# РАЗРАБОТКА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ, В ТОМ ЧИСЛЕ С ДИНАМИЧЕСКИ ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫМИ ПРЕДЕЛАМИ ИЗМЕРЕНИЙ, НА ОСНОВЕ МАТРИЧНЫХ СТРУКТУР

## А. П. Мосеев<sup>1</sup>, Б. В. Цыпин<sup>2</sup>, С. А. Бростилов<sup>3</sup>, П. С. Горшков<sup>4</sup>, Н. А. Кузин<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
 <sup>4</sup> ООО «НПО Наука Софт», Москва, Россия
 <sup>5</sup> Московский автодорожный институт (технический университет), Москва, Россия
 <sup>1</sup> moseew2008@mail.ru, <sup>2</sup> rkap@pnzgu.ru, <sup>3</sup> ser-brostilov@yandex.ru,
 <sup>4</sup> 7498405@mail.ru, <sup>5</sup> sputnik1985nk3y@mail.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Исследуемое направление развития техники (матричные структуры, интегрированные в распределенные кластеры и многофункциональные интеллектуальные преобразователи давления на основе матричных структур, интегрированных в распределенные кластеры) является актуальным и перспективным. Материалы и методы. В работе была произведена разработка обобщенных принципов построения многофункциональных интеллектуальных преобразователей давления, в том числе с динамически переключаемыми пределами измерений, на основе матричных структур, интегрированных в распределенные кластеры. *Результаты*. На основе теоретических исследований изготовлена структура многофункционального интеллектуального преобразователя давления в пределах от 0 до 50 бар. При давлении 1 бар отклонение мембраны 1 составило 3,5 мкм, мембраны 2 – 0,3 мкм. Выводы. Эксперименты с изготовленным образцом подтвердили справедливость приведённых расчётов, в том числе линейность массива датчиков давления.

**Ключевые слова**: полупроводниковый датчик давления, измерение, кремневый чувствительный элемент, пьезорезисторы, полиимидный слой, технология эластичного прессованного межсоединения

Для цитирования: Мосеев А. П., Цыпин Б. В., Бростилов С. А., Горшков П. С., Кузин Н. А. Разработка многофункциональных интеллектуальных преобразователей давления, в том числе с динамически переключаемыми пределами измерений, на основе матричных структур // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 86–94. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-11

## DEVELOPMENT OF MULTIFUNCTIONAL INTELLIGENT PRESSURE TRANSDUCERS, INCLUDING THOSE WITH DYNAMICALLY SWITCHABLE MEASUREMENT LIMITS, BASED ON MATRIX STRUCTURES

### A.P. Moseev<sup>1</sup>, B.V. Tsypin<sup>2</sup>, S.A. Brostilov<sup>3</sup>, P.S. Gorshkov<sup>4</sup>, N.A. Kuzin<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Penza State University, Penza, Russia
 <sup>4</sup> LLC "NPO Nauka Soft", Moscow, Russia
 <sup>5</sup> Moscow Road Institute (Technical University), Moscow, Russia
 <sup>1</sup> moseew2008@mail.ru, <sup>2</sup> rkap@pnzgu.ru, <sup>3</sup> ser-brostilov@yandex.ru,
 <sup>4</sup> 7498405@mail.ru, <sup>5</sup> sputnik1985nk3y@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The studied direction of technology development (matrix structures integrated into distributed clusters and multifunctional intelligent pressure transducers based on matrix structures integrated into distributed clusters) is relevant and promising. *Materials and methods.* The paper developed generalized principles of construction of multifunctional intelligent pressure transducers, including those with dynamically switched measurement limits, based on matrix structures integrated into distributed clusters. *Results.* Based on theoretical studies, a structure of a multifunctional intelligent pressure transducer in the range from 0 to 50 bar was manufactured. At a pressure of 1 bar, the deviation of membrane 1 was 3.5  $\mu$ m, membrane 2 – 0.3  $\mu$ m. *Conclusions.* Experiments with the manufactured sample confirmed the validity of the calculations, including the linearity of the pressure sensor array.

