

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 621.396, 538.9, 681.7

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ (ОБЗОР)

© П. Е. Котляр, О. И. Потатуркин

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: kotlyarpe@iae.nsk.su, potaturkin@iae.nsk.su*

Оптико-акустические преобразователи (ОАП) могут быть использованы во всех приложениях прикладной оптики, где требуются прецизионные измерения мощности электромагнитного излучения. Они относятся к тепловым волнометрическим приёмникам «полного спектра», имеют постоянную спектральную чувствительность в очень широком диапазоне (0,3–10000 мкм) и позволяют измерять как постоянные потоки электромагнитного излучения мощностью от 10^{-11} Вт с динамическим диапазоном 80 дБ, так и фемтосекундные тераваттные лазерные импульсы. Метрологические параметры ОАП в основном определяются конструкцией чувствительных элементов, осуществляющих акустомеханическое преобразование. Анализируются методы увеличения чувствительности классических мембранных чувствительных элементов за счёт использования новых материалов, оптимизации геометрии, гофрирования и краевой перфорации, а также применение кантилеверов в качестве новых высокочувствительных элементов датчиков давления. Представлены предельные возможности как классических, так и новых методов прецизионных измерений деформации чувствительного элемента ОАП, вызванного давлением расширяющегося газа.

Ключевые слова: мембрана, геометрия, чувствительность, гофрирование, перфорация, графен, кантилевер, отклонение, регистрация прогиба.

DOI: 10.15372/AUT20250308

EDN: UUKWRN

Введение. Оптико-акустические приёмники (ОАП) основаны на эффекте Белла — Тиндаля — генерации акустических волн в замкнутом объёме газа под действием светового потока, модулированного вращающимся перфорированным диском, обнаруженном в 1880 г. А. Г. Беллом. В 1881 г. данное открытие было подтверждено в работах Дж. Тиндаля и В. К. Рентгена [1]. Этот эффект заключается в том, что в результате поглощения модулированного излучения возникают колебания температуры газа и его давления, а также акустические колебания, которые передаются гибкой мембране. Частота колебаний зависит от частоты модуляции потока, а их интенсивность — от интенсивности радиации и способности данного газа поглощать инфракрасную радиацию.

В 1934–1936 гг. Х. В. Хейсу [2] удалось использовать эффект Белла — Тиндаля для принципиального усовершенствования классического газового термометра. Он поместил внутрь газонаполненного объёма специальный элемент, поглощающий исследуемое излучение, применил эластичную мембрану для регистрации изменения объёма газа при нагревании и принцип динамического конденсатора для отсчётной системы, что позволяло свести измерение деформации гибкой металлической мембраны к измерению электрической ёмкости. Схематически приёмник Хейса построен по двухкамерной схеме, представленной на рис. 1.

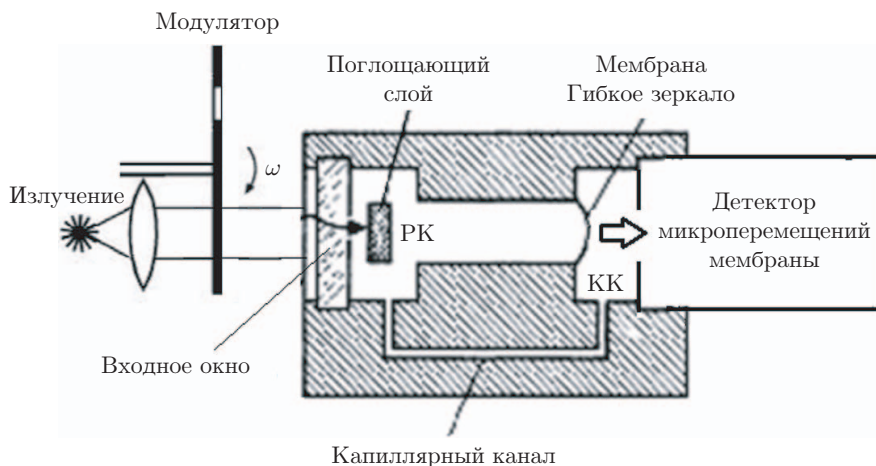


Рис. 1. Структурная схема оптико-акустического преобразователя [3] с добавлениями

Исследуемое излучение через входное окно попадает в газонаполненную расширительную камеру (РК), в которой расположен поглотитель, преобразующий излучение в тепло. Расширительная камера герметично отделена от следующей за ней компенсационной камеры (КК) с помощью тонкой мембраны, жёстко закреплённой по контуру. Тонкая мембрана представляет собой чувствительный элемент датчика давления. В конструкции ОАП Хейса используется проводящая мембрана, деформируемая давлением нагретого газа, которая служит подвижным электродом динамического конденсатора, образованного ею, и плоским неподвижным электродом, закреплённым на внутренней поверхности торцевой стенки компенсационной камеры. Таким способом формируется ёмкостный детектор деформации мембраны.

Основной конструктивный принцип, заложенный Хейсом, — газонаполненный объём, герметично разделённый на две камеры (расширительную и компенсационную) с помощью дисковидной эластичной мембраны, жёстко закреплённой по контуру, — оставался неизменным во всех конструкциях оптико-акустических преобразователей (ОАП) более 60 лет [4–6]. Оптико-акустические преобразователи, построенные на этих принципах, имеют постоянную спектральную чувствительность в диапазоне 0,3–10000 мкм, наибольшую среди тепловых детекторов, работающих при комнатной температуре, и не требуют вакуумирования и термостабилизации. Диапазон исследуемых с помощью ОАП сигналов охватывает как постоянные потоки электромагнитного излучения мощностью от 10^{-11} Вт (изменения температуры термочувствительного элемента на 10^{-6} – 10^{-7} К), так и фемтосекундные тераваттные лазерные импульсы. Недостатками ОАП являются относительно большая постоянная времени (0,6 мс для ячеек с гелиевым наполнением и 10–20 мс для ксеноновых) и сверхчувствительность к механическим вибрациям. По чувствительности и шумовым характеристикам ($NEP = 1,4 \cdot 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2}) они уступают лишь охлаждаемым тепловым приёмникам.

Упругие элементы датчиков давления.

Мембраны. Мембранные датчики давления функционируют за счёт деформации упругой мембраны, которая реагирует на изменения внешнего давления. Мембранно-ёмкостный 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-ёмкостного датчика не зависят от рода газа, заполняющего расширительную и компенсационную камеры. Мембраны подразделяются на пластины и плёнки. Под пластиной понимают упругую перегородку, сопротивляющуюся деформации благодаря своей собственной

жёсткости. Перегородка из плёнки не имеет собственной изгибной жёсткости и приобретает упругие свойства только благодаря предварительному натяжению [7].

В [8–11] представлены шесть основных критериев для оценки характерных особенностей функционирования мембран (пластин), позволяющие оптимизировать конструкцию датчика давления. В критериях приняты следующие обозначения физических параметров: a — радиус круглой мембраны или половина стороны квадратной мембраны; w_0 — смещение (прогиб) центра мембраны; h — толщина мембраны; P — приложенное давление; σ_0 — начальное внутреннее напряжение мембраны; E — модуль Юнга материала мембраны; ν — коэффициент Пуассона.

В расчётном плане пластина полагается тонкой, если $(h/a)^2 \ll 1$. Обычно используется следующий ряд: $(h/a)^2 \sim 0,1; 0,01; 0,001; 0,0001$. Тонкие пластины в рамках их упругого деформирования подразделяются на жёсткие, гибкие и абсолютно гибкие. Если упругий прогиб w таков, что $w/h \leq 0,25$, то пластина считается жёсткой. В этом случае деформации срединного слоя пластины пренебрежимо малы и в расчётах не учитываются. Несущие свойства такой пластины обеспечиваются лишь её изгибной жёсткостью. При $0,25 \leq w/h \leq 1$ пластина полагается гибкой. Деформации срединного слоя гибкой пластины сравнимы с изгибными деформациями, и пренебрегать ими нельзя. Если пластина деформируется упруго при прогибах, значительно превышающих толщину $w/h \gg 1$, то такая пластина является абсолютно гибкой (мембрана).

Представим сравнительные деформационные критерии, учитывающие модуль Юнга материала мембраны:

Критерий «мембрана — пластина»: $k_1 = \sigma_0 a^2 / (E h^2)$, при $k_1 \gg 1$ — в большей степени «напряжённая мембрана»; при $k_1 \ll 1$ — в большей степени «жёстко закреплённая пластина»; при $k_1 \approx 1$ в расчётах учитываются изгибные и продольные напряжения.

