

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.396, 538.9, 681.7

ДЕТЕКТОРЫ ИК- И ТГЦ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ (Обзор)

© П. Е. Котляр

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

Классические оптико-акустические приёмники (ОАП) успешно используются для решения целого ряда научных и прикладных задач, таких как измерения слабых потоков оптического излучения ИК- и ТГц-диапазонов, количественного и качественного анализа газовых смесей, исследования спектров поглощения газов и паров. Рассмотрены назначение, конструкция и эволюция основных конструктивных элементов классических ОАП. Анализируется перспективность применения однослойного графена как наиболее перспективного материала для создания мембран. Значительное увеличение чувствительности связано с исключительно высокой эластичностью графена в сочетании с его высокой механической прочностью. Показано, что использование гибкой мембраны из однослойного графена обеспечивает снижение восприимчивости ОАП к акустическим и вибрационным шумам более чем на три порядка без применения каких-либо устройств виброзащиты. Благодаря сохранению графеновой мембраной высокой эластичности при гелиевых температурах рабочий диапазон ОАП может быть расширен от 320 К до гелиевых температур, чем обеспечивается достижение теоретически предельной пороговой чувствительности за счёт снижения шумов и открывается возможность широкого применения ОАП для решения научных задач астрофизики и космологии. Рассмотрены ёмкостный, оптический, туннельный и кантилеверный детекторы микродеформаций гибкой мембраны. Показано, что достижение предельных метрологических характеристик ОАП возможно за счёт совмещения уникальных возможностей двух разработок: мембраны из однослойного графена и туннельного детектора микродеформаций.

Ключевые слова: приёмники излучения, ячейки Голея, графеновые мембраны, туннельные преобразователи, кантилеверы.

DOI: 10.15372/AUT20230410

Введение. Оптико-акустические приёмники (ОАП) электромагнитного излучения относятся к тепловым волюметрическим приёмникам «полного спектра». Они имеют постоянную спектральную чувствительность в очень широком диапазоне (0,3–10000 мкм), а также наибольшую чувствительность 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 до 10^{-11} ватт (изменения температуры термочувствительного элемента на 10^{-6} – 10^{-7} К), так и фемтосекундные терраваттные лазерные импульсы [1, 2, 3].

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 [1].

История появления и развития ОАП представлена в ряде обзоров [4, 5].

Высокоэффективные неохлаждаемые приёмники ИК- и ТГц-излучения на базе оптико-акустических преобразователей применяются в современных оптико-электронных систе-

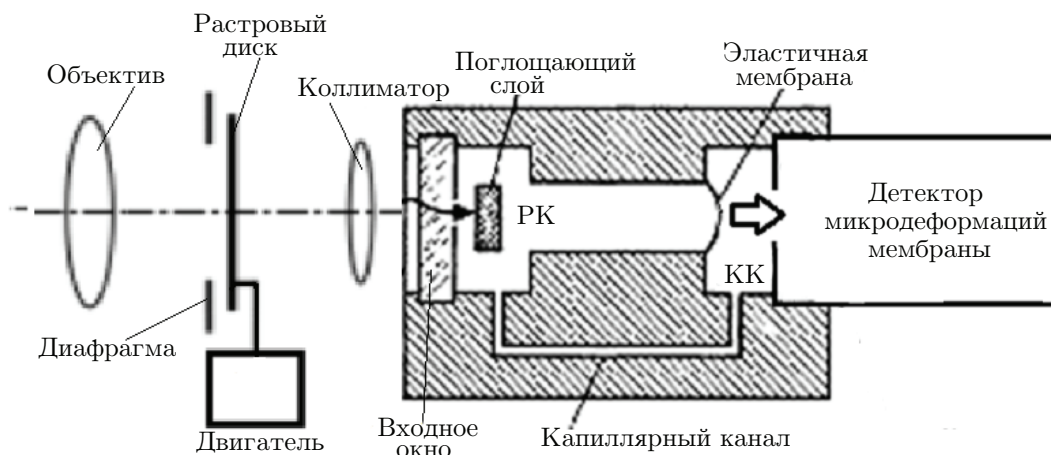


Рис. 1. Конструктивная схема оптико-акустических приёмников излучения

мах локации, наблюдения, слежения и спектрометрии. Во всех отечественных газоанализаторах инфракрасного поглощения, которых к началу 80-х гг. насчитывалось около 1 млн, преобразование интенсивности потока излучения на выходе оптического канала в электрический сигнал осуществляется избирательными оптико-акустическими преобразователями. Оптико-акустические приёмники применяются для эталонирования потоков излучения и стали основным прецизионным измерителем мощности ТГц-излучения.

Физические принципы и их реализация. В основе оптико-акустического приёмника лежит эффект, обнаруженный в 1880 г. Беллом [6] и исследованный Гиндалем [7] и Рентгеном [8]. Этот эффект проявляется в виде пульсаций давления газа в замкнутом объёме при поглощении излучения, модулированного на звуковой частоте. Его возникновение связано с преобразованием части энергии возбуждённых излучением молекул в тепловую энергию среды за счёт безызлучательных переходов. Частота колебаний зависит от частоты модуляции потока, а интенсивность колебаний — от способности устройства поглощать ИК-радиацию и от её интенсивности. Этот эффект не зависит от природы внешнего излучения и, следовательно, от длины волны; амплитуда фотосигнала зависит от мощности падающего излучения (или её изменений), но не от его спектрального состава. В 1946 г. Гершбергер впервые наблюдал оптико-акустический эффект в сантиметровом диапазоне длин волн [9].

Оптико-акустические приёмники представляют собой разновидность волюметрических газовых термометров, в которых измеряется изменение объёма (volume) газа в соответствии с изменением температуры по газовому закону Шарля.

Для идеального газа, находящегося в замкнутом объёме, небольшие изменения температуры (ΔT), объёма (ΔV) и давления (ΔP) связаны с их равновесными значениями следующим образом:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta P}{P}. \quad (1)$$

Конструктивно и функционально газовая ячейка ОАП (термопневматический актюатор), объединённая с электромеханическим модулятором входного излучения и электронными узлами детектора микроперемещений мембраны на выходе, представлена на рис. 1.

Поступающее в камеру модулированное излучение поглощается металлической плёнкой и нагревает газ, который, расширяясь, изгибает эластичную мембрану. Величина прогиба эластичной мембраны является мерой величины поглощённой энергии излучения. Для

того чтобы приёмник не был подвержен изменениям внешних давления и температуры, расширительная камера (РК) дополнена компенсационной камерой (КК), расположенной между эластичной мембраной и выходным окном. С помощью капиллярного канала уравнивается давление по обе стороны эластичной мембраны. Преобразования в ОАП осуществляются по схеме $h\nu \rightarrow \text{тепло} \rightarrow P(T) \rightarrow \delta(P) \rightarrow$ электрический сигнал, где δ — прогиб эластичной 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:

$$S_{\text{ОАП}} = S_{I-T} S_{T-P} S_{P-\delta} S_{\delta-U} = \frac{\Delta T}{\Delta I} \frac{\Delta P}{\Delta T} \frac{\Delta \delta}{\Delta P} \frac{\Delta U}{\Delta \delta}. \quad (2)$$

Из приведённого выражения следует, что достижение предельных параметров преобразователя может быть достигнуто только оптимизацией каждого из звеньев цепи преобразования.

Физические процессы, происходящие в оптико-акустических преобразователях, описываются уравнениями теплопроводности. В принцип построения всех без исключения тепловых приёмников ИК- и ТГц-излучения на первом этапе заложено фототермическое преобразование. Оно реализуется с использованием в качестве чувствительного элемента малоинерционного плёночного поглотителя, освещаемого модулированным входным излучением. Особенностью этого преобразования является то, что энергия квантов падающего излучения распределяется между всеми элементами вещества поглотителя равномерно, увеличивая амплитуду колебательных процессов. Применяется непосредственное повышение температуры чувствительного элемента, вызванное поглощённым излучением. Факторы, определяющие теплофизические характеристики фототермического преобразования, а также вопросы оптимизации параметров преобразования в настоящее время изучены достаточно полно [10–13].

