



УДК 681.586.6

*Ю.Д. Акульшин, А.В. Глуховской, А.Н. Казакин,
И.М. Комаревцев, М.С. Лурье, Е.Н. Пятышев*

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ МЭМС-ДАТЧИКИ

Представлены результаты работ лаборатории нано- и микросистемной техники СПбГПУ по созданию и исследованию тепловых МЭМС-датчиков различного функционального назначения. Датчики реализованы на основе разработанного базового МЭМС-преобразователя и технологии его изготовления.

ТЕХНОЛОГИИ; ДАТЧИКИ; МЭМС.

*Yu.D. Akulshin, A.V. Gluhovskoi, A.N. Kazakin,
I.M. Komarevtcev, M.S. Lurie, E.N. Piatyshev*

MULTIFUNCTIONAL THERMAL SENSORS

The give paper presents the results of NMST Lab in designing and researching thermal MEMS sensors for different purposes. The sensors are based on the MEMS-core converter and micromachining technologies.

TECHNOLOGY; SENSORS; MEMS.

Развитие микросистемной техники (МСТ) в решающей мере зависит от наличия и качества различных видов преобразователей неэлектрических величин в электрические сигналы. Помимо необходимых метрологических и эксплуатационных характеристик эти преобразователи должны отличаться возможностью использования в различных отраслях промышленности, технологической доступностью для серийного производства и невысокой себестоимостью. Обеспечению этих требований способствует объединение всего множества преобразователей в типовые группы, отличающиеся одинаковым принципом преобразования и разработкой соответствующих базовых технологий, которые позволяют изготавливать различные преобразователи данной группы с небольшими, принципиальными изменениями технологических процессов [1–5].

Среди основных типов микросистемных преобразователей, сгруппированных по принципу общности механизмов преобразования неэлектрических величин в электрические сигналы, одно из направлений занимают тепловые преобразователи, которые могут быть отнесены также к категории наиболее сложных изделий [6, 7].

Следует отметить, что для всех типов преобразователей переход от макро- к микроконструкциям и использованию микро-технологий приводит не только к уменьшению размеров, массы и стоимости, но и к увеличению надежности и воспроизводимости параметров изделия.

Для тепловых преобразователей переход к микроразмерам помимо указанного дает еще следующие дополнительные преимущества:

при малых габаритах и незначительной массе преобразователя процессы теплопередачи стабилизируются за малые отрезки времени, т. е. снижается инерционность и повышается частотный предел работы изделия;

вследствие малых размеров значительно уменьшается рассеяние тепловой энергии за счет конвективного и радиационного теплообмена с окружающей средой;

изготовление токовых и крепежных элементов в виде пленочных слоев с малыми поперечными сечениями позволяет уменьшить рассеяние тепла за счет теплопроводности. Это резко уменьшает необходимую мощность нагрева [6].

Перечисленные особенности процессов

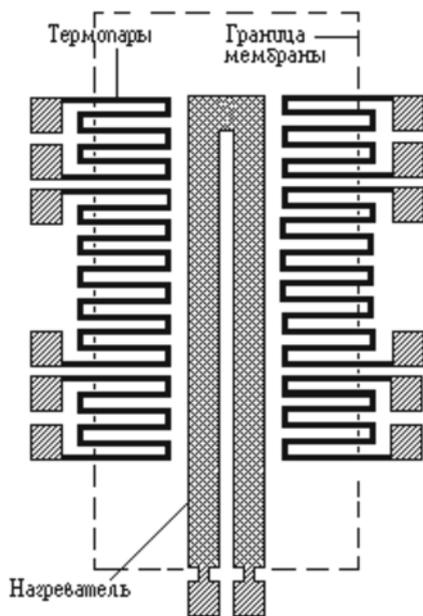


Рис. 1. Расположение элементов конструкции теплового МЭМС-преобразователя [6]

в тепловых МЭМС-преобразователях позволяют не только улучшить характеристики изделий, но и обеспечить ряд применений, недоступных макропреобразователям того же назначения.

Тепловые преобразователи являются по своей природе многофункциональными, т. е. позволяют использовать одинаковые конструкции чипа для измерения многих различных параметров путем изменения конструкции интерфейса. Отметим также, что для некоторых МЭМС-преобразователей макроскопические аналоги вообще отсутствуют (тепловые акселерометры и инклинометры).

Конструкция тепловых МЭМС-преобразователей содержит следующие функциональные элементы (рис. 1): основание (кремниевый чип); «терморазвязка» (мембрана); теплогенерирующие элементы (нагреватель); термочувствительные элементы (термопары, терморезисторы); теплоотводящие элементы (заполняющий корпус газ); элементы, обеспечивающие передачу электрических сигналов (токоразводка); специальные элементы функционального корпусирования, обеспечивающие

чувствительность к различным измеряемым величинам.

