

ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 621.382.(06)

DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-10

*П. Г. Михайлов, М. А. Чиркина, В. П. Сазонова, Л. А. Маринина, Л. Базарбай***ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВОДОРОДНЫХ
СЕНСОРОВ. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ
ФОРМИРОВАНИЯ***P. G. Mikhailov, M. A. Chirkina, V. P. Sazonova, L. A. Marinina, L. Basarbay***SENSITIVE ELEMENTS OF HYDROGEN SENSORS.
FEATURES OF FORMATION TECHNOLOGIES**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. В связи с ростом потребности в чистых технологиях для микро-и нанoeлектроники, которые можно провести только в атмосфере водорода – газа – восстановителя, необходимы средства контроля его применения для предотвращения утечек и взрывов водородных смесей, соответствующие технологии изготовления сенсоров водорода. **Материалы и методы.** Следует отметить, что процессы изготовления чувствительных элементов водородных сенсоров (ЧЭС) являются технологически очень сложными и трудоемкими процессами с недостаточно высоким выходом годных приборов, так как включают в себя несколько технологических платформ: тонкопленочную, твердотельную и микромеханическую. При проведении технологических операций (ТО) по формированию структур ЧЭС используется сложное, дорогостоящее оборудование, включая магнетронные и электронно-лучевые напылительные установки, реакторы для газофазного осаждения поликремния, нитрида кремния и двуокиси кремния, установки ионного легирования, диффузионные печи. **Результаты.** Разработаны и апробированы при изготовлении экспериментальных образцов специальные ТО и ТП формирования водородочувствительных элементов сенсоров.

A b s t r a c t. Background. Due to the growing demand for clean technologies for micro- and nanoelectronics, which can be carried out only in an atmosphere of hydrogen – a gas – reductant, means of control of its use are necessary to prevent leaks and explosions of hydrogen mixtures corresponding technologies for the manufacture of hydrogen sensors. **Materials and methods.** It should be noted that the manufacturing processes of sensitive elements of hydrogen sensors (SEHS) are technologically very complex and time-consuming processes with insufficiently high yield of suitable devices, since they include several technological platforms: thin-film, solid-state and micromechanical. When carrying out technological operations (TO) on the formation of SEHS structures, complex, expensive equipment is used, including magnetron and electron beam spraying devices, reactors for the gas-phase deposition of polysilicon, silicon nitride and silicon dioxide, ion doping plants, diffusion furnaces. **Results** Special TO and TP for the formation of hydrogen-sensitive sensor elements were developed and tested in the manufacture of experimental samples.

© Михайлов П. Г., Чиркина М. А., Сазонова В. П., Маринина Л. А., Базарбай Л., 2020

К л ю ч е в ы е с л о в а: технология, операция, сенсор, элемент, водород напыление, легирование.

К e y w o r d s: technology, operation, sensor, element, hydrogen deposition, alloying.

Введение

Технология изготовления ЧЭВС представляет собой целый комплекс взаимосвязанных технологических процессов (ТП) и технологических операций (ТО), относящихся к различным технологическим платформам [1, 2]: тонкопленочной, твердотельной и микромеханической.

Применительно к транзисторному ЧЭВС [3] по тонкопленочной технологии формируется водородочувствительная пленка палладий-серебро (Pd-Ag) и алюминиевая (Al) контактная металлизация.

По твердотельной технологии формируются элементы полевого транзистора: ионно-легированные области сток-исток, диффузионный нагреватель, элементы планарного датчика температуры [4, 5].

С применением микромеханической технологии формируется профиль затвора и конфигурация всего ЧЭВС на основе МДП – транзистора с подвешенным затвором [6, 7].

Фактически все эти группы технологий состоят из отдельных, как независимых, так и взаимосвязанных ТП и ТО, выстраиваемых в определенной последовательности согласно разработанным маршрутным ТП.

Разработанные в процессе исследований ТП и ТО были использованы для формирования элементов и структур двух типов ЧЭВС: 1) резистивного на изолирующей подложке и на основе полупроводниковых структур; 2) МДП с подвешенным затвором [3, 8].

