

УДК 621.396, 538.9, 681.7  
EDN: XXPZFT

PACS: 85.30 Dw, 84.40.Ba

**Опτικο-акустические приемники со свободно подвешенной мембраной**

© П. Е. Котляр

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, 630090 Россия  
E-mail: kotlyarpe@iae.nsk.su**Статья поступила в редакцию 18.09.2025; после доработки 25.09.2025; принята к публикации 11.12.2025  
Шифр научной специальности: 2.2.6*

**Рассмотрена эволюция основного узла оптико-акустического преобразователя-датчика давления. Показан последовательный переход от мембранного датчика давления с жестким закреплением мембраны по контуру, приводящему к неконтролируемым механическим напряжениям и изменениям основных метрологических параметров к кантилеверным датчикам давления, у которых закрепляется лишь одна из сторон, что приводит к увеличению чувствительности более чем в 140 раз. Показано, что путем химического травления на мембранной фольге четырех Г-образных узких сквозных пазов в одном технологическом цикле могут быть сформированы полностью свободный от деформаций центральный мембранный элемент квадратной формы и четырехточечный угловой эластичный подвес в виде четырех узких упругих сенсорных элементов, расположенных вдоль боковых сторон недеформируемого мембранного элемента жестко закрепленных на опорном контуре.**

*Ключевые слова:* чувствительный элемент; мембрана; кантилевер; эластичная подвеска.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-75-81

**Введение**

Мембранные датчики давления являются одним из основных элементов конструкции оптико-акустических приемников излучения в значительной степени определяющим метрологические характеристики устройства [1, 2]. Мембранные датчики давления функционируют за счёт деформации упругой мембраны, которая реагирует на изменения внешнего давления. Мембранно-емкостной датчик может очень точно измерять давление в диапазоне от 3,5 до 4 порядков с нижним пределом до  $10^{-5}$  мбар и погрешностью  $\pm(0,15-0,35)$ . Показания мембранно-емкостного датчика не зависят от рода газа, заполняющего расширительную и компенсационную камеры. Разработанные фирмой «Knowles» (Иллинойс, США) на собственной технологической платформе CMOS / MEMS, запущенной в 2002 году, микрофоны серии SiSonic™ на основе кремния уже в четвёртом поколении продают-

ся по всему миру в объемах свыше 1 млрд единиц в год.

**Мембраны**

Чувствительность ОАП определяется как минимальное значение мощности излучения на входе, допускающее уверенное выделение сигнала на уровне фона и собственных шумов преобразователя, и может быть вычислена как произведение парциальных чувствительностей фототермического  $S_{I-T}$ , термоакустического  $S_{T-P}$ , акустомеханического  $S_{P-\delta}$  и электромеханического  $S_{\delta-U}$  звеньев преобразования:

$$S_{\text{ОАП}} = S_{I-T} S_{T-P} S_{P-\delta} S_{\delta-U} = \frac{\Delta T}{\Delta I} \frac{\Delta P}{\Delta T} \frac{\Delta \delta}{\Delta P} \frac{\Delta U}{\Delta \delta}.$$

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что лимитирующим зве-

ном в цепи преобразований является акусто-механическое  $S_{P-\delta}$ , реализуемое как датчик давления.

Чувствительность  $\delta$  (величина прогиба центра плоской мембраны, жестко закреплённой по контуру) при малых перемещениях под действием давления  $P$  выражается формулой [3]:

$$\delta = \frac{3(1-\mu^2)PR^4}{16Rh^3},$$

где  $R$  – рабочий радиус мембраны (по контуру закрепления);  $h$  – толщина мембраны,  $E$ ,  $\mu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала мембраны, соответственно. В существующих конструкциях ОАП прогиб мембран при пороговых значениях измеряемых потоков излучения составляет несколько ангстрем.

