

УДК 541.138

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ НА ПРИНЦИПАХ ПЕРЕНОСА МАССЫ И ЗАРЯДА В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ МИКРОСИСТЕМАХ

© 2012 г. В. Г. Криштоп\*, \*\*, В. М. Агафонов\*\*, <sup>1</sup>, А. С. Бугаев\*\*\*

\*Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия

\*\*Факультет физической и квантовой электроники, Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия

\*\*\*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 02.06.2011 г.

Важнейшим достоинством преобразователей параметров движения на принципах переноса массы и заряда в электрохимических микросистемах является исключительно высокая крутизна преобразования механического сигнала в электрический ток. В основе действия приборов данного класса лежит принцип диффузионного переноса заряда в условиях вынужденной конвекции, возникающей при действии внешнего ускорения. В данной работе показана возможность создания современных высокотехнологичных устройств на основе электрохимического преобразователя, выполненного с помощью современных микроэлектронных технологий.

**Ключевые слова:** электрохимический преобразователь, электрохимическая ячейка, молекулярно-электронный перенос, твердо-жидкостные микросистемы, конвективная диффузия

### 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ДАТЧИКОВ ДВИЖЕНИЯ НА ПРИНЦИПАХ ПЕРЕНОСА МАССЫ И ЗАРЯДА В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ МИКРОСИСТЕМАХ

Электрохимический преобразователь (ЭХП), принцип работы которого основан на явлении молекулярно-электронного переноса, представляет собой набор электродов, помещенных в раствор электролита (рис. 1).

Как правило, используется раствор с высокой концентрацией фонового (не участвующего в электродных реакциях) электролита с небольшой добавкой активного компонента, ответственного за перенос заряда через границу раздела жидкость/металл на поверхности электрода. Известно, что в этом случае для расчета тока, протекающего в системе, достаточно рассматривать потоки только активного компонента, учитывая диффузионный и конвективный перенос. Роль фонового электролита сводится к экранированию электрического поля в жидкости и, тем самым, к подавлению миграционного переноса зарядов. Работа чувствительного элемента основана на том, что скорость электрохимической реакции на электродах

значительно больше скорости доставки к ним реагирующих веществ.

Принцип действия ЭХП легко пояснить, используя приближение плоских проницаемых (для жидкости, но не для заряда) электродов, впервые разработанное в [1]. При приложении электриче-

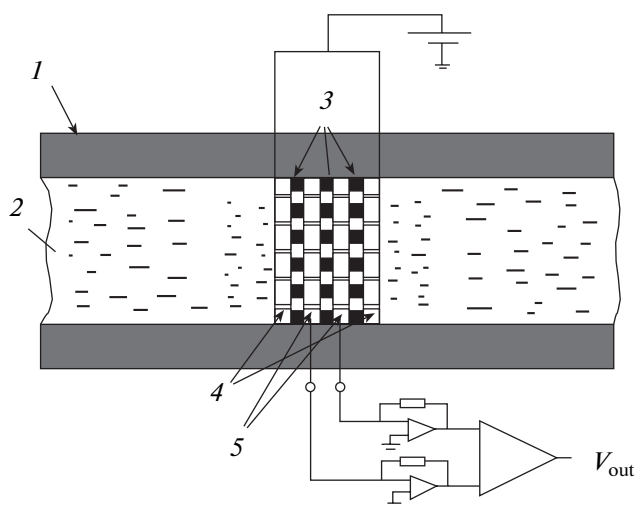
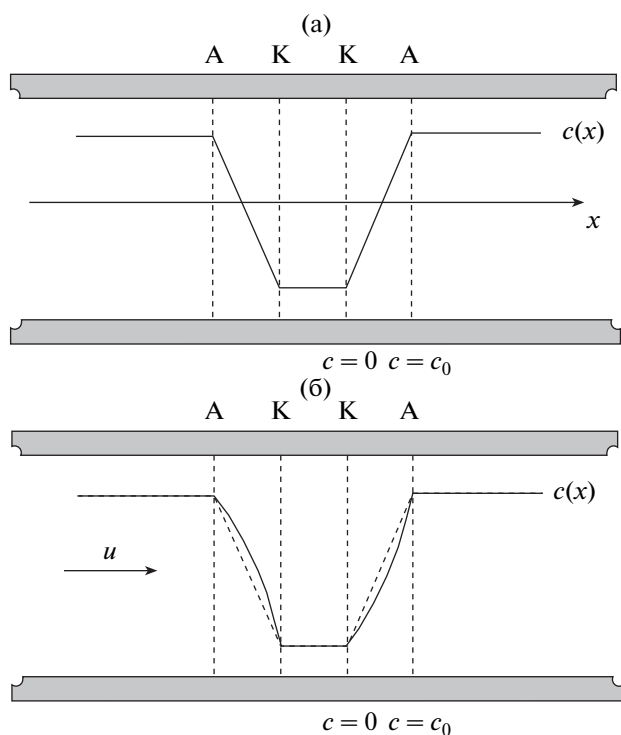


Рис. 1. Электрохимический преобразователь: 1 – керамический или стеклянный корпус; 2 – электролит; 3 – пористые керамические перегородки; 4 – аноды; 5 – катоды.

<sup>1</sup> Адрес автора для переписки: agavonov@cme.ffke.mipt.ru (В.М. Агафонов).

**ПРОВЕРЕНО КОРРЕКТОРОМ.**  
Материал отправлен на согласование



**Рис. 2.** Распределение концентрации электролита в электродном узле с плоскими проницаемыми электродами.  $c(x)$  – установившаяся при наличии напряжения смещения концентрация; а – распределение концентрации без механического движения; б – показано, как изменяется распределение концентрации  $c(x)$  под воздействием набегающего потока жидкости;  $u$  – скорость потока жидкости, электроды обозначены: А – аноды, К – катоды (и так же на рисунках далее).

ского напряжения в системе протекает электрохимический ток (т.н. “фоновый ток”), не зависящий от наличия механического движения (рис. 2а). В этом случае электрохимические реакции создают градиент концентрации компонентов раствора, и перенос заряда в неподвижном электролите осуществляется с помощью диффузии ионов от одного электрода к другому.