Критерий линейности прогиба мембран: $k_2 = E w^2 / (\sigma_0 a^2)$, при $k_2 \ll 1$ — практически линейная зависимость прогиба мембраны от давления; при $k_2 \gg 1$ — сильная нелинейность прогиба мембраны.

Приведём сравнительные критерии, учитывающие влияние параметров окружающей газовой среды на технические характеристики мембранных преобразователей:

Критерий влияния упругости подмембранного газового объёма: $k_3 = p_\nu a^2 / (\sigma_0 h h_\nu)$, где p_ν — давление газа, h_ν — толщина подмембранного газового зазора; при $k_3 \ll 1$ учитывается лишь упругость мембраны; при $k_3 > 1$ необходимо принимать во внимание влияние упругости газового подмембранного объёма.

Критерий влияния присоединённой массы воздуха (при линейных размерах мембраны меньше длины звуковых волн): $k_4 = \rho_\nu a / (\rho_m h)$, где ρ_ν — плотность окружающего газа, ρ_m — средняя плотность материала мембраны; при $k_4 \ll 1$ учитывается лишь масса мембраны; при $k_4 > 1$ необходимо учитывать влияние присоединённой массы окружающего газа.

Отметим сравнительные критерии, учитывающие влияние параметров окружающей газовой среды на характеристики мембранных термопреобразователей:

Критерий влияния газовой теплоотдачи: $k_5 = \lambda_\nu a / (\lambda_m h)$, где λ_ν — теплопроводность газа, λ_m — теплопроводность материала мембраны; при $k_5 \ll 1$ учитывается лишь теплопроводность через мембрану; при $k_5 > 1$ необходимо принимать во внимание теплоотдачу в газовую среду.

Критерий влияния присоединённой теплоёмкости воздуха: $k_6 = c_\nu \rho_\nu a / (c_m \rho_m h)$, где c_ν — теплоёмкость газа, c_m — средняя теплоёмкость материала мембраны; при $k_6 \ll 1$ учитывается лишь теплоёмкость мембраны; при $k_6 > 1$ необходимо иметь в виду влияние теплоёмкости окружающего газа.

Из приведённых сравнительных критериев необходимо выделить важнейший размерный параметр a/h , определяющий взаимодействие подсистем при полном анализе мембранных устройств.

Чувствительность ОАП (основной параметр устройства) 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 звеном в цепи преобразований является акустомеханическое $S_{P-\delta}$, реализуемое как датчик давления.

Чувствительность δ (величина прогиба центра плоской мембраны, жёстко закреплённой по контуру) при малых перемещениях под действием давления P выражается формулой

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

где R — рабочий радиус мембраны (по контуру закрепления); h — толщина мембраны; E, μ — модуль упругости и коэффициент Пуассона материала мембраны соответственно [12].

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 приведённого выражения следует, что чувствительность мембранного преобразователя определяется физическими свойствами материала мембраны (E, μ) и конструктивными параметрами (R, h). Сверхлинейные зависимости чувствительности R^4, h^3 означают, что мембранные датчики сверхчувствительны к изменению параметров устройства, что является труднопреодолимым 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 Å [13]. При создании мембранных устройств с использованием МЭМС-технологий, широко применяемых при микроминиатюризации, обычно используются: кремниевая (Si) мембрана, которая создаётся травлением материала подложки до толщин 2–5 мкм; двуокись кремния (SiO_2), нитрид кремния (Si_3N_4), карбид кремния (SiC), углерод (C), нитрид алюминия (AlN), нитрид бора (BN), получаемые как из газовой фазы, так и ионно-химическими методами осаждения. В качестве базового материала сверхтонких мембран применяют нитрид кремния (Si_3N_4) — один из основных материалов микроэлектроники с хорошо отработанной технологией получения и известными свойствами [14, 15].

Графен. В известных работах по созданию нового поколения ОАП [16–20] 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 такой недостаток, традиционно присущий 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.

Конструкции мембран.

Геометрические факторы мембран, влияющие на чувствительность. Форма мембраны. При исследовании возможностей повышения чувствительности ОАП с жёстко закреплёнными по периметру мембранами различных геометрических форм (квадратной, круглой и прямоугольной) установлено, что использование мембраны круглой формы обеспечивает максимальные изменения ёмкости чувствительного элемента при воздействии давления по сравнению с их изменениями в чувствительных элементах с мембранами других геометрических форм [21]. Для создания высокочувствительных устройств, как правило, применяются мембраны с минимально технологически достижимыми толщинами. Особый интерес представляют мембраны, в которых жёсткость и механические напряжения снижаются за счёт введения разгружающих 3D-элементов (гофры, перфорация). Чувствительность мембраны δ обратно пропорциональна её жёсткости D .

Сборка мембранного узла и регулировка натяжения мембраны обычно осуществляются путём зажатия мембраны двумя наружными кольцами с V-образным торцевым уплотнением [22, 23].

Гофрированные мембраны. Для повышения чувствительности мембранных структур к воздействию внешнего давления необходимо уменьшение толщины, снижение механических напряжений и увеличение рабочего радиуса мембраны. При достижении определённых соотношений этих параметров обнаруживается определяющее влияние остаточных механических напряжений на чувствительность мембранной структуры. Известно, что кардинальное снижение суммарных механических напряжений в мембране возможно за счёт использования гофрированной структуры. Формирование структуры гофров по периферии мембраны обеспечивает резкое снижение остаточных напряжений в центральной части мембраны за счёт возникновения изгибных деформаций в области гофра. При этом значительно возрастает чувствительность мембраны (рис. 2). Соотношение между толщиной мембраны и высотой гофра может достигать 1/200 [9].

В [24] впервые в известной научной литературе представлены материалы по применению гофрированной мембраны из нитрида кремния в конструкции датчика давления ОАП с туннельной схемой считывания прогиба (рис. 3).

На рис. 4 представлены внешний вид гофрированной мембраны с центральным отражательным элементом с искусственно созданными концентрическими кольцевыми

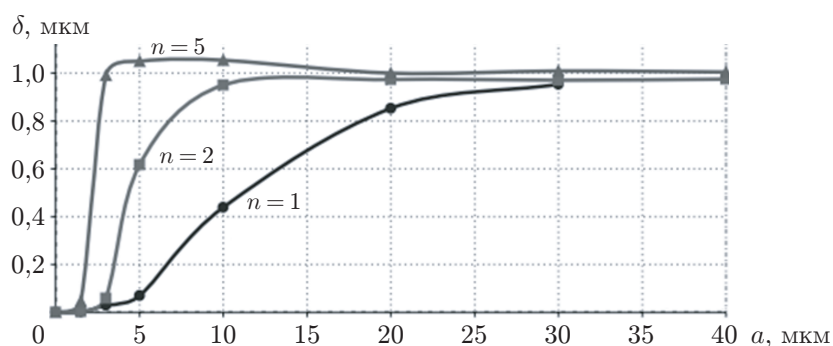


Рис. 2. Зависимости прогиба δ центральной части гофрированной мембраны толщиной 0,2 мкм при давлении $p = 1$ Па от глубины a и числа гофров n [9]

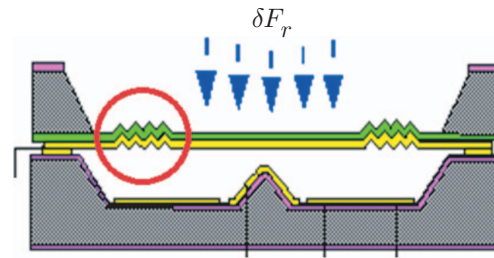


Рис. 3. Гофрированная мембрана в туннельном ОАП [24]. Эластичная биморфная гофрированная мембрана выполнена из нитрида кремния толщиной 0,7 мкм с проводящим покрытием слоя золота толщиной 2000 Å

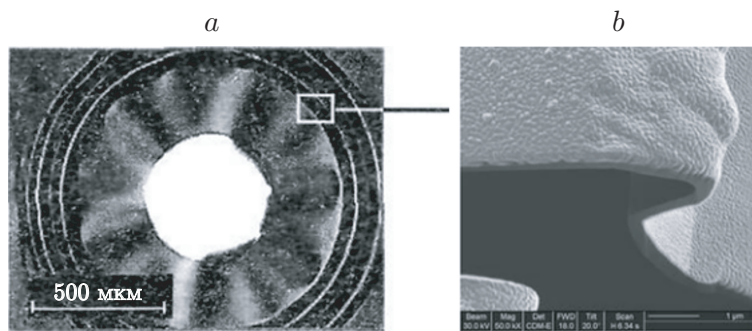


Рис. 4. Гофрированная мембрана с центральным отражательным элементом [9]

гофрами и естественно самоорганизующимися радиальными гофрами (рис. 4, *a*), а также изображение сечения кольцевого гофра, полученного после препарирования мембраны остросфокусированным ионным пучком (рис. 4, *b*). Отечественной радиоэлектронной промышленностью освоена технология изготовления мембран с гладким профилем гофров при глубине рельефа до 30 мкм и зеркалом для оптической системы считывания прогибов в виде круглого металлического элемента. Достигнута чувствительность до 140 нм/Па при размере мембраны $1,5 \times 1,5 \text{ мм}^2$ и толщине слоя нитрида кремния 0,2 мкм [9].

