

26. Williams R.S., Tuckerman D.B. Low-noise Darlington amplifier design for high-frequency applications, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1987, Vol. 34, No. 5, pp. 567-574. DOI: 10.1109/TCS.1987.1086185.
27. Gupta A., Singh R. Performance Analysis of Darlington Transistor Arrays in High-Precision Analog Circuits, *Journal of Solid-State Circuits*, 2021, Vol. 56, No. 4, pp. 1123-1132. DOI: 10.1109/JSSC.2020.3040123.
28. Kim H.S., Cho M.J. Integration of Darlington Transistors in Low-Voltage Power ICs for Enhanced Efficiency, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, Vol. 37, No. 2, pp. 2345-2353. DOI: 10.1109/TPEL.2021.3103456.

Жук Алексей Андреевич – Донской государственный технический университет; e-mail: alexey.zhuk96@mail.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79185880301; младший научный сотрудник отдела «Управление научных исследований»; ассистент кафедры «Информационные системы и радиотехника».

Клейменкин Дмитрий Владимирович – Донской государственный технический университет; e-mail: k-dima-01@mail.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79281970049; младший научный сотрудник отдела «Управление научных исследований».

Прокопенко Николай Николаевич – Донской государственный технический университет; e-mail: prokopenko@sssu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79281201984; зав. кафедрой «Информационные системы и радиотехника».

Zhuk Alexey Andreevich – Don State Technical University; e-mail: alexey.zhuk96@mail.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79185880301; junior research fellow of the “Office of Scientific Research”; assistant of the Department of Information Systems and Radio Engineering.

Kleimenkin Dmitry Vladimirovich – Don State Technical University; e-mail: k-dima-01@mail.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79281970049; junior research fellow of the “Office of Scientific Research”.

Prokopenko Nikolay Nikolaevich – Don State Technical University; e-mail: prokopenko@sssu.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79281201984; junior research fellow of the “Office of Scientific Research”; head of Department “Information Systems and Radio Engineering”.

УДК 681.586

DOI 10.18522/2311-3103-2025-5-159-167

С.П. Малюков, В.Д. Мишнев

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ
НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УПРУГОЙ
МЕМБРАНЫ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ
«КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ»**

Высокая точность и повышенные эксплуатационные характеристики датчиков давления необходимы для обеспечения безопасности, качества и эффективности в различных отраслях промышленности и техники. Применение метода конечных элементов (МКЭ) при проектировании датчиков давления позволяет улучшить их точность за счёт более глубокого анализа механических и физических процессов, возникающих при воздействии нагрузки от давления. Целью данной работы является построение цифровой трёхмерной модели чувствительного элемента (ЧЭ) датчика давления и анализ напряжённно-деформированного состояния упругой мембраны под действием нагрузки от давления от 0 до 15 МПа. Основные задачи работы: исследование свойств и параметров материалов, применяющихся в составе чувствительного элемента датчика давления на основе структуры «кремний на сапфире»; получение значений максимального эквивалентного напряжения, возникающего в конструкции упругой мембраны ЧЭ при воздействии нагрузки от давления 125% от номинального значения; распределение радиальных и тангенциальных деформаций упругой мембраны и определение наилучшего расположения тензорезисторов на поверхности ЧЭ датчика давления. В результате исследования установлено, что используемые материалы обладают хорошей стойкостью к воздействию агрессивной среды, а также возможностью работы в широком диапазоне температур и при воздействии высоких нагрузок от давления. По результатам моделирования определено значение максимального эквивалентного напряжения, величина

напряжения не превышает предел прочности чувствительной мембраны, получено распределение радиальных и тангенциальных деформаций на поверхности ЧЭ, что даёт возможность получить оптимизированный рисунок тензорезисторной мостовой схемы.

Датчик давления; тензочувствительный элемент; кремний на сапфире; метод конечных элементов; численное моделирование.

