

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 537.331.33

DOI 10.21685/2072-3059-2020-3-6

П. Г. Михайлов, В. В. Смогунов, М. И. Вольников

ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Аннотация.

Актуальность и цели. Актуальность работы обусловлена высокой гетерогенностью элементов и структур современных микроэлектронных преобразователей физических величин, предназначенных для работы в широком диапазоне температур и радиационных излучений. Цель: разработка технологий формирования гетерогенных элементов и структур высокотемпературных преобразователей

Материалы и методы. В качестве методов и средств исследований используется гетерология, физика твердого тела и микросистемной технологии.

Результаты. Разработаны гетерология технологии формирования полупроводниковых 3D-структур на основе легированного поликристаллического кремния.

Выводы. На основе анализа экспериментальных результатов формирования измерительных преобразователей на основе пьезорезисторов определены факторы, влияющие на электрофизические характеристики сенсорных элементов.

Ключевые слова: гетерология, технология, кремний, поликремний, структура, гетерогенность, преобразователь, чувствительный элемент, высокотемпературный, микроэлектронный.

P. G. Mikhaylov, V. V. Smogunov, M. I. Vol'nikov

TECHNOLOGIES FOR HETEROSTRUCTURES FORMATION OF TRANSDUCER

Abstract.

Background. The relevance of the work is due to the high heterogeneity of the elements and structures of modern microelectronic converters of physical quantities, designed to operate in a wide range of temperatures and radiation. The goal of the research is development of technologies for the formation of heterogeneous elements and structures of high-temperature transducers.

© Михайлов П. Г., Смогунов В. В., Вольников М. И., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Materials and methods. Heterology, solid state physics and microsystem technology are used as methods and research tools.

Results. Heterology of the technology for the formation of semiconductor 3D structures based on doped polycrystalline silicon has been developed.

Conclusion. Based on the analysis of experimental results of the formation of piezoresistors made of polycrystalline silicon, factors affecting the electrophysical characteristics of sensor elements are determined.

Keywords: heterology, technology, silicon, polysilicon, structure, heterogeneity, transducer, sensitive element, high temperature, microelectronic.

Введение

Расширение сфер применения приборов в науке, технике и технологиях приводит к необходимости разработки новых материалов и элементов, которые остаются работоспособными в условиях высоких и низких температур, наличия радиации и агрессивных сред [1, 2]. Применительно к измерительным преобразователям (ИП) физических величин (ФВ) это означает необходимость создания новых материалов и технологий формирования многослойных полупроводниковых и пленочных структур, каждый слой которых выполняет свою функцию (изолирующую, проводящую, защитную, измерительную и проч.), а в совокупности – обеспечение корректного измерения высокотемпературной ФВ (например давления, температуры, перемещения и т.д.). Традиционные материалы и технологии изготовления полупроводниковых датчиков на основе монокристаллического кремния (МК) и диффузионных сенсорных элементов, изолированных *p-n*-переходами, обеспечивают работоспособность ИП максимум до +80...100 °С, что значительно сужает их применение [3]. Поэтому необходим поиск и исследование новых материалов, особенно функциональных, а также новых микроэлектронных технологий их использования применительно для ИП ФВ.

Постановка задачи

Таким образом, для достижения поставленной цели, необходимо:

1) выбрать и исследовать электрофизические характеристики (ЭФХ) материалов (особенно функциональных) устойчивых к высоким температурам;

2) выявить физические принципы преобразования, позволяющие обеспечить измерение физической величины в расширенном температурном диапазоне.

3) разработать технологию, обеспечивающую формирование сенсорных элементов и структуры с использованием новых материалов или модернизировать существующую.

Выбор и исследование новых высокотемпературных материалов

Следует отметить, что все материалы в ИП можно условно разделить на силовые, защитные, проводящие, изолирующие и функциональные, при этом основными, которые обеспечивают преобразование измеряемой неэлектрической ФВ в информативную электрическую, являются функциональные [4].