Перфорированные мембраны. Идея перфорирования плоских мембран для повышения их чувствительности содержится в патенте А. В. Корлякова [25]. Сквозная краевая перфорация мембраны является ещё одним способом повышения чувствительности мембранного датчика давления. Краевая перфорация переводит плоскую мембрану в квазигофрированную и обеспечивает достижение следующих целей.

1. Разгрузка механических напряжений мембраны, вызванных деформациями в зоне закрепления.

2. Снижение жёсткости мембраны.

3. Обеспечение выравнивания градиента давления между расширительной и компенсационной камерами для осуществления термо- и барокомпенсации и отказ от выполнения капиллярного компенсационного канала (см. рис. 1), что значительно упрощает конструкцию ОАП, особенно в матричном исполнении.

4. Значительное увеличение прогиба мембраны с действием сквозной краевой перфорации как краевого гофра при заданном давлении за счёт локального уменьшения его жёсткости, что обеспечивает дополнительное увеличение чувствительности.

5. Выполаживание профиля прогиба гибкой проводящей мембраны, увеличивающее ёмкость динамического конденсатора (рис. 5).

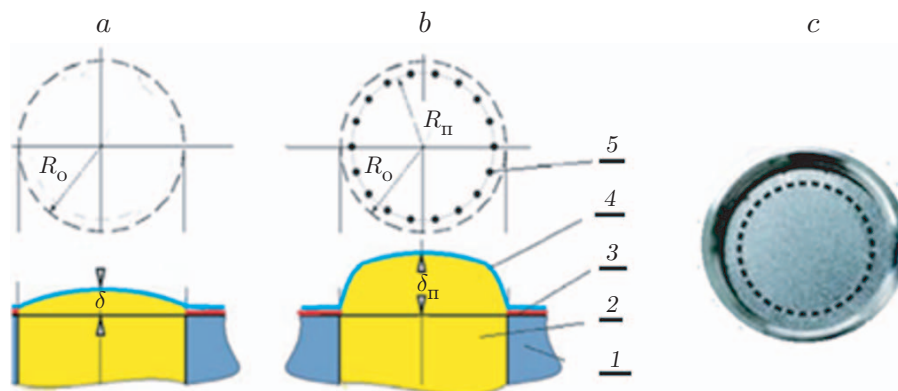


Рис. 5. Увеличение прогиба и выполаживание профиля прогиба тонкой мембраны за счёт сквозной краевой перфорации: *a* — прогиб δ -мембраны без краевой перфорации; *b* — прогиб δ_π -мембраны с краевой перфорацией (1 — корпус преобразователя, 2 — расширительная камера ОАП, 3 — подстилающий контактный слой золота, 4 — мембранный слой, 5 — сквозные перфорационные отверстия); *c* — фотография перфорированной мембраны

Отверстия в листе графена делают в два этапа [26]. На первом этапе графен бомбардируют ионами галлия с энергией, достаточной, чтобы нарушить его структуру в местах попадания. Затем мембрану погружают в окислитель, который разрушает графен прежде всего в местах дефектов — в листе появляются круговые отверстия примерно одинакового размера. Диаметр каждого из них составляет порядка одного нанометра и возрастает с увеличением времени травления, достигая 10 нм. Для сохранения прочностных характеристик материала расстояние между центрами отверстий должно быть не менее четырёх диаметров. Краевая перфорация может выполняться как однорядной, так и многорядной.

Кантилевер. Плоская прямолинейная консольно закреплённая пружина широко применяется в прикладной электротехнике, начиная с момента её зарождения в XIX в. и до настоящего времени, в телеграфных, телефонных и специальных слаботочных электромагнитных реле. Упругая консоль (кантилевер) как прецизионный микродинамометр с порогом в 1 пН впервые была применена в атомно-силовом микроскопе в 1982 г. [27]. С этого момента кантилевер перешёл из разряда одного из узлов контактной группы реле в обширный самостоятельный класс сверхвысокочувствительных датчиков [28], начались разработка и промышленный выпуск широкой номенклатуры кантилеверов, ориентированных на решение принципиально новых научных задач [29].

Известно, что использование тонкой отражающей плёнки, жёстко закреплённой по одной стороне, в обычной фотоакустической ячейке вместо классической гибкой мембраны впервые было предложено в работе М. Н. de Paula (университет Сан-Паулу, Бразилия, 1988 г.) [30]. Обычно кантилевер представляет собой консольно закреплённую балку в виде прямоугольного параллелепипеда. Главное свойство кантилевера — отклонение под действием приложенной силы. Основной характеристикой кантилевера является его упругая постоянная. Чувствительный элемент кантилеверного датчика давления ОАП конструктивно отличается от кантилеверов, применяемых в атомно-силовой микроскопии [31, 32] и при биохимических исследованиях [29, 33]. Он состоит из подложки, полностью перекрывающей акустическую апертуру ОАП, в которой сформирован подвижный консольный элемент, отделённый от подложки с трёх сторон узким микрометровым сквозным пазом (рис. 6). Для оптической системы считывания на сторону кантилевера, обращённую в компенсационную камеру, наносится отражающее покрытие (платина, золото, алюминий).

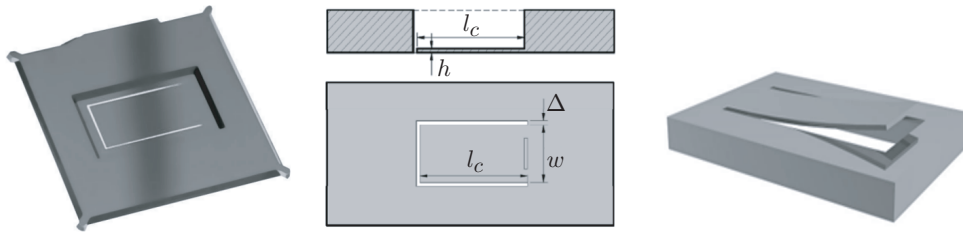


Рис. 6. Фотография и схематический чертёж структуры кантилевера ОАП [34]

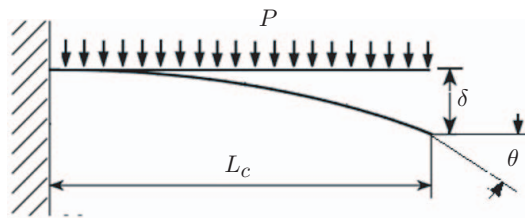


Рис. 7. Расчётная схема консольной балки под действием равномерно распределённой нагрузки

Основными производителями кантилеверов различных типов являются: Nanonics Imaging Ltd. (Израиль), ЗАО «НТ-МДТ» (Россия), Veeco Instruments Inc. (США), Budget Sensors (Болгария), NANOSENSORSTM (Швейцария), NanoAndMore GmbH (Германия), Nano World (США).

В расчётном плане [35–37] кантилевер рассматривается как жёстко закреплённая консольная балка с конструктивной длиной L_c , шириной w и толщиной h с равномерно распределённой нагрузкой P (рис. 7).

Связь конечного прогиба δ консоли с приложенным напряжением P определяется формулой Стоуни:

$$\delta = \frac{3P(1-\mu)}{E} \left(\frac{L_c}{h} \right)^2,$$

где E , μ — модуль упругости и коэффициент Пуассона материала консоли соответственно; L_c — длина балки; h — толщина балки кантилевера. Жёсткость кантилевера определяется выражением $k = Ewh^3/(4L_c^3)$, где w — ширина кантилевера.

Максимальный прогиб такой балки под действием равномерно распределённой нагрузки $\delta_{\max} = PL_c^4/(8EI)$ и максимальный угол прогиба $\theta_{\max} = PL_c^3/(6EI)$, где I — момент инерции, $I = wh^3/12$. Тогда $\delta_{\max} = 3PL_c^4/(2Ewh^3)$ и $\theta_{\max} = 2PL_c^3/(Ewh^3)$.

