

Сейсмические датчики на принципах молекулярно-электронного переноса в твердотельных и жидкостных микроструктурах

- Агафонов В. М.1,2), Криштоп В. Г.1,3), Егоров И. В.2),
 1) МФТИ, г. Долгопрудный, 2) ООО "Р-сенсорс", г. Долгопрудный,
 3) Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов
 РАН, Московская обл, Ногинский р-н, Черноголовка

Традиционная конструкция сейсмического датчика включает в себя массу, подвешенную на пружине, закрепленной на жестко связанном с корпусом основании. При наличии колебательного движения корпуса, вызванного сейсмическим сигналом, на массу действуют силы инерции, заставляющие массу перемещаться относительно основания. Относительное движение инерциальной массы измеряется преобразователем, наиболее распространенный из которых использует для преобразования сигнала явление электромагнитной индукции. Датчики такого типа (геофоны) широко используются в сейсморазведке многокомпонентных измерений. В последнее время, ряд производителей сейсмического оборудования за рубежом, компании Sercel и IONgeo, вывели на рынок трехкомпонентные сейсмические MEMS-акселерометры. Известно о проведении аналогичных работ в компании Hewlett-Packard при финансировании и техническом участии Shell. Несомненным результатом использования датчиков таких типов является повышение общей точности сейсморазведочных данных как за счет расширения частотного диапазона, так и в силу лучшей линейности измерителей и многократно более высокой их идентичности. Вместе с тем, такие датчики имеют мало общего с массо-

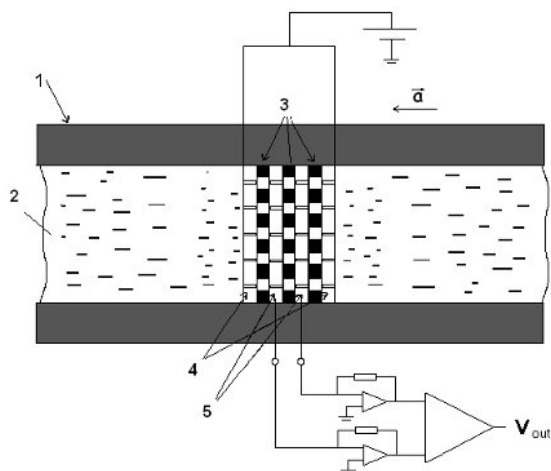
выми коммерческими МЭМС акселерометрами или гироскопами, широко применяемыми, например, в автомобильной промышленности или бытовой электронике. Для достижения необходимой в сейсморазведке высокой чувствительности широко применяются объемные микротехнологии, требующие уникального дорогостоящего оборудования. Как следствие, высококачественные сейсмические МЭМС весьма дороги, что связано с высокой стоимостью основных вложений в создание высокоточного микро-электронного производства. В свою очередь, высокая цена ограничивает область использования подобных новых сейсморазведочных систем и вообще ставит под вопрос целесообразность их широкого практического использования.

В отличие от МЭМС, молекулярно-электронные датчики, о которых и пойдет речь в данной работе, используют жидкую инерциальную массу. При этом, чувствительный элемент представляет из себя систему фиксированных относительно корпуса микро-электродов, преобразующих переменный поток рабочей жидкости, вызванный силами инерции, в вариации межэлектродного электрического тока. Отличительной особенностью данного физического механизма является крайне высокий коэффициент

преобразования, что на уровне базовых принципов позволяет достигать низкого уровня собственного шума. Важным достижением последних лет исследований является объединение молекулярно-электронного принципа преобразования с достижениями микроэлектронных технологий [1]-[3], что позволяет, во-первых, кардинально снизить себестоимость устройств в массовом производстве, а во-вторых – расширить частотную полосу регистрируемых сигналов, полностью покрыв диапазон, представляющий практический интерес для сейсморазведки.

Принципы работы.

