

На правах рукописи



Шлепаков Павел Сергеевич

РАЗРАБОТКА МИКРОФЛЮИДНОГО НАСОСА НА ОСНОВЕ
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО АКТЮАТОРА

2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ярославль - 2026

Работа выполнена в Обособленном подразделении «Отдел микротехнологий» - Ярославль Отделения физико-технологических исследований имени К. А. Валиева Центра перспективной микроэлектроники Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт») и в Ярославском государственном университете им. П.Г. Демидова

Научный руководитель:

Уваров Илья Владимирович, доктор технических наук, старший научный сотрудник Обособленного подразделения «Отдел микротехнологий» - Ярославль Отделения физико-технологических исследований имени К. А. Валиева Центра перспективной микроэлектроники НИЦ «Курчатовский институт», г. Ярославль

Официальные оппоненты:

Лысенко Игорь Евгеньевич, доктор технических наук, доцент, директор по разработке микроэлектромеханических систем АО «Дизайн Центр «Союз», г. Зеленоград

Петрова Софья Владимировна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Инженерно-технологической академии Южного федерального университета, г. Таганрог

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Зеленоград

Защита состоится 15 мая 2026 г., начало в 12:00, на заседании диссертационного совета 02.1.003.09 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте www.nrcki.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

02.01.003.09, к.ф.-м.н.



Рогожин А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Микрофлюидные системы являются отдельным классом микроэлектромеханических систем и представляют собой миниатюрные чипы с сетью микроканалов и камер для обработки и анализа вещества. Использование микрофлюидных систем имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными лабораторными методами. В частности, они характеризуются меньшей погрешностью, повышенной чувствительностью, высокой скоростью анализа и низкой стоимостью. Поперечные размеры каналов микрофлюидных систем составляют от десятых долей до нескольких сотен микрон, что позволяет им оперировать малыми объемами ($10^{-9} - 10^{-18}$ л) жидкости. Поэтому для исследования с помощью микрофлюидных устройств требуется на порядки меньше материала образца и реагентов. Низкая стоимость микрофлюидных чипов обеспечивает их одноразовое применение, что гарантирует высокую стерильность и исключает перекрёстное загрязнение. Внедрение микрофлюидных устройств в различные области науки позволяет реализовать экспресс-диагностику заболеваний, проводить точный анализ вещества и клеток.

Особое место среди микрофлюидных систем занимают устройства, доставляющие лекарства непосредственно к поражённым органам. Применение данного метода позволяет повысить эффективность препаратов, уменьшить побочное действие лекарств и разрабатывать индивидуальный план лечения онкологических заболеваний, диабета, остеопороза и т.д. Энергоснабжение таких устройств может осуществляться беспроводным способом. Таким образом, изделие представляет собой автономную систему с аккумулятором малой емкости, управляющей электроникой и микронасосом, обеспечивающим перекачку препарата из встроенного резервуара через микроиглы в организм человека.

Поскольку устройства доставки лекарств закрепляются непосредственно на пораженном органе, от габаритов составных частей изделия зависит максимальная емкость резервуара с лекарством, частота его дозаправки и удобство использования системы в целом. Это делает уменьшение размеров устройства критически важной задачей. Успехи в миниатюризации электронных компонентов и аккумуляторов на сегодняшний день колоссальны. Дополнительное уменьшение габаритов ограничивается характеристиками используемых микронасосов.

Современные микронасосы демонстрируют расход от 1 до 1000 мкл/мин при точности дозировки порядка 10 нл. Однако уменьшение их размеров достигло своего предела на отметке $\sim 100 \text{ мм}^3$. В устройствах доставки лекарств применяются насосы различных типов: пьезоэлектрические, электромагнитные, электростатические, термические, осмотические, электрохимические и др. Уменьшение размеров насосов существующих типов значительно ухудшает рабочие параметры устройства или вовсе невозможно. Отличие между типами заключается в физическом принципе, отклоняющим гибкую мембрану для создания движения жидкости. Недавно был представлен новый способ отклонения мембраны, основанный на электролизе переменной полярности. Использование такого типа электролиза в качестве рабочего принципа микронасоса позволит

сохранить рабочие параметры устройства на приемлемом уровне при меньших размерах рабочей части по сравнению с другими типами микронасосов.

Таким образом, разработка микронасоса, основанного на электролизе переменной полярности, сочетающего в себе одновременно малый объем рабочей части, приемлемый расход и высокую точность дозировки является актуальной темой исследования.

Целью работы являлось исследование и разработка микронасоса на основе электролиза переменной полярности с объемом рабочей части, меньшей по сравнению с другими типами насосов, при этом расходом и точностью дозировки, не уступающим по характеристикам существующим устройствам. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поставлены следующие **задачи**:

1. Провести сравнительный анализ существующих микронасосов с количественной оценкой расхода, точности дозировки, объема рабочей части. Оценить возможность применения этих типов насосов для перекачки лекарств. Обосновать выбор наиболее перспективного принципа работы насоса.

2. Спроектировать микронасос, подобрать оптимальные материалы, провести моделирование работы устройства, рассчитать ключевые характеристики насоса.

3. Разработать маршрут изготовления микронасоса и отладить технологические процессы производства устройства. Изготовить микронасос.

4. Разработать метрологическое обеспечение диссертационного исследования для измерения рабочих характеристик насоса.

5. Исследовать особенности электролиза переменной полярности и улучшить рабочие характеристики устройства за счет оптимизации формы и материала электродов, частоты смены полярности электролиза и длительности рабочего сигнала.

Научная новизна работы

1. Впервые продемонстрирован микронасос на основе электролиза переменной полярности. Быстрое удаление газа обеспечивает работу насоса с частотой 25 Гц, что на несколько порядков больше по сравнению с классическим электрохимическим насосом. Это открывает возможность уменьшения размеров устройства без потери производительности и обеспечивает ранее не достижимую насосами других типов точность дозировки 0,14 нл.

2. Разработан способ работы электрохимического актюатора во взрывном режиме, основанном на достижении критической концентрации водорода и кислорода, приводящей к взрыву и отклонению мембраны. Способ обеспечивает многократное срабатывание, исключает паразитный ход мембраны и излишнее энергопотребление, а также способен повысить расход насоса до 3 мкл/мин, характерный для насосов в десятки раз больших размеров.

3. Установлен механизм деградации титановых электродов в процессе электролиза переменной полярности. Показано, что на краях электродов формируется оксидный слой с механическими напряжениями, приводящими к его отслоению. С повышением частоты смены полярности электролиза скорость окисления снижается.

Достоверность результатов, полученных в данной работе, определяется применением современных экспериментальных методик, воспроизводимостью результатов, а также согласием экспериментальных данных с результатами математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Принцип работы микромеханического насоса, основанный на электролизе переменной полярности. Предложенный принцип повышает рабочую частоту устройства на несколько порядков по сравнению с классическим электрохимическим насосом и позволяет уменьшить его размер на два порядка, тем самым повысить точность дозировки.

2. Способ работы электрохимического актюатора, основанный на взрыве водород-кислородной смеси и обеспечивающий рост скорости перекачки в десятки раз по сравнению с режимом без взрыва.

3. Серия экспериментальных исследований разрушения титановых электродов различной формы в процессе электролиза переменной полярности частотой 50 – 500 кГц.

Практическая ценность работы

Разработана технология изготовления мембранного микронасоса. Технология позволяет получить единый микрофлюидный чип с двумя уровнями микроканалов и входными отверстиями для заполнения жидкостью. С одной стороны чип закрыт стеклянной пластиной, через которую возможно отслеживать процессы в каналах и камерах. Размеры каналов и количество/форма камер могут быть выбраны произвольно. К камерам возможно подвести электроды или чувствительные элементы, изготовленные методом фотолитографии. Таким образом, данная технология подходит для изготовления микрофлюидных чипов различного назначения.

Разработан и изготовлен микронасос, работающий за счет электролиза напряжением переменной полярности. Насос демонстрирует дозировку 0,14 нл, что на порядок меньше по сравнению с известными насосами различных типов. Объем рабочей части составляет 3 мм³, на два порядка меньший по сравнению с другими устройствами электрохимического типа. Определены оптимальная форма электродов насоса и материал их рабочего слоя. Преимущества изделия делают его применимым для использования в микрофлюидных системах, в частности в системах доставки лекарств, и открывают новые возможности как в лабораторных исследованиях, так и в медицине.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались автором на следующих российских и международных конференциях:

- Российский форум «Микроэлектроника 2025», ФТ Сириус, Россия, 2025;
- International Conference «Micro- and Nanoelectronics – 2025» (ICMNE), Yaroslavl, Russia, 2025;
- International Conference «Micro- and Nanoelectronics» (ICMNE), Moscow – Zvenigorod, Russia, 2023;
- Российский форум Микроэлектроника 2022 Школа молодых ученых, пгт. Гурзуф, Россия, 2022;
- Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Зеленоград, Россия, 2024, 2023;
- Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва, Россия, 2024.
- International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (SPbOPEN), Saint Petersburg, Russia, 2024, 2023, 2022, 2020, 2019, 2018;
- Международная научно-техническая конференция молодых ученых «Инновационные материалы и технологии», Минск, Беларусь, 2020;
- International Conference on Modern Problems in Physics of Surfaces and Nanostructures (ISMPSN), Yaroslavl, Russia, 2019;
- Всероссийская с международным участием молодежная научно-практическая конференция «Физика, техника и технология сложных систем», Ярославль, Россия, 2023, 2022;

Публикации

Результаты диссертации опубликованы в 7 работах, включая 2 статьи в российских журналах, рекомендованных ВАК, 4 статьи в зарубежных журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus (2 статьи входят в Q1), 1 патент РФ на изобретение. Список работ приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора

Общая постановка задачи осуществлялась соискателем совместно с научным руководителем Уваровым И. В. В диссертации изложены результаты, полученные как лично автором, так и в соавторстве со Световым В. Б. (теоретический анализ процессов), Наумовым В. В. (магнетронное распыление), Меленевым А. Е. (разработка и изготовление генератора сигналов), Королёвой О. М. (фотолитография), Вагановой Е. И. (жидкостное травление), Морозовым О. В. (плазмохимическое травление кремния), Мазалецким Л. А. (РЭМ-исследования, энергодисперсионный рентгеновский микроанализ). Сбор, обработка и интерпретация экспериментальных данных, 3D печать вспомогательных приспособлений для экспериментов проводились соискателем самостоятельно.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы и содержит 147 страниц, 103 рисунка, 9 таблиц. Список использованных источников включает 126 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится краткое описание состояния проблемы, обосновывается актуальность темы работы, сформулированы цель и конкретные задачи исследования, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится анализ существующих типов микронасосов для микрофлюидных систем, описанных в отечественных и зарубежных литературных источниках. Рассмотрены основные типы микронасосов: пьезоэлектрические, электростатические, электромагнитные, термические, осмотические, электрохимические, а также принцип действия насоса, основанного на электролизе переменной полярности.