**Keywords**: semiconductor pressure sensor, measurement, silicon sensitive element, piezoresistors, polyimide layer, elastic pressed interconnection technology

**For citation**: Moseev A.P., Tsypin B.V., Brostilov S.A., Gorshkov P.S., Kuzin N.A. Development of multifunctional intelligent pressure transducers, including those with dynamically switchable measurement limits, based on matrix structures. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1):86–94. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-11

<sup>©</sup> Мосеев А. П., Цыпин Б. В., Бростилов С. А., Горшков П. С., Кузин Н. А., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

За последнее время благодаря эффективному развитию отрасли электронных компонентов, микроэлектронных технологий, а также цифровых систем сбора и обработки информации на их основе стали возможными разработка и применение новых подходов к формированию измерительных задач [1–3]. Совершенствование операций традиционных микроэлектронных технологий, развитие технологий формирования МЭМС и НЭМС, технологий изготовления композиционных материалов и конструкций на их основе сформировало новую парадигму измерительных приборов и измерительных задач, а именно:

 – многофункциональных интеллектуальных преобразователей, реализующих ленточный и матричный принцип компоновки чувствительных элементов;

– однокристальных микроминиатюрных многофункциональных интеллектуальных измерительных преобразователей, основанных на применении МЭМС и НЭМС-технологий, способных реализовывать комплексные измерительные задачи на участке поверхности малой площади.

Для измерения давления в настоящее время широко используются полупроводниковые датчики давления, выполненные по кремниевой МЭМС-технологии [4–7].

Положительные свойства кремниевого ЧЭ определяют и свойства датчиков на его основе:

- минимальные массо-габаритные характеристики датчиков;
- низкая потребляемая энергия;
- минимальная стоимость за счет группового изготовления ЧЭ;
- надежность эксплуатации;
- стабильность параметров;
- массовость производства и широкая номенклатура.

Из приведенного выше следует, что для создания распределенных датчиков целесообразно использовать кремниевые ЧЭ в качестве измерительных модулей давления. В общем виде структура распределенного датчика может быть представлена в виде, изображенном на рис. 1 [8–10].



Рис. 1. Структурная схеме распределенного датчика

В ходе анализа известных датчиков выявлены следующие особенности:

 конструктивно-технологическое исполнение деталей и узлов распределенных датчиков: измерительные модули, гибкие коммутационные платы;

– оригинальные схемные решения;

 – способы повышения точности, надежности, стабильности метрологических характеристик полупроводниковых модулей.

Электронные устройства должны обладать меньшим весом и объемом, лучшими электрическими характеристиками, которые обеспечивают большую свободу проектирования и высокую надежность. Все эти преимущества востребованы в ракетно-космической технике (РКТ).

В центре CMST при IMEC были разработаны технология ультратонкой сборки (корпусирования) кристаллов (Ultra-Thin Chip Package, UTCP) и технология эластичного прессованного межсоединения (Stretchable Moulded Interconnect, SMI).

В соответствии с технологией UTCP кристаллы толщиной 20–30 мкм интегрируются в полиимидные слои. Тонкая металлизированная пленка наносится на разветвляющиеся контакты и позволяет создать очень миниатюрный, легкий и гибкий корпус толщиной менее 100 мкм. Технология SMI основывается на стандартном методе производства гибко-жестких печатных плат. Эластичные межсоединения изготавливаются из меди в форме меандров с основой из гибкого материала (например, полиимида). Для заливки проводников и компонентов используются гибкие материалы, главным образом полиметилсилоксановый каучук, полиуретан или другой пластик, которые служат несущей основой электронной схемы.

Однако технологии изначально не были предназначены для использования в условиях космоса, их уникальные особенности позволяют надеяться на успешное освоение и этой области применения. Миниатюризация, которую обеспечивает метод UTCP, и простота интеграции в объемные конструкции благодаря гибкости электронных схем позволяют значительно сократить размеры и вес систем, что является важным преимуществом для их применения в космической технике. Важно и то, что прочность межсоединений, которую обеспечивают эти новые технологии, в дальнейшем можно повысить. Благодаря заливке в эластичные материалы, растягиваемые электронные устройства в меньшей мере чувствительны к вибрациям. Ультратонкие устройства можно встраивать в гибкие или жесткие печатные платы методами ламинирования, сверления сквозных отверстий и их металлизации. Производство по технологии UTCP и заливка печатных плат не требуют пайки, что позволяет избежать соответствующих проблем с надежностью эксплуатации в жестких условиях.