Рисунок 1 иллюстрирует базовую концепцию молекулярно-электронного преобразующего элемента, используемого в сейсмических датчиках, состоящего, как правило, из двух симметрично расположенных пар электродов. В каждой паре один из



▲ Рис. 1. Принципиальная схема устройства молекулярно-электронного преобразующего элемента.

- 1 – канал, с жидкостью;
- 2 – рабочая жидкость;
- 3-диэлектрические разделители;
- 4 – аноды;
- 5 – катоды.

электродов (катод) имеет более низкий потенциал относительно другого (анода). Электродная система размещается внутри канала, заполненного рабочей жидкостью. На концах канала размещены гибкие мембраны, позволяющие жидкости двигаться относительно электродов под действием сил инерции.

Для объяснения принципов работы преобразующего элемента необходимо кратко остановиться на физических свойствах рассматриваемой системы и, в частности, механизме протекания электрического тока. Как правило, в молекулярно-электронном преобразователе используется йод-йодидный электролит, представляющий собой высококонцентрированный раствор йодида калия или лития с небольшой добавкой молекулярного йода. В присутствии йодида йод превращается в растворимый компонент три-йодид согласно следующей реакции:



Если между электродами приложена разность потенциалов, то в ячейке протекает электрический ток. При этом перенос заряда через электроды оказывается возможным только за счет наличия в растворе ионов три-йодида, которые на катоде превращаются ионы йодида с передачей электронов в металл:



В отсутствии ионов три-йодида катодная реакция становится невозможной и электрическая цепь разры-

вается. В целом, молекулярный перенос заряда в растворе дополняется электронной проводимостью на границе и в объеме металла, откуда и происходит термин молекулярно-электронный перенос, как одно из известных названий процесса переноса заряда в такой системе [4]. Величина электродного тока, таким образом, оказывается однозначно связанной с потоком ионов три-йодида через поверхность электрода:

$$I = -Dq \oint_S (\nabla c, \vec{n}) \cdot d\vec{S} \quad (3)$$

где D – коэффициент диффузии, – c – концентрация ионов три-йодида (активная компонента), $\vec{n}$ – единичный вектор нормали к поверхности электрода, q – заряд через поверхность переносимый в единичной электрохимической реакции (2). Интегрирование проводится по всей поверхности электрода, находящейся в контакте с электролитом.

Работа молекулярно-электронного преобразователя основывается на том, что величина электродного тока зависит от скорости доставки активного компонента к электроду за счет конвективного, связанного с движением жидкости, механизма. Наиболее сильно эта зависимость проявляется в режиме насыщения, переход в который происходит по мере увеличения межэлектродной разности потенциалов. Величина тока сначала нарастает из-за повышения интенсивности стимулированных разностью потенциалов электрохимических реакций (2), пока не реализуется ситуация, в которой все ионы три-йодида, достиг-

шие поверхности катода, мгновенно вступают в реакцию (2). При этом дальнейшее увеличение разности потенциалов практически не изменяет величины тока. В то же время, ток становится очень чувствительным к изменению скорости переноса ионов в объеме раствора. В частности, если жидкость приходит в движение под действием сил инерции, то конвективный перенос изменяет скорость доставки ионов к электродам, а следовательно и электрический ток.

Выходным сигналом молекулярно-электронного преобразователя, чаще всего, является разность катодных токов. Такой выбор обусловлен тем, что для симметричной ячейки, аналогичной показанной на рисунке 1, разность катодных токов в неподвижной жидкости равна нулю, а при движении жидкости один катодный ток возрастает, а другой уменьшается. Использование разностного тока позволяет компенсировать постоянную составляющую тока, повысить линейность преобразования и расширить динамический диапазон.

АЧХ молекулярно-электронного преобразователя.

Полная передаточная функция молекулярно-электронного преобразователя определяется произведением передаточных функций механической и электрохимической систем:

$$W(\omega) = W_{mech}(\omega) \cdot W_{el-chem}(\omega) \quad (4)$$

где $W_{el-chem}(\omega)$ — электрохимическая часть передаточной функции МЭП, $W_{mech}(\omega)$ — механическая.

