

С. А. Гурин, Е. А. Печерская, Т. О. Зинченко, А. В. Фимин, К. О. Николаев

КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ БЫСТРОПЕРЕМЕННОГО И СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

S. A. Gurin, E. A. Pecherskaya, T. O. Zinchenko, A. V. Fimin, K. O. Nikolaev

STRUCTURES AND TECHNOLOGICAL REGIMES OF FORMING SENSITIVE ELEMENTS OF MICROELECTRONIC SENSORS OF FAST ALTERNATING AND STATIC PRESSURE

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Прогресс в областях микроэлектроники и МЭМС-технологий, обширное применение контрольно-измерительной аппаратуры обеспечили разработку и изготовление датчиков и систем различного целевого назначения, уровня сложности, принципов работы, преобразования энергии и сигнала. МЭМС сегодня – это сложнейшие физические устройства, представляющие совокупность взаимодействующих элементов, интегрированных в единую систему. Использование датчиковой аппаратуры с применением пьезоэлектрических тензорезистивных модулей позволяет регистрировать быстропеременное и статическое давление. Целью работы является разработка конструкций, подбор материалов и описание технологических процессов изготовления чувствительных элементов датчиков давления. **Материалы и методы.** Один из предложенных вариантов чувствительного элемента датчика динамического давления содержит пленки на основе полярных диэлектриков AlN и ZnO, которые в нормальных условиях кристаллизуются в гексагональную решетку типа вюрцит или цирконата титаната свинца с пьезоэлектрическими свойствами, обладающего структурой типа перовскит. Другой чувствительный элемент датчика и быстропеременного и статического давления содержит кремниевую подложку со сформированными платиновыми дорожками, интегрированными пьезоэлектрическими емкостными структурами с полупроводниковыми тензорезисторами. **Результаты.** Предложены два варианта конструкций чувствительного элемента датчика быстропеременного и статического давления: а) структура на базе кремниевой подложки с сформированными платиновыми дорожками, интегрированными пьезоэлектрическими емкостными структурами с полупроводниковыми тензорезисторами; б) структура на основе крестообразной балки, которая расположена по периметру опорного кольца со сформированной мостовой схемой из металлопленочных тензорезисторов и пьезоэлектрических емкостных структур на основе ЦТС. **Выводы.** Обоснован выбор материалов и описаны технологические режимы формирования гетерогенных конструкций чувствительных элементов датчиков быстропеременного и статического давления. Представленные структуры позволяют регистрировать широкий диапазон как статических, так и динамически изменяющихся значений давлений с малыми отклонениями от действительных величин. Результаты моделирования подтверждают возможность изготовления опытных образцов чувствительных элементов.

A b s t r a c t. Background. Progress in the fields of microelectronics and MEMS technologies, the extensive use of instrumentation, ensured the development and manufacture of sen-

sors and systems for various purposes, level of complexity, principles of operation, and energy and signal conversion. MEMS today is the most complex physical devices, representing a set of interacting elements integrated into a single system. The use of sensor equipment with the use of piezoelectric strain-resistant modules allows you to register fast-variable and static pressure. The aim of the work is the development of structures, selection of materials and description of technological processes for the manufacture of sensitive elements of pressure sensors. **Materials and methods.** One of the proposed options for the dynamic pressure sensor element contains films based on polar dielectrics AlN and ZnO, which under normal conditions crystallize into a hexagonal lattice of the wurtzite type, or lead titanate zirconate with piezoelectric properties, which has a perovskite structure. Another sensitive element of the sensor and the rapidly varying and static pressure contains a silicon state with formed platinum tracks, integrated piezoelectric capacitive structures with semiconductor strain gages. **Results.** Two versions of the sensitive element of the quick-variable and static pressure sensor are proposed: a) a silicon-based structure with formed platinum tracks integrated with piezoelectric capacitive structures with semiconductor strain gauges; b) a cruciform beam-based structure, which is located along the perimeter of the support ring with a formed bridge circuit of metal-film strain gauges and piezoelectric capacitive structures based on PZT. **Conclusions.** The choice of materials is substantiated and the technological regimes of the formation of heterogeneous structures of sensitive elements of sensors of quick-variable and static pressure are described. The presented structures allow to register a wide range of both static and dynamically changing pressure values with small deviations from the actual values. The simulation results confirm the possibility of making prototypes of sensitive elements.

