



УДК 621.3

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

ТЕХНОЛОГИИ И РАЗРАБОТКИ ЛАБОРАТОРИИ НМСТ

Представлены результаты работ лаборатории нано- и микросистемной техники СПбГПУ в области разработки технологий и МЭМС-преобразователей различного назначения.

ТЕХНОЛОГИИ; МЭМС; ДАТЧИКИ.

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

TECHNOLOGIES & DEVICES NMST LAB

The given paper presents the research work results of the Nano- and Microsystems Technology laboratory in the field of the technology development and MEMS transducers for different purposes.

TECHNOLOGY; MEMS; TRANSDUCERS.

Важнейшими задачами развития микросистемной техники (МСТ) в настоящее время являются создание собственной Российской элементной базы и импортозамещение для таких сфер применения, как медицина и здравоохранение, автомобилестроение, авиастроение, машиностроение, телекоммуникации, системы безопасности, оборонная промышленность.

Создаваемая элементная база, кроме необходимых метрологических и эксплуатационных характеристик, должна отличаться возможностью использования в различных отраслях промышленности, технологической доступностью для серийного полупроводникового производства и невысокой себестоимостью [1, 2].

Российским заказчикам требуются различные инерциальные датчики, датчики давления, высокочастотные микроэлектромеханические системы (ВЧ МЭМС), микрофлюидные устройства и комбинированные системы на их основе. Причем отечественным предприятиям необходимы как сами указанные продукты (в готовом виде), так и технологии по их проектированию, моделированию, производству и испытанию [3].

Научно-исследовательская лаборатория нано- и микросистемной техники обладает значительным опытом разработки и вне-

дрения методов и технологий проектирования и производства изделий микросистемной техники, а также создания устройств микросистемной техники различного назначения с опорой на освоенную технологическую базу и методы физического и математического моделирования.

Лаборатория располагает возможностями для выполнения всего стандартного для микроэлектроники набора технологических операций: фотолитография, напыление металлов и диэлектриков, жидкостное и сухое травление, термическая обработка, легирование, разделение пластин на чипы и корпусирование. Лаборатория обеспечивает необходимые требования комплексного подхода ко всем составляющим цикла «проектирование-изготовление» (проектирование, технологии, материалы). Разработка МЭМС базируется на технологическом фундаменте, существенным моментом является сочетание технологий микроэлектроники и операций, радикально отличающихся от традиционных для микроэлектроники. Для разработки различных МЭМС-устройств используются технологии глубокого жидкостного и сухого (плазменного) травления, технологии «кремний на стекле» с применением анодной сварки, выполнен ряд разработок по функциональ-

ному корпусированию. Наряду с широким использованием возможностей традиционных микроэлектронных технологий это позволяет создавать изделия и устройства МСТ разнообразных применений [4].

Разработаны датчики давления тензорезистивного типа для измерения давления газовых потоков. Основу датчиков составляет кремниевый чип (чувствительный элемент давления). Датчики выполняются по классической МЭМС-технологии: мембрана, созданная жидкостным травлением, с диффузионными тензорезисторами, соединенными по мостовой схеме. Датчики отличаются малыми габаритами, высокой чувствительностью и быстродействием и предназначены для исследования быстропротекающих аэродинамических процессов в компрессорах, вентиляторах, ветрогенераторах и устройствах подготовки воздуха

(кондиционерах).

Низкопрофильные датчики давления типа Альфа (рис. 1), (табл. 1) – одна из первых микроэлектромеханических разработок нашей лаборатории, выполненная по заказу отдела промышленной вентиляции Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ). Были разработаны датчики для установки непосредственно на поверхность аэродинамической модели (толщина датчика 0,4 мм).