Передаточная функция механичес-

кой системы может быть описана как отклик гармонического осциллятора, в котором инерциальная масса является жидкой, возвращающая сила связана с действием упругих мембран, а демпфирование определяется вязкими силами, действующими в тонких каналах преобразующей электродной системы (5):

$$W_{mech}(\omega) = \left| \frac{Q(\omega)}{a(\omega)} \right| = \frac{\rho L}{\sqrt{\left(\frac{\rho L}{S_{ch}} \right)^2 \frac{(\omega^2 - \omega_0^2)}{\omega^2} + R_h^2}}$$

Здесь $Q(\omega)$ – объем электролита, протекающий в канале за единицу времени, $a(\omega)$ – внешнее ускорение, ρ – плотность, L – длина канала, S_{ch} – площадь поперечного сечения канала, ω_0 – собственная частота колебательной системы, R_h – гидродинамическое сопротивление.

Электрохимическая составляющая передаточной функции в общем случае имеет сложный вид и исследуется численными методами. Для расчетов используется система, состоящая из уравнения Навье-Стокса, условия несжимаемости жидкости и уравнения конвективной диффузии:

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla P + \mu \Delta \mathbf{u} \\ \nabla \mathbf{u} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} + \nabla(-D \nabla c + c \mathbf{u}) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Здесь $\mathbf{u}$ – гидродинамическая скорость жидкости, μ – вязкость, P – давление. Граничные условия к системе уравнений учитывают прилипание жидкости на твердых стенках,

отсутствие потоков ионов через диэлектрические поверхности, условие равенства нулю концентрации с на катодах, что эквивалентно нахождению системе в режиме насыщения. Корректная постановка условий на анодах является нетривиальной задачей и подробно обсуждается, например, в [5]. К счастью, условия на аноде лишь в малой степени влияют на выходные катодные токи и данная проблема носит скорее академический характер. В большинстве работ используется достаточно простое предположение о постоянстве анодной концентрации.

Известно достаточно большое количество работ, в которых решается численно или аналитически система уравнений (6) для самых разных геометрий. Полученные результаты имеют большое практическое значение для выбора оптимальной конфигурации преобразующего узла. В целом, обсуждение этого вопроса может занять достаточно много места и выходит за пределы данной статьи, имеющей целью дать общее представление о физике преобразования сигнала. Отметим только наиболее важный для дальнейшего обсуждения тот факт, что во всех изученных до сих пор геометриях коэффициент преобразования спадает с ростом частоты², начиная с некоторого критического значения D/d , где под d в общем случае надо понимать некоторый характерный размер конструкции преобразующего элемента. Отсюда, в частности, можно сделать универсальный вывод, что необходимым условием для достижения широкого частотного

диапазона является минимизация параметра d . Собственно говоря, именно создание преобразующих систем с крайне малыми характерными размерами и является решающим технологическим усовершенствованием, позволившим создать устройства с диапазоном измерений, удовлетворяющим требованиям современных сейсморазведочных технологий.

Современные молекулярно-электронные сейсмические датчики на принципах молекулярно-электронного переноса используют обратную связь, чтобы обеспечить широкий динамический диапазон, точность (повторяемость) выходных параметров, широкий частотный и температурный диапазоны измерений, временную стабильность параметров. Принцип работы сейсмодатчика с обратной связью состоит в том, что входной сигнал преобразующего элемента после электронной коррекции поступает в виде управляющего тока на вход катушки, фиксированной на корпусе преобразователя. Ток в катушке воздействует на магнит, закрепленный на мембране датчика. В результате, на жидкость в канале преобразователя действует сила, противодействующая

