

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-1-118-130>



Микрофлюидные устройства со встроенными управляемыми источниками магнитного поля

Е. А. Соколов¹, Д. А. Калюжная¹, А. О. Васильева¹, П. А. Ряполов¹✉

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

✉ e-mail: r-piter@yandex.ru

Резюме

Цель работы. Разработать эффективную технологию создания микрофлюидных чипов для исследования динамики магнитных жидких сред с немагнитными включениями с помощью управляемого воздействия источниками магнитного поля на основе постоянных магнитов, электромагнитов, а также их комбинации.

Методы. Рассмотрено несколько методов изготовления микрофлюидных чипов на основе сэндвич-структуры с использованием пленки Parafilm®, а также микрофлюидики PDMS с использованием стандартного 3D-принтера, ABS-пластика и ацетона. Эксперименты проведены на установках, разработанных на основе известных методов и оборудования для магнитных измерений и изготовленных самостоятельно. В качестве источников неоднородного магнитного поля используются различные комбинации электрических катушек и постоянных магнитов.

Результаты. Проведён аналитический обзор известных методов производства микрофлюидных чипов. Большинство из них требуют дорогостоящего оборудования и чистых комнат, однако ряд из них основан на использовании доступных расходных материалов и не требует специфических условий. К ним относятся технологии на основе пленки Parafilm®, а также PDMS чипы с удаляемым ABS каркасом. С использованием каждой из технологий была изготовлена серия микрофлюидных чипов, в процессе производства которых менялись технологические параметры: температура, давление и время спекания, состав полимерной матрицы и технология промывки. Оптимальная технология производства была определена на основании микроскопического анализа и технологических испытаний.

Заключение. В работе рассмотрено несколько технологий производства микрофлюидных устройств. Определены оптимальные параметры изготовления чипов на основе сэндвич-структур Plexiglass – Parafilm® – Plexiglass. Предложен оригинальный вариант изготовления микрофлюидного устройства с интегрированным миниатюрным источником магнитного поля на основе технологии ESCARGOT. Полученные результаты могут быть полезны для разработки устройств по управляемому воздействию на умные материалы в микрофлюидных чипах.

Ключевые слова: микрофлюидика; микрофлюидный чип; магнитное поле; Парафильм, сэндвич-структура.

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

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00311, <https://rscf.ru/project/22-22-00311/>.

© Соколов Е. А., Калюжная Д. А., Васильева А. О., Ряполов П. А., 2022

Для цитирования: Микрофлюидные устройства со встроенными управляемыми источниками магнитного поля / Е. А. Соколов, Д. А. Калюжная, А. О. Васильева, П. А. Ряполов // *Известия Юго-Западного государственного университета*. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 1. С. 118–130. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-1-118-130>

Поступила в редакцию 24.01.2022

Подписана в печать 21.02.2022

Опубликована 30.03.2022

Microfluidic Devices with Integrated Controlled Magnetic Field Sources

**Evgeny A. Sokolov¹, Dariya A. Kalyuzhnaya¹, Anastasia O. Vasilyeva¹,
Petr A. Ryapolov¹✉**

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

✉ e-mail: r-piter@yandex.ru

Abstract

The purpose of the work: To develop an effective technology for creating microfluidic chips for studying the dynamics of magnetic fluid media with non-magnetic inclusions using controlled exposure to magnetic field sources based on permanent magnets, electromagnets, and their combinations.

Methods. To consider several methods of manufacturing microfluidic chips based on a sandwich structure using Parafilm® film, as well as PDMS microfluidics using a standard 3D printer, ABS plastic and acetone. The experiments were carried out on installations developed on the basis of known methods and equipment for magnetic measurements and manufactured independently. Various combinations of electric coils and permanent magnets are used as sources of an inhomogeneous magnetic field.

Results. An analytical review of known methods for the production of microfluidic chips was carried out. Most of them require expensive equipment and clean rooms, but a number of them are based on the use of available consumables and do not require specific conditions. These include technologies based on Parafilm® film, as well as PDMS chips with a removable ABS frame. For each of the technologies, a series of microfluidic chips was manufactured, during the production of which technological parameters changed: temperature, pressure and sintering time, the composition of the polymer matrix and the washing technology. The optimal production technology was determined on the basis of microscopic analysis and technological tests.

Conclusion. The paper considers several technologies for the production of microfluidic devices. Optimal parameters for manufacturing chips based on Plexiglass - Parafilm® – Plexiglass sandwich structures have been determined. An original variant of manufacturing a microfluidic device with an integrated miniature magnetic field source based on ESCARGOT technology is proposed. The results obtained can be useful for the development of devices for controlled exposure to smart materials in microfluidic chips.

Keywords: microfluidics; microfluidic chip; magnetic field; Parafilm; sandwich structure.

