

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 544.638.2

МИКРОФЛЮИДНЫЙ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОР НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВОЙ МИКРОКАНАЛЬНОЙ МЕМБРАНЫ*

М. А. Паращенко, Н. С. Филиппов, В. В. Кириенко

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: map@isp.nsc.ru*

Работа посвящена созданию и характеристике микрофлюидного электрогенератора на основе кремниевой микроканальной мембраны. В экспериментах с использованием деионизованной воды определены напряжение и ток, создаваемые генератором, а также мощность, выделяемая на нагрузочном сопротивлении в зависимости от его величины при прохождении жидкости через мембрану. Произведена оценка эффективности работы созданного устройства. Продемонстрирована возможность применения кремниевых мембран в качестве рабочего элемента микрофлюидного электрогенератора. Предполагается, что при тиражировании устройства могут быть изготовлены генераторы, пригодные для питания маломощных электроприборов. Отмечается возможность использования устройства как сенсорного элемента для определения скорости потока жидкости.

Ключевые слова: макропористый кремний, микроканальная мембрана, потенциал течения, микрофлюидная система, микрофлюидный электрогенератор.

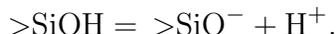
Введение. В последние годы наблюдается стремительное развитие микро- и нанофлюидных систем, применяемых в различных областях техники, а также в биологических и медицинских исследованиях. В этой связи всё чаще возникает потребность в универсальном высокотехнологичном материале, на основе которого возможно изготовление различных элементов подобных систем: фильтров, сенсоров, насосов, концентраторов и других. На роль такого материала хорошо подходит микро- и наноканальный кремний — высокоструктурированная форма пористого кремния. Отработанная технология получения этого материала позволяет изготавливать совершенные матрицы микроканалов (мембраны) различной длины и поперечного сечения с их последующим применением в сенсорных структурах [1–4], микрореакторах [5], электроосмотических микронасосах [6–8], молекулярных и клеточных фильтрах [9, 10], а также в концентраторах микро- и наноразмерных объектов [11, 12]. Помимо использования в перечисленных выше устройствах микроканальный кремний является перспективным материалом для создания компактных микрофлюидных электрогенераторов, работающих на основе электрокинетических эффектов, а именно эффекта Квинке (возникновение разности потенциалов при движении жидкости относительно неподвижной твёрдой поверхности) [13]. Такие микрогенераторы привлекают внимание из-за ряда преимуществ, важнейшие из которых — простота изготовления, лёгкость интеграции устройства в сложную микро- и нанофлюидную систему и, главным образом, отсутствие каких бы то ни было движущихся частей, что обеспечивает высокую надёжность и долговечность прибора. Благодаря этим достоинствам микрофлюидные генераторы являются альтернативой другим микроэлектромеханическим генераторам.

*Часть исследований выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования «Наноструктуры».

рам [14–17], созданным по технологии микроэлектроники, например электростатическим или пьезоэлектрическим, и могут стать перспективным источником энергии для питания различных маломощных систем.

Цель данной работы — создание на основе кремниевой микроканальной мембраны микрофлюидного электрогенератора, проведение его испытаний с использованием деионизованной воды (ДВ) и определение основных характеристик этого устройства.

Кремниевый микрофлюидный электрогенератор. *Принцип работы.* Основным элементом созданного микрофлюидного электрогенератора является кремниевая микроканальная мембрана, стенки которой покрыты двуокисью кремния, сформированной с помощью процедуры высокотемпературного окисления в парах воды. На поверхности двуокиси кремния при контакте с деионизованной водой образуется приграничный слой, содержащий ионы H^+ . Это происходит в результате ионизации молекул вещества твёрдой фазы за счёт диссоциации поверхностных ионогенных групп под влиянием дисперсионной среды [18–20]. Сначала при взаимодействии с водой на поверхности двуокиси кремния образуются силанольные группы $>\text{SiOH}$. Далее возникающее в ходе реакции поверхностное соединение — поликремниевая кислота — частично диссоциирует по следующему механизму:



Ионы H^+ переходят в жидкую фазу, но вследствие кулоновского взаимодействия с группами $>\text{SiO}^-$ выстраиваются вдоль поверхности (рис. 1). На границе раздела твёрдая фаза — жидкость образуется двойной электрический слой (ДЭС), который представляет собой пространственное разделение зарядов противоположного знака и может быть рассмотрен как конденсатор.