Пьезоэлектрические насосы обеспечивают высокий расход жидкости ~100 мл/мин, быстрый отклик, высокое давление до 50 кПа и высокую точность дозирования ~10 нл/цикл. Однако достигается это за счет складывания пьезоэлектрических слоев и увеличения размера устройства до 1 см³ и высокого электрического напряжения более 100 В, прикладываемого к электродам.

Электростатические насосы изготавливаются с помощью известных методов микроэлектроники, имеют высокую рабочую частоту до 400 Гц, развивают умеренное давление до 20 кПа. Однако данный тип насосов применяется лишь для перекачки неполярных жидкостей или воздуха и имеют высокое рабочее напряжение более 100 В.

Электромагнитные микронасосы способны работать с частотой 50 Гц. Развиваемое давление насоса зависит от количества витков катушки и силе тока ~1 А, проходящего через нее, при этом катушка может нагреваться до ~100°C и требует охлаждения при длительной работе. При работе насос оказывает влияние на лекарство нагревом и магнитным полем. Кроме того, электромагнитные насосы сложны для миниатюризации.

Насосы термического типа не требуют высокого рабочего напряжения, изготавливаются по планарной технологии и компактны. Однако ввиду рассеивания тепла термические насосы имеют низкую рабочую частоту (~0,01 Гц) и высокое энергопотребление. За счет нагрева термические насосы также могут изменять свойства перекачиваемого материала, что крайне нежелательно в средствах доставки лекарств и «лаборатории на чипе» для анализа вещества.

Осмотические насосы способны создавать давление ~100 кПа, перекачивать жидкость со скоростью ~1 мкл/мин. Однако не могут осуществлять перекачку дозированных порциями и, следовательно, с точно заданной скоростью ввиду необратимости процесса осмоса.

Электрохимические насосы успешно применяются в микрофлюидных системах доставки лекарств. Такие насосы компактны, демонстрируют высокий расход, не влияют на свойства перекачиваемой жидкости и могут быть изготовлены по

технологии МЭМС. Ввиду необходимости генерации пузырей газа в камере, объем насоса не может быть менее чем $0,5 \text{ см}^3$. Конструкция насоса не позволяет работать устройству с высокой рабочей частотой из-за медленного растворения газа в камере в течение нескольких минут.

Сравнительно недавно был открыт новый эффект, на основе которого возможно разработать микронасос со множеством преимуществ. Принцип работы насоса, основанном на данном эффекте, схематично представлен на рис. 1. В ходе электролиза воды импульсами напряжения переменной полярности с частотой $\sim 100 \text{ кГц}$ производится газ в виде нанопузырей водорода и кислорода. В нижней камере, закрытой гибкой мембраной, нанопузыри способны своим объемом толкать мембрану насоса и вытеснять перекачиваемую жидкость из верхней камеры, как показано на рис. 1а. После прекращения электролиза мембрана возвращается в исходное положение одновременно втягивая следующую порцию жидкости в камеру. При этом нанопузыри удаляются из камеры за несколько миллисекунд в ходе спонтанной реакции горения, что позволит достичь рабочей частоты устройства до 100 Гц .

При амплитуде напряжения выше определенного значения в камере достигается критическая концентрация нанопузырей. Происходит их слияние в микропузырь, зажигается реакция горения с последующим взрывом, резко толкающим мембрану, как изображено на рис. 1б. Ход мембраны во взрывном режиме на порядок больше, поэтому данный режим может использоваться для быстрой перекачки жидкости.

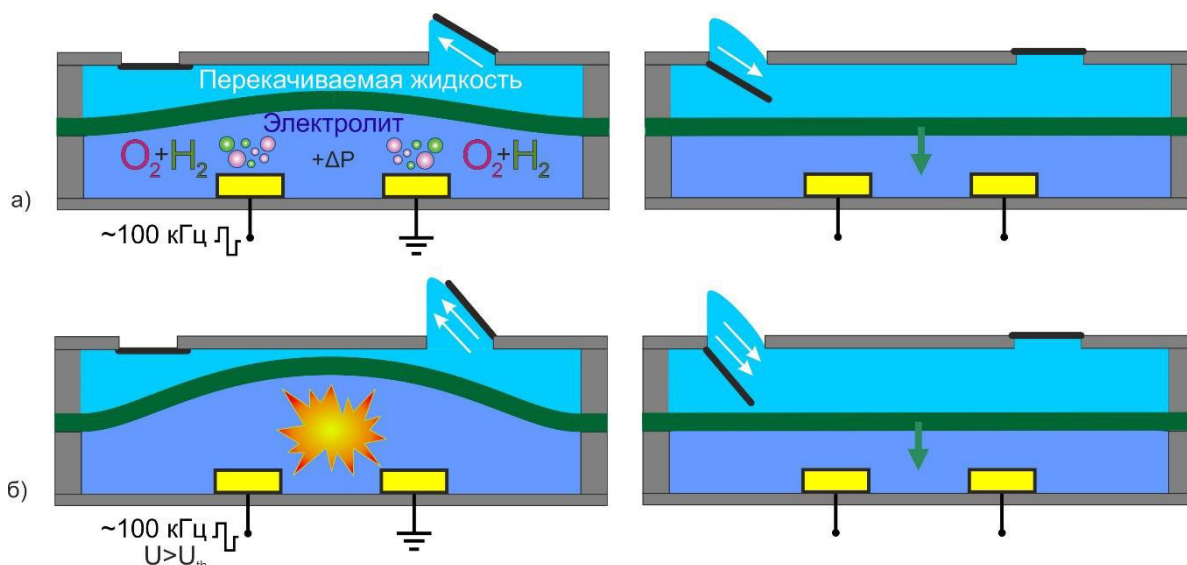


Рис. 1. Принцип действия насоса на основе электролиза переменной полярности (а) в режиме без взрывов и (б) во взрывном режиме

Объем рабочей части такого микронасоса может быть уменьшен до нескольких кубических миллиметров при этом устройство будет иметь расход, который демонстрируют насосы с габаритами более 100 мм^3 . Малое время срабатывания насоса позволит достичь одновременно и точной дозировки, и высокого расхода.

Вторая глава посвящена проектированию и изготовлению микронасоса на основе электролиза переменной полярности.

Спроектирован насос перистальтического типа. Устройство схематично изображено на рис. 2. В своем составе насос имеет три камеры с двумя электродами в каждой на нижнем уровне и канал для перекачиваемой жидкости на верхнем уровне, закрытый кремниевой подложкой с входными/выходными отверстиями для перекачиваемой жидкости и электролита. Нижний уровень изготавливается на прозрачной подложке для отслеживания процессов в камерах и каналах насоса. Стенки каналов и камер формируются из фоторезиста. Металлические электроды наносятся методом магнетронного распыления. Чтобы сформировать отверстия для заполнения насоса перекачиваемой жидкостью предусмотрены входные и выходные отверстия.

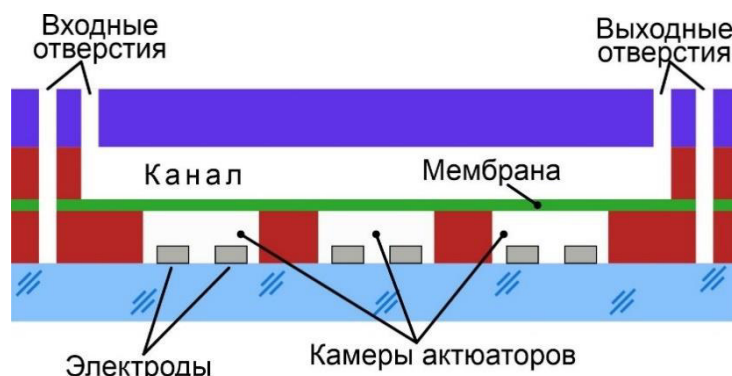


Рис. 2. Схематичное изображение микронасоса, вид сбоку

В качестве материала мембраны выбран полидиметилсилоксан (ПДМС). Высокая эластичность позволяет мембране из ПДМС выдерживать большие растяжения (более 100 мкм) без значительного износа, что важно для работы насоса во взрывном режиме. Кроме того, процесс срачивания мембраны к фоторезисту SU-8 чрезвычайно чувствителен к загрязнениям и неровностям на поверхностях. ПДМС имеет модуль Юнга 1,3 МПа, то есть является очень мягким материалом. Это свойство позволяет огибать несовершенства срачиваемых поверхностей и обеспечивать хорошую адгезию.

Камеры заполняются электролитом – одномолярным раствором сульфата натрия в дистиллированной воде. Такая концентрация соли в процессе электролиза обеспечивает эффективное производство газа без выпадения сульфата натрия в осадок. Один электрод в каждой камере заземляется, на вторые в определенной последовательности подается серия импульсов напряжения переменной полярности частотой ~100 кГц. В процессе электролиза на каждом электроде за один период импульсов производятся нанопузыри водорода и кислорода диаметром ~100 нм. Пузыри создают повышенное давление в камере, которое толкает мембрану и создает движение перекачиваемой жидкости. После прекращения электролиза нанопузыри удаляются в течение нескольких миллисекунд в ходе спонтанной реакции горения водорода и кислорода. При амплитуде импульсов напряжения выше граничного значения U_{th} концентрация нанопузырей в камере достигает критического значения, они объединяются в микропузырь, который затем взрывается, сильно отклоняя мембрану. После взрыва пузырь схлопывается и камера готова к следующему циклу работы.