Задача, поставленная перед лабораторией нано- и микросистемной техники СПбГПУ, состояла в разработке и исследовании базовой конструкции теплового МЭМС-преобразователя, разработке технологии изготовления базового чипа, максимально приближенной к возможностям стандартного микроэлектронного производства, разработке и исследованию тепловых МЭМС-датчиков различного функционального назначения.

Для базового чипа была принята конфигурация, принципиально сходная с конфигурацией, приведенной на рис. 1. Построена математическая модель теплопереноса между отдельными элементами конструкции МЭМС-преобразователя. С учетом результатов моделирования определены геометрические параметры элементов базовой конструкции чипа.

Внешний вид разработанного МЭМС-преобразователя представлен на фотографиях рис. 2.

Кремниевый чип размером в плане $3 \times 2,5$ мм содержит перечисленные выше структурные элементы. Одним из важнейших элементов конструкции является мембрана, малая теплопередача и минимальная температурная деформация которой являются непременным условием прецизионных измерений. Наилучшим вариантом изготовления мембраны, как выяснено в [12], является поочередное осаждение слоев оксида и нитрида кремния. Варьируя количество и толщину слоев, можно максимально приблизить коэффициент теплового расширения (ТКР) мембраны к ТКР кремния ($\text{ТКР Si}_3\text{N}_4 < \text{Si} < \text{SiO}_2$) и минимизировать температурные деформации. Многочисленными экспериментами установлено, что наилучшими характеристиками обладают пятислойные мембраны со строго определенными толщинами слоев.

Стабильность характеристик преобразования серьезно зависит также от температурной стабильности нагревательного элемента конструкции. Найдено, что оптимальными материалами нагревательного элемента яв-

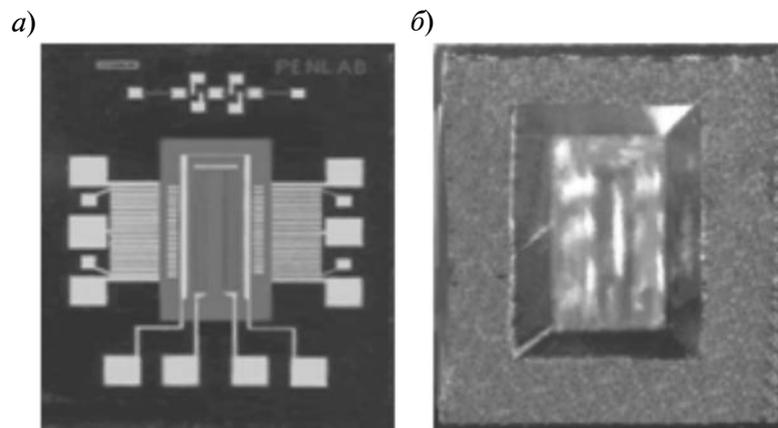


Рис. 2. Базовый тепловой МЭМС-преобразователь:
 а – планарная сторона чипа; б – задняя сторона

ляются сплавы NiCrSi и NiCrAlCu с ТКС $\sim 10^{-5} - 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$. Удовлетворительный результат дают также пленки сплава монель (CuNiSi), отожженные при $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

С целью максимального увеличения чувствительности преобразования, в конструкции применены батареи включенных последовательно пленочных термопар, выполненных из чередующихся полосок полукремния *p*- и *n*-типа, причем «горячие» концы термопар находятся на мембране, а «холодные» – над массивом кремниевой основы чипа. Формирование термопар производилось имплантацией бора и фосфора с последующей термообработкой для активации и разгонки примеси.

Разработанные термобатареи позволили получить полезный сигнал в измерительной цепи порядка десятков милливольт при мощности нагрева порядка единиц милливольт.

Для изготовления тепловых преобразователей разработан технологический маршрут, операции которого не выходят за рамки возможностей стандартного полупроводникового производства.

На основе разработанного чипа теплового преобразователя созданы и исследованы МЭМС-датчики различного функционального назначения, особенности и технические характеристики которых приведены ниже.

Преобразователь мощности переменного тока используется для измерения

действующих значений переменного напряжения, тока и мощности в широком частотном диапазоне и может обеспечивать измерение электрических сигналов произвольной формы путем сравнения исследуемого сигнала и сигнала от прецизионного источника постоянного тока. Разработка МЭМС-преобразователей ведется рядом зарубежных и отечественных метрологических организаций [8–13].

