

Klunnikova Yulia Vladimirovna – Southern Federal University; e-mail: yvklunnikova@sfedu.ru; 2, Shevchenko str. building “E”, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634371603; the department of electronic apparatuses design; associate professor.

Gusev Evgeny Yurievich – e-mail: eyugusev@sfedu.ru; phone: +78634371940; the department of nanotechnology and microsystem technics; associate professor.

УДК 621.3.049.77

DOI 10.23683/2311-3103-2018-2-25-33

М.А. Денисенко, А.С. Исаева

**ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ТУННЕЛЬНЫЙ
АКСЕЛЕРОМЕТР НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ
МЕХАНИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЛОЕВ***

В настоящее время на рынке инерциальных систем навигации и ориентации большое внимание уделяется реализации простых, компактных и недорогих решений. Это объясняется возникновением новых сфер применения: носимая электроника, игрушки, игровые консоли, фото- и видеотехника, дроны и роботизированные системы и др. Адаптация дорогостоящих прецизионных приборов (на лазерных, волоконно-оптических, поплавковых гироскопах) для малогабаритных объектов трудновыполнимая, а часто и невозможная задача. Наиболее перспективны для разнообразного широкого применения датчики на основе МЭМС-технологии. Массовое использование микромеханических датчиков (гироскопов и акселерометров) и систем на их основе за рубежом началось со сложных аэрокосмических и оборонных систем. Дальнейшее внедрение микромеханики в автомобильные системы безопасности, медицинские системы, мобильную связь и производство смартфонов, индустрию детских товаров и т.д. стало возможным в результате повышения технологичности производства МЭМС. Рассмотрена конструкция нового интегрального микромеханического сенсора линейных ускорений на основе туннельного эффекта для перспективных инерциальных систем навигации и ориентации малоразмерных подвижных объектов, а также для промышленных нужд; кратко описан метод построения с использованием операции самосборки на основе управляемой самоорганизации механически напряженных полупроводниковых слоев GaAs/InAs, который позволяет прецизионно контролировать формирование туннельного контакта с зазором порядка единиц нанометров. При этом обеспечивается высокая технологичность конструкции в том числе за счет возможности ее интегрального изготовления групповыми методами обработки с использованием стандартных технологических операций. Конструкция туннельного акселерометра была промоделирована в САПР ANSYS. Результаты математического моделирования удовлетворяют требованиям, предъявляемым к современным микромеханическим акселерометрам, и позволяют использовать их для дальнейшего развития структур такого типа. Полученные данные могут быть использованы в частности для расчета рекомендуемых параметров при разработке методик проектирования туннельных сенсоров угловых скоростей и линейных ускорений и для разработки более точных моделей МЭМС-структур.

МЭМС; микромеханический акселерометр; дизайн; датчик; математическая модель.

* Работа выполнена при финансовой поддержке из средств "Программы развития Южного федерального университета до 2021 года" (проект ВнГр-07/2017-10).

M.A. Denisenko, A.S. Isaeva

INTEGRATED MICRO-MECHANICAL TUNNEL ACCELEROMETER BASED ON CONTROLLED SELF-ORGANIZATION OF MECHANICALLY STRESSED SEMICONDUCTOR LAYERS

At present, the market of inertial navigation and orientation systems pays much attention to the implementation of simple, compact and inexpensive solutions. It is explained by the emergence of new fields of application: wearable electronics, toys, game consoles, photo and video equipment, drones and robotic systems, etc. Adaptation of expensive precision instruments (based on laser, fiber optic or floating gyroscopes) for small objects is difficult, and sometimes is an impossible task. Sensors based on MEMS technology are the most promising for a wide range of applications. Micromechanical sensors (gyroscopes and accelerometers) and systems used massively for different tasks connected with complex aerospace and defense systems. Further micromechanics introduced into automotive security systems, medical systems, mobile communications and the production of smartphones, the children's goods industry, etc. became possible as a result of increasing the manufacturability of MEMS. The article deals with the construction of a new integrated micromechanical linear acceleration sensor based on the tunneling effect for perspective inertial navigation and orientation systems of small-sized mobile objects, as well as for industrial needs; a method for constructing mechanically stressed GaAs / InAs semiconductor layers using a self-assembly operation is briefly described; it's based on controlled self-organization, which allows for precise control of the formation of a tunnel contact with a gap about one nanometer. At the same time, high technological design is ensured, including through the possibility of its integral manufacturing by group processing methods using standard technological operations. The design of the tunnel accelerometer was simulated in the ANSYS CAD software. The results of mathematical modeling satisfy the requirements for modern micromechanical accelerometers and allow using them for the further development of structures of this type. The obtained data can be used in particular to calculate the recommended parameters in the development of techniques for designing tunnel velocity sensors and linear accelerations and for the development of more accurate models of MEMS structures.