Перистальтический тип насоса не нуждается в клапанах и дополнительных технологических процессах для их формирования. Отсутствие клапанов компенсировалось наличием трёх актюаторов, работающих последовательно, как изображено на рис. 3а и перекачивают жидкость слева направо. Осциллограммы управляющего напряжения представлены на рис. 3б. Для каждого актюатора управляющий сигнал представляет собой серию импульсов напряжения амплитудой U и длительностью t_a . За это время мембрана поднимается вверх и двигает жидкость над собой. Во время паузы длительностью t_p мембрана возвращается в исходное положение. Управляющий сигнал идентичен для каждого актюатора, но сдвинут на $2t_a/3$ и $4t_a/3$ для второго и третьего актюаторов соответственно. Таким образом рабочий период насоса составляет $t=t_a+t_p$, а рабочая частота $f=1/t$.

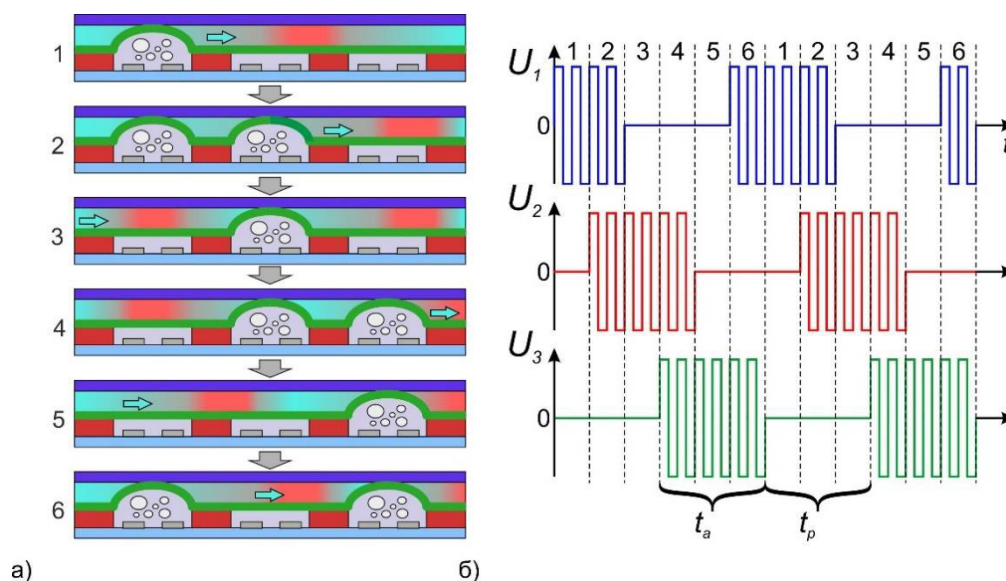


Рис. 3. Работа перистальтического насоса (а) последовательность работы актюаторов и (б) осциллограммы управляющего напряжения актюаторов

Схематичное изображение камер, каналов и контактных линий представлено на рис. 4. Диаметр каждой камеры составляет 500 мкм, а высота 16 мкм. Актюаторы данных размеров ранее исследованы и демонстрируют стабильную работу. Камеры соединены между собой каналом шириной 50 мкм. Подача управляющего напряжения на один актюатор приводит к электролизу в соседней камере актюатора. Для минимизации этого эффекта длина канала для электролита (отмечен зеленым) между актюаторами за счёт зигзагообразной формы увеличена до 10 мм. Канал для перекачиваемой жидкости шириной 120 мкм проходит напрямую и также содержит три камеры диаметром 500 мкм над актюаторами. Высота канала составляет 10 мкм и совпадает с максимальным отклонением мембраны в режиме без взрыва, исследованного ранее. Таким образом объем рабочей части микронасоса составляет всего 3 мм³, что на два порядка меньше по сравнению с другими насосами, известных на сегодняшний день. Прозрачность стекла позволяет наблюдать движение мембран и менисков в каналах.

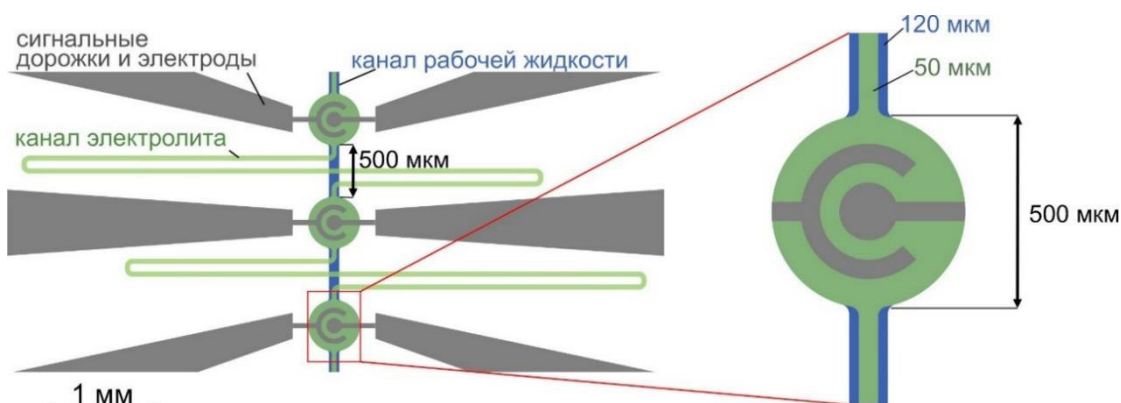


Рис. 4. Схема расположения каналов и электродов насоса, вид сверху

Объем дозировки ΔV можно вычислить как:

$$\Delta V \approx \frac{1}{2} \frac{\pi r^2 d}{2}, \quad (1)$$

где r – радиус мембраны 250 мкм, d – отклонение мембраны. За $t_a=20$ мс мембрана должна успеть отклониться на 5 мкм. При отклонении мембраны 5 мкм, объем дозировки равен $\Delta V=0,25$ нл. При $t_a=t_p=20$ мс рабочая частота насоса будет равна 25 Гц. Ожидаемый расход в этом случае составляет 0,37 мкл/мин. Это невысокая скорость перекачки по сравнению с известными насосами. Однако за 1 час работы такой насос сможет перекачать 22 мкл. Этот объем примерно соответствует типичному объему резервуара для компактных микрофлюидных систем размером 5x5x1 мм. Теоретическая рабочая частота насоса может достигать 100 Гц. При максимальной частоте расход будет составлять 1,4 мкл/мин. Таким образом, данный микронасос способен перекачивать жидкость быстро и с высокой точностью дозировки. Эти достоинства насоса являются очень важными для систем доставки лекарств.

Разработана технология изготовления микрофлюидного чипа с двумя уровнями каналов и встроенным микронасосом. Этапы изготовления представлены на рис. 5. На подложку методом магнетронного распыления последовательно наносились материалы электродов. Методом фотолитографии формировался рисунок электродов. Затем на подложку наносился фоторезист SU-8 3005 в котором методом фотолитографии формировались три камеры и каналы для электролита. Задубливание фоторезиста не выполнялось. Предварительная и финальная сушка фоторезиста проводились при температуре 95 и 80°C в течение 20 и 10 мин соответственно.

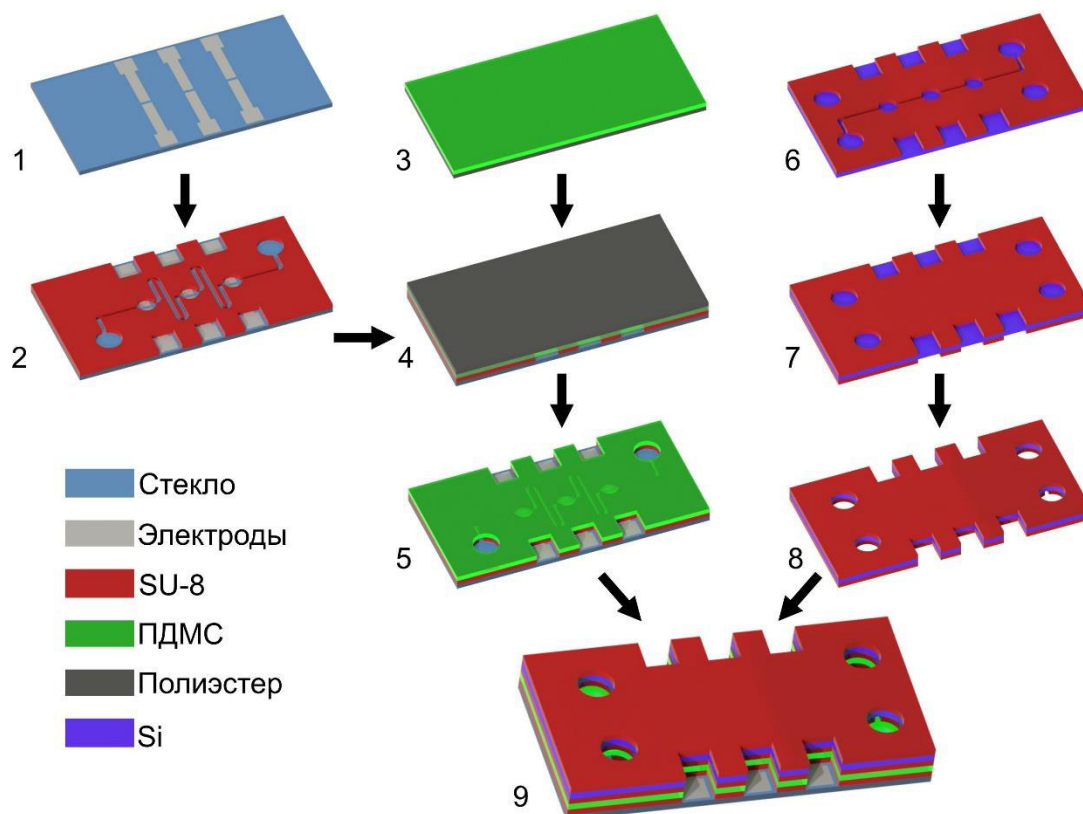


Рис. 5. Этапы процесса изготовления микронасоса.

Следующим этапом на полиэстеровой гибкой подложке формировалась мембрана из ПДМС (этап 3), которая затем срачивалась со слоем SU-8 на стеклянной подложке (шаг 4). Сращивание выполняется путем обработки ПДМС в азотной плазме с помощью установки плазменной очистки. Обработанная структура прижимается к слою SU-8, и сборка прогревается при температуре 100°C.