В общепринятой модели фототермического преобразования, которое осуществляется в РК ОАП, рассматривается преобразование исследуемого модулированного излучения в температуру чувствительного элемента и его теплообмен с термостатом и заполняющим расширительную камеру газом. При этом принципиально необходимо создать условие оптимального взаимодействия с внешним излучением и одновременно уменьшить все другие виды теплового взаимодействия с окружающей средой. Это означает, что теплоёмкость поглотителя излучения и его тепловой контакт с корпусными деталями преобразователя должны быть сведены к минимуму.

Первые патенты. В 1936 г. Хейс [14] сообщил о ряде принципиальных усовершенствований классического газового термометра. Он поместил внутрь расширительной камеры специальный элемент, поглощающий исследуемое излучение и представляющий собой мелкодисперсную форму древесного угля — fluff, а также тонкую металлическую разделительную мембрану, образующую часть динамического конденсатора для отсчётной системы. Мембрана была изготовлена из дюралюминия толщиной 25,4 мкм и выполняла роль подвижной обкладки динамического конденсатора. Введение в компенсационную камеру дополнительного плоского электрода, расположенного напротив колеблющейся мембраны, позволяло свести измерение деформации к измерению электрической ёмкости. Конструкция приёмника Хейса представлена на рис. 2.

Разработчик радарных систем Голей усовершенствовал приёмник Хейса и использовал его для идентификации инфракрасных выбросов самолётов [15, 16]. Он заменил расположенный в расширительной камере поглощающий элемент, занимавший большую часть

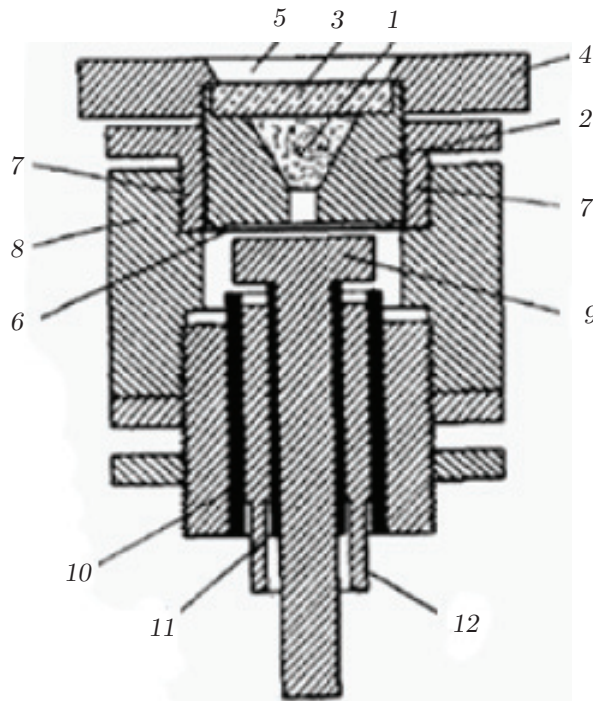


Рис. 2. Оптико-акустический приёмник Хейса [14]: 1 — мелкодисперсный поглотитель, 2 — блок расширительной камеры, 3 — входное окно, 4 — удерживающий фланец, 5 — входная апертура, 6 — гибкая металлическая мембрана, 7 — кольцевая оправка гибкой мембраны, 8 — металлический корпус, 9 — плоский металлический электрод, 10, 11 — изолирующие трубки, 12 — контрэлектрод

полости, поглощающей мембраной, представляющей собой тонкий слой золотой черни на полупроницаемой подложке из коллодия. Этим обеспечивались малая теплоёмкость поглотителя и тепловая развязка от стенок расширительной камеры. Сама камера заполнялась ксеноном, обладающим низкой теплоёмкостью и высокой теплопроводностью. Голей также применил серебряное покрытие гибкой мембраны для оптического считывания и впервые использовал оптические методы измерения деформации для инфракрасного излучения. Конструкция ячейки Голея приведена на рис. 3.

Спектральный диапазон. Оптические свойства ОАП определяются входным окном, обеспечивающим ввод исследуемого излучения в расширительную камеру, и поглотителем излучения, находящимся внутри камеры. Требования к входному окну: высокое однородное пропускание в рабочем диапазоне длин волн и малое отражение. При измерении энергии тераваттных фемтосекундных лазерных импульсов дополнительным требованием является высокая лучевая стойкость. В зависимости от рабочего диапазона длин волн входные окна изготавливаются из следующих материалов [17]:

1. Алмаз. Рабочий диапазон длин волн 0,4–8000 мкм.

2. Высокоомный кремний (HRFZ-Si). За исключением синтетического алмаза высокоомный кремний является единственным изотропным кристаллическим материалом, подходящим для чрезвычайно широкого диапазона длин волн — от ближнего ИК (1,2 мкм) до миллиметрового (1000 мкм) и более. Однако по сравнению с алмазом он существенно дешевле в выращивании и обработке, а также имеет значительно более крупные размеры.

3. Кристаллический кварц — один из наилучших материалов для длин волн выше 50 мкм.

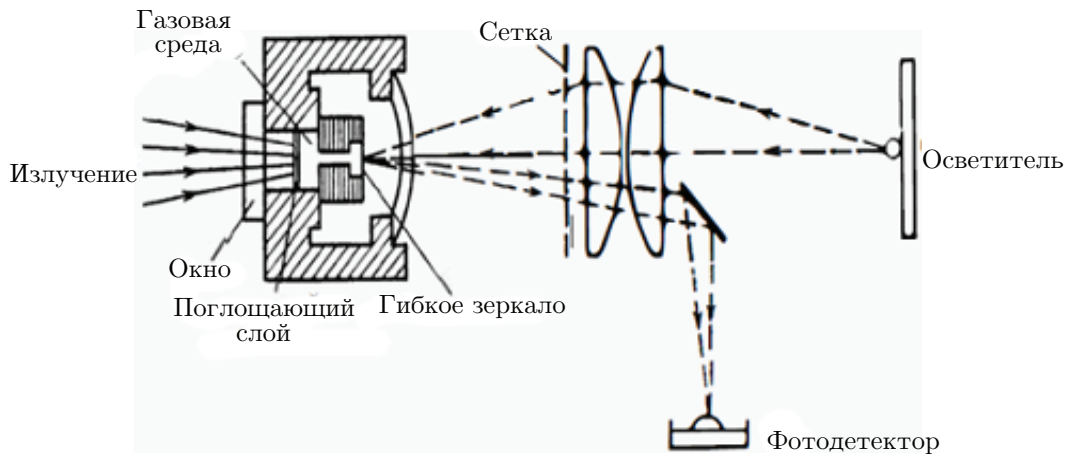


Рис. 3. Ячейка Голея (1947 г.)

4. Полиметилпентен (ТРХ) — прозрачен в ультрафиолетовом, видимом и дальнем инфракрасном диапазонах. Входная апертура в известных конструкциях ОАП равна 3–5 мм.

Поглотитель излучения реализует преобразование излучения в тепло. Так как свойства поглощающего слоя определяют спектральные характеристики ОАП, необходимо обеспечивать максимальное значение и равномерность коэффициента поглощения в возможно более широком участке спектра. Для получения малой инерционности материал поглотителя должен обладать минимальной удельной теплоёмкостью, а само поглощающее покрытие минимальной толщины наносится на полимерную плёнку со сквозной пористостью, имеющую термическую развязку с корпусом. В зависимости от вида поглотителя ОАП подразделяются на широкополосные (первая группа), реализуемые на тонких металлических плёнках, и узкополосные, реализуемые на резонансном поглощении излучения в газах. Максимальным поглощением при минимальной теплоёмкости обладают черни металлов (золото, платина, серебро). Отражение от черной составляет 0,1 % на 0,8 мкм и 1,1 % на 51 мкм. Геометрические размеры поглотителя и его толщина должны превышать максимальную длину волны, на которую рассчитывается преобразователь.

В современных преобразователях используются полупрозрачные металлические слои, толщиной в сотые доли мкм. Такие слои при толщине, обеспечивающей сопротивление 188 Ом/см^2 , поглощают 50 % падающего излучения, но позволяют расширить спектральный диапазон вплоть до миллиметровых радиоволн без существенных вариаций коэффициента поглощения и минимизировать теплоёмкость поглощающего слоя [18, 19, 20].