Датчики выполнены по классической МЭМС-технологии, однако контактные площадки покрыты нержавеющей сталью и имеют размер больший (1,6*0,6 мм), чем обычно используется при разработках ИС и МСТ. Такое конструктивное решение обеспечивает монтаж датчиков с использованием оборудования и методик стандартной

Таблица 1

Датчики давления

Наименование	Тип Альфа	Тип С	Тип СБ	Тип КС
Диапазоны, атм	±0,1 до 76	±0,1 до 16	±0,1 до 16	76; 160
Тип датчика	избыточный, дифференциальный	абсолютный, избыточный, дифференциальный	избыточный, дифференциальный	абсолютный
Выходной сигнал, мВ	±20	±30	±30	±200
Напряжение питания, В	5	5	5	6
Погрешность, %	0,5..1	0,5..1	0,5..1	0,5
Рабочий диапазон температур, °С	-25...80	-25...80	-25...80	-40...100
Быстродействие	2...50 мкс	10...100 мкс	10...100 мкс	10 мс
Рабочий газ	Воздух	Воздух	Воздух, фреон	Воздух, природный газ
Габариты, мм	7×2,8×0,5	H = 1,6, D = 6	D = 6, L = 25	D = 36, L = 250
Особенности установки	Низкопрофильный для установки на стенки каналов	Для установки на рабочие колеса ЦК	Для установки на стенки каналов	Для системы антипомпажной защиты КС
Особенности технологии	Глубокое жидкостное травление			

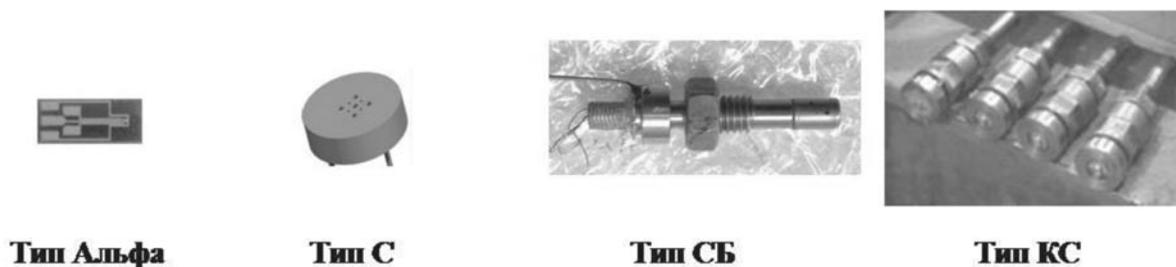


Рис. 1. Датчики давления тензометрического типа

тензометрии. Датчики устанавливаются на поверхность моделей с помощью клея, разводка выводов производится обычной распайкой с помощью микропаяльника. При необходимости защиты в ряде применений (исследования запыленных потоков, течений жидкостей в насосах) после монтажа поверхность датчика покрывается полимерной композицией на основе кремнийорганического материала. Мембраны датчиков имеют площадь $1,2 \times 0,8$ мм при толщине 5...50 мкм, что обеспечивает работу в диапазоне давлений 0...10 кПа, 0...1 МПа при собственных частотах мембран до 100 кГц.

Совместно с кафедрой компрессорной, вакуумной и холодильной техники СПбГПУ разработан ряд датчиков давления для исследований нестационарных аэродинамических процессов в турбомашинах, в т. ч. и на вращающемся роторе при высоком уровне центробежных ускорений (рис. 1), (табл. 1). Датчики давления типа С для установки на рабочие колеса выполнялись в металлических (ковар) и керамических (фотоситалл) корпусах. Конструкция датчиков обеспечивает установку на покрывающие диски рабочих колес центробежных компрессоров и работоспособна при перегрузке до 30 000 г. Датчики давления типа СБ предназначены для измерения быстроменяющихся давлений газовых потоков. Основу датчиков составляет кремниевый чип (чувствительный элемент давления). Конструкция корпусов и технология сборки датчиков типа С и СБ позволяют минимизировать величину предметного объема, подводящие каналы обеспечивают демпфирование колебаний в подводящем тракте. Диапазон измеряемых частот пульсаций до 40 кГц. Датчики давле-

ния типа КС разработаны совместно с ЗАО «Кировский Завод» и предназначены для системы антипомпажной защиты центробежного компрессора газоперекачивающего агрегата. Датчики в составе макета системы антипомпажной защиты прошли испытания на головном агрегате ГПА «НЕВА16». Конструкция системы защищена патентом [5].