При этом основными критериями выбора функциональных материалов (ФМ) применительно к полупроводникам и полупроводниковым соединениям являются:

1) ширина запрещенной зоны (E_g), например, для МК $E_g = 1,1$ эВ при 300 К, а для алмаза $E_g = 5,5$ эВ при 300 К;

2) технологичность ФМ (сложность, дороговизна, экологичность, выход годных, требования к помещениям, сложность технологического оборудования и проч.);

3) стоимость ФМ и размеры заготовок (диаметр и толщина пластин);

4) номенклатура, стоимость и доступность технологических расходных материалов (кислот, щелочей, газов, растворителей, спецматериалов);

5) потребление энергоресурсов (электроэнергии, воды, тепла и охлаждения);

6) требования к персоналу и обслуживающим службам.

Рассмотрим основные ЭФХ ФМ в приборостроении – применяемые и перспективные [2].

Единственным представителем широкополосного монокристаллического полупроводника является алмаз с шириной запрещенной зоны –5,5 эВ при 300 °С.

Другая группа включает в себя следующие двойные и тройные полупроводниковые соединения:

– монокристаллический кремний $E_g = 1,1$ эВ при 300 К;

– поликристаллический кремний $E_g = 1,8$ эВ при 300 К;

– алмаз $E_g = 5,5$ эВ;

– карбид кремния (β -политип) – β -SiC, $E_g = 2,4$ эВ;

– арсенид галлия (GaAs), $E_g = 1,43$ эВ;

– фосфид галлия (GaP), $E_g = 2,24$ эВ;

– фосфат цинка (ZnP_2), $E_g = 2,05$ эВ (тетрагональная фаза);

– $MgSiP_2$, $E_g = 3,1$ эВ;

– $ZnSiAs_2$, $E_g = 2,15$ эВ;

– $CdSiP_2$, $E_g = 2,2$ эВ.

Из всех перечисленных соединений представляют интерес для использования в ИП: алмаз, карбид кремния и арсенид галлия. Остальная часть ФМ имеет ряд недостатков – начиная от недостаточной стабильности и заканчивая сложностью изготовления и сложными технологиями получения конечного продукта. Поэтому они чаще всего используются в качестве источника и приемника излучения в оптическом диапазоне.

Синтетические алмазы являются очень перспективным ФМ для работы ИП в агрессивных условиях и при высоких температурах. Сочетание уникальных свойств, таких как высокая теплопроводность, термостойкость, устойчивость к агрессивным средам и излучению, делает синтетический алмаз уникальным для изготовления ИП с ЭФХ, недостижимыми для других ФМ.

Другим перспективным ФМ для изготовления высокотемпературных и радиационно стойких ИП и электронных устройств является также карбид кремния (SiC) с политипом 6H (или β -SiC), отличающийся кристаллографией. Данный политип карбида кремния в настоящее время используется для изготовления высокотемпературных датчиков с рабочими температурами до 600 °С [5]. Технология изготовления устройств на основе SiC аналогична технологии изготовления приборов на основе алмаза.

Еще одними из перспективных являются структуры на основе кремния, такие как КНД (кремний на диэлектрике) и КНК (кремний на кремнии), среди которых можно выделить кремний на сапфире (КНС). На основе структуры

КНС изготавливаются полупроводниковые чувствительные элементы (ПЧЭ) ИП механических параметров, работающие до 200–250 °С без охлаждения и являющиеся стойкими к агрессивным средам и радиации [6].

Поликристаллический кремний (ПК), являющийся изотропным по своим ЭФХ, в отличие от МК, используется для изготовления высокотемпературных ИП.

ПК, в отличие от МК, позволяет изготавливать из него чувствительные элементы (ЧЭ), которые не содержат *p-n*-переходов. Применение ионной имплантации (ИИ) бора (B^+) с последующим и термоотжигом позволяет изменять ЭФХ ПК [7]. Варьируя концентрацию легирующей примеси, внедряемой в ПК (модификация ПК) [8, 9], мы можем получить нулевое значение температурного коэффициента сопротивления (ТКС) ПК-резисторов.

Фрагменты полупроводниковых гетероструктур с использованием МК и ПК, изготовленные по разработанной нами технологии и предназначенные для высокотемпературного ИП, представлены на рис. 1.

