

## **ПЕРИСТАЛЬТИЧЕСКИЙ МИКРОНАСОС НА ОСНОВЕ БЫСТРОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО АКТЮАТОРА: ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ**

### **Введение**

Микрофлюидика является одной из наиболее актуальных и интенсивно развивающихся отраслей инженерной науки. Микрофлюидные системы оперируют малыми объемами жидкости и широко используются в биологии и медицине. Перспективными микрофлюидными системами являются компактные устройства доставки лекарств. Как правило они представляют из себя резервуар с лекарством, которое выталкивается движением мембраны через иглу и попадает в организм. Движение мембраны создает актюатор. Существует несколько типов актюаторов. Осмотические актюаторы не требуют внешнего питания, но не позволяют доставлять лекарства дозированно. Тепловые актюаторы просты в изготовлении, но медлительны и отличаются высоким энергопотреблением. Пьезоэлектрические актюаторы обеспечивают высокое давление мембраны, точную дозировку лекарств, но имеют большие размеры, высокое рабочее напряжение и несовместимы с микротехнологией изготовления. Наиболее энергоэффективным и полностью совместимым с микротехнологией является представленный ранее электрохимический актюатор, основанный на электролизе переменной полярности [1]. Он представляет собой рабочую камеру с двумя электродами, заполненную электролитом и закрытую эластичной мембраной (рисунок 1). Один электрод заземляется, на второй подается серия микросекундных импульсов напряжения переменной полярности. Над электродами образуются нанопузырьки водорода и кислорода. В камере создается избыточное давление, толкающее мембрану вверх. Вследствие малых размеров камеры актюатор за один цикл вытесняет менее 1 нл жидкости. После отключения напряжения газ в камере исчезает за миллисекунды в ходе спонтанной реакции между водородом и кислородом. Рабочая частота актюатора достигает 1 кГц и на несколько порядков превышает частоту работы традиционных электрохимических устройств. Насос, построенный на базе такого актюатора, может обеспечивать высокий расход жидкости в сочетании с высокой точностью дозировки, и поэтому является пер-

спективным для использования в различных микрофлюидных системах, в т.ч. портативных устройствах доставки лекарств. Работа посвящена проектированию и изготовлению микронасоса.

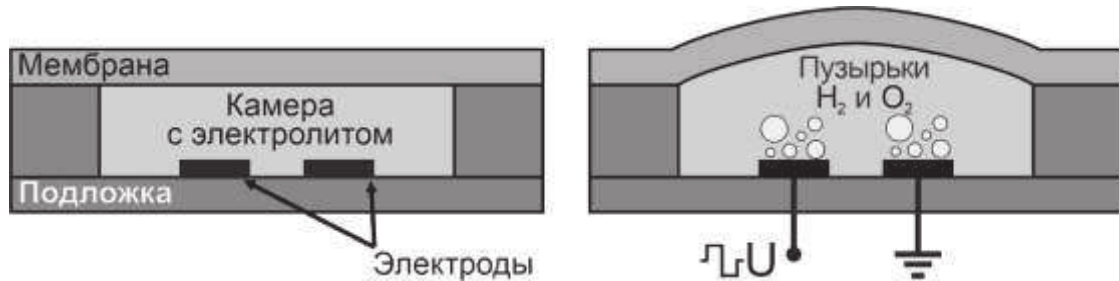


Рисунок 1 – Устройство и принцип действия электрохимического актюатора

### Принцип работы насоса

Насос представляет собой три актюатора с независимым управлением, над которыми проходит канал с перекачиваемой жидкостью. Перекачка осуществляется за счет перистальтического движения мембран. Рабочий цикл состоит из шести шагов, показанных на рисунке 2. Жидкость перемещается в заданном направлении дозированными порциями.

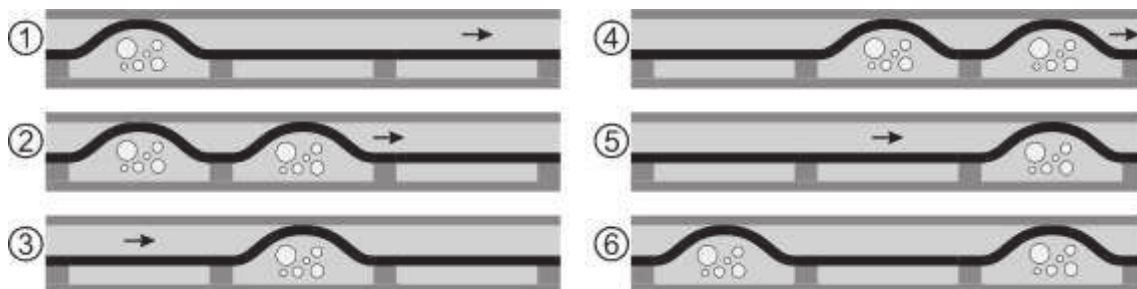


Рисунок 2 – Принцип работы насоса. Направление движения жидкости показано стрелками