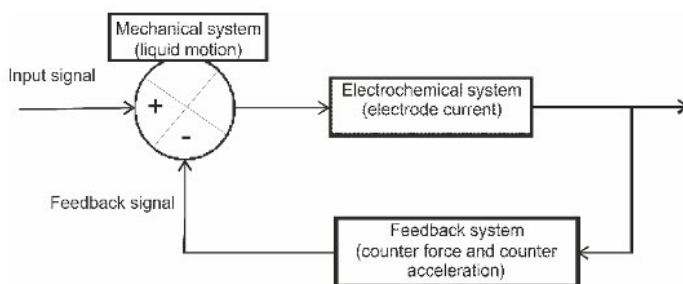
силам инерции. В зависимости от характера электронной коррекции можно сформировать выходной сигнал, пропорциональный либо скорости (велосиметр), либо ускорению (акселерометр).

Конструкции молекулярно-электронных преобразователей и методы, использованные при их создании.

Сейчас на рынке наиболее распространены датчики, созданные по микрокерамической технологии и производимые, в частности, в компании ООО «Р-сенсорс», г. Долгопрудный. Electroды в этом случае изготовлены из сетки с диаметром проволоки 30 - 100 мкм (Рисунок 3). Между электродами размещаются диэлектрические керамические разделители, в которых выполнены отверстия для протекания рабочей жидкости. Идеологически близкая технология, также с использованием сеточных электродов, описана в патенте [9] и реализована в компании eentec, США.

К принципиальным недостаткам технологии нужно отнести неизбежность ручных операций при сборке электродного узла, а также очень существенные ограничения на возможность миниатюризации преобразующего микроэлемента, связанные с технической невозможностью уменьшить характерные размеры преобразующей системы ниже уровня 30-40 мкм.

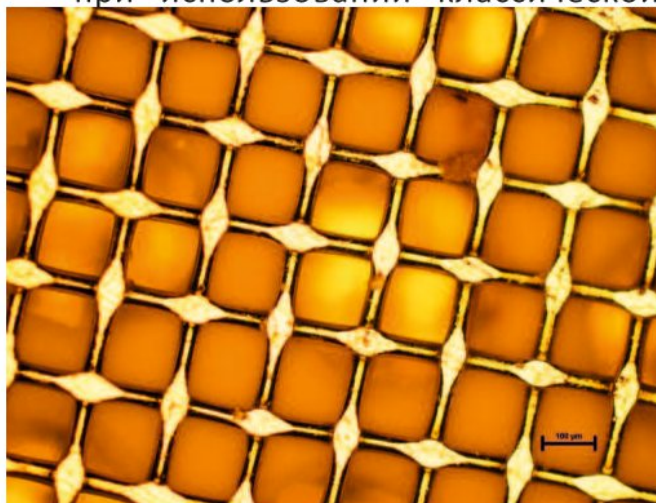
В настоящее время компанией Mettech (США) испытывается технология послойной печати преобразующего элемента керамической пастой (Рисунок 4), но, несмотря на ряд проведенных экспериментальных



▲ Рис. 2. Принципиальная блок-схема сейсмодатчика с отрицательной обратной связью.

работ, на текущий момент геофоны с преобразователями, выполненными по данной технологии, отсутствуют в продаже.

В перспективе основная проблема технологии послойной печати состоит в том, что она не позволяет достичь расстояния между электродами менее нескольких десятков микрометров и при этом из-за высокого удельного сопротивления используемых материалов дополнительное сопротивление электродов получается относительно высоким. Определенным преимуществом данной технологии можно считать теоретическую возможность достичь меньшего разброса параметров при серийном производстве, чем при использовании классической