S.P. Malyukov, V.D. Mishnev

SIMULATION AND ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A PRESSURE SENSOR'S ELASTIC MEMBRANE BASED ON "SILICON ON SAPPHIRE" STRUCTURE

High accuracy and improved performance of pressure sensors are essential to ensure safety, quality and efficiency in various industries and machinery. The use of the finite element method (FEM) in the design of pressure sensors makes it possible to improve their accuracy due to a deeper analysis of mechanical and physical processes that arise when exposed to pressure loads. The purpose of this work is to build an accurate three-dimensional model of the sensitive element of the pressure sensor and to analyze the stress-strain state of the elastic membrane under the load from 0 to 15 MPa. The main tasks of the work: research of the properties and parameters of materials used as part of the sensitive element of the pressure sensor based on the structure "silicon on sapphire"; obtaining the values of the maximum equivalent stress arising in the design of the elastic membrane of the sensitive element under the influence of a pressure load of 125% of the nominal value; distribution of radial and tangential deformations of the elastic membrane and determination of the best location of resistance strain gauges on the surface of pressure sensor's sensitive element. As a result of the research, it was found that the materials used have good resistance to an aggressive environment, as well as the ability to work in a wide temperature range and under high pressure loads. Based on the simulation results, the value of the maximum equivalent stress was determined, the stress value does not exceed the ultimate strength of the sensitive membrane, the distribution of radial and tangential deformations on the surface of the sensitive element was obtained, which makes it possible to determine the most optimal pattern of the resistance strain gauge bridge circuit.

Pressure sensor; pressure-sensitive element; silicon on sapphire; finite element method; simulation an analysis.

Введение. Метод конечных элементов (МКЭ) является мощным инженерным инструментом, который широко используется для моделирования и анализа различных физических и механических процессов. Применяя МКЭ при моделировании и анализе деформаций упругой мембраны чувствительного элемента (ЧЭ) датчика давления можно добиться повышения точности показателей исходного устройства следующим образом [1–3]:

♦ **Моделирование геометрии.** С помощью МКЭ можно создать цифровую трёхмерную модель геометрии датчика давления, что позволяет учесть особенности конструкции и структуры ЧЭ датчика при анализе его характеристик.

♦ **Механический анализ.** МКЭ позволяет проводить детальный механический анализ напряжённо деформированных состояний ЧЭ датчика давления, включая распределение напряжений и деформаций в материалах, что помогает оптимизировать конструкцию для повышения точности.

♦ **Учёт внешних воздействий.** МКЭ позволяет учитывать воздействие внешних факторов на работу датчика давления, таких как температура или вибрации, что помогает снизить влияние искажений на результаты измерений [4, 5].

1. Конструкция и анализ материалов чувствительного элемента датчика давления. Выбор материалов, используемых при изготовлении тонкоплёночных тензорезисторных датчиков давления, оказывает существенное влияние на точность, стоимость и эксплуатационные возможности конечного устройства [6].

По результатам исследования основных типов структур чувствительных элементов датчиков давления, таких как КНС, КНИ, КНД и др. установлено, что структура «кремний на сапфире» является наиболее эффективной для датчиков давления, работающих в условиях воздействия агрессивной среды [7–10]. Конструкция измерительного элемента, выполненного на основе структуры КНС, изображена на рис. 1.

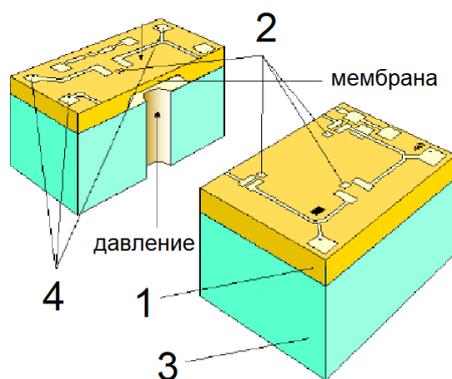


Рис. 1. Чувствительный элемент на основе структуры КНС. 1 подложка из лейкосапфира (Al_2O_3), 2 кремниевая (Si) тензорезистивная мостовая схема, 3 керамическое основание, 4 контактные площадки

В структуре КНС отсутствует р-п-переход, что позволяет добиться низкой погрешности (от 0,25 до 0,5 %), ввиду отсутствия токов утечки. В структуре КНС тензорезистивная мостовая схема выполняется из тонкого слоя кремния. Ввиду того, что термические напряжения в сплошном слое кремния практически однородны и изотропны в структурах КНС они почти не влияют на подвижность дырок и сопротивление кремния, что позволяет минимизировать негативные эффекты, влияющие на точность измеряемого сигнала.