К л ю ч е в ы е с л о в а: чувствительный элемент, давление, пьезоэлектрические тонкие пленки, тензорезистор.

К e y w o r d s: sensitive element, pressure, thin piezoelectric films, strain gauge.

Введение

Усиление требований, предъявляемых к техническим устройствам и системам, обуславливает рост объемов измерений и количества разнородных исследуемых параметров, преобразуемых с помощью первичных датчиков [1–4]. При этом датчиковые устройства должны обладать не только расширенными функциональными возможностями, но и оптимизированными, не загроможденными конструкциями. В таких условиях многофункциональные чувствительные элементы с интегрированными тонкими тензорезистивными и пьезоэлектрическими пленками способны выполнять поставленные задачи, связанные с регистрацией максимального диапазона определяемых давлений. Подобные сборки обладают малой геометрической конструкцией, теоретическую модель которой возможно изготовить промышленным путем. Создание таких конструкций стало возможным благодаря технологическому прорыву в области синтеза тонких сегнетоэлектрических пленок ЦТС, а также полярных диэлектриков ZnO и AlN [5–16].

Применяемые материалы

Выращивание высоко текстурированных пьезоэлектрических тонких пленок ZnO и AlN с четко определенными толщинами по всей подложке в настоящее время реализуется на промышленном уровне [17].

Для определения динамического давления используются пленки на основе полярных диэлектриков AlN и ZnO, которые в нормальных условиях кристаллизуются в гексагональную решетку типа вюрцит (В4) или цирконата титаната свинца (ЦТС) с пьезоэлектрическими свойствами, обладающего структурой типа перовскит. В табл. 1 представлены эффективные параметры тонких пьезоэлектрических пленок.

Таблица 1

Параметры пьезоэлектрических пленок

Параметр	Нитрид алюминия AlN	Оксид цинка ZnO	Цирконат титаната свинца ЦТС
$\epsilon_{33,f}$	8–12	10,4	900–1300
$d_{33,f}$, пКл/Н	10–12	3,4–3,9	90–110
$k_{n,f}^2$	0,06–0,085	0,065–0,11	0,1–0,20
Плотность, г/см ³	5,68	3,26	7,5–7,6
Модуль Юнга, ГПа	110–150	260–380	60–80

Тонкие пленки ЦТС с пьезоэлектрическими свойствами обладают структурой типа перовскит. Спонтанный электрический дипольный момент ЦТС пленок может быть переориентирован между определенными кристаллографически стабильными состояниями с помощью соответствующих уровней электрического поля, не приводящими к диэлектрическому пробою. В перовскит структуре АВО₃, где А – двухвалентный ион, В – четырехвалентный ион, кубическая решетка может подвергаться искажениям при температурах ниже температуры Кюри. Эти искажения приводят к сдвигу октаэдрально ориентированных катионов от центра структуры. Соответственно, создается дипольный момент между центром негативного заряда, созданного кислородным октаэдром и центром положительного заряда, созданного катионной субрешеткой. Сдвиги позиции А-ионов Pb + 2 так же, как и В-ионов Zr + 4 и Ti + 4, определяют свойства диполей ЦТС Pb(ZrxTi1-x)O₃ [2].

Значения пьезоэлектрических параметров тонких перовскитовых пленок ЦТС превосходят аналогичные параметры AlN и ZnO. Однако стабильность характеристик пьезоэлектрических параметров полярных диэлектриков значительно выше и их получение освоено гораздо шире, что в свою очередь накладывает ограничения на применение пленок ЦТС. Для промышленного получения тонких пьезоэлектрических пленок ЦТС требуется решить ряд фундаментальных задач: разработка физических основ технологии изготовления низкоразмерных пьезоэлектрических пленок; изучение особенностей пьезоэлектрического состояния и механизмов переключения спонтанной поляризации; создание условий устойчивого во времени поляризованного состояния [3, 8, 9]. Причем дальнейшая интеграция пьезоэлектрических перовскит пленок с отработанными режимами нанесения с тензорезистивными полупроводниковыми датчиками давления ограничена высокими температурами изготовления чувствительных элементов.

