

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И СТАБИЛЬНОСТИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

В. Л. Ткалич¹, М. Е. Калинин¹, Р. Я. Лабковская¹, А. Г. Коробейников^{1,2},
О. И. Пирожникова¹, А. С. Козлов¹

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: mariia_kalinkina@mail.ru

²Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН,
199034, Санкт-Петербург, Россия

Представлена новая технологическая методика обеспечения надежности и стабильности выходных параметров микромеханических датчиков давления. Произведен расчет параметров надежности чувствительных элементов датчиков давления. Приведены результаты автономных ускоренных испытаний и испытаний на безотказность.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, датчики давления, чувствительный элемент

Проблема создания отечественной электронной компонентной базы для разработки микромеханических датчиков давления (МДД) со стабильными выходными и улучшенными метрологическими характеристиками в заданном диапазоне температур достаточно актуальна. Перспективным с точки зрения создания высококачественной и конкурентоспособной элементной базы является метод глубокого микропрофилирования монокристаллического кремния, используемого для изготовления чувствительных элементов интегральных МДД. Применение этого метода позволяет внедрить высокопроизводительные групповые технологии микроэлектроники.

Основой для разработки конкурентоспособной элементной базы для интегральных датчиков первичной информации, в частности МДД, является создание новых методов изготовления и контроля качества их чувствительных элементов [1].

Внедрение технологий микроэлектроники и разработка на их основе микромеханических датчиков первичной информации позволяют резко увеличить объем выпускаемой продукции и повысить ее рентабельность. При этом по соотношению цена—качество такая продукция выходит на лидирующие позиции, так как используемый в качестве конструктивного материала монокристаллический кремний обладает высокой стабильностью физических и механических свойств.

Как показал патентный анализ, одно из первых мест по объему продаж измерительной аппаратуры занимают различные датчики измерителей давления [1—4].

Актуальными также являются такие задачи, как [5—12]:

— разработка и внедрение новых технологических методик обеспечения стабильности выходных параметров интегральных МДД, используемых для систем контроля, измерений, диагностики и управления техническими объектами;

— разработка базовых технологических процессов производства, обеспечивающих стабильность выходных параметров чувствительных элементов интегральных МДД;

— разработка рекомендаций для проектирования новых интегральных датчиков и микроэлектромеханических систем (МЭМС) по результатам исследования стабильности параметров их чувствительных элементов [7—13];

— изготовление макетных образцов изделий и проведение их испытаний.

Авторами настоящей статьи проанализированы основные технологические методики, направленные на повышение временной стабильности преобразователей давления, и на их основе разработана новая методика получения интегральных преобразователей давления и чувствительных элементов датчиков давления (ЧЭД). Разработана также программа исследования влияния внешних факторов на стабильность выходных параметров интегральных МДД.

Один из важных этапов реализации новой технологической методики — расчет параметров надежности чувствительных элементов датчиков давления [5]. Расчет производился для разработанных конструкций перспективных чувствительных элементов интегрального преобразователя давления в диапазоне номинальных значений 0,01—2,5 МПа и с улучшенными метрологическими характеристиками.

Для определения показателей надежности ЧЭД использовались экспериментальные значения, полученные при их автономных (поэлементных) ускоренных испытаниях, при этом использовались ЧЭД в тестовых корпусах.

Испытания на безотказность ЧЭД проводились в форсированном режиме, что приводило к интенсификации физико-химических процессов без изменения основных механизмов отказов [10, 13—16]. В качестве фактора, ускоряющего эти процессы, выбрана температура. В предположении активационного механизма старения (деградации), который выражается в электродиффузии в проводниках и уменьшении количества дефектов в диэлектриках, коэффициент ускорения для форсированного температурного режима рассчитывался согласно уравнению

$$K_T = \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{(T_0 + \Delta T) + 273} - \frac{1}{(T_\phi + \Delta T) + 273} \right) \right],$$

где K_T — коэффициент ускорения для диапазона температур от $T_0 + \Delta T$ до $T_\phi + \Delta T$; T_0, T_ϕ — температура кристалла чувствительного элемента при нормальных условиях эксплуатации и при форсированном режиме соответственно, ...°С; ΔT — перегрев чувствительного элемента, ...°С; E_a — средняя энергия активации механизмов отказа, эВ; k — постоянная Больцмана.

Для экспериментальной партии (20 тестовых образцов) чувствительных элементов, изготовленных по новой технологической методике обеспечения стабильности выходных параметров интегральных датчиков, был проведен расчет минимальной наработки на отказ и срока службы ЧЭД и определена средняя интенсивность отказов.