Широко распространённая модель Гуи — Чепмена — Штерна [13, 21] подразделяет внешнюю обкладку возникшего ДЭС на внутренний слой (слой Штерна), включающий неподвижные ионы, которые относительно крепко связаны с поверхностью твёрдой фазы, и внешний (диффузный слой), содержащий слабо связанные подвижные ионы. Протяжённость диффузного слоя определяется длиной Дебая λ_D , которая показывает расстояние падения электрокинетического потенциала в растворе в e раз относительно границы раздела жидкость — твёрдое тело и определяется следующим соотношением [22]:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 kT}{q^2 \sum_i (n_i z_i^2)}}, \quad (1)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость, ε_0 — диэлектрическая постоянная, k — постоянная Больцмана, T — температура, q — заряд электрона, n_i — концентрация i -го иона электролита, z_i — валентность i -го иона электролита. При возникновении потока элект-

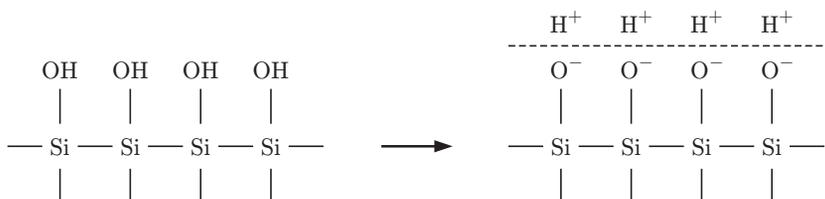


Рис. 1. Диссоциация на поверхности двуокиси кремния при контакте с деионизованной водой

ролита через мембрану, в каналах которой существует ДЭС, основная масса жидкости увлекает за собой ионы, находящиеся в диффузном слое. При этом распределение ионов во внешнем слое ДЭС нарушается и происходит вынос избытка зарядов одного знака на одну сторону мембраны по направлению движения потока жидкости. Движение зарядов вдоль стенок каналов мембраны представляет собой поверхностный, конвективный ток I_s . В результате перераспределения зарядов на противоположных сторонах мембраны появляется разность потенциалов, называемая потенциалом течения V_s , которая даёт начало вторичному объёмному току проводимости I_c , возникающему во всём сечении канала в направлении, обратном конвективному току I_s . Разность потенциалов будет возрастать до тех пор, пока объёмный ток не станет равным поверхностному и в стационарном состоянии не примет постоянное значение. Схематически возникновение потенциала течения представлено на рис. 2.

Одной из важнейших характеристик микрофлюидного электрогенератора является эффективность преобразования механической энергии движения жидкости сквозь мембрану в электрическую энергию. Максимальная величина эффективности преобразования

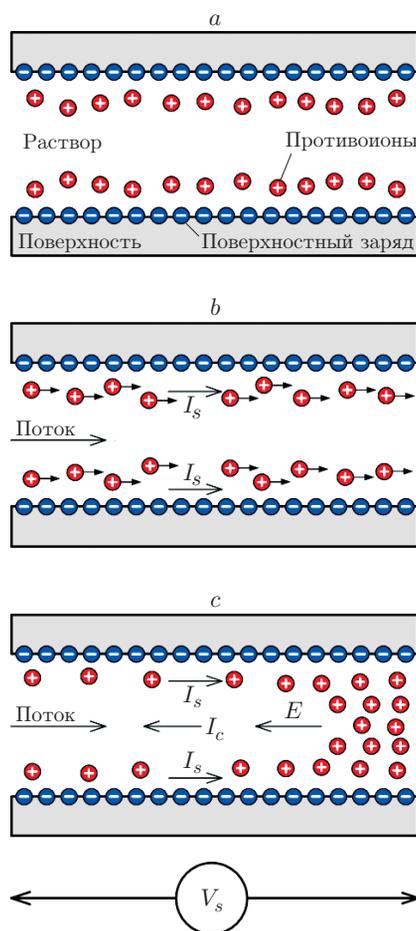


Рис. 2. Возникновение потенциала течения (эффект Квинке): *a* — при заполнении канала деионизованной водой на границе твёрдое тело — жидкость формируется ДЭС; *b* — поток жидкости перемещает положительные заряды вдоль стенок канала, создавая поверхностный ток I_s ; *c* — перераспределение зарядов является причиной появления электрического поля E , которое вызывает объёмный ток I_c , вследствие чего возникает разность потенциалов V_s на концах канала

энергии с некоторыми допущениями может быть определена с помощью следующего выражения [23–25]:

$$E_{\max} = \frac{2\pi(\varepsilon\varepsilon_0\zeta)^2}{\mu\sigma A_0} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где ζ — дзета-потенциал, μ — вязкость жидкости, σ — проводимость раствора, A_0 — площадь сечения одного канала.

Изготовление микроканальной мембраны. Основу микрофлюидного электрогенератора — круглую кремниевую микроканальную мембрану диаметром 8 мм, площадью 0,5 см² и толщиной 230 мкм, заключённую в монолитное обрамление, получали методом анодного электрохимического травления монокристаллической пластины кремния с проводимостью p -типа, удельным сопротивлением 40 Ом · см и кристаллографической ориентацией поверхности (100). Детальное описание процесса анодного травления кремния представлено в [26, 27]. Схема изготовления мембраны приведена на рис. 3. Проведённое структурное исследование [6] дало полное пространственное описание основного элемента тестируемого микрофлюидного электрогенератора: ячейка микроканалов 10 × 10 мкм, поверхностная плотность $\eta = 1 \cdot 10^6$ см⁻², площадь поперечного сечения микроканала $A_0 \approx 66$ мкм², периметр $P_0 \approx 33$ мкм, площадь внутренней поверхности $S_0 \approx 7,6 \cdot 10^3$ мкм².