Чтобы обеспечить малый форм-фактор и гибкость, суммарная толщина корпуса кристалла должна быть менее 100 мкм. Этим требованиям удовлетворяет технология UTCP. На рис. 2 представлен общий вид устройства, выполненного по технологии UTCP. На рис. 3 показана последовательность операций в соответствии с технологией UTCP.



Рис. 2. Общий вид устройства, выполненного по технологии UTCP



Рис. 3. Последовательность операций в соответствии с технологией UTCP

Процесс начинается с того, что поверх разделительного слоя стеклянной подложки наносится полиимидный слой. Далее в заданное положение устанавливается кристалл толщиной до 20 мкм. На его поверхность наносится фоточувствительная полиимидная пленка. Для формирования микрорельефа в области над кристаллом часть полиимида удаляется. Эта пленка выступает в качестве выравнивающего слоя для третьего полиимидного слоя со схемой межсоединений. Металлическое покрытие заданной толщины создается напылением в вакууме медного зародышевого слоя с помощью электролитического метода. Наконец, на металлизированном слое формируется рисунок. Таким образом, на стеклянной подложке образуется гибкий промежуточный слой суммарной толщиной около 70 мкм.

Спрос на тонкие гибкие сборки и эластичные межсоединения обусловлен потребностью в большей функциональной плотности при меньшем форм-факторе или тех размерах, которые диктуются конкретным применением. Новые технологии, позволяющие увеличить функциональную плотность, уменьшить форм-фактор и адаптировать изделия к поверхности любой формы, становятся привлекательными для космических применений. Однако в этой области применения высокая прочность электронных устройств является наивысшим приоритетом.

По своей природе растятиваемые межсоединения обладают большим потенциалом механической прочности. Разделение крупной системы на небольшие модули, соединенные с помощью эластичных проводников, и поглощающие механические вибрации или удары позволяют защитить чувствительные к воздействиям компоненты, не прибегая к использованию противовибрационных рам [4].

Распределение воздействующей величины на эластичной мембране зависит от ее структуры и свойств материала мембраны. Компанией Microelectronics Research Center разработан массив датчиков давления (рис. 4).





Каждый датчик включает в себя три чувствительных элемента (ЧЭ) абсолютного давления, один ЧЭ дифференциального давления, ЧЭ температуры и схему сбора данных и обработки сигнала. Все воспринимающие резисторы выполнены из поликремния. Размер ЧЭ варьируется от десятков до сотен микрометров, минимальная толщина – 2 мкм. Под мембраной расположены вакуумные полости и сквозные отверстия. Под воздействием давления мембраны деформируются, вызывая тем самым изменение сопротивления резисторов, расположенных на ее противоположной стороне.

Структуры ЧЭ дифференциального и абсолютного давления показаны на рис. 5, 6 [5].



Рис. 5. Структура ЧЭ дифференциального давления

Рис. 6. Структура ЧЭ абсолютного давления

Индийскими учеными был разработан массив МЭМС-датчиков давления для применения в морской воде. Типичные требования к датчику давления морской воды следующие:

- диапазон давлений от 0 до 50 бар;
- разрешение 0,0001 % от верхнего предела измерений;
- нелинейность 0,001 % от верхнего предела измерений.

При таком разрешении минимальное измеряемое давление должно составлять 0,05 мбар. При измерении такого малого давления датчиком с одним ЧЭ с чувствительностью 0,02 мВ/В/бар выходной сигнал имеет величину порядка 3 нВ при напряжении питания 3,3 В, что требует схемы усиления на КМОП электронике с крайне низким уровнем шума.

Для получения указанных выше характеристик был разработан массив датчиков давления с множеством ЧЭ.

Чувствительность датчика давления с круглой мембраной составляет:

$$dR/R = \sigma_l \pi_l + \sigma_t \pi_t$$

где dR/R – чувствительность;  $\sigma_l$  – продольная деформация;  $\pi_l$  – продольный пьезорезистивный коэффициент;  $\sigma_t$  – поперечная деформация;  $\pi_t$  – поперечный пьезорезистивный коэффициент:

$$\sigma_{l} = 3/8(q/h^{2})[a^{2}(1+v) - r^{2}(3+v)];$$
  

$$\sigma_{t} = 3/8(q/h^{2})[a^{2}(1+v) - r^{2}(1+3v)];$$
  

$$\delta = (qa^{4}/16Eh^{3})3(1-v^{2}),$$

где q – давление; h – толщина мембраны; a – радиус мембраны; r – расстояние по радиусу от центра мембраны; v – коэффициент Пуассона;  $\delta$  – максимальное отклонение в центре мембраны; E – модуль Юнга.