Прогиб кантилевера определяется следующим выражением:

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

Теоретическая оценка чувствительности классической жёстко закреплённой круглой мембраны и прямоугольного кантилевера равной площади показала, что прогиб свободного конца кантилевера превышает прогиб центра круглой мембраны в 140,6 раза [34]. Экспериментальные исследования [38] показали, что для ячеек с простым и дифференциальным микрофонами и кантилеверным датчиком давления, прогиб которого измерялся с помощью лазерного интерферометра, были получены значения нормализованной чувствительности $3,1 \cdot 10^{-7}$, $1,7 \cdot 10^{-7}$ и $2,2 \cdot 10^{-9}$ Вт·Гц^{1/2}/см соответственно, что находится в хорошем согласии с теоретической оценкой.

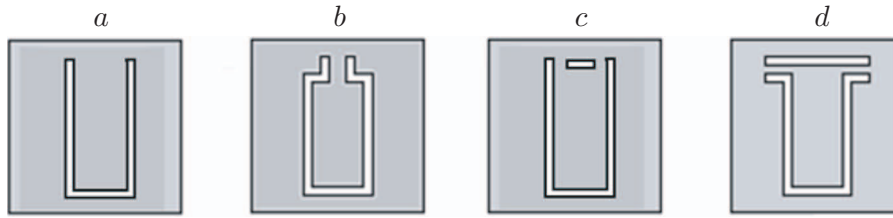


Рис. 8. Топология кантилеверов ОАП [34] с дополнениями: *a* — классический кантилевер; *b* — кантилевер типа «лепесток» со сниженной жёсткостью за счёт уменьшения ширины w ; *c* — кантилевер со сниженной жёсткостью и увеличенной поперечной устойчивостью; *d* — кантилевер с увеличенной поперечной устойчивостью и сниженной жёсткостью за счёт торсионной подвески

Жёсткость кантилевера $k = Ewh^3/(4L_c^3)$ 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. Обнаруженное настолько значительное повышение чувствительности обусловлено особенностью поведения пластин (преобладают изгибные деформации) и мембран (преобладают деформации растяжения) при линейных и нелинейных деформациях.

Топология кантилеверов ОАП представлена на рис. 8.

Эволюция конструкции кантилеверов заключалась в последовательном снижении их жёсткости за счёт увеличения фактора L_c/w (рис. 9, *a—c*) и переходе от изгибных деформаций к деформациям кручения (рис. 9, *d*).

В [39] представлены результаты исследования (рис. 10, 11) влияния геометрии кантилеверов на резонансную частоту, механическую и ёмкостную чувствительность и время отклика. Все три конструктивных исполнения имели одинаковую площадь ($WL = \text{const}$, где W — сторона закрепления), отношения сторон W/L , равные 1,5 — Design-1 (D1), 1,0 — Design-2 (D2) и 0,67 — Design-3 (D3) и закреплённые с зазором d от жёсткого недеформируемого электрода, предназначенного для измерения деформации кантилевера при подаче давления 1 Па ёмкостным методом.

Из рис. 9, с следует, что конструкции кантилеверных ёмкостных датчиков давления D1 и D2, у которых ширина закрепления W превышает их длину, обладают предельно низкой чувствительностью, и для практического применения может быть рекомендован только конструктивный вариант D3.

На рис. 10 представлены временные изменения ёмкости консольных датчиков давления с соотношением сторон 1,5; 1,0 и 0,67 при подаче звуковой волны частотой 300 Гц и давлении 1 Па [39].

Из рис. 10, с следует, что консольный датчик давления D3 обладает не только максимальной чувствительностью, но и минимальным временем отклика среди всех трёх датчиков.

Частотная характеристика кантилеверного ОАП. На рис. 11 представлен вклад различных теплофизических процессов в формирование частотной зависимости выходного сигнала ОАП [40].

На низких частотах тепловая диффузия к стенкам ячейки уменьшает волну давления, генерируемую внутри ячейки, а утечка газа через зазор между рамой и консолью уменьшает разницу давлений, изгибающую консоль. Чувствительность возрастает с увеличением частоты модуляции до тех пор, пока расширение газа за счёт поглощения электромагнитной энергии и механизмы релаксации не перестают успевать за модуляцией. Максимальная чувствительность обычно достигается при частоте модуляции около десятков Гц. Затем частотная характеристика снижается до тех пор, пока не достигнет резонансной частоты

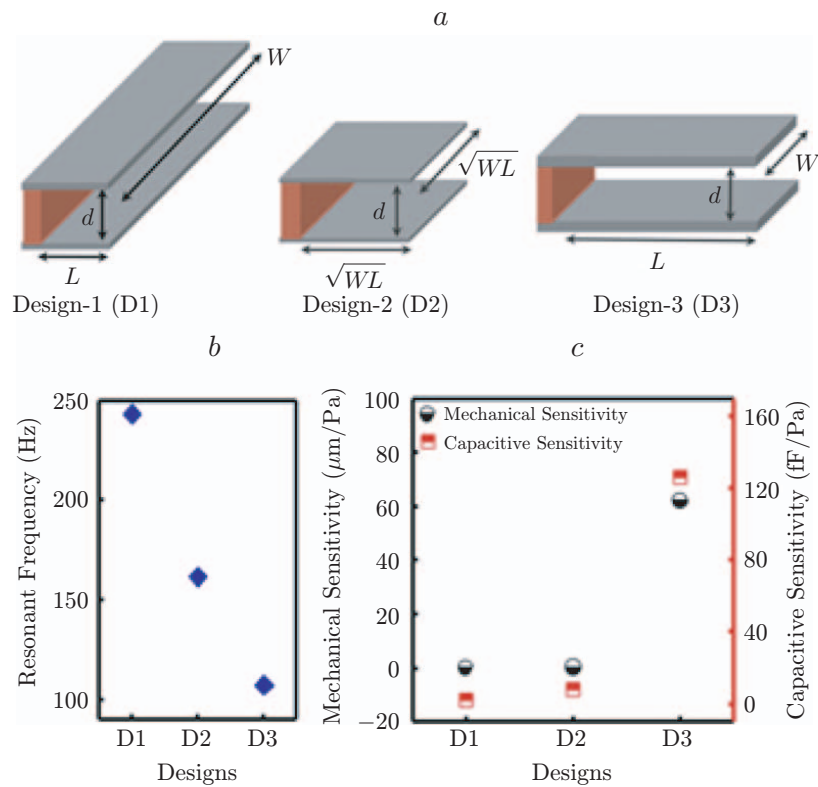


Рис. 9. Конструктивные схемы трёх различных консольных ёмкостных датчиков давления (а), резонансная частота всех трёх конструкций (b), механическая и ёмкостная чувствительность всех трёх конструкций при давлении 1 Па (с) [39]

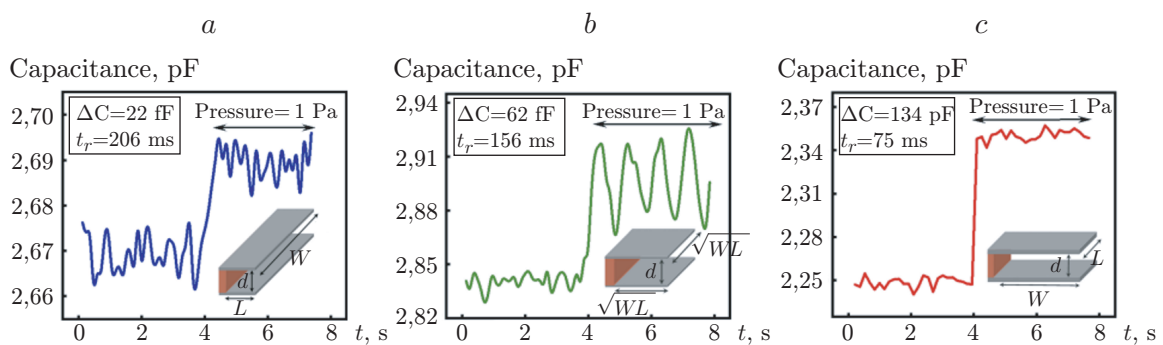


Рис. 10. Изменения ёмкости и времени отклика консольных датчиков давления, которые имеют соотношение сторон 1,5 (а), 1,0 (b) и 0,67 (с) при подаче звуковой волны частотой 300 Гц и давлении 1 Па [39]