Физико-механические свойства мембран в сильной степени зависят от материала, структуры, свойств поверхности и технологии. Из приведенного выражения следует, что чувствительность мембранного преобразователя определяется физическими свойствами материала мембраны ( $E$ ,  $\mu$ ) и конструктивными параметрами ( $R$ ,  $h$ ). Сверхлинейные зависимости чувствительности  $R^4$ ,  $h^3$  обуславливают сверхчувствительность мембранных датчиков к изменению параметров устройства, что является трудно преодолимым препятствием для создания матричных устройств большой размерности.

### Материал для изготовления мембран

Эволюция конструкций проходила в направлении последовательного перехода от металлических мембран из дюралюминия, серебра, никеля, титана, легированных титановых сплавов ВТ16 или ВТ35 толщиной 40–100 нм, к биморфным полимерным мембранам, покрытым отражающим слоем серебра или сурьмы толщиной порядка 100 А [4]. При создании мембранных устройств с использованием МЭМС технологий, широко применяемых при микроминиатюризации, обычно используются: кремний Si-мембрана,

которая формируется травлением материала подложки до толщин 2–5 мкм; двуокись кремния  $\text{SiO}_2$ , нитрид кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , карбид кремния  $\text{SiC}$ , углерод  $\text{C}$ , нитрид алюминия  $\text{AlN}$ , нитрид бора  $\text{BN}$ , получаемые как из газовой фазы, так и ионно-химическими методами осаждения. В качестве базового материала сверхтонких мембран используют нитрид кремния ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) — один из основных материалов микроэлектроники с хорошо отработанной технологией получения и известными свойствами [5, 6].

Перспективными материалами для создания мембран являются каптон и графен. **Каптон** – плёночный полиимид, используемый в различных космических инструментах, разработанный компанией DuPont в 1960-х годах. Каптон является эластичным диэлектриком, стабильным в широком диапазоне температур от  $-273$  до  $+400$  °С, что позволяет решить проблему охрупчивания металлических и полимерных мембран при низких температурах. Используется для изготовления гибких печатных плат и внешних слоёв скаффандров [7].

**Графен.** В известных работах по созданию нового поколения оптико-акустических преобразователей [8, 9] основными факторами, обуславливающими выбор однослойного графена (SLG) для изготовления гибкой мембраны, были предельно малая толщина и предельно высокие эластичность и механическая прочность материала, гарантировавшие значительное повышение чувствительности. Кроме того, применение мембран из однослойного графена даёт возможность одновременно с рекордным повышением чувствительности практически полностью устранить такие недостатки, традиционно присущие преобразователям, как высокая восприимчивость к акустическим и вибрационным шумам, обеспечить увеличение быстродействия, расширение динамического диапазона и возможность работы не только при комнатных температурах, но и при предельно глубоком охлаждении.

Многочисленные эксперименты по выбору формы мембран преследовали не увеличение чувствительности, а в первую очередь получение необходимой частотной характеристики.

При исследовании возможностей повышения чувствительности оптико-акустических преобразователей с жестко закрепленными по периметру мембранами различных геометрических форм (квадратной, круглой и прямоугольной) установлено, что использование мембраны круглой формы обеспечивает максимальные изменения емкости чувствительного элемента при воздействии давления по сравнению с их изменениями в чувствительных элементах с мембранами других геометрических форм [10].

Проблемные технологические вопросы, которые полностью не преодолены до настоящего времени, связаны с плохо контролируруемыми механическими напряжениями, возникающими при жестком закреплении мембран, и сложностью контроля толщины травления сверхтонких (порядка 1 мкм и менее) мембран в МЭМС технологиях, приводящие к индивидуальной калибровке измерительных датчиков давления.

### Кантилевер

Использование тонкой отражающей пленки, жестко закрепленной по одной стороне, в обычной фотоакустической ячейке вместо классической гибкой мембраны впервые было предложено в работе de Paula [11]. Упругая консоль (кантилевер), как прецизионный микродинамометр с порогом в 1 пиконьютон, впервые была применена в атомно-силовом микроскопе в 1982 году.

