

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
АКАДЕМИЯ ПРОБЛЕМ КАЧЕСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ КОСМОНАВТИКИ имени К. Э. ЦИОЛКОВСКОГО
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ» РАН
(ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР РАН имени А. А. ДОРОДНИЦЫНА)
АО «УПКБ "ДЕТАЛЬ"», АО «РАДИОЗАВОД»,
АО «ФНПЦ «ПО "СТАРТ" имени М. В. ПРОЦЕНКО», АО «НИИЭМП»
АО «ПНИЭИ», АО «НИИФИ», АО «НПП "РУБИН"»
ЕВРАЗИЙСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени Л. Н. ГУМИЛЕВА
ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



ТРУДЫ
МЕЖДУНАРОДНОГО СИМПОЗИУМА
НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО

*Посвящается 300-летию
Российской академии наук*

Том 2

ПЕНЗА 2024

Труды Международного симпозиума НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО. – 2024. – Т. 2. – 503 с.

Представлены доклады XXIX Международного симпозиума «Надежность и качество», посвященного 300-летию Российской академии наук, проходившего с 27 мая по 1 июня 2024 г. в г. Пензе.

Рассмотрены актуальные проблемы теории и практики повышения надежности и качества; эффективности внедрения инновационных и информационных технологий в фундаментальные научные и прикладные исследования, образовательные и коммуникативные системы и среды, экономику и юриспруденцию; методов и средств анализа и прогнозирования показателей надежности и качества приборов, устройств и систем, а также анализа непараметрических моделей и оценки остаточного ресурса изделий двойного назначения; ресурсосбережения; проектирования интеллектуальных экспертных и диагностических систем, систем управления и связи, интерактивных, телекоммуникационных сетей и сервисных систем; экологического мониторинга и контроля состояния окружающей среды и биологических объектов; исследования физико-технологических процессов в науке, технике и технологиях для повышения качества выпускаемых изделий радиопромышленности, приборостроения, аэрокосмического и топливно-энергетического комплексов, электроники и вычислительной техники и др.

Издание предназначено для студентов, аспирантов, ученых и научных сотрудников, заинтересованных в исследовании надежности и качества эффективных комплексных систем.

УДК 621.396.6:621.315.616.97:658:562

Оргкомитет благодарит за поддержку в организации и проведении Международного симпозиума и издании настоящих трудов Министерство науки и высшего образования РФ, Правительство Пензенской области, Академию проблем качества РФ, Российскую академию космонавтики имени К. Э. Циолковского, Российскую инженерную академию, ФИЦ ИУ РАН (Вычислительный центр РАН имени А. А. Дородницына), АО «УПКБ “ДЕТАЛЬ”», АО «НИИФИ», АО «ПНИЭИ», АО «НПП “РУБИН”», АО «РАДИОЗАВОД», АО «ППО “ЭЛЕКТРОПРИБОР”», АО «ФНПЦ «ПО “СТАРТ” имени М. В. Проценко», АО «НИКИРЭТ», ООО «Экспериментальная мастерская “НаукаСофт”», Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Пензенский государственный университет.

Издание зарегистрировано в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ) с 2005 г.

Редакционная коллегия:

Юрков Н. К. – главный редактор;

Трусов В. А. – ответственный секретарь;

**Гуляков А. Д., Майстер В. А., Северцев Н. А., Сыдыков Е. Б., Абрамов О. В.,
Артамонов Д. В., Безродный Б. Ф., Бецов А. В., Васин С. М., Дивеев А. И., Иофин А. А.,
Каиштанов В. А., Кемалов Б. К., Острейковский В. А., Пиганов М. Н.,
Роберт И. В., Романенко Ю. А., Савченко В. П., Садыхов Г. С., Увайсов С. У.,
Халютин С. П., Шайко-Шайковский А. Г., Шахнов В. А., Якимов А. Н.**

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НА БАЗЕ СТРУКТУРЫ «КРЕМНИЙ НА ДИЭЛЕКТРИКЕ»

Аннотация. Целью работы является разработка полупроводниковых МЭМС-датчиков давления на базе ранее разработанных методик расчётов, алгоритмов и компьютерных программ, реализующих установленные оптимальные соотношения между параметрами микроэлектромеханической системы и обеспечивающие повышенную точность измерения, чувствительность, линейность. Конструкции полупроводниковых МЭМС-датчиков давления, созданные с использованием этих инженерных методик расчета, обеспечивают повышение чувствительности, значительное уменьшение погрешности нелинейности. Применение разработанных методик, алгоритма и программы позволило повысить точность расчетов микроэлектромеханической системы более чем в 7 раз (погрешность расчетов снижена с 55 до 6,6 %).