Связь между напряжением U , подводимым к нагревателю, и эдс, генерируемой на термочувствительном элементе, определяется в общем виде выражением:

$$U_0 = K_{\text{np}} \frac{U_{\text{in}}^2}{R},$$

где U_0 – выходное напряжение термоэдс; U_{in} – входное напряжение; R – сопротивление нагревателя; K_{np} – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров изделия и факторов внешнего воздействия.

Из этого выражения следует одна из особенностей теплового преобразователя – независимость эдс на его выходе от направления тока через входную цепь, – позволяющая использовать преобразователь не только для измерения электрических параметров переменного тока, но и для преобразования ряда неэлектрических величин. Датчик представляет собой базовый преобразователь, который для исключения влияния внешних тепловых воздействий помещен в вакууммированный корпус. На-

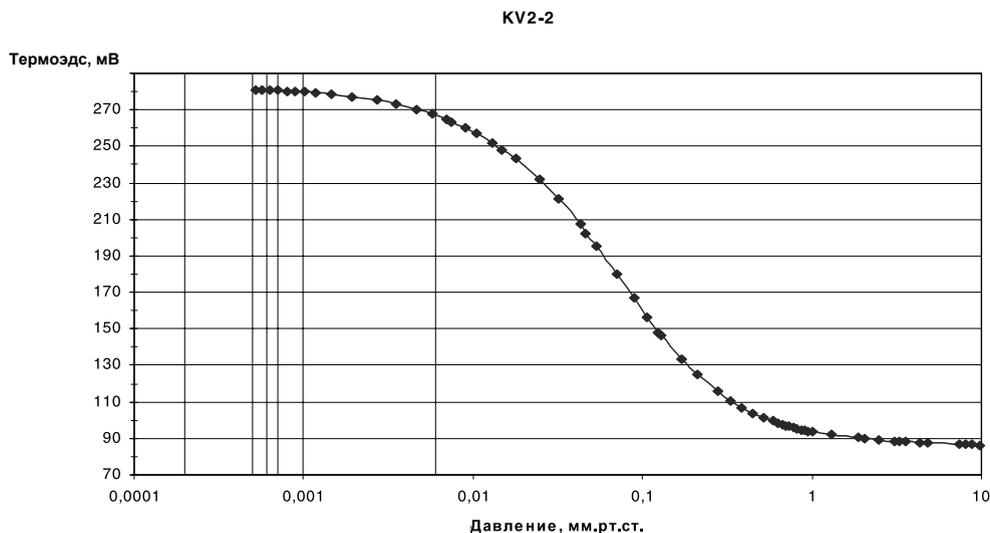


Рис. 3. Градуировочная характеристика теплового микровакуумметра

греватель преобразователя присоединяется к исследуемому источнику переменного сигнала, и фиксируются показания в измерительной цепи термопар. Затем к нагревателю присоединяется источник постоянного тока и проводится его регулирование до получения в цепи термопар такого же напряжения.

По данным испытаний, проведенных во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии имени Д.И. Менделеева, погрешность измерения в созданном приборе составила не более $10^{-5}\%$, что отвечает требованиям, предъявляемым к вторичным эталонам [8].

Возможная область применения — метрологические лаборатории предприятий, использующих электротехническую и радиотехническую аппаратуру [13].

Базовый чип теплового МЭМС-преобразователя был испытан в качестве термопарного датчика форвакуума. Чип поместили в открытый корпус, который в свою очередь размещался во внешнем герметичном корпусе со штуцером, стандартным для откачных средств вакуумной техники.

В основе теплового метода измерения давления лежит эффект зависимости теплопроводности газа от его концентрации [14]. Градуировочная характеристика вакуумметра приведена на рис. 3.

Благодаря высокой чувствительности и

малым размерам чипа, такой преобразователь может использоваться не только в стандартном вакуумном оборудовании, но и в широком круге специальных устройств, включая мониторинг герметизированных объектов микросистемной техники, например, герметизированных электронных модулей, капсул вибрационных гироскопов и др. [15–24]

Области применения микровакуумметра — отрасли промышленности, использующие откачную вакуумную технику, аэрокосмическая техника, а также мониторинг вакуумированных объемов в различных отраслях техники.

Тепловые методы измерения широко используются для измерения скоростей газовых потоков [25–34]. Скорость потока газа в термоанемометре определяется по изменению теплообмена между газом и термочувствительным элементом анемометра.

Известные многочисленные варианты конструкции анемометров не решают вопроса измерения очень малых (от 0,1 м/с) скоростей потока газа. Между тем, этот диапазон скоростей необходим во многих практических применениях анемометрии [27, 28, 34].