При наличии механического сигнала электролит приходит в движение под воздействием сил инерции  $u$ , наряду с диффузией, возникает дополнительный конвективный перенос ионов к электродам, что резко изменяет скорость доставки реагирующих веществ к электродам и, соответственно, резко меняется ток, идущий через чувствительный элемент. В системе возникает дополнительный (к “фоновому”) электрический ток, причем этот ток пропорционален внешнему механическому сигналу.

Иными словами (рис. 2б), возникающий в результате механического движения поток жидкости искажает установившееся “неподвижное” распределение концентрации носителей заряда в межэлектродном пространстве, что приводит к

сильному изменению градиента концентрации вблизи поверхности электродов, а электрический ток через электрод, в свою очередь, зависит от градиента концентрации вблизи поверхности электрода следующим образом:

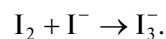
$$I = -Dq \oint_S (\nabla c ds), \quad (1)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии,  $c$  – концентрация носителей заряда,  $q$  – заряд носителей,  $S$  – площадь электрода.

При этом такая система обладает исключительно высокой чувствительностью к механическому воздействию, связанной с высокой крутизной преобразования механического сигнала в электрический ток.

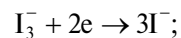
В преобразователе могут быть использованы различные окислительно-восстановительные реакции, например: йод-йодид, ферри-ферроцианид и др. При этом электроды ЭХП изготавливаются из металла, который не участвует в обмене катионами, а осуществляет только электронный обмен, что теоретически позволяет устройству работать бесконечно долгое время без изменения рабочих параметров.

В настоящее время наиболее широкое применение получили йод-йодидные системы с платиновыми электродами. Электролит такой системы состоит из высококонцентрированного водного раствора йодида калия  $KI$  (нижняя граница температурного диапазона  $-15^\circ C$ ) или йодида лития  $LiI$  (нижняя граница температурного диапазона  $-55^\circ C$ ) и небольшого количества молекулярного йода  $I_2$ . В избытке йодида йод переходит в хорошо растворимое комплексное соединение – трийодид – по следующей схеме:

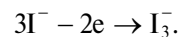


При прохождении тока через ЭХП на электродах происходят следующие электрохимические реакции:

восстановление трийодида на катоде:



окисление йода на аноде:



При этом ионы калия или лития играют роль фонового электролита и не принимают участия в реакциях.

При увеличении межэлектродной разности потенциалов интенсивность электрохимических реакций постепенно нарастает, пока не возникает ситуация, когда все ионы трийодида, достигшие электрода, мгновенно вступают в электрохимическую реакцию. При этом реализуется режим тока насыщения и дальнейшее увеличение разности

потенциалов не изменяет его величины. В этом режиме величина тока насыщения определяется объемной скоростью доставки активного компонента к электродам. В неподвижном электролите скорость доставки определяется диффузией ионов. При движении раствора появляется дополнительный конвективный механизм, который существенно изменяет ток насыщения. Вольт-амперные характеристики электродной системы в неподвижном и движущемся электролите иллюстрирует рис. 3. Характерной особенностью процесса преобразования является его высокая эффективность, что выражается в сильном электрическом отклике, значительно превышающем шумы сопутствующей электроники даже при низких уровнях входного механического воздействия. В конечном счете, тем самым обеспечивается высокое отношение сигнал/шум для всего измерительного тракта.

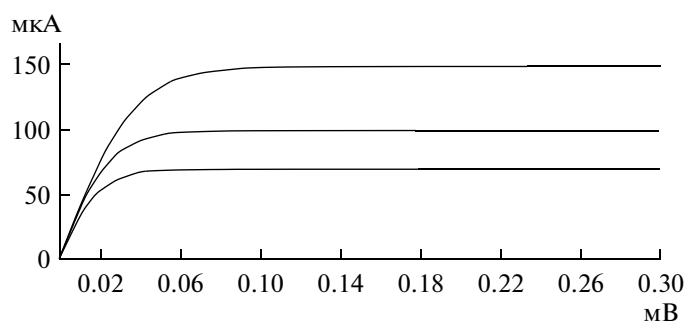
В настоящее время существует экспериментальное производство преобразующих элементов для ЭХП с сетчатыми электродами в микрокерамическом исполнении. На основе этих преобразующих элементов в Центре молекулярной электроники МФТИ разработан ряд оригинальных экспериментальных приборов и систем, предназначенных для решения самых разных задач. Некоторые из мелкосерийно выпускаемых устройств изображены на рис. 4, общее число различных разработанных устройств и модификаций составляет несколько десятков, среди которых встречаются уникальные, например, устройство для определения направления на географический север или шестикомпонентные системы мониторинга состояния высотных зданий и сложных технических сооружений, способные регистрировать как линейные, так и вращательные колебания.

## 2. ПЕРЕНОС ЗАРЯДА И МАССЫ В ЭХП

Для описания процессов переноса и преобразования сигнала и расчета частотных, динамических и шумовых характеристик ЭХП необходимо решить систему уравнений гидродинамики и конвективной диффузии в условиях протекания через электрохимическую ячейку переменного потока электролита. Основным уравнением, описывающим перенос активного компонента в рассматриваемой преобразующей системе, является уравнение нестационарной конвективной диффузии, имеющее, в общем случае, вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\Delta c - \mathbf{V}\nabla c, \quad (2)$$

где  $c$  — концентрация активных ионов,  $\mathbf{V}$  — гидродинамическая скорость течения электролита относительно корпуса преобразователя,  $D$  — коэффициент диффузии,  $t$  — время.



**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики преобразующей электродной системы в неподвижном (средняя кривая) и движущемся от анода к катоду (верхняя кривая) и противоположном направлении (нижняя кривая) электролите.

Распределение скоростей, необходимое для решения (2), может быть получено из уравнений Навье-Стокса (при расчете линейного отклика достаточно использовать приближение малых чисел Рейнольдса) и условия несжимаемости жидкости:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = \nu \Delta \mathbf{V} - \frac{\nabla P}{\rho}, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{V} = 0, \quad (4)$$

где  $\nu$  — коэффициент вязкости электролита,  $P$  — давление,  $\rho$  — плотность.