Ускоренные испытания длительностью 1464 ч при повышенной температуре 90 °С позволяют оценить один из параметров надежности — минимальную наработку на отказ „в облегченном режиме“, т.е. при нормальной (комнатной) температуре и номинальном напряжении питания.

В ходе испытаний на безотказность оснастка с образцами тестовых элементов устанавливалась в камере тепла и холода. Напряжение питания $U_{\text{п}} = 7 \pm 0,1$ В. План испытаний не предусматривал восстановление и замену образцов, отказавших во время испытаний. Испытания прекращались по истечении ~1400 ч.

Измерения параметров образцов ЧЭД проводились перед началом испытаний на безотказность при температуре 20 ± 1 °С, в процессе испытаний через 100, 200, 500, 1000 ч и в конце испытаний после выдержки образцов в течение 60 мин при температуре 20 ± 1 °С. Для каждого образца контролировались значения U_0 и $U_{\text{вых}}$ при номинальном давлении. За отказ

ЧЭД было выбрано значение ухода параметров на 0,5 %. В течение 1464 ч ускоренных испытаний при температуре 90 °С отказов не было.

Погрешность определения выходного напряжения вычисляется по формуле

$$\delta U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(0) - U_{\text{ВЫХ}}(t)}{U_{\text{ВЫХ}}(0)} \cdot 100 \%,$$

а дрейф нуля — по формуле

$$\delta U_0 = \frac{U_0 - U_0(t)}{U_0} \cdot 100 \%.$$

Результаты испытаний представлены на рис. 1 и 2 (где N — номер образца).

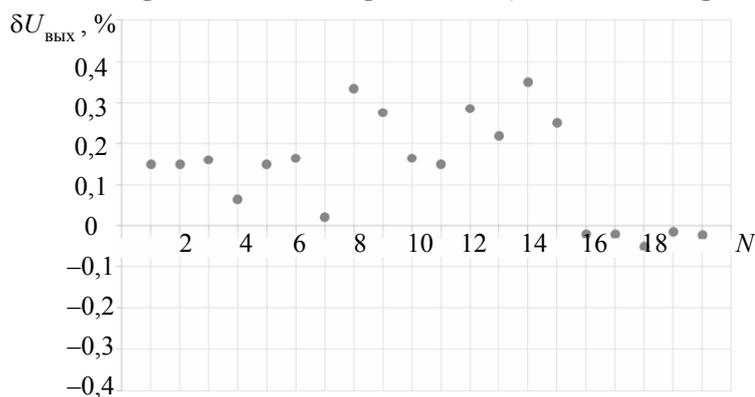


Рис. 1

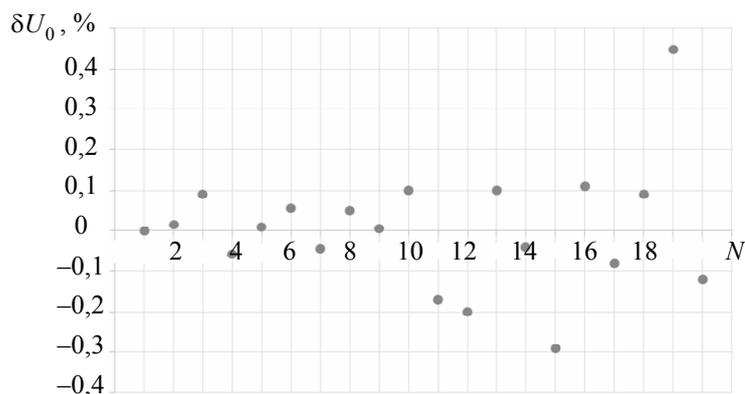


Рис. 2

Экспериментальные исследования влияния внешних факторов (таких как повышенная и пониженная рабочая температура внешней среды, испытание на прочность при воздействии синусоидальной вибрации, механические удары многократного и одиночного действия, термоциклирование) на стабильность выходных параметров чувствительных элементов интегральных МДД подтверждают эффективность полученных конструктивно-технологических решений, а именно:

— эксперимент по ускоренной деградации и проведенный расчет позволили оценить норму минимальной наработки — 47 580 ч;

— расчетный средний срок службы ЧЭД с вероятностью 0,95 составил 10,3 года;

— значения нижней и верхней доверительных границ средней наработки на отказ при доверительной вероятности 0,95 составили 6,9 года и 20 лет соответственно.

Экспериментальная партия чувствительных элементов для интегральных МДД, изготовленная по новой технологической методике, обладает высокой надежностью и удовлетворяет современным требованиям по конкурентоспособности отечественной элементной базы интегральных первичных преобразователей.