Рассмотрим особенности технологий изготовления двух типов ЧЭВС.

1. Технология изготовления тонкопленочного резистивного ЧЭВС на изолирующих подложках (рис. 1).



Рис. 1. Укрупненный маршрутный ТП изготовления ЧЭВС на основе тонкопленочного газочувствительного резистора из сплава палладия с серебром

При изготовлении Pd – тонкопленочного ЧЭВС в качестве основы выбирались подложки: монокристаллический сапфир (лейкосапфир), ситалл, поликор и окисленный кремний. Нагревательный элемент на обратной стороне пластины был изготовлен путем жидкостного травления напыленной пленки никеля. В качестве материалов для контактных площадок к палладиевым резисторам, расположенным на лицевой стороне подложки, использовались либо золото с подслоем титана, либо Al [9].

Технологические операции по изготовлению резистивного ЧЭВС на изоляционных подложках проводятся в последовательности, показанной на рис. 1:

- 1) жидкостная очистка диэлектрических подложек (стандартные ТО);
- 2) напыление на лицевую сторону подложки либо золота с подслоем титана, либо Al, а на обратную сторону – пластины никеля. Толщины напыляемых пленок: Au (0,4 мкм), Ti (100...400 Å), Al (0,6...0,8 мкм), Ni (0,2...0,4 мкм). Нанесение всех указанных пленок производилось термическим вакуумным напылением при давлении остаточных газов $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. Температура подложки 200...250 °С;
- 3) нанесение фоторезиста на обе стороны подложки (стандартные ТО);
- 4) двухсторонняя ф/л для формирования контактных площадок на лицевой стороне и никелевого нагревателя на обратной стороне подложки;
- 5) жидкостное травление поочередно металлических пленок с лицевой и обратной стороны пластины;
- 6) снятие фоторезиста (стандартные ТО);
- 7) химическая обработка перед напылением палладия;
- 8) напыление палладия через биметаллическую маску;
- 9) резка пластин на кристаллы алмазным диском (стандартные ТО);
- 10) установка кристалла ЧЭВС в корпус измерительного модуля.

Исследовались два метода формирования конфигурации газочувствительного резистора и нагревателя:

- 1) масочный метод;
- 2) взрывная фотолитография.

Напыление Pd в обоих случаях проводилось в установке термического вакуумного напыления при давлении остаточных газов $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. В первом случае подложка нагревалась до температуры порядка 250 °С, во втором случае нагрев свыше 100...130 °С не допускается, так как невозможно произвести снятие негативного фоторезиста и проведение взрывной фотолитографии.

В качестве материала чувствительных резисторов был использован сплав Pd с серебром (25 %). Нанесение сплава Pd-Ag (25 %) проводилось термическим вакуумным напылением на подложки двух типов: сапфир и окисленный кремний. Следует отметить, что при термовакuumном методе в напыленной пленке не обеспечивается стехиометрия исходного сплава из-за разных температур испарения Pd и Ag.

2. Технология изготовления резистивного ЧЭВС на основе полупроводниковых структур (рис. 2).

Последовательность ТО следующая:

- окисление кремниевых пластин КДБ-4 (100) в диффузионной печи типа СДО для создания маски из SiO₂ толщиной 0,1...0,3 мкм;
- 1-я ф/л по вскрытию окон в SiO₂ под область истока и стока МДП-транзистора;
- формирование диффузией фосфора областей n-типа;
- стравливание маскирующего слоя SiO₂ из подзатворной области между стоком и истоком;
- тонкое окисление для создания слоя подзатворного диэлектрика;
- вскрытие окон под контакт с металлизацией в областях истока и стока;
- напыление Al (стандартные ТО);
- ф/л по Al для формирования шин металлизации, контактных площадок и затвора (стандартные ТО);
- формирование пленки SiO₂ толщиной 0,2...0,6 мкм пиролизом моносилана в среде кислорода при 350...450 °С;
- 2-я ф/л по созданию маски из фоторезиста над подзатворной областью и проведение травления пленки SiO₂ в растворе HF;