Conflict of interest: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-22-003113 <https://rscf.ru/project/22-22-00311/>.

For citation: Sokolov E. A., Kalyuzhnaya D. A., Vasilyeva A. O., Ryapolov P. A. Microfluidic devices with integrated controlled magnetic field sources *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. Seriya: *Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University*. Series: *Engineering and Technologies*. 2022; 12(1): 118–130. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-1-118-130>

Received 24.01.2022

Accepted 21.02.2022

Published 30.03.2021

Введение

Микрофлюидика – одна из самых быстрорастущих областей инженерии, химии и биологии благодаря способности контролировать микродозы и микропотоки. В этом масштабе многие традиционные варианты управления динамикой многофазных систем не работают; значительные возможности бесконтактного управления открывает магнитное поле.

Магнитные жидкости представляют собой коллоидный раствор наноразмерных магнитных наночастиц, покрытых поверхностно-активным веществом в жидкости-носителе [1–5]. Магнитные жидкости позволяют добиться уникального сочетания: текучести и активного отклика на внешние, в первую очередь магнитные воздействия [6–10].

Управляемое воздействие на немагнитные капли в магнитной жидкости является актуальной тематикой недавних исследований [11–13]. В работе [14] исследована миграция и слияние капель воды в магнитной жидкости в микроканале в неоднородном магнитном поле.

Важнейшей проблемой капельной микрофлюидики является разработка систем надежной генерации капель микронных размеров [15]. Управление данными осуществляется подводом различных видов энергии к границе раздела жидкость-жидкость. Управляемое магнитное поле представляется перспективным способом управления процессом генерации капель, так оно воздействует

бесконтактно, не приводит к нагреву и изменению физических свойств многофазной системы.

Микрофлюидные чипы могут быть изготовлены множеством различных способов, одним из наиболее популярных вариантов является использование пленки Parafilm®. Parafilm® представляет собой термопластичную пленку, которая позволяет ей оставаться твердой при комнатной температуре и плавиться при температуре примерно выше 60°C. Наиболее сложным моментом при производстве микрофлюидных чипов подобным способом является подбор режима и температуры нагрева при спекании чипа. В работе [16] указано, что чип размещали на теплой плитке в течение нескольких минут, в статье [17] сэндвич-структура нагревалась до 75°C, в работе [18] чип нагревали при температуре 120°C от двух до 10 минут в зависимости от материала чипа. Влияние температуры нагрева подробно изучено в работе [19], в которой исследованы PET–Parafilm®–PET сэндвич-структуры, полученные с помощью ламинации. В данной работе было выяснено, что оптимальной температурой является 35°C.

Еще одним вариантом изготовления микрофлюидных чипов является технология Embedded SCAffold RemovinG Open Technology (ESCARGOT) [20], заключающаяся в изготовлении микроканальной структуры посредством 3D-печати ABS-пластика. Затем эти каркасы суспендировали в жидком силиконовом

компаунде (ПДМС), последний отверждали при 75°C в течение 2 часов, после чего погружали в ацетон на 12 часов, растворяя каркасы, сделанные из ABS-пластика. Заключительная промывка ацетоном полностью очистила внутренний канал, фактически создав микрофлюидное устройство PDMS.

Проведенный литературный обзор показывает, что существует несколько технологий изготовления микрофлюидных чипов, которые могут быть использованы для изготовления систем с интегрированными управляемыми источниками магнитного поля. В данных работах используются различные значения температуры, давления и времени спекания, состава полимерной матрицы и технологии промывки, поэтому представляет интерес сравнение данных методов при производстве серии микрофлюидных чипов.

Материалы и методы

Микрофлюидный чип, конфигурация которого представлена на рисунке 1, использовался в качестве тестового образца. Данный чип предполагается использовать для исследований управляемой динамики немагнитных включений в магнитной жидкости. Заполнение магнитной жидкостью будет осуществляться через вход 1, подача немагнитной фазы – через вход 2. Использование внешнего магнитного поля, создавае-

мого кольцевым постоянным магнитом 3, а также электромагнитом, согласно проведенным исследованиям [21–22], позволит создать управляемый счетчик-микродозатор в микрофлюидном исполнении.

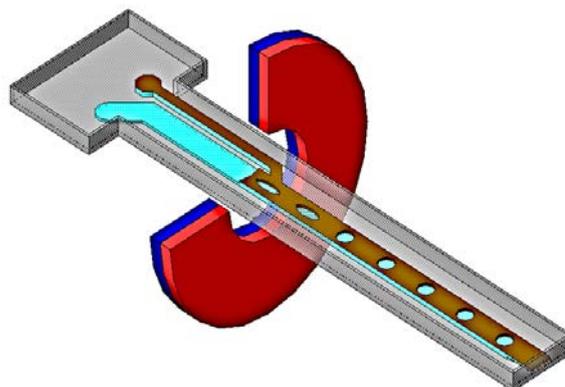


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. The scheme of the experimental setup

Для изготовления микрофлюидных чипов использовалось несколько технологий, параметры которых представлены в таблице.