Использование лейкосапфира (Al_2O_3) в качестве материала подложки даёт возможность использовать устройство в широком диапазоне температур, благодаря отличным упругим и изолирующим свойствам вплоть до температур порядка $1000^\circ C$ (до начала пластических деформаций). Из основных преимуществ сапфира, позволяющих добиться высоких эксплуатационных показателей можно выделить:

- ◆ сапфир не является химически активным материалом и обладает стойкостью к радиации;
- ◆ температура плавления сапфира выше, чем у кремния, что приводит к минимизации деформаций при высокотемпературной обработке;
- ◆ возможность проведения вторичной обработки сапфира в виду его высокой прочности [11].

Применение керамики в качестве материала основания ЧЭ позволит снизить эффект дополнительной температурной деформации ЧЭ датчика давления, влияющий на погрешность преобразования из-за возможности лучшего согласования коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) керамики и сапфировой подложки ($\pm 5 \times 10^{-7} K^{-1}$) [7, 8, 12].

Керамика на основе нитрида алюминия (AlN) характеризуются высокой теплопроводностью (>170 Вт/м $^\circ K$), механической прочностью на изгиб (450 МПа), термической и химической стойкостью (максимальная температура эксплуатации $1350^\circ C$). Кроме того, использование керамики в качестве материала основания ЧЭ датчика давления даёт возможность снижения себестоимости конечного устройства из-за отсутствия необходимости использовать дорогостоящие титановые сплавы, требующих более сложной металлообработки [12].

Для соединения чувствительного элемента структуры КНС вместо эпоксидных компаундов и стеклоприпоев к корпусному основанию изделия применён стекловидный диэлектрик системы $PbO - V_2O_5 - ZnO$ с КЛТР ($80 - 90 \times 10^{-7} K^{-1}$), отвечающий комплексу требований для согласованности с КЛТР сапфира и керамики. Помимо согласованности по КЛТР стекловидный диэлектрик системы $PbO - V_2O_5 - ZnO$ обладает рядом следующих преимуществ:

- ◆ высокая механическая прочность;
- ◆ высокая адгезионная способность;

- ♦ устойчивость к радиации;
- ♦ отсутствие старения и деструкции во времени [13, 14].

Таким образом, применение структуры «кремний – сапфир – стекловидный диэлектрик – керамика» полностью отвечает требованиям по созданию датчика давления, способного работать в диапазоне температур от -60°C до $+350^{\circ}\text{C}$, при воздействии давлений от 0 до 10 МПа в условиях повышенных механических вибраций и радиации.

2. Разработка математической модели напряжённо-деформированного состояния чувствительного элемента датчика давления. С целью минимизации погрешности тензорезисторных преобразователей на основе КНС проведены аналитический расчёт и построение математической модели чувствительной мембраны под действием давления от 0 до 12,5 МПа в среде системы анализа методом конечных элементов Ansys [1–5, 17]. Расчётная схема и физические свойства материалов приведены на рис. 2 и в табл. 1 и 2 соответственно.

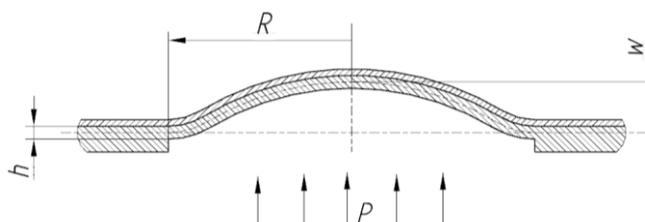


Рис. 2. Расчётная схема плоской сапфировой мембраны с нанесённым слоем кремния.
 w – прогиб центра мембраны, p – давление, R – рабочий радиус мембраны,
 E – модуль Юнга, h – толщина мембраны

Таблица 1

Физические свойства материалов упругого элемента (УЭ)

Материал	Модуль упругости, E , ГПа	Предел прочности, σ_b , МПа	Коэффициент Пуассона, μ	Плотность, ρ
Кремний (Si)	382	895	0,27	0,27
Сапфир (Al_2O_3)	130	500	0,28	0,28
Керамика на основе AlN	210	900	0,2	0,2

Расчёт прогиба мембраны оценивался аналитически по выражению:

$$w = \frac{pR^4}{Eh^3}, \quad (1)$$

где w – прогиб центра мембраны, p – давление, R – рабочий радиус мембраны, E – модуль Юнга, h – толщина мембраны [11, 16, 18–20].