При малых скоростях протекания электролита решение уравнения конвективной диффузии можно искать в виде ряда, где каждое последующее слагаемое пропорционально амплитуде скорости течения электролита  $u$  в более высокой степени. При исследовании линейного отклика системы достаточно ограничиться первыми двумя членами разложения:

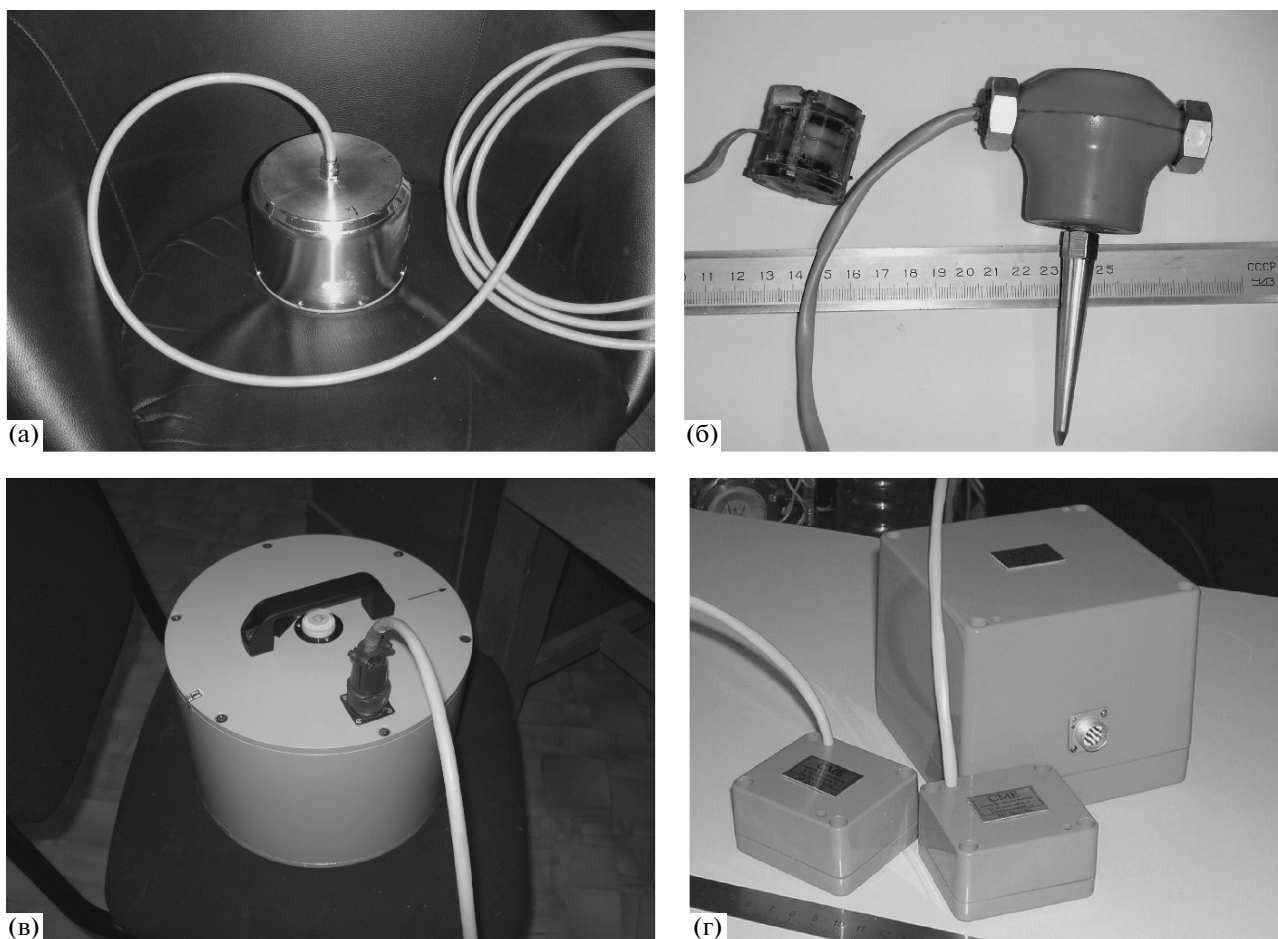
$$c = c_0 + c_1 e^{i\omega t}, \quad (5)$$

где  $c_0$  — распределение концентрации в неподвижной жидкости,  $c_1$  — малая добавка к концентрации, линейная по гидродинамической скорости, изменяющаяся по гармоническому закону. Тогда уравнение (5) преобразуется в следующую систему:

$$\Delta c_0 = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} = D\Delta c_1 - \mathbf{V}\nabla c_0. \quad (7)$$

Система, состоящая из уравнений (3), (4), (6) и (7), в линейном приближении полностью определяет процессы конвективной диффузии, происходящие в ячейке. Обычно используемые для ее решения граничные условия представляют собой естественные физические условия отсутствия потока активных ионов на диэлектрических поверхностях, постоянства концентрации на проводящих электродах, стандартные для гидродинамики



**Рис. 4.** Некоторые из современных приборов и устройств, разработанные в Центре молекулярной электроники ФФКЭ МФТИ: а – шельфовый сейсмометр; б – геофон; в – прецизионный сейсмометр с силовой ОС; г – датчики вращательных движений различного назначения.

условия прилипания жидкости на твердых стенках, а также условия известного перепада давлений на входе и выходе каналов преобразующего элемента.