Ключевые слова: структура и технология «кремний на диэлектрике», микроэлектромеханические системы, полупроводниковые датчики давления, тензорезистивные элементы

**Bannov¹ V.Ya., Golovyashkin² A.N., Soloviev³ V.A., Sukhankin⁴ D.Yu.,
Kolesnikov⁵ A.V.**

^{1,2,3} Penza State University, Penza, Russia

^{4,5} Scientific Research Institute of Physical Measurements, Penza, Russia

¹ kipra@pnzgu.ru

SEMICONDUCTOR MEMS BASED ON THE STRUCTURE "SILICON ON A DIELECTRIC"

Annotation. The aim of the work is to develop semiconductor MEMS pressure sensors based on previously developed calculation methods, algorithms and computer programs that implement the established optimal ratios between MEMS parameters and provide increased measurement accuracy, sensitivity, and linearity. The designs of semiconductor MEMS pressure sensors, created using these engineering calculation methods, provide an increase in sensitivity, a significant reduction in the error of nonlinearity. The application of the developed methods, algorithm and program allowed to increase the accuracy of MEMS calculations by more than 7 times (the calculation error was reduced from 55 to 6.6%).

Keywords: structure and technology of "silicon on a dielectric", microelectromechanical systems, semiconductor pressure sensors, strain-resistant elements

Введение.

Конструкции полупроводниковых датчиков давления на основе МЭМС постоянно совершенствуются, повышается чувствительность, стабильность, надёжность, уменьшаются основная и дополнительная погрешности измерения, расширяется температурный диапазон.

Предварительно проведённые теоретические исследования послужили основой для создания новых технических решений полупроводниковых МЭМС датчиков давления. В них реализованы установленные оптимальные соотношения между параметрами МЭМС, они обеспечивают повышенную точность измерения, обладают высокой чувствительностью, линейностью. Эти результаты были достигнуты благодаря применению ранее разработанных методик расчёта, алгоритма и компьютерных программ [1–5].

Конструкции полупроводниковых МЭМС

В ходе проведённой работы были разработаны полупроводниковые МЭМС на базе структуры «кремний на диэлектрике». Первый вариант конструкции представлен на рисунке 1. Технические требования для разработки полупроводниковой МЭМС представлены в таблице 1. В проектируемой топологии центры тензорезисторов R1 – R4 размещены на расстоянии $l = 1$ мм от центра мембраны. Для измерения давления 0,2 МПа использовался профилированный кристалл с мембраной квадратной формы и жестким центром размером $a_{\text{ц}} = 1$ мм, который показан на рисунке 1, б. Для измерения давлений 1...25 МПа использовался профилированный кристалл с мембраной квадратной формы без жесткого центра, представленный на рисунке 1, в. Размеры $a_{\text{м}}$ и $h_{\text{м}}$ мембран для кристалла рассчитывались по системе уравнений [1 – 3]. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Диапазоны измерения и геометрические параметры полупроводниковой Таблица 1
МЭМС измерительного функционального модуля давления и температуры

Номинальное давление P , МПа	Толщина мембраны $h_{\text{м}}$, мкм	Размер мембраны $a_{\text{м}}$, мм	Толщина кремниевого кристалла $H_{\text{кр}}$, мм	Рисунок
0,2	20±3	2,02±0,04	300±10	1, а
1	50±3	2,02±0,04	300±10	1, б
5	105±5	2,02±0,04	300±10	1, в
10	145±5	2,01±0,04	500±10	1, б
25	215±5	1,95±0,04	500±10	1, в

Второй вариант конструкции полупроводниковой МЭМС показан на рисунке 2.

Расположение тензорезисторов $R1 - R4$ в областях с максимальными относительными положительными деформациями позволяет получить максимально возможную чувствительность к измеряемому давлению. В первую очередь конструкция отличается наличием терморезисторов $R5, R6$ и $R7$, которые позволяют осуществлять температурную компенсацию выходного сигнала.