Конструкция чувствительного элемента датчика с интегрированными пьезоэлектрическими и тензорезистивными пленками

На рис. 1 представлена модель чувствительного элемента датчика измерения быстропременного и статического давления, построенного на базе кремниевой подложки со сформированными платиновыми дорожками, интегрированными пьезоэлектрическими емкостными структурами с полупроводниковыми тензорезисторами.

Конденсаторные пьезоэлектрические структуры сформированы в центре чувствительного элемента, на периферии жесткого центра. Тензорезисторы сжатия и растяжения расположены по периметру мембраны в зонах наибольшей деформации. Они изготовлены по отработанной технологии плазмохимического осаждения поликристаллического кремния. Терморезистор сформирован при помощи ионной имплантации.

Дальнейшее изготовление кристалла чувствительного элемента проводится методом анодного срачивания кремния со стеклом при температурах выше 500 °С и напряжении, подаваемом на структуру, порядка нескольких сотен вольт. Это неизбежно приведет к переориентации поляризации тонких пленок ЦТС. В качестве тонких пьезоэлектрических пленок целесообразно использовать оксид цинка или нитрид алюминия.

Текстурированные пьезоэлектрические пленки AlN, используемые в качестве приборного слоя, получены при ионно-лучевом распылении мишени из Al в аргоново-азотной смеси на модернизированной установке ионно-лучевого напыления при остаточном давлении от 3 до 5·10⁻⁵ Па с целью исключения геттерирования реакционного газа, которое проявляется при

магнетронном распылении в результате излучения плазмы. При ионно-лучевом распылении мишень и подложка находятся вне плазмы, что качественно улучшает свойства структуры [18]. Температура подложки варьировалась от 150 до 350 °С. Текстуры с удовлетворительными свойствами формируются при 350 °С. Давление рабочей смеси в вакуумной камере поддерживалось в диапазоне от 1 до $3 \cdot 10^{-3}$ Па в соотношении газов $\text{Ar} : \text{N}_2 = 1:1$. При уменьшении процентного соотношения аргона наблюдается снижение скорости распыления материала мишени и ухудшение свойств осаждаемой пленки. Это связано с химической активностью азота, вступающего в соединение с материалом мишени на ее поверхности, и недостаточной энергией бомбардирующих ионов по сравнению с кинетической энергией ионов аргона для интенсивного выбивания атомов и конгломератов атомов (кластеров) из мишени [18].