Поперечное сечение каждого микроканала имело острочетырёхгранную форму, которая ясно просматривалась на изображении фронтальной поверхности образца (рис. 4), полученном в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) после операции вскрытия микроканалов (см. рис. 3, стадия 5). Морфология входных отверстий в микроканалы на противоположных поверхностях мембраны различалась, что связано со способом вскрытия микроканалов. Поверхности имели разные коэффициенты прозрачности (отношение площади, не заполненной материалом, к общей площади поверхности). Для использованной в экспериментах микроканальной мембраны коэффициент прозрачности фронтальной поверхности был равен 66 %, в то время как у тыльной составлял более 90 %. Структурная асимметрия сквозных микроканалов отражена на рис. 3 (стадия 5).

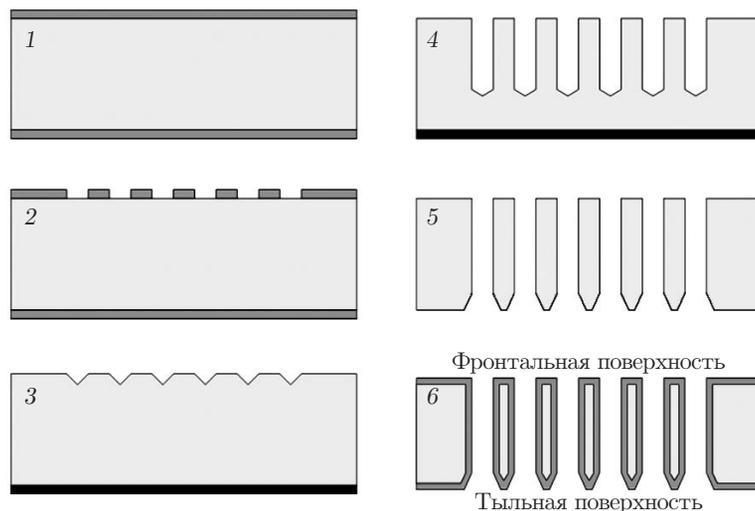


Рис. 3. Схема изготовления кремниевой микроканальной мембраны: 1 — этап термического окисления пластины кремния, 2 — вскрытие окон в слое диэлектрика, 3 — получение затравочных ямок, 4 — анодное электрохимическое травление, 5 — вскрытие микроканалов, 6 — высокотемпературное окисление микроканальной мембраны с формированием поверхностной структуры двуокиси кремния — кремний

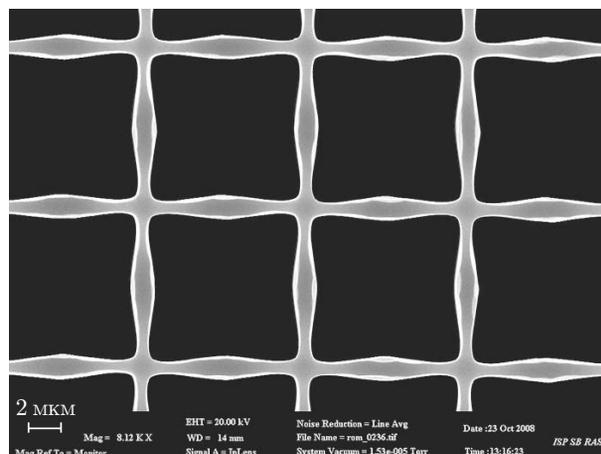


Рис. 4. СЭМ-изображение фронтальной поверхности кремниевой микроканальной мембраны перед операцией высокотемпературного окисления

После термического окисления в парах воды при температуре $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 часа на всей поверхности кремниевой структуры был сформирован слой SiO_2 толщиной 90 нм (см. рис. 3, стадия б).

Конструкция генератора. Схематичное изображение генератора с измерительным стендом приводится на рис. 5. Изготовленная микроканальная мембрана помещалась в симметричную двухкамерную ячейку, имеющую сквозной вертикальный канал диаметром 2,5 мм, внутри которого на расстоянии 200 мкм с обеих сторон от мембраны располагались сетчатые вольфрамовые электроды толщиной 50 мкм с микроканалами гексагональной формы (характерный размер канала — диаметр вписанной окружности — 150 мкм). Рас-