Обработанная поверхность ПДМС приводилась в контакт с поверхностью SU-8, и выполнялся прогрев сборки. Повышенная температура запускала химическую реакцию, в результате которой образовывалась пептидная (N-C) связь. После сращивания адгезия ПДМС к SU-8 существенно превосходила адгезию ПДМС к пленке, что позволило удалить пленку вручную. После снятия пленки на пятом этапе в слое ПДМС выполнялись отверстия для подачи электролита и доступа к контактным площадкам.

Верхний уровень изготавливался на кремниевой подложке. На лицевую сторону наносился фоторезист SU-8. Методом контактной литографии в фоторезисте формируются камеры и каналы для перекачиваемой жидкости (этап 6). Седьмым этапом на тыльной стороне формировалась маска из SU-8, через которую на восьмом этапе выполняется реактивное ионное травление кремния. В результате травления в пластине формировались отверстия для закачки перекачиваемой жидкости и окна для доступа к контактным площадкам. Заключительной операцией являлось сращивание стеклянной и кремниевой пластин по описанной выше процедуре. Для производства чипа спроектировано 4 фотошаблона. Фотошаблоны представляют собой подложку из боросиликатного

стекла размером 127x127 мм и толщиной 2,3 мм с сформированным рисунком из слоя хрома толщиной 100 нм.

Для тестирования микронасоса и его основных узлов подготовлен лабораторный стенд, схема которого представлена на рис. 6. Разработанный и изготовленный в лаборатории технологии микро- и наносистемной техники генератор способен производить прямоугольные импульсы напряжения переменной полярности частотой от 50 до 500 кГц. Образец закреплялся в специальном держателе, изготовленном с помощью 3D принтера. Держатель находился на столике оптического микроскопа Mitutoyo. Генератор подключался параллельно к контактным площадкам образца и 4-х каналному USB осциллографу АКИП 75442В.

Генератор имеет сигнальных 3 выхода для формирования импульсов напряжения. Параметры рабочего сигнала для каждого актюатора настраивались с помощью программного обеспечения, установленного на персональный компьютер. Для настройки доступно изменять частоту импульсов, амплитуду напряжения и скважность импульсов, сдвиг рабочего сигнала между актюаторами по времени, количество периодов, длительность перерыва между пачками импульсов.

Один электрод актюаторов насоса заземлялся, на второй подавался управляющий сигнал с генератора. При тестировании микронасоса каждый актюатор подключался к независимому каналу генератора импульсов. Сила тока, прошедшего через электроды, измерялась с помощью измерительного трансформатора тока Т, подключенного к осциллографу.

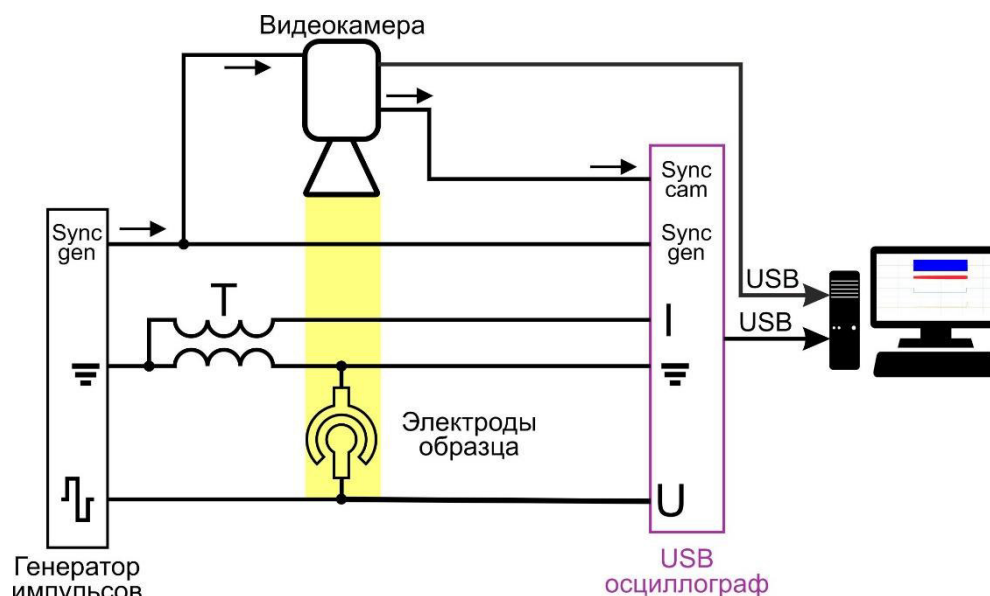


Рис. 6 - Схема лабораторного стенда

Генератор способен подавать серию импульсов с заданной длительностью. Данная опция подходит для невзрывного режима работы насоса. Во время взрывного режима работы микронасоса генератор способен отследить взрыв в камере по падению тока через электроды и прервать серию импульсов напряжения. Для отслеживания рассчитывается среднее значение силы тока за два разных промежутка времени: короткий и длительный. Длительность промежутков много

меньше длительности серии. При падении тока его среднее значение за короткий промежуток времени будет меньше, чем значение за длительный промежуток времени. При превышении определенного порога разницы между средними значениями серия импульсов напряжения прерывается. Данный метод запатентован научным коллективом, в состав которого включен соискатель (Патент РФ № 2820788). Отслеживание средних значений тока осуществляется дополнительной аппаратной частью, встроенной в генератор импульсов.

Для наблюдения за образцом использовались видеокамера, подключенная к отдельному окуляру микроскопа. Камера Moticom 1M использовалась для записи видео экспериментов. Камера Jenoptic ProgRes CF способна осуществлять съемку по синхроимпульсу, поданному на специальный вход. Также на специальном выходе камера выдает постоянное напряжение 3,3 В во время экспозиции кадра. Синхроимпульс для съемки формируется генератором импульсов и параллельно поступает на вход осциллографа. Сигнал экспозиции от камеры также отслеживается осциллографом.

Полученные осциллограммы сохраняются на персональном компьютере, поэтому их можно масштабировать и исследовать подробнее. Тем самым отследить точно амплитуду и период управляющего сигнала, тока, измерить длительность серии импульсов, отследить падение тока в результате взрыва микропузыря, измерить длительность экспонирования кадра для камеры Jenoptic. Пример осциллограммы представлен на рис. 7.

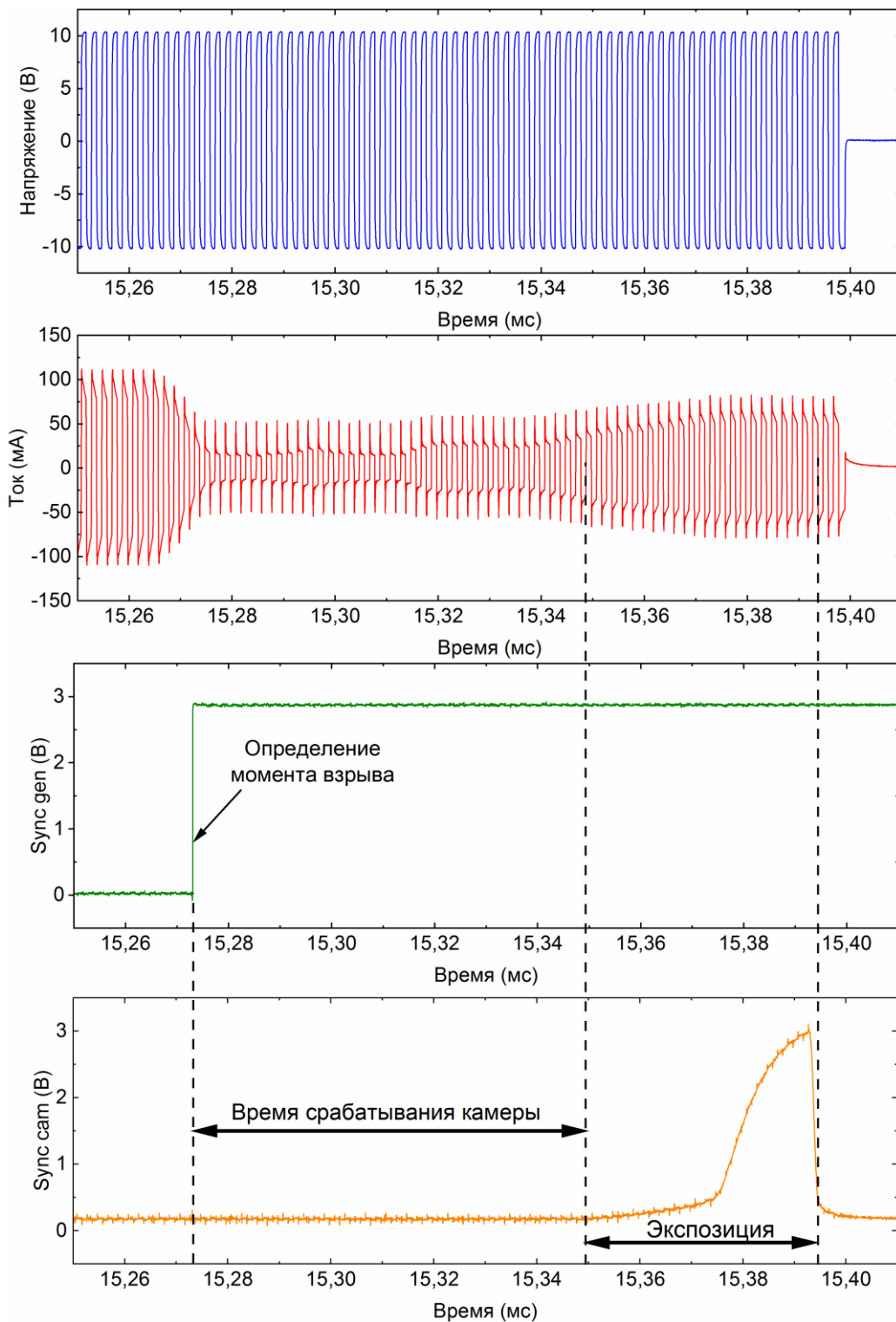


Рис. 7 - Осциллограммы в момент взрыва

Третья глава посвящена исследованиям, направленным на оптимизацию работы микронасоса. Для достижения длительного срока эксплуатации и стабильной работы устройства необходимо минимизировать факторы, сопутствующие скорому износу устройства. В электролизе переменным напряжением поведение электродов сильно отличается от работы в электролизе постоянным напряжением. В ходе переменного электролиза ток через электрохимическую ячейку падает в течение нескольких минут, производство

нанопузырей прекращается, что приводит к выходу насоса из строя. Необходимо исследовать причины деградации, подобрать форму и материал электродов, а также рабочий сигнал.