Перед расчётом деформаций было проведено построение конечно-элементной сетки конструкции ЧЭ датчика давления (рис. 3). Число элементов сетки 147000.

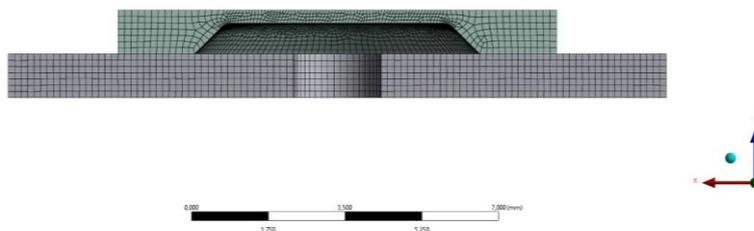


Рис. 3. Модель УЭ с разбиением на сетку конечных элементов

При расчёте деформаций УЭ, к мембране прикладывалась нагрузка в 12,5 МПа (125% от номинального в 10 МПа), что обусловлено требованием к испытательному давлению по ГОСТ 22520-85. По результатам предварительного расчёта было установлено, что ввиду малой толщины слоя кремния (не более 0,005 мм) его влияние на расчёт прогиба мембраны незначительно, и в дальнейшем им можно пренебречь.

Для оценки нелинейности прогиба мембраны, влияющей на точность измерений, было произведено сравнение результатов расчёта по выражению (1) и численного моделирования приведены в табл. 2. Перемещение центра мембраны упругого элемента представлено на рис. 4.

Таблица 2

Перемещение центра измерительной мембраны УЭ

Давление, МПа	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15
аналитический расчёт, мм	0,003	0,005	0,007	0,009	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018
расчёт МКЭ, мм	0,004	0,005	0,007	0,009	0,010	0,013	0,014	0,016	0,018

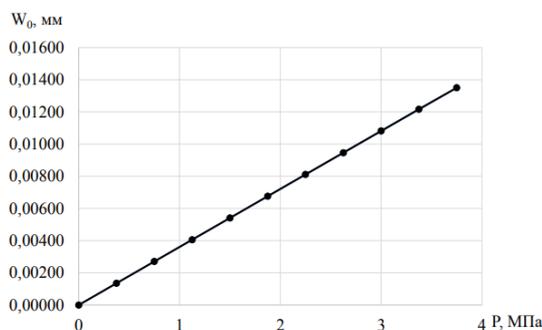


Рис. 4. Перемещение центра измерительной мембраны УЭ

Из графика, изображённого на рис. 4, следует, что изменение прогиба упругой мембраны имеет практически линейную зависимость от прикладываемой нагрузки от давления 12,5 МПа. Нелинейность составляет не более 0,7%, что свидетельствует о высокой точности изделия в целом.

Модель напряжённо-деформированного состояния разрабатываемого упругого элемента датчика давления представлена на рис. 5 и 6. Деформации отмасштабированы для наглядности.