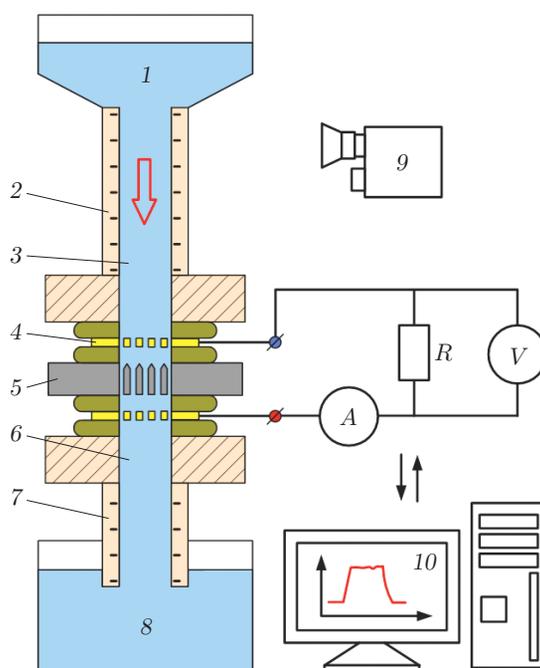


Рис. 5. Схема генератора с измерительным стендом: 1 — резервуар, 2 — стеклянный калиброванный цилиндр, 3 — верхняя камера, 4 — вольфрамовые электроды и уплотняющие кольца, 5 — микроканальная мембрана, 6 — нижняя камера, 7 — гибкий капилляр, 8 — накопитель, 9 — видеокамера, 10 — ЭВМ. Стрелка показывает движение жидкости

стояние между вольфрамовыми сетчатыми электродами с учётом толщины мембраны и уплотняющих колец, изготовленных из полидиметилсилоксана, составляло приблизительно 0,6 мм. Над ячейкой вертикально закреплялся стеклянный калиброванный капилляр высотой 0,5 м с внутренним диаметром 2,5 мм. К свободному концу капилляра крепился резервуар высотой 0,1 м с внутренним диаметром 20 мм. При заполнении капилляра и резервуара рабочей жидкостью (ДВ) создавалось давление на микроканальную мембрану, которая для уменьшения гидродинамического сопротивления была обращена к потоку жидкости тыльной стороной (сторона с бóльшим коэффициентом прозрачности). К выходному отверстию ячейки присоединялся гибкий капилляр, с помощью которого прошедшая сквозь устройство вода сливалась в накопитель. Гибкий капилляр содержал специальный вентиль, позволяющий регулировать поток жидкости через систему.

Методика измерений. Измеряемыми величинами являлись высота столба жидкости над мембраной (давление, создаваемое жидкостью), возникающее на электродах напряжение (потенциал течения) и ток, протекающий через нагрузочное сопротивление. Изменение высоты столба жидкости в резервуаре и стеклянном калиброванном капилляре относительно мембраны регистрировали с помощью видеокамеры. Пересчёт полученных значений высоты столба жидкости в давление производился по известной формуле

$$P = \rho gh, \quad (3)$$

где ρ — плотность жидкости, g — ускорение свободного падения, h — высота столба жидкости над мембраной. Напряжение и ток фиксировали с помощью двух цифровых мультиметров "Keithley 2000", работающих в режимах вольтметра и амперметра. Управление процессами измерения, накопления, сохранения и вывода получаемых данных осуществлялось с помощью ЭВМ с использованием протокола GPIB под контролем программного обеспечения, созданного в среде разработки Embarcadero RAD Studio XE2.

Все измерения проводились при комнатной температуре по следующей схеме:

- предварительная продувка системы инертным газом (аргоном) в целях восстановления исходного состояния микрофлюидного электрогенератора;
- заливка в систему ДВ специальным калиброванным дозатором;
- открытие запорного вентиля, пропускание жидкости через систему;
- регистрация высоты столба жидкости над мембраной и непрерывное измерение напряжения и/или тока в зависимости от схемы подключения (в режиме холостого хода (ХХ), короткого замыкания (КЗ) или с нагрузочным сопротивлением разных номиналов).

В экспериментах использовалась чистая ДВ (рН = 6–7), полученная с помощью установки очистки воды "Milli-Q Integral-10" (компания "Millipore").

Результаты и обсуждение. *Работа генератора в режимах холостого хода и короткого замыкания.* Во всех случаях микрофлюидный электрогенератор на основе кремниевой микроканальной мембраны создавал разность потенциалов при пропускании через него рабочей жидкости. Это было обусловлено тем, что на поверхности микроканалов находился диэлектрический слой SiO_2 , несущий на себе отрицательный заряд, возникавший при контакте с ДВ (рН = 6–7). В результате внутри микроканалов формировался диффузионный слой катионов (в нашем случае протонов), которые при движении жидкости устремлялись к нижнему сетчатому электроду, создавая разность потенциалов.