- используя ту же маску из фоторезиста, травят над подзатворной областью Al в травителе для алюминия ($70 \text{ мл H}_3\text{PO}_4 + 1,5 \text{ мл CH}_3\text{CO-OH} + 5 \text{ мл H}_2\text{O}$), при этом Al предотвращает травление подзатворного окисла при вскрытии окна в защитной пленке;
- удаляют фоторезист и проводят 3-ю ф/л для вскрытия окна в защитной пленке под контакт Pd с алюминием;
- напыляют методом электронно-лучевого распыления Pd толщиной $0,05...0,3 \text{ мкм}$ и 4 ф/л формируют затвор из Pd, используя в качестве травителя раствор азотной и соляной кислот (1 ч. $\text{HNO}_3 + 3 \text{ ч. HCl}$);
- 5-я ф/л по формированию в защитной пленке окон на контактных площадках.

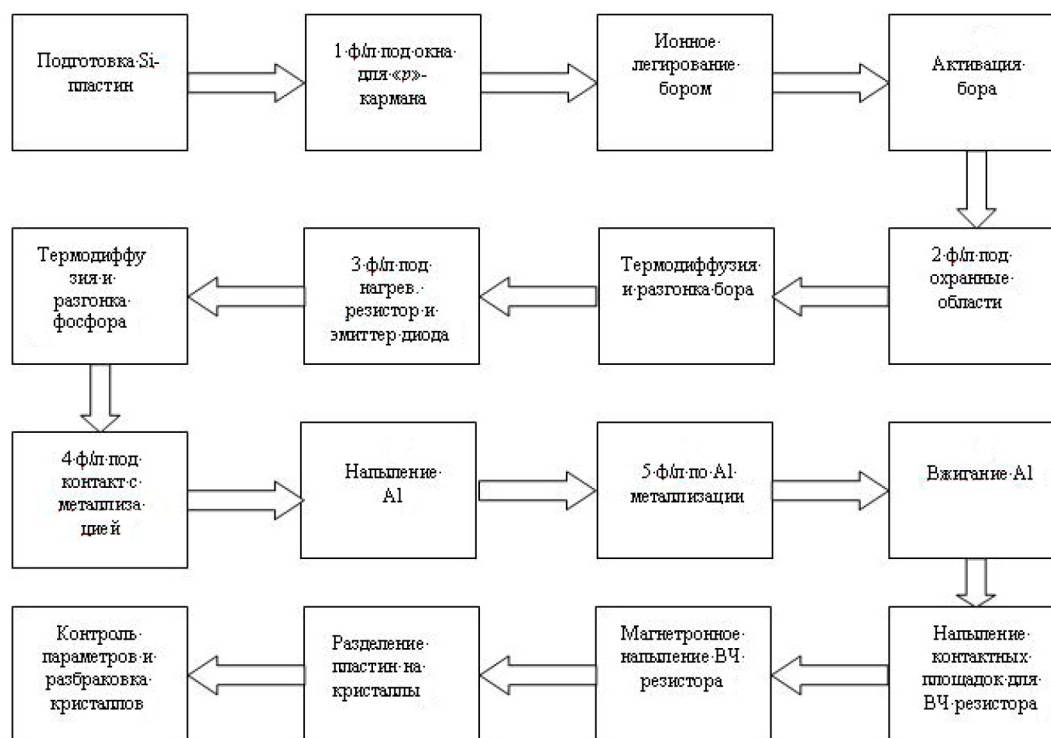


Рис. 2. Увеличенный маршрутный ТП изготовления ЧЭВС на основе МДП – транзистора с подвешенным затвором

Данный способ изготовления ЧЭВС позволяет повысить выход годных структур. Это достигается за счет:

- 1) формирования над областью затвора транзистора временной Al защиты;
- 2) нанесения низкотемпературной пленки SiO_2 , предотвращающей воздействие травителя для Pd на Al металлизацию;
- 3) вскрытия окна под затвор в данной пленке сначала до Al, а затем до подзатворного диэлектрика;
- 4) вскрытия окна в защитной пленке в области контакта Pd с Al и формирования Pd затвора прямой фотолитографией.