В подавляющем большинстве конструкций ОАП поглотитель наносится на тонкую коллоидную мембрану со сквозной пористостью.

Вторую конструктивную группу образуют селективные ОАП. В 1938 г. была опубликована работа Вейнгерова [21], в которой сообщалось о создании принципиально нового селективного газового приёмника — спектрофона — с чувствительностью от ультрафиолетовой до миллиметровой области спектра, т. е. о создании селективного газового приёмника. В нём излучение поглощает заполняющий расширительную камеру газ, содержащий в молекуле два и более различных атома, например, окись углерода (СО), двуокись углерода (СО₂), метан (СН₄). В принципе, все атомы, молекулы и их соединения, имеющие спектр поглощения на том или ином участке электромагнитного спектра, могут быть определены оптико-акустическим методом. Как следствие, спектральная чувствительность такого устройства определяется спектром поглощения заполняющего камеру газа. В зарубежной литературе приёмники такого типа носят название приёмников Паттерсона — Мосса [22]. Конструктивная схема селективного ОАП в составе газоанализатора представлена на рис. 4.

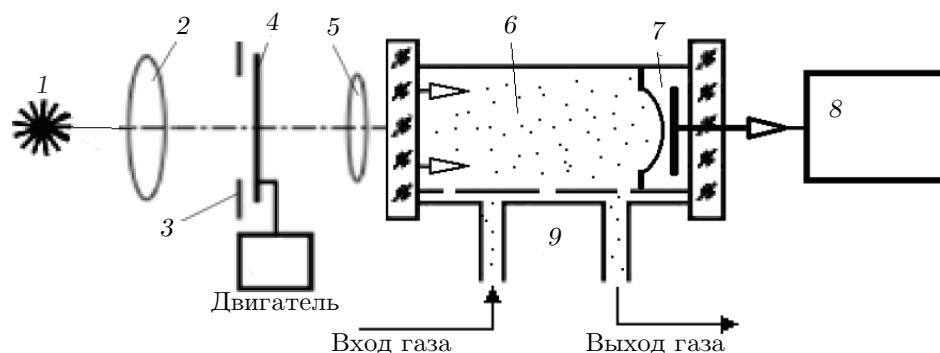


Рис. 4. Конструктивная схема оптико-акустического газоанализатора: 1 — перестраиваемый источник ИК-излучения, 2 — объектив, 3 — диафрагма, 4 — модулятор, 5 — коллиматор, 6 — абсорбционная камера, 7 — динамический микрофон, 8 — регистрирующее устройство, 9 — система забора проб газа

Метод оптико-акустической спектроскопии характеризуется низкими пределами обнаружения 10^{-11} . Работа Вейнгера положила начало широко развивающемуся газоаналитическому приборостроению [23], включающему аппаратуру экологического мониторинга и аппаратуру для скрининговой неинвазивной медицинской диагностики на основе измерений газового состава выдыхаемого человеком воздуха [24].

Геометрия расширительной камеры. Варианты геометрии расширительных камер оптико-акустических приёмников представлены на рис. 5. В подавляющем большинстве современных конструкций ОАП используется цилиндрическая расширительная камера (рис. 5, *a*) с равными расстояниями от поглощающей плёнки до входного окна и эластичной мембраны, что обусловлено стремлением уменьшить тепловые потери [25]. Однако в первых экспериментах по исследованию оптико-акустического эффекта, выполненных Беллом [6], было обнаружено, что усиление оптико-акустического сигнала возможно за счёт

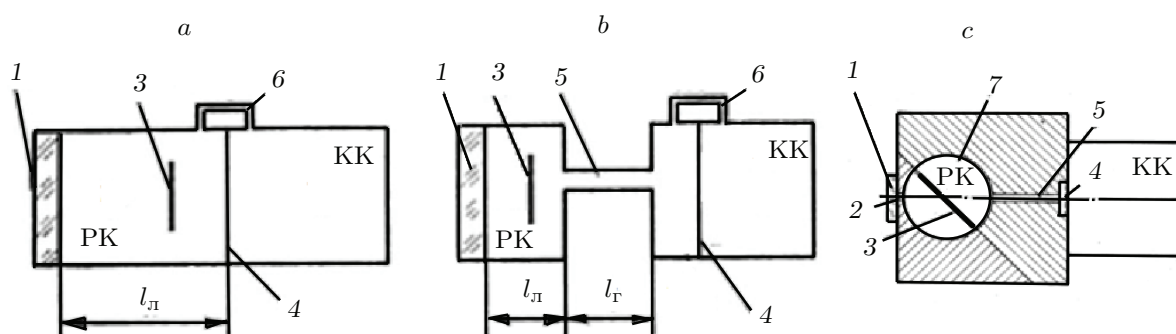


Рис. 5. Геометрия расширительных камер оптико-акустических приёмников [25, 26]: *a* — классическая двухкамерная схема, *b* — двухкамерная схема с акустическим резонатором Гельмгольца в расширительной камере, *c* — сферическая расширительная камера. Обозначения: 1 — входное окно, 2 — малое входное отверстие, 3 — поглотитель излучения, 4 — гибкая мембрана, 5 — горловина резонатора Гельмгольца, 6 — капиллярный канал для уравнивания статического давления по обе стороны мембраны, 7 — отражающее золотое покрытие стенок расширительной камеры

такого явления, как акустический резонанс. В дальнейшем было разработано множество конструктивных вариантов резонансных оптико-акустических ячеек, с помощью которых и была продемонстрирована эффективность данного метода [14, 15, 22]. Белл предложил использовать акустический резонанс в расширительной камере, частоту модуляции входного радиационного потока и собственную частоту мембраны для увеличения амплитуды колебаний. В [26, 27] чётко просматривается двухкамерная схема с акустическим резонатором Гельмгольца в расширительной камере (рис. 5, *b*). Практическое использование акустического резонанса в оптико-акустических приёмниках не нашло широкого распространения в связи с тем, что при повышении добротности приёмник становится крайне чувствительным к толчкам и вибрациям [28].

На рис. 5, *c* представлена конструкция ОАП со сферической расширительной камерой [26], в которой под углом к продольной оси установлена поглощающая плёнка. Внутренняя часть сферы и боковая поверхность входного отверстия отполированы и покрыты слоем золота для лучшего отражения радиации от стенок. Такое расположение поглотителя исключает отражение радиации, падающей на него нормально, а золочение поверхности сферической полости обеспечивает многократное отражение и вследствие этого полное поглощение входного излучения. Конструкция обеспечивает равномерную чувствительность от ультрафиолетовой до далёкой инфракрасной области и поглощение около 99,5 % входного потока, что недостижимо даже при использовании коммерчески доступных поглотителей из углеродных нанотрубок (CNT). Сферическая конструкция расширительной камеры обеспечивает минимизацию тепловых потерь за счёт исключения распространения тепловой энергии через стенки. В [29] описана конструкция ОАП, в котором расширительная и компенсационная камеры представлены усечёнными четырёхгранными пирамидами.

Выражение пороговой чувствительности ОАП, учитывающее геометрические параметры конструкции и теплофизические параметры её элементов в отсутствие дробового шума [30], имеет вид

$$Q_{\text{пор}} = \frac{1}{\varepsilon} \sqrt{4\pi^2 k T_0^2 \kappa F F_0 \Delta f}, \quad (3)$$

где выражение под корнем характеризует интенсивность тепловых флуктуаций газа в расширительной камере и потери тепла в конструктивных элементах; ε — коэффициент поглощения приёмной поверхности поглощающего слоя; T_0 — абсолютная температура окружающей среды; κ — коэффициент потерь тепла (отнесённый к единице площади поглощающего слоя); F — площадь поверхности поглощающего слоя; F_0 — площадь поверхности стенок расширительной камеры; Δf — полоса рабочих частот ОАП.

Из приведённого выражения следует, что пороговая чувствительность улучшается как при уменьшении площади поверхности поглощающего слоя F , так и при уменьшении геометрических размеров расширительной камеры.