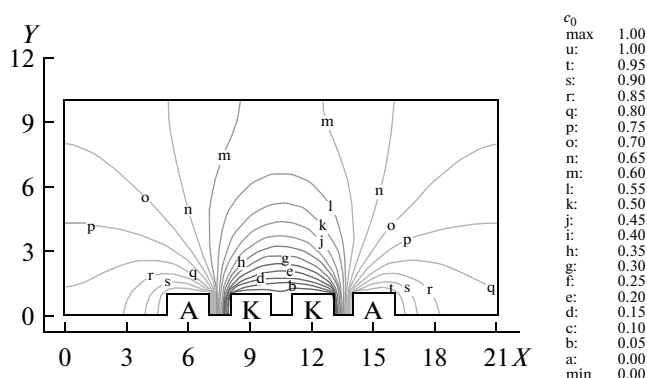
В качестве выходного сигнала для чаще всего используемой четырехэлектродной системы (два анода и два катода, расположенные симметричным образом) рассматривают амплитуду разностного катодного тока:

$$I(t) = I_{\text{Катод2}}(t) - I_{\text{Катод1}}(t) = Dq \left( \oint_{S_{\text{Катод2}}} (\nabla c_1(t) ds) - \oint_{S_{\text{Катод1}}} (\nabla c_1(t) ds) \right), \quad (8)$$

где  $I$  – выходной сигнал,  $t$  – время,  $I_{\text{Катод1}}$ ,  $I_{\text{Катод2}}$  – токи через поверхность соответствующих электродов,  $S_{\text{Катод1}}$ ,  $S_{\text{Катод2}}$  – площади соответствующих электродов.

С точки зрения выходных параметров чувствительного элемента основные недостатки сейсмических датчиков связаны с особенностями пове-

дения его характеристики в области высоких частот. Ранее был опубликован целый ряд работ, связанных с анализом отклика преобразующей системы на высокочастотные сигналы. В публикациях [2, 3] рассматривалась система цилиндрических электродов, соответствующих используемым в серийных устройствах ЭХП сеточным преобразующим структурам. Полученные там результаты достаточно хорошо описывают частотное поведение характеристик реальных преобразователей и, в частности, показывают, что существует предел для чувствительности преобразователей с сетчатыми электродами на высоких частотах, который не может быть преодолен варьированием геометрических параметров. (Здесь и далее под “высокими частотами” понимаются высокие частоты с точки зрения длиннопериодной сейсмологии и процессов переноса в ЭХП. Это диапазон от нескольких герц до нескольких сотен герц. Низкие же частоты с этой точки зрения – от нескольких тысячных (!) до десятых долей герца.)



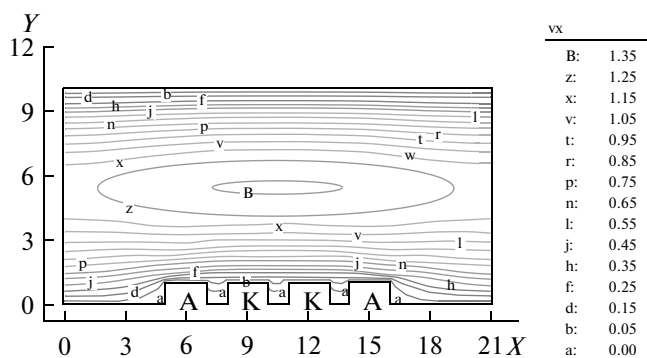
**Рис. 5.** Стационарное распределение концентраций  $c_0$ . Линии с постоянной концентрацией обозначены латинскими буквами, по осям  $X$  и  $Y$  – размеры расчетной структуры в мкм, электроды выполнены в виде прямоугольных выступов. Наибольший градиент концентрации (наибольшая густота линий) достигается в межэлектродном пространстве.

Для улучшения отклика преобразователя на высоких частотах было предложено использовать сеточные электроды из предельно тонких нитей. Существует практическая необходимость достижения максимальных рабочих частот выше 800 Гц для сейсмических датчиков, что для приборов с обратной связью соответствует необходимости смещения соответствующей характерной частоты до, примерно, 3–4 кГц. При этом температурный диапазон в отрицательной области должен достигать  $-40^\circ\text{C}$ , что соответствует  $D \sim 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ . Радиус нити в этом случае должен быть:

$$R \leq \sqrt{D/\omega} \approx 70 \text{ нм}. \quad (9)$$

Практическая реализация сеточных структур подобного типа представляется при текущем уровне технологий достаточно затруднительной. В то же время планарные структуры соответствующих размеров вполне могут быть получены.

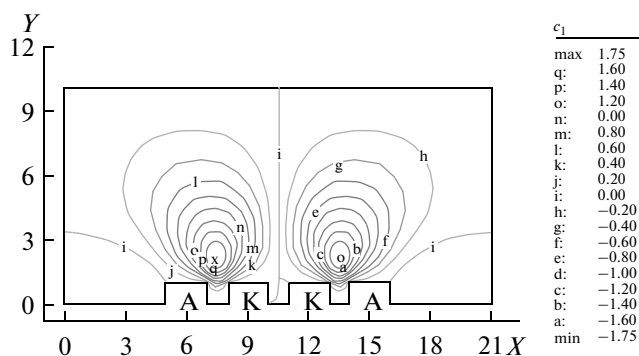
Теоретически преобразующие системы с планарными электродами были исследованы в работах [4, 5] – численно-аналитическими, а в [6–8] – численными методами. В обсуждаемых публикациях основной интерес был направлен на исследование низкочастотного поведения преобразующих систем, соответственно, исследовались структуры с размерами больше 1 мкм. Тем не менее ряд полученных результатов имеет непосредственное отношение к обсуждаемой теме. Так, сопоставляя результаты работ [2] и [4], можно утверждать, что одним только переходом к геометрии с кольцевыми электродами вместо цилиндрических, при сохранении характерных размеров ключевых параметров микросистемы, можно добиться увеличения частоты, на которой начинается спад характеристики на высоких частотах, а также более благоприятного характера спада характеристики, что позволяет обойти предел чувствитель-



**Рис. 6.** Распределение горизонтальной компоненты скорости в ячейке. Линии с одинаковой горизонтальной компонентой скорости обозначены латинскими буквами, по осям  $X$  и  $Y$  – размеры расчетной структуры в мкм, электроды выполнены в виде прямоугольных выступов.