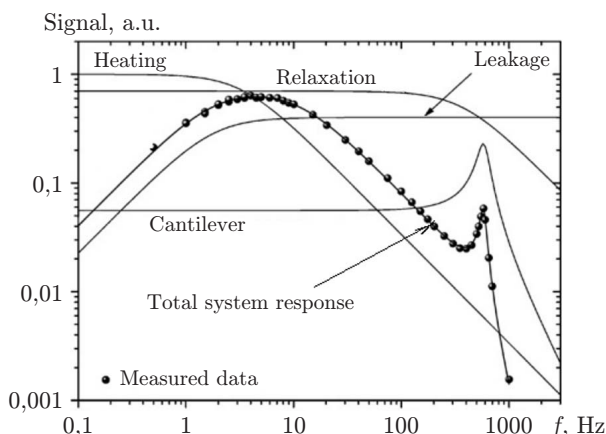


Рис. 11. Вклад различных теплофизических процессов в формирование частотной зависимости выходного сигнала ОАП [40]

Таблица

**Основные параметры промышленных кантилеверов
с оптической системой регистрации отклонения
(материал — Si, размер основания — $3,4 \times 1,6 \times 0,3$ мм)**

Производитель	Серия	Покры- тие	Размер кантилевера, мкм			Коэффициент жёсткости, Н/м		
			Длина	Ширина	Толщина	Мин.	Средн.	Макс.
NT-MDT	NSG10/15	Au	95 ± 5	30 ± 3	$2,0 \pm 0,5$	1,45	5,1	15,1
	CSG10/15	Au	225 ± 5	30 ± 3	$1,0 \pm 0,5$	0,003	0,03	0,13
Budget- sensors	Tap300-G Contact	—	125 ± 10	30 ± 5	$4,0 \pm 1,0$	20	40	75
		—	450 ± 10	50 ± 5	$2,0 \pm 1,0$	0,07	0,2	0,4
Nano- world	Arrow TM NC	?	160 ± 5	45 ± 5	$4,6 \pm 0,5$	27	42	80
	Arrow TM CONT	?	450 ± 5	45 ± 5	$2,0 \pm 0,5$	0,06	0,2	0,38
Nano- science	AppNano ACT	Al	125 ± 10	35 ± 5	$4,5 \pm 0,5$	25	40	75
	AppNano Sicon	Al	450 ± 10	40 ± 5	$2,5 \pm 0,5$	0,1	0,2	0,6

кантилевера (локальный максимум). При частотах выше, чем резонансная частота, общий отклик системы снижается за счёт механизмов релаксации тепла и откликов кантилевера.

В настоящее время в разработках кантилеверных микромеханических устройств лидируют исследовательские группы Стенфордского университета. Группой Т. Кенни и Д. Ругара созданы кантилеверы жёсткостью 10^{-5} Н/м, с помощью которых можно регистрировать силы до 10^{-18} Н, а Дж. Маминым создан кантилевер с временем механического отклика 90 нс [41]. В таблице представлены основные параметры промышленных кантилеверов ведущих отечественных и зарубежных производителей [41].

Как следует из таблицы, несмотря на использование прецизионной фотолитографии и хорошо контролируемых методов травления, до настоящего времени не удалось добиться отклонения отдельных кантилеверов по толщине менее 0,5 мкм. Как следствие, жёсткость кантилеверов может отличаться на 100 % и более, что требует их индивидуальной силовой калибровки.

Отечественной промышленностью (АО «Ангстрем») освоен серийный выпуск высокочувствительных кантилеверов из монокристаллического кремния N-типа с объёмным сопротивлением 0,003 Ом·см, легированного фосфором, и с алюминиевым отражающим

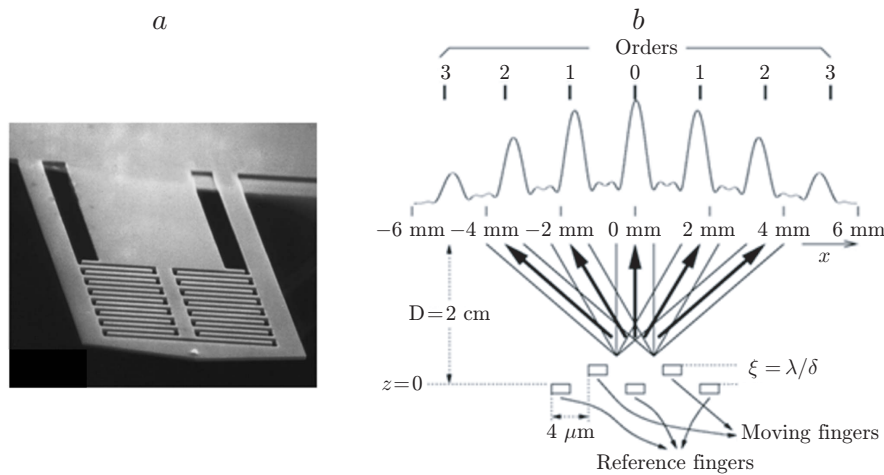


Рис. 12. Геометрия встречно-штыревого кантилевера (а) и формирование дифракционной картины при деформации консольного элемента конструкции (b) [42]

покрытием. Длина консоли $L \approx 420$ мкм, ширина $W \approx 30$ мкм, толщина $1,75 \pm 0,75$ мкм и силовая постоянная $0,03$ Н/м [31].

Встречно-штыревой кантилевер [42, 43]. Встречно-штыревой (interdigital, ID) кантилевер с двумя наборами чередующихся пальцев является альтернативой обычному кантилеверу. Он основан на формировании встречно-штыревой оптической дифракционной решётки, которая состоит из двух наборов гребенчатых штырей. Один набор штырей жёстко соединён с опорой кантилевера и остаётся неподвижным во время измерения давления. Второй набор штырей, размещённый в пазах первого, закреплён на консольной балке, деформируемой под действием равномерно распределённой нагрузки, которая вызвана давлением расширяющегося газа. Отражение считывающего луча от штырей создаёт дифракционную картину, состоящую из многих порядков. Интенсивность каждого порядка зависит от величины отклонения кантилевера. Таким образом, отклонение кантилевера определяется простым измерением оптической интенсивности. Геометрия и формирование дифракционной картины встречно-штыревого кантилевера представлены на рис. 12.

Существует два способа реализации фазовых решёток на консольных балках. В первом способе штыри направлены вдоль оси консоли, во втором способе (рис. 12, а) — перпендикулярны оси консоли. Между двумя геометриями мало различий, за исключением оси дифракционной картины, которая перпендикулярна консоли для первого вида и параллельна оси консоли для второго. Встречно-штыревой кантилевер невосприимчив к шуму лазерного источника считывания и термически возбуждаемым механическим вибрациям.

Технологии производства микрокантилеверов. В настоящее время основными материалами МЭМС-технологии для производства кантилеверов являются кремний, оксид кремния и нитрид кремния. Впервые метод фотолитографии для создания микрокантилевера из нитрида кремния применён Т. Альбрехтом в 1989 г. Чувствительность кантилеверного сенсора в статическом режиме зависит от модуля Юнга материала кантилевера. Кремний имеет достаточно большое значение модуля Юнга ($E = 1,79 \cdot 10^{11}$ Н/м²), поэтому кантилеверы, произведённые из более мягких материалов, например SiO₂ ($E = 0,6 \cdot 10^{11}$ Н/м²), будут более чувствительными. Однако мембраны и кантилеверы благодаря абсолютным упругим свойствам монокристаллического кремния не имеют гистерезиса ($< 0,001$ % измеряемой величины, в пределах погрешности эталонных средств измерения) и практически лишены нелинейности ($< 0,003$ % измеряемой величины) [43].

Распространение получили также полимерные материалы, такие как SU-8 и полиметилметакрилат (ПММА). Поскольку они являются фоторезистами, для них подходят технологии прямой фотолитографии.

Один из наиболее эффективных методов повышения чувствительности заключается в уменьшении упругости кантилевера. Для изготовления кантилевера, обладающего малой упругостью, целесообразно применять материалы с относительно малым модулем Юнга, к которым относятся металлы (Al, Au и др.) и полимеры (SU-8, полистирол). Однако для получения сверхмалых значений упругости необходимо уменьшать толщину кантилевера до наноразмерной величины, сохраняя длину на микронном уровне, т. е. увеличивать отношение длины к толщине. Для изготовления нанокантилеверов со сверхвысоким отношением длины к толщине (>100) полимеры малоприменимы. Кроме того, кантилевер должен быть проводящим, поэтому для его изготовления целесообразнее использовать металлы. Согласно литературным данным, наименьшим значением упругости обладают кантилеверы, изготовленные из композита Al-Mo, имеющие толщину 20 нм и отношение длины к толщине 400. Для специфических задач, в том числе достижения максимальной чувствительности, специально разработаны и произведены кантилеверы с отношением длины к толщине, достигающим 1500 [44, 45]. Согласно литературным данным, наибольшим отношением длины к толщине обладают кантилеверы, изготовленные из кремния, толщиной 12 нм [46, 47].