Исследована зависимость деградации электродов от длительности электролиза импульсами переменной полярности частотой 200 кГц. Длительность электролиза варьировалась от 5 до 160 с. Фотографии электродов после процесса представлены на рис. 8. Продолжение электролиза приводит к дальнейшему потемнению электродов. Потемнение начинается с краев, затем распространяется в центральную часть. Интенсивное потемнение наблюдается в первые 40 секунд электролиза. Затем цвет меняется незначительно.

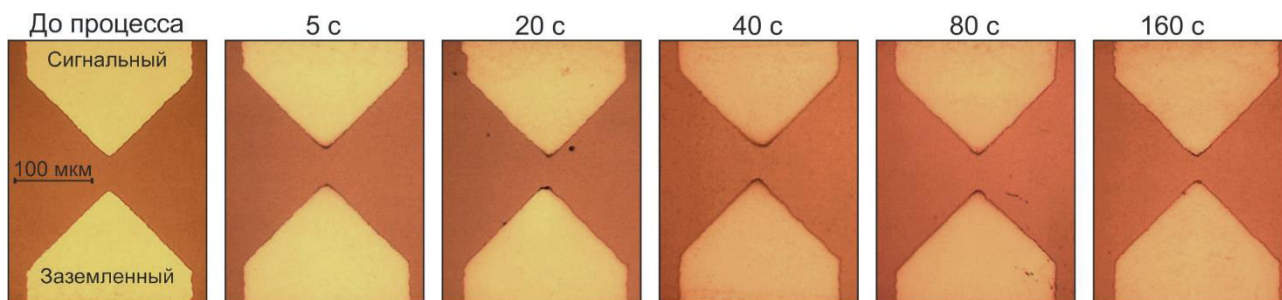


Рис. 8. Фотографии электродов в оптический микроскоп после электролиза переменной полярности разной длительности

Электроды меняют цвет вследствие формирования поверхностных слоев. Известно, что при электролизе постоянным током на титановом аноде формируется оксидная пленка, меняющая цвет электрода вследствие интерференции света. Изначально образуется желтая пленка, затем по мере роста она становится коричневой. В электролизе переменной полярности каждый электрод периодически является анодом, следовательно, подвергается окислению и темнеет. Однако существует и несколько отличий от электролиза постоянным током. Во-первых, края электродов обычно темнее центральной части, в то время как анод в постоянном электролизе темнеет однородно. Во-вторых, чем ниже частота импульсов, тем интенсивнее изменяется цвет электродов (см. рис. 9). В-третьих, при низких частотах происходит частичное удаление материала электрода с подложки. Такого явления не наблюдается в постоянном электролизе при одинаковом напряжении.

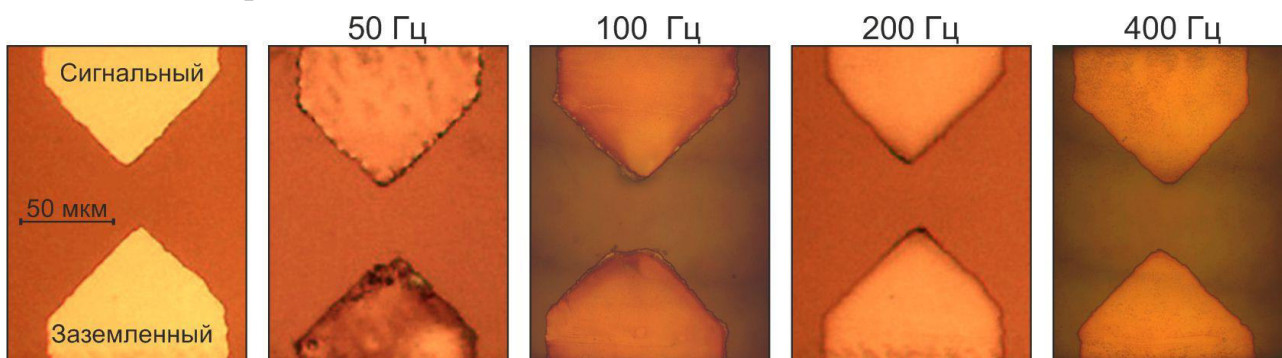


Рис. 9. Фотографии электродов после электролиза переменной полярности с различной частотой импульсов напряжения.

РЭМ изображения электродов после электролиза переменной полярности представлены на рис. 10 а-г. Видно разрушение края для частот 50 и 100 кГц. При частоте 200 кГц разрушение меньше, но заметно при осмотре электрода под углом 20° к подложке. Практически незаметно разрушение края для частоты 400 кГц. После постоянного электролиза разрушения электродов не наблюдается (см. рис. 10 д, е).

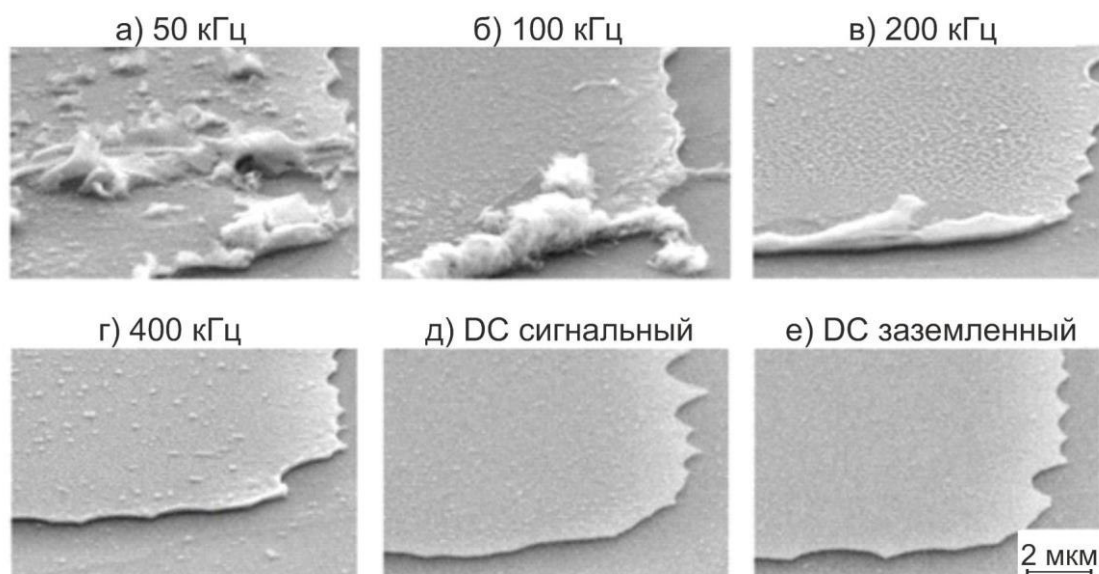


Рис. 10. РЭМ изображения электродов после процесса электролиза длительностью 60 с. Изображения получены под углом 20° к подложке. а-г – после переменного электролиза, д-е – сигнальный и заземленный электроды после постоянного электролиза

Материал, формирующийся на электродах, преимущественно состоит из титана и кислорода с добавлением С и F. Оксид титана скапливается в отдельные частицы в центральной области электродов, в то время как на их краях формируется непрерывный слой.

Неравномерное распределение оксида может быть объяснено неполным восстановлением титана во время катодной поляризации. Плотность тока больше на краях электрода чем в центральной части. Таким образом, на краю производится больше оксида титана и больший объем материала нарастает в этой области. Титан может восстановиться только в центральной области электрода, где слой оксида относительно тоньше, а на краю полное восстановление не происходит. Затем окисление повторяется в следующем периоде управляющего сигнала. В результате оксид титана накапливается преимущественно на краю электрода.

Наибольшее содержание кислорода (более чем 30 ат. %) наблюдается у образцов, протестированных при частоте импульсов 50 и 100 кГц. Зависимость содержания кислорода от частоты также может быть объяснена дисбалансом между окислением и восстановлением. При низкой частоте фаза окисления долгая, и более толстые слои оксида титана формируются на электроде. Чем толще слой оксида, тем сложнее проходит процесс восстановления. При высокой частоте фаза окисления короче, а более тонкий слой оксида восстанавливается легче.

В первые секунды электролиза I_{av} имеет значения от 25 до 35 мА. Средний ток уменьшается одновременно с изменением цвета электродов. При частоте электролиза 200 кГц электроды темнеют в первые 40 с (см. рис. 8), в то время как быстрое падение тока происходит в течение 60 с. Формирование оксида титана на поверхности электрода уменьшает ток. Постепенное уменьшение тока и потемнение электродов свидетельствует о том, что процесс окисления превалирует над процессом восстановления. Однако, значение тока впоследствии держится на определенном значении, а потемнение останавливается. Это означает, что окисление и восстановление компенсируют друг друга.

При электролизе переменной полярности электроды быстро разрушаются вследствие высокой плотности тока порядка 100 А/см^2 . Материал электродов либо быстро разрушается ввиду механического действия нанопузырей, либо окисляется. Форма электродов определяет распределение плотности тока, следовательно, предпочтительные места износа электродов и скорость их деградации. Для исследования эффективности производства газа и износа были подготовлены образцы с различной формой электродов, изображенные на рис. 11. Электроды представляют собой три слоя Ti/Al/Ti толщиной 10/500/500 нм соответственно и размещены на кремниевой подложке со слоем оксида кремния толщиной 0,9 мкм.