При проведении работ по отработке ТП изготовления ЧЭВС для формирования газочувствительных пленок отрабатывались два метода нанесения тонких пленок.

1 метод – термическое испарение в вакууме проволоки из сплава палладия с серебром (PdCr20). Для его реализации использовалась универсальная установка вакуумного напыления типа УВН 71П-3 с резистивным испарителем из молибдена. Из-за значительной разницы в температурах плавления палладия (1828 К) и серебра (1234 К) при расплавлении навески из сплава PdCr20 происходит фракционирование сплава, так как в первую очередь расплавляется и испаряется более легкоплавкая составляющая сплава Ag, а уже потом – более тугоплавкая составляющая Pd. Это подтверждается анализом распределения элементов по толщине тонкой пленки, проведенным с помощью электронной ОЖЕ-спектроскопии, при которой проводился

последний анализ тонкой пленки в процессе ее распыления ионами аргона с энергией 3 кэВ и химический анализ с учетом коэффициентов элементной чувствительности.

Характер распределения элементов Pd и Ag от поверхности пленки к поверхности подложки из кремния (рис. 3) указывает на то, что на поверхности подложки пленка состоит из сплава, содержащего 55 % Pd и 45 % Ag. Ближе к середине толщины пленки содержание Ag доходит до 65 %, а Pd падает до 35 %. Верхний слой пленки состоит из чистого палладия. Такое распределение элементов сплава в пленке приводит к ухудшению адгезии пленки и падению ее чувствительности к водороду.

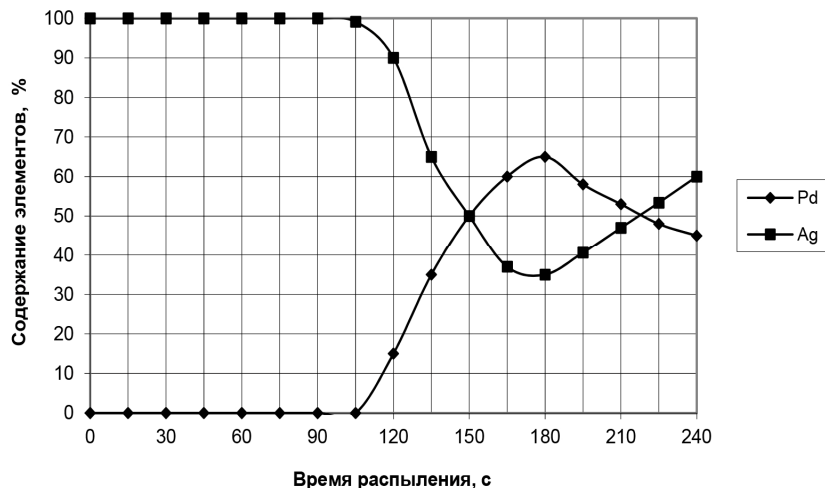


Рис. 3. Распределение элементов по толщине газочувствительной пленки при термовакuumном напылении

2 метод – магнетронное распыление мишени из сплава PdCr20 в плазме аргона с помощью планарного магнетрона. Газочувствительные пленки получали на модернизированной под магнетронное распыление установке типа УВН 71П-3. Толщина формируемых пленок составила 50...60 нм. Полученные пленки исследовались с помощью электронной ОЖЕ-спектрографии на послойный анализ состава тонкой пленки в процессе ее распыления ионами аргона. Характер распределения элементов Pd и Ag от поверхности тонкой пленки к поверхности подложки из кремния (рис. 4) показывает, что состав исходного материала (сплав PdCr20) повторяется в полученной пленке, содержание Pd колеблется в пределах 76...79 %, а содержание Ag в пределах 20...24 %. Полученная данным методом пленка обладает удовлетворительными газочувствительными свойствами.