Корпус ОАП выполняется толстостенным из меди, латуни или нержавеющей стали (см. рис. 2, 5, *c*). Этим достигается повышение теплоёмкости всего устройства, что позволяет устранять колебания температуры мембраны, вызванные помехами от паразитных источников тепла.

На рис. 6 представлены результаты вычисления влияния геометрии расширительной камеры на чувствительность ОАП [31].

Газовое заполнение расширительной камеры и постоянная времени. Все одноатомные газы имеют одинаковый коэффициент теплового расширения, равный $1/273$ К. Амплитуда колебаний давления в расширительной камере за счёт модуляции входного

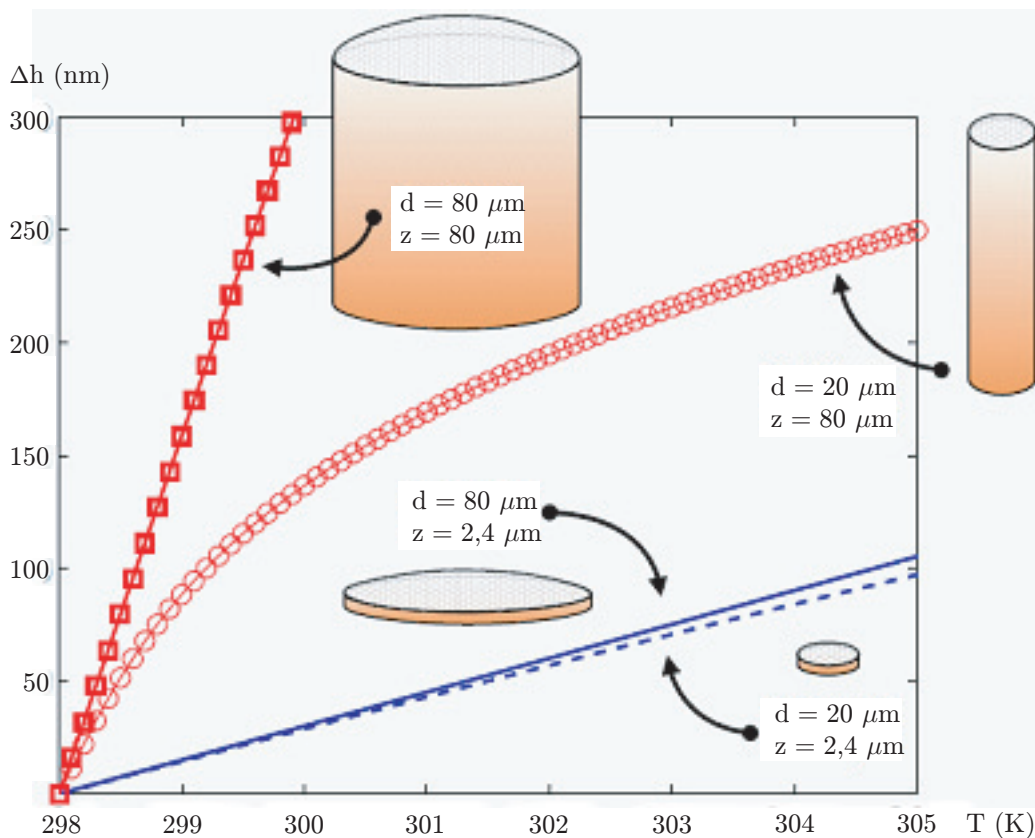


Рис. 6. Влияние геометрии расширительной камеры на чувствительность ОАП [31]

излучения P определяется выражением

$$P = \frac{P_0 Q}{TG \sqrt{1 + \omega^2 C_V^2 / G^2}}, \quad (4)$$

где P_0 — статическое давление газа в камере; T — термодинамическая температура; G — тепловая проводимость газ—камера; C_V — теплоёмкость газа; ω — круговая частота модуляции; Q — амплитуда теплового потока, поглощённого в камере. Наименьшей постоянной времени порядка 0,6 мс обладает ОАП, наполненный гелием (теплопроводность при 273 К равна 0,143 Вт/мК). Серийно выпускаемые ячейки с ксеноновым наполнением (теплопроводность равна 0,0057 Вт/мК) при статическом давлении 30–100 мм рт. ст. имеют типичное значение скорости отклика 10–20 мс, что соответствует отношению теплопроводностей, равному 25. Однако снижение постоянной времени сопровождается падением чувствительности приёмника [32, 33]. Из теории тепловых процессов

$$\Delta T_c = J/Q,$$

где T_c — прирост температуры поглотителя; J — приращение теплового потока за счёт поглощения входного излучения; G — теплопроводность от поглотителя к окружающей его среде.

Тогда постоянная времени τ определится из равенства

$$\tau = C/G = cm/k\lambda, \quad (5)$$

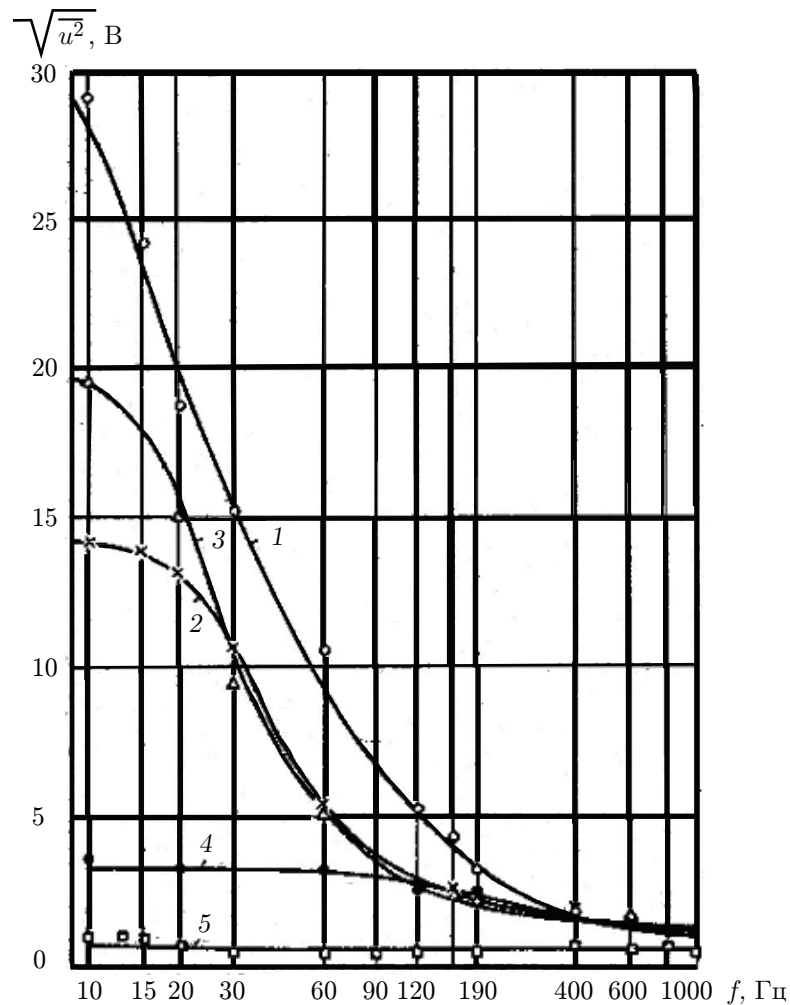


Рис. 7. Зависимость уровня шума от частоты и типа рабочего газа для ОАП ГОИ [34]: 1 — ксеноновое наполнение, 2 — гелиевое наполнение, 3 — воздушное наполнение, 4 — шум ФЭУ, 5 — шум усилителя

где s — удельная теплоёмкость поглотителя излучения; m — масса поглотителя излучения; k — конструктивный коэффициент расширительной камеры; λ — теплопроводность газа, заполняющего расширительную камеру.

Из выражения (5) следует, что для уменьшения постоянной времени необходимо использовать конструкцию поглотителя излучения, имеющую минимальную теплоёмкость, а расширительная камера должна заполняться газом с максимальной теплопроводностью.

Как показано в [32], $\tau \approx RC$, постоянная времени τ пропорциональна произведению чувствительности R на теплоёмкость поглотителя C , откуда следует, что снижение постоянной времени при сохранении уровня чувствительности невозможно. Оптико-акустический приёмник является единственным приёмником, пороговая чувствительность которого практически определяется температурным шумом, возникающим вследствие статистических флуктуаций температуры газа, заполняющего расширительную камеру.