ности сетчатого электродного узла на высоких частотах, существование которого показано в [2]. В работах [6, 7] исследовалась структура с планарными электродами и было показано, что такая структура еще более перспективна с точки зрения изготовления преобразующего элемента, чем с кольцевыми. Результаты работы [7] также свидетельствуют о более медленной скорости спада АЧХ миниатюрных планарных электрохимических ячеек с ростом частоты по сравнению с используемыми ныне. В работе [6] рассматривался процесс преобразования сигнала в ячейке с электродами, нанесенными на стенки канала, и, в частности, приведены следующие рисунки. На рис. 5 показано стационарное, в отсутствие движения электролита, распределение концентраций. Данная величина соответствует  $c_0$  из уравнений (5) и (6), приведенных выше. На рис. 6 показано характерное распределение скоростей в канале. Линейная по скорости поправка к концентрации  $c_1$  приведена на рис. 7. Внешним контуром на рассматриваемых рисунках показаны границы моделируемой области, при этом электроды соответствуют небольшим прямоугольникам в нижней части рисунков. Наружные электроды – аноды, внутренние – катоды.

Из представленных рисунков следует, что максимальный градиент концентрации  $\nabla c_0$  соответствует области в зазоре между электродами. Максимум концентрации  $c_1$  (рис. 7) оказывается удаленным от данной области, поэтому по мере увеличения частоты воздействия ионы из этой области не будут успевать достигать поверхности электродов за время, соответствующее периоду изменения сигнала. Соответственно, чувствительность преобразователя начинает падать заметно быстрее, как только диффузионная длина  $\lambda_D$



**Рис. 7.** Линейная по скорости поправка к стационарному распределению концентрации  $c_1$ . Линии с одинаковой линейной по скорости поправкой к концентрации обозначены латинскими буквами, по осям  $X$  и  $Y$  – размеры расчетной структуры в мкм, электроды выполнены в виде прямоугольных выступов.

оказывается меньше характерных размеров электродной структуры. При этом наибольшее значение имеет размер в области между анодом и катодом, т.к. именно здесь создается линейное по измеряемой скорости возмущение концентрации, ответственное, в конечном итоге, за величину выходного сигнала.

Вместе с тем, с уменьшением характерных размеров электродной структуры и геометрических размеров рабочего канала, заполненного электролитом, снижается и уровень собственных шумов преобразователя. В частности, это относится к механизму неравновесного гидродинамического шума, связанного с конвективной неустойчивостью в жидкости в преобразующем элементе, исследованному в работе [8].

Можно сформулировать следующие выводы:

1. Электродная система с планарными электродами имеет ряд преимуществ перед другими рассмотренными конфигурациями электродов даже при сохранении характерных размеров преобразующих микроструктур на прежнем уровне.
2. Уменьшение характерных размеров основных элементов преобразующей системы позволяет расширить частотный диапазон преобразования, повысить линейность, а во многих случаях и обеспечить более высокую чувствительность.
3. Одним из важнейших параметров планарной структуры, в значительной степени определяющим характеристики ЭХП, является расстояние между катодом и анодом.

Таким образом, одним из основных направлений развития электрохимических датчиков параметров движения является дальнейшее уменьшение характерных размеров преобразующей микроструктуры ЭХП, которого на данном этапе развития можно достичь только с привлечением современных микротехнологий, так как суще-

ствующая сеточная керамическая технология уже исчерпала себя в этом направлении. Использование стандартных микроэлектронных технологий позволит значительно миниатюризировать электродный узел, минимизировать разброс параметров преобразователя, снизить энергопотребление и существенно уменьшить стоимость готовых сенсоров. ЭХП, изготовленный на основе микротехнологий, может иметь характерный размер основных конструктивных элементов вплоть до 100 нм, т.е. становится возможным на 2–3 порядка уменьшить характерные размеры преобразующих элементов.

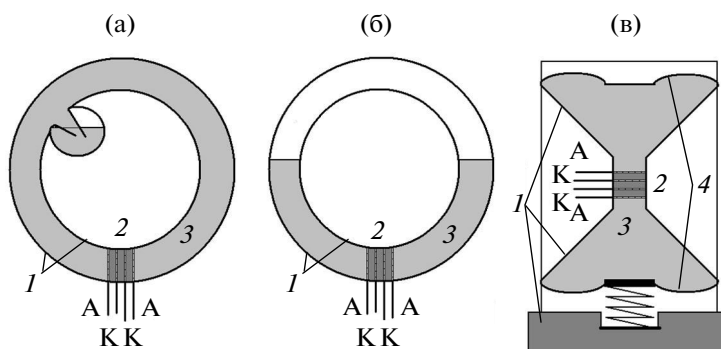
### 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ ЭХП

При изготовлении сейсмического датчика чувствительный элемент помещается поперек диэлектрического канала, ограниченного с обеих сторон гибкими мембранами и заполненного рабочей жидкостью. В настоящее время электродные пакеты ЭХП изготавливаются из металлической сетки с диаметром проволоки 30–100 мкм. Схематическое изображение сейсмических датчиков и внешний вид преобразующих электродов показан на рис. 8 и 9.

Выходная амплитудно-частотная характеристика серийно выпускаемого преобразователя приведена на рис. 10 (кривая 1). Дальнейшее формирование выходной характеристики обеспечивается посредством использования глубокой отрицательной электродинамической обратной связи. В зависимости от способа формирования сигнала обратной связи можно получить выход, пропорциональный скорости либо ускорению. В конечном счете, выходная АЧХ имеет совершенно стандартный для устройств такого назначения плоский вид с неравномерностью характеристики в рабочем диапазоне частот менее 1 Дб. Одновременно, использование обратной связи позволяет обеспечить высокую линейность отклика прибора, температурную и временную стабильность выходных параметров.