Для измерения скоростей потока газа в диапазоне 0–20 см/с выполнена разработка теплового микроанемометра на основе базовой конструкции теплового преоб-



разователя. Для различных применений анемометры имеют различный интерфейс (специализированное корпусирование). Корпус микроанемометра реализован как проточная конструкция и отличается тем, что снабжен ограничителем сечения потока газа, а чип ориентирован в корпусе таким образом, чтобы газ протекал в направлении от одного «холодного» конца термопар к другому (рис. 4 а). Разность термоэдс выходных и входных термопар является функцией скорости потока. Один из конструктивных вариантов анемометра представлен на рис. 4 б (диаметр штуцеров 4 мм). Эта конструкция может использоваться во всех случаях, когда необходимо измерить малую скорость или малый расход направленного потока газа или неагрессивной жидкости внутри какой-либо магистрали.

В расходомере расход газа определяется интегрированием скорости потока по времени с учетом объема датчика. На основе микроанемометров изготовлены и исследованы экспериментальные образцы микрорасходомеров с диапазоном измерения (0–100) мл/мин и (0–250) мл/мин, с погрешностью измерения менее 5 %.

На разработанное устройство микроанемометра получен патент на полезную модель [30].

Области применения инклинометров и расходомеров:

Электронная промышленность, фармацевтика, косметическая промышленность, биология и медицина, метеорология, аэродинамика, космонавтика, авиация (особенно для малогабаритных летательных аппаратов специального назначения) и др. [31–34]

Задача измерения угла отклонения от вертикали сводится к измерению отклонения от направления гравитационной силы. Для создания инклинометров используются различные принципы преобразования от реостатных датчиков маятникового типа до микродатчиков с электростатическим приводом.

Преимущество тепловых инклинометров перед ними состоит в том, что тепловой датчик не имеет подвижных элементов [35–37]. При наклоне датчика смещение конвективных потоков нагретого воздуха в герметичной полости внутри корпуса создает градиент температуры на поверхности чипа. Изменение температуры между термоприемниками создает дифференциальный сигнал. Датчики такого типа серийно производятся в Германии (Vogt electronic AG) и США (фирма Memsic Inc.). Исследования специалистов этих фирм показали, что чувствительность преобразования существенно зависит от объема воздушной полости корпуса [36, 37].

На базовом чипе термических преобразователей был создан и исследован макетный образец одноосного инклинометра. Полученные результаты показали возможность измерения углов наклона с разрешающей способностью не более одного углового градуса. Сигнал, снятый непосредственно с преобразователя, составлял единицы милливольт (рис. 5).

Области применения инклинометров: автомобильные противоугонные системы, системы навигации, системы стабилизации крена судов, системы стабилизации в некоторых видах продукции военного назначения, робототехника, горнодобывающая

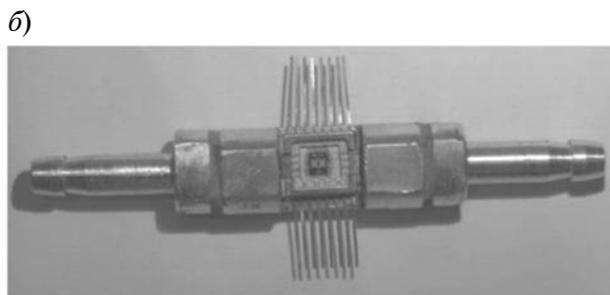


Рис. 4. Структура анемометра – а; штуцерный анемометр – б

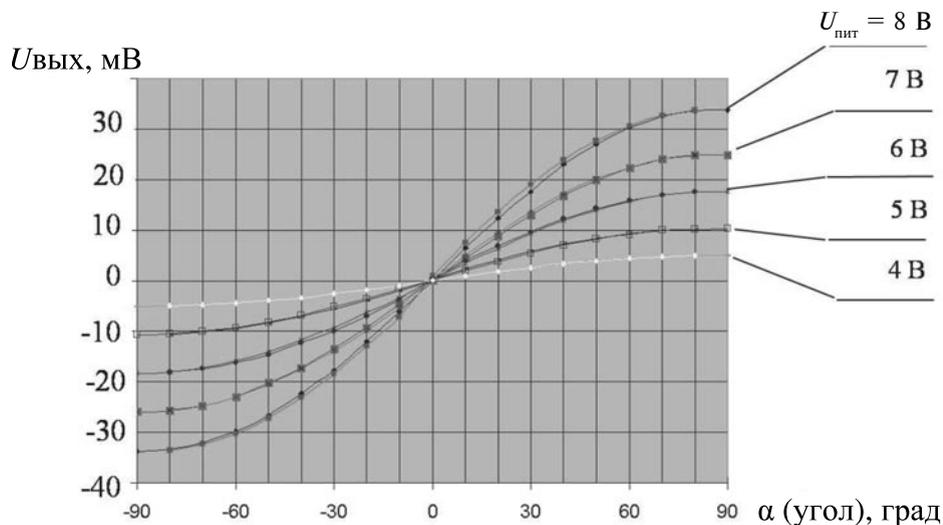


Рис. 5. Выходной сигнал в измерительной цепи инклинометра

промышленность, строительство, мониторинг высотных сооружений, проведение монтажных работ и др. [35–37]