Тепловые МЭМС-преобразователи составляют значительную группу датчиков широкого спектра применений. Для изготовления тепловых преобразователей разработан технологический маршрут, операции которого не выходят за рамки возможностей стандартного полупроводникового производства. Конечные операции по глубокому жидкостному травлению выполняются на специализированном оборудовании.

Тепловые микрорасходомеры (рис. 2), (табл. 2) предназначены для измерения расходов газовых потоков методом термоанемометра. Датчики типа Ион разработаны для применения в газовых трактах экспериментального лабораторного оборудования медико-биологического назначения. Датчики ТИРГ разработаны в качестве экспериментальных образцов по программе «Многофункциональные тепловые преобразователи». На разработанное устройство микроанемометра получен патент на полезную модель [6].

Тепловые акселерометры (рис. 3), (табл. 3) предназначены для измерения гравитационных и инерциальных ускорений методом «конвективного облака». Датчики GM08 разработаны для экспериментального образца системы стабилизации движения (контракт с фирмой GM). Датчики ТАКС разработаны в качестве экспериментальных образцов по программе «Многофункциональные тепловые преобразователи».

Таблица 2

Тепловые микрорасходомеры

Наименование	Тип Ион	Тип ТИРГ
Диапазоны, мл/мин	0–150	0–200
Тип датчика	Пленочный термоанемометр	Пленочный термоанемометр
Выходной сигнал, мВ	±30	±50
Напряжение питания, В	5	5
Погрешность, %	+/-1..2	+/-2
Рабочий диапазон температур, °С	15....35	10....50
Быстродействие, мс	10	10
Рабочий газ	Воздух, азот, чистые неагрессивные газы	Воздух
Габариты, мм	D = 10, L = 80	30×20×15
Особенности технологии	Глубокое жидкостное травление. Многослойная мембрана	



Тип Ион

Тип ТИРГ

Рис. 2. Датчики для измерения микрорасходов

Таблица 3

Тепловые акселерометры

Наименование	Тип	
	GM08	ТАКС
Диапазоны, g	+/- 1	+/- 1
Тип датчика/принцип измерения	Конвективный	Конвективный
Выходной сигнал	0 до 4 В	±50 мВ
Напряжение питания, В	5	5
Погрешность, %	+/- 1..2	+/- 2
Рабочий диапазон температур, °С	15....35	10....50
Быстродействие, мс	10	10
Габариты, мм	H = 100, L = 80	30×20×15
Особенности технологии	Глубокое жидкостное травление. Многослойная мембрана	

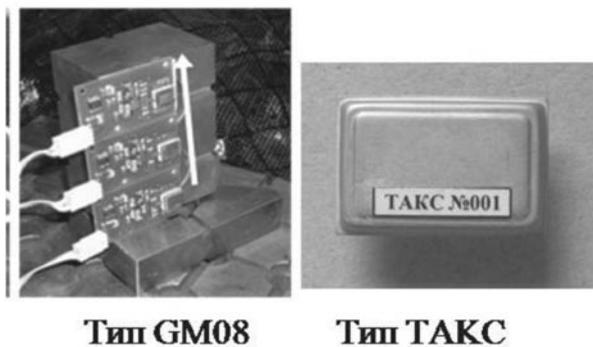


Рис. 3. Тепловые микроакселерометры

Инерциальные преобразователи вибрационного типа наиболее сложные в технологическом отношении МЭМС-изделия. Лаборатория участвует в создании микромеханических инерциальных преобразо-

вателей различного назначения. Уровень разработки в этой области определяется во многом возможностями технологий, используются технологии глубокого сухого (плазменного) травления, технологии «кремний на стекле» с применением анодной сварки. В настоящее время Лаборатория работает над созданием технологии инерциальных преобразователей повышенной точности, пригодных для широкого круга применений.

Датчики угловой скорости (рис. 4), (табл. 4) являются основой для создания устройств различного назначения для систем навигации, стабилизации движения и управления. В таблице представлены данные одного из чувствительных элементов – датчиков угловой скорости, изготовленных в Лаборатории.