Шаблоны из пенки Parafilm® были изготовлены на плоттере Gifttec MT-365. При изготовлении микрофлюидных чипов по технологиям 1–4 лазерный станок Raylogic 11G 1290 использовался для обработки оргстекла, плитка ИКА С-Mag HP 7 – для спекания сэндвич-структур, температура контролировалась с помощью тепловизора testo 875-2. Ламинатор Vektor HD-320 использовался для изготовления микрофлюидных пленочных чипов.

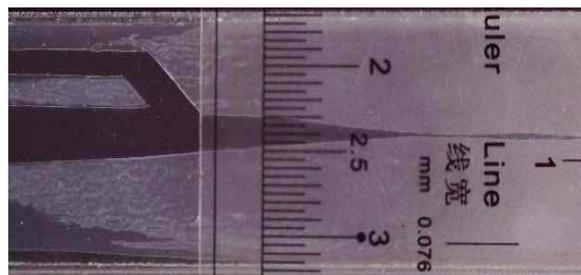
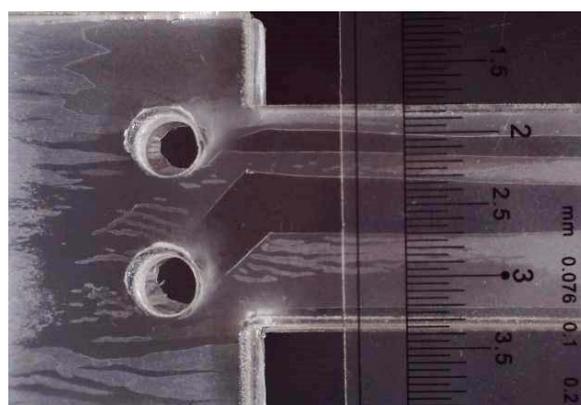
Таблица. Технологии изготовления микрофлюидных чипов на основе сэндвич-структур с пленкой Parafilm®**Table.** Technologies for producing microfluid chips based on sandwich structures with Parafilm® film

Технология производства чипов / Chip production technology	Параметры / Options		
	сэндвич-структура / Sandwich structure	температура нагрева T , °C / Heating temperature T , °C	время выдержки t , мин / Exposure time, t , min
1 [17]	Plexiglass–Parafilm®–Plexiglass	75	5
2 [18]		120	2–10
3 [16]		40	5
4 [19]	PET–Parafilm®–PET	35	1
5	Plexiglass–Parafilm®–Plexiglass	55	10

Результаты и их обсуждение

При изготовлении чипов по технологиям 1–2 (см. табл.) наблюдалось сужение микроканалов, а иногда и полное их перекрытие. Фотография данных дефектов, полученная с помощью микроскопа Микмед 5.0, представлена на рисунке 2. Появление данных дефектов вызвано плавлением пленки Parafilm® при внешнем давлении. Также было установлено, что в результате воздействия повышенных температур образуются раковины, микрофотография которых приведена на рисунке 3. При изготовлении микрофлюидных чипов по технологии 3 наблюдалась разгерметизация чипа, вызванная неполной проклейкой пленки Parafilm® при данной температуре.

Также при производстве чипов по технологиям 1–3 с помощью термофотографии было установлено, что лабораторная электроплитка имеет области неравномерного нагрева, что может отразиться на качестве изделия.

**Рис. 2.** Фотография сужения микроканалов**Fig. 2.** Photo of narrowing of microchannels**Рис. 3.** Фотографии дефектов в виде раковин**Fig. 3.** Photos of shell defects

Более равномерный нагрев может быть обеспечен с помощью технологии

ламинации 4, с помощью которой было проведено исследование температуры спекания на качество склейки чипа и уменьшение толщины каналов. Для этого была изготовлена серия чипов с

каналом шириной 3 мм, которая была ламинирована при различных температурах. Зависимость относительного уменьшения ширины канала от температуры представлена на рисунке 4.