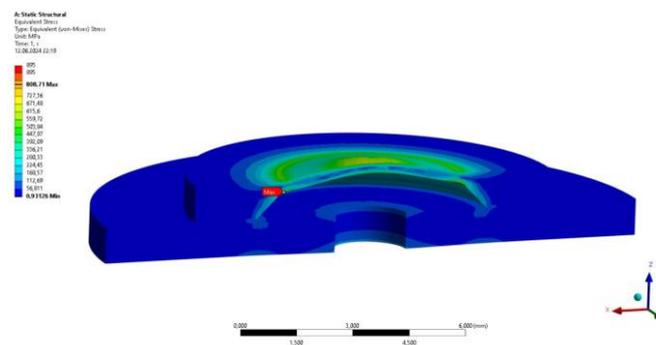


Рис. 5. Напряжения в модели рассчитываемого упругого элемента

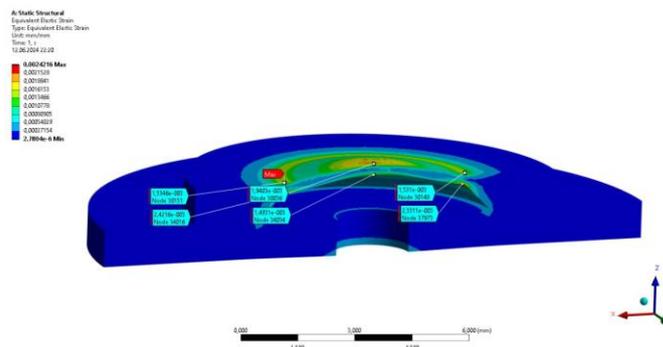


Рис. 6. Относительные деформации в модели рассчитываемого упругого элемента

Из рис. 5 и 6 видно, что напряжения, возникающие при воздействии на сапфировую мембрану составляют 806,71 МПа, что не превышает значение предела прочности сапфира 895 МПа (см. табл. 1).

Для определения оптимального расположения тензорезисторов и формы тензорезисторной мостовой схемы были получены распределения и разность радиальной и тангенциальной деформаций на поверхности УЭ (рис. 7 и 8) [11].

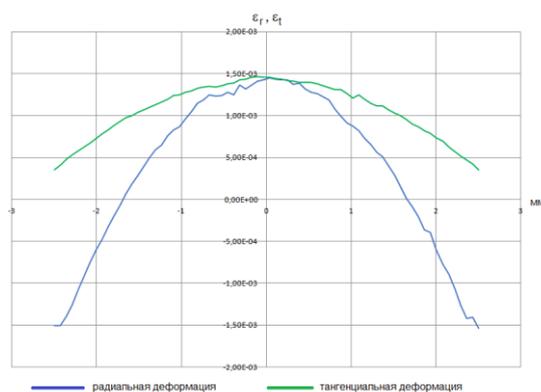


Рис. 7. Распределение деформаций в радиальном направлении (ϵ_r) и тангенциальном направлении (ϵ_t) на поверхности чувствительного элемента

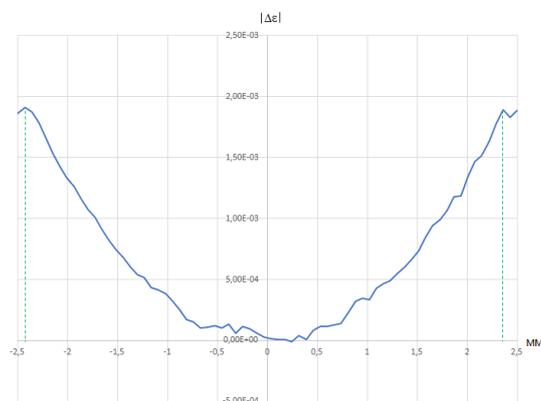


Рис. 8. Разность радиальных и тангенциальных деформаций $|\Delta\epsilon|$ на поверхности чувствительного элемента

Заключение. В результате численного моделирования напряжённо-деформированного состояния разрабатываемого УЭ датчика давления на основе структуры КНС установлено:

- ◆ значение максимального эквивалентного напряжения (806,71 МПа), возникающее в конструкции УЭ при действии давления 125% от номинального не превышает предел прочности сапфира;
- ◆ получено распределение радиальных и тангенциальных деформаций на поверхности ЧЭ и определено наилучшее место расположения тензорезистора: $r = 2,4$ мм от центра мембраны.

Таким образом, полученные значения прогиба мембраны под действием нагрузки от давления дают возможность получить оптимизированный рисунок тензорезисторной мостовой схемы, а также определить влияние на величину коэффициента тензочувствительности датчика давления.