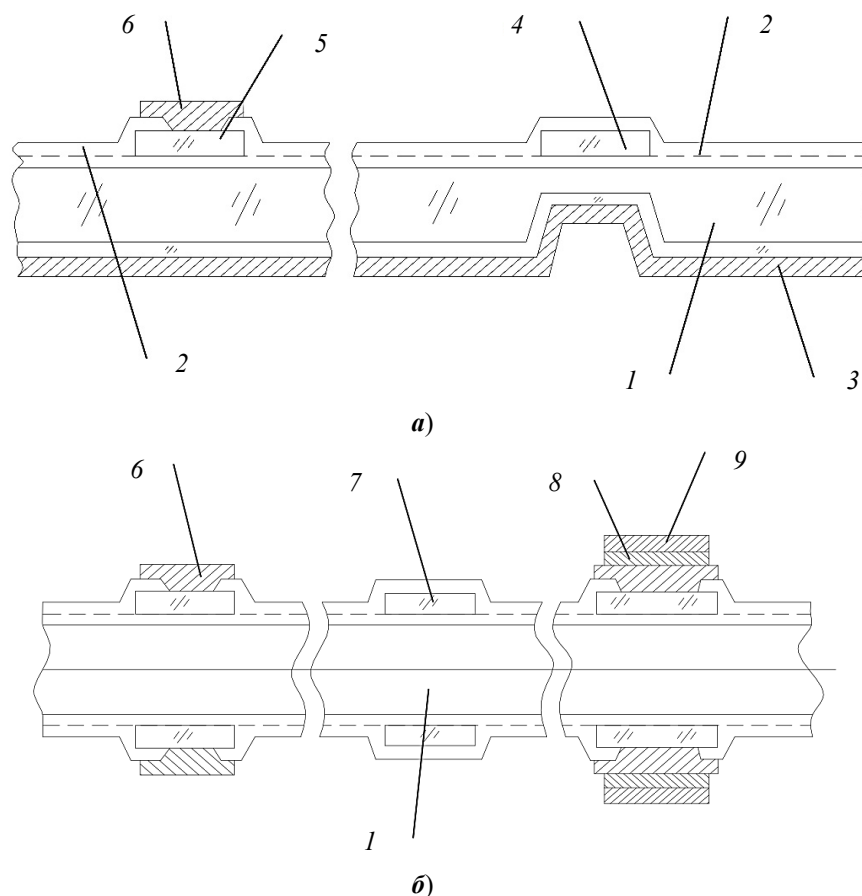


Рис. 1. Фрагменты гетерогенных структур ЧЭ (а) и настроечной платы (б), изготовленных с использованием поликремниевой технологии: 1 – подложка из МК; 2 – изолирующая пленка из SiO_2 ; 3 – Al-экран; 4 – ПК пьезорезистор; 5 – ПК коммутационная шина; 6 – Al – контактная площадка; 7 – ПК-резистор; 8 – подслой ванадия; 9 – Ni контактная площадка

Приведем укороченный маршрутный технологический процесс, разработанный для формирования указанных гетерогенных структур [10]:

1. Профилирование Si заготовки и профилирование ЧЭ.
2. Травление SiO₂ с обеих сторон пластины.
3. Окисление пластин для создания слоя SiO₂ в качестве изолятора между ПК тензорезисторами и подложкой из МК.
4. Создание пленки ПК толщиной $0,6 \pm 0,2$ мкм с использованием диффузионной печи СДО 125/3-15 (оснащенной реактором пониженного давления – РПД) по следующим режимам: температура 630 °С, интервал времени – 90 мин; использование в качестве рабочего газа 5 % смеси моносилана с аргоном.
5. ИИ бора в ПК по двум режимам:
 - 5.1. Дозирование – 110000 импульсов, ускоряющая разность потенциалов – 70 кэВ. Разгонка (активация) примеси с окислением при 1150 °С, выдержка: в потоках O₂ 20 мин и Ar 10 мин.
Удельное поверхностное сопротивление ПК для первого режима было получено в пределах $R_s = (25...26)$ Ом/□.
 - 5.2. Дозирование – 90000 импульсов, ускоряющая разность потенциалов – 70 кэВ. Разгонка (активация) примеси с окислением при 1150 °С, выдержка: в потоках O₂ 20 мин и Ar 10 мин.
Удельное поверхностное сопротивление ПК для второго режима было получено в пределах $R_s = (53...57)$ Ом/□.
6. Фотолитография образования слоя SiO₂ над профилем с непланарной стороны.
7. Фотолитография образования окон под контактом с Al-металлизацией с планарной стороны.
8. Вакуумное термическое осаждение Al-металлизации.
9. Фотолитография образования Al-металлизации.
10. Вжигание алюминия.
11. Контроль электрических параметров ПЧЭ.
12. Напыление металлических защитных пленок с обеих сторон пластины.
13. Фотолитография для создания разделительных зон в металлической пленке с планара.
14. Плазмохимическое разделение пластин на отдельные кристаллы (ПЧЭ).
15. Контроль внешнего вида ПЧЭ.
16. Окончательная проверка параметров и внешнего вида разделенных ПЧЭ.