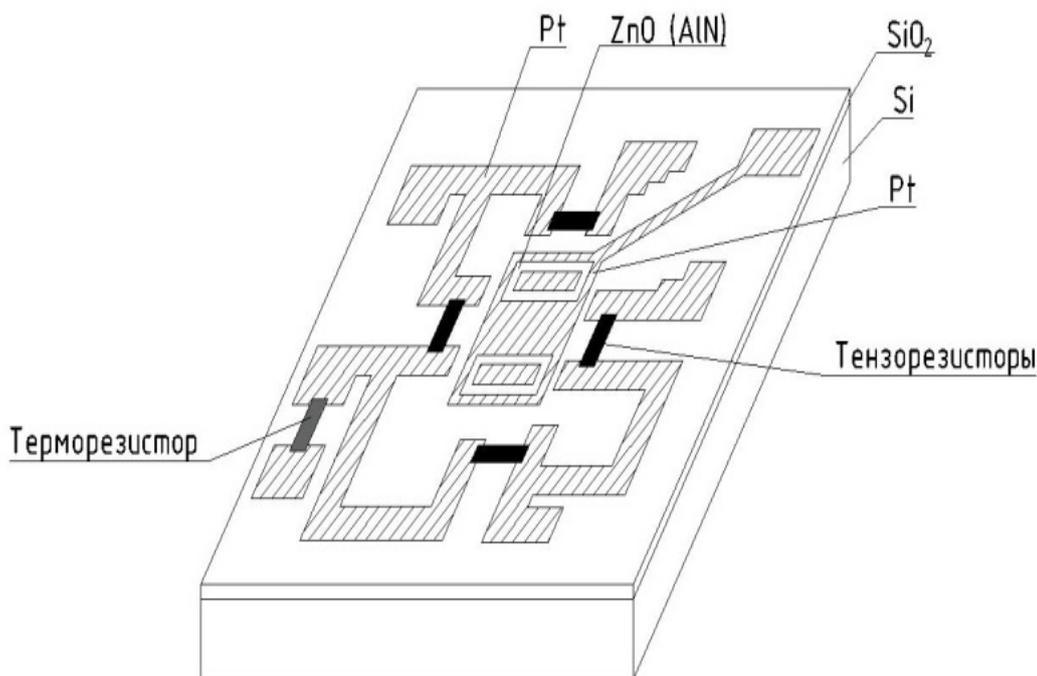


Рис. 1. Модель чувствительного элемента датчика давления

К недостаткам ионно-лучевого метода напыления AlN можно отнести относительно низкую воспроизводимость свойств получаемых пленок и дефективность структур вследствие выбивания кластеров (конгломератов атомов), которые ухудшают текстуру пленки.

Тонкие пленки ZnO с пьезоэлектрическими свойствами получены реактивным ВЧ-магнетронным распылением мишени из цинка Zn (99,9 %) в газовой смеси $\text{Ar} + 65\% \text{O}_2$ при давлении в камере от 1 до $3 \cdot 10^{-3}$ Па. Температура подложки составила 220 °С, мощность ВЧ разряда – 100 Вт. Применение ВЧ магнетронного распыления мишени из Zn (99,9 %) вместо распыления на постоянном токе вызвано «отравлением» мишени кислородом и образованием поверхностного диэлектрического слоя, способствующего возникновению поверхностного заряда, уменьшающего скорость распыления. К тому же при ВЧ распылении мишени ZnO зачастую происходит ее растрескивание в результате перегрева.

Исключение термомеханических напряжений проводилось путем проведения нагрева и остывания в обоих случаях со скоростью не более 3°С/мин. Напыление пьезоэлектрических структур в комбинации с отработанной кремниевой технологией получения тензорезисторов можно проводить как перед формированием тензорезисторов, так и после.

Конструкция чувствительного элемента с интеграцией тонких пьезоэлектрических пленок ЦТС и металлопленочных тензорезисторов

Другим вариантом чувствительного элемента датчика является крестообразная балка, расположенная по периметру опорного кольца, на которой сформирована мостовая схема из металлопленочных тензорезисторов и пьезоэлектрических емкостных структур на основе ЦТС

(рис. 2). Балка выполнена из упругого сплава с высоким модулем упругости 36НХТЮ. В данной структуре тензорезисторы сформированы по технологии термовакuumного испарения сплава X20Н75Ю. Тонкие пленки ЦТС формируются ВЧ распылением из керамической мишени ЦТС ($\text{Pb1}, 2\text{ZrO}, 52\text{TiO}, 48\text{O}_3$) при мощности 300 Вт, в потоке $\text{Ar} - \text{O}_2$ (1:1).