MEMS; micromechanical accelerometer; design; sensor; mathematical model.

Введение. Микро- и наномеханические устройства находят широкое применение в современных технических системах различного назначения: от бытовых (камеры, игрушки, мобильные телефоны и планшеты и мн. др.) до специализированных (автомобильных, медицинских, промышленных, навигационных) [1, 2].

Одним из наиболее активно развивающихся направлений микросистемной техники является разработка устройств, способных решать задачи анализа траектории, параметров движения и динамических характеристик движущихся объектов. Такими устройствами являются в том числе сенсоры угловых скоростей и линейных ускорений, которые относятся к классу микроэлектромеханических систем (МЭМС).

В данной статье представлена конструкция интегрального микромеханического сенсора линейных ускорений на основе туннельного эффекта; метод построения с использованием операции самосборки на основе управляемой самоорганизации механически напряженных полупроводниковых слоев GaAs/InAs. Приведены результаты статического анализа предложенной конструкции туннельного акселерометра, полученные в САПР ANSYS, подтверждающие ее соответствие требованиям, предъявляемым к современным устройствам регистрации линейных ускорений.

Постановка задачи. Важным направлением современной микросистемной техники является создание высокочувствительных гироскопов и акселерометров. Из-за высокой распространенности таких устройств актуальным становится улучшение не только технических параметров (пороговая чувствительность, нелиней-

ность, рабочий диапазон частот и др.), но и других аспектов, в частности снижение стоимости готового изделия, повышение технологичности, возможность интегрального изготовления совместно с другими компонентами МЭМС [3–5].

Известно, что наиболее чувствительными к смещению являются акселерометры, использующие туннельный ток для регистрации расстояния между электродами. Характерные значения туннельного тока составляют величину порядка 1 нА при напряжениях порядка 0,1 В и расстоянии 1 нм между электродами [6–8]. При этом туннельные акселерометры обладают важными преимуществами: сверхчувствительность, вызванная экспоненциальным соотношением между туннельным током и межэлектродным расстоянием; уменьшение характеристических размеров влияет на чувствительность гораздо меньше, чем в случае традиционных емкостных акселерометров (это связано с малой площадью чувствительной области, т.е. туннельного контакта); схемы обработки сигналов туннельных акселерометров обычно проще подобных схем для емкостных акселерометров [9].

Описание конструкции. На рис. 1 представлена конструкция туннельного акселерометра, которая включает в себя полуизолирующую подложку, подвижный и неподвижный электроды, подвижный и неподвижный электроды электростатического актюатора, два упругих подвеса.

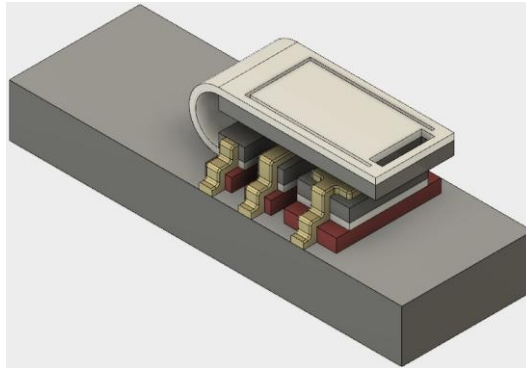


Рис. 1. Конструкция туннельного акселерометра

Преобразователь перемещения представляет собой туннельный контакт, образованный неподвижным и подвижным электродами. Первый упругий подвес имеет U-образную форму и представляет собой сегмент цилиндрической оболочки, примыкающий одним концом к якорной области подвижного электрода и жестко закрепленный относительно полуизолирующей подложки, а вторым концом примыкающий к подвижной балке, представляющую собой комплексную микромеханическую конструкцию, на которой сформированы подвижный электрод, подвижный электрод электростатического актюатора, второй упругий подвес, инерционная масса. Электростатический актюатор образован неподвижным и подвижным отклоняющими электродами.