Проводимость ПК регулируется технологическими методами за счет изменения дозы легирующей примеси, а также изменения энергии легирующих ионов и температуры подложки. Например, на одном кристалле могут образовываться тензо- и терморезисторы, фото- и магниточувствительные сенсорные элементы (СЭ), металлизация, контактные группы и изолирующие зоны. Полученные результаты модификации ПК-резисторов с использованием ИИ применительно к СЭ представлены на рис. 2. Во всех случаях энергия ионного пучка была 70 кэВ, после ИИ структуры были отожжены при 900 °С в течение 30 мин [11].

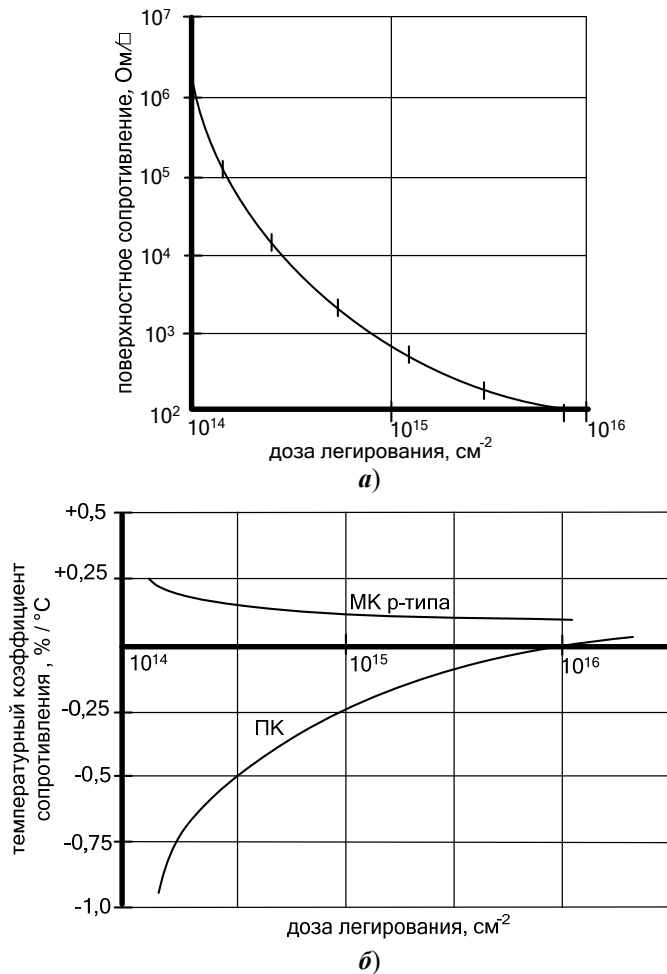


Рис. 2. Регулирование ЭФХ с использованием ИИ: *a* – поверхностного сопротивления (R_s); *б* – ТКС ПК и МК от дозы легирования (D , см⁻²)

После проведения ИИ и разделения кристаллов были измерены номиналы и температурный коэффициент сопротивления ПК-резисторов. ТКС рассчитывали в диапазоне температур от -70 до $+250$ °C по следующей формуле

$$\gamma = \frac{R_{(+250)} - R_{(-70)} \cdot 100 \%}{\Delta T \cdot R_{н.у}},$$

где $R_{(+250)}$, $R_{(-70)}$ – номиналы резисторов при максимальной и номинальной температуре, Ом; $R_{н.у}$ – номинал резисторов при нормальных условиях, Ом; ΔT – принятый диапазон температур, °C; γ – ТКС ПК-резистора, %/°C.