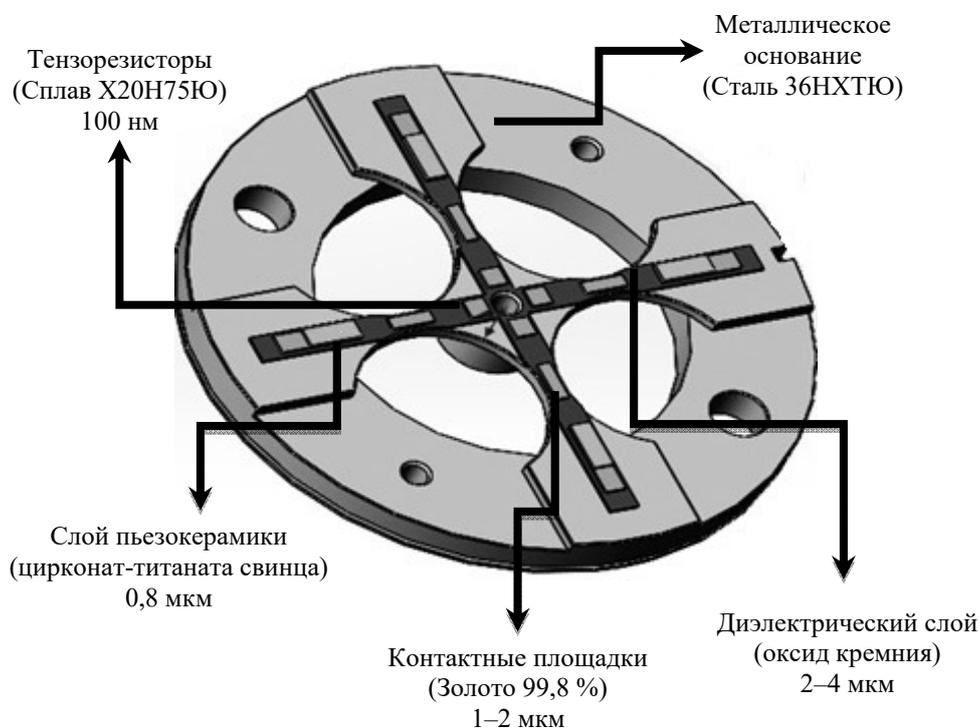


Рис. 2. Чувствительный элемент с интеграцией тонких пьезоэлектрических пленок ЦТС и металлопленочных тензорезисторов

Состав соответствует ромбоэдрическому твердому раствору, примыкающему к морфотропной фазовой границе. Потери свинца компенсировались добавлением 10 mol. % PbO . Температура осаждения составила 400 °С, толщина пленки соответствует диапазону от 0,5 до 0,8 мкм, температура отжига равна 570 °С. Тензорезисторы перед напылением ЦТС пленки пассивировались пленкой Si_3N_4 , полученной методом низкотемпературного плазмохимического осаждения, в целях исключения внедрения загрязняющих примесей процесса распыления ЦТС мишени, приводящей к деградации тензорезисторов. Далее формировались верхние обкладки из структуры «титан-золото» методом резистивного испарения аналогично нижним обкладкам.

Дальнейшая сборка чувствительного элемента осуществляется механическим способом без высоких нагревов, способных повлиять на поляризованное состояние пленки ЦТС. Применение полярных диэлектриков в указанной структуре не обосновано в связи с низким пьезомодулем пленок, что в совокупности с малым ходом балки из упругого сплава не вызовет должного выходного сигнала.

Заключение

Предложены конструкции чувствительных элементов датчиков быстропеременного и статического давления с интегрированными пьезоэлектрическими и тензорезистивными пленками и чувствительного элемента с интеграцией тонких пьезоэлектрических пленок ЦТС и металлопленочных тензорезисторов.

Представленные структуры позволяют регистрировать широкий диапазон как статических, так и динамически изменяющихся значений давлений с малыми отклонениями от действительных величин. При этом результатами моделирования подтверждается возможность изготовления опытных образцов чувствительных элементов.