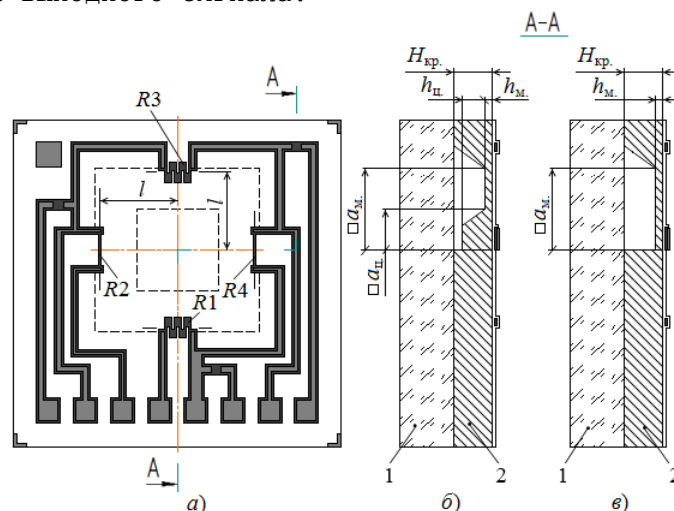


Рисунок 1 – Полупроводниковая МЭМС измерительного функционального модуля давления и температуры: 1 – стеклянное основание; 2 – кремниевый кристалл

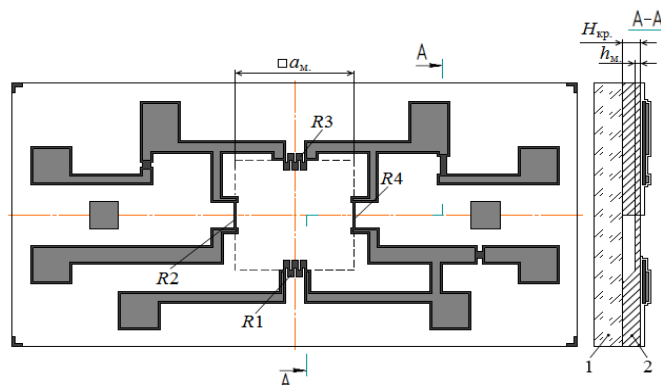


Рисунок 2 – Полупроводниковая МЭМС высокотемпературного датчика давления: 1 – стеклянное основание; 2 – кремниевый кристалл

Предложенные технические решения полупроводниковых МЭМС датчиков давления обеспечивают повышенную точность измерения и обладают высокой чувствительностью, линейностью.

Сопоставление экспериментальных данных с результатами исследования

Для определения достоверности результатов теоретических исследований проводилось сравнение отношений размеров мембран к толщине a_m/h_m полупроводниковых МЭМС, использующихся при проектировании датчиков давления типа ДАЭ 100, ДАЭ 107, ДАЭ 110 и ДАЭ 112. Зависимости отношений a_m/h_m от измеряемого давления P представлены на рисунке 3. Исходные данные и результаты расчетов представлены в таблице 2.

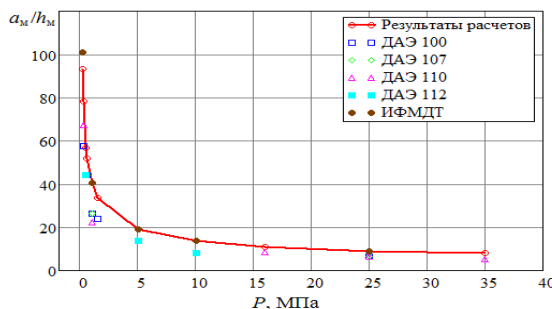


Рисунок 3 – Зависимость отношения размера мембраны к ее толщине a_m/h_m для рассматриваемых МЭМС датчиков от номинального давления P

Для анализа рассчитывался разброс выходного сигнала $U_{\text{вых}}$ рассматриваемых МЭМС по следующей формуле:

$$\gamma_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{выхmax}} - U_{\text{выхmin}}}{U_{\text{выхmax}}} \cdot 100\% , \quad (1)$$

где $U_{\text{вых, max}}$ – максимальное значение выходного сигнала диапазонов рассматриваемого датчика;

$U_{\text{вых, min}}$ – минимальное значение выходного сигнала диапазонов рассматриваемого датчика.