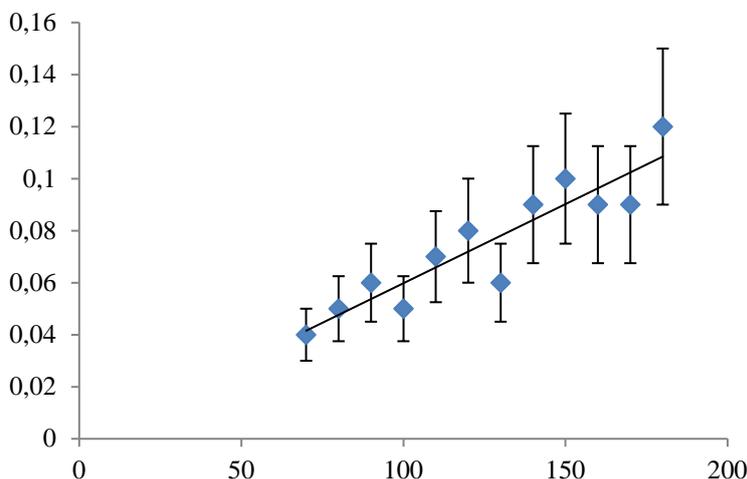


Рис. 4. Зависимость относительного уменьшения ширины канала от температуры

Fig. 4. The dependence of the relative decrease the channel width on temperature

При проведении эксперимента было установлено, что при температуре меньше 50°C наблюдается неполная проклейка пленки Parafilm®, а при превышении 60°C пленка Parafilm® плавится, в результате чего наблюдается уменьшение толщины каналов. Также было установлено, что при заполнении магнитной жидкостью в магнитном поле микрофлюидные чипы, изготовленные на основе сэндвич-структур Plexiglass – Parafilm® – Plexiglass, деформируются. Причиной этого является низкая жесткость получаемых структур.

На основании проведенных исследований, с учетом выявленных особенностей и недостатков технологий производства микрофлюидных чипов 1–4, был предложен оптимальный вариант, при-

веденный в таблице под номером 5. Данная технология, схема которой представлена на рисунке 5, состоит из следующих операций:

1. Изготовление слоев чипа: оргстекло с помощью обработки на лазерном станке Raylogic 11G 1290, пленка Parafilm® на плоттере Giftec MT-365
2. Сборка сэндвич-структуры с помощью зажимов.
3. Предварительный нагрев электроплитки с массивной металлической пластиной для равномерного распределения тепла до 55°C.
4. Спекание с контролем равномерности прогрева до 55°C с помощью тепловизора.
5. Разборка изделия, приклеивание коннекторов.

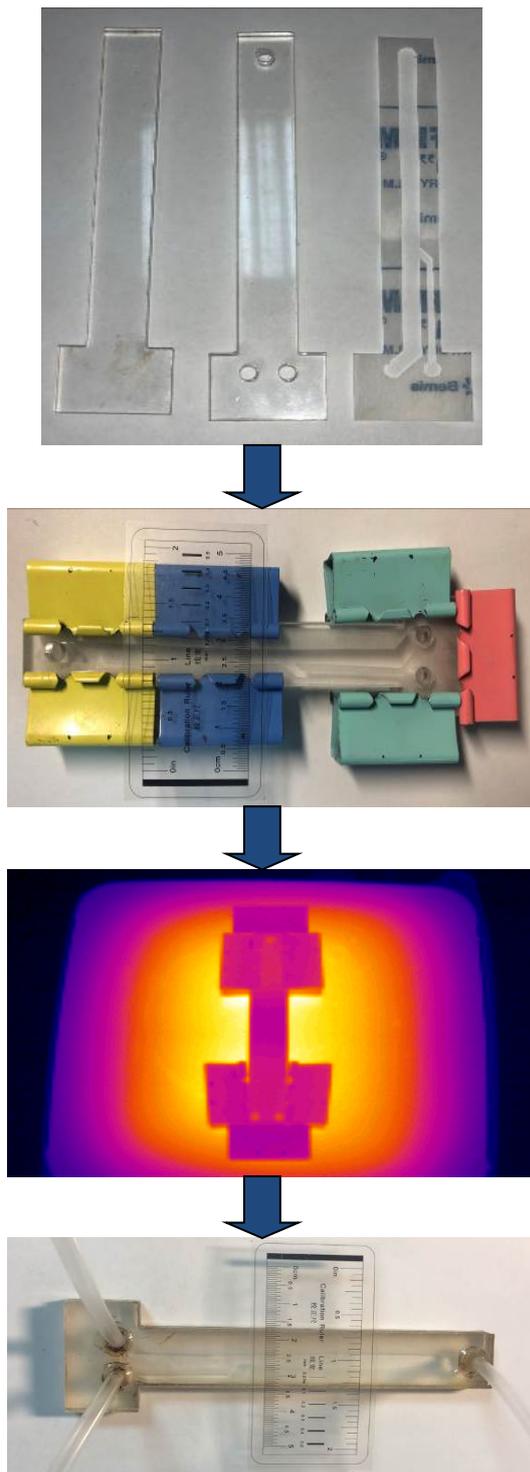


Рис. 5. Технология производства микрофлюидных чипов на основе сэндвич-структур с пленкой Parafilm®

Fig. 5. Technology for the production of microfluidic chips based on the sandwich structures with Parafilm® film

Фотография экспериментальной установки по исследованию динамики немагнитных включений в магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле в микрофлюидном чипе, изготовленном по технологии 5, представлена на рисунке 6, а. Результаты микрофотографии, полученной на данной установке, приведены на рисунке 6, б.