Библиографический список

1. Intelligent System for Active Dielectrics Parameters Research / E. A. Pecherskaya, P. E. Golubkov, A. V. Fimin, T. O. Zinchenko, A. V. Pechersky, J. V. Shepeleva // *Procedia Computer Science*. – 2018. – Vol. 132. – P. 1163–1170
2. Pb displacements in Pb(Zr,Ti)O₃ perovskites / W. L. Warren, J. Robertson, D. Dimos, B. A. Tuttle, G. E. Pike, D. A. Payne // *Phys. Rev.* – 1996. – B 53. – P. 3080–3087.
3. Воротилов, К. А. Интегрированные сегнетоэлектрические устройства / К. А. Воротилов, В. М. Мухортов ; под ред. чл.-корр. РАН А. С. Сигова. – Москва : Энергоатомиздат, 2011. – 175 с.
4. Vorotilov, K. A. Ferroelectric memory / K. A. Vorotilov, A. S. Sigov // *Phys. Solid State*. – 2012. – Vol. 54(5). – P. 894.
5. Mishina, E. D. Ferroelectric in planar geometry: fabrication and perspectives for integration / E. D. Mishina, V. M. Muhortov, A. S. Sigov // *Integrated ferroelectrics*. – 2009. – Vol. 106 (1). – P. 1–10.
6. Crystallization of thin polycrystalline pzt films on si/sio₂/pt substrates / I. P. Pronin, E. Yu. Kaptelov, S. V. Senkevich, V. A. Klimov, N. A. Zaitseva, T. A. Shaplygina, V. P. Pronin, S. A. Kukushkin // *Physics of the solid state*. – 2010. – Vol. 52 (1). – P. 124–128.
7. Quality-enhanced AlN epitaxial films grown on c-sapphire using ZnO buffer layer for SAW applications / Fu Sulei, Li Qi, Gao Shuang, Wang Guangyue, Zeng Fei, Pan Feng // *Applied Surface Science*. – 2017. – Vol. 402. – P. 392–399.
8. Pyroelectric and piezoelectric responses of thin aln films epitaxy-grown on a sic/si substrate / S. A. Kukushkin, A. V. Osipov, O. N. Sergeeva, D. A. Kiselev, A. A. Bogomolov, A. V. Solnyshkin, E. Yu. Kaptelov, S. V. Senkevich, I. P. Pronin // *Physics of the solid state*. – 2016. – Vol. 58 (5). – P. 967–970.
9. Formation mechanisms and the orientation of selfpolarization in PZT polycrystalline thin films / I. P. Pronin, S. A. Kukushkin, V. V. Spirin // *Materials Physics and Mechanics*. – 2017. – Vol. 30. – P. 20–34.
10. Modeling of Dependence of Dielectric Parameters of Double-layer Ferroelectric Structure on Temperature and Layers Thickness / E. A. Pecherskaya, T. O. Zinchenko, P. E. Golubkov, A. V. Pechersky, A. V. Fimin, K. O. Nikolaev // *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. – Moscow, 2018. – P. 1–4.
11. Pecherskaya, E. A. Automated method of measuring the temperature dependences of the dielectric parameters of ferroelectrics with second kind phase transition. *Journal of Physics* / E. A. Pecherskaya, D. V. Ryabov, J. V. Shepeleva, R. M. Pecherskaya // *Conference Series*. – 2014. – Vol. 541. – P. 012012.
12. Печерская, Е. А. Метрологические аспекты исследования активных диэлектриков для микро- и наноиндустрии / Е. А. Печерская // *Нано- и микросистемная техника*. – 2007. – № 7. – С. 41–44.
13. Controlling the temporal instability of the dielectric parameters of ferroelectrics / E. A. Pecherskaya, V. A. Solov'ev, A. M. Metal'nikov, Y. A. Varenik, I. M. Gladkov, D. V. Ryabov // *Semiconductors*. – 2013. – Т. 47, № 13. – С. 1720–1722.
14. Печерская, Е. А. Метрологические аспекты модели активного диэлектрика / Е. А. Печерская, Д. В. Рябов, Н. Д. Якушова // *Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий*. – 2012. – № 1. – С. 208–213.
15. Software-Hardware Complex for Measurement and Control of Ferroelectrics Parameters / E. A. Pecherskaya, D. V. Artamonov, V. I. Kondrashin, P. E. Golubkov, O. V. Karpanin, T. O. Zinchenko // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 225. – P. 012254. – DOI 10.1088/1757899X/225/1/012254.
16. Контроль временной нестабильности диэлектрических параметров сегнетоэлектриков / Е. А. Печерская, В. А. Соловьев, А. М. Метальников, Ю. А. Вареник, И. М. Гладков, Д. В. Рябов // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. – 2013. – № 2 (100). – С. 84–88.
17. MEMS Materials and Processes Handbook Springer Science + Business Media, LLC 2011. – DOI: 10.1007/978-0-387-47318-5
18. Volokhov, I. V. Study of the properties of high-sensitivity thermally-stable thin-film resistance strain gauges for integral pressure sensors / I. V. Volokhov, S. A. Gurin, I. R. Vergazov // *Measurement techniques*. – 2016. – Vol. 59. – P. 80–86.