Акселерометры – датчики линейного ускорения – основаны на измерении смещения инерциальной массы, которое регистрируется резисторным или емкостным способом. Оба способа имеют серьезные недостатки:

резисторные акселерометры имеют высокую температурную зависимость; на них оказывают большое влияние механические напряжения, возникающие при монтаже;

емкостные акселерометры из-за малой измеряемой величины требуют сложных измерительных устройств, подвержены электромагнитным помехам и влиянию паразитных емкостей, которые могут превышать измеряемую емкость. Тепловые акселерометры лишены этих недостатков [35–37].

Нами были проведены исследования базового чипа в качестве теплового акселерометра, с соответствующими изменениями интерфейса. Исследования проводились путем записи сигнала датчика, расположенного на консольной балке, которая отклонялась в пределах упругой деформации и после освобождения начинала колебаться. Переменный сигнал от колеблющегося вместе с балкой акселерометра записывал-

ся и анализировался на предмет сохранения монотонности затухания сигнала и отсутствия паразитных выбросов. Каких-либо выбросов на монотонном сигнале затухающих колебаний обнаружено не было.

Для статической калибровки акселерометра использовались измерения при трех стационарных ориентациях датчика в поле земного тяготения (вертикальном и двух горизонтальных). При этом фиксировался сигнал опорных значений 0, -1 g , $+1 \text{ g}$. Чувствительность макетного образца составила порядка 100 мВ на 1 g.

Чувствительность акселерометра, естественно, может быть произвольно изменена путем изменения условий теплоотвода.

Результаты исследования макета показали, что такие акселерометры могут составить конкуренцию существующим резисторным и емкостным акселерометрам в целом ряде практических применений, включая МЭМС-системы в автомобильной промышленности, других средствах передвижения, робототехнике, военной промышленности и т. д. [35–37]

В заключение следует отметить, что разработанные макетные образцы тепловых МЭМС-датчиков различного функционального назначения не уступают по основным параметрам зарубежным анало-



гам, а в некоторых случаях их превосходят (квадратор, анемометр). Параметры датчиков для каждого конкретного применения