Величина ТКС ПК резистора находится в пределах 0,06...0,07 %/°C.

При формировании пленки ПК и ее легировании наблюдались следующие эффекты: структура ПК сильно зависит от типа легирующей примеси, температуры осаждения и термообработки пленки после формирования.

Пленки ПК, осаждаемые при температуре менее 575 °С, получались аморфными, а при температуре более 625 °С становились поликристаллическими и стали иметь столбчатую структуру.

Кристаллизация и рост зерен ПК происходит при термическом отжиге аморфного или столбчатого ПК.

Важным процессом формирования высокотемпературных ПК ИП является перекристаллизация ПК, которая происходит при нагревании структур. В то же время было установлено, что температура кристаллизации сильно зависит от легированных примесей, вводимых в ПК при образовании пленок. Изменяя состав и концентрацию примесей, можно управлять отдельными ЭФХ ПК [12, 13].

Коэффициенты тензочувствительности (K) к различным концентрациям примесей измерялись экспериментально для ИП силовых параметров, действие которых основано на пьезорезистивном эффекте (рис. 3).

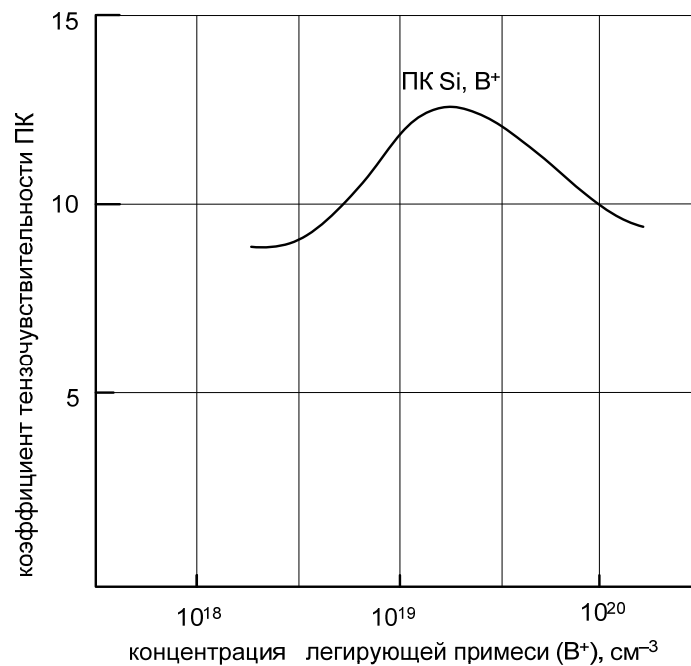


Рис. 3. Зависимость коэффициента тензочувствительности (K) ПК от концентрации N_S (см⁻³) легирующей примеси (B⁺)

Таким образом, для тензоструктур, легированных бором, до концентраций 10²⁰ см⁻³ значения продольного (π_l) и поперечного (π_t) пьезорезистивных коэффициентов составляют:

- π_l для МК = 60, для ПК = 30, для рекристаллизованного ПК (РПК) = 40;
- π_t для МК = 60, для ПК = -4, для РПК = -6.

Фундаментальные пьезорезистивные коэффициенты для ПК, легированного бором до 1,8·10²⁰, имеют следующие значения:

$$\pi_{11} = +11,8 \cdot 10^{-11} \text{ Па}, \quad \pi_{12} = -6,7 \cdot 10^{-11} \text{ Па}, \quad \pi_{44} = +18,6 \cdot 10^{-11} \text{ Па}.$$

Для пленок ПК, легированных фосфором, тензорезисторы обладают только геометрическим тензоэффектом (как у металлопленочных тензорезисторов), а пьезоэффект пропадает.