Из рис. 7 следует, что для ОАП ГОИ [34] гелиевое заполнение ячейки обеспечивает минимальный уровень шумов.

Капиллярный канал соединяет расширительную и компенсационную камеры. Пнев-

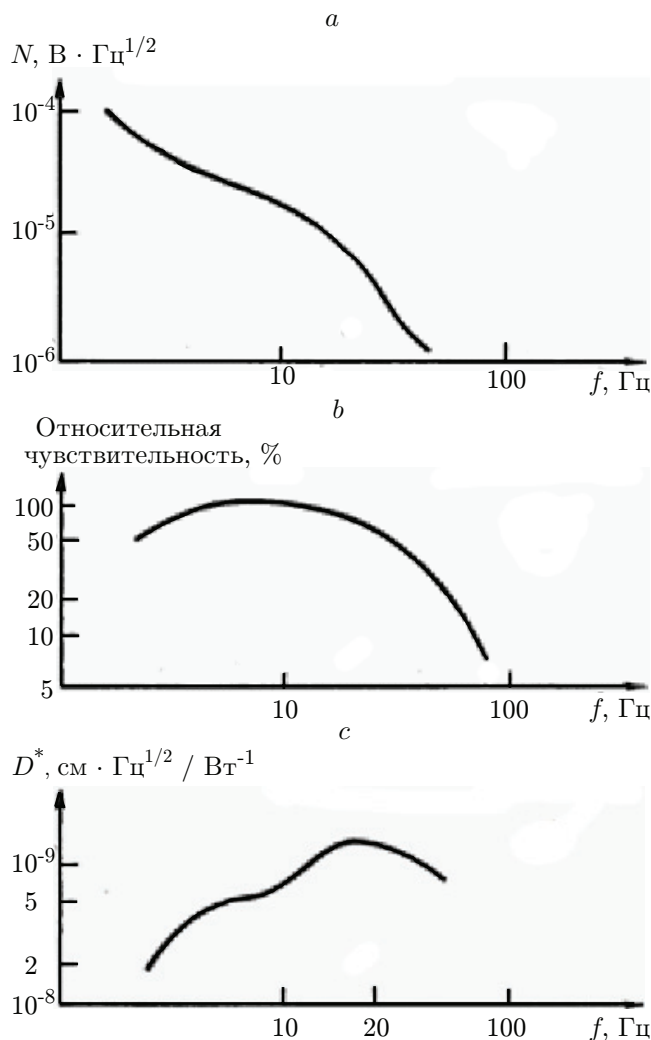


Рис. 8. Частотные характеристики ОАП: *a* — спектр шумов, *b* — частотная зависимость чувствительности, *c* — обнаружительная способность

матическое сопротивление капиллярного канала должно обеспечивать выравнивание давления в расширительной и компенсационной камерах (по обе стороны эластичной мембраны) за время, равное половине периода модуляции.

Модуляция входного излучения, осуществляемая в большинстве случаев растровым диском, является неизменным атрибутом всех тепловых приёмников. На рис. 8 представлены зависимости спектра шумов N , относительной чувствительности R и обнаружительной способности D^* ОАП от частоты модуляции f [35].

В ОАП имеется два главных источника шума. Первая составляющая обусловлена броуновским движением молекул газа в расширительной камере. Она представляет собой шум реакции приёмника, меняющийся с частотой модуляции по закону $(1 + 4\pi^2\tau^2)^{-0,5}$. Вторая часть шума, меняющаяся по закону $1/f$, связана с шумами фотоприёмника (рис. 8, *a*).

Чувствительность ОАП имеет явно выраженный максимум и уменьшается как при увеличении, так и при снижении частоты модуляции. При очень низких частотах спад характеристики объясняется тем, что давление в компенсационной камере успевает выровняться с давлением в расширительной камере, а на высоких частотах спад чувствительности объясняется тем, что газ не успевает нагреваться и охлаждаться (рис. 8, *b*).

Максимальная обнаружительная способность наблюдается вблизи 20 Гц и очень слабо зависит от длины волны падающего излучения в средней и дальней инфракрасных областях. В серийных изделиях фирмы Tydex J. S. Co она составляет $9 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}^{-1}$ и близка к обнаружительной способности идеальных тепловых приёмников, работающих без охлаждения [36] (рис. 8, с).

Эластичная мембрана. Противоположная входному окну стенка расширительной камеры выполняется в виде гибкой мембраны. Заполняющий камеру газ, нагретый поглотителем, расширяется и выгибает мембрану. Гибкая разделительная мембрана является основным критическим компонентом оптико-акустических приёмников. Конструкция мембраны вносит основной вклад не только в чувствительность преобразования «давление—прогиб», но и в чувствительность преобразователя в целом (1). Величина коэффициента преобразования мембраны определяется её упругими свойствами. Более эластичная мембрана обеспечивает большую чувствительность. Основным вклад в чувствительность мембран вносят модуль упругости и коэффициент Пуассона материала и её геометрические параметры (диаметр и толщина). В существующих конструкциях ОАП прогиб мембран при пороговых значениях измеряемых потоков излучения составляет несколько ангстрем.

Принципиальное различие в конструкциях мембран состоит в том, что для приёмников Хейса мембраны должны обладать металлической проводимостью и иметь электрический вывод, а мембраны приёмников Голя должны иметь отражающее покрытие. Эволюция конструкций проходила в направлении последовательного перехода от металлических мембран из дюралюминия, серебра, никеля, титана, легированных титановых сплавов ВТ16 или ВТ35 толщиной 10–20 нм [37] к биморфным полимерным мембранам из полиметилметакрилата (РММА) [38] толщиной 40–100 нм, покрытым отражающим слоем серебра или сурьмы толщиной порядка 100 Å и широко применяемым в микроэлектронике тонким плёнкам нитрида кремния толщиной 5–10 мкм.

Графеновая мембрана. Графен является одним из самых интересных научных открытий начала XXI в. Углеродные наноматериалы занимают ведущее положение среди наиболее изучаемых объектов физического материаловедения со времени открытия фуллеренов в 1985 г., углеродных нанотрубок в 1991 г. и выделения в свободном виде графена в 2004 г. О существовании графена теоретически стало известно ещё в 1947 г. Энергетическая структура его была предсказана и рассчитана канадским учёным Уоллесом [39].

С момента первой публикации о получении графена Геймом и Новоселовым в 2004 г. [40] начались интенсивные исследования физических и химических свойств, обусловленных кристаллической структурой и π -электронами атомов углерода 2D-структур [41]. Уникальные свойства графена [42] практически сразу начали использоваться при разработке нового поколения нанооптоэлектромеханических устройств [43], а также наиболее динамично развивающихся микромеханических измерительных приборов — акселерометров, гироскопов, датчиков давления и др.

В известных работах по созданию нового поколения оптико-акустических преобразователей [44–48] 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, и обеспечить увеличение быстродействия, расширение динамического диапазона и возможность работы не только при комнатных температурах, но и предельно глубоком охлаждении.

Совокупность этих факторов позволяет утверждать о появлении нового поколения оптико-акустических преобразователей.

Физические свойства графена. Известно, что графен обладает множеством уникальных физических свойств [41, 42, 49]. Выделим только те из них, которые являются определяющими при конструировании гибких мембран ОАП.

1. Толщина одного слоя графена составляет 0,355 нм, он является самым тонким из известных плёночных материалов.

2. Высокая механическая прочность (модуль Юнга E порядка 1 ТПа).

3. Превосходные упругие свойства и нулевая жёсткость на изгиб.

4. Однослойный графен характеризуется отсутствием гистерезиса при повторных циклах нагружения, очень высокими адгезивными свойствами за счёт сил Ван-дер-Ваальса. Адгезионная сила между графеном и подложкой на несколько порядков больше, чем в обычных микромеханических структурах $E_a = 0,3$ Дж/м², что объясняется гибкостью графена и способностью «подстраиваться» под топологию подложки.

5. Однослойный графен обладает рекордно высокой электропроводностью, практически полной прозрачностью ($T \approx 98\%$), непроницаемостью для газов (в том числе гелия).