Помимо классических материалов, для изготовления кантилеверов, ориентированных на решение специальных задач, используется однослойный и многослойный графен [48–52] и алмазные плёнки толщиной 30–50 мкм [53, 54].

Основным преимуществом микромеханических консольных датчиков является их дешевизна и простота изготовления в виде больших массивов (рис. 13).

Проблема практического применения консольных датчиков заключается в квадратичной и кубической зависимости их характеристик от геометрических размеров. Эти сверхлинейные зависимости означают, что консольные датчики довольно чувствительны к изменению параметров процесса, особенно к толщине, которую, как правило, трудно точно контролировать в процессе изготовления с использованием современных МЭМС-технологий. Контроль остаточных напряжений также затруднён, что приводит к тому, что технологический разброс жёсткости даже в пределах одной партии может достигать 100 % [55, 56].

Системы регистрации отклонения кантилевера. Известно несколько методов высокоточной регистрации малых линейных перемещений, связанных с деформацией чувствительного элемента ОАП, самыми распространёнными из которых являются традиционные ёмкостный и оптический микрофоны М. Голея на основе схемы Теплера. Новыми

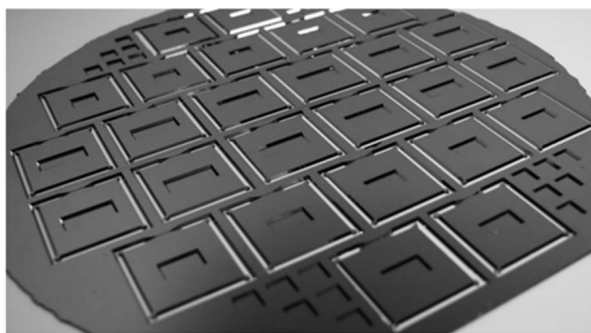


Рис. 13. Консоли с микрообработкой на кремниевой пластине [34]

методами, заимствованными из техники атомно-силовой микроскопии, являются хорошо апробированные метод оптического рычага (с отражённым от верхней части балки лазерным лучом), интерферометрический метод с использованием интерферометров Фабри — Перо и Майкельсона, дифракционный и туннельный [57].

Ёмкостный метод впервые использован в первой известной конструкции ОАП Х. В. Хейса в 1936 г. [2, 57–59]. В этом методе мембрана или кантилевер являются одной из пластин плоского конденсатора, ёмкость которого обратно пропорциональна зазору между пластинами. К настоящему времени накоплен большой практический опыт разработки ёмкостных датчиков малых перемещений, основными преимуществами которых являются: возможность очень точно измерять давление в диапазоне от 3,5 до 4 порядков с нижним пределом до 10^{-5} мбар с погрешностью $\pm(0,15–0,25)$ %; предельно простая конструкция; высокая чувствительность ($\Delta C/C = 15–20$ %); высокая пороговая чувствительность (0,003 нм); КМОП-совместимость; большой динамический диапазон; применимость для нанометровых размеров кантилеверов; отсутствие изменения механических свойств чувствительного элемента ОАП и теплового воздействия. Недостатки и ограничения ёмкостного метода вытекают из базовых законов физики и до конца не устранимы за счёт совершенствования конструкции, материалов и технологии изготовления — это нелинейный выходной сигнал, эффект электростатического притяжения и чувствительность к вибрации. Максимальная деформация чувствительного элемента, определяющая динамический диапазон измеряемых сигналов, ограничена начальным зазором между пластинами порядка 1 мкм, что мало по сравнению с другими методами. Сигнал ёмкостного преобразователя легко преобразуется в частотную форму.

Оптический микрофон. Метод предложен М. Голеем [4] в 1947 г. Прогиб разделительной гибкой мембраны обнаруживают с помощью оптической системы Теплера. Для этого изображение решётки, в которой ширина штрихов равна половине шага, проецируется после отражения от мембраны на другую такую же решётку так, чтобы при покоящейся мембране изображения перемычек штрихов точно перекрывали отверстия второй решётки. При этих условиях сквозь вторую решётку свет не проходит. Однако незначительные искривления мембраны приводят к увеличению количества света, проходящего через вторую решётку. Световой поток после второй решётки воспринимается фотоэлементом, фототок которого регистрируется обычными способами. Таким методом удаётся обнаруживать смещения мембраны, значительно меньшие 0,1 мкм. Недостатком метода (как и всех оптических) является конструктивное усложнение за счёт необходимости использования вспомогательного источника света, фотоприёмного устройства и элементов проекционной оптики. Помимо увеличения весогабаритных параметров и стоимости ОАП, метод обладает дополнительными источниками шумов и повышенной виброчувствительностью, требует применения отражательного чувствительного элемента. Несмотря на отмеченные недостатки, ОАП с оптическим микрофоном Голея является наиболее распространённым.

Метод отражения оптического луча (метод биения лазерного пучка, метод лазерного рычага) [46, 60] является самым распространённым способом контроля изгиба зонда атомных силовых микроскопов и может успешно использоваться в ОАП с кантилеверными датчиками давления. В этом методе лазерный луч отражается от тыльной поверхности кантилевера (имеющей отражающее покрытие) и направляется в многоэлементный фотоприёмник. Разновидностью метода является метод лазерного рычага, в котором после отражения от кантилевера луч лазера падает на зеркало и только затем попадает на детектор положения. Детектором может служить четырёхэлементный фотодиод, ПЗС-линейка или ПЗС-камера. При отклонении кантилевера от первоначального положения отражённый луч перемещается по детектору, причём его перемещение усиливается за счёт «оптического плеча». Устройство измеряет кривизну зонда посредством сдвига лазерного пятна.

Размеры отражающего пятна кантилевера должны быть не меньше длины волны лазерного источника. Метод надёжен, вносит наименьший шум при измерениях и позволяет использовать различные кантилеверы. В отличие от интерферометра оптический рычаг не требует размещения компонентов непосредственно над кантилевером. Именно эта простота сделала оптический рычаг более популярным, чем интерферометр. Разрешение метода ограничено значением порядка $0,1 \text{ \AA}$. Недостатком данного метода является применение громоздких и сложных периферийных устройств с оптическим считыванием. Особенно важным является точность измерения отклонения кантилевера, которая характеризуется уровнем тепловых шумов самого кантилевера, а также шумами оптической системы, величина которых определяется в основном качеством лазера. К недостаткам метода также необходимо отнести введение дополнительного (помимо измеряемого излучения) тепла в ячейку и возможность прогиба сверхвысокочувствительного кантилевера давлением света лазерного источника.

Интерферометрический метод [61–64]. Для интерферометра Фабри — Перо резонатор образуется между отражающим пятном на поверхности кантилевера и сколом на торцевой поверхности оптоволокна, в которое введён лазерный луч. Сколотый конец оптического волокна помещается вблизи поверхности кантилевера, и одна часть излучения отражается от границы оптоволокна и среды, а вторая — от поверхности кантилевера. Эти два излучения интерферируют, и интерференционный сигнал может быть измерен фотодетектором. Длина резонатора не должна превышать 4 мкм . Интенсивность интерференции лучей, отражённых от торца волокна и поверхности кантилевера, зависит от расстояния между ними, т. е. от изгиба консоли. Данный метод позволяет достичь разрешения вплоть до $0,001 \text{ нм}$, но не подходит для больших перемещений кантилевера. Его использование затруднено необходимостью точного позиционирования оптоволокна, а абсолютное смещение кантилевера (изгиб балки) ограничено длиной волны [52, 61, 62]. Исследователи Университета Чжэнчжоу (Китай) [62], используя консольные балки в интерферометрической структуре Фабри — Перо, разработали ряд оптоволоконных микрофонов, демонстрирующих повышенную чувствительность $302,8 \text{ мВ/Па}$ и минимальное обнаруживаемое акустическое давление $2,35 \text{ мкПа/Гц}^{0,5}$. В 2021 г. китайские исследователи сообщили [53] о разработке на основе алмазного кантилевера толщиной 30 мкм и интерферометрической структуры Фабри — Перо ультрачувствительного микрофона, обеспечивающего сверхвысокую чувствительность $1433,8 \text{ мВ/Па}$ и минимальное обнаруживаемое акустическое давление $0,24 \text{ мкПа/Гц}^{0,5}$, что является одним из лучших показателей. Настолько высокие характеристики, по мнению авторов, обусловлены исключительной механической прочностью и низким уровнем теплового шума алмаза. Кантилеверный МЭМС-микрофон с интегрированной системой считывания на основе интерферометра Майкельсона, позволяющей измерять отклонение кантилевера в $0,001 \text{ нм}$, разработан фирмой Gasera Ltd. (Финляндия). Разработка завершилась серийным выпуском оптико-акустического преобразователя РА-301. Замена классической мембраны кантилевером позволила расширить динамический диапазон детектора до 80 дБ , от шумового эквивалента мощности $6 \text{ нВт/Гц}^{0,5}$ до 600 мВт [64].