изделий могут быть оптимизированы путем непринципиальных изменений отдельных элементов базового преобразователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернер В.Д., Иванов А.А., Коломенская Н.Г., Лучинин В.В., Мальцев П.П., Попова И.В. Изделия микросистемной техники – основные понятия и термины // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 12. С. 2–5.
2. Вернер В.Д., Иванов А.А., Коломенская Н.Г., Лучинин В.В., Мальцев П.П., Попова И.В. Изделия микросистемной техники – термины и определения, классификация и обозначения типов // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 1. С. 2–5.
3. Мальцев П.П. О классификации в области микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 1. С. 9–10.
4. Лучинин В.В. Микросистемная техника. Направления и тенденции развития // Научное приборостроение. 1999. Т. 9. № 1. С. 3–18.
5. Пятыхев Е.Н., Лурье М.С., Акульшин Ю.Д., Скалон А.И. Микротехнологии: от микроэлектроники к микросистемной технике // Датчики и системы. 2001. № 6. С. 58–65.
6. Козлов А.Г. Тепловые микросенсоры: классификация, основные типы // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 4.
7. Anatyshuk L.I., Luste O.J. Thermoelectrics Handbook. Macro to Nano. CRC Press LLC, 2006. P. 356.
8. Акнаев Р.Ф., Галахова О.П., Рождественская Т.Б. Методы и средства обеспечения единства измерений напряжения переменного тока // Измер. техника. 1976. № 4. С. 66–71.
9. Laiz H., Klonz M., Kessler E., Spiegel T. New thin-film multijunction thermal converters with negligible low frequency AC-DC transfer differences // IEEE Trans. Instr. Meas. 2001. Vol. 50. No. 2. Pp. 11–23.
10. Laiz H.M. Low frequency behavior of thin-film multijunction thermal converter // Dissertation TU Braunschweig. 1999. 128 p. [электронный ресурс] / URL: <http://hdl.handle.net/10068/150785>
11. Kim J.S., Lee H.C., Lee J.H., Lee J.H., Park S.I., Kwon S.W. A planar Bi-Sb multijunction thermal converter with small AC-DC transfer differences // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. 2002. Vol. 51. No. 1. Pp. 17–23.
12. Одинцов А.В. Тепловой преобразователь переменного тока, изготовленный методами микротехнологий // V СПб ассамблея молодых ученых и специалистов. Тезисы докладов. 2000.
13. Пятыхев Е.Н., Одинцов А.В. Микромеханический тепловой преобразователь напряжения переменного тока // Датчики и системы: сб. докл. междунар. конф. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. Т. 2.
14. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2007. 392 с.
15. Wüest M. The changing art of measuring vacuum pressure // Solid State Technology. June, 2004.
16. Кузьмин В.В. Состояние и тенденции развития современного вакуумметрического приборостроения // Вакуумная техника и технология. 2001. Т. 11. № 1. С. 3–16. № 2. С. 43–50.
17. Wang S.N., Mizuno K., Fujiyoshi M., Funabachi H., Sakata J. Thermal micropressure sensor for pressure monitoring in a minute package // American Vacuum Society. 2001. A 19 (1).
18. Chou B.C.S., Chen C.-N., Shie J.-S. Micromachining on (111)-Oriented Silicon // Sensors and Actuators. 1999. Vol. 75. Pp. 271–277.
19. Doms M., Bekesch A., Mueller J. A Microfabricated Pirani Pressure Sensor Operating Near Atmospheric Pressure // J. of Micromechanics and Microengineering. 2005. Vol. 15. Pp. 1504–1510.
20. Zhang T.F., Tang Z., Yu J., Jin R.C. A Micro-Pirani Vacuum Gauge Based on Micro-Hotplate Technology // Sensors and Actuators A. 2006. Vol. 126. Pp. 300–305.
21. Baliga J. Integrated Pressure Monitor Technology for RF MEMS // Semiconductor International. 2006. No. 2/1.
22. Dozoretz P., Stone C., Wenzel O. Shrinking the Pirani Vacuum Gauge // Sensors. 2005. No. 1.
23. Одинцов А.В., Пятыхев Е.Н. Микромеханический термоэлектрический датчик вакуума на основе AC-DC преобразователя // Вакуумная техника и технология. Тезисы докл. науч.-техн. семинара. СПб.: Унивак, 2003.
24. Пятыхев Е.Н., Казакин А.Н., Пакконен А.В., Одинцов А.В. Микросистемная техника в вакуумной технологии // Контроль герметичности. Тезисы докл. науч.-техн. семинара. 2001.
25. Tropea C., Yarin A., Foss J. Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. Berlin. Springer, 2007. Pp. 179–182.
26. Beeby S. MEMS mechanical sensors. Boston, London, Artech House, INC., 2004.
27. Янкевич Ю.И., Веркин Ю.И. Состояние и перспективы развития летательных микроаппаратов // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 37–39.

28. Алексеев Н.В., Кравцов В.Г., Назаров О.И., Панкратов А.К., Вожаев Е.С., Вялков А.В., Головкин М.А., Ефремов А.А. Системы измерения воздушных параметров полета нового поколения // *Авиакосмическое приборостроение*. 2003. № 8. С. 31–36.

29. [электронный ресурс] / URL: <http://www.bosch.com>.

30. Пятыхшев Е.Н., Козлов В.П., Акульшин Ю.Д., Одинцов А.В., Зубарев А.Н. Устройство для измерения вектора скорости воздушного потока // Патент РФ на полезную модель №55146. 15.02.2006.

31. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества вещества: справочник. СПб.: Политехника, 2002. Кн. 1. 409 с.

32. Kersjes R., Liebscher F., Spiegel E., Manoli Y., Mokwa W. An invasive catheter flow sensor with on-chip CMOS readout electronics for the on-line determination of blood flow // *Sensors and Actuators A*. 1999. Vol. 58. Pp. 563–567.

33. Ashauer M., Glosch H., Hendrich P., Hey N., Sandmaier H., Lang W. Thermal flow sensor for liquids and gases based on combinations of two principles // *Sensors and Actuators*. 1999. A 73. Pp. 7–13.

34. Котов В.Н., Черепяхин И.И. Интегральный кремниевый микротермоанемометр для измерения расхода жидких и газообразных сред // *Микросистемная техника*. 2003. № 8.

35. Leung A.M., Zhao Y., Cunnee T.M. Moving with Heat // *European Semiconductor*. 2001. Pp. 63–67.

36. Milanovi M., Bowen E., Zaghloul M.E., Tea N.H., Suehle J.S., Payne B., Gaitan M. Micromachined convective accelerometers in standard integrated circuits technology // *Applied Physics Letters*. 2000. Vol. 76(4). Pp. 510–580.

37. [электронный ресурс] / URL: <http://www.memsic.com> (дата обращения 08.08.2014).