Несущий упругий U-образный подвес сформирован с использованием Принц-технологии [10–13]. Он выполнен (как и технологические слои) из двухслойного материала таким образом, что внешняя поверхность упругого подвеса сформирована из пленки InAs, а внутренняя поверхность – из пленки GaAs. Из-за разницы в значениях постоянных решетки InAs и GaAs ($\Delta a/a = 7,2\%$) в полученной гетеропленке возникают механические напряжения, которые изгибают ее при локальном освобождении от связи с подложкой за счет контролируемого селективного травления жертвенного слоя AlGaAs [14–17].

Таким образом, контролируя время травления, можно управлять процессом самоорганизации напряженных слоев InAs/GaAs и получить туннельный зазор между неподвижным электродом и подвижным электродом. Такой подход имеет ряд преимуществ перед традиционной планарной технологией формирования микромеханических акселерометров. Во-первых, повышается технологичность, так как все операции выполняются в едином техпроцессе и отсутствует необходимость в операциях микросборки, что дает возможность ее интегрального изготовления групповыми методами обработки с использованием стандартных технологических операций GaAs технологии. Во-вторых, имеется возможность прецизионного формирования туннельного контакта с зазором порядка единиц нанометров. В-третьих, на основе этой технологии становится возможным получать в том числе и многоосевые акселерометры в интегральном исполнении [18]. Кроме того, имеется возможность включения в состав структуры функционально и технологически интегрированной системы калибровки и схемы обработки сигналов акселерометра [19–20].

Второй упругий подвес формируется до того, как структура будет свернута путем травления П-образной сквозной щели и прямоугольного выреза (см. рис. 1). Инерционная масса при этом расположена вблизи подвижного конца балки и второго упругого подвеса таким образом, что оказывает влияние на оба упругих подвеса.

Туннельный зазор формируется за счет контроля параметров операции травления жертвенного слоя. На практике могут возникнуть отклонения от необходимой величины зазора, обусловленные разбросом параметров материалов, внешних условий и пр. Для решения этой проблемы предусмотрена система калибровки, в состав которой входят подвижный и неподвижный электроды электростатического актюатора. При подаче соответствующего напряжения происходит изменение положения подвижной балки за счет электростатических сил. Распределение электрического поля, полученное в САПР ANSYS показано на рис. 2.

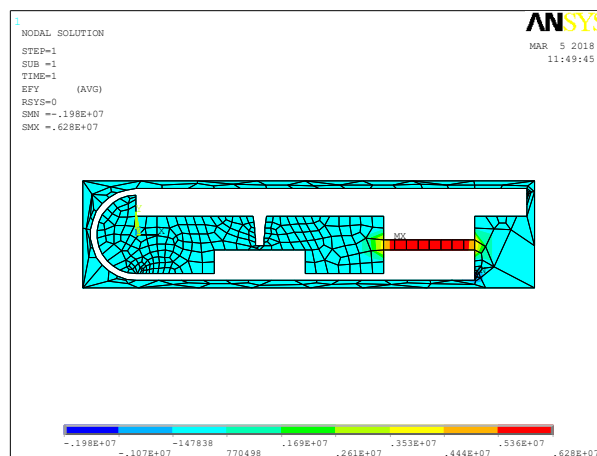


Рис. 2. Распределение электрического поля

Моделирование. Для подтверждения работоспособности представленного туннельного акселерометра, был подготовлен макрос в ANSYS APDL, описывающий эскиз структуры с физико-геометрическими параметрами, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры конструкции акселерометра

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Внутренний радиус	R_i	0.35e-6	m
Толщина внутренней пленки (GaAs)	H_i	0.02e-6	m
Толщина внешней пленки (GaAs)	H_o	0.03e-6	m
Длина подвижной балки	L_{im}	3.00e-6	m
Ширина структуры	W	1.00e-6	m
Толщина инерционной массы	H_{im}	0.06e-6	m
Толщина неподвижного электрода	H_e	0.06e-6	m
Туннельный зазор	D_t	2.00e-9	m
Модуль Юнга InAs	E_{InAs}	50.00e9	Pa
Коэффициент Пуассона InAs	μ_{InAs}	0.33	-
Плотность InAs	ρ_{InAs}	5.67e3	kg/m ³
Модуль Юнга InAs GaAs	E_{GaAs}	82.68e9	Pa
Коэффициент Пуассона GaAs	μ_{GaAs}	0.31	-
Плотность GaAs	ρ_{GaAs}	5.32e3	kg/m ³

На данном этапе проводится только механическое моделирование, поэтому конструкция была несколько упрощена (см. рис. 3). В модели учитывается двух-слойная структура несущего упругого подвеса с соответствующими параметрами слоев.

