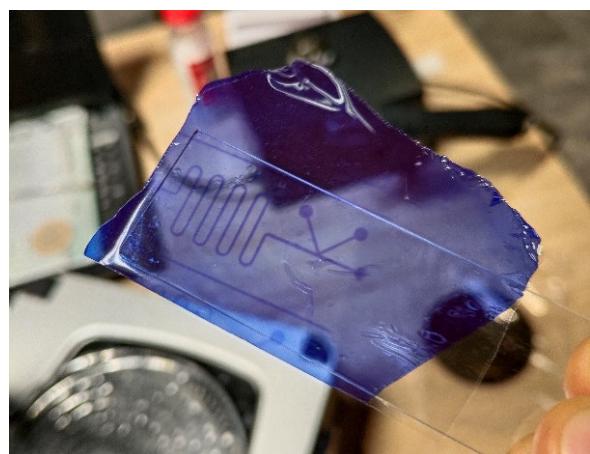
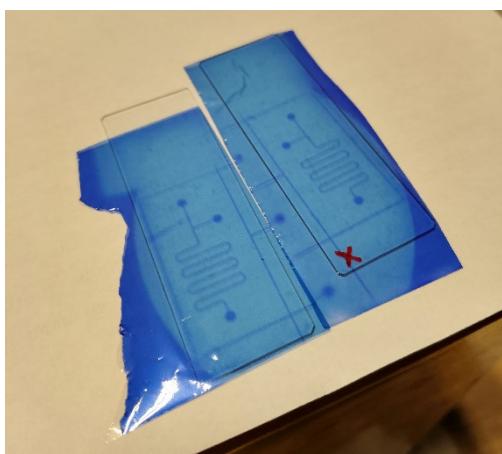


Рис. 8. Результат экспонирования на предметном стекле

Fig. 8. Result of exposure on a glass slide

С учётом двух предыдущих экспериментов предложено использование кремниевых подложек (рис. 9) в качестве мастер-форм. Удалось последовательно нанести три слоя фоторезиста и добиться

толщины ~120 мкм. Полученные реплики отличались большей прозрачностью и сохраняли топологию каналов после склеивания. Подобранная технология является оптимальной для изготовления мастер-

форм мягкой литографии с использованием плёночного сухого фоторезиста, а также применимой для упрощенного скле-

ивания полимерной реплики со стеклом плазменной активацией поверхности.

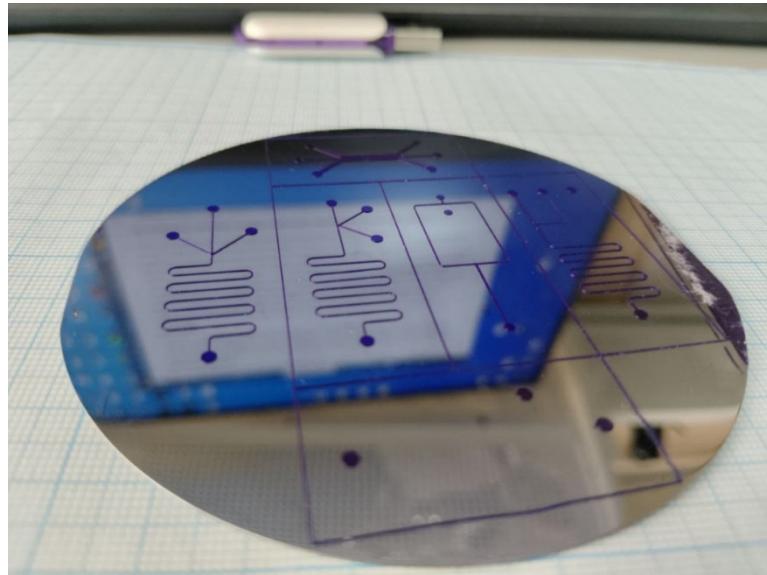


Рис. 9. Трёхслойная фотолитография плёночным фоторезистом на кремниевую пластину

Fig. 9. Three-layer photolithography with film photoresist on a silicon wafer

Выводы

Рассмотрены технологические аспекты изготовления микрофлюидных чипов на основе метода мягкой литографии. Первоначальная задача по определению подходящего режима и способа фотолитографии была достигнута применением дополнительного прижатия через оргстекло негативного шаблона, а также трёхслойного экспонирования сухого плёночного фоторезиста на кремниевую пластину. По-

добранный режим склеивания полимерной реплики с предметным стеклом на плазменной установке низкого давления в воздушной среде позволил удешевить, облегчить и обезопасить процесс.

Результаты исследований могут быть использованы для применения в производстве микрофлюидных устройств силами малых исследовательских лабораторий без дорогостоящего оборудования, отдельных норм к чистоте помещений и норм к безопасности процессов.