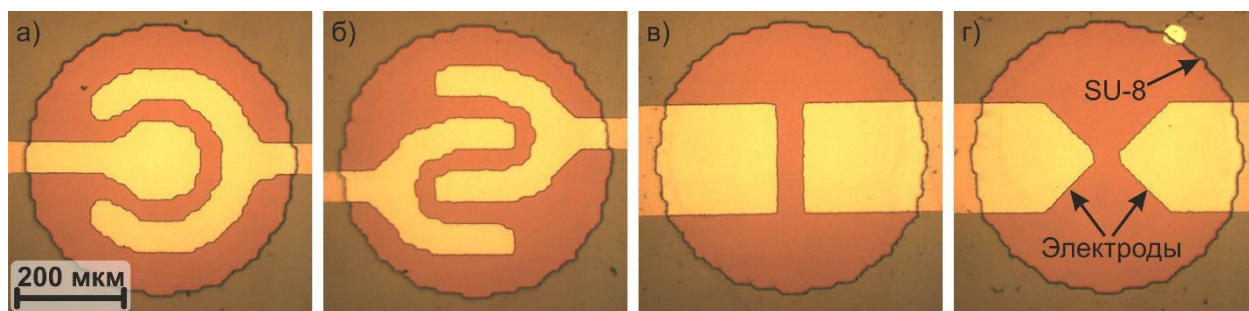


Рис. 11. Фотографии электродов различной формы: (а) концентрические, (б) встречно-штыревые, (в) прямоугольные, (г) треугольные

Зависимость среднего значения тока от времени для каждого типа электродов представлена на рис. 12. Электролиз осуществлялся импульсами переменной полярности частотой 200 кГц и амплитудой 6В. Для отслеживания изменения тока рассчитывалось его среднее значение I_{av} в различные моменты времени. При отрицательных импульсах взяты абсолютные значения тока. Понижение тока в первые 100 секунд прослеживается в электролизе с любой формой электродов ввиду окисления титана. Небольшое возрастание тока в течение 10 с начала электролиза наблюдается в случаях с концентрическими и встречно-штыревыми электродами. В начале эксперимента концентрические и встречно-штыревые электроды демонстрируют наивысшие значения среднего тока 38 -40 мА, в то время как прямоугольные и треугольные электроды проводят значительно меньший ток 22 и 16 мА соответственно.

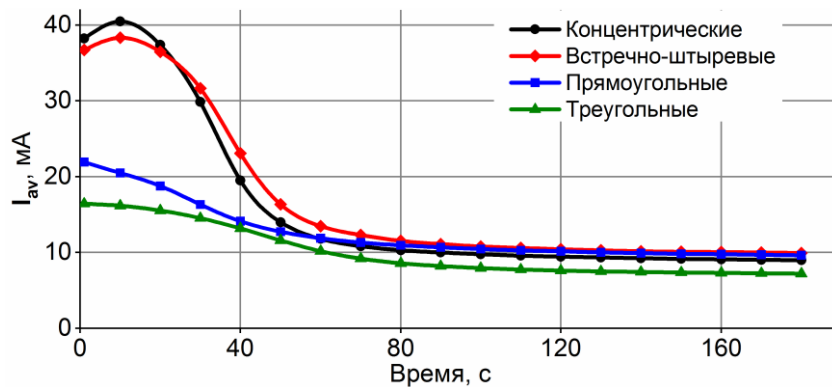


Рис. 12. Зависимость среднего тока, протекающего через электроды разной формы

Концентрические и встречно-штыревые электроды начинают производить взрывы при наименьшей амплитуде напряжения $U_{th} = 10$ В. Треугольные показали наибольшее начальное $U_{th} = 13$ В. Граничное значение амплитуды напряжения постепенно возрастает по мере окисления титана. В случае треугольных электродов U_{th} возросло до 19 В за 4 минуты. Прямоугольная форма электродов обеспечивает производство взрывов при $U_{th} = 12$ В и наименьшую скорость возрастания граничного напряжения.

Фотографии электродов после эксперимента во взрывном режиме представлены на рис. 13а. Наблюдается потемнение и частичное удаление материала электродов от подложки. Изменение цвета связано с окислением титана на поверхности электродов и разрушением материала ввиду высокой плотности тока. На треугольных электродах виден меньший износ по сравнению со встречно-штыревыми, которые пострадали сильнее всех. Верхний титановый слой частично удалился с внутренних выступов, обнажая алюминиевый подслои. Распределение плотности тока по поверхности электродов было рассчитано методом конечных элементов (МКЭ). Области наивысшей плотности тока представлены на рисунке 13б. Эти области расположены на краях и углах электродов и совпадают с экспериментально обнаруженными областями наибольшего износа.

Концентрическая форма электродов имеет несколько преимуществ. А именно: демонстрируют высокую проводимость электрохимической ячейки, сравнительно низкий износ, имеют низкое начальное значение U_{th} . А также имеют самую длинную протяженность областей с наивысшей плотностью тока, которые расположены напротив соседнего электрода. Мощность взрыва оценивалась по его звуку в виде щелчка. Концентрические электроды генерируют взрывы не самой высокой мощности, однако в разных случайных местах, что увеличивает срок службы насоса за счет равномерного износа.

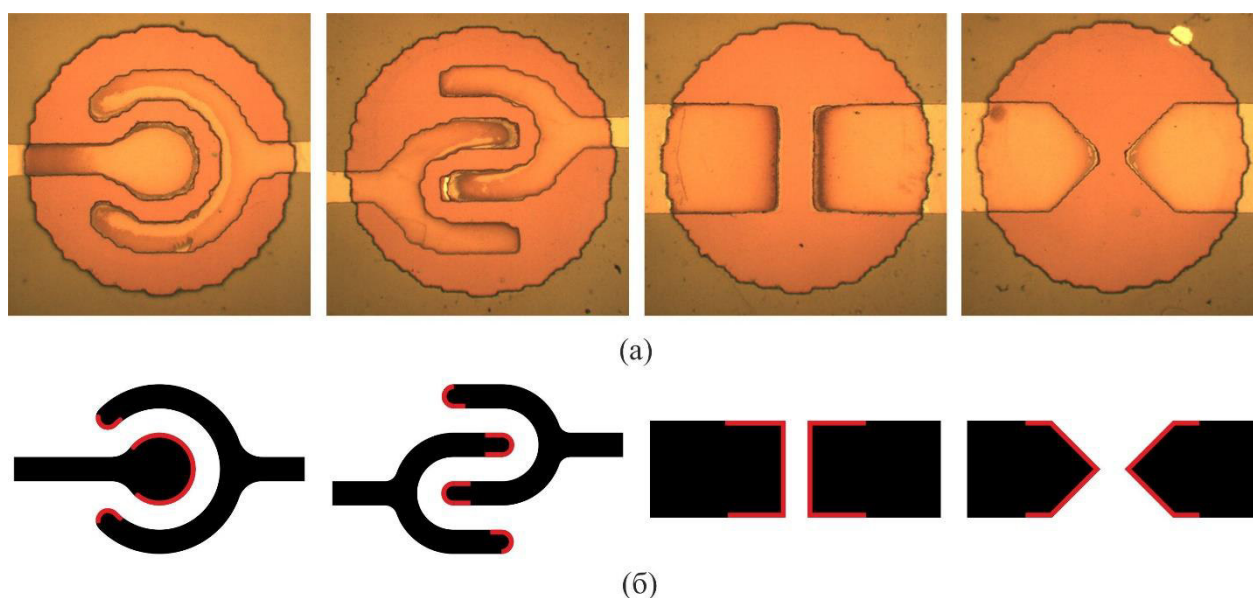


Рис. 13. Фотографии электродов после эксперимента во взрывном режиме (а) и схематичное изображение областей с наибольшей плотностью тока (отмечено красным) по результатам расчёта МКЭ

В литературе описаны и исследованы материалы электродов для электролиза постоянного тока. Отдельные материалы для катода и отдельные для анода. В процессе электролиза импульсами напряжения переменной полярности каждый электрод попеременно является анодом и катодом. Верный подбор материала увеличит срок службы электрода, однако поведение материалов в условиях электролиза импульсами высокой частоты плохо изучено. Электроды с рабочим слоем из Ti, Ta, Cu, Ni, Pt, Au и Ru были изготовлены на кремниевой подложке со слоем SiO₂ 0,9 мкм.

Рутениевый рабочий слой обеспечивает лучшую износостойкость от механического воздействия нанопузырей и имеет оксид с высокой проводимостью, что в совокупности позволяет электродам стабильно работать без видимого износа в электролизе импульсами переменной полярности в режиме без взрыва, а во взрывном режиме в течение 2х часов. Этого времени достаточно для выполнения функций микронасоса.

В невзрывном режиме работы отклонение мембраны ПДМС толщиной 30 мкм было исследовано ранее (Uvarov, I. V., et al. Electrochemical membrane microactuator with a millisecond response time. // Sensors and Actuators B: Chemical. 2018. № 260 P. 12-20.). В качестве управляющего сигнала актюатора служила серия импульсов напряжения частотой 500 кГц длительностью 40 мс С повышением амплитуды импульсов возрастает и отклонение мембраны и составляет 3-7 мкм. При повышении амплитуды до 13 В замечена работа актюатора во взрывном режиме. Отклонение мембраны осуществлено в очень короткий промежуток времени ≈10 мкс и не было зафиксировано интерферометром. Записи с высокоскоростной камеры не позволили запечатлеть детали хода мембран. Однако по кадрам удалось оценить её отклонение, оно составляет ≈90 мкм.

Во взрывном режиме отклонение мембраны актюатора с рутениевыми электродами измерялось с помощью фотокамеры, синхронизованной с моментом

взрыва. Управляющим сигналом служила серия импульсов напряжения частотой 500 кГц длительностью 20 мс и амплитудой 12 В. После взрыва в камере наблюдаются остаточный пузыри газа, которые ограничивают рабочую частоту устройства, так как должны успеть раствориться до наступления следующей серии. Максимальная рабочая частота актюатора составляет 10 Гц со средним отклонением мембраны 100 мкм, что более чем на порядок больше по сравнению с обычным режимом работы. В среднем отклонение мембраны составляет 100 мкм. Фото отклонения представлено на рисунке 14.