Был проведен статический анализ, результаты которого приведены на рис. 3 и в табл. 2

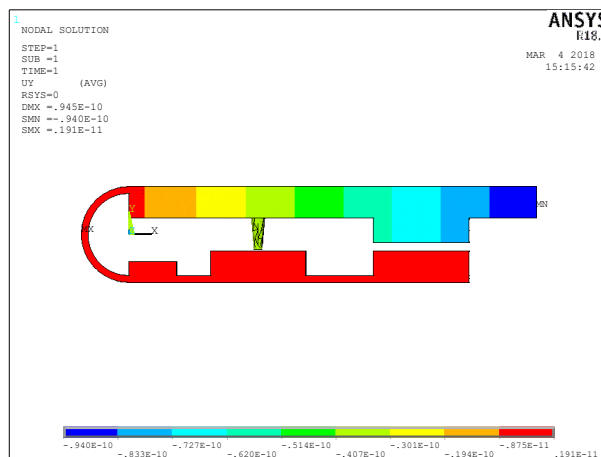


Рис. 3. Результаты статического анализа конструкции. Подано ускорение 5 g по оси Y. Смещение подвижного электрода преобразователя перемещения по оси Y составляет $-0.407 \cdot 10^{-10}$ м

Таблица 2

Результаты статического анализа конструкции при ускорении 5g

Направление ускорения 5g	Смещение вдоль оси X (м)	Смещение вдоль оси Y (м)	Смещение вдоль оси Z (м)
- X	$-0.646 \cdot 10^{-12}$	$-0.503 \cdot 10^{-11}$	$-0.461 \cdot 10^{-12}$
X	$-0.461 \cdot 10^{-12}$	$0.279 \cdot 10^{-11}$	$-0.303 \cdot 10^{-12}$
- Y	$0.210 \cdot 10^{-11}$	$0.301 \cdot 10^{-10}$	$-0.385 \cdot 10^{-12}$
Y	$-0.356 \cdot 10^{-11}$	$-0.407 \cdot 10^{-10}$	$0.111 \cdot 10^{-12}$
- Z	$0.190 \cdot 10^{-13}$	$-0.515 \cdot 10^{-12}$	$0.163 \cdot 10^{-10}$
Z	$-0.312 \cdot 10^{-13}$	$0.441 \cdot 10^{-12}$	$-0.242 \cdot 10^{-10}$

Из табл. 2 видно, что наибольшее смещение подвижного электрода возникает в результате приложения ускорения вдоль оси, перпендикулярной плоскости подложки, таким образом акселерометр наиболее чувствителен к линейным ускорениям, возникающим вдоль оси Y.

В работе [7] связь между туннельным током (I), напряжением, приложенным к электродам преобразователя перемещений (V), и величиной туннельного зазора (D) иллюстрируется следующим выражением:

$$I \propto V \times e^{((const)(-Dt))}, \quad (1)$$

т.е. туннельный ток линейно пропорционален приложенному напряжению, и экспоненциально зависит от величины туннельного зазора. Таким образом, приведенных в табл. 2 смещений достаточно для регистрации линейных ускорений, возникающим вдоль оси Y.

Из полученных данных можно рассчитать чувствительность акселерометра (которая также может быть представлена обратной величиной – k/m ratio). Известно выражение:

$$\frac{k}{m} = \frac{a}{z}, \quad (2)$$

где k – коэффициент жесткости подвеса, m – масса инерционной массы, a – ускорение, z – смещение инерционной массы. Таким образом, k/m соотношение будет составлять $1.204 \cdot 10^{12} \text{ c}^{-2}$, а чувствительность $8.306 \cdot 10^{-13} \text{ c}^2$.

Был проведен модальный анализ представленной структуры для первых десяти мод собственных колебаний, результаты которого представлены в табл. 3 и на рис. 4.