Свойства и параметры материалов структуры «кремний – сапфир – стекловидный диэлектрик – керамика», полностью отвечают требованиям по созданию датчика давления нового поколения, способного работать широком диапазоне температур (от -60°C до $+350^{\circ}\text{C}$) при воздействии давлений от 0 до 10 МПа в условиях повышенных механических вибраций и радиации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Басов К.А. ANSYS и LMS Virtual Lab. Геометрическое моделирование. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 240 с. – ISBN 5-94074-301-3.
2. Кожанов Д.А., Лихачева С.Ю. Конечно-элементное моделирование в инженерных расчетах механики деформируемого твердого тела: учеб. пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. – 51 с. – ISBN 978-5-528-00562-1.
3. Антонец И.В., Борисов Р.А., Нигматуллина Л.А., Борисова Д.Р. Определение упругих характеристик первичного преобразователя датчика давления в системе воздушных сигналов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2025. – Т. 68, № 7. – С. 590-599. – DOI 10.17586/0021-3454-2025-68-7-590-599.
4. Бозуш М.В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков с использованием конечно-элементных математических моделей // Приборы. – 2007. – № 12 (90). – С. 30-38.
5. Логинова Л.В., Трофимов А.А., Печерская Е.А., Рыбаков И.М., Северцев Н.А. Моделирование высокотемпературных датчиков давления на базе технологических структур «поликремний – диэлектрик» // Надежность и качество сложных систем. – 2024. – № (48). – С. 85-95. – DOI 10.21685/2307-4205-2024-4-9.
6. Теплова Т.Б., Самерханова А.С. Тенденция развития применения твердых высокопрочных материалов в микроэлектронике, медицине и ювелирных изделиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 10. – С. 339-347.
7. Малюков С.П., Мишнев В.Д. Технология изготовления чувствительных элементов датчиков давления на основе спая «сапфир – стекловидный диэлектрик – керамика» // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 111-119.
8. Малюков С.П., Мишнев В.Д. Технология изготовления чувствительного элемента датчика давления на основе структуры «кремний на сапфире» с использованием метода высокочастотного магнетронного распыления // Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития: Матер. XXX научной конференции (Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 13–15 апреля 2023 г.). – С. 275-279.
9. Sun M., Valdeza-Felip S., Naranjo F.B. Amorphous Silicon Films and Nanocolumns Deposited on Sapphire and GaN by DC Sputtering // Physica status solidi (b). – 2023. – P. 1-7.
10. Cai Sikang & Wang Guicong & Li Ying-Jun & Yang Xiaoqi. Research on material selection of force-sensitive element for high-frequency dynamic piezoelectric pressure sensor // MATEC Web of Conferences. – 2022. – P. 1-7.
11. Скворцов П.А. Разработка методики расчета и проектирования упругого элемента тензодатчика на структуре «кремний на сапфире»: специальность 01.02.06 "Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры": дисс. ... канд. техн. наук. – 2019. – 153 с.
12. Саенко А.В., Бондарчук Д.А. Разработка конструкции датчика давления на основе структуры сапфир-стекловидный диэлектрик-керамика // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 7 (201). – С. 24-32.

13. Клунникова Ю.В., Бондарчук Д.А. Формирование спая стекловидного диэлектрика и сапфира для элементов микроэлектроники // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 7. – С. 66-74.
14. Клунникова Ю.В. Исследование процессов получения спая сапфир-стекловидный диэлектрик // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 1. – С. 17.
15. Кололиков Ю.И., Кащеев И.Д., Хрустов В.Р. Термическое расширение композиционной керамики системы диоксид циркония – оксид алюминия // Новые огнеупоры. – 2016. – № 9. – С. 59-62.
16. Малюков С.П., Мишнев В.Д. Математическое моделирование напряжённо-деформированного состояния чувствительной мембраны датчика давления на основе структуры «кремний на сапфире» // Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития: Матер. XXXI научной конференции (Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 18–20 апреля 2024 г.). – С. 280-282.
17. Karuturi Srinivasa Rao & Samyuktha W. & Vardhan D. & Naidu B. & Kumar Puli & Sravani Girija & Guha Koushik. Design and sensitivity analysis of capacitive MEMS pressure sensor for blood pressure measurement // Microsystem Technologies. – 2020. – P. 2371-2379.
18. Тиняков Ю.Н., Николаева А.Н. О расчёте мембран датчиков давления // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. “Приборостроение”. – 2015. – № 6. – С. 135-142.
19. Андреев А.И., Жуков А.В., Яковлев А.С. Разработка методики в области проектирования мембранных датчиков давления // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 28-34.
20. Пьо В.Т., Симонов Б.М., Тимошенко С.П. Исследование возможностей повышения чувствительности МЭМС-датчика давления емкостного типа с мембранами различных геометрических форм // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2023. – Т. 28, № 2. – С. 222-231.