6. Поверхностная плотность графена рекордно низкая (0,77 мг/м²), что определяет предельно низкую инерционность мембраны.

Перечисленные параметры свидетельствуют о том, что однослойный графен является идеальным материалом для изготовления гибкой мембраны.

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

$$\delta = \frac{3(1 - \mu^2)PR^4}{16Eh^3}, \quad (6)$$

где R — рабочий радиус мембраны (по контуру закрепления), h — толщина мембраны, E , μ — модуль упругости кГ/см² и коэффициент Пуассона материала мембраны соответственно [50].

В [51] представлены результаты расчётов чувствительности однослойных мембран, свидетельствующие о том, что повышение чувствительности при изготовлении мембран из классического графена C_6 составляет порядка 9 000, а из гексагриграфена $C_{(63)6}$ порядка 300 000 по сравнению с наиболее чувствительными мембранами из полиметилметакрилата.

Краевая перфорация мембраны. Ещё одним способом повышения чувствительности является сквозная краевая перфорация графеновой мембраны. Идея перфорирования плоских мембран для повышения их чувствительности представлена в [52]. Технология перфорирования графена изложена в [53]. Краевая перфорация переводит плоскую мембрану в квазигфрированную и обеспечивает достижение следующих целей [54]:

1. Сквозные микроотверстия в мембране обеспечивают выравнивание градиента давления между расширительной и компенсационной камерами и позволяют отказаться от выполнения капиллярного компенсационного канала (рис. 9), что значительно упрощает конструкцию ОАП, особенно в матричном исполнении.

2. Сквозная краевая перфорация, действуя как краевая гофра, значительно увеличивает прогиб мембраны при заданном давлении за счёт локального уменьшения её жёсткости, что обеспечивает дополнительное увеличение чувствительности.

3. Сквозная краевая перфорация приводит к выполаживанию профиля прогиба гибкой проводящей мембраны, увеличивая ёмкость динамического конденсатора.

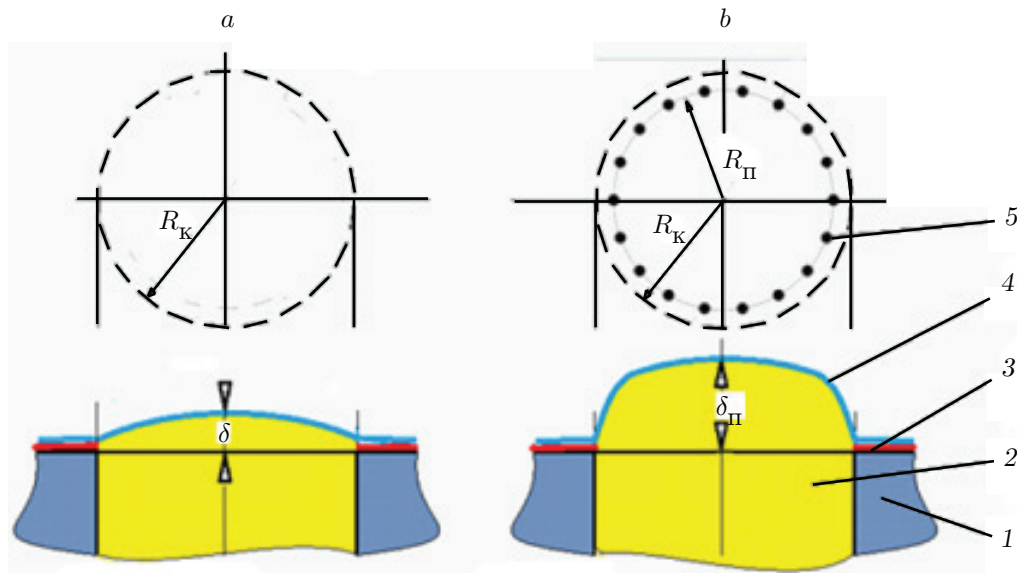


Рис. 9. Прогиб SLG-мембраны: δ — прогиб мембраны без краевой перфорации (а); $\delta_{\text{П}}$ — прогиб мембраны с краевой перфорацией (b) (обозначения: $R_{\text{К}}$ — радиус расширительной камеры, $R_{\text{П}}$ — радиус перфорации: 1 — корпус преобразователя, 2 — расширительная камера ОАП, 3 — подстилающий контактный слой золота, 4 — эластичная мембрана, 5 — перфорационные микроотверстия в мембране)

Оптико-акустические приёмники при низких температурах. Основное конструктивное ограничение для использования ОАП при низких температурах обусловлено тем, что как полимерные, так и металлические гибкие мембраны теряют эластичность при глубоком охлаждении. В общем случае достижение устройством высоких метрологических параметров без использования систем охлаждения чувствительного элемента является несомненным достоинством. Известно, что фундаментальным ограничением предельной пороговой чувствительности для всех моделей тепловых фотоприёмников являются флуктуации потока энергии со стороны фона. Для современных ОАП, работающих при комнатной температуре (+5 ... +40 °С), пороговый поток составляет примерно 10^{-10} Вт/Гц^{1/2}. Теоретически пороговая мощность регистрируемого излучения для всех моделей тепловых фотоприёмников при $T = 290$ К не может превышать $5,0 \cdot 10^{-11}$ Вт. В предельном случае, когда в поле обзора приёмника находится открытое космическое пространство (температура фона 3 К) и сам он охлаждён до 3 К, его предельная чувствительность составляет $5,5 \cdot 10^{-16}$ Вт. Переход к криогенным температурам является действенным и практически хорошо проверенным способом улучшения метрологических характеристик фотоприёмников инфракрасного диапазона.

Для создания низкотемпературного ОАП главной проблемой были поиски материала для гибкой мембраны, сохраняющего при азотных и гелиевых температурах такие качества, как деформационная прочность и эластичность. Единственным материалом, полностью отвечающим этим требованиям, является графен.

На рис. 10 представлены результаты экспериментов по нагружению мембраны из двухслойного графена, перекрывающей колодец радиусом 12 нм при комнатной и криогенной температурах. Из графика видно, что при равных значениях нагрузки при температуре 20 К прогиб графеновой мембраны на 10–15 % превышает прогиб даже при 300 К. Сохранение графеновой мембраной высокой эластичности при гелиевых температурах не

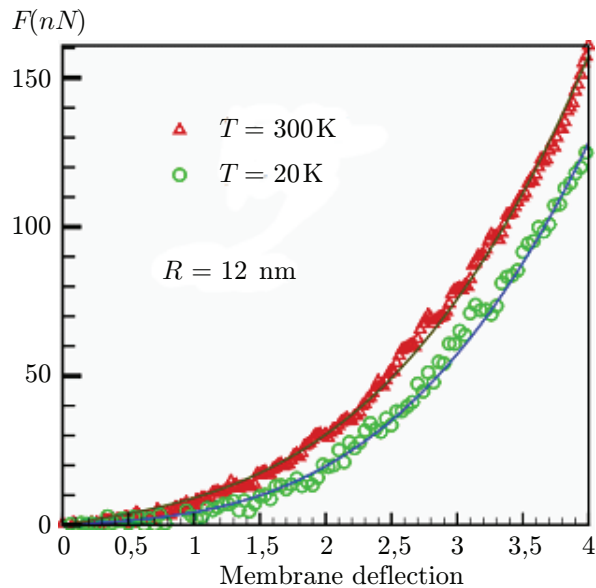


Рис. 10. Эластичность мембраны из двухслойного графена при комнатной 300 К и криогенной 20 К температурах [55]

только обеспечивает достижение теоретически предельной пороговой чувствительности за счёт снижения шумов, но и открывает возможность широкого использования ОАП для решения научных задач астрофизики и космологии на основе астрономических наблюдений в диапазоне длин волн от дальнего инфракрасного до миллиметрового [56, 57].

Снижение восприимчивости к акустическим и вибрационным шумам. Известно, что основным недостатком ОАП является их чрезвычайно высокая восприимчивость к акустическим и вибрационным шумам, ограничивающая пороговую чувствительность по сравнению с принципиально достижимыми значениями и приводящая к ограничению их использования в широкой практике. Природа этого явления объясняется тем, что гибкая мембрана, выполняющая роль датчика давления, одновременно является элементом акселерометра.