Таблица 3

Результаты модального анализа конструкции

Номер моды	Собственная частота колебаний (Hz)
1	0.138e06
2	0.208e06
3	0.599e06
4	0.946e06
5	0.112e07
6	0.129e07
7	0.336e07
8	0.459e07
9	0.470e07
10	0.577e07
	0.221e08

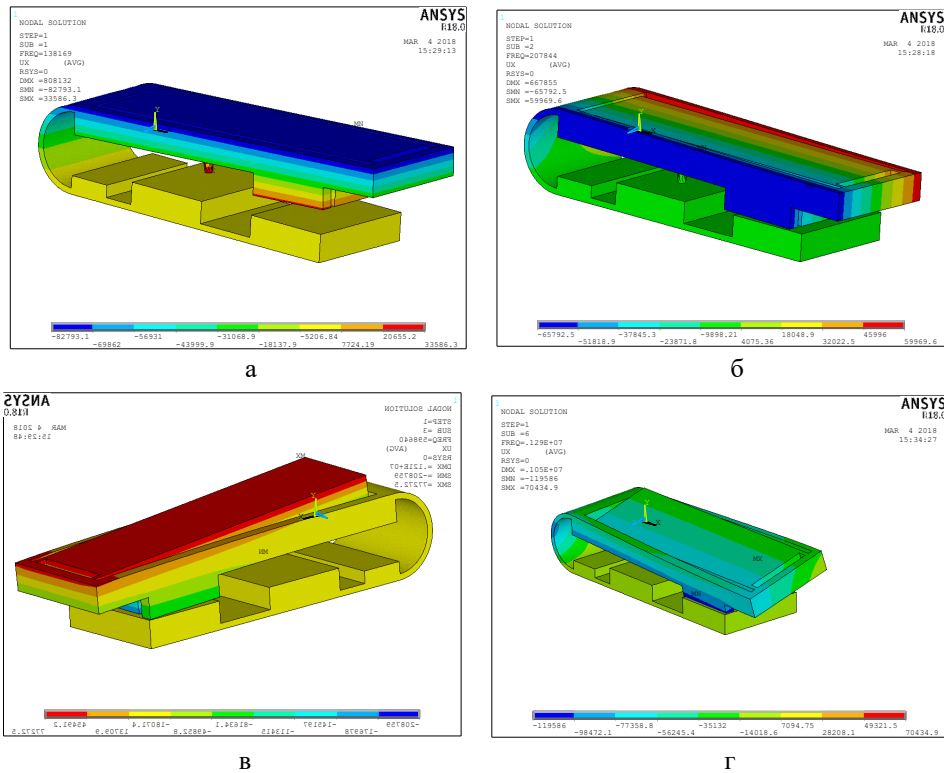


Рис. 4. Результаты модального анализа конструкции: а – первая мода; б – вторая мода; в – третья мода; г – шестая мода

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности построения предлагаемых сенсорных элементов посредством управляемой самоорганизации напряженных слоев GaAs/InAs, а также возможности применения подобных структур для построения интегральных микромеханических акселерометров, содержащих наноразмерные преобразователи перемещения на основе туннельного эффекта, что позволит уменьшить массогабаритные характеристики датчиков инерциальных систем ориентации и навигации, повысить их функциональные возможности, обеспечить высокую прецизионность и расширить сферу их применения, включая малоразмерные подвижные объекты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Berkeley S. Sensor & actuator center. – 2014 [Online]. Available: <http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/>.
2. Konoplev B.G., Lysenko I.E. and Ezhova O.A. Evolution Criteria Fingers Hardness Electrode MEMS Comb Converters // Bioscience. Biotechnology research Asia. – 2015. – Vol. 12, No. 3.
3. Yuanfeng Zhang, Chupeng Lei, Woo Soo Kim. Design optimized membrane-based flexible paper acceleromometer with silver nano ink. // Applied Physics Letters 103, 073304 (2013). Doi: 10.1063/1.4818734. – P. 073304-1–073304-3.
4. Hierold C. From micro- to nanosystems: mechanical sensors go nano // Christofer Hierold 2004 J. Micromech. Microeng. 14, S1. – P. S1-S11.