Таблица 4

Датчики угловой скорости

Наименование параметра	Режим измерения	Типовое/макс. значения	Единица измерения
Динамический диапазон	Аналоговый выход	± 300	$^{\circ}/\text{с}$
Уход начального смещения		$-/10$	$^{\circ}/\text{ч}$
Значение шума на выходе	При динамическом диапазоне $\pm 300^{\circ}/\text{с}$,	$-/0,3$	$^{\circ}/\text{с}$ СКЗ
Полоса пропускания по уровню -3 дБ,		100	Гц
Особенности технологии	Технология «кремний на стекле». Глубокое плазменное травление. Анодная сварка		

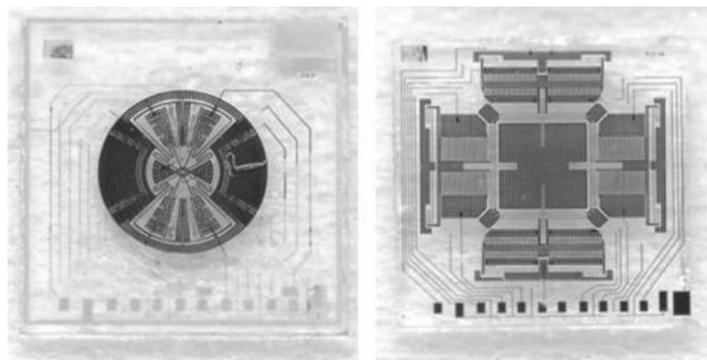


Рис. 4. Датчики угловой скорости

Таблица 5

Датчики линейного ускорения

Наименование параметра	Типовое значение	Единица измерения
Динамический диапазон	± 50	g
Уход начального смещения	5	mg
Значение шума на выходе СКЗ	1,5	mg
Особенности технологии	Технология «кремний на стекле». Глубокое плазменное травление. Анодная сварка	

Датчики линейного ускорения (рис. 5), (табл. 5) предназначены для измерения инерционного и гравитационного линейного ускорения. Применяются для создания устройств различного назначения для систем навигации, стабилизации движения и управления, а также сейсмических устройств и систем охраны периметра. На разработанное устройство микроакселерометра получен патент на полезную модель [7].

Следует отметить, что разработка конструкции и поиск оптимальных механических параметров гироскопов и акселерометров представляют собой отдельную и очень трудоемкую задачу, решение которой требует применения специальных аналитических методов, а также современных компьютерных методов математического моделирования. Поэтому разработка конструкции ведется в кооперации со специалистами в области инерциального приборостроения. Так, разработка

технологий и изготовление датчиков акселерометров и гироскопов для систем управления и навигации малогабаритных быстролетающих объектов (рис. 4, 5) проводились по заказу ЗАО «Гирооптика»; ведутся совместные работы в области бесплатформенных систем навигации и создании инерциальных датчиков движения с ЦНИИ робототехники и технической кибернетики; ВНИИ технической физики имени академика Е.И. Забабахина, ФГУП «Электроприбор».

Для расширения областей применения разработанных МЭМС-датчиков требуется проведение работ по адаптации датчиков к требованиям стандартов конкретных отраслей. Так, датчики, отвечающие требованиям «автомобильного назначения», должны обеспечивать преобразование физических параметров (ускорение, скорость, давление) в цифровые сигналы автомобильной CAN-шины. Чувствительный элемент датчика в сочетании с преобразователем напряжения