Таким образом, наиболее перспективными структурами с точки зрения близости к ЭФХ МК по чувствительности являются структуры РПК-SiO₂-МК, в которых пленка РПК отделена от основного материала слоем SiO₂ толщиной 0,1...0,2 мкм. Эта структура аналогична структуре КНС, но, в отличие от последней, позволяет профилировать структуры щелочными или кислотными травящими материалами и получить необходимый диапазон измерения для ЧЭ. Рабочая температура ИП с РПК составляет 250...270 °С. Пьезочувствительность получается на практике близкой к МК. Благодаря оксидной маске при лазерной рекристаллизации, защищающей выбранные элементы от нагрева, можно получить гибридные структуры: РПК-ПК, поликремниевые элементы которых могут выступать в качестве высокоомных резисторов, подгоночных или термокомпенсационных элементов. Использование этой технологии позволяет нам обеспечить изготовление кремниевого ИП, в котором силовые, функциональные и регулировочные элементы, а также защитные материалы (вплоть до корпуса) будут сделаны из модификаций кремния (МК и ПК) и его соединений (SiO₂, Si₃N₄). Такое конструктивно-техническое решение приводит к резкому снижению термической деформации за счет идентичности используемых материалов.

Заключение

На основе анализа экспериментальных результатов формирования ПК пьезорезисторов получены следующие выводы:

1. Факторами, управляющими ЭФХ СЭ на основе ПК, являются доза легирования, мощность лазера и, в меньшей степени, температура подложки.
2. ПК-резисторы с защитной оксидной пленкой более стабильны, а оптимальная толщина пленки колеблется от 0,1 до 0,2 мкм.
3. Изменяя дозу легирования, можно изменить ТКС ПК-пленок с отрицательного почти до нулевого значения.
4. Удельное поверхностное сопротивление слоя уменьшается по мере увеличения дозы легирования одновременно с уменьшением ТКС.
5. На одном ПЧЭ, изменяя дозу легирования, можно формировать термо- и тензоэлементы, позволяя получать комбинированные датчики.

Библиографический список

1. Михайлов, П. Г. Вопросы применения высокоустойчивых материалов в изделиях приборостроения / П. Г. Михайлов, А. П. Михайлов, Е. Д. Фадеев, В. П. Сафонова // Уральский радиотехнический журнал. – 2018. – Т. 2, № 2. – С. 7–25.
2. Михайлов, П. Г. Материалы микроэлектронных датчиков / П. Г. Михайлов, М. Б. Богонин, А. П. Михайлов // Новые промышленные технологии. – 2003. – № 3. – С. 19–21.
3. Warden, K. New intellectual materials and designs. Properties and application Text / K. Warden. – Москва : Technosphere, 2006. – 224 p.
4. Чувствительные элементы высокотемпературных датчиков давления. Материалы и технологии изготовления / П. Г. Михайлов, Е. А. Мокров, Д. А. Сергеев, В. В. Скотников, В. А. Петрин, М. А. Чернецов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – № 4. – С. 204–213.

5. **Jackson, R. G.** The latest sensors. Reference lane, from English / R. G Jackson. – Moscow : Technosphere, 2007. –380 p.
6. **Gosalvez, M. A.** Simulating anisotropic etching of silicon in any etchant: evolutionary algorithm for the calibration of the continuous cellular automaton / M. A. Gosalvez, N. Ferrando, Y. Xing // *J.Micromech. Microeng.* – 2011. – № 6. – P. 72–84.
7. **Глушко, А. А.** Параметры резистивных структур на поликристаллическом кремнии / А. А. Глушко, В. А Шахнов // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение.* – 2011. – № 1. – С. 67–75.
8. **Михайлов, П. Г.** Модификация материалов микроэлектронных датчиков / П. Г. Михайлов // *Приборы и Системы. Управление, Контроль, Диагностика.* – 2003. – № 5.
9. **Кузнецова, М. А.** Физико-технологические основы применения наноразмерной ионно-лучевой технологии при создании изделий нано- и микросистемной техники / М. А. Кузнецова, В. В. Лучинин, А. Ю. Савенко / *Нано- и микросистемная техника.* – 2009. – № 8. – С. 24–32.
10. **Чистяков, Ю. Д.** Физико-химические основы технологии микроэлектроники / Ю. Д. Чистяков, Ю. П. Райнова. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 392 с.
11. **Mikhaylov, P. G.** Mathematical Modeling of Combined Sensor Information / P.G. Mikhaylov, Yu. N. Slesarev, V. A. Chulkov // *Measuring Systems International Journal of Applied Engineering Research.* – 2016. – Vol. 11, № 20. – P. 10332–10337. – URL: <http://www.ripublication.com>
12. Review on Surface Stress-Based Miniaturized Piezoresistive SU-8 Polymeric Cantilever Sensors / Ribu Mathew, A. Ravi Sankar // *Nanomicro Lett.* – 2018. – Vol. 2, № 10. – P. 35. – URL: <https://doi.org/10.1007/s40820-018-0189-1> 3 November 2017 / (Accepted: 2 January 2018).
13. Wearable smart sensor systems integrated on soft contact lenses for wireless ocular diagnostics / J. Kim, M. Kim, Lee et al. // *Nat. Commun.* – 2017. – № 8. – P. 14997.