5. Dao D.V., Nakamura K., Bui T.T., Sugiyama S. Micro/nano-mechanical sensors and actuators based on SOI-MEMS technology // *Adv. Nat. Sci: Nanosci. Nanotechnol.* 2010, 1 013001. – P. 1-10.
6. Konoplev B.G., Pristupchik N.K., Ryndin E.A. A Simulation Method for Displacement Transducers Based on the Tunnelling Effect // *Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra.* – 2012. – No. 8 (4). – P. 20-26, (In Russian).
7. Boyden E., El Rifai O., Hubert B., Karpman M., Roberts D. A High-Performance Tunneling Accelerometer. MIT Term Project Paper 6.777, Introduction to Microelectromechanical Systems, Spring 1999.
8. Bustillo J.M., Howe R.T., Muller R.S. Surface Micromachining for Microelectromechanical Systems // *Proceedings of the IEEE.* – August 1998. – Vol. 86, No. 8. – P. 1552-1574.
9. Dong H., Jiaa Y., Haoa Y., Shenb S. A Novel out-of-plane MEMS Tunneling Accelerometer // *Sensors and Actuators A* 120. – 2005. – P. 360-364.
10. Prinz V.Ya. Precise semiconductor nanotubes and nanoshells fabricated on (110) and (111) Si and GaAs // *Physica E.* – 2004. – Vol. 23. – P. 260-268.
11. Denisenko M.A., Konoplev B.G., Isaeva A.S., Lysenko I.E. Integrated Micro-Mechanical Tunneling Accelerometer // *J. Pharm. Sci. & Res.* – 2017. – Vol. 9 (10). – P. 2155-2158.
12. Bernardi A., Goni A.R., Alonso M.I., Alsina F., Scheel H., Vaccaro P.O. and Saito N. Probing residual strain in InGaAs/GaAs micro-origami tubes by micro-Raman spectroscopy // *J. Appl. Phys.* 99, 063512 (2006). Ddoi: 10.1063/1.2183353. – P. 063512-1–063512-6.
13. Chun I.S., Bassett K., Challa A., Li X. Tuning the photoluminescence characteristics with curvature for rolled-up GaAs quantum well microtubes // *Applied Physics Letters.* 96, 251106, 2010. – P. 251106-1–251106-3.
14. Chun I.S., Li X. Controlled Assembly and Dispersion of Strain-Induced InGaAs/GaAs Nanotubes // *IEEE Transactions on Nanotechnology.* – July 2008. – Vol. 7, No. 4. – P. 493-459.
15. Prinz A.V., Prinz V.Ya., Seleznev V.A. Semiconductor micro- and nanoneedles for microinjections and ink-jet printing // *Microelectronic Engineering.* 67–68 (2003). – P. 782-788.
16. Nikishkov G.P. Curvature estimation for multilayer hinged structures with initial strains // *Journal of Applied Physics.* – 2003. – Vol. 94 (8). – P. 5333-5336.
17. Tsui Y.C., Clyne T.W. An analytical model for predicting residual stresses in progressively deposited coatings. Part 2: Cylindrical geometry // *Thin Solid Films.* – 1997. – Vol. 306. – P. 34-51.
18. Ryndin E.A., Pristupchik N.K. Integrated Micromechanical Tunneling Accelerometer Based on Driven Self-Assembly of Strained GaAs/InAs Layers // *Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences.* – 2009. – No. 01. – P. 129-134.
19. Konoplev B., Lysenko I., Ryndin E., Ezhova O., Bondarev F. Research of the micromechanical three-axis accelerometer // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 102241B (2016). Doi: 10.1117/12.2266766.
20. Konoplev B., Ryndin E., Lysenko I., Denisenko M., Isaeva A. Highly sensitive devices for primary signal processing of the micromechanical capacitive transducers // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* 102241E (2016). Doi: 10.1117/12.2266562.

REFERENCES

1. Berkeley S. Sensor & actuator center 2014 [Online]. Available: <http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/>.
2. Konoplev B.G., Lysenko I.E. and Ezhova O.A. Evolution Criteria Fingers Hardness Electrode MEMS Comb Converters, *Bioscience. Biotechnology research Asia*, 2015, Vol. 12, No. 3.
3. Yuanfeng Zhang, Chupeng Lei, Woo Soo Kim. Design optimized membrane-based flexible paper accelerometer with silver nano ink, *Applied Physics Letters* 103, 073304 (2013). Doi: 10.1063/1.4818734, pp. 073304-1–073304-3.
4. Hierold C. From micro- to nanosystems: mechanical sensors go nano, *Christofer Hierold 2004 J. Micromech. Microeng.* 14, S1, pp. S1-S11.
5. Dao D.V., Nakamura K., Bui T.T., Sugiyama S. Micro/nano-mechanical sensors and actuators based on SOI-MEMS technology, *Adv. Nat. Sci: Nanosci. Nanotechnol.* 2010, 1 013001, pp. 1-10.