Параметры полупроводниковых МЭМС датчиков
ДАЭ 100, ДАЭ 107, ДАЭ 110, ДАЭ 112, ИФМДТ и полученные расчетным путем

Таблица 2

	*Технология изготовления МЭМС	$P_{\text{ном}}$, МПа	a_m , мм	h_m , мкм	a_m/h_m	$U_{\text{вых}}$, мВ/В	$\gamma_{\text{вых}}$, %
ДАЭ 100	1	0,25	1,32	23	57,4	26,2	50,6
		0,6		30	44	52	
		1		50	26,4	53,02	
		1,5		55	24		
		25		210	6,3	42,2	
ДАЭ 107	1	0,6	1,32	30	44	53,1	44,26
		1		50	26,4	29,6	
		25		210	6,3	43,4	
ДАЭ 110	2	0,25	1,68	25	67,2		24,66
		1		75	22,4	11	
		16		200	8,4		
		25		260	6,5		
		35		320	5,3	14,6	
ДАЭ 112	2	0,5	1,68	30	56	30	55,33
		5		95	17,7	14,6	
		10		165	10,2	13,4	
ИФМДТ	2	0,2	2,02	20	101	41,22	6,6
		1	2,02	50	40,4	44,12	
		5	2,02	105	19,24		
		10	2,01	145	13,86	41,2	
		25	1,95	215	9,1		
Результаты расчетов	2	0,2	2,02	21,7	93	60	–
		0,25	2,02	25,8	78,3		
		0,5	2,02	35,7	56,5		
		0,6	2,02	39	51,8		
		1	2,02	49,7	40,7		
		1,5	2,02	60,3	33,5		
		5	2,02	107	18,9		
		10	2,01	146,9	13,7		
		16	1,99	179,6	11,1		
		25	1,95	214,3	9,1		
		35	1,92	242	7,9		

* 1 – объемная микромеханика; 2 – кремний на диэлектрике.

В процессе исследования были изготовлены МЭМС на базе структуры «кремний на диэлектрике» измерительного функционального модуля давления и температуры ИФМДТ, представленные на рис. 4, а, для диапазонов давления 0...0,2 МПа, 0...1 МПа, 0...10 МПа. Геометрические параметры изготовленных МЭМС представлены в таблице 3.

На диапазон давления 0...0,2 МПа были изготовлены МЭМС на базе профилированного кристалла с квадратной мембраной и жестким центром (рис. 5, а). На диапазоны давления 0...1 МПа и 0...10 МПа – на базе профилированного кристалла с квадратной мембраной без жесткого центра (рис. 5, б). Результаты эксперимента анализировались и сопоставлялись с экспериментальными данными МЭМС на базе структуры КНД датчика давления ДАЭ 110, представленной на рис. 4, б.

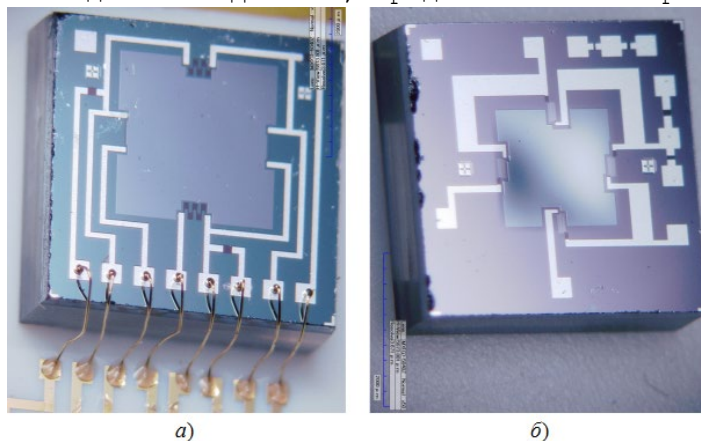


Рисунок 4 – Полупроводниковые МЭМС на базе структуры КНД:

а – измерительного функционального модуля давления и температуры ИФМДТ;

б – датчика давления ДАЭ 110

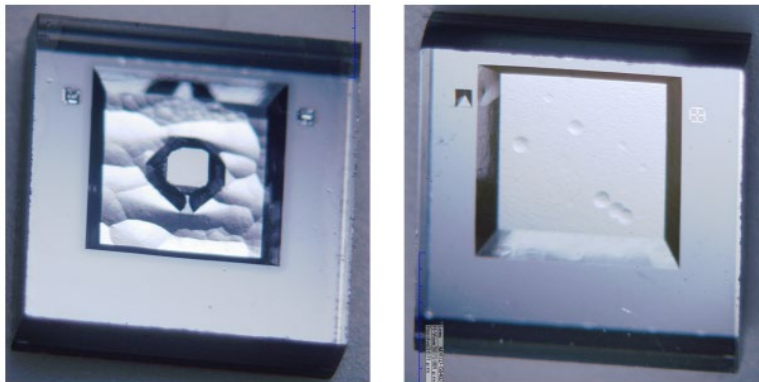
Сравнение проводилось для следующих характеристик МЭМС:

- зависимости выходного сигнала на различные диапазоны измеряемого давления;
- чувствительность МЭМС к измеряемому давлению (мВ/В);
- погрешность от нелинейности измерительной цепи МЭМС, рассчитанная по следующей формуле:

$$\gamma_{\text{нелин}} = \left| \frac{U_{\text{вых}} - U_{\text{вых.лин}}}{U_{\text{вых.лин}}} \right| \cdot 100\% , \quad (2)$$

где $U_{\text{вых}}$ – значение выходного сигнала измерительной цепи МЭМС;

$U_{\text{вых.лин}}$ – значение выходного сигнала линейной характеристики датчика, построенной по крайним точкам градуировочной характеристики МЭМС.

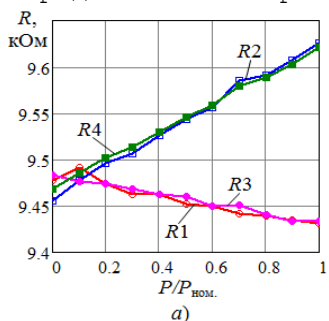


а)

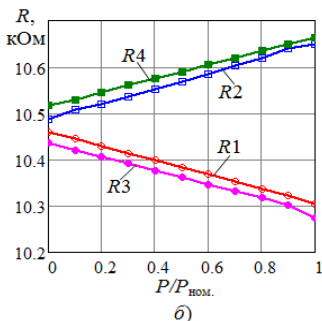
б)

Рисунок 5 – Изготовленные МЭМС измерительного функционального модуля давления и температуры на базе: а – профилированного кристалла с квадратной мембраной и жестким центром; б – профилированного кристалла с квадратной мембраной без жесткого центра

Результаты градуировки тензорезисторов МЭМС датчика давления ДАЭ 110 на диапазоны 0...1 МПа и 0...35 МПа представлены на рис. 6. Результаты градуировки выходного сигнала МЭМС датчика давления ДАЭ 110 на диапазоны 0...1 МПа и 0...35 МПа представлены на рис. 7.



а)



б)

Рисунок 6 – Градуировка тензорезисторов МЭМС датчика давления ДАЭ 110 на 1 МПа (а) и 35 МПа (б)

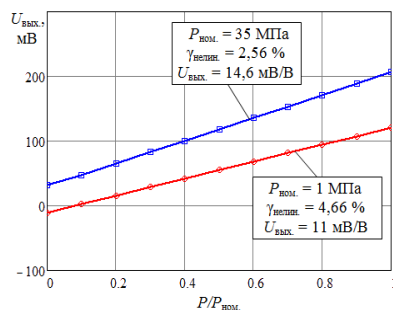
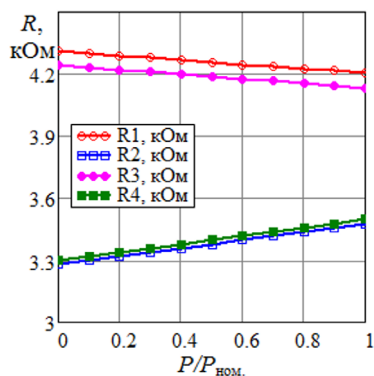
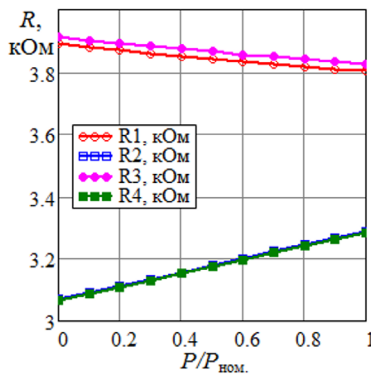


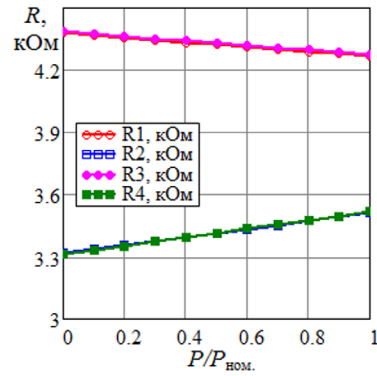
Рисунок 7 – Градуировка выходного сигнала МЭМС датчика давления ДАЭ 110



а)



б)



в)