REFERENCES

1. Basov K.A. ANSYS i LMS Virtual Lab. Geometricheskoe modelirovanie [ANSYS and LMS Virtual Lab. Geometric modeling]. Moscow: DMK Press, 2006, 240 p. ISBN 5-94074-301-3.
2. Kozhanov D.A., Likhacheva S.Yu. Konechno-elementnoe modelirovanie v inzhenernykh raschetakh mekhaniki deformiruемого tverdogo tela: ucheb. posobie [Finite element modeling in engineering calculations of solid mechanics: textbook]. Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet, 2024, 51 p. ISBN 978-5-528-00562-1.
3. Antonets I.V., Borisov R.A., Nigmatullina L.A., Borisova D.R. Opredelenie uprugikh kharakteristik pervichnogo preobrazovatelya datchika davleniya v sisteme vozdushnykh signalov [Determination of elastic characteristics of the primary transducer of the pressure sensor in the air signal system], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [News of Higher Educational Institutions. Instrument-making], 2025, Vol. 68, No. 7, pp. 590-599. DOI 10.17586/0021-3454-2025-68-7-590-599.
4. Bogush M.V. Proektirovanie p'ezoelektricheskikh datchikov s ispol'zovaniem konechno-elementnykh matematicheskikh modeley [Design of piezoelectric sensors using finite element mathematical models], *Pribory* [Devices], 2007, No. 12 (90), pp. 30-38.
5. Loginova L.V., Trofimov A.A., Pecherskaya E.A., Rybakov I.M., Severtsev N.A. Modelirovanie vysokotemperaturnykh datchikov davleniya na baze tekhnologicheskikh struktur «polikremniy – dielektrik» [Modeling of high-temperature pressure sensors based on “polysilicon – dielectric” technological structures], *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems], 2024, No. (48), pp. 85-95. DOI 10.21685/2307-4205-2024-4-9.
6. Teplova T.B., Samerkhanova A.S. Tendentsiya razvitiya primeneniya tverdykh vysokoprochnykh materialov v mikroelektronike, meditsine i yuvelirnykh izdeliyakh [Development trends in the application of hard high-strength materials in microelectronics, medicine, and jewelry], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2006, No. 10, pp. 339-347.
7. Malyukov S.P., Mishnev V.D. Tekhnologiya izgotovleniya chuvstvitel'nykh elementov datchikov davleniya na osnove spaya «sapfir – steklovidnyy dielektrik – keramika» [Manufacturing technology of sensitive elements of pressure sensors based on the "sapphire - vitreous dielectric - ceramics" seam], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 2, pp. 111-119.
8. Malyukov S.P., Mishnev V.D. Tekhnologiya izgotovleniya chuvstvitel'nogo elementa datchika davleniya na osnove struktury «kremniy na sapfire» s ispol'zovaniem metoda vysokochastotnogo magnetronnogo raspyleniya [Manufacturing technology of a sensitive element of a pressure sensor based on the silicon-on-sapphire structure using the high-frequency magnetron sputtering method], *Sovremennye informatsionnye tekhnologii: tendentsii i perspektivy razvitiya: Mater. XXX nauchnoy konferentsii (YUzhnyy federal'nyy universitet, Rostov-na-Donu, 13–15 aprelya 2023 g.)* [Modern information technologies: trends and development prospects: Proceedings of the XXX scientific conference (Southern Federal University, Rostov-on-Don, April 13–15, 2023)], pp. 275-279.