References

1. Mikhaylov P. G., Mikhaylov A. P., Fadeev E. D., Sazonova V. P. *Ural'skiy radio-tekhnicheskij zhurnal* [Ural Radio Engineering Journal]. 2018, vol. 2, no. 2, pp. 7–25. [In Russian]
2. Mikhaylov P. G., Bogonin M. B., Mikhaylov A. P. *Novye promyshlennye tekhnologii* [New industrial technologies]. 2003, no. 3, pp. 19–21. [In Russian]
3. Warden K. *New intellectual materials and designs. Properties and application Text.* Moscow: Technosphere, 2006, 224 p.
4. Mikhaylov P. G., Mokrov E. A., Sergeev D. A., Skotnikov V. V., Petrin V. A., Chernetsov M. A. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Southern Federal University. Engineering sciences]. 2014, no. 4, pp. 204–213. [In Russian]
5. Jackson R. G. *The latest sensors. Reference lane, from English.* Moscow: Technosphere, 2007, 380 p.
6. Gosalvez M. A., Ferrando N., Xing Y. *J.Micromech. Microeng.* 2011, no. 6, pp. 72–84.
7. Glushko A. A., Shakhnov V. A. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroyeniye* [Bulletin of Bauman State Technical University. Series: Instrument engineering]. 2011, no. 1, pp. 67–75. [In Russian]
8. Mikhaylov P. G. *Pribory i Sistemy. Upravlenie, Kontrol', Diagnostika* [Devices and Systems. Management, control, diagnostics]. 2003, no. 5. [In Russian]
9. Kuznetsova M. A., Luchinin V. V., Savenko A. Yu. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and microsystem technology]. 2009, no. 8, pp. 24–32. [In Russian]

10. Chistyakov Yu. D. *Fiziko-khimicheskie osnovy tekhnologii mikroelektroniki* [Physical and chemical foundations of microelectronic technology]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2010, 392 p. [In Russian]
11. Mikhaylov P. G., Slesarev Yu. N., Chulkov V. A. *Measuring Systems International Journal of Applied Engineering Research*. 2016, vol. 11, no. 20, pp. 10332–10337. Available at: <http://www.ripublication.com>
12. Ribu Mathew, Ravi Sankar A. *Nanometro Lett.* 2018, vol. 2, no. 10, pp. 35. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40820-018-0189-1> 3 November 2017 / (accessed 2 Jan. 2018).
13. Kim J., Kim M., Lee et al. *Nat. Commun.* 2017, no. 8, p. 14997.

Михайлов Петр Григорьевич

доктор технических наук, профессор,
генеральный директор, Научно-
производственный центр «Контрольные
измерительные технологии» (Россия,
г. Пенза, ул. Кустодиева, 23)

E-mail: pit_mix@mail.ru

Mikhaylov Petr Grigor'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
general director, Research and production
center “Control measuring technologies”
(23 Kustodiyeva street, Penza, Russia)

Смогунов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра теоретической и прикладной
механики и графики, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: pnzgu.tpmg@mail.ru

Smogunov Vladimir Vasil'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of theoretical and applied
mechanics and graphics, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Вольников Михаил Иванович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра автоматизации и управления,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)

E-mail: vmi1972@yandex.ru

Vol'nikov Mikhail Ivanovich

Candidate of engineering sciences,
associate professor, sub-department
of automation and control,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova lane/Gagarina
street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Михайлов, Р. А. Технологии формирования гетероструктур измерительных преобразователей / П. Г. Михайлов, В. В. Смогунов, М. И. Вольников // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 3 (55). – С. 58–67. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-3-6.