Рисунок 8 – Градуировка тензорезисторов МЭМС измерительного функционального модуля давления и температуры ИФМДТ на диапазоны давления 0...0,2 МПа (а), 0...1 МПа (б) и 0...10 МПа (в)

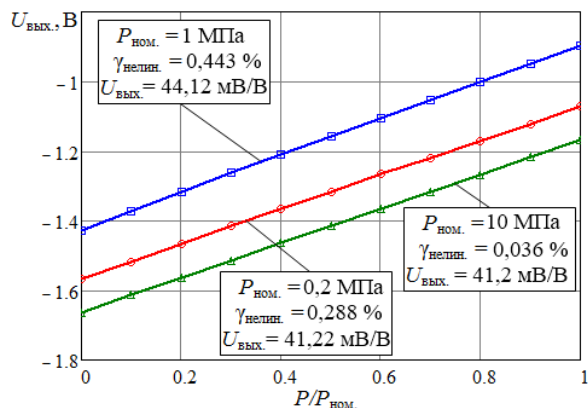


Рисунок 9 – Градуировка выходного сигнала МЭМС измерительного функционального модуля давления и температуры ИФМДТ

Результаты градуировки тензорезисторов МЭМС измерительного функционального модуля давления и температуры ИФМДТ представлены на рис. 8.

Результаты градуировки выходного сигнала МЭМС измерительного функционального модуля давления и температуры ИФМДТ на диапазоны 0...0,2 МПа, 0...1 МПа и 0...10 МПа представлены на рис. 9.

Сопоставление экспериментальных и теоретических исследований показало, что применение разработанных методик, алгоритма и программы позволяет проектировать полупроводниковые МЭМС на различные диапазоны измеряемых давлений с разбросом выходного сигнала не более 6,6 %, в то время как у серийно выпускаемых полупроводниковых МЭМС разброс выходного сигнала достигает 55 %.

Заключение

Итогом проделанной работы является разработка конструкций полупроводниковых МЭМС датчиков давления на базе профилированного кристалла с мембраной квадратной формы без жесткого центра, обеспечивающих повышенную точность за счет размещения тензорезисторов в областях с равными по абсолютной величине относительными деформациями и полупроводниковой МЭМС датчиков давления на базе профилированного кристалла мембраной квадратной формы и жестким центром, обеспечивающая повышенную точность за счет оптимального размещения тензорезисторов на плоской поверхности кристалла.

Проведённое сопоставление экспериментальных и теоретических исследований датчиков давления на базе полупроводниковых МЭМС показало, что применение разработанных инженерной методики расчета, алгоритма и программы позволяют рассчитывать полупроводниковые МЭМС с достаточной точностью на различные диапазоны измеряемых давлений. Погрешность расчетов снижена с 55 % до 6,6% (точность расчетов повышается более чем в 7 раз). Кроме того, разработанные конструкции полупроводниковых МЭМС датчиков давления обеспечивают повышение чувствительности в 3 раза и значительное уменьшение погрешности нелинейности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полупроводниковые микроэлектромеханические системы датчиков давления / В. Я. Баннов, А. Н. Головяшкин, В. А. Соловьев, Д.Ю. Суханкин, С.А. Москалев // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2023. – Т. 2. – С. 290-295.
2. Современные методы повышения эффективности работы полупроводниковых датчиков давления в условиях воздействия повышенной температуры / С.А. Москалев, Н.К. Юрков, И.В. Ползунов // Надежность и качество: тр. междунар. симп. – Пенза, 2012. – Т. 2. – С. 46-47.
3. Головяшкин А.Н., Васильев В.А., Громков Н.В., Москалев С.А. / Частотные преобразователи для датчиков давления на основе нано- и микроэлектромеханических систем. Монография. Изд-во ПГУ, Пенза, 2011.
4. Полупроводниковые чувствительные элементы для датчиков давления с улучшенными характеристиками на базе структур «поликремний-диэлектрик» для информационно-измерительных систем / С.А. Москалев, И.В. Ползунов, А.А. Родионов // Датчики и системы: методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации (Датчики и системы – 2012): тр. Междунар. науч.-техн. конф. с элементами научной школы для молодых ученых. – Пенза, 2012. – С. 166-169.
5. Моделирование полупроводниковых чувствительных элементов датчиков давления / С.А. Москалев // Датчики и системы: Сборник докл. XXX межрегион. научно-практич. конф. молодых ученых и специалистов – Пенза: ОАО «НИИФИ», 2011. – С. 159-162.