Список литературы

1. Microfluidic nanomaterials: From synthesis to biomedical applications Illath / K.K. Illath, S. Kar, P. Gupta, A. Shinde, S. Wankhar, F.-G. Tseng [et al.] // Biomaterials. 2022. Vol. 280. P. 121247. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2021.121247>.
2. Microfluidic chips: recent advances, critical strategies in design, applications and future perspectives / P. Pattanayak, S.K. Singh, M. Gulati, S. Vishwas, B. Kapoor, D.K. Chellappan // Microfluidics and nanofluidics. 2021. Vol. 25, no. 12. P. 99. <https://doi.org/10.1007/s10404-021-02502-2>.
3. Microfluidic devices: a tool for nanoparticle synthesis and performance evaluation / S. Gimondi, H. Ferreira, R.L. Reis, N.M. Neves // ACS nano. 2023. Vol. 17, no. 15. P. 14205–14228. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c01117>.

4. Fabrication and applications of microfluidic devices: A review / A.G. Niculescu, C. Chircov, A.C. Bîrcă, A.M. Grumezescu // International journal of molecular sciences. 2021. Vol. 22, no. 4. P. 2011. <https://doi.org/10.3390/ijms22042011>.
5. Modular microfluidics for life sciences / J. Wu, H. Fang, J. Zhang, S. Yan // Journal of Nanobiotechnology. 2023. Vol. 21, no. 1. P. 85. <https://doi.org/10.1186/s12951-023-01846-x>.
6. High ZT and performance controllable thermoelectric devices based on electrically gated bismuth telluride thin films / D. Qin, F. Pan, J. Zhou, Z. Xu, Y. Deng // Nano Energy. 2021. Vol. 89. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106472>.
7. Frienda J., Yeo L. Fabrication of microfluidic devices using polydimethylsiloxane // Biomicrofluidics. 2010. Vol. 4, no. 2. 026502. <https://doi.org/10.1063/1.3259624>.
8. Materials and methods for droplet microfluidic device fabrication / K.S. Elvira, F. Gielen, S.S.H. Tsai, A.M. Nightingale // Lab on a Chip. 2022. Vol. 22, no. 5. P. 859-875. <https://doi.org/10.1039/D1LC00836F>.
9. Niculescu A.G., Mihaiescu D.E., Grumezescu A.M. A review of microfluidic experimental designs for nanoparticle synthesis // International Journal of Molecular Sciences. 2022. Vol. 23, no. 15. P. 8293. <https://doi.org/10.3390/ijms23158293>.
10. Scott S.M., Ali Z. Fabrication methods for microfluidic devices: An overview // Micro-machines. 2021. Vol. 12, no. 3. P. 319. <https://doi.org/10.3390/mi12030319>.
11. Альтернативные подходы при создании мастер-форм для изготовления микрофлюидных чипов методом «мягкой» литографии / Я.С. Посмитная, А.С. Букатин, Д.А. Макаров, К.В. Юдин, А.А. Евстронов // Научное приборостроение. 2017. Т. 27, № 2. С. 13-20.
12. 3D printed microfluidic devices: enablers and barriers / S. Waheed, J.M. Cabot, N.P. Macdonald, T. Lewis, R. M. Guijt, B. Paull, M.C. Breadmore // Lab Chip. 2016. Vol. 16. P. 1993-2013. <https://doi.org/10.1039/C6LC00284F>.
13. Photo and soft lithography for organ-on-chip applications / E. Ferrari, F. Nebuloni, M. Rasponi, P. Occhetta // Organ-on-a-chip: methods and protocols. New York, NY : Springer US, 2021. P. 1-19. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1693-2_1.
14. Fabrication and characterization of a PDMS–glass hybrid continuous-flow PCR chip / J.A. Kim, J.Y. Lee, S. Seong, S.H. Cha, S.H. Lee, J.J. Kim [et al.] // Biochemical Engineering Journal. 2006. Vol. 29, no. 1-2. P. 91-97. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2005.02.032>.
15. Accounting for PDMS shrinkage when replicating structures / M.H. Madsen, N. Feidenhans'l, P.-E. Hansen, J. Garnaes, K. Dirscherl // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2014. Vol. 24, no. 12. P. 127002. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/24/12/127002>.
16. Xiong L., Chen P., Zhou Q. Adhesion promotion between PDMS and glass by oxygen plasma pre-treatment // Journal of Adhesion Science and Technology. 2014. Vol. 28, no. 11. P. 1046-1054. <https://doi.org/10.1080/01694243.2014.883774>.
17. Resolution and sensitivity of a resist with and without hexamethyldisilazane determined using profilometry / H. Horibe, M. Yamamoto, S. Takamatsu, T. Ichikawa // Journal of Photopolymer Science and Technology. 2006. Vol. 19, no. 1. P. 75-80. <https://doi.org/10.2494/photopolymer.19.75>.