Несмотря на достигнутые достаточно высокие выходные параметры разработанные и выпускаемые в настоящий момент устройства обладают рядом недостатков, в конечном счете, ограничивающих область их применения. Основными из них являются следующие:

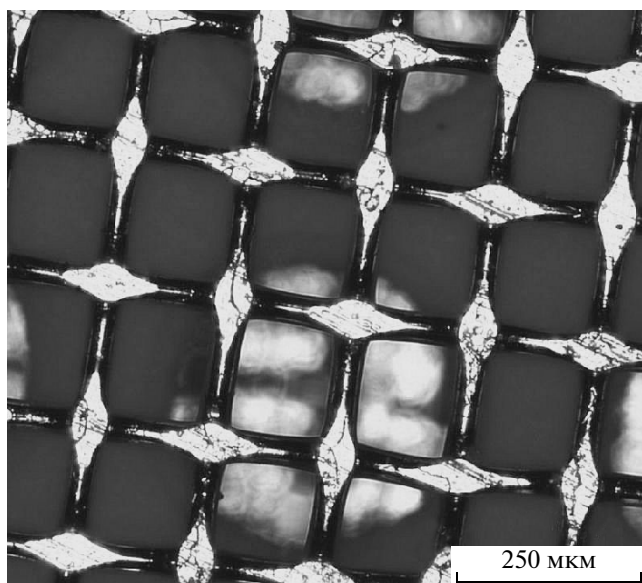
- 1) высокая стоимость изготовления преобразующих элементов,
- 2) довольно сильный разброс параметров изготовленных вручную преобразующих элементов, приводящий к необходимости индивидуальной для каждого датчика настройки сопутствующей электроники, что также увеличивает стоимость прибора;



**Рис. 8.** Типы датчиков на основе ЭХП: а – датчик вращательных движений; б – горизонтальный разрез; в – вертикальный разрез; 1 – корпус, 2 – преобразователь, 3 – канал, заполненный электролитом, 4 – мембраны.

3) ранний спад чувствительности чувствительного элемента в области высоких частот (см. рис. 10, кривая 1).

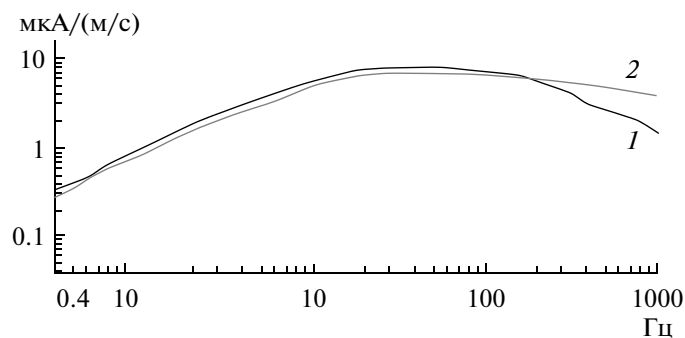
Перечисленные трудности вполне преодолели на современном техническом уровне при использовании планарных преобразующих элементов. В частности, в работе [9] показана возможность реализации чувствительного элемента с характерными размерами электродной структуры 7 мкм.



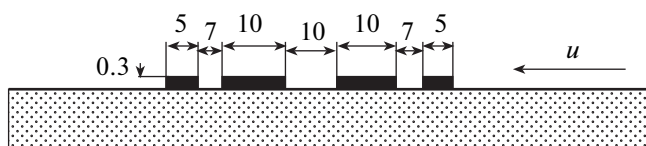
**Рис. 9.** Снимок внутреннего устройства электродного пакета современного ЭХП, созданный с помощью микроскопа Nikon Eclipse LV150. Снимок сделан в направлении оси чувствительности (в направлении течения жидкости). Хорошо видна сетка внешнего электрода – анода 4 (рис. 1) – сплетенная из цилиндрических проволок, сплюснутых в местах их пересечения. Шаг сетки – 150 мкм, толщина проволок – 30 мкм. Под сеткой различимы размытые светлые круглые пятна с радиусом, примерно равным шагу сетки – перфорированные отверстия в керамической перегородке 3 (рис. 1), разделяющей электроды.

Основываясь на результатах аналитических и численных моделей, описанных выше, мы разработали и изготовили чувствительные элементы преобразователя с характерными размерами электродов 3 мкм. Схематическое изображение преобразующей структуры показано на рис. 11.

Технологическая цепочка включает в себя следующий набор основных технологических операций: диэлектрическая поверхность корпуса прибора и щелевого канала на пластине из кремния формируется окислением в диффузионной печи; электродная микроструктура формируется с помощью взрывной фотолитографии и электронно-лучевого напыления; для формирования сквозных прорезей в пластинах подложки используется лазерная резка с помощью перенастраиваемого импульсного пико-/фемтосекундного лазера; выполнение разводки контактов и выводов прибора реализуется методами УЗ-сварки, прецизионной контактной пайки и склеивания контактов электропроводящей пастой. В целом процесс представляет собой совокупность достаточно распространенных в полупроводниковой микроэлектронной промышленности технологических операций,



**Рис. 10.** Амплитудно-частотная характеристика чувствительного элемента сейсмотатчика с преобразующей ячейкой сеточного типа (1) и сейсмического датчика, изготовленного с использованием планарных технологий (2).