9. Sun M., Valdueza-Felip S., Naranjo F.B. Amorphous Silicon Films and Nanocolumns Deposited on Sapphire and GaN by DC Sputtering, *Physica status solidi (b)*, 2023, pp. 1-7.
10. Cai Sikang & Wang Guicong & Li Ying-Jun & Yang Xiaoqi. Research on material selection of force-sensitive element for high-frequency dynamic piezoelectric pressure sensor, *MATEC Web of Conferences*, 2022, pp. 1-7.
11. Skvortsov P.A. Razrabotka metodiki rascheta i proektirovaniya uprugogo elementa tenzodatchika na strukture "kremniy na sapphire": spetsial'nost' 01.02.06 "Dinamika, prochnost' mashin, priborov i apparatury": diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of a calculation and design methodology for an elastic element of a strain gauge based on a silicon-on-sapphire structure: specialty 01.02.06 "Dynamics and strength of machines, devices, and equipment": cand. of eng. sc. diss.], 2019, 153 p.
12. Saenko A.V., Bondarchuk D.A. Razrabotka konstruksii datchika davleniya na osnove struktury sappfir-steklovidnyy dielektrik-keramika [Development of a pressure sensor design based on a sapphire-glassy dielectric-ceramic structure], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 7 (201), pp. 24-32.
13. Klunnikova Yu.V., Bondarchuk D.A. Formirovanie spaya steklovidnogo dielektrika i sappfira dlya elementov mikroelektroniki [Formation of a junction between a vitreous dielectric and sapphire for microelectronic elements], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 7, pp. 66-74.
14. Klunnikova Yu.V. Issledovanie protsessov polucheniya spaya sappfir-steklovidnyy dielektrik [Study of the processes of obtaining a junction between a sapphire and a vitreous dielectric], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2016, No. 1, pp. 17.
15. Komolikhov Yu.I., Kashcheev I.D., Khrustov V.R. Termicheskoe rasshirenie kompozitsionnoy keramiki sistemy dioksid tsirkoniya – oksid alyuminiya [Thermal expansion of composite ceramics of the zirconium dioxide – aluminum oxide system], *Novye ognepuory* [New refractories], 2016, No. 9, pp. 59-62.
16. Malyukov S.P., Mishnev V.D. Matematicheskoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya chuvstvitel'noy membrany datchika davleniya na osnove struktury «kremniy na sapphire» [Mathematical modeling of the stress-strain state of the sensitive membrane of a pressure sensor based on the "silicon on sapphire" structure], *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii: tendentsii i perspektivy razvitiya: Mater. XXXI nauchnoy konferentsii (YUzhnyy federal'nyy universitet, Rostov-na-Donu, 18–20 aprelya 2024 g.)* [Modern information technologies: trends and development prospects: Proceedings of the XXXI scientific conference (Southern Federal University, Rostov-on-Don, April 18-20, 2024)], pp. 280-282.
17. Karumuri Srinivasa Rao & Samyuktha W. & Vardhan D. & Naidu B. & Kumar Puli & Sravani Girija & Guha Koushik. Design and sensitivity analysis of capacitive MEMS pressure sensor for blood pressure measurement, *Microsystem Technologies*, 2020, pp. 2371-2379.
18. Tinyakov Yu.N., Nikolaeva A.N. O raschete membran datchikov davleniya [On the calculation of pressure sensor membranes], *Vestnik MGTU im. N.E.Baumana. Ser. "Priborostroenie"* [Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series "Instrument Engineering"], 2015, No. 6, pp. 135-142.
19. Andreev A.I., Zhukov A.V., Yakovishin A.S. Razrabotka metodiki v oblasti proektirovaniya membrannykh datchikov davleniya [Development of a methodology for designing membrane pressure sensors], *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science], 2022, Vol. 24, No. 1, pp. 28-34.
20. P'o V.T., Simonov B.M., Timoshenkov S.P. Issledovanie vozmozhnostey povysheniya chuvstvitel'nosti MEMS-datchika davleniya emkostnogo tipa s membranami razlichnykh geometricheskikh form [Study of the possibilities of increasing the sensitivity of a capacitive MEMS pressure sensor with membranes of various geometric shapes], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [Bulletin of higher educational institutions. Electronics], 2023, Vol. 28, No. 2, pp. 222-231.

Малюков Сергей Павлович – Южный федеральный университет; e-mail: spmalyukov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра радиотехнической электроники и наноэлектроники; д.т.н.; профессор; член-корреспондент РАН.

Мишнев Виктор Дмитриевич – Южный федеральный университет; e-mail: mishnev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185929271; кафедра радиотехнической электроники и наноэлектроники; аспирант.

Malyukov Sergey Pavlovich – Southern Federal University; e-mail: spmalyukov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the Department of Radio Engineering Electronics and Nanoelectronics; dr. of eng. sc.; professor.

Mishnev Victor Dmitrievich – Southern Federal University; e-mail: mishnev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185929271; the Department of Radio Engineering Electronics and Nanoelectronics; post-graduate student.