Датчик давления ОАП на основе гибкой мембраны полностью повторяет конструктивную схему осевого акселерометра [58], т. е. узел гибкой мембраны фактически объединяет в себе два датчика: датчик давления газа, нагретого поглощённым излучением, и одновременно осевой акселерометр, который измеряет составляющую линейного ускорения, перпендикулярную плоскости гибкой мембраны.

Классический осевой акселерометр представляет собой инерционную массу, которая с помощью упругих элементов подвеса смонтирована в корпусе. Именно такой принцип построения используется для создания измерителей ускорений линейных вибраций (вибродатчиков, виброакселерометров) [59].

Структурная схема осевого акселерометра линейных ускорений представлена на рис. 11. Принцип действия акселерометра основан на измерении силы инерции, развиваемой инерционной массой при её движении с ускорением. В соответствии со вторым законом Ньютона сила, действующая на гибкую мембрану и вызывающая её дополнительный прогиб, равна произведению её массы на ускорение $F = m \times a$. При ускорении преобразователя в направлении, перпендикулярном плоскости гибкой мембраны, помимо давления, вызванного расширением газа, действует также сила инерции. Такой акселерометр, инерционная масса которого определяется массой гибкой мембраны, измеряет составляющую линейного ускорения, совпадающую с продольной осью ОАП.

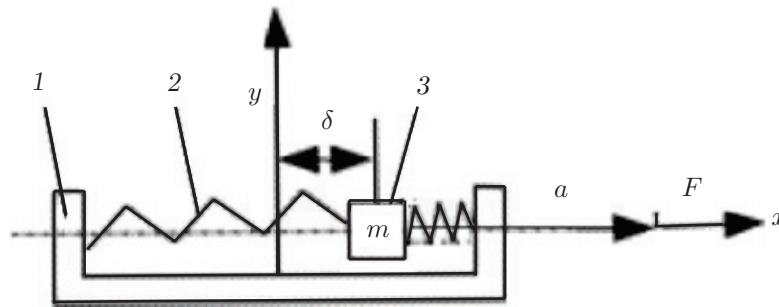


Рис. 11. Структурная схема осевого акселерометра линейных ускорений:
1 — корпус, 2 — пружины подвеса, 3 — инерционная масса

Величина, определяющая отношение массы гибкой мембраны к коэффициенту её жёсткости, является вибрационной чувствительностью ОАП $S_{\text{виб}} = m/D$, где D — коэффициент жёсткости ($\text{Па} \cdot \text{м}^3$):

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \sigma^2)},$$

где E , σ — модуль упругости в паскалях и коэффициент Пуассона материала мембраны соответственно, h — толщина мембраны.

Повышение чувствительности ОАП к изменениям давления в расширительной камере за счёт снижения жёсткости гибкой мембраны приводит к одновременному повышению вибрационной чувствительности, а любые методы демпфирования — к понижению температурной чувствительности.

Существует простой способ практически полного устранения восприимчивости ОАП к акустическим и вибрационным шумам без применения каких-либо устройств виброзащиты, созданный на использовании малоинерционных гибких мембран на основе однослойного графена [60].

Инерция мембраны характеризуется массой единицы площади ρ (в $\text{кг}/\text{м}^2$). Из определения следует, что минимальной инерцией будут обладать предельно тонкие мембраны, изготовленные на основе $2D$ -материалов. Для оценки степени подавления акустических и вибрационных шумов n в [60] было выполнено сравнение инерционности классической биморфной мембраны, использованной NASA в туннельном ОАП [61] и изготовленной из классического материала микроэлектроники нитрида кремния толщиной $0,7 \text{ мкм}$ с проводящим золотым покрытием толщиной 2000 \AA и мембраны из однослойного графена. Показано, что использование гибкой мембраны из SLG обеспечивает снижение восприимчивости ОАП к акустическим и вибрационным шумам в 7900 раз без применения каких-либо устройств виброзащиты.

Применение однослойного графена для изготовления гибкой мембраны ОАП позволяет создать принципиально новое поколение детекторов ИК- и ТГц-излучения, свободных от недостатков классических конструкций и обладающих предельно достижимыми метрологическими характеристиками.

На рис. 12 представлены результаты первых экспериментов по созданию ОАП с мембранами из однослойного графена.

Рис. 13 иллюстрирует результаты первых экспериментов по созданию матричного ОАП, в котором слой графена перекрывает множество «колодцев» с герметизацией отдельных ячеек за счёт сил Ван-дер-Ваальса [49].

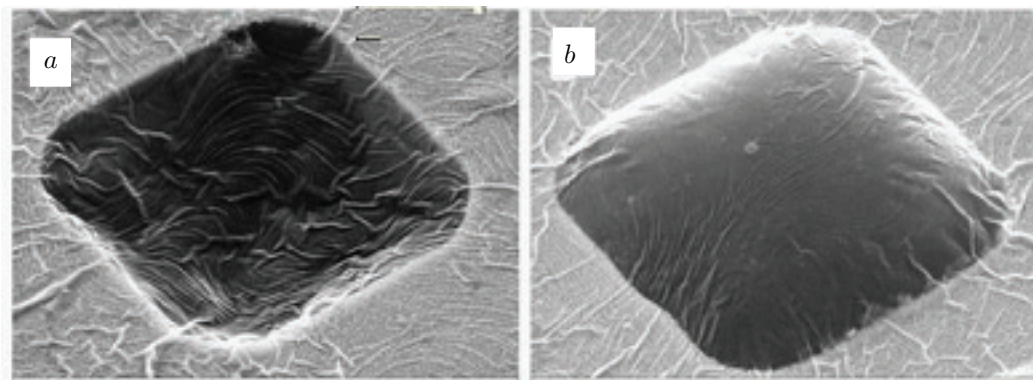


Рис. 12. Первые эксперименты по использованию мембран из однослойного графена в ОАП, перекрывающих «колодец» объёмного Si: в состоянии покоя (a) и при перепаде давления 0,1 МПа (b) [48]

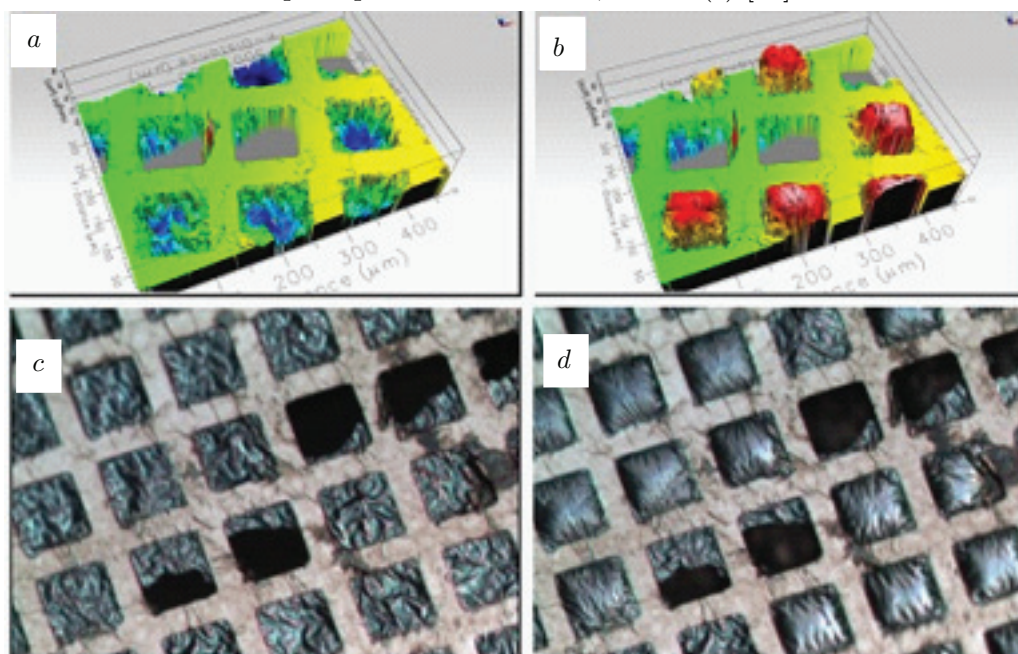


Рис. 13. Оптические изображения и профили матрицы герметичных ячеек: до (a) и после (b) применения давления, повреждение мембран над отдельными ячейками (c), отсутствие пневматической связи между рабочими и повреждёнными ячейками (d) [49]

Матричные преобразователи. Особенно острая потребность в матричных преобразователях существует для визуализации ИК- и ТГц-излучения во многих применениях, таких как системы технического зрения, спектральное и многоцветное тепловидение. Известно, что первый в истории техники матричный ОАП с 61 ячейкой для спектрального диапазона 8–14 мкм был сконструирован Zahl и Голеем для обнаружения воздушных целей и представлен для эксплуатационных испытаний в Береговой артиллерийский совет (Форт Монро, штат Вирджиния) в ноябре–декабре 1938 г. В открытой печати описание устройства появилось лишь в 1946 г. [63]. В основу устройства была положена оптико-акустическая ячейка Хейса. Корпус блока расширительных камер устройства представлял собой стальной диск, в котором было выполнено 61 отверстие по гексагональной сетке.