На рис. 6, а представлен результат одного из экспериментов, когда при подключении к генератору цифрового мультиметра "Keithley 2000", работающего в режиме вольтметра (входное сопротивление >10 ГОм), обеспечивался режим измерения напряжения холостого хода. В данном случае полагаем, что нагрузочное сопротивление бесконечно. В процессе экспериментов регистрировались высота столба жидкости над мембраной и напряжение между электродами. При этом наблюдалась линейная зависимость напряжения, возникающего на клеммах устройства, от высоты столба (давления) жидкости, протекающей

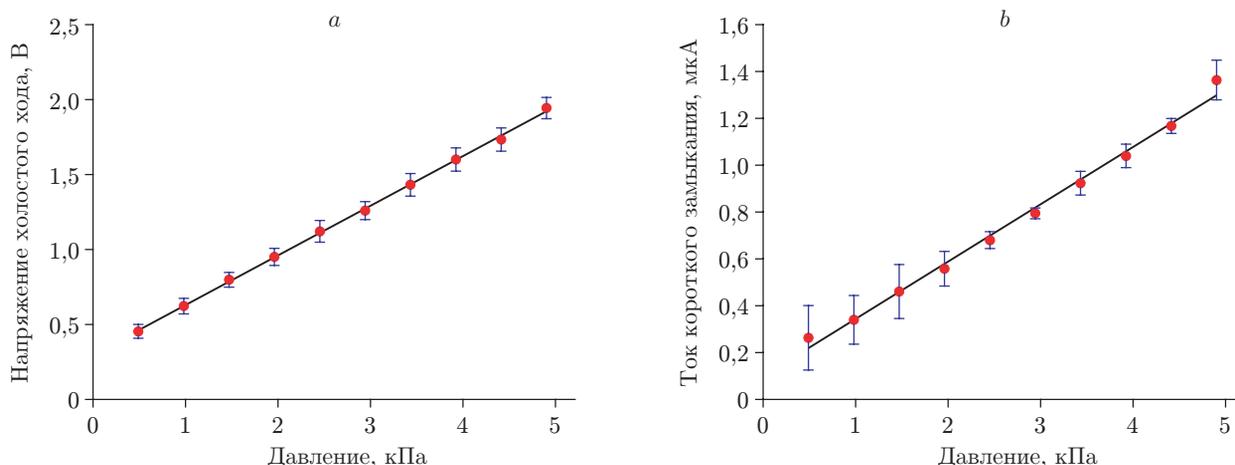


Рис. 6. Работа генератора в двух режимах: холостой ход (а) и короткое замыкание (б). Интервал ошибок измерений указан с доверительной вероятностью 90 %

через него, что было в полном соответствии с теорией [13]. Функциональная связь между напряжением и давлением жидкости аппроксимирована методом наименьших квадратов в линейную зависимость вида $U_{ХХ}(P) = k_{ХХ}P + b_{ХХ}$ с параметрами $k_{ХХ} = 0,33$ В/кПа и $b_{ХХ} = 0,3$ В. Следует отметить, что при нулевом давлении на электродах сохраняется небольшая разность потенциалов ($\sim 0,3$ В).

При подключении к генератору цифрового мультиметра "Keithley 2000", работающего в режиме амперметра (сопротивление токового шунта составляет 10 Ом), обеспечивался режим короткого замыкания. В этом случае полагаем, что нагрузочное сопротивление близко к нулевому. Как и при измерении в режиме холостого хода, регистрировалась высота столба жидкости с последующим пересчётом в давление, а также ток, протекающий через систему. Результаты измерений приведены на рис. 6, б. Полученные значения хорошо аппроксимируются методом наименьших квадратов в линейную зависимость вида $I_{КЗ}(P) = k_{КЗ}P + b_{КЗ}$ с параметрами $k_{КЗ} = 0,24$ мкА/кПа и $b_{КЗ} = 0,1$ мкА. В момент прекращения движения жидкости (установления нулевого давления) в системе регистрировался остаточный ток ($\sim 0,1$ мкА).

Остаточные значения напряжения и тока в режимах измерения напряжения холостого хода и тока короткого замыкания соответственно встречались в работе [28] и могут быть связаны с неравновесным распределением зарядов внутри микроканалов, установившимся после прекращения движения жидкости (перекрытие вентиля на гибком капилляре). Вероятно, асимметрия микроканалов (см. рис. 3, стадия б) используемой кремниевой мембраны играет существенную роль в усилении этого эффекта.

Полученные линейные коэффициенты позволяют предсказать величины напряжения холостого хода и тока короткого замыкания при давлении жидкости 100 кПа (~ 1 атм.), значения составят ~ 33 В и 24 мкА соответственно.

Одним из важнейших параметров любой генерирующей системы является внутреннее сопротивление, которое определяется как отношение напряжения холостого хода к току короткого замыкания [29]:

$$r_i = U_{ХХ}/I_{КЗ}. \quad (4)$$

Например, при давлении жидкости 4,9 кПа (высота столба жидкости 0,5 м) напряжение холостого хода составляет 1,94 В, а ток короткого замыкания — 1,4 мкА. Значение внутреннего сопротивления, определённое указанным выше способом, равно 1,4 МОм.

Работа генератора с нагрузкой. Следующим шагом после определения параметров микрофлюидного электрогенератора при работе в режимах холостого хода и короткого замыкания стало изучение режима работы генератора с нагрузочным сопротивлением, к которому последовательно и параллельно подключались два цифровых мультиметра "Keithley 2000", работающие в режимах амперметра и вольтметра соответственно. В ходе экспериментов при подключении к генератору различных нагрузочных сопротивлений R в интервале от 1 кОм до 50 МОм фиксировались высота столба (давление) жидкости, напряжение и ток. Примеры полученных зависимостей показаны на рис. 7, *a*.