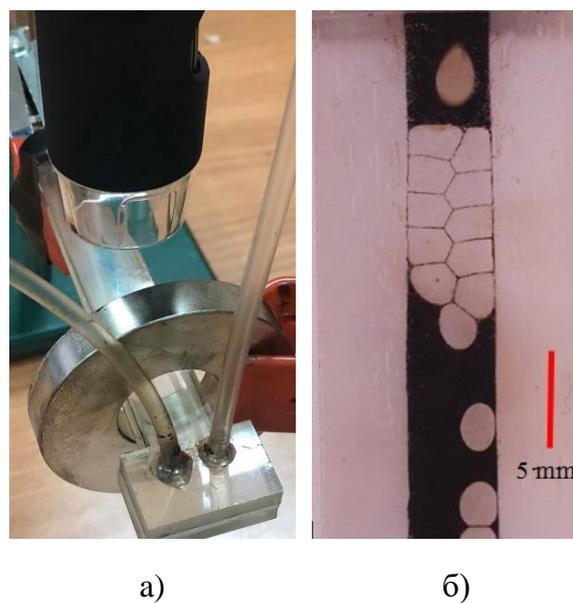


Рис. 6. Экспериментальная установка на основе микрофлюидного чипа: а – общий вид; б – микрофотография динамики немагнитных включений в магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле

Fig. 6. Experimental setup based on a microfluidic chip: а – general view; б – the micrograph of the dynamics of non-magnetic inclusions in a magnetic fluid in an inhomogeneous magnetic field

К недостаткам технологии производства микрофлюидных чипов на основе сэндвич-структур Plexiglass – Parafilm® – Plexiglass можно отнести ограничения, связанные с минимальной

шириной прослойки пленки между соседними каналами в 1 мм, которая обеспечивает герметичность чипа, а также невозможность интеграции источников управляемых внешних воздействий, например: магнитов, электродов, нагревательных элементов и т. д. Этим недостатком лишена технология (ESCARGOT) [20], заключающаяся в изготовлении микроканальной структуры посредством 3D-печати ABS-пластика. С помощью нее были изготовлены микрофлюидные чипы на основе двух прозрачных двухкомпонентных силиконовых компаундов REXANT ПК-68 и Силагерм 2104. Для изготовления схемы-каркаса микрофлюидных каналов использовался 3D-принтер Picaso.

Схема изготовления микрофлюидных чипов с интегрированными источниками магнитного поля на основе ESCARGOT представлена на рисунке 7, она включает:

- 1) изготовление компьютерной трехмерной модели каналов микрофлюидного чипа;
- 2) печать модели на 3D-принтере Picaso;
- 3) сборку схемы-каркаса микрофлюидных каналов, источников магнитного поля в форме для заливки;
- 4) подготовку компаунда, которая включает спешивание его компонентов и дегазацию;
- 5) заливка компаунда в форму;
- 6) выдержку в 24 часа и изъятие чипа из формы.
- 7) промывку чипа в ацетоне для удаления ABS-пластика.