References

1. Illath K., Kar K.S., Gupta P., Shinde A., Wankhar S., Tseng F.-G., et al. Microfluidic nano-materials: From synthesis to biomedical applications. *Biomaterials*. 2022;280:121247. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2021.121247>.
2. Pattanayak P., Singh S.K., Gulati M., Vishwas S., Kapoor B., Chellappan D.K., et al. Microfluidic chips: recent advances, critical strategies in design, applications and future perspectives. *Microfluidics and Nanofluidics*. 2021;25(12):99. <https://doi.org/10.1007/s10404-021-02502-2>.
3. Gimondi S., Ferreira H., Reis R.L., Neves N.M. Microfluidic devices: a tool for nanoparticle synthesis and performance evaluation. *ACS nano*. 2023;17(15):14205-14228. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c01117>.

4. Niculescu A.G., Chircov C., Bîrcă A.C., Grumezescu A.M. Fabrication and applications of microfluidic devices: A review. *International journal of molecular sciences*. 2021;22(4):2011. <https://doi.org/10.3390/ijms22042011>.
5. Wu J., Fang H., Zhang J., Yan S. Modular microfluidics for life sciences. *Journal of Nanobiotechnology*. 2023;21(1):85. <https://doi.org/10.1186/s12951-023-01846-x>.
6. Qin D., Pan F., Zhou J., Xu Z., Deng Y. High ZT and performance controllable thermoelectric devices based on electrically gated bismuth telluride thin films. *Nano Energy*. 2021;89:1-8. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106472>.
7. Frienda J., Yeo L. Fabrication of microfluidic devices using polydimethylsiloxane. *Biomicrofluidics*. 2010;4(2):026502. <https://doi.org/10.1063/1.3259624>.
8. Elvira K.S., Gielen F., Tsai S.S.H., Nightingale A. M. Materials and methods for droplet microfluidic device fabrication. *Lab on a Chip*. 2022;22(5):859-875. <https://doi.org/10.1039/D1LC00836F>.
9. Niculescu A.G., Mihaiescu D.E., Grumezescu A.M. A review of microfluidic experimental designs for nanoparticle synthesis. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23(15):8293. <https://doi.org/10.3390/ijms23158293>.
10. Scott S.M., Ali Z. Fabrication methods for microfluidic devices: An overview. *Micro-machines*. 2021;12(3):319. <https://doi.org/10.3390/mi12030319>.
11. Posmitnaya Ya.S., Bukatin A.S., Makarov D.A., Yudin K.V., Evstranov A.A. Alternative approaches to creating master molds for the production of microfluidic chips using soft lithography. *Nauchnoe priborostroenie = Scientific Instrument Engineering*. 2017;27(2):13-20. (In Russ.)
12. Waheed S., Cabot J.M., Macdonald N.P., Lewis T., Guijt R.M., Paull B., M.C. Breadmore 3D printed microfluidic devices: enablers and barriers. *Lab Chip*. 2016;16:1993-2013. <https://doi.org/10.1039/C6LC00284F>.
13. Ferrari E., Nebuloni F., Rasponi M., Occhetta P. Photo and soft lithography for organ-on-chip applications. *Organ-on-a-chip: methods and protocols*. New York, NY: Springer US; 2021. P. 1-19. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1693-2_1.
14. Kim J.A., Lee J.Y., Seong S., Cha S.H., Lee S.H., Kim J.J., et al. Fabrication and characterization of a PDMS–glass hybrid continuous-flow PCR chip. *Biochemical Engineering Journal*. 2006; 29(1-2):91-97. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2005.02.032>.
15. Madsen M.H., Feidenhans'l N., Hansen P.-E., Garnaes J., Dirscherl K. Accounting for PDMS shrinkage when replicating structures. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2014;24(12):127002. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/24/12/127002>.
16. Xiong L., Chen P., Zhou Q. Adhesion promotion between PDMS and glass by oxygen plasma pre-treatment. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2014;28(11):1046-1054. <https://doi.org/10.1080/01694243.2014.883774>.
17. Horibe H., Yamamoto M., Takamatsu S., Ichikawa T. Resolution and sensitivity of a resist with and without hexamethyldisilazane determined using profilometry. *Journal of Photopolymer Science and Technology*. 2006;19(1):75-80. <https://doi.org/10.2494/photopolymer.19.75>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Матарыкин Константин Александрович, инженер кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: icego132@gmail.ru

Konstantin A. Matarykin, Engeneer of the Department of Nanotechnology, Mictroelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: icego132@gmail.ru

Соколов Евгений Александрович, преподаватель кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: evgeniysokolov1@yandex.ru

Калюжная Дарья Анатольевна, аспирант кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, Российская Федерация, e-mail: kalyuzhnaya.dariya@yandex.ru

Ряполов Петр Алексеевич, доктор физико-математических наук, доцент, декан естественно-научного факультета, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: r-piter@yandex.ru

Evgeniy A. Sokolov, Lecturer, Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: evgeniysokolov1@yandex.ru

Daria A. Kalyuzhnaya, Postgraduate Student of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kalyuzhnaya.dariya@yandex.ru

Petr A. Ryapolov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Dean of the Faculty of Natural Sciences, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: r-piter@yandex.ru