Кантилевер представляет собой тонкую упругую пластину П-образной формы длиной  $\alpha$ , шириной  $b$  ( $b < \alpha$ ) и толщиной  $h$  ( $h \ll \alpha, b$ ) жестко закрепленную узкой стороной  $b$ . Геометрия кантилевера определяет его жесткость, которая изменяется в широких пределах. Коэффициент жесткости кантилевера  $K = Ebh^3/4\alpha^3$ , где  $E$  – модуль Юнга материала кантилевера,  $b$  – ширина,  $h$  – толщина, и  $\alpha$  – длина прямоугольного кантилевера. Коэффициент жесткости кантилевера, в значительной мере определяющий чувствительность устройства, может варьировать в очень широких пределах ( $10^{-4} \div 10$  Н/м).

Основное свойство кантилевера – отклонение под действием приложенной силы. Основной характеристикой кантилевера явля-

ется его упругая постоянная. Чувствительный элемент кантилеверного датчика давления ОАП, представленный на рис. 1 конструктивно отличается от кантилеверов, применяемых в атомно-силовой микроскопии [12]. Он состоит из подложки, полностью перекрывающей акустическую апертуру ОАП, в которой сформирован подвижный консольный элемент, отделенный от подложки с трех сторон узким микрометровым сквозным пазом. Для оптической системы считывания на сторону кантилевера, обращенную в компенсационную камеру наносится отражающее покрытие: (платина, золото, алюминий).

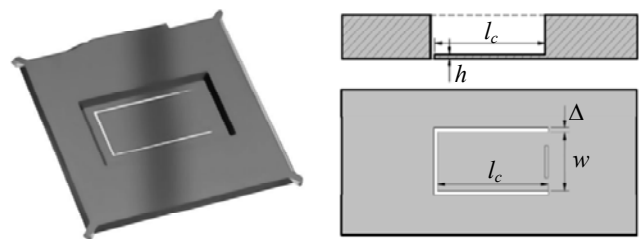


Рис. 1. Фотография и схематический чертеж структуры кантилевера ОАП по [13]

Связь конечного прогиба  $\delta$  консоли с приложенным напряжением  $P$  определяется формулой Стоуни:  $\delta = \frac{3P(1-\mu)}{E} \left( \frac{L_c}{h} \right)^2$ , где  $E$ ,  $\mu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала консоли, соответственно;  $L_c$  – длина балки;  $h$  – толщина балки кантилевера.

Жесткость кантилевера определяется выражением  $k = \frac{Ewh^3}{4L_c^3}$ , где  $w$  – ширина кантилевера.

Максимальный прогиб такой балки под действием равномерно распределенной нагрузки  $\delta_{\max} = \frac{PL_c^4}{8EI}$  и максимальный угол

прогиба  $\theta_{\max} = \frac{PL_c^3}{6EI}$ , где  $I$  момент инерции

$$I = \frac{wh^3}{12}. \text{ Тогда } \delta_{\max} = \frac{3PL_c^4}{2Ewh^3} \text{ и } \theta_{\max} = \frac{2PL_c^3}{Ewh^3}.$$

$$\text{Прогиб кантилевера } \delta_L = \frac{PL^2}{12EI} + \left[ 2L_cL - 3L_c^2 - \frac{L^2}{2} \right].$$

Теоретическая оценка чувствительности классической жестко закрепленной круглой мембраны и прямоугольного кантилевера равной площади показала, что прогиб свободного конца кантилевера превышает прогиб центра круглой мембраны в 140,6 раз [13]. Экспериментальные исследования [14] показали, что для ячеек с простым микрофоном, дифференциальным микрофоном и кантилеверным датчиком давления, прогиб которых измерялся с помощью лазерного интерферометра, значения чувствительности составляют  $3,1 \times 10^{-7}$ ,  $1,7 \times 10^{-7}$  и  $2,2 \times 10^{-9} \text{ см}^{-1} \cdot \text{Вт} \cdot \text{Гц}^{1/2}$  соответственно, что находится в хорошем соответствии с теоретической оценкой.