Дифракционный метод. Основан на использовании встречно-штыревого кантилевера [42, 43] с двумя наборами чередующихся штырей, представляющих собой встречно-штыревую дифракционную решётку. Один набор штырей соединён с внешней частью кантилевера, которая изгибается под нагрузкой. Второй набор расположен на внутренней неподвижной балке. Луч лазера, попадая на такой кантилевер, отражается и образует дифракционную картину максимумов многих порядков. Интенсивность максимума того или иного порядка зависит от изгиба внешней части кантилевера по отношению к внутренней неподвижной. Устройство обладает максимальным вертикальным разрешением —

0,00078 нм. Для обработки информации, поступающей от встречно-штыревого кантилевера, необходимо использовать линейные или матричные фотоприёмники.

Туннельный микрофон [5, 24]. Изобретение туннельного микроскопа в 1981 г. Г. Биннигом и Г. Рорером не только совершило переворот в исследовании наноструктур, но и послужило фактически началом широкого применения туннельного эффекта в экспериментальной физике, так как позволяет преодолеть дифракционный предел разрешения, присущий оптическим методам. Принцип действия таких устройств основан на изменении величины туннельного тока в зависимости от расстояния между остриём и противоэлектродом. Получение туннельного эффекта определяется условием достижения напряжённости электрического поля порядка 1–10 В/мкм. При таких значениях напряжённости электрического поля высота и ширина потенциального барьера уменьшаются до таких величин, при которых проявляется квантово-механическое туннелирование электрона сквозь потенциальный барьер. Чувствительность соответствует изменению зазора на величину 10^{-3} Å. Метод практически реализован в ОАП, разработанном факультетом машиностроения Стэнфордского университета, у которого NEP лучше чем $8 \cdot 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2} при диаметре гибкой мембраны 2 мм. Расчётная чувствительность, определяемая как смещение центральной точки мембраны на единицу изменения температуры газа, составила $S = 15,5$ мкм/К. Разрешение туннельного преобразователя в полосе пропускания 1 Гц, рассчитанное по данным частотной характеристики, составило 29 пм, что соответствует температурному разрешению 1,7 мК. Шум был обусловлен чувствительностью преобразователя к механическим вибрациям.

Метод обладает следующими недостатками: нелинейным режимом, ограниченным динамическим диапазоном и необходимостью поддержания туннельного зазора.

Заключение. За последнее десятилетие принципы построения ОАП значительно обогатились за счёт достижений атомно-силовой микроскопии (кантилеверные датчики давления), применения новых материалов, обладающих уникальными физическими свойствами (графен). Использование предельных интерференционных, дифракционных и туннельных технологий считывания и последних достижений микроэлектроники и МЭМС-технологий позволило поднять чувствительность оптико-акустических преобразователей на три порядка. Для современного кантилеверного микрофона минимальное обнаруживаемое акустическое давление составляет 0,24 мкПа/Гц^{0,5}. Замена классической мембраны кантилевером позволила также расширить динамический диапазон детектора до 80 дБ, от шумового эквивалента мощности 6 нВт/Гц^{0,5} до 600 мВт. Ещё более широкие перспективы открываются при применении встречно-штыревого кантилевера, который с дифракционной системой считывания прогиба обладает максимальным разрешением — 0,00078 нм. Однако эти изменения сопровождаются значительным техническим усложнением и увеличением стоимости ОАП и, к сожалению, пока не привели к достижению пороговой чувствительности, ограниченной вибрационными и термомеханическими шумами.

Финансирование. 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. Tyndall J. Action of an Intermittent Beam of Radiant Heat upon Gaseous Matter // Proceedings of The Royal Soc. 1881. **31**. P. 307–317.
2. Hayes H. V. A New Receiver of Radiant Energy // Rev. Sci. Instrum. 1936. **7**, Iss. 5. P. 202–204.
3. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с франц. Н. В. Васильченко; под ред. Л. Н. Курбатова. М.: Мир, 1988. 416 с.

4. **Pat. 2557096 US.** Radiation detecting device / M. J. E. Golay. Publ. 19.06.1951.
5. **Pat. 5436452 US.** Uncooled tunneling infrared sensor / T. W. Kenny, W. J. Kaiser, J. A. Podosek, E. C. Vote, R. E. Muller, P. D. Maker. Publ. 25.07.1995.
6. **Котляр П. Е.** Детекторы ИК- и ТГц-излучения на оптико-акустических преобразователях (Обзор) // Автометрия. 2023. **59**, № 4. С. 88–114. DOI: 10.15372/AUT20230410.
7. **Корляков А. В.** Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы / Под ред. В. В. Лучинина, Ю. М. Таирова. М.: Физматлит, 2006. Гл. 4. С. 493–516.
8. **Корляков А. В.** Сверхтонкие мембраны в микросистемной технике // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 8. С. 17–26.
9. **Кривошеева А. Н.** Пассивные и активные мембраны для устройств микросистемной техники: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2007. 16 с.
10. **Пономарев С. Д., Андреева Л. Е.** Расчёт упругих элементов машин и приборов. М.: Машиностроение, 1980. 326 с.
11. **Липатов О. Ф.** Упругие элементы отрицательной жёсткости для устройств автоматики. Саров: ВНИИ экспериментальной физики, 2023. 276 с.
12. **Андреева Л. Е.** Упругие элементы приборов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1981. 456 с.
13. **Hasikin K., Soin N., Ibrahim F.** Micro-diaphragm performance analysis for polyimide diaphragm // Proc. of the IEEE Int. Conf. Semiconductor Electronics (ICSE). Malacca, Malaysia, 28–30 June, 2010. P. 293–296. DOI: 10.1109/SMELEC.2010.5549367.
14. **Палатник Л. С., Ильинский А. И.** Механические свойства металлических плёнок // УФН. 1968. **95**, № 4. С. 613–645.
15. **Дедкова А. А., Глаголев П. Ю., Гусев Е. Э. и др.** Особенности деформирования круглых тонкоплёночных мембран и экспериментальное определение их эффективных характеристик // ЖТФ. 2021. **91**, вып. 10. С. 1454–1465.
16. **Гибин И. С., Котляр П. Е.** Мембраны оптико-акустических приёмников излучения // Прикладная физика. 2020. № 2. С. 90–97.
17. **Baglioni G., Pezone R., Vollebregt S. et al.** Ultra-sensitive graphene membranes for microphone applications // Nanoscale. 2023. **15**, Iss. 13. P. 6343–6352.
18. **Ali A., Khan A., Karimov Kh. S. et al.** Pressure Sensitive Sensors Based on Carbon Nanotubes, Graphene, and Its Composites // Journ. Nanomaterials. 2018. **2018**, Iss. 1. DOI: 10.1155/2018/9592610.
19. **Fan K., Suen J. Y., Padilla W. J.** Graphene metamaterial spatial light modulator for infrared single pixel imaging // Opt. Exp. 2017. **25**, Iss. 21. P. 25318–25325.
20. **Ledwosinska E., Szkopek T., Guermoune A., Siaj M.** Application of graphene membrane in micro-Golay cell array // Proc. SPIE. 2012. **8261**. 82610A.
21. **Тун П. В., Симонов Б. М., Тимошенков С. П.** Исследование возможностей повышения чувствительности МЭМС-датчика давления ёмкостного типа с мембранами различных геометрических форм // Изв. вузов. Электроника. 2023. **28**, № 2. С. 222–231. DOI: 10.24151/1561-5405-2023-28-2-222-231.
22. **Беранек Л.** Акустические измерения: Пер. с англ., под ред. Н. И. Андреева. М.: Изд-во иностр. лит., 1952. 627 с.
23. **Нуберт Г. П.** Измерительные преобразователи неэлектрических величин. Л.: Энергия, 1970. Гл. 3–4. С. 51–57.
24. **Kenny T. W., Reynolds J. K., Podosek J. A. et al.** Micromachined infrared sensors using tunneling displacement transducers // Rev. Sci. Instrum. 1996. **67**, Iss. 1. P. 112–128. DOI: 10.1063/1.1146559.
25. **Пат. 2265913 РФ.** Перфорированная мембрана для чувствительного элемента микромеханического прибора / А. В. Корляков, В. В. Лучинин, С. В. Белых. Оpubл. 12.10.2005, Бюл. № 34.