Схематичное изображение массива датчиков давления показано на рис. 7.



ENTRY OF OCEAN WATER

Рис. 7. Схематичное изображение массива датчиков давления

Верхняя пластина (top wafer) нужна для ограничения перемещения мембран в зазоре между верхней и нижней пластинами (bottom wafer). Таким образом предотвращается разрушение мембран под действием перегрузки.

Процесс изготовления массива датчиков давления показан на рис. 8, 9.



Рис. 8. Процесс изготовления первой подложки

### RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS. 2025;(1)



Рис. 9. Процесс изготовления второй подложки

Кремниевая пластина *p*-типа (100) сначала окисляется, затем в процессе литографии формируются две зоны на мембране. Микропрофилирование выполняется на отдельном этапе, толщина мембран одинаковая. Затем формируются пьезорезисторы и их соединение. На второй кремниевой подложке методами объемной микрообработки формируется полость. После вторая кремниевая подложка соединяется с первой.

Изготовленная структура предназначена для измерения давлений от 0 до 50 бар, распределение деформаций показано на рис. 10, отклонения мембран – на рис. 11. При давлении 1 бар отклонение мембраны *1* составило 3,5 мкм, мембраны *2* – 0,3 мкм, что соответствует расчетам.



Рис. 10. Распределение деформаций

Рис. 11. Отклонение мембран

Изменение выходного напряжения двух мембран показано на рис. 12 и 13.



Рис. 13. Результаты мембраны 2

По рисункам видно, что выходное напряжение мембраны *1* достигает значения 0,003 В при давлении 1 бар, выходное напряжение мембраны *2* – величины 0,014 В, что соответствует результатам расчетов. Линейность массива датчиков давления, как видно из рис. 13, также соответствует расчетной.

#### Заключение

На основе теоретических исследований изготовлена структура многофункционального интеллектуального преобразователя давления в пределах от 0 до 50 бар. При давлении 1 бар отклонение мембраны *1* составило 3,5 мкм, мембраны 2 – 0,3 мкм. Эксперименты с изготовленным образцом подтвердили справедливость приведенных расчетов, в том числе линейность массива датчиков давления.

#### Список литературы

- 1. Бростилов С. А., Бростилова Т. Ю., Бекбаулиев А. О., Ермекбаев С. Ш. Создание и внедрение волоконнооптических систем и датчиков давления на изделиях ракетно-космической и авиационной техники // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 16–17.
- Григорьев А. В., Лысенко А. В., Бростилов С. А. [и др.]. Принципы конфигурирования систем измерения вибрационного перемещения на основе анализа размытия изображения круглой метки // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 4. С. 78–86.

- Бростилов С. А., Бростилова Т. Ю., Кусаинов А. Б., Сарсенбеков С. Ж. Волоконно-оптические системы контроля температуры энергетических объектов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. Т. 2. С. 66–67.
- 4. Куве М., Босуи Ф., де Баетс Й., Вонфлитерен Я. Гибкие и эластичные системы для космических приложений / пер. В. Фомичев // Технологии в электронной промышленности. 2015. № 8. С. 34–38.
- Jin J., Zhou Z. Simulation and Modeling of Micro Pressure Sensor Array // Microelectronics Research Center. 2002. Vol. 3. P. 82–86.
- 6. Михайлов П. Г., Мокров Е. А., Скотников В. В. [и др.]. Вопросы синтеза и анализа метрологических моделей пьезоэлектрических датчиков быстропеременных давлений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 1. С. 35–40.
- 7. Михайлов П. Г., Богонин М. Б., Михайлов А. П. Материалы микроэлектронных датчиков // Новые промышленные технологии. 2003. № 3. С. 28–32.
- 8. Зырянов Ю. Т., Калхиташвили Д. Ш., Хрипунов С. П. Разработка прототипа архитектуры интеллектуального микроконтроллера при реализации приложений интернета вещей // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 3. С. 118–123.
- 9. Адамова А. А., Медведева Е. А., Семенцов С. Г. Интеллектуальный уровнемер с визуальным отсчетом для жидкостей // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 103–112.
- 10. Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Савочкин А. Е., Семочкина И. Ю. Обеспечение надежности в жизненном цикле систем искусственного интеллекта ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 12–20.