Торцы диска были подвергнуты оптической шлифовке. Теплопоглощающий элемент представлял собой коллоидную плёнку толщиной около 500 \AA с вакуумным напылением тонкого слоя сурьмы. Этим обеспечивались малая теплоёмкость поглотителя и тепловая развязка от стенок расширительной камеры. Блок детектирующих гибких мембран представлял собой латунную пластину с аналогичной системой отверстий. Соединения между блоками осуществлялись с помощью отдельных медных трубок. Все (61) отверстия расширительных камер перекрывались одной большой термопоглощающей плёнкой. Детектирующая гибкая металлическая мембрана Хейса была заменена коллоидной плёнкой толщиной приблизительно 300 \AA , перекрывавшей все отверстия латунного блока. Система камер заполнялась ксеноном, обладающим низкой теплоёмкостью и высокой теплопроводностью.

Многочисленные попытки создания малогабаритных матричных ОАП, предпринимавшиеся в дографеновую эпоху, неизменно сопровождалась резким падением их чувствительности (в соответствии с выражением (6) чувствительность элементарной ячейки пропорциональна R^4).

Наряду с чувствительностью основной характеристикой матричных преобразователей излучения ИК- и ТГц-диапазонов является разрешающая способность, которая определяется возможностью предельного уменьшения размеров элементарных оптико-акустических ячеек и расстояний между ними. Таким образом, размерность матрицы обуславливается компромиссом между требуемыми чувствительностью и разрешающей способностью. Минимальные значения размеров элементарных оптико-акустических ячеек ограничены дифракционными эффектами и сильно варьируются из-за чрезвычайно широкого рабочего диапазона используемых длин волн. Для ИК-диапазона они составляют величину порядка 15–30 мкм, а для ТГц-диапазона — несколько сотен мкм.

Преобразователь представляет собой гибридную конструкцию, состоящую из оптико-акустической фотоприёмной матрицы и сопряжённой с ней с помощью индиевых столбиков стандартной кремниевой микросхемы такой же размерности, которая выполняет функции накопления, усиления и коммутации фотосигналов. Выбор конструктивной схемы считывания информации о прогибе гибкой мембраны определяется оптическими свойствами и электропроводностью графена, который прозрачен во всём диапазоне длин волн видимого света и ближней части ИК-излучения и считается наиболее электропроводящим из известных материалов. Именно сочетание этих свойств является решающим при выборе конденсаторной (хейсовской) схемы считывания [62].

В настоящее время наиболее распространёнными для ИК- и ТГц-областей спектра являются матрицы микроболометров, объём выпуска которых превышает выпуск детекторов всех разновидностей вместе взятых. Так, швейцарская фирма SwissTerahertz, основанная в 2015 г., предлагает первые в мире компактные терагерцовые мегапиксельные камеры на неохлаждаемых микроболометрах с NEP менее $1,5 \text{ pВт/Гц}^{1/2}$ в полосе частот 1–18 ТГц с размером пикселя от 17 до 160 мкм и весом менее 200 г [64].

Появление однослойного графена привело к возобновлению попыток создания матричных ОАП (см. рис. 13). Основные трудности при создании ОАП с мембранами из однослойного графена связаны с получением бездефектного однослойного графена и его переносом на технологический «колодец», разделяющий расширительную и компенсационную камеры. В настоящее время американская фирма Graphenea, Inc. предлагает клиентам не только высококачественный однослойный эпитаксиальный графен на металлах, эпитаксиальный графен на SiC и CVD-графен на никеле или меди, но и перенос графенового слоя на подложки с технологическими «колодцами», поставляемые разработчиками оптико-механических устройств [65]. Аналогичные услуги разработчикам предоставляет и отечественная компания «ООО Русграфен» [66]. Современное состояние работ в этой области представлено в [67].

Регистрация выходного сигнала. Ёмкостный микрофон — первый предложенный Хейсом [14] в 1936 г. способ регистрации выходного сигнала. Динамический конденсатор с переменным зазором состоит из гибкой металлической мембраны или полимерной мембраны, покрытой слоем серебра, и неподвижного плоского металлического электрода. При расстоянии между электродами конденсатора порядка 10 мкм его ёмкость составляет около 8 пкФ. Обычно используется резонансный метод измерения ёмкости, основанный на определении собственной частоты колебательного контура, в который включён ёмкостный микрофон. Этот способ является основным методом регистрации в селективных оптико-акустических преобразователях газоанализаторов (ячейка Люфта), а также используется в приёмнике ONERA [22]. Для приёмников Хейса мембраны должны обладать металлической проводимостью и иметь электрический вывод.

Чувствительность ОАП с ёмкостным преобразователем давления в электрический сигнал для плоской мембраны, закреплённой по контуру, и при малых перемещениях под действием давления P вычисляется по формуле

$$S_{\dot{\varepsilon}} = \frac{\beta^2}{16} \frac{\beta^2(\beta^2 - 3) + 3}{\beta^2 + a} \frac{1}{\delta} \frac{(1 - \mu^2)R_m}{E \times h^3},$$

где R_m — рабочий радиус мембраны (по контуру закрепления); h — толщина мембраны; E , μ — модуль упругости кгс/см² и коэффициент Пуассона материала мембраны соответственно; δ — начальный зазор между электродом и мембраной; β — отношение радиуса электрода к радиусу мембраны; $a = C_k/C$, C — ёмкость датчика при $\beta = 1$, C_k — ёмкость кабеля [68].

Ёмкостный метод является основным при построении прецизионных измерителей микроперемещений. Он использован во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева при создании государственного специального эталона абсолютного давления для диапазона от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^3$ Па со случайной погрешностью не более 0,001 Па.

Ёмкостный метод, основанный на измерении изменений ёмкости между деформируемой эластичной мембраной и контрэлектродом, занимает первое место по простоте исполнения и поэтому может использоваться в будущем.

Оптический микрофон. Метод предложен Голеем [15] в 1947 г., впервые применившим биморфную мембрану, в которой полимерный слой обеспечивал повышенную чувствительность, а покрытие слоем серебра — высокий коэффициент отражения, необходимый для системы считывания (рис. 14). Прогиб разделительной гибкой мембраны обнаруживается с помощью оптической системы Теплера. Для этого изображение решётки с шириной штрихов, равной половине шага, проецируется после отражения от мембраны на другую такую же решётку таким образом, чтобы при покоящейся мембране изображения 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 фотозлементом, фототок которого регистрируется обычными способами. Метод позволяет обнаруживать смещения мембраны, значительно меньшие 0,1 мкм.

Анализ метрологических характеристик конструкций ОАП [69] позволил сделать вывод о том, что «приёмник с конденсаторным микрофоном при соблюдении оптимальных условий имеет ту же пороговую чувствительность, какую имеют приёмники с оптическим и электродинамическим микрофонами».

Поскольку однослойный графен обладает практически полной прозрачностью ($T \approx 98\%$), для реализации оптической системы считывания (приёмник Голея) графеновая мембрана должна покрываться отражающим металлическим покрытием, толщина