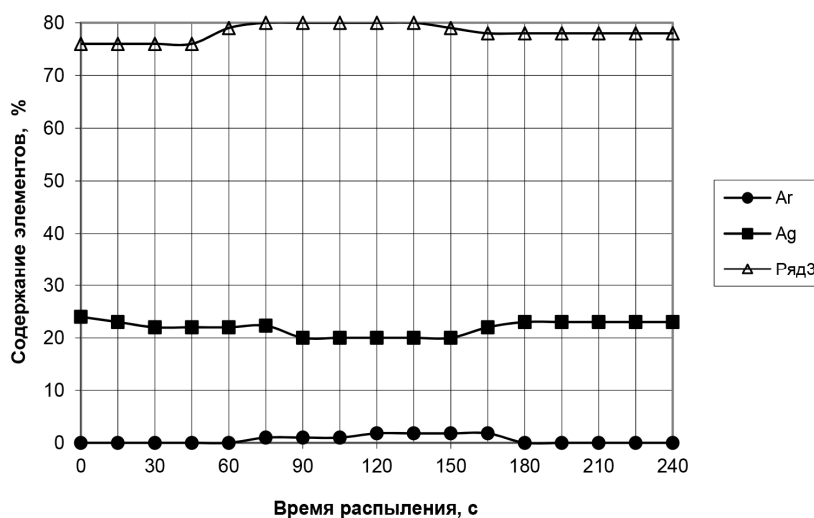


Рис. 4. Распределение элементов по толщине газочувствительной пленки, сформированной магнетронным напылением из мишени PdCr20

Особенности технологии формирования ЧЭВС

Особенностями технологии формирования ЧЭВС, по сравнению с другими полупроводниковыми приборами, в частности с КМОП-транзисторами, состоит в том, что необходимо обеспечить селективность газочувствительной пленки к водороду с одновременной возможностью ее дегазации путем периодического нагрева. При циклическом характере работы пленки она должна не терять своих механических свойств и иметь низкое значение порогового напряжения для обеспечения необходимой чувствительности преобразования.

К таким специальным операциям можно отнести:

– отжиг кремниевых пластин в атмосфере аргона после формирования подзатворного тонкого окисла;

– ионно-плазменное травление Pd-пленки (газовая среда Ar, время травления 100 мин) с использованием маски при из Al, так как скорость травления Pd в несколько раз превышает скорость травления Al;

– после снятия фоторезиста проводилась еще одна ф/л с помощью фотошаблона, используемого для создания окон под тонкий окисел. При этом вскрывались окна в области затвора МДП-транзистора, после чего в травителе для Al вытравливался Al между Pd полосками и под ними. В результате Pd полоски оказываются подвешенными над поверхностью подзатворного диэлектрика на высоте порядка 0,1 мкм;

– далее удалялся фоторезист и проводилось травление Al по всей пластине на толщину тонкого слоя Al (0,1 мкм). Время травления Al на данном этапе должно строго контролироваться, чтобы не была повреждена алюминиевая разводка и контактные площадки, толщина Al в которых составляет 0,8...0,9 мкм.

В процессе отработки технологии было выяснено, что при обычных методах напыления Pd на поверхность SiO₂ получают низкую адгезия Pd пленки, что неприемлемо для датчиков, подвергающихся воздействиям дестабилизирующих факторов, поэтому были исследованы возможные варианты повышения силы сцепления пленки Pd с поверхностью SiO₂. Была опробована технология активации поверхности путем ее сенсбилизации с использованием раствора двухлористого олова (SnCl₂), в результате чего на поверхности диэлектрика создается пленка из ионов двухвалентного олова, которые впоследствии на этапе активации, являются восстановителями для ионов Pd [10, 11].

Для повышения чувствительности и быстродействия ЧЭВС было применено профилирование кремниевого кристалла с использованием химического травления и формируемого стоп-слоя с повышенной концентрацией носителей заряда [12]. Травление осуществлялось на установке анодного травления (рис. 5).