Жесткость кантилевера  $k = \frac{Ewh^3}{4L_c^3}$  обычно на 2 или 3 порядка меньше, чем у мембраны и перемещение конца кантилевера может составлять десятки микрометров без каких-либо нелинейных или ограничивающих эффектов. Столь значительное повышение чувствительности обусловлено принципиальным отличием поведения пластин (преобладают изгибные деформации) от мембран (преобладают деформации растяжения) при линейных и нелинейных деформациях.

В настоящее время в разработках кантилеверных микромеханических устройств лидируют исследовательские группы Стенфордского университета в которых созданы кантилеверы с жесткостью  $10^{-5} \text{ Н/м}$ , регистрирующие силы до  $10^{-18} \text{ Н}$ , и кантилеверы с временем механического отклика 90 нс [15].

В расчетном плане [16] кантилевер рассматривается как жестко закрепленная консольная балка с конструктивной длиной  $L_c$  шириной  $w$  и толщиной  $h$ , нагруженная равномерно распределенной нагрузкой  $P$  (см. рис. 2).

В расчетном плане [16] кантилевер рассматривается как жестко закрепленная консольная балка с конструктивной длиной  $L_c$  шириной  $w$  и толщиной  $h$ , нагруженная равномерно распределенной нагрузкой  $P$  (см. рис. 2).

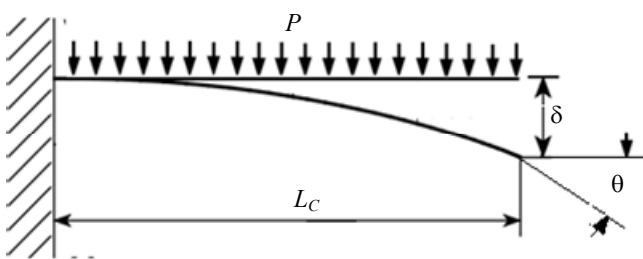


Рис. 2. Расчетная схема консольной балки под действием равномерно распределенной нагрузки

## Мембрана со свободным подвесом

Для преодоления основного недостатка классических мембранных датчиков давления – неконтролируемых механических напряжений, возникающих в мембране при её жестком закреплении, увеличения чувствительности и расширения динамического диапазона предложен прецизионный датчик давления для ОАП, который выполнен на основе квадратного проводящего мембранного элемента, свободно подвешенного в четырех точках с помощью упругих сенсорных элементов, неподвижно закрепленных на опорном контуре с емкостным датчиком перемещения мембранного элемента.

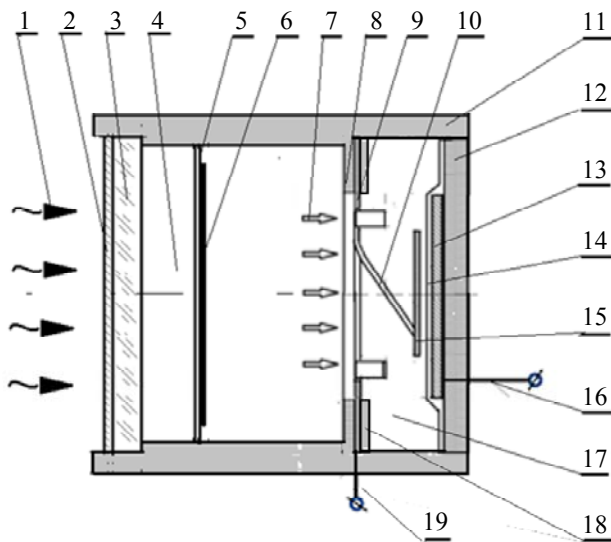
Структурная схема оптико-акустического приемника инфракрасного и ТГц излучения со свободно подвешенной мембраной представлена на рис. 3, включает в себя цилиндрический корпус, который содержит систему пневматически связанных и наполненных гелием, при низком давлении, расширительной камеры и компенсационной камеры, при этом один торец расширительной камеры является входным окном, выполненным с просветляющим покрытием, внутри расширительной камеры параллельно входному окну располагается коллодиевая пленка, с нанесенным на нее, и термически развязанным от стенок расширительной камеры металлическим поглощающим элементом в виде тонкой пленки металлической пленки. Расширительная камера отделена от компенсационной камеры разделительной перегородкой, которая выполнена в виде дисковидной тонкой упругой пластины проводящего материала, закрепленной между опорной и прижимной шайбой. Диаметр разделительной перегородки равен внутреннему диаметру компенсационной камеры, на разделительной перегородке рис. 4 с использованием технологии прецизионной фотолитографии выполняются четыре линии сквозного травления шириной 3-30 мкм, каждая из которых состоит из двух ортогональных равновеликих отрезков длиной  $a$ , причем первый отрезок начинается с отступом  $b$  от угла центрального квадрата ( $a \times a$ ) и ориентирован вдоль стороны квадрата, а второй отрезок выполняется под углом  $90^\circ$  к первому и параллелен стороне квадрата со смещением  $b + \Delta$ , где  $\Delta$  – ширина зазора, об-