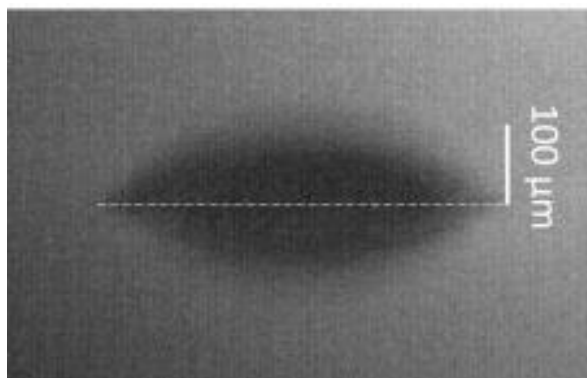


Рис. 14. Фотография отклонения мембраны под углом 8° к подложке во взрывном режиме

Во взрывном режиме актюатор подбрасывает нагрузочный шар на высоту h до 29 мм и сообщает ему энергию $E=m \cdot g \cdot h=1,2$ мкДж, где m – масса шара. При этом начальная скорость шара составляет $v=(2 \cdot g \cdot h)^{1/2}=0.75$ м/с. Согласно осциллограмме тока, отклонение мембраны происходит в течение $t_0 \approx 10$ мкс. Таким образом, начальное ускорение составляет $a \approx v/t_0 \approx 7\,700$ g. Актюатор развивает усилие $F \approx m \cdot a \approx 0,31$ Н и приводит в движение макроскопический объект, в 200 раз превосходящий его по объему и в 1300 раз по массе. Актюатор подбрасывает край пластинки на высоту 2 мм. Важно отметить, что пластинка в 11 000 раз тяжелее актюатора, а развиваемое усилие составляет 0,5 Н. Таким образом устройство во взрывном режиме в момент создавало давление $0,5 \text{ Н}/(\pi \cdot (25 \cdot 10^{-5} \text{ м})^2)=2,5$ МПа, что на несколько порядков больше развиваемого давления микронасосов для микрофлюидных систем.

После взрыва в камере насоса наблюдаются остаточные микропузыри газа с латеральным размером ~ 10 мкм. Эти микропузыри могут накапливаться и объединяться в камере актюатора, тем самым препятствуя электролизу и дальнейшей работе устройства. Во время серии импульсов напряжения управляющего сигнала в камере актюатора сначала происходит первый сильный взрыв. Затем следуют менее сильные локальные взрывы. Первый взрыв совершает полезную работу по отклонению мембраны и оставляет некоторое количество видимых микропузырей после себя. Последующие локальные взрывы полезной работы не совершают, но также оставляют микропузыри, тем самым ускоряя накопление газа в камере. В свою очередь наличие газа в камере препятствует электролизу и делает дальнейшую работу актюатора невозможной. При сильном взрыве наблюдается падение амплитуды силы тока, прошедшего через электроды. Отслеживая осциллограмму тока, возможно отследить момент первого взрыва,

прервать серию импульсов напряжения и предотвратить генерацию газа вторичными взрывами.

С целью исключения вторичных взрывов разработан, запатентован и внедрен способ прерывания электролиза по наступлению основного взрыва. Прерывание серии значительно сокращает число остаточных пузырей по сравнению с режимом с полной серией. Благодаря этому рабочую частоту актюатора удалось повысить от 0,1 Гц до 10 Гц.

Четвертая глава посвящена исследованию рабочих характеристик микронасоса.

Изготовленный микронасос показан на рис. 15. Он представляет собой чип с латеральным размером 20×30 мм и толщиной около 0,9 мм. Со стороны стеклянной подложки видны электроды и каналы с электролитом и перекачиваемой жидкостью. Со стороны кремниевой пластины располагаются четыре входных отверстия диаметром 0,5 мм для заполнения каналов жидкостью и окна для доступа к контактным площадкам электродов.

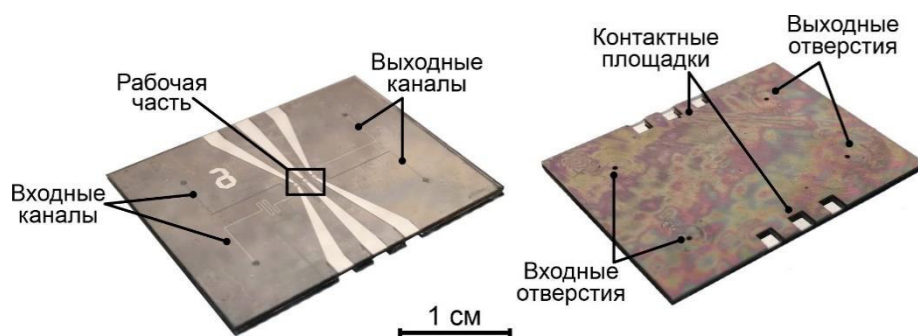


Рис. 15. Изготовленный чип микронасоса (а) вид со стороны стеклянной подложки, (б) вид со стороны кремниевой подложки

Чип закреплялся в специально спроектированном и изготовленном с помощью 3D печати держателе, представленном на рис. 16. К входным отверстиям подключались микрофлюидные трубки, через которые заполнялись камеры насоса и канал для перекачиваемой жидкости. В качестве перекачиваемой жидкости использовалась дистиллированная вода.

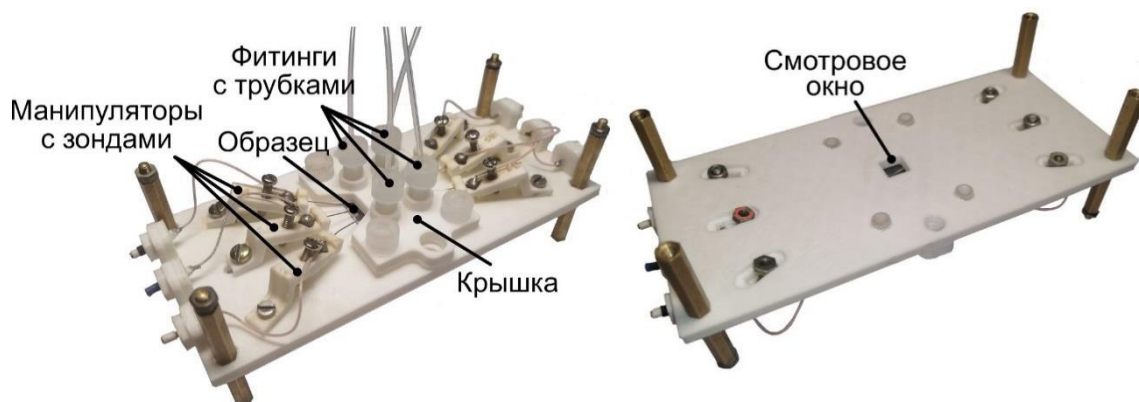


Рис. 16. Держатель чипа с насосом (а) вид сверху и (б) вид снизу

Скорость перекачки измерялась при работе устройства с рабочей частотой 25 Гц в течение 1,7 с. Как показано на рис. 17 за это время мениск воды в канале

сдвинулся на 1460 мкм, что соответствует расходу 0,06 мкл/мин. Из выражения (1) следует, что данный расход соответствует отклонению мембраны 2,9 мкм. Ввиду сопротивления движению мембраны водой и противодействия уже перекачанной жидкости экспериментальное значение расхода оказалось в 6 раз ниже расчётного значения (0,37 мкл/мин).

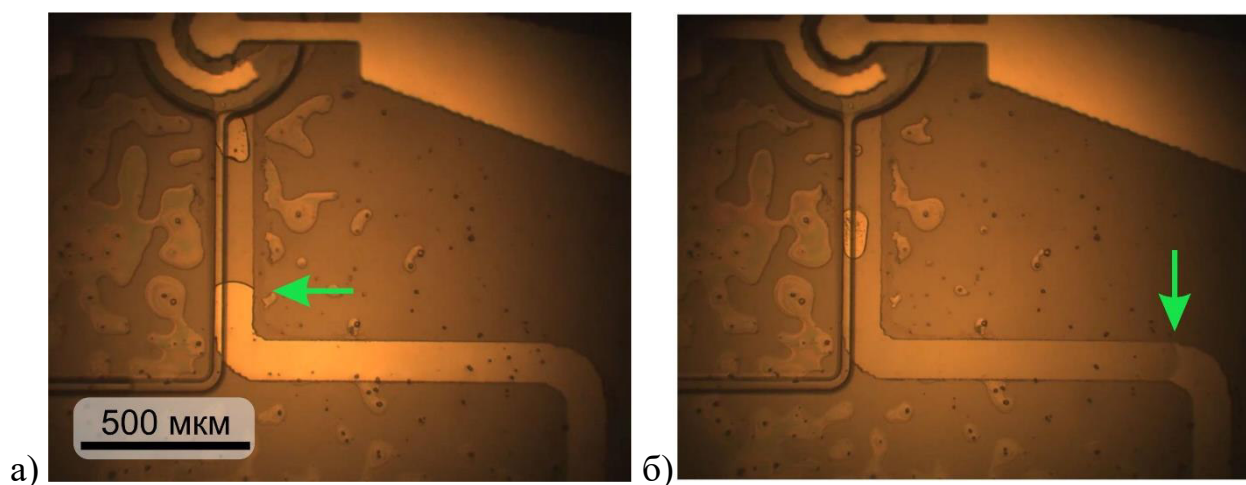


Рис. 17. Фото камеры и канала насоса сверху. Положение мениска рабочей жидкости при измерении расхода: а) в начале работы и б) в конце работы

Для сравнения рабочих характеристик микронасосов между собой необходимо учитывать их объем рабочей части. Поэтому сравнивается удельное значение расхода. Для представленного насоса удельный расход составляет 0,02 мкл/(мин мм³). Традиционные электрохимические насосы на основе электролиза постоянным током, имеют расход 0,05 мкл/(мин мм³). Насосы других типов способны перекачивать жидкость со скоростью от 1 до 1000 мкл/мин и имеют объем рабочей части более 100 мм³. За небольшим исключением их удельный расход составляет менее 0,02 мкл/(мин мм³). Таким образом микронасос на основе электролиза переменной полярности демонстрирует производительность, сравнимую с классическими электрохимическими насосами и устройствами, основанными на других принципах работы.

При работе насоса во взрывном режиме и отклонении мембраны на 100 мкм ожидается перекачка 4.9 нл за цикл. В данном режиме насос способен работать с максимальной частотой 10 Гц. При максимальной частоте ожидается расход на порядок больше по сравнению с обычным режимом работы насоса 3 мкл/мин. На рис. 18 представлена зависимость скорости перекачки насосов различных типов (Forouzandeh F., et al A review of peristaltic micropumps // Sensors and Actuators A: Physical. 2021. №3 26 P. 112602). Видно, что расход микронасоса, представленного в данной работе, сравним со скоростью перекачки устройств на 2 порядка больше по объему.