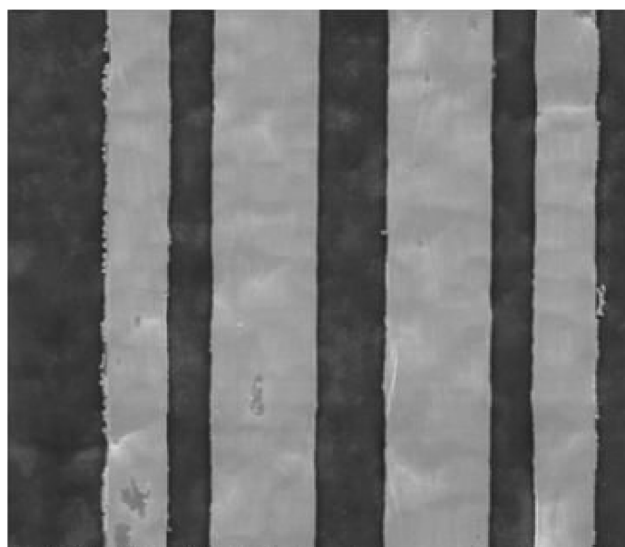
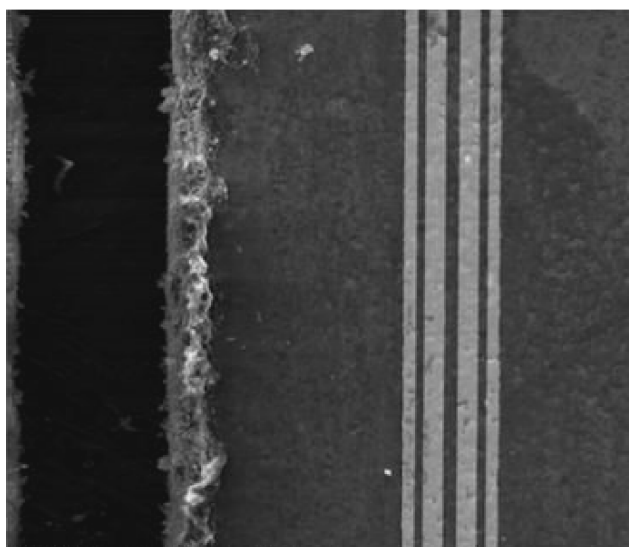
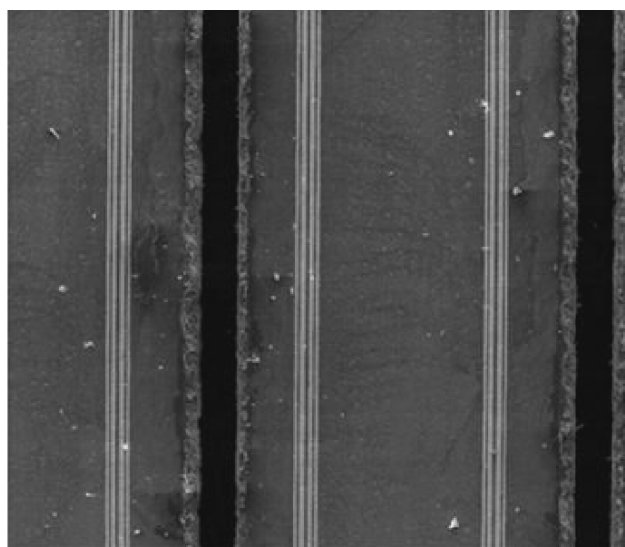
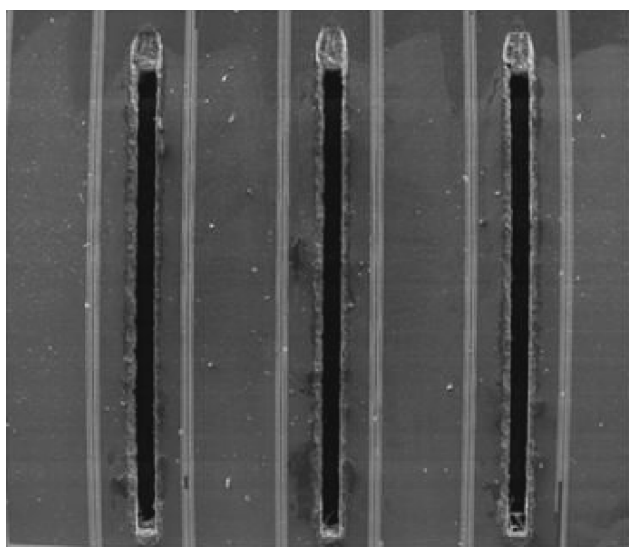
**Рис. 11.** Схематическое изображение преобразующей электродной структуры (поперечное сечение).  $u$  — направление потока электролита.

однако опыт применения этих методов для изготовления преобразователей параметров движения на принципах переноса массы и заряда в электрохимических микросистемах до сих пор

был весьма ограничен. Фотографии изготовленных образцов приведены на рис. 12.

На рис. 12 в увеличенном масштабе хорошо видны преобразующие электродные структуры (группы по 4 светлые параллельные полоски) и выполненные в кремниевой пластине с нанесенными электродами сквозные отверстия, обеспечивающие доступ рабочей жидкости к преобразующей электродной системе.

Детали геометрии преобразующей электродной системы были исследованы с помощью микроскопа высокого разрешения Nikon Eclipse LV150, оснащенного BWH-501 3D surface profiler с высокоточным пьезоэлектрическим приводом и соот-



**Рис. 12.** Изображения электродной структуры чувствительных элементов ЭХП. Фотографии выполнены с помощью растрового электронного микроскопа FEI Quanta 200.



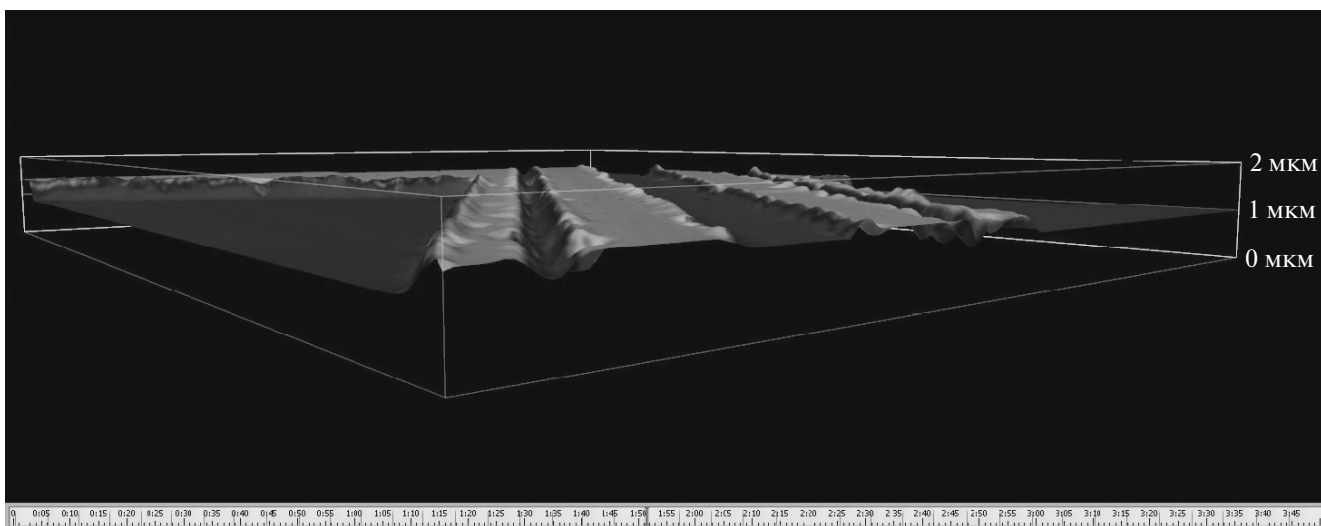


Рис. 13. Трехмерная модель преобразующих электродных структур, построенная с помощью микроскопа Nikon Eclipse LV150, оснащенного BWH-501 3D surface profiler.