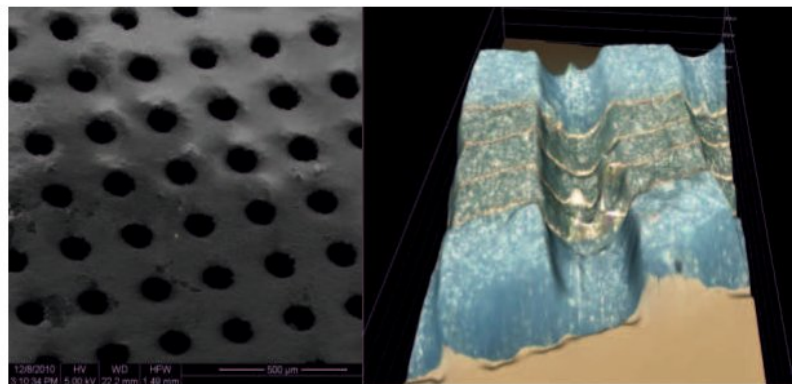


▲ Рис. 3. Снимок электродного пакета современного МЭП, созданный с помощью микроскопа Nikon Eclipse LV150. Слева – внешний вид преобразующего элемента. Справа – увеличенное изображение электрода, входящего в состав преобразующего элемента.

В настоящее время компанией Mettech (США) испытывается техноло-

гия послойной печати преобразующего элемента керамической пастой (Рисунок 4), но, несмотря на ряд проведенных экспериментальных работ, на текущий момент геофоны с преобразователями, выполненными по данной технологии, отсутствуют в продаже.

В перспективе основная проблема технологии послойной печати состоит в том, что она не позволяет достичь расстояния между электродами менее нескольких десятков микрометров и при этом из-за высокого удельного сопротивления используемых материалов дополнительное сопротивление электродов получается относительно высоким. Определенным преимуществом данной технологии можно считать теоретическую возможность достичь меньшего разброса параметров при серийном производстве, чем



▲ Рис. 4. Снимок внутреннего устройства электродного пакета преобразователя, выполненного по технологии послойной печати, построенный с помощью микроскопа Nikon Eclipse LV150, оснащенного BWH-501 3D surface profiler. Расстояние между тонкими проводящими слоями — 40 мкм. Слева – внешний вид преобразующего элемента. Справа – увеличенный разрез электродной структуры внутри канала

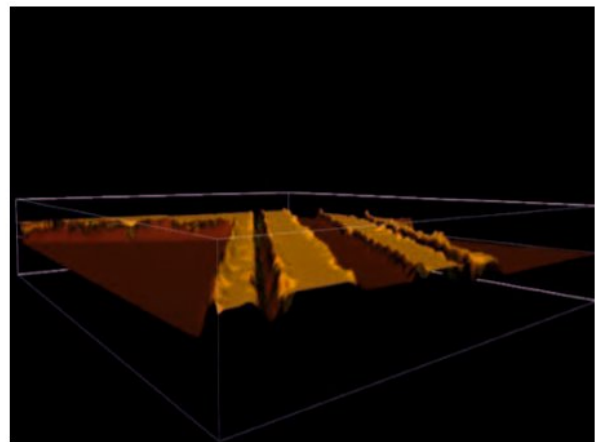
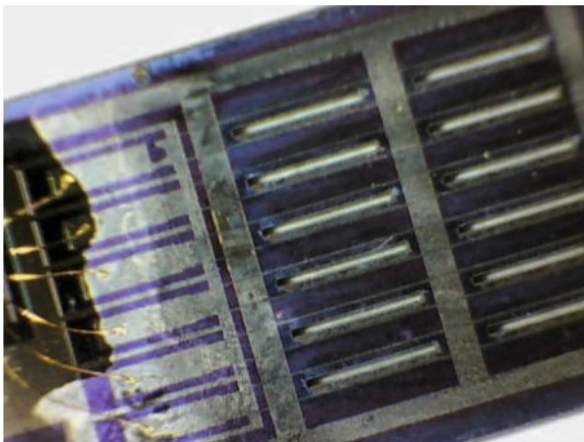
при использовании классической сеточной технологии.