Проведённые эксперименты позволили определить мощность, выделяемую на различных нагрузочных сопротивлениях при их подключении к генератору. Зависимость мощности от номинала нагрузочного сопротивления при постоянном давлении жидкости 4,9 кПа (высота столба жидкости 0,5 м) представлена на рис. 7, *b*. При сопротивлении нагрузки 1,8 МОм на графике наблюдается отчётливо выраженный максимум 0,55 мкВт. Это может быть объяснено тем, что согласно теории электрических цепей максимальная мощность отдаётся генератором в цепь при нагрузочном сопротивлении, равном внутреннему сопротивлению генератора [29]. При давлении жидкости 4,9 кПа внутреннее сопротивление генератора, определённое таким способом (1,8 МОм), по порядку величины соответствует значению внутреннего сопротивления, найденному из отношения напряжения холостого хода к току короткого замыкания (1,4 МОм). Необходимо отметить, что внутреннее сопротивление работающего генератора сильно зависит от свойств ДЭС на границе раздела двуокись кремния — жидкость, который очень чувствителен к изменению внешних условий (температура, электропроводность и вязкость жидкости, наличие мелкодисперсных частиц-загрязнителей и др.). Это хорошо демонстрирует выражение (1). Полученные значения дают представление о порядке величины внутреннего сопротивления, что в будущем поможет при создании электронных схем согласования для питания приборов от подобных генерирующих устройств. Стоит подчеркнуть, что достигнутые величины мощностей соответствуют значениям, получаемым другими микроэлектрогенераторами, например электростатическими [15].

Стабильность работы генератора. В экспериментах по изучению стабильности работы созданного микрофлюидного электрогенератора использовался резервуар с сечением 40 мм, что позволяло стабилизировать в относительно постоянных пределах давление

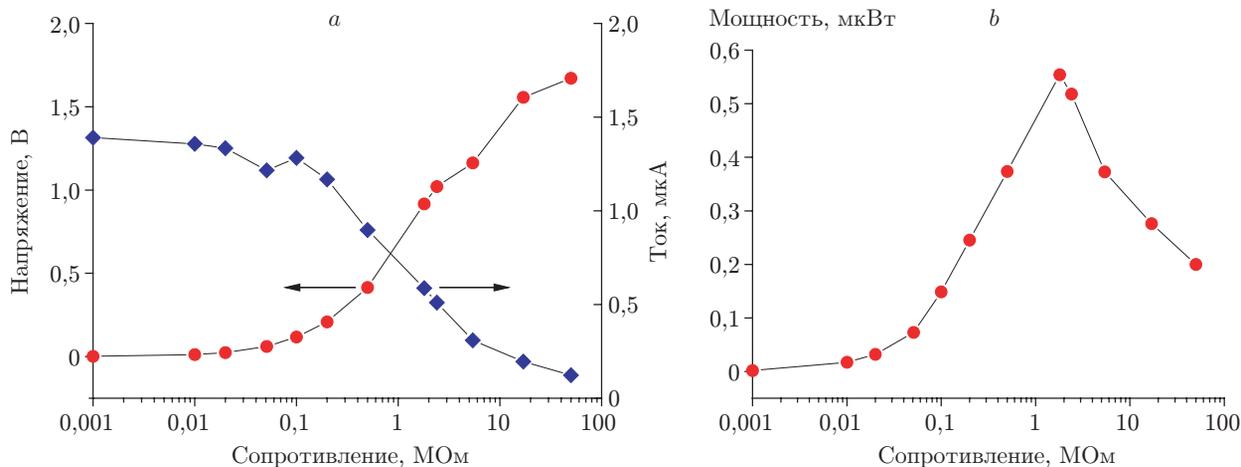


Рис. 7. Работа генератора с нагрузкой при давлении жидкости 4,9 кПа (высота столба жидкости 0,5 м): *a* — зависимость напряжения и тока от сопротивления нагрузки, *b* — мощность, выделяемая на нагрузочном сопротивлении

жидкости на мембрану. Регистрация возникающего потенциала течения при непрерывном пропускании жидкости в течение 10 мин показала высокую стабильность генерируемого напряжения. При этом процессы газообразования визуально не фиксировались. Водородный показатель рН воды, прошедшей сквозь устройство, определялся с помощью универсальной индикаторной бумаги и был равен ~ 6 . Следует обратить внимание на то, что вышеописываемые эксперименты проводились при относительно малых давлениях жидкости (до 5 кПа).