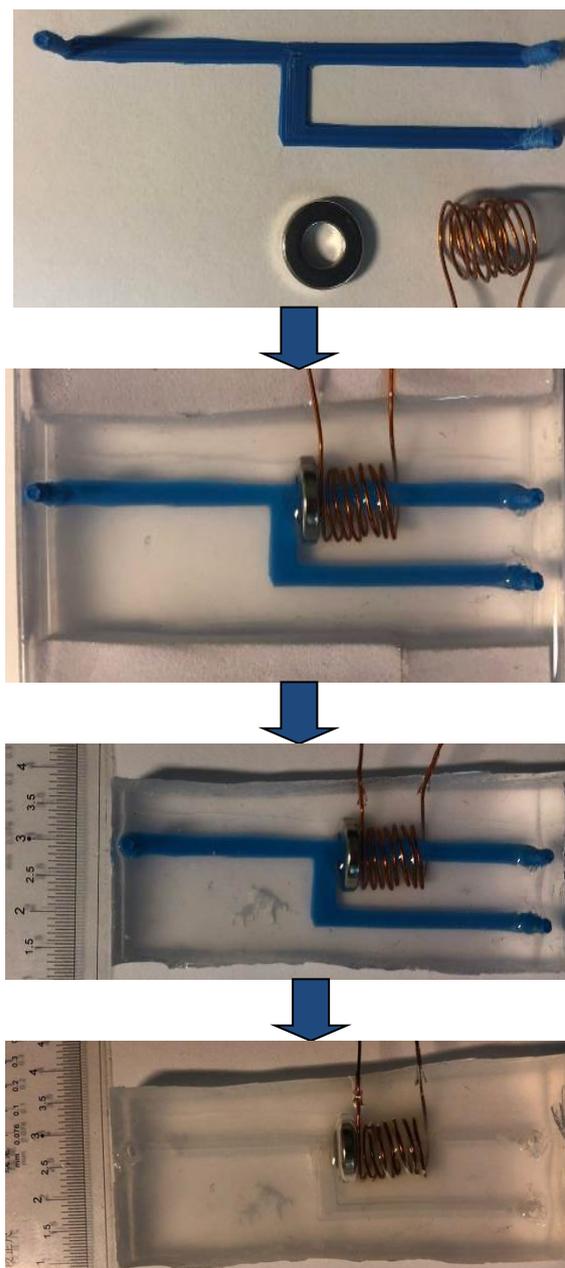


Рис. 7. Производство микрофлюидных чипов на основе ESCARGOT

Fig. 7. Production of microfluidic chips based on ESCARGOT

По итогам изготовления микрофлюидных чипов установлено, что наилучшим компаундом для их изготовления является Силагерм 2104. Изделия из компаунда REXANT ПК-68 после промывки ацетоном становились хрупкими и мутнели.

Выводы

В работе рассмотрено несколько технологий производства микрофлюидных устройств. Определены оптимальные параметры изготовления чипов на основе сэндвич-структур Plexiglass–Parafilm®–Plexiglass. Предложен оригинальный вариант изготовления микро-

флюидного устройства с интегрированным миниатюрным источником магнитного поля на основе технологии ESCARGOT. Полученные результаты могут быть полезны для разработки устройств по управляемому воздействию на умные материалы в микрофлюидных чипах.

Список литературы

1. Rosensweig R. E. *Ferrohydrodynamics*. Courier Corporation, 1985. 348 p.
2. Такетоми С., Тикадзуми С. *Магнитные жидкости*. М.: Мир, 1993. 272 с.
3. Synchronous magnetic control of water droplets in bulk ferrofluid / G. Katsikis, A. Breant, A. Rinberg, M. Prakash // *Soft matter*. 2018. Vol. 14, No. 5. P. 681–692.
4. Баштовой В. Г., Берковский Б. М., Вислович А. Н. *Введение в термомеханику магнитных жидкостей*. М.: ИВТАН, 1985. 188 с.
5. Полунин В. М. *Акустические эффекты в магнитных жидкостях*. М.: Физматлит, 2008. 208 с.
6. Instability of the flow of a magnetic liquid pushing down an air cavity / M. L. Boev, V. M. Polunin, P. A. Ryapolov, V. G. Bashtovoi, A. G. Reks, Yu. B. Kazakov, I. M. Aref'ev, T. A. Aref'eva // *Russian Physics Journal*. 2015. Vol. 57, is. 10. P. 1348–1355.
7. Возмущение намагниченности магнитной жидкости ультрамалыми тепловыми колебаниями, сопровождающими звуковую волну / В. М. Полунин, А. М. Стороженко, П. А. Ряполов, А. О. Танцюра, Ю. Б. Казаков, Т. А. Арефьева, И. М. Арефьев, Ю. А. Нерочев, В. И. Коротковский // *Акустический журнал*. 2014. Т. 60, № 5. С. 476–482.
8. Захват и передислокация порции воздуха управляемым потоком нанодисперсной магнитной жидкости / В. Г. Баштовой, В. М. Полунин, М. Л. Боев, П. А. Ряполов // *Нанотехника*. 2013. № 1(33). С. 84–91.
9. Захват воздушной полости плоским каналом с магнитной жидкостью в кольцевом магните / П. А. Ряполов, В. М. Полунин, Е. Б. Постников, В. Г. Баштовой, А. Г. Рекс, Е. А. Соколов // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2020. Т. 63, № 6. С. 163–169.
10. Ряполов П. А., Соколов Е. А. Динамика немагнитных жидких и газообразных включений в магнитной жидкости в магнитном поле кольцевого магнита // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2021. Т. 11, № 1. С. 102–113.

11. Synchronous magnetic control of water droplets in bulk ferrofluid / G. Katsikis, A. Breant, A. Rinberg, M. Prakash // *Soft matter*. 2018. Vol. 14, No. 5. P. 681–692.

12. Zakinyan A. R., Zakinyan A. A. Rotating field induced torque on ferrofluid emulsion with deformable dispersed phase microdrops // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2020. Vol. 314. P. 112347.