38. [электронный ресурс] / URL: <http://www.mems.ru> (дата обращения 08.08.2014).

REFERENCES

1. Verner V.D., Ivanov A.A., Kolomenskaya N.G., Luchinin V.V., Maltsev P.P., Popova I.V. Izdeliya mikrosistemnoy tekhniki – osnovnyye ponyatiya i terminy, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2007, No. 12, Pp. 2–5. (rus)

2. Verner V.D., Ivanov A.A., Kolomenskaya N.G., Luchinin V.V., Maltsev P.P., Popova I.V. Izdeliya mikrosistemnoy tekhniki – terminy i opredeleniya, klassifikatsiya i oboznacheniya tipov, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2008, No. 1, Pp. 2–5. (rus)

3. Maltsev P.P. O klassifikatsii v oblasti mikrosistemnoy tekhniki, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2005, No. 1, Pp. 9–10. (rus)

4. Luchinin V.V. Mikrosistemnaya tekhnika. Napravleniya i tendentsii razvitiya, *Nauchnoye priborostroyeniye*, 1999, Vol. 9, No. 1, Pp. 3–18. (rus)

5. Pyatyshev Ye.N., Lurye M.S., Akulshin Yu.D., Skalon A.I. Mikrotekhnologii: ot mikroelektroniki k mikrosistemnoy tekhnike, *Datchiki i sistemy*, 2001, No. 6, Pp. 58–65. (rus)

6. Kozlov A.G. Teplovyye mikrosensory: klassifikatsiya, osnovnyye tipy, *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2006, No. 4. (rus)

7. Anatyshuk L.I., Luste O.J. *Thermoelectrics Handbook. Macro to Nano*, CRC Press LLC, 2006, P. 356.

8. Aknayev R.F., Galakhova O.P., Rozhdestvenskaya T.B. Metody i sredstva obespecheniya yedinstva izmereniy napryazheniya peremennogo toka, *Izmeritel'naya tekhnika*. 1976, No. 4, Pp. 66–71. (rus)

9. Laiz H., Klonz M., Kessler E., Spiegel T. New thin-film multijunction thermal converters with negligible low frequency AC-DC transfer differences, *IEEE Trans. Instr. Meas*, 2001, Vol. 50, No. 2, Pp. 11–23.

10. Laiz H.M. Low frequency behavior of thin-film multijunction thermal converter, *Dissertation TU Braunschweig*, 1999, 128 p. Available: <http://hdl.handle.net/10068/150785>

11. Kim J.S., Lee H.C., Lee J.H., Lee J.H., Park S.I., Kwon S.W. A planar Bi–Sb multijunction thermal converter with small AC-DC transfer differences, *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 2002, Vol. 51, No. 1, Pp. 17–23.

12. Odintsov A.V. Teplovoy preobrazovatel peremennogo toka, izgotovlennyy metodami mikrotekhnologii, *Sankt-peterburgskaya assambleya molodykh uchenykh i spetsialistov: tezisy dokladov*, 2000. (rus)

13. Pyatyshev Ye.N., Odintsov A.V. Mikromekhanicheskiy teplovoy preobrazovatel napryazheniya peremennogo toka, *Datchiki i sistemy: Sbornik dokladov mezhdunarodnoy konferentsii*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2002, Vol. 2. (rus)

14. Rozanov L.N. *Vakuumnaya tekhnika*. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2007, 392 p. (rus)

15. Wüest M. The changing art of measuring vacuum pressure, *Solid State Technology*, June, 2004.

16. Kuzmin V.V. Sostoyaniye i tendentsii razvitiya sovremennogo vakuummetricheskogo priborostroyeniya, *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya*, 2001, Vol. 11, No. 1, Pp. 3–16, No. 2, Pp. 43–50. (rus)