Для перспектив широкого практического применения молекулярно-электронных сейсмических датчиков важнейшее значение имеет создание первых образцов устройств, основанных на принципиально новой технологии изготовления чувствительного элемента. [1, 2] С использованием набора микроэлектронных технологических операций были созданы планарные преобразующие структуры с рекордно малым расстоянием между

можно создание устройств по цене близких к стандартным геофонам, при сохранении значительных преимуществ в части технических характеристик.

Технические параметры современных молекулярно-электронных сейсмо датчиков.

На основе описанных физических принципов разработаны и выпускается целая серия технических устройств, различающихся по назначению и техническим параметрам. В ближайшем будущем ожидается появление



▲ Рис. 5. Трехмерный снимок преобразующей электродной структуры, построенный с помощью микроскопа Nikon Eclipse LV150, оснащенного BWH-501 3D surface profiler. Расстояние между электродами - 3 мкм, высота электродов над поверхностью пластины – 300 нм. (масштаб по вертикали и горизонтали различный). Слева – общий вид. Справа – микроструктура проводящих дорожек, служащих электродами преобразующего элемента.

электродами преобразующей микросистемы (Рис. 5).

В свою очередь, это привело к существенному расширению частотного диапазона измерений, улучшению линейности отклика. Одновременно, использование планарных технологий создает основу для качественного снижения себестоимости сейсмодатчиков, созданных на базе новых технологий. Уже в ближайшее время воз-

можно создание устройств по цене близких к стандартным геофонам, при сохранении значительных преимуществ в части технических характеристик.

коммерчески доступных приборов, в которых преобразующие микроструктуры выполнены с применением микроэлектронных технологий. В настоящее время наиболее близко по своим техническим и экономическим параметрам к возможности применения на рынке сейсморазведочной аппаратуры подошли сейсмические датчики велосиметры МТСС-1001 (МТСС-2003 – трехкомпонентная

модификация), разработки ООО «Р-сенсорс», г. Долгопрудный, , сейсмоакселерометры того же производителя МТСС-1041А (МТСС-1043А – трехкомпонентная версия), а также сейсмотатчик МТЛА-1040, разработанный в компании Mettech, США. Технические параметры указанных устройств в сравнении с геофонами известных производителей приведены в табл. 1.

В таблице 2 приводится сравнение с сейсмическими акселерометрами, изготовленными по технологии МЭМС.

ных искажений менее 0.05% достаточно сложно обнаружить даже в лабораторных условиях, не говоря уже о полевых. Едва ли указанное преимущество имеет практическое значение. В то же время молекулярно-электронные акселерометры заметно дешевле, а при переходе на микроэлектронные технологии изготовления эта разница составит более, чем десять раз.

Из данных, приведенных в таблице 1, видно, что молекулярно-электронные датчики обеспечивают более

▼ Табл. 1. Молекулярно-электронные датчики в сравнении с геофонами.

Параметр	GS -11D	MTSS1001	MTLA -1040
Количество осей	1	1	1
Нижняя граничная частота	4.5 Гц, 8 Гц, 10 Гц, 14 Гц±0.75 Гц	1 Гц±0.05 Гц	3-410 Гц
Коэффициент преобразования	32 В/м/с±10%	250 В/м/с±2%	40 В/м/с
Коэффициент нелинейных искажений измеряется при сигнале 18 мм/сек, на 12 Гц	<0.2% - для версий 8 Гц, 10 Гц, 14 Гц Не указан - для версии 4.5 Гц	<0.1 %	<0.1 %
Размер ЧЭ			
Высота	34 мм	35 мм	36 мм
Диаметр	32 мм	32 мм	34 мм
Требования к установке	Угол наклона < 30°	Работоспособен в любой ориентации	Работоспособен в любой ориентации

В целом, здесь наблюдается близость параметров. МЭМС акселерометры имеют более широкую полосу регистрации сигналов, в основном вне полезной области, и лучшую линейность. По последнему параметру стоит заметить, что в настоящее время наиболее распространены геофоны с линейностью 0.2%, а уровни нелиней-