13. Magnetic field-driven deformation, attraction, and coalescence of nonmagnetic aqueous droplets in an oil-based ferrofluid / C. A. Rigoni, J. Fresnais, D. Talbot, R. Massart, R. Perzynski, J. C. Bacri, A. Abou-Hassan // *Langmuir*. 2020. Vol. 36, No. 18. P. 5048–5057.

14. Cross-stream migration and coalescence of droplets in a microchannel co-flow using magnetophoresis / U. Banerjee, C. Mandal, S. K. Jain, A. K. Sen // *Physics of Fluids*. 2019. Vol. 31, No. 11. P. 112003.

15. Active droplet generation in microfluidics / Z. Z. Chong, S. H. Tan, A. M. Gañán-Calvo, S. B. Tor, N. H. Loh, N. T. Nguyen // *Lab on a Chip*. 2016. Vol. 16, No. 1. P. 35–58.

16. Wang Q., Bentley M. R., Steinbock O. Self-organization of layered inorganic membranes in microfluidic devices // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2017. Vol. 121, No. 26. P. 14120–14127.

17. Gravity effects on mixing with magnetic micro-convection in microfluidics / G. Kitenbergs, A. Tatuļčenkovs, L. Puķina, A. Cēbers // *The European Physical Journal E*. 2018. Vol. 41, No. 11. P. 1–11.

18. Yu L., Shi Z. Z. Microfluidic paper-based analytical devices fabricated by low-cost photolithography and embossing of Parafilm® // *Lab on a Chip*. 2015. Vol. 15, No. 7. P. 1642–1645.

19. Fast prototyping of a customized microfluidic device in a non-clean-room setting by cutting and laminating Parafilm® / Y. Lu, Z. Shi, L. Yu, C. M. Li // *RSC advances*. 2016. Vol. 6, No. 88. P. 85468–85472.

20. Saggiomo V., Velders A. H. Simple 3D printed scaffold-removal method for the fabrication of intricate microfluidic devices // *Advanced science*. 2015. Vol. 2, No. 9. P. 1500125.

21. The behaviour of gas inclusions in a magnetic fluid in a non-uniform magnetic field / P. A. Ryapolov, V. M. Polunin, E. B. Postnikov, V. G. Bashtovoi, A. G. Reks, E. A. Sokolov // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. Vol. 497. P. 165925.

22. Поведение капель воды в магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле кольцевого магнита / П. А. Ряполов, Е. А. Соколов, И. А. Шабанова, А. О. Васильева, Д. А. Калюжная, А. В. Кузько // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2020. Т. 10, № 3. С. 45–57.

References

1. Rosensweig R. E. *Ferrohydrodynamics*. Courier Corporation, 1985. 348 p.
2. Taketomi S., Chikazumi S. *Magnitnye zhidkosti [Magnetic fluids]*. Moscow, Mir Publ., 1993. 272 p.
3. Katsikis G., Katsikis G., Breant A., Rinberg A., Prakash M. Synchronous magnetic control of water droplets in bulk ferrofluid. *Soft matter.*, 2018, vol. 14, no. 5, pp. 681–692.
4. Bashtovoi V. G., Berkovsky B. M., Vislovich A. N. *Vvedenie v termomekhaniku magnitnykh zhidkosti [Introduction to thermomechanics of magnetic fluids]*. Moscow, IVTAN Publ., 1985. 188 p.
5. Polunin V. M. *Akusticheskie efekty v magnitnykh zhidkostyakh [Acoustic effects in magnetic fluids]*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 208 p.
6. Boev V. M., Polunin V. M., Ryapolov P. A., Bashtovoi V. G., Reks A. G., Kazakov Yu. B., Aref'ev I. M., Aref'eva T. A. Instability of the flow of a magnetic liquid pushing down an air cavity. *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 57, is. 10, pp. 1348–1355.
7. Polunin V. M., Storozhenko A. M., Ryapolov P. A., Tantsyura A. O., Kazakov Yu. B., Arefieva T. A., Arefiev I. M., Nerochev Yu. A., Korotkovsky V. I. *Vozmushchenie namagnichennosti magnitnoi zhidkosti ul'tramalymi teplovymi kolebaniyami, soprovozhdayushchimi zvukovuyu volnu [Perturbation of the magnetization of a magnetic fluid by ultrasmall thermal vibrations accompanying an acoustic wave]*. *Akusticheskii zhurnal = Acoustic journal*, 2014, vol. 60, no. 5, pp. 476–482.
8. Bashtovoi V. G., Polunin V. M., Boev M. L., Ryapolov P. A. *Zakhvat i peredislokatsiya portsii vozdukhа upravlyаемym potokom nanodispersnoi magnitnoi zhidkosti [Capture and redeployment of a portion of air by a controlled flow of nanodispersed magnetic fluid]*. *Nanotechn*, 2013, no. 1 (33), pp. 84–91.
9. Ryapolov P. A., Polunin V. M., Postnikov E. B., Bashtova V. G., Reks A. G., Sokolov E. A. *Zakhvat vozdukhnoi polosti ploskim kanalom s magnitnoi zhidkost'yu v kol'tsevom magnite [Capturing an air cavity by a flat channel with magnetic fluid in a ring magnet]*. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika = Proceedings of Higher Educational Institutions. Physics*, 2020, vol. 63, no. 6, pp. 163–169.
10. Ryapolov P. A., Sokolov E. A. *Dinamika nemagnitnykh zhidkikh i gazoobraznykh vkluyucheni v magnitnoi zhidkosti v magnitnom pole kol'tseвого magnita [Dynamics of non-magnetic liquid and gaseous inclusions in a magnetic fluid in the magnetic field of a ring magnet]*. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 102–113.
11. Katsikis G., Breant A., Rinberg A., Prakash M. Synchronous magnetic control of water droplets in bulk ferrofluid. *Soft matter.*, 2018, vol. 14, no. 5, pp. 681–692.