Разработка и внедрение новой технологической методики обеспечения стабильности выходных параметров интегральных датчиков и МЭМС позволит создать современную конкурентоспособную базу МДД нового поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шиккульская О., Шиккульский М. Моделирование датчиков. М.: Изд-во „Palmarium Academic Publ.“, 2012. 496 с.
2. Клаассен К. Основы измерений. Датчики и электронные приборы. М.: Интеллект, 2008. 352 с.
3. Казарян А. А. Пленочные датчики давления. М.: Бумажная галерея, 2006. 320 с.
4. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. М.: Солон-Пресс, 2012. 548 с.
5. Распопов В. Я. Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
6. Конюхов Н. Е., Медников Ф. М., Нечаевский М. Л. Электромагнитные датчики механических величин. М.: Машиностроение, 1987. 254 с.
7. Ачильдиев В. М., Грузевич Ю. К., Солдатенков В. А. Информационные измерительные и оптико-электронные системы на основе микро- и наномеханических датчиков угловой скорости и линейного ускорения. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 264 с.
8. Калашиников В. И., Нефедов С. В. Электроника и микропроцессорная техника. М.: Академия, 2012. 368 с.
9. Лаврентьев Б. Ф. Схемотехника электронных средств. М.: Академия, 2010. 336 с.
10. Ермуратский П. В., Лычкина Г. П., Минкин Ю. Б. Электротехника и электроника. М.: ДМК Пресс, 2011. 416 с.
11. Лабковская Р. Я., Козлов А. С., Пирожникова О. И., Коробейников А. Г. Моделирование динамики чувствительных элементов герконов систем управления // Кибернетика и программирование. 2014. Т. 5. С. 70.
12. Коробейников А. Г., Гришенцев А. Ю. Разработка и исследование многомерных математических моделей с использованием систем компьютерной алгебры. СПб: НИУ ИТМО, 2014. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/download/elibrary_26121279_54604165.pdf>.
13. Баканов Г. Ф., Соколов С. С. Конструирование и производство радиоаппаратуры. М.: Академия, 2011. 384 с.
14. Аверченков О. Е. Схемотехника. Аппаратура и программы. М.: ДМК Пресс, 2012. 588 с.
15. Агеев О. А., Петров В. В. Информационно-измерительная техника и электроника. Преобразователи неэлектрических величин: Учеб. пособие. М.: Юрайт, 2018. 158 с.
16. Kalinkina M. E., Kozlov A. S., Labkovskaya R. Y., Pirozhnikova O. I., Tklich V. L. Analysis and design of pressure sensors for micromechanical integrated pressure sensors // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 450, N 3. P. 032004.

Сведения об авторах

- Вера Леонидовна Ткалич** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; факультет безопасности информационных технологий; E-mail: vera_leonidovna_tkalich@mail.ru
- Мария Евгеньевна Калинкина** — аспирант; Университет ИТМО; факультет безопасности информационных технологий; E-mail: mariia_kalinkina@mail.ru
- Римма Яновна Лабковская** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; факультет безопасности информационных технологий; E-mail: labkovskaya@corp.ifmo.ru
- Анатолий Григорьевич Коробейников** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; факультет безопасности информационных технологий; Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН; зам. директора по науке; E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru
- Ольга Игоревна Пирожникова** — канд. техн. наук; Университет ИТМО; факультет безопасности информационных технологий; E-mail: cheesecake@mail.ru
- Алексей Сергеевич Козлов** — аспирант; Университет ИТМО; факультет безопасности информационных технологий; E-mail: zz.kozlov@gmail.com

Поступила в редакцию
01.03.19 г.

Ссылка для цитирования: Ткалич В. Л., Калинин М. Е., Лабковская Р. Я., Коробейников А. Г., Пирожникова О. И., Козлов А. С. Новая технологическая методика обеспечения надежности и стабильности выходных параметров микромеханических датчиков давления // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 7. С. 675—680.

NEW TECHNOLOGICAL TECHNIQUE ENSURING RELIABILITY AND STABILITY OF OUTPUT PARAMETERS OF MICROMECHANICAL PRESSURE SENSORS

V. L. Tklich¹, M. E. Kalinkina¹, R. Ya. Labkovskaya¹, A. G. Korobeynikov^{1,2},
O. I. Pirozhnikova¹, A. S. Kozlov¹

¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: mariia_kalinkina@mail.ru

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the RAS,
St. Petersburg Branch
199034, St. Petersburg, Russia

A new technological method ensuring characteristics of reliability and stability of the output parameters of micromechanical pressure sensors is presented. The reliability parameters of sensitive elements of pressure sensors are calculated. Results of autonomous accelerated tests and tests for reliability are demonstrated.