широкую частоту регистрации, лучшую линейность и точность воспроизведения характеристик при габаритах, характерных для 10-герцовых геофонов. По сравнению с 1-герцовыми геофонами молекулярно-электронные датчики значительно меньше, обеспечивая более широкую полосу регистрации, теперь уже в области

высоких частот. Молекулярно-электронные датчики имеют, как правило, более высокий коэффициент преобразования. В то же время, надо понимать, что больший коэффициент преобразования не обязательно автоматически означает возможность регистрировать более слабые сигналы. Дело в том, что геофон, будучи, по сути, пассивным прибором имеет крайне низкие собственные шумы. Реально, если рассматривать канал регистрации сейсмодатчик – цифровая система, именно шумы цифровой электроники являются фактором, определяющим реальную разрешающую способность канала. К примеру,

типичное значение собственного шума (шум Найквиста омического сопротивления плюс броуновское движение инерциальной массы) соответствуют выходным сигналам около 0.05 мкВ при собственных шумах 24-разрядного АЦП ~ 1 мкВ. В пересчете на входной сигнал одиночного 10-тигерцового геофона с коэффициентом преобразования 20 В/м/с это соответствует 50 нм/сек входного сигнала. Для той же самой полосы, учитывая, что спектральная плотность шума в единицах измеряемого ускорения мало зависит от частоты и составляет примерно 0.7 мкм/с²/Гц, одиночный молекулярно-электрон-

▼ Табл. 2. Молекулярно-электронные датчики в сравнении с сейсмическими МЭМС акселерометрами.

Технический параметр	Сейсмоакселерометр, используемый в VectorSeis, IONgeo	Сейсмоакселерометр, используемый в DSU - 3, Sercel	Молекулярно-электронный акселерометр MTSS 1043A
Диапазон измеряемых сигналов	$\pm 3.3 \text{ м/с}^2$	$\pm 5 \text{ м/с}^2$ 0°	$\pm 8 \text{ м/с}^2$
Шум	$0.5 \text{ мкм/с}^2 / \sqrt{\text{Гц}}$	$0.4 \text{ мкм/с}^2 / \sqrt{\text{Гц}}$	$0.7 \text{ мкм/с}^2 / \sqrt{\text{Гц}}$
Частотный диапазон	0 - 1450 Гц,	0 - 800 Гц,	0.1 – 120 Гц
Динамический диапазон, в полосе до 100 Гц	$\sim 117 \text{ dB}$	$\sim 122 \text{ dB}$	122 dB
Температурный диапазон	-40 +70 °C	-40 +70 °C	-40 +70 °C
Нелинейные искажения при 12 Гц и размахе входного сигнала 18 мм/сек.	$\pm 0.002\%$	$\pm 0.003\%$	$\pm 0.05\%$,
Потребление	Не указано	300 мВт	320 мВт
Цена	\$1800	\$1800	\$1000

ный датчик будет иметь шум [10] около 20 нм/сек. С другой стороны, группа из 12 геофонов будет иметь уже более высокий общий коэффициент преобразования и соответственно – более низкий уровень приведенных ко входу шумов.

В целом, можно заключить, что имеющиеся в настоящее время на рынке молекулярно-электронные сейсмодатчики могут иметь существенное преимущество по сравнению с геофонами, если требуется регистрация более низких частот или предполагается применение одиночного датчика.

Использование группы геофонов позволяет обеспечить регистрацию более слабых сигналов.

Важная особенность молекулярно-электронных датчиков состоит в том, что их работоспособность не зависит от ориентации. В случае трехкомпонентной регистрации это дает существенное преимущество, поскольку позволяет корректировать отклонения оси чувствительности от вертикали. Также отсутствие требований к ориентации осей значительно упрощает использование датчиков под водой, например, в донных станциях или при регистрации трехкомпонентного акустического сигнала.