12. Zakinyan A. R., Zakinyan A. A. Rotating field induced torque on ferrofluid emulsion with deformable dispersed phase microdrops. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, vol. 314, p. 112347.

13. Rigoni C., Fresnais J., Talbot D., Massart R., Perzynski R., Bacri J. C., Abou-Hasan A. Magnetic field-driven deformation, attraction, and coalescence of nonmagnetic aqueous droplets in an oil-based ferrofluid. *Langmuir*, 2020, vol. 36, no. 18, pp. 5048–5057.

14. Banerjee U., Mandal C., Jain S. K., Sen A. K. Cross-stream migration and coalescence of droplets in a microchannel co-flow using magnetophoresis. *Physics of Fluids*, 2019, vol. 31, no. 11, p. 112003.

15. Chong Z. Z., Tan S. H., Gañán-Calvo A. M., Tor S. B., Loh N. H., Nguyen N. T. Active droplet generation in microfluidics. *Lab on a Chip*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 35–58.

16. Wang Q., Bentley M. R., Steinbock O. Self-organization of layered inorganic membranes in microfluidic devices. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2017, vol. 121, no. 26, pp. 14120–14127.

17. Kitenbergs G., Tatuļčenkova A., Puķina L., Cēbers A. Gravity effects on mixing with magnetic micro-convection in microfluidics. *The European Physical Journal E*, 2018, vol. 41, no. 11, pp. 1–11.

18. Yu L., Shi Z. Z. Microfluidic paper-based analytical devices fabricated by low-cost photolithography and embossing of Parafilm®. *Lab on a Chip*, 2015, vol. 15, no. 7, pp. 1642–1645.

19. Lu Y., Shi Z., Yu L., Li C. M. Fast prototyping of a customized microfluidic device in a non-clean-room setting by cutting and laminating Parafilm®. *RSC advances*, 2016, vol. 6, no. 88, pp. 85468–85472.

20. Saggiomo V., Velders A. H. Simple 3D printed scaffold-removal method for the fabrication of intricate microfluidic devices. *Advanced science*, 2015, vol. 2, no. 9, p. 1500125.

21. Ryapolov P. A., Polunin V. M., Postnikov E. B., Bashtovoi V. G., Reks A. G., Sokolov E. A. The behaviour of gas inclusions in a magnetic fluid in a non-uniform magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, vol. 497, p. 165925.

22. Ryapolov P. A., Sokolov E. A., Shabanova I. A., Vasilyeva A. O., Kalyuzhnaya D. A., Kuzko A. V. Povedenie kapel' vody v magnitnoi zhidkosti v neodnorodnom magnitnom pole kol'tseвого magnita [Behavior of water drops in a magnetic fluid in a non-uniform magnetic field of a ring magnet]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 45–57.

Информация об авторах / Information about the Authors

Соколов Евгений Александрович, аспирант кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: evgeniysokolov1@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-9069-010X

Evgeny A. Sokolov, Post-Graduate Student of the Departments of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: evgeniysokolov1@yandex.ru ORCID: 0000-0002-9069-010X

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

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

Васильева Анастасия Олеговна, студент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: vasilyeva.ao@mail.ru

Anastasia O. Vasilyeva, Student of the Departments of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: vasilyeva.ao@mail.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, ORCID: 0000-0003-0393-3538

Petr A. Ryapolov, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Dean Faculty of Natural Sciences, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: r-piter@yandex.ru ORCID: 0000-0003-0393-3538