References

1. Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Fimin A. V., Zinchenko T. O., Pechersky A. V., Shepeleva J. V. *Procedia Computer Science*. 2018, vol. 132, pp. 1163–1170
2. Warren W. L., Robertson J., Dimos D., Tuttle B. A., Pike G. E., Payne D. A. *Phys. Rev.* 1996, B 53, pp. 3080–3087.
3. Vorotilov K. A., Mukhortov V. M. *Integrirovannye segnetoelektricheskie ustroystva* [Integrated ferroelectric devices]. Moscow: Energoatomizdat, 2011, 175 p. [In Russian]

4. Vorotilov K. A., Sigov A. S. *Phys. Solid State*. 2012, vol. 54(5), p. 894.
5. Mishina E. D., Muhortov V. M., Sigov A. S. *Integrated ferroelectrics*. 2009, vol. 106 (1), pp. 1–10.
6. Pronin I. P., Kaptelov E. Yu., Senkevich S. V., Klimov V. A., Zaitseva N. A., Shaplygina T. A., Pronin V. P., Kukushkin S. A. *Physics of the solid state*. 2010, vol. 52 (1), pp. 124–128.
7. Fu Sulei, Li Qi, Gao Shuang, Wang Guangyue, Zeng Fei, Pan Feng *Applied Surface Science*. 2017, vol. 402, pp. 392–399.
8. Kukushkin S. A., Osipov A. V., Sergeeva O. N., Kiselev D. A., Bogomolov A. A., Solnyshkin A. V., Kaptelov E. Yu., Senkevich S. V., Pronin I. P. *Physics of the solid state*. 2016, vol. 58 (5), pp. 967–970.
9. Pronin I. P., Kukushkin S. A., Spirin V. V. *Materials Physics and Mechanics*. 2017, vol. 30, pp. 20–34.
10. Pecherskaya E. A., Zinchenko T. O., Golubkov P. E., Pechersky A. V., Fimin A. V., Nikolaev K. O. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. Moscow, 2018, pp. 1–4.
11. Pecherskaya E. A., Ryabov D. V., Shepeleva J. V., Pecherskaya R. M. *Conference Series*. 2014, vol. 541, p. 012012.
12. Pecherskaya E. A. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology]. 2007, no. 7, pp. 41–44. [In Russian]
13. Pecherskaya E. A., Solov'ev V. A., Metal'nikov A. M., Varenik Y. A., Gladkov I. M., Ryabov D. V. *Semiconductors*. 2013, vol. 47, no. 13, pp. 1720–1722.
14. Pecherskaya E. A., Ryabov D. V., Yakushova N. D. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologiy* [Innovations based on information and communication technologies]. 2012, no. 1, pp. 208–213. [In Russian]
15. Pecherskaya E. A., Artamonov D. V., Kondrashin V. I., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Zinchenko T. O. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 225, p. 012254. DOI 10.1088/1757899X/225/1/012254.
16. Pecherskaya E. A., Solov'ev V. A., Metal'nikov A. M., Varenik Yu. A., Gladkov I. M., Ryabov D. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [Proceedings of higher educational institutions. Electronics]. 2013, no. 2 (100), pp. 84–88. [In Russian]
17. *MEMS Materials and Processes Handbook* Springer Science + Business Media, LLC 2011. DOI: 10.1007/978-0-387-47318-5
18. Volokhov I. V., Gurin S. A., Vergazov I. R. *Measurement techniques*. 2016. – Vol. 59. – P. 80–86.

Гурин Сергей Александрович

кандидат технических наук,
заместитель начальника отдела,
ЗАО «Медтехника»
(Россия, г. Пенза, ул. Средняя, 9)
E-mail: teslananoel@rambler.ru

Gurin Sergey Aleksandrovich

candidate of technical sciences,
deputy head of department,
CJSC «Medtehnika»
(9 Srednyaya street, Penza, Russia)

Печерская Екатерина Анатольевна

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: peal@list.ru

Pecherskaya Ekaterina Anatolevna

doctor of technical sciences, associate professor,
head of sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Зинченко Тимур Олегович

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: scar0243@gmail.com

Zinchenko Timur Olegovich

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Фимин Андрей Владимирович

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mr.l0tus@mail.ru

Fimin Andrey Vladimirovich

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Николаев Кирилл Олегович

аспирант,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: nikolaev_kirill10@mail.ru

Nikolaev Kirill Olegovich

postgraduate student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Конструкции и технологические режимы формирования чувствительных элементов микроэлектронных датчиков быстропеременного и статического давления / С. А. Гурин, Е. А. Печерская, Т. О. Зинченко, А. В. Фимин, К. О. Николаев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 111–118. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-13.