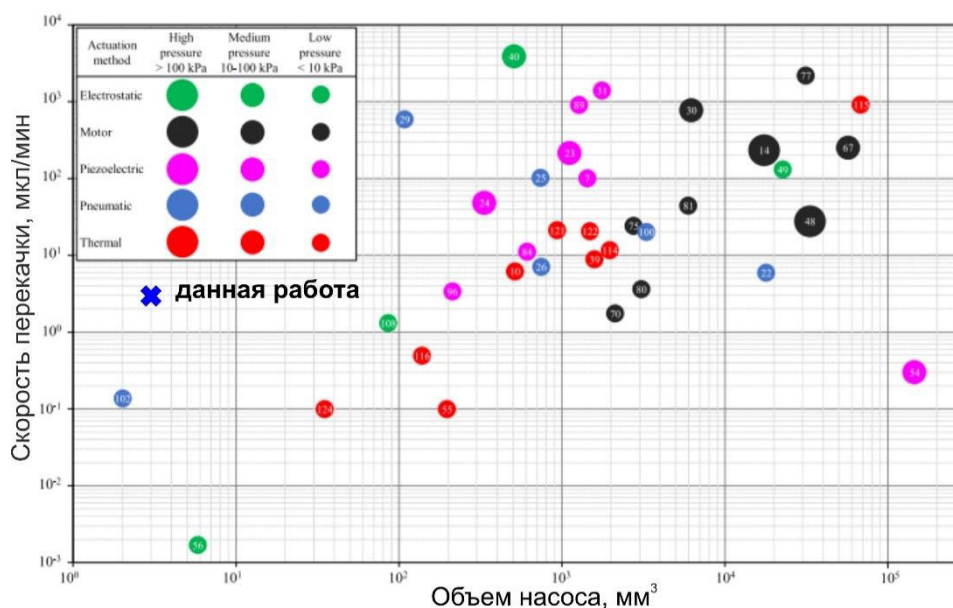


Рис. 18. Зависимость скорости перекачки от объема рабочей части устройства

В заключении диссертации изложены основные результаты и выводы:

1. Разработан и изготовлен микронасос перистальтического типа на новом принципе – электролизе переменной полярности.

2. Оптимизирована работа насоса за счет выбора материала, формы и рабочего слоя электродов, а также частоты импульсов напряжения и длительности рабочего сигнала. Концентрические электроды эффективно производят газ в камере насоса. В режиме без взрывов износ рутениевых электродов не наблюдается, во взрывном режиме насос способен работать несколько часов. За счет отслеживания взрывов повышена рабочая частота насоса во взрывном режиме.

3. Исследованы рабочие характеристики микронасоса. Устройство имеет малый объем рабочей части 3 мм^3 , что позволяет достичь сверхвысокую точность дозирования $0,14 \text{ нл}$, при расходе 3 мкл/мин , сопоставимом с другими устройствами. Электрохимический насос способен циклично работать с частотой до 25 Гц , на несколько порядков большей по сравнению с классическим электрохимическим насосом.

Благодарности

Автор диссертации выражает благодарность Уварову И. В., Световому В. Б., Амирову И. И. за обсуждение результатов и помощь в подготовке публикаций. Также соискатель благодарит сотрудников Обособленного подразделения «Отдел микротехнологий» - Ярославль ОФТИ им. К. А. Валиева НИЦ «Курчатовский институт» за помощь в изготовлении образцов и проведении экспериментов: Наумов В. В. – нанесение тонких пленок, Королева О. М. – фотолитография, Ваганова Е. И. – жидкостное травление, Морозов О. В. – травление кремния, Мазалецкий Л. А. – сканирующая электронная микроскопия. А также Меленев А. Е. – разработка и изготовление генератора сигналов.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в российских журналах, рекомендованных ВАК и зарубежных журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus:

1. Uvarov, I. V. A fast and strong microactuator powered by internal combustion of hydrogen and oxygen / I. V. Uvarov, **P. S. Shlepakov**, V. B. Svetovoy // Advanced Materials Technologies. – 2024. – V. 9. – №. 18. – P. 2400690. *Q1*
2. Микронасос на основе быстрого электрохимического актюатора / **П. С. Шлепаков**, И. В. Уваров, А. М. Абрамычев, В. Б. Световой // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16, – № S9-2(119). – С. 594-596.
3. Быстрый электрохимический микронасос для портативного модуля доставки лекарств / И. В. Уваров, **П. С. Шлепаков**, А. М. Абрамычев, В. Б. Световой // Микроэлектроника. – 2023. – Т. 52, – № 3. – С. 227-235.
4. A peristaltic micropump based on the fast electrochemical actuator: design, fabrication, and preliminary testing / I. V. Uvarov, **P. S. Shlepakov**, A. E. Melenev [et al.] // Actuators. – 2021. – V. 10, – № 3 – P. 62.
5. Highly energetic impact of H₂ and O₂ nanobubbles on Pt surface / I. V. Uvarov, **P. S. Shlepakov**, A. V. Postnikov, V. B. Svetovoy // Journal of Colloid and Interface Science. – 2021. – V. 582. – P. 167-176. *Q1*
6. Degradation of titanium electrodes in the alternating polarity electrolysis / **P. S. Shlepakov**, I. V. Uvarov, V. V. Naumov [et al.] // International Journal of Electrochemical Science. – 2019. – V. 14, – № 6. – P. 5211-5225.

Патенты:

1. Патент № 2820788 Российская Федерация, МПК G01L 3/00 (2006.01). Способ работы электрохимического актюатора: №2023130354: заявл. 22.11.2023: опубл. 10.06.2024 / Уваров И. В., Шлепаков П. С., Световой В. Б.; заявитель ФТИАН им. К. А. Валиева РАН. – 18 с.

Материалы конференций:

1. **Шлепаков, П. С.** Микронасос на основе электрохимического мембранного актюатора / П. С. Шлепаков, В. Б. Световой, И. В. Уваров // Российский форум «Микроэлектроника 2025» 11-я Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули» (ФТ Сириус, 21-27 сентября, 2025). Сборник тезисов С. 519 – 520.
2. **Shlepakov, P. S.** Increasing performance of a microactuator based on a hydrogen-oxygen mixture explosion / Shlepakov P. S., Svetovoy V. B., Uvarov I. V. // 16th Valiev International Conference «Micro- and Nanoelectronics -2025» (ICMNE-2025) (Yaroslavl October 6-10, 2025) P. 364-365.
3. **Shlepakov, P. S.** Passive microfluidic valve with reduced threshold pressure / Shlepakov P. S., Morozov O. V., Uvarov I. V. // 16th Valiev International Conference «Micro- and Nanoelectronics -2025» (ICMNE-2025) (Yaroslavl, October 6-10, 2025) P. 366-367.
4. **Шлепаков, П. С.** Быстрый и сильный микроактюатор на основе взрыва водород-кислородной смеси / Шлепаков П. С., Уваров И. В., Световой В. Б. // 31 Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов,

аспирантов и молодых учёных «Микроэлектроника и информатика – 2024», Зеленоград, 25-26 апреля 2024, – Зеленоград, 2024 – С. 283.

5. **Shlepakov, P.S.** A fast and strong microactuator powered by explosion of a hydrogen-oxygen mixture / P.S. Shlepakov, I.V. Uvarov, V.B. Svetovoy // Book of Abstracts «11th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures», Saint Petersburg, May 23-26 2024. – Saint Petersburg, 2024 – P. 279-280

6. **Шлепаков, П.С.** Быстрый электрохимический актюатор во взрывном режиме работы / П.С. Шлепаков, И.В. Уваров // Сборник тезисов докладов конференции «Ломоносов-2024» Секция «Физика», Подсекция «Медицинская физика», Москва, 12-26 апреля 2024, – Москва, 2024 – С. 360-362.

7. Explosive operation of the fast electrochemical actuator: the first results / **P.S. Shlepakov**, I.V. Uvarov, V.B. Svetovoy // Book of Abstract of the International Conference «Micro- and Nanoelectronics– 2023», Zvenigorod, October 2–6 2023, - Zvenigorod, 2023 – P. 72.

8. Перистальтический микронасос на основе быстрого электрохимического актюатора / **П.С. Шлепаков**, И.В. Уваров, А.М. Абрамычев, В.Б. Световой // XXX Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Микроэлектроника и информатика – 2023», Зеленоград 20-21 апреля 2023, – Зеленоград, 2023 – С. 284.

9. Fabrication of a micropump based on the fast electrochemical actuator with the PDMS membrane / I. V. Uvarov, **P. S. Shlepakov**, А.М. Abramychyev, V.B. Svetovoy // Book of Abstracts 9th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures», Saint Petersburg, May 24-27 2022, 2022 – Saint Petersburg, 2022 – P. 637-638.

10. Ruthenium as an electrode material for the fast electrochemical actuator / **P. S. Shlepakov**, I. V. Uvarov, V.B. Svetovoy // Book of Abstracts «9th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures», Saint Petersburg, May 24-27 2022, – Saint Petersburg, 2022 – P. 559-560.

11. Микронасос на основе быстрого электрохимического актюатора / **П. С. Шлепаков**, И. В. Уваров, А. М. Абрамычев, В. Б. Световой // Тезисы докладов Российской конференции по микроэлектронике «Школа молодых ученых 2022», пгт. Гурзуф, 26 сентября – 01 октября 2022 Российский форум «Микроэлектроника 2022» Школа молодых ученых, - пгт. Гурзуф, 2022. – С. 859-861.

12. Choosing the electrode material for the fast electrochemical actuator / **P. S. Shlepakov**, I. V. Uvarov, V. V. Naumov, V. B. Svetovoy // Journal of Physics: Conference Series : 7, Saint Petersburg, April 27–30 2020. – Saint Petersburg, 2020. – P. 012155.

13. Деградация электродов в электрохимическом процессе переменной полярности / **П. С. Шлепаков**, И. В. Уваров, В. В. Наумов, В. Б. Световой // Инновационные материалы и технологии - 2020 : материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых, Минск, 09–10 января 2020 года / Белорусский государственный технологический университет. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2020. – С. 628-631.

14. Optimization of electrodes for the fast electrochemical actuator / **P. S. Shlepakov**, I. V. Uvarov, V. V. Naumov [et al] // 6th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures “Saint Petersburg OPEN 2019” (April 22-25, 2019, St. Petersburg, Russia): Book of abstracts. – St. Petersburg: Academic University Publishing, 2019. – P. 517-518.