ветствующим программным обеспечением. Согласно своим техническим спецификациям данное устройство позволяет изучать профили поверхности с вариациями высоты от 100 нм до 40 мкм. В частности, данное устройство позволяет получать послойные фотографии исследуемых участков поверхности с шагом 25 нм и строить, на основании этого, трехмерные модели и профили изучаемых структур. Результаты такого исследования приведены на рис. 13 и 14.

На рис. 14 показаны положения и профили двух соседних электродов, анода и катода, а также непроводящего зазора между ними. Тонкими вертикальными линиями показаны границы между электродами и непроводящими зазорами. Высота поверхности электрода относительно дна непроводящего зазора составляет 100 нм. Некоторый подъем профиля поверхности электрода на краях создается маской при ее отрыве от поверхности после нанесения электродов в процессе взрывной фотолитографии.

На рис. 10 приведена амплитудно-частотная характеристика сейсмического датчика с чувствительным элементом нового типа (кривая 2) в сравнении с традиционным устройством (кривая 1). Из полученных результатов видно, что по сравнению с традиционным устройством чувствительность нового датчика в области высоких частот падает значительно слабее, что, во-первых, вполне соответствует теоретическим предсказаниям и численным расчетам, обсуждаемым выше, а во-вторых, убедительно доказывает, что разработанный с использованием микроэлектронных технологий новый преобразующий элемент значительно превосходит современные приборы на основе МЭП по частотному диапазону работы.

Измерители параметров движения на основе молекулярно-электронного переноса в ЭХП, при их невысокой себестоимости при массовом производстве с использованием современных микроэлектронных технологий и качественном повышении технических параметров, имеют весьма широкую сферу применения, включая сейсмо-разведку (в том числе 2D и 3D, в том числе, векторную), системы навигации (в том числе портативные персональные и предназначенные для малых автономно действующих аппаратов), системы виброконтроля и сейсмического мониторинга состояния зданий и сооружений, некоторые медицинские приложения (такие как носимые системы кардиомониторинга, ортопедии и спортивной

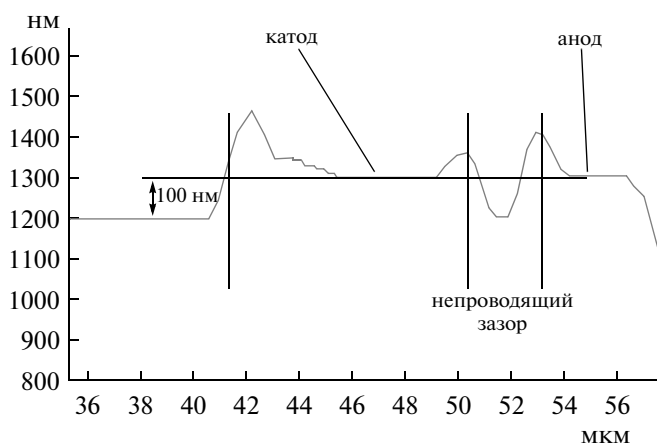


Рис. 14. Профиль электродной структуры, полученный с помощью микроскопа Nikon Eclipse LV150, оснащенного BWH-501 3D surface profiler. Показан участок профиля, соответствующий двум электродам и зазору между ними.

медицины), автомобильные системы безопасности, робототехника и многие другие.

Авторы выражают благодарность В.Г. Попову (ИПТМ РАН), И.Н. Ескину (МФТИ), В.В. Кононенко (ИОФ РАН), В.В. Денискину (НИИ ФП), Р.Н. Выдумкиной (ИПТМ РАН), Н. Ушаковой (ИПТМ РАН), Е. Шелеминой (ИПТМ РАН), В.Т. Волкову (ИПТМ РАН), Я. Биндлер (Mettech, USA), В.В. Платонову (ТЦ МИЭТ), В.В. Амеличеву (ТЦ МИЭТ), А. Соболеву (ИРЭ РАН), Е. Коростылеву (НОЦ “Нанотехнологии” МФТИ), Е.В. Обручевой (ОАО “НПП Квант”).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Larkam C.W.* // J. Acoustical Soc. America. 1965. V. 37. № 4. P. 664.
2. *Агафонов В.М., Криштон В.Г.* // Электрохимия. 2004. Т. 40. С. 606. [*Agafonov V.M., Krishtop V.G.* // Russ. J. Electrochem. 2004. V. 40. P. 537.]
3. *Агафонов В.М., Криштон В.Г.* // Микросистемная техника. 2004. № 9. С. 40.
4. *Козлов В.А., Терентьев Д.А.* // Электрохимия. 2002. Т. 38. С. 1104. [*Kozlov V.A., Terent'ev D.A.* // Russ. J. Electrochem. 2002. V. 38. P. 992.]
5. *Козлов В.А., Терентьев Д.А.* // Электрохимия. 2003. Т. 39. С. 443. [*Kozlov V.A., Terent'ev D.A.* // Russ. J. Electrochem. 2003. V. 39. P. 401.]
6. *Агафонов В.М., Орел А.А.* // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 5. С. 50.
7. *Агафонов В.М., Бугаев А.С., Орел А.А.* // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 5. С. 32.
8. *Сафонов М.В.* // Электронный журнал “Исследовано в России”. 2004. С. 2433.
9. *Агафонов В.М., Криштон В.Г., Сафонов М.В.* // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 6. С. 47.