26. **Чесноков Д. В., Шергин С. Л., Никулин Д. М.** // Лазерная перфорация тонкоплёночных мембран // GeoSiberia — Int. Exhibition and Sci. Cong. Novosibirsk, Russia, 25 Apr., 2007. DOI: 10.3997/2214-4609.201403494.
27. **Bhushan B.** Handbook of Micro/Nano Tribology. 2nd Ed. Boca Raton: CRC Press, 1999. 859 p.
28. **Datar R., Kim S., Jeon S. et al.** Cantilever Sensors: Nanomechanical Tools for Diagnostics // MRS Bulletin. 2009. **34**, Iss. 6. P. 449–454.
29. **Колесов Д., Ахметова А. И., Яминский И. В. и др.** Кантилеверные биосенсоры для обнаружения вирусов и бактерий // Наноиндустрия. 2016. № 4. С. 26–35. DOI: 10.22184/1993-8578.2016.66.4.26.35.
30. **De Paula M. H., de Carvalho A. A., Vinha C. A. et al.** Optical microphone for photoacoustic spectroscopy // Journ. Appl. Phys. 1988. **64**, Iss. 7. P. 3722–3724.
31. **Кантилеверы** для атомно-силовой микроскопии (АСМ) компании АО «Ангстрем». Новак А. В. URL: https://www.angstrom.ru/company/articles/kantilevery_dlya_atomno_silovoy_mikroskopii_asm_kompanii_ao_angstrom/ (дата обращения: 04.04.2025).
32. **Гетманенко Н. Ю.** Наномеханические особенности кантилеверных элементов атомно-силового микроскопа // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2011. **4**, № 7. С. 30–35.
33. **Киселев Г., Зиновьев К., Домингос К., Яминский И.** Микрокантилеверы как преобразователи поверхностного натяжения // Наноиндустрия. 2009. № 4. С. 46–48.
34. **Saarinen M.** Cantilever enhanced gas sensing using photoacoustic spectroscopy : Master's thesis. Espoo: Aalto university school of sci. and technol. 2010. 83 p.
35. **Тимошенко С. П.** Сопротивление материалов : Пер. с англ. В. Н. Фёдорова. Т. 1. Элементарная теория и задачи. М.: Наука, 1965. 364 с.
36. **Феодосьев В. И.** Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. М.: Наука, 1967. 368 с.
37. **Тимошенко С. П.** Сопротивление материалов : Пер. с англ. В. Н. Фёдорова. Т. 2. Более сложные вопросы теории и задачи. М.: Наука, 1965. 480 с.
38. **Lindley R. E., Parkes A. M., Keen K. A. et al.** A sensitivity comparison of three photoacoustic cells containing a single microphone, a differential dual microphone or a cantilever pressure sensor // Appl. Phys. B. 2006. **86**. P. 707–713.
39. **Mishra R. B., Shaikh S. F., Hussain A. M., Hussain M. M.** Metal coated polymer and paper-based cantilever design and analysis for acoustic pressure sensing // AIP Advances. 2020. **10**, Iss. 5. 055112. DOI: 10.1063/5.0006544.
40. **Koskinen V., Fonsen J., Roth K., Kauppinen J.** Progress in cantilever enhanced photoacoustic spectroscopy // Vibrational Spectroscopy. 2008. **48**, Iss. 1. P. 16–21.
41. **Быков А. В.** Конструктивно-технологические особенности кантилеверов для атомно-силовой микроскопии // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2014. № 9. С. 141–151.
42. **Yaralioglu G. G., Atalar A., Manalis S. R., Quate C. F.** Analysis and design of an interdigital cantilever as a displacement sensor // Journ. Appl. Phys. 1998. **83**, Iss. 12. P. 7405–7415.
43. **Manalis S. R., Minne S. C., Atalar A., Quate C. F.** Interdigital cantilevers for atomic force microscopy // Appl. Phys. Lett. 1996. **69**, Iss. 25. P. 3944–3946.
44. **Принципы** измерения, применяемые в датчиках давления. URL: <https://etalonchel.ru/help/izmerenie-davlenija/principy-izmerenija-primenjaemye-v-datchikakh-davlenija/> (дата обращения: 04.04.2025).
45. **Уваров И. В.** Резонансные свойства трёхслойных металлических кантилеверов наноразмерной толщины: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ярославль, 2013. 23 с.
46. **Морозов И. А.** Современные проблемы механики. Теория и практика атомно-силовой микроскопии. Пермь: Изд-во Пермского государственного национального исследовательского университета, 2020. 108 с.

47. **Баринов И. Н., Волков В. С.** Чувствительные элементы микромеханических датчиков давлений. Основы проектирования и разработки. Пенза, 2013. 79 с.
48. **Шашкин В. И., Вопилкин Е. А., Востоков Н. В. и др.** Изготовление микроконсолей и управление их изгибом // Микросистемная техника. 2004. № 9. С. 22–26.
49. **Rasuli R., Iraj Zad A., Ahadian M. M.** Mechanical properties of graphene cantilever from atomic force microscopy and density functional theory // Nanotechnol. 2010. **21**, N 18. 185503. DOI: 10.1088/0957-4484/21/18/185503.
50. **Martynov O. V., Bockrath M.** Carbon nanotube stabilized single layer graphene cantilevers // Appl. Phys. Lett. 2017. **110**, Iss. 15. 151901. DOI: 10.1063/1.4979837.
51. **Zelinger Z., Janda P., Suchánek J. et al.** Silicon micro-levers and a multilayer graphene membrane studied via laser photoacoustic detection // Journ. Sens. and Sens. Syst. 2015. **4**, Iss. 1. P. 103–109. DOI: 10.5194/jsss-4-103-2015.
52. **Suchánek J., Dostál M., Vlasáková T. et al.** First application of multilayer graphene cantilever for laser photoacoustic detection // Measurement. 2017. **101**. P. 9–14.
53. **Li L., Tian S., Lin C. et al.** Ultrasensitive diamond cantilever-based optical microphone // Springer Nature. 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3634811/v1.
54. **Fu J., Zhu T., Liang Y. et al.** Fabrication of capacitive pressure sensor using single crystal diamond cantilever beam // Sci. Rep. 2019. **9**. 4699. DOI: 10.1038/s41598-019-40582-x.
55. **Якубов Г. Э.** Измерения поверхностных и гидродинамических сил между модельными частями с помощью атомно-силового микроскопа: Дис. ... канд. хим. наук. М., 2002. 176 с.
56. **Boisen A., Dohn S., Keller S. S. et al.** Cantilever-like micromechanical sensors // Rep. Progress in Phys. 2011. **74**, N 3. 036101.
57. **Сюрдо А. И., Бирюков Д. Ю.** Физические основы измерений. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2013. 144 с.
58. **Kubba A. E., Hasson A., Kubba A. I., Hall G.** A micro-capacitive pressure sensor design and modelling // Journ. Sens. and Sens. Syst. 2016. **5**, Iss. 1. P. 95–112. DOI: 10.5194/jsss-5-95-2016.
59. **Вавилов В. Д., Вавилов И. В., Долгов А. Н.** Ёмкостной преобразователь перемещений для интегральных датчиков // Датчики и системы. 2007. № 2. С. 2–5.
60. **Meyer G., Amer N. M.** Erratum: Novel optical approach to atomic force microscopy // Appl. Phys. Lett. 1988. **53**, Iss. 24. P. 2400–2402.
61. **Rugar D., Mamin H. J., Guethner P.** Improved fiber-optic interferometer for atomic force microscopy // Appl. Phys. Lett. 1989. **55**, Iss. 25. P. 2588–2590. DOI: 10.1063/1.101987.
62. **Chen K., Gong Z., Guo M. et al.** Fiber-optic Fabry-Perot interferometer based high sensitive cantilever microphone // Sensors and Actuators A: Phys. 2018. **279**. P. 107–112.
63. **Tian S., Chen P., Jiao M. et al.** Geometry optimization of cantilever-based optical microphones // Opt. Lett. 2024. **49**, Iss. 8. P. 2101–2104. DOI: 10.1364/OL.519135.
64. **Yin Y., Ren D., Li C. et al.** Cantilever-enhanced photoacoustic spectroscopy for gas sensing: A comparison of different displacement detection methods // Photoacoustics. 2022. **28**. 100423.

Поступила в редакцию 04.04.2025

После доработки 16.04.2025

Принята к публикации 29.04.2025