Электролитом служит молярный раствор сульфата натрия в дистиллированной воде. В качестве материала электродов используется титан. Среди множества металлов, он наименее подвержен деградации в электролизе переменного тока [2]. Для успешной перекачки мембрана должна перекрывать канал, поэтому его высота не должна превышать максимальное отклонение мембраны, составляющее 10 мкм. Ранее мембрана изготавливалась из полидиметилсилоксана (ПДМС) [1], однако этот материал является газопроницаемым. Попадание газа в канал может вывести насос из строя, поэтому ПДМС было решено заменить на нитрид кремния  $\text{SiN}_x$ . Материал каналов должен иметь хорошую адгезию к подложке и быть совместимым с мик-

ротехнологией. Этим требованиям удовлетворяет фоторезист SU-8. Диаметр камеры составляет 500 мкм.

### Изготовление насоса

Изготовленное устройство схематично изображено на рисунке 3. Камеры актюаторов сформированы в слое фоторезиста SU-8 толщиной 10 мкм на стеклянной подложке (подложка 1). Диаметр камер и расстояние между ними составляют 500 мкм. Материалом электродов является проводящий слой алюминия толщиной 500 нм, покрытый рабочим слоем титана 200 нм. Металлы нанесены методом магнетронного распыления, форма электродов задавалась взрывной литографией. Электроды имеют прямоугольную форму. Их ширина составляет 250 мкм, расстояние между электродами – 100 мкм.

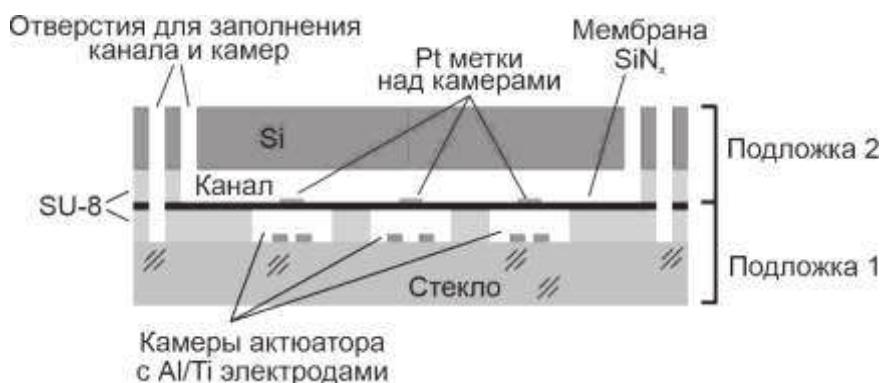


Рисунок 3 – Схематичное изображение насоса в разрезе

На промежуточную кремниевую пластину методом магнетронного распыления и взрывной литографии наносятся платиновые метки для отслеживания хода мембраны. Они представляют собой площадки диаметром 50 мкм и толщиной 100 нм. Далее эта пластина покрывается слоем  $\text{SiN}_x$  толщиной 300 нм и обрабатывается методом плазменного травления. После формирования рисунка пластина срачивается со стеклянной подложкой (подложка 1). После этого кремний удаляется методом травления в плазме, оставляя пленку  $\text{SiN}_x$  с платиновыми метками сращенной с SU-8.

Вторая кремниевая пластина (подложка 2) содержит каналы для перекачиваемой жидкости, а также входные и выходные отверстия и окна для контактных площадок. Однако плазменное травление выполняется не на всю глубину пластины, чтобы дать возможность сформировать каналы в слое SU-8 толщиной 10 мкм на противоположной стороне. После экспонирования и проявления SU-8 пластина срачивается со стеклянной пластиной. Заключительными этапами выполняется окончательное травление отверстий и разделение полу-

ченной сборки на отдельные чипы с помощью установки дисковой резки. Фотография насоса представлена на рисунке 4.



Рисунок 4 - Изготовленный микронасос: а – общий вид, б – актюатор, вид сверху

### Заклучение

Спроектирован и изготовлен микронасос на основе быстрого электрохимического актюатора. Рабочим принципом актюатора является электролиз воды, выполняемый микросекундными импульсами напряжения переменной полярности. Насос содержит три актюатора, работающие по перистальтической схеме. Изготовление насоса выполняется с применением стандартных техпроцессов микроэлектроники. Для изготовления необходимы стеклянная пластина и две кремниевые пластины диаметром 100 мм, а также шесть фотошаблонов для контактной УФ-литографии. Изготовлено несколько десятков образцов, в дальнейшем планируется исследовать их рабочие характеристики.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-79-10038.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Uvarov I.V., Lokhanin M.V., Postnikov A.V., Melenev A.E., Svetovoy V.B. Electrochemical membrane microactuator with a millisecond response time // Sens. Actuators B. 2018. V. 260. P. 12.
- 2 Шлепаков П.С., Уваров И. В., Наумов В. В., Световой В.Б. Дegradация электродов в электрохимическом процессе переменной полярности // Материалы конференции «Инновационные материалы и технологии – 2020». 2020. С. 629.