разованного сквозным травлением. Таким образом формируются:

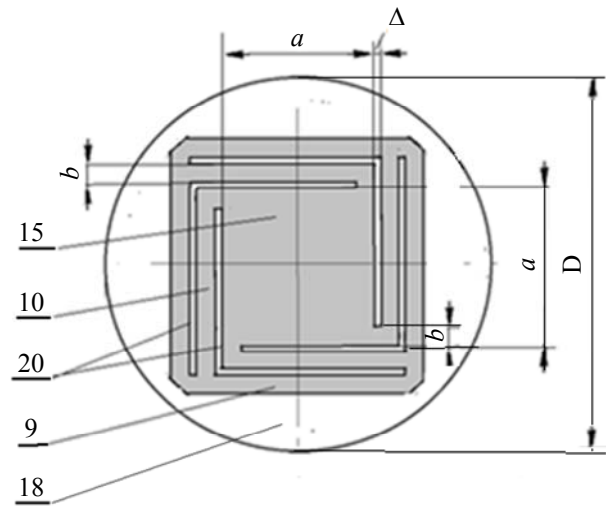
- недеформируемый мембранный элемент 15 квадратной формы ( $a \times a$ ) у которого сторона квадрата  $a = 0,6D$ , расположенный в центре разделительной перегородки 9, перекрывающий большую часть акустической апертуры и имеющий возможность поступательно перемещаться вдоль оси, перпендикулярной его плоскости под действием давления расширяющегося газа;

- четырехточечный угловой эластичный подвес в виде четырех узких ( $a \times b$ ) упругих сенсорных элементов 10, расположенных вдоль боковых сторон недеформируемого мембранного элемента 15 квадратной формы и жестко закрепленных на опорном контуре;

- опорный контур 9, представляющий собой периферийную часть разделительной перегородки, закрепляемую прижимной шайбой 18.



**Рис. 3.** Структурная схема опико-акустического приемника инфракрасного и ТГц излучения со свободно подвешенной мембраной 1 – входное излучение; 2 – просветляющее покрытие; 3 – входное окно; 4 – расширительная камера; 5 – пленка со сквозной пористостью; 6 – металлический поглощающий элемент; 7 – волна давления; 8 – шайбовидная перегородка; 9 – опорный контур, 10 – упругий сенсорный элемент, 11 – цилиндрический корпус, 12 – задняя стенка компенсационной камеры, 13 – неподвижный электрод динамического конденсатора, 14 – защитное диэлектрическое покрытие, 15 – недеформируемый мембранный элемент квадратной формы, 16 – вывод неподвижного электрода, 17 – компенсационная камера, 18 – прижимная шайба, 19 – вывод разделительной перегородки



**Рис. 4.** Конструктивная схема чувствительного элемента датчика давления со свободно подвешенным мембранным элементом, где 9 – опорный контур чувствительного элемента, 10 – упругая сенсорная балка, 15 – недеформируемый мембранный элемент квадратной формы, 18 – прижимная шайба, 20 – линия сквозного травления