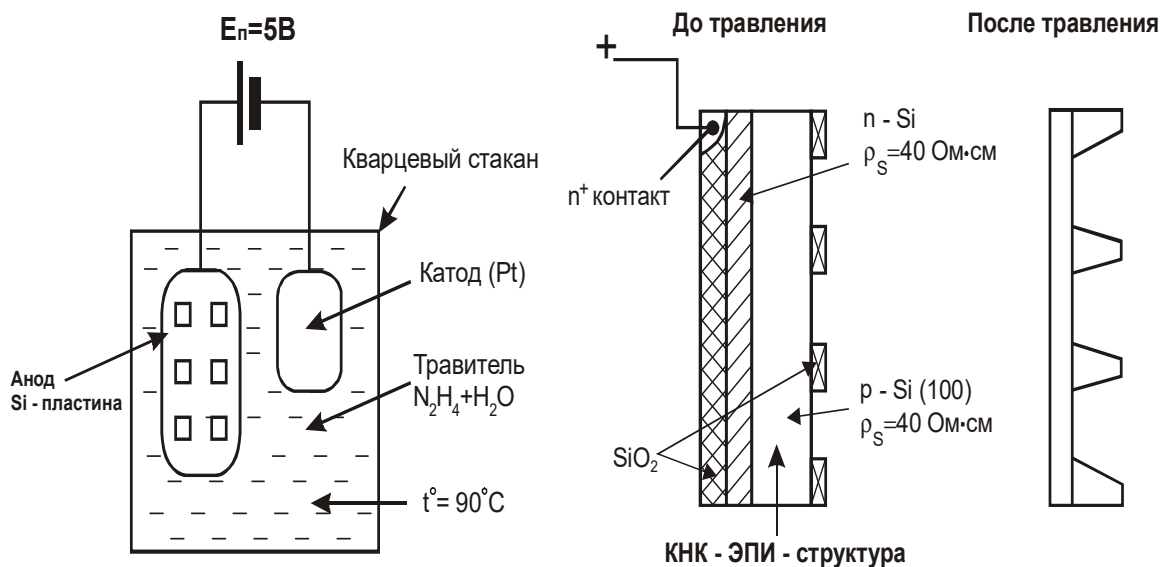


Рис. 5. Технология формирования тонких мембран ЧЭВС МЭД с использованием анодного травления

Как показали исследования и поисковые работы по различным отечественным и иностранным литературным источникам, введение в конструкцию газового датчика различных по избирательности газочувствительных структур, а также сенсоров температуры и влажности позволит создать многофункциональные датчики и проводить их диагностику работы, не снимая с объекта контроля [13–15].

При стендовых испытаниях было определено, что разработанный экспериментальный образец полупроводникового интегрального ЧЭВС на основе газочувствительного резистора из сплава палладия с серебром способен работать при концентрациях водорода от 0,1 до 10,0 объемных %. По МДП – ЧЭВС с подвешенным затвором в настоящее время проводятся исследования по стабилизации электрофизических характеристик сенсорных структур.

Заключение

В результате проведения исследований по отработке и внедрению технологий формирования ВЧЭ были получены следующие результаты:

1. Разработаны и оптимизированы ТП и ТО изготовления элементов и структур ЧЭВС в части:

- изготовления резистивного ЧЭВС на изолирующих подложках;
- резистивного ЧЭВС на основе полупроводниковых структур;
- ЧЭВС на основе МДП-транзистора с подвешенным затвором;
- повышения адгезионной активности поверхности окисла кремния;
- формирования пленок из чистого палладия и его сплава с серебром;
- изготовления подвешенного палладиевого затвора;
- формообразования структур ЧЭВС (анизотропного, изотропного и электрохимического травления);
- определены травители, технологические режимы и полупроводниковые структуры, позволяющие получить самотормозящиеся режимы травления.

2. Разработана топология основных элементов ЧЭВС и изготовлен комплект фотошаблонов.

3. Разработанный полупроводниковый интегральный ЧЭВС на основе газочувствительного резистора из сплава палладия с серебром способен работать при концентрациях водорода от 0,1 до 10,0 объемных %.

По МДП – ЧЭВС с подвешенным затвором в настоящее время проводятся исследования по стабилизации электрофизических характеристик сенсорных структур.