Эффективность преобразования энергии. Существенным параметром микрофлюидных электрогенераторов является эффективность, с которой механическая энергия движения жидкости превращается в электрическую. Согласно выражению (2) при следующих значениях входящих в него параметров: $\varepsilon = 81$, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\zeta = 46,3$ мВ (определено в [6]), $\mu = 1 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\sigma = 0,055$ мкСм/см (заявленные параметры установки очистки воды "Milli-Q Integral-10"), $A_0 \approx 66$ мкм² — максимальная эффективность устройства составляет 1,91 %. Полученное значение эффективности преобразования для устройства, содержащего мембрану с поперечным размером микроканалов $\sim (8-9)$ мкм, достаточно высоко по сравнению с уже опубликованными результатами. Например, в работах [23, 24] при использовании микроканальных мембран эффективность преобразования составила 0,39 % и ~ 1 % соответственно, а в исследовании [30] — 1,3 %. Для стеклянных мембран с сечением канала 10×16 мкм [31] эффективность была существенно ниже и находилась на уровне 0,01 %. Керамические мембраны [32] показали эффективность 0,8 %, а проведённые при этом теоретические расчёты предсказывают, что максимально возможная эффективность преобразования может достигать 40 %.

Оптимизация конструкции генератора. Основной способ увеличения эффективности преобразования энергии в микрофлюидных генерирующих устройствах на основе окисленных кремниевых мембран заключается в уменьшении сечения каналов. Согласно теоретическим оценкам (1) для деионизованной воды с рН = 7 протяжённость диффузного слоя (длина Дебая) может достигать 500 нм. Для микрофлюидного электрогенератора, использованного в данной работе, эта величина значительно меньше поперечного размера микроканалов, составляющего $\sim (8-9)$ мкм. Уменьшение ячейки микроканалов мембраны в целях оптимизации устройства и повышения эффективности преобразования энергии возможно до тех пор, пока поперечные размеры микроканала не сравняются с толщиной диффузного слоя. При дальнейшем уменьшении сечения канала произойдёт перекрытие диффузных слоёв противоположных стенок, что накладывает физические ограничения на перенос зарядов диффузного слоя [23]. На сегодняшний день существует хорошо отработанная технология изготовления мембран с характерным размером сечения пор $\sim (2-3)$ мкм [33]. Использование подобных мембран при прочих равных условиях позволит достигнуть эффективности преобразования энергии порядка 20 %.

Заключение. Полученные экспериментальные данные убедительно показали, что микрофлюидный электрогенератор, созданный на основе асимметричной кремниевой микроканальной мембраны, может быть эффективным генерирующим устройством, применяемым в микро- и нанофлюидных системах. В экспериментах с использованием деионизованной воды определены напряжение и ток, создаваемые генератором, а также мощность, выделяемая на нагрузочном сопротивлении в зависимости от его величины при фиксированном давлении потока жидкости, проходящего через мембрану. Отмечены надёжность и высокая стабильность работы устройства. Применение ранее разработанного подхода аналитического описания пространственной структуры микроканальных мембран позволило более точно определить такую важную характеристику устройства, как эффективность преобразования энергии.

Результаты предлагаемой работы станут базой для дальнейшей оптимизации уже существующих и создания новых, более простых и эффективных генерирующих устройств,

основанных на эффекте Квинке. Несколько таких устройств, установленных в транспортную магистраль микро- и нанофлюидного комплекса и соединённых вместе, могут обеспечить возможность питания маломощных электроприборов. Продолжительные отопительные сезоны в климатических условиях Сибирского региона делают интересной идею размещения подобных генераторов в элементах центрального отопления и водоснабжения, по которым подаётся вода под давлением, установленным государственными стандартами. Линейные зависимости напряжения холостого хода и тока короткого замыкания от давления рабочей жидкости открывают широкие перспективы использования микрофлюидного электрогенератора на основе микроканальной асимметричной мембраны в качестве сенсорного устройства для определения скорости течения жидкости.