Под действием давления расширяющегося газа каждый из четырех сенсорных элементов 10 будет испытывать изгибные деформации вызванные: распределенной нагрузкой,  $\delta_{распр} = qa^4/8EI$ , где  $\delta_{распр}$  – прогиб сенсорного элемента;  $q$  – удельное давление;  $a$  – длина сенсорного элемента;  $E$  – модуль упругости материала;  $I$  – момент инерции площади прямоугольного сечения сенсорного элемента  $I = bh^3/12$  и сосредоточенной нагрузкой, обусловленной давлением  $P$  на четвертую часть площади мембранного элемента  $\delta_{соср} = QEI \frac{a^3}{3}$ , где  $Q = 0,75Pa^2/4$   $h_{соср} = 075Pa^5/Ebh^3$ .

Общее перемещение угла недеформируемого мембранного элемента 15 составит  $\delta = \delta_{распр} + \delta_{соср}$  и при полной идентичности сенсорных элементов обеспечивает поступательное перемещение недеформируемого мембранного элемента 15 квадратной формы, выполняющего роль подвижного электрода в емкостном датчике давления.

Чувствительность такого датчика давления определяется шириной сенсорных элементов  $b$ , где  $b = (0,1-0,05)a$ , и толщиной разделительной перегородки  $h$ , которая составляет несколько мкм.

Расширительная камера 4 и компенсационная камера 17 оказываются пневматиче-

ски соединенными через зазоры сквозных линий травления разделительной перегородки, чем обеспечивается пневматическая обратная связь между камерами по аналогии с капиллярным каналом в классической схеме ОАП и устраняется увеличение жесткости за счет сжатия газа в компенсационной камере 17.

### Заключение

Предложенная свободно подвешенная мембрана образует третью группу сенсорных элементов ОАП (мембрана, кантилевер, свободный подвес). Подобный свободный подвес известен как 4-х точечный Z-образный косо-симметричный подвес осевых акселерометров [17], однако как подвес мембраны датчика давления в известной литературе не рассматривался. Подвес обеспечивает увеличение чувствительности более чем на три порядка по сравнению с круглой мембраной, выполненной из того же материала и имеющей ту же толщину и активную площадь. Поступательное перемещение свободно подвешенного проводящего мембранного элемента обеспечивает эффективное преобразование изменения давления в расширительной камере в изменение емкости. Если на поверхность мембранного элемента нанесена штриховая отражательная маска, то за счет вращательного движения подвес одновременно допускает оптическое считывание перемещения с применением схемы Теплера.

---

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках*

*выполнения работ по проекту № 124041700103-1 государственного задания ИАиЭ СО РАН на 2024–2026 гг.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гибин И. С., Котляр П. Е. / Прикладная физика. 2020. № 2. С. 90–97.
2. Котляр П. Е., Потатуркин О. И. / Автометрия. 2025. № 3. С. 77–95.
3. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов. – М.: Машиностроение, 1981. С. 463.
4. Hasikin K., Soin N., Ibrahim F. / Proc. of the IEEE Int. Conference on Semiconductor Electronics. Malacca, Malaysia, 2010. P. 293–296.
5. Палатник Л. С., Ильинский А. И. / УФН. 1968. Т. 95. Вып. 4. С. 613–645.
6. Дедкова А. А. и др. / Журнал технической физики. 2021. Т. 91. Вып. 10. С. 1054–1465.
7. Полиимидные пленки DuPont™ Kapton®. / www.dupont.com. 03.04.2023.
8. Baglioni G. et al. / Nanoscale. 2023. Vol. 15. P. 6343–6352.
9. Fan K., Suen J. Y., Padilla W. J. / Opt. Express. 2017. Vol. 25. № 21. P. 25318–25325.
10. Тун Пью Вин, Симонов Б. М., Тимошенко С. П. / Известия вузов. Электроника. 2023. Т. 28 (2). С. 222–231.
11. de Paula M. H. et al. / J. Appl. Phys. 1988. Vol. 64. P. 3722–3724.
12. Гетманенко Н. Ю. / Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. Т. 4/7 (52). С. 30–35.
13. Mikko Saarinen. Cantilever enhanced gas sensing using photoacoustic spectroscopy. – Finland: Aalto university school of science and technology, 2010. P. 83.
14. Lindley R. E. et al. / Applied Physics B. 2007. Vol. 86. P. 707–713.
15. Быков А. В. / Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. С. 141–151.
16. Феодосьев В. И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. – М.: Наука, 1967.
17. Распопов В. Я. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007.