Библиографический список

1. Нанотехнологии в электронике / под ред. Ю. А. Чаплыгина. – Москва : ТЕХНОСФЕРА, 2015. – Вып. 3. – 480 с.
2. Вавилов, В. Д. Микросистемные датчики физических величин : монография / В. Д. Вавилов, С. П. Тимошенко, А. С. Тимошенко. – Москва : ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 471 с.
3. Патент RU 1785049 СССР. Способ изготовления датчиков водорода на МОП-транзисторах / Л. А. Маринина, С. А. Козин ; МКИ: H01L 21/336 ; опубл. 30.12.90.
4. Айнспрук, Н. Плазменная технология в производстве СБИС / Н. Айнспрук, Д. Браун. – Москва : Мир, 1987. – 471 с.
5. Kumar, A. Fabrication of porous silicon filled Pd/SiC nanocauliflower thin films for high performance H₂ gas sensor / A. Kumar, A. Kumar, R. Chandra // Sens. Actuators B Chem. – 2018. – Vol. 264. – P. 10–19.
6. Integrated Temperature and Hydrogen Sensors with MEMS Technology / H.-C. Jiang, M. Huang, Y.-B. Yu, X.-Y. Tian et. all // Sensors. – 2018. – Vol. 18. – P. 94.
7. Hübert, T. Hydrogen sensors – A review / T. Hübert, L. Boon-Brett, G. Black, U. Banach // Sensors and Actuators B Chemical. – 2011. – Vol. 157 (2). – P. 329–352.
8. Основы золь-гель-технологии нанокompозитов / А. И. Максимов, В. А. Мошников, Ю. М. Таиров, О. А. Шилова. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007. – 273 с.
9. Распопов, В. Я. Микромеханические приборы / В. Я. Распопов. – Москва, 2007. – 400 с.
10. Волькенштейн, Ф. Ф. Электронные процессы на поверхности полупроводников при хемосорбции / Ф. Ф. Волькенштейн. – Москва : Наука, 1987. – С. 431.

11. Öztürk, S. Pd thin films on flexible substrate for hydrogen sensor / S. Öztürk, N. Kılınc // *J. Alloys Compd.* – 2016. – Vol. 674. – P. 179–184.
12. Михайлов, П. Г. Формообразование сенсорных элементов и структур микроэлектронных датчиков / П. Г. Михайлов // *Новые промышленные технологии.* – 2004. – № 2. – С. 67–69.
13. Multi-functional sensors for control systems and monitoring / P. Mikhailov, M. Baktybayev, Z. Bayasilova and all // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET).* – 2018. – Vol. 9, iss. 13. – P. 959–967.
14. Mikhajlov, P. G. Mathematical Modeling of Combined Sensor Information / P. G. Mikhajlov, Yu. N. Slesarev, V. A. Chulkov // *Measuring Systems International Journal of Applied Engineering Research.* – 2016. – Vol. 11, № 20. – P. 10332–10337.
15. Development of Technologies, Methods and Devices of the Functional Diagnostics of Microelectronic Sensors Parts and Components / K. A. Ozhikenov, P. G. Mikhailov, R. S. Ismagulova, Zh. K. Azamatova, B. N. Azamatov // *13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (A PEIE).* – 2016. – Vol. 1. – P. 84–90.