6. Konoplev B.G., Pristupchik N.K., Ryndin E.A. A Simulation Method for Displacement Transducers Based on the Tunnelling Effect, *Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra*, 2012, No. 8 (4), pp. 20-26, (In Russian).
7. Boyden E., El Rifai O., Hubert B., Karpman M., Roberts D. A High-Performance Tunneling Accelerometer. MIT Term Project Paper 6.777, Introduction to Microelectromechanical Systems, Spring 1999.
8. Bustillo J.M., Howe R.T., Muller R.S. Surface Micromachining for Microelectromechanical Systems, *Proceedings of the IEEE*, August 1998, Vol. 86, No. 8, pp. 1552-1574.
9. Dong H., Jiaa Y., Haoa Y., Shenb S. A Novel out-of-plane MEMS Tunneling Accelerometer, *Sensors and Actuators A 120*, 2005, pp. 360-364.
10. Prinz V.Ya. Precise semiconductor nanotubes and nanoshells fabricated on (110) and (111) Si and GaAs, *Physica E*, 2004, Vol. 23, pp. 260-268.
11. Denisenko M.A., Konoplev B.G., Isaeva A.S., Lysenko I.E. Integrated Micro-Mechanical Tunneling Accelerometer, *J. Pharm. Sci. & Res.*, 2017, Vol. 9 (10), pp. 2155-2158.
12. Bernardi A., Goni A.R., Alonso M.I., Alsina F., Scheel H., Vaccaro P.O. and Saito N. Probing residual strain in InGaAs/GaAs micro-origami tubes by micro-Raman spectroscopy, *J. Appl. Phys.* 99, 063512 (2006). Doi: 10.1063/1.2183353, pp. 063512-1–063512-6.
13. Chun I.S., Bassett K., Challa A., Li X. Tuning the photoluminescence characteristics with curvature for rolled-up GaAs quantum well microtubes, *Applied Physics Letters*. 96, 251106, 2010, pp. 251106-1–251106-3.
14. Chun I.S., Li X. Controlled Assembly and Dispersion of Strain-Induced InGaAs/GaAs Nanotubes, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, July 2008, Vol. 7, No. 4, pp. 493-459.
15. Prinz A.V., Prinz V.Ya., Seleznev V.A. Semiconductor micro- and nanoneedles for microinjections and ink-jet printing, *Microelectronic Engineering*. 67–68 (2003). pp. 782-788.
16. Nikishkov G.P. Curvature estimation for multilayer hinged structures with initial strains, *Journal of Applied Physics*, 2003, Vol. 94 (8), pp. 5333-5336.
17. Tsui Y.C., Clyne T.W. An analytical model for predicting residual stresses in progressively deposited coatings. Part 2: Cylindrical geometry, *Thin Solid Films*, 1997, Vol. 306, pp. 34-51.
18. Ryndin E.A., Pristupchik N.K. Integrated Micromechanical Tunneling Accelerometer Based on Driven Self-Assembly of Strained GaAs/InAs Layers, *Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences*, 2009, No. 01, pp. 129-134.
19. Konoplev B., Lysenko I., Ryndin E., Ezhova O., Bondarev F. Research of the micromechanical three-axis accelerometer, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 102241B (2016). Doi: 10.1117/12.2266766.
20. Konoplev B., Ryndin E., Lysenko I., Denisenko M., Isaeva A. Highly sensitive devices for primary signal processing of the micromechanical capacitive transducers, *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* 102241E (2016). Doi: 10.1117/12.2266562.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.Е. Лысенко.

Денисенко Марк Анатольевич – Южный федеральный университет; e-mail: dema@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634361374; кафедра конструирования электронных средств; к.т.н.; доцент.

Исаева Алина Сергеевна – e-mail: isaevaas@sfedu.ru; кафедра конструирования электронных средств; к.т.н.; ассистент.

Denisenko Mark Anatolievich – Southern Federal University; e-mail: dema@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634361374; the department of electronic apparatuses design; cand. of eng. sc.; associate professor.

Isaeva Alina Sergeevna – e-mail: isaevaas@sfedu.ru; the department of electronic apparatuses design; cand. of eng. sc.; assistant.