Авторы выражают благодарность чл.-корр. РАН А. В. Двуреченскому и канд. физ.-мат. наук С. И. Романову за критические замечания и плодотворную дискуссию при проведении исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Паращенко М. А., Вандышева Н. В., Кириенко В. В. и др.** Сенсор на основе кремниевого микроканального резистора // Микроэлектроника. 2013. **42**, № 1. С. 23–33.
2. **Archer M., Christophersen M., Fauchet P. M.** Macroporous silicon electrical sensor for DNA hybridization detection // Biomed. Microdev. 2004. **6**, N 3. P. 203–211.
3. **Wang Y., Yeow J. T. W.** Humidity sensing of ordered Macroporous silicon with HfO₂ thin-film surface coating // IEEE Sensors Journ. 2009. **9**, N 5. P. 541–547.
4. **Романов С. И., Пышный Д. В., Вандышева Н. В. и др.** Кремниевая микроканальная матрица для биочиповых технологий // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 9. С. 55–60.
5. **Splinter A., Stürmann J., Bartels O., Benecke W.** Micro membrane reactor: a flow-through membrane for gas pre-combustion // Sensors and Actuators B. 2002. **83**, Is. 1–3. P. 169–174.
6. **Паращенко М. А., Филиппов Н. С., Кириенко В. В., Романов С. И.** Электроосмотический насос на основе асимметричных кремниевых микроканальных мембран // Автометрия. 2014. **50**, № 3. С. 121–129.
7. **Yao S., Myers A. M., Posner J. D. et al.** Electroosmotic pumps fabricated from porous silicon membranes // Journ. Microelectromech. Syst. 2006. **15**, N 3. P. 717–728.
8. **Wallner J. Z., Nagar N., Friedrich C. R., Bergstrom P. L.** Macro porous silicon as pump media for electro-osmotic pumps // Phys. Status Solidi A. 2007. **204**, N 5. P. 1327–1331.
9. **Вайнер О. Б., Запорожченко И. А., Романов С. И. и др.** Использование микроканальных кремниевых матриц для размер-селективной сепарации клеток // Вестн. НГУ. Сер. Биология, клиническая медицина. 2010. **8**, № 2. С. 5–12.
10. **Letant S. E., van Buuren T. W., Terminello L. J.** Nanochannel arrays on silicon platforms by electrochemistry // Nano Lett. 2004. **4**, N 9. P. 1705–1707.
11. **Филиппов Н. С., Вандышева Н. В., Паращенко М. А. и др.** Электрофоретическое осаждение коллоидных наночастиц CdS на аморфную кремниевую мембрану // ФТП. 2014. **48**, № 7. С. 995–1001.
12. **Chun M., Choa H. I., Song I. K.** Electrokinetic behavior of membrane zeta potential during the filtration of colloidal suspensions // Desalination. 2002. **148**, N 1–3. P. 363–368.
13. **Григоров О. Н.** Электрокинетические явления: Курс лекций. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1973. 198 с.
14. **Багинский И. Л., Косцов Э. Г.** Микроэлектронные высокоэнергоемкие генераторы энергии // Микросистемная техника. 2002. **6**. С. 24–26.

15. Драгунов В. П., Косцов Э. Г. МЭМ электростатический генератор энергии // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 11. С. 47–52.
16. Драгунов В. П., Косцов Э. Г. Особенности функционирования электростатических микрогенераторов энергии // Автометрия. 2009. 45, № 3. С. 62–73.
17. Драгунов В. П., Остертак Д. И. Микроэлектромеханические преобразователи // Микроэлектроника. 2012. 41, № 2. С. 120–135.
18. Papirer E. Adsorption on Silica Surfaces. N. Y.: Marcel Dekker, Inc., 2000. 774 p.
19. Parida S. K., Dash S., Patel S., Mishra B. K. Adsorption of organic molecules on silica surface // Adv. in Colloid and Interface Sci. 2006. 121, N 1–3. P. 77–110.
20. Hunter R. J. Zeta Potential in Colloid Science: Principles and Applications. N. Y.: Academic Press, 1981. 386 p.
21. Probstein R. F. Physicochemical Hydrodynamics: An Introduction. N. Y.: John Wiley and Sons, Inc., 1994. 416 p.
22. Измайлов Н. А. Электрохимия растворов. М.: Химия, 1976. 488 с.
23. Osterle J. F. Electrokinetic energy conversion // Journ. Appl. Mech. 1964. 31, N 2. P. 161–164.
24. Olthuis W., Schippers B., Eijkel J., van den Berg A. Energy from streaming current and potential // Sensors and Actuators B. 2005. 111–112, N 11. P. 385–389.
25. Burgreen D., Nakache F. R. Efficiency of pumping and power generation in ultrafine electrokinetic systems // Journ. Appl. Mech. 1965. 32, N 3. P. 675–679.
26. Пат. 2 388 109 РФ. Способ получения кремниевой микроканальной мембраны в монолитном обрамлении /Н. В. Вандышева, С. И. Романов. Опубл. 27.04.2010, Бюл. № 12.
27. Пат. 2 410 792 РФ. Способ получения кремниевой микроканальной матрицы /Н. В. Вандышева, С. С. Косолюбов, С. И. Романов. Опубл. 27.01.2011, Бюл. № 3.
28. Sbai M., Szymczyk A., Fievet P. et al. Influence of the membrane pore conductance on tangential streaming potential // Langmuir. 2003. 19, N 21. P. 8867–8871.
29. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1975. 752 с.
30. Mansouri A., Bhattacharjee S., Kostiuik L. High-power electrokinetic energy conversion in a glass microchannel array // Lab Chip. 2012. 12, N 20. P. 4033–4036.
31. Yang J., Lu F., Kostiuik L. W., Kwok D. Y. Electrokinetic microchannel battery by means of electrokinetic and microfluidic phenomena // Journ. Micromech. Microeng. 2003. 13, N 6. P. 963–970.
32. Yang J., Lu F. Z., Kostiuik L. W., Kwok D. Y. Electrokinetic power generation by means of streaming potentials: a mobile-ion-drain method to increase the streaming potentials // Journ. Nanosci. Nanotechnol. 2005. 5, N 4. P. 648–652.
33. Пат. 2 516 612 РФ. Канальная матрица и способ её изготовления /С. И. Романов, Н. С. Филиппов, М. А. Паращенко. Опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14.

Поступила в редакцию 28 июля 2014 г.