### References

- 1. Brostilov S.A., Brostilova T.Yu., Bekbauliev A.O., Ermekbaev S.Sh. Creation and implementation of fiber-optic systems and pressure sensors on products of rocket, space and aviation equipment. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality.* 2018;2:16–17. (In Russ.)
- 2. Grigor'ev A.V., Lysenko A.V., Brostilov S.A. et al. Principles of configuring vibration displacement measurement systems based on the analysis of blurring of a circular mark image. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(4):78–86. (In Russ.)
- 3. Brostilov S.A., Brostilova T.Yu., Kusainov A.B., Sarsenbekov S.Zh. Fiber-optic temperature control systems for energy facilities. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the Interna-tional Symposium Reliability and Quality*. 2016;2:66–67. (In Russ.)
- 4. Kuve M., Bosui F., de Baets Y., Vonfliteren Ya. Flexible and elastic systems for space applications. *Tekhnologii* v elektronnoy promyshlennosti = Technologies in the electronic industry. 2015;(8):34–38. (In Russ.)
- 5. Jin J., Zhou Z. Simulation and Modeling of Micro Pressure Sensor Array. *Microelectronics Research Center*. 2002;3:82–86.
- 6. Mikhaylov P.G., Mokrov E.A., Skotnikov V.V. et al. Issues of synthesis and analysis of metrological models of piezoelectric sensors of rapidly alternating pressures. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2014;(1):35–40. (In Russ.)
- 7. Mikhaylov P.G., Bogonin M.B., Mikhaylov A.P. Materials of microelectronic sensors. *Novye promyshlennye tekhnologii = New industrial technologies*. 2003;(3):28–32. (In Russ.)
- 8. Zyryanov Yu.T., Kalkhitashvili D.Sh., Khripunov S.P. Development of a prototype architecture for an intelligent microcontroller in the implementation of Internet of Things applications. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(3):118–123. (In Russ.)
- 9. Adamova A.A., Medvedeva E.A., Sementsov S.G. Intelligent level gauge with visual reading for liquids. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):103–112. (In Russ.)
- 10. Mikheev M.Yu., Prokof'ev O.V., Savochkin A.E., Semochkina I.Yu. Semochkina I. Yu. Ensuring reliability in the life cycle of artificial intelligence systems for responsible purposes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):12–20. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

Антон Павлович Мосеев аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: moseew2008@mail.ru Anton P. Moseev

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

## НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО СЛОЖНЫХ СИСТЕМ. 2025. № 1

#### Борис Вульфович Цыпин

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры ракетно-космического и авиационного приборостроения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: rkap@pnzgu.ru

### Сергей Александрович Бростилов

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: ser-brostilov@yandex.ru

### Павел Сергеевич Горшков

доктор технических наук, генеральный директор, ООО «НПО Наука Софт» (Россия, г. Москва, ул. Годовикова, 9, стр. 3) E-mail: 7498405@mail.ru

### Николай Андреевич Кузин

студент, Московский автодорожный институт (технический университет) (Россия, г. Москва, Ленинградский пр-т, 64) E-mail: sputnik1985nk3y@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests. Поступила в редакцию/Received 05.11.2024 Поступила после рецензирования/Revised 20.12.2024 Принята к публикации/Accepted 15.01.2025

### Boris V. Tsypin

Doctor of technical sciences, professor, professor of the sub-department of rocket, space and aviation instrumentation, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

### Sergey A. Brostilov

Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of radio equipment design and production, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

### Pavel S. Gorshkov

Doctor of technical sciences, general director, LLC "NPO Nauka Soft" (build. 3, 9 Godovikova street, Moscow, Russia)

### Nikolai A. Kuzin

Student, Moscow Road Institute (Technical University) (64 Leningradsky avenue, Moscow, Russia)