## Optical-acoustic radiation receivers with a freely suspended membrane

P. E. Kotlyar

*Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science,  
Novosibirsk, 630090 Russia  
E-mail: kotlyarpe@iae.nsk.su*

*Received 18.09.2025; revised 25.09.2025; accepted 11.12.2025*

***The evolution of the main unit of an optical-acoustic pressure transducer-sensor is considered. A consistent transition from a membrane pressure sensor with rigid fixation of the membrane along the contour, leading to uncontrolled mechanical stresses and changes in the main metrological parameters to cantilever pressure sensors in which only one side is fixed, which leads to an increase in sensitivity by more than 140 times, is shown. It is shown that by chemical etching of four L-shaped narrow through grooves on a membrane foil in one technological cycle, a four-point Z-shaped skew-symmetric suspension can be formed, containing a completely deformation-free central membrane element of a square shape, a four-point angular elastic suspension in the form of four narrow elastic sensor elements located along the lateral sides of the non-deformable membrane element and rigidly fixed to the support contour, and a support contour.***

***Keywords:*** sensitive element; membrane; cantilever; sensitivity; elastic suspension.

### REFERENCES

1. Gibin I. S. and Kotlyar P. E., Applied Physics, № 2, 90–97 (2020) [in Russian].
2. Kotlyar P. E. and Potaturkin O. I., Avtometriya, № 3, 77–95 (2025).
3. Andreyeva L. Ye. Uprugiy elementy priborov. Moscow, Mashinostroyeniye, 1981, p. 463.
4. Hasikin K., Soin N. and Ibrahim F. Proc. of the IEEE Int. Conference on Semiconductor Electronics. Malacca, Malaysia, 2010, pp. 293–296.
5. Palatnik L. S. and Il'inskiy A. I., UFN **95** (4), 613–645 (1968).
6. Dedkova A. A. et al., Zhurnal tekhnicheskoy fiziki **91** (10), 1054–1465 (2021).
7. Poliimidnyye plenki DuPont™ Kapton®. www.dupont.com. 03.04.2023.
8. Baglioni G. et al., Nanoscale **15**, 6343–6352 (2023).
9. Fan K., Suen J. Y. and Padilla W. J., Opt. Express **25** (21), 25318–25325 (2017).
10. Tun P'o Vin., Simonov B. M. and Timoshenkov S. P., Izvestiya vuzov. Elektronika **28** (2), 222–231 (2023).
11. de Paula M. H. et al., J. Appl. Phys. **64**, 3722–3724 (1988).
12. Getmanenko N. Yu., Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy **4/7** (52), 30–35 (2011).
13. Mikko Saarinen. Cantilever enhanced gas sensing using photoacoustic spectroscopy. Finland, Aalto university school of science and technology, 2010, p. 83.
14. Lindley R. E. et al., Applied Physics B **86**, 707–713 (2007).
15. Bykov A. V., Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki, 141–151 (2014).
16. Feodos'yev V. I. Izbrannyye zadachi i voprosy po soprotivleniyu materialov. Moscow, Nauka, 1967.
17. Raspopov V. Y. Mikromekhanicheskiye pribory. Moscow, Mashinostroyeniye, 2007.

### Об авторе

**Котляр Петр Ефимович**, д.г.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник, Институт автоматизации и электрометрии СО РАН (630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1). E-mail: kotlyarpe@iae.nsk.su  
AuthorID: 60366