References

1. *Nanotekhnologii v elektronike* [Nanotechnology in electronics]. Ed. by Yu. A. Chaplygin. Moscow: TEKhNOSFERA, 2015, iss. 3, 480 p. [In Russian]
2. Vavilov V. D., Timoshenkov S. P., Timoshenkov A. S. *Mikrosistemnye datchiki fizicheskikh velichin: monografiya* [Microsystem sensors of physical quantities: monograph]. Moscow: TEKhNOSFERA, 2018, 471 p. [In Russian]
3. Patent RU 1785049 SSSR. *Sposob izgotovleniya datchikov vodoroda na MOP-tranzistorakh* [Patent RU 1785049 of the USSR. A method of manufacturing a sensor of hydrogen on MOS devices]. L. A. Marina, S. A. Kozin; MKI: H01L 21/336; publ. 30.12.90. [In Russian]
4. Aynspruk N., Braun D. *Plazmennaya tekhnologiya v proizvodstve SBIS* [Plasma technology in the production of VLSI]. Moscow: Mir, 1987, 471 p. [In Russian]
5. Kumar A., Chandra R. *Sens. Actuators B Chem.* 2018, vol. 264, pp. 10–19.
6. Jiang H.-C., Huang M., Yu Y.-B., Tian X.-Y. et al. *Sensors.* 2018, vol. 18, p. 94.
7. Hübert T., Boon-Brett L., Black G., Banach U. *Sensors and Actuators B Chemical.* 2011, vol. 157 (2), pp. 329–352.
8. Maksimov A. I., Moshnikov V. A., Tairov Yu. M., Shilova O. A. *Osnovy zol'-gel'-tekhnologii nanokompozitov* [Fundamentals of sol-gel technology of nanocomposites]. Saint-Petersburg: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2007, 273 p. [In Russian]
9. Raspopov V. Ya. *Mikromekhanicheskie pribory* [Micromechanical devices]. Moscow, 2007, 400 p. [In Russian]
10. Vol'kenshteyn F. F. *Elektronnye protsessy na poverkhnosti poluprovodnikov pri khemosorbtsii* [Electronic processes on the surface of semiconductors during chemisorption]. Moscow: Nauka, 1987, p. 431. [In Russian]
11. Öztürk S., Kılınc N. *J. Alloys Compd.* 2016, vol. 674, pp. 179–184.
12. Mikhajlov P. G. *Novye promyshlennye tekhnologii* [New industrial technology]. 2004, no. 2, pp. 67–69. [In Russian]
13. Mikhailov P., Baktybayev M., Bayasilova Z. and all. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET).* 2018, vol. 9, iss. 13, pp. 959–967.
14. Mikhajlov P. G., Slesarev Yu. N., Chulkov V. A. *Measuring Systems International Journal of Applied Engineering Research.* 2016, vol. 11, no. 20, pp. 10332–10337.
15. Ozhikenov K. A., Mikhailov P. G., Ismagulova R. S., Azamatova Zh. K., Azamatov B. N. *13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (A PEIE).* 2016, vol. 1, pp. 84–90.

Михайлов Петр Григорьевич

доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова/Гагарина 1а/11)
E-mail: pit_mix@mail.ru

Mikhaylov Petr Grigor'evich

doctor of technical sciences, professor,
leading researcher,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova/Gagarina street, Penza, Russia)

Чиркина Марина Александровна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства
(Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)
E-mail: chm-77@mail.ru

Сазонова Вера Петровна

сотрудница,
Технологический университет
(Россия, Московская обл., г. Королев,
ул. Гагарина, 42)
E-mail: verochka.86@list.ru

Маринина Лариса Александровна

кандидат технических наук, преподаватель,
Пензенский филиал Военной академии
материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева
(Россия, г. Пенза, Военный городок, 1)
E-mail: pit_mix@mail.ru

Базарбай Лашын

докторантка,
Казахский национальный технический
университет им. К. Сатпаева
(Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22)
E-mail: lashyn_7754@mail.ru

Chirkina Marina Aleksandrovna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of Information and computer systems,
Penza State University
of Architecture and Construction
(28 Herman Titov street, Penza, Russia)

Sazonova Vera Petrovna

collaborator,
University of Technology
(42 Gagarina street, Korolev, Moscow region, Russia)

Marinina Larisa Aleksandrovna

candidate of technical sciences, lecturer,
Penza branch of Military Academy
Logistics Support named after general
of the army A. V. Khruleva
(1 Voenny gorodok, Penza, Russia)

Bazarbay Lashyn

doctoral student,
Kazakh National Technical University
named after K. Satpayev
(22 Satpaeva street, Almaty, Kazakhstan)

Образец цитирования:

Чувствительные элементы водородных сенсоров. Особенности технологий формирования /
П. Г. Михайлов, М. А. Чиркина, В. П. Сазонова, Л. А. Маринина, Л. Базарбай // Измерение. Монито-
ринг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 80–88. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-10.