Keywords: microelectromechanical systems, pressure sensors, sensing element

REFERENCES

1. Shikul'skaya O., Shikul'skiy M. *Modelirovaniye datchikov* (Sensor Simulation), Moscow, 2012, 496 p. (in Russ.)
2. Klaassen K.B. *Electronic Measurement and Instrumentation*, NY, IBM Almaden Research Center, 1996.
3. Kazaryan A.A. *Plenochnyye datchiki davleniya* (Film Pressure Sensors), Moscow, 2006, 320 p. (in Russ.)
4. Afonskiy A.A., D'yakonov V.P. *Izmeritel'nyye pribory i massovyye elektronnyye izmereniya* (Measuring Instruments and Mass Electronic Measurements), Moscow, 2012, 548 p. (in Russ.)
5. Raspopov V.Ya. *Mikromekhanicheskiye pribory* (Micromechanical Devices), Moscow, 2007, 400 p. (in Russ.)
6. Konyukhov N.E., Mednikov F.M., Nechayevskiy M.L. *Elektromagnitnyye datchiki mekhanicheskikh velichin* (Electromagnetic Sensors of Mechanical Quantities), Moscow, 1987, 254 p. (in Russ.)
7. Achil'diyev V.M., Gruzevich Yu.K., Soldatenkov V.A. *Informatsionnyye izmeritel'nyye i optiko-elektronnyye sistemy na osnove mikro- i nanomekhanicheskikh datchikov uglovoy skorosti i lineynogo uskoreniya* (Information Measuring and Opto-Electronic Systems Based on Micro- and Nanomechanical Sensors of Angular Velocity and Linear Acceleration), Moscow, 2016, 264 p. (in Russ.)
8. Kalashnikov V.I., Nefedov S.V. *Elektronika i mikroprotsessornaya tekhnika* (Electronics and Microprocessor Technology), Moscow, 2012, 368 p. (in Russ.)
9. Lavrent'yev B.F. *Skhemotekhnika elektronnykh sredstv* (Electronic Circuit Design), Moscow, 2010, 336 p. (in Russ.)
10. Ermuratskiy P.V., Lychkina G.P., Minkin Yu.B. *Elektrotekhnika i elektronika* (Electrical and Electronics), Moscow, 2011, 416 p. (in Russ.)
11. Labkovskaya R.Ya., Kozlov A.S., Pirozhnikova O.I., Korobeynikov A.G. *Cybernetics and Programming*, 2014, vol. 5, pp. 70
12. Korobeynikov A.G., Grishentsev A.Yu. *Razrabotka i issledovaniye mnogomernykh matematicheskikh modeley s ispol'zovaniyem sistem komp'yuternoy algebry* (Development and Research of Multidimensional Mathematical Models Using Computer Algebra Systems), St. Petersburg, 2014, 100 p. https://elibrary.ru/download/elibrary_26121279_54604165.pdf. (in Russ.)
13. Bakanov F., Sokolov S.S. *Konstruirovaniye i proizvodstvo radioapparatury* (Design and Manufacture of Radio Equipment), Moscow, 2011, 384 p. (in Russ.)
14. Averchenkov O.E. *Skhemotekhnika. Apparatura i programmy* (Circuitry. Equipment and Software), Moscow, 2012, 588 p. (in Russ.)
15. Ageyev O.A., Petrov V.V. *Informatsionno-izmeritel'naya tekhnika i elektronika. Preobrazovateli neelektricheskikh velichin* (Information and Measuring Equipment and Electronics. Non-Electric Transducers), Moscow, 2018, 158 p. (in Russ.)
16. Kalinkina M.E., Kozlov A.S., Labkovskaya R.Y., Pirozhnikova O.I., Tklich V.L. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, no. 3(450), pp. 032004.

Data on authors

- Vera L. Tkalich** — Dr. Sci., Professor; ITMO University; Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: vera_leonidovna_tkalich@mail.ru
- Maria E. Kalinkina** — Post-Graduate Student; ITMO University; Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: mariia_kalinkina@mail.ru
- Rimma Ya. Labkovskaya** — PhD., Associate Professor; ITMO University; Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: labkovskaya@corp.ifmo.ru
- Anatoly G. Korobeynikov** — Dr. Sci., Professor; ITMO University; Faculty of Secure Information Technologies; Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the RAS, St. Petersburg Branch; Deputy Director of Science; E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru
- Olga I. Pirozhnikova** — PhD.; ITMO University; Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: cheesecake@mail.ru
- Aleksey S. Kozlov** — Post-Graduate Student; ITMO University; Faculty of Secure Information Technologies; E-mail: zz.kozlov@gmail.com

For citation: Tkalich V. L., Kalinkina M. E., Labkovskaya R. Ya., Korobeynikov A. G., Pirozhnikova O. I., Kozlov A. S. New technological technique ensuring reliability and stability of output parameters of micro-mechanical pressure sensors. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 7. P. 675—680 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-7-675-680