17. Wang S.N., Mizuno K., Fujiyoshi M., Funabachi H., Sakata J. Thermal micropressure sensor for pressure monitoring in a minute package, *American Vacuum Society*, 2001, A 19 (1).
18. Chou B.C.S., Chen C.-N., Shie J.-S. Micromachining on (111)-Oriented Silicon, *Sensors and Actuators*, 1999, Vol. 75, Pp. 271–277.
19. Doms M., Bekesch A., Mueller J. A Microfabricated Pirani Pressure Sensor Operating Near Atmospheric Pressure, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, Vol. 15, Pp. 1504–1510.
20. Zhang T.F., Tang Z., Yu J., Jin R.C. A Micro-Pirani Vacuum Gauge Based on Micro-Hotplate Technology, *Sensors and Actuators A*, 2006, Vol. 126, Pp. 300–305.
21. Baliga J. Integrated Pressure Monitor Technology for RF MEMS, *Semiconductor International*, 2006, No. 2/1.
22. Dozoretz P., Stone C., Wenzel O. Shrinking the Pirani Vacuum Gauge, *Sensors*, 2005, No. 1.
23. Odintsov A.V., Pyatyshev Ye.N. Mikromekhanicheskiy termoelektricheskiy datchik vakuuma na osnove AC-DC preobrazovatelya, *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya: tezisy dokladov nauchno-tekhnicheskogo seminar*, St. Petersburg: Univak Publ., 2003. (rus)
24. Pyatyshev Ye.N., Kazakin A.N., Pakkonen A.V., Odintsov A.V. Mikrosistemnaya tekhnika v vakuumnoy tekhnologii, *Kontrol germetichnosti: tezisy dokladov nauchno-tekhnicheskogo seminar*, 2001. (rus)
25. Tropea C., Yarin A., Foss J. *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*, Springer, Berlin, 2007, Pp. 179–182.
26. Beeby S. *MEMS mechanical sensors*, Boston, London, Artech House, Inc., 2004.
27. Yankevich Yu.I., Verkin Yu.I. Sostoyaniye i perspektivy razvitiya letatelnykh mikroapparatov, *Mikrosistemnaya tekhnika*, 2000, No. 1, Pp. 37–39. (rus)
28. Alekseyev N.V., Kravtsov V.G., Nazarov O.I., Pankratov A.K., Vozhdayev Ye.S., Vyalkov A.V., Golovkin M.A., Yefremov A.A. Sistemy izmereniya vozdushnykh parametrov poleta novogo pokoleniya, *Aviakosmicheskoye priborostroyeniye*, 2003, No. 8, Pp. 31–36. (rus)
29. Available: <http://www.bosch.com>
30. Pyatyshev Ye.N., Kozlov V.P., Akulshin Yu.D., Odintsov A.V., Zubarev A.N. Ustroystvo dlya izmereniya vektora skorosti vozdushnogo potoka, *Patent RF No. 55146*, 15.02. 2006. (rus)
31. Kremlevskiy P.P. Raskhodometry i schetchiki kolichestva veshchestva: Spravochnik. St. Petersburg: Politekhnik Publ., 2002, Kn. 1, 409 p. (rus)
32. Kersjes R., Liebscher F., Spiegel E., Manoli Y., Mokwa W. An invasive catheter flow sensor with on-chip CMOS readout electronics for the on-line determination of blood flow, *Sensors and Actuators A*, 1999, Vol. 58, Pp. 563–567.
33. Ashauer M., Glosch H., Hendrich P., Hey N., Sandmaier H., Lang W. Thermal flow sensor for liquids and gases based on combinations of two principles, *Sensors and Actuators*, 1999. A 73, Pp. 7–13.
34. Kotov V.N., Cherepakhin I.I. Integralnyy kremniyevyy mikrotermoanemometr dlya izmereniya raskhoda zhidkikh i gazoobraznykh sred, *Mikrosistemnaya tekhnika*, 2003, No. 8. (rus)
35. Leung A.M., Zhao Y., Cunnee T.M. Moving with Heat, *European Semiconductor*, March 2001, Pp. 63–67.
36. Milanovi M., Bowen E., Zaghloul M.E., Tea N.H., Suehle J.S., Payne B., Gaitan M. Micromachined convective accelerometers in standard integrated circuits technology, *Applied Physics Letters*, 2000, Vol. 76 (4), Pp. 510–580.
37. Available: <http://www.memsic.com> (Accessed 08.08.2014).
38. Available: <http://www.mems.ru> (Accessed 08.08.2014).

АКУЛЬШИН Юрий Дмитриевич – ведущий инженер лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: acul@mems.ru

AKULSHIN, Yurii D. *St. Petersburg State Polytechnical University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: acul@mems.ru

ГЛУХОВСКОЙ Анатолий Викторович – младший научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: togl@mail.ru

GLUHOVSKOI, Anatoliy V. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: togl@mail.ru

КАЗАКИН Алексей Николаевич — научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: keha@newmail.ru

KAZAKIN, Aleksey N. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: keha@newmail.ru

КОМАРЕВЦЕВ Иван Михайлович — младший научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: vanec@aport.ru

KOMAREVTCEV, Ivan M. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: vanec@aport.ru

ЛУРЬЕ Михаил Семенович — ведущий научный сотрудник лаборатории нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: milur@mail.ru

LURIE, Mikhail S. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: milur@mail.ru

ПЯТЫШЕВ Евгений Нилович — заведующий лабораторией нано- и микросистемной техники Объединенного научно-технологического института Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: pen@mems.ru

PIATYSHEV, Evgenii N. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: pen@mems.ru