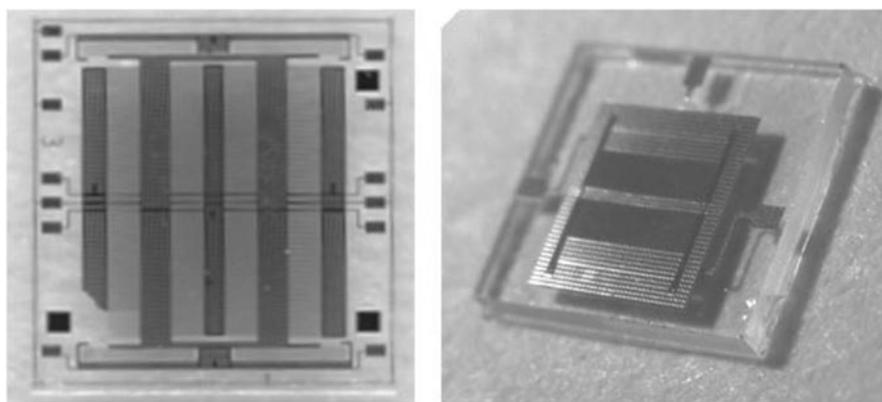


Рис. 5. Датчики линейного ускорения

(заказная микросхема – ASIC) необходимо компоновать в разработанный по автомобильным стандартам корпус.

В настоящее время отечественные датчики линейного ускорения, отвечающие требованиям «автомобильного назначения», могут быть востребованы в инновационных автомобильных разработках для систем безопасности, стабилизации движения, навигации, информационного обеспечения водителя и операторов автомобильного парка.

Разработанные нашей лабораторией технологии представляют значительный интерес для создания отечественной элементной базы и импортозамещения в таких областях, как медицина и здравоохранение, автомобилестроение, авиастроение, машиностроение, телекоммуникации, системы безопасности, оборонная промышленность. Собственная отечественная элементная база позволит избежать зависимости предприятий РФ от импортных компонентов, что обеспечит безопасность серийного производства конечных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Лучинин В.В. Микросистемная техника. Направления и тенденции развития // Научное приборостроение. 1999. Т. 9. № 1. С. 3–18.
3. Обзор российского рынка МЭМС [электронный ресурс] / URL: http://www.semiconrussia.org/en/sites/semiconrussia.org/files/docs/SEMI_2014_Urmanov_MEMS.pdf
4. Пятыхшев Е.Н., Лурье М.С., Акульшин Ю.Д., Скалон А.И. Микротехнологии: от ми-

кроэлектроники к микросистемной технике // Датчики и системы. 2001. № 6. С. 58–65.

5. Семененко П.Г., Гительман А.И., Акульшин Ю.Д., Измайлов Р.А., Сорокин А.В. Способ регулирования режимов работы компрессора // Патент РФ № 2230939. Приоритет 20.06.2004.

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

7. Прядко А.И., Рогов А.В., Пятыхшев Е.Н., Казакин А.Н., Караваев П.Н. Микромеханический акселерометр // Патент РФ № 13361. Приоритет 29.10.2012.

REFERENCES

1. 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)
2. Luchinin V.V. Mikrosistemnaya tekhnika. Napravleniya i tendentsii razvitiya, *Nauchnoye priborostroyeniye*, 1999, Vol. 9, No. 1, Pp. 3–18. (rus)
3. *Obzor rossiyskogo rynka MEMS*. Available: http://www.semiconrussia.org/en/sites/semiconrussia.org/files/docs/SEMI_2014_Urmanov_MEMS.pdf (rus)
4. 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)

5. Semenenko P.G., Gitelman A.I., Akulshin Yu.D., Izmaylov R.A., Sorokin A.V. Spособ regulirovaniya rezhimov raboty kompressora, *Patent RF No. 2230939. Prioritet 20.06.2004.* (rus)

6. 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, Prioritet 15.02.2006.* (rus)

7. Pryadko A.I., Rogov A.V., Pyatyshev Ye.N., Kazakin A.N., Karavayev P.N. Mikromekhanicheskiy akselerometr, *Patent RF No. 13361. Prioritet 29.10.2012* (rus)

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

КОЗЛОВ Владислав Петрович – 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: vkr@mems.ru

KOZLOV, Vladislav P. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: vkr@mems.ru

КОРШУНОВ Андрей Васильевич – доцент кафедры компрессорной, вакуумной и холодильной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

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

KORSHUNOV, Andrey V. *St. Petersburg State Polytechnical University.*
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: korshunov@spbstu.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

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

ЛЮРЬЕ 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