Что касается ценовых показателей, то в настоящее время их цена заметно выше, чем у геофонов, но может практически сравняться с ними при переходе на микроэлектронные технологии, представленные выше.

По сравнению с МЭМС акселерометрами преимущество молекулярно-электронных датчиков в их более

низкой цене, которое может оказаться намного более существенным при переходе к массовым микроэлектронным технологиям.

Заключение

Таким образом, результатом исследований и разработок, выполненных, начиная с 2000 года, явилось создание нового типа сейсмического оборудования – первичных датчиков, основанных на молекулярно-электронном переносе в твердотельных и жидкостных микроструктурах. В настоящее время организован серийный выпуск таких изделий, одновременно развиваются микроэлектронные методы создания соответствующих преобразующих элементов, что позволит им успешно конкурировать с имеющимися на рынке геофонами и МЭМС акселерометрами не только по техническим, но и экономическим характеристикам. Появление на рынке такого продукта запланировано на ближайшие 2-3 года.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты 2-07-12057офи-м, 12-07-33101мол_а_вед, 1-07-00663а и в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы» г/к. № 11.519.11.5003 от 30.08.2011 г.

Литература

1. Криштон В. Г., Агафонов В. М., Бугаев А.С. Технологические основы преобразователей параметров движения на принципах переноса массы и заряда в электрохимических микросистемах. Электрохимия, 2012,

том 48, № 7.

2. Агафонов В. М., Криштоп В. Г., Сафонов М. В. Измерительные устройства на основе молекулярно-электронного переноса в микро- и наноструктурах. Нано- и микро-системная техника, Т.5, №6, 2010.

3. H. Huang, B. Carande, R. Tang, J. Oiler, D. Zaitsev, V. M. Agafonov and H. Yu "Development of a micro seismometer based on molecular electronic transducer technology for planetary exploration", In Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2013), January 20-24, Taipei, Taiwan. IEEE, 2013.

4. Лидоренко Н.С., Ильин Б.И., Зайденман И.А. и др.; Под ред. Лидоренко Н.С. Введение в молекулярную электронику. М.: Энергоатомиздат, 1984. -320 с.

5. Z. Sun, E. Egorov, V. Agafonov The Influence Of The Boundary Condition On Anodes For Solution Of Convection- Diffusion Equation With The Application To A Four-Electrode Electrochemical Cell. Journal of Electroanalytical Chemistry. 661 (2011), 157-161.

6. Larcam C.W. Theoretical Analysis of the Solion Polarized Cathode Acoustic Linear Transducer // The Journal of the Acoustical Society of America, 1965, vol. 37, № 4, pp. 644-678.

7. Козлов В.А., Терентьев Д.А. Передаточная функция диффузионного преобразователя при частотах выше гидродинамической. Электрохимия, 2003, том 39, № 4, С. 443-449.

8. Агафонов В.М., Криштоп В.Г. Частотная характеристика диффузионного датчика механических сигналов на высоких частотах. Электрохимия, 2004, том 40, № 5, С. 606-611.

9. Abramovich I.A., Kharlamov A.V. Electrochemical transducer and a method for fabricating the same. US Patent 6,576,103 B2 2003.

10. Егоров И. В., Агафонов В. М., Шабалина А. С. Принципы работы и технические характеристики малогабаритного молекулярно-электронного сейсмодатчика с отрицательной обратной связью. Сейсмические приборы. 2013. Т. 49, № 1, С.5-18.

Подробнее об авторах

Агафонов В. М.



МФТИ, г. Долгопрудный,
ООО "Р-сенсорс",
г.Долгопрудный,

Криштоп В. Г.



МФТИ, г. Долгопрудный,
Институт проблем техно-
логии микроэлектроники
и особочистых материалов
РАН, Московская обл,
Ногинский р-н,
Черноголовка

Егоров И. В.



ООО "Р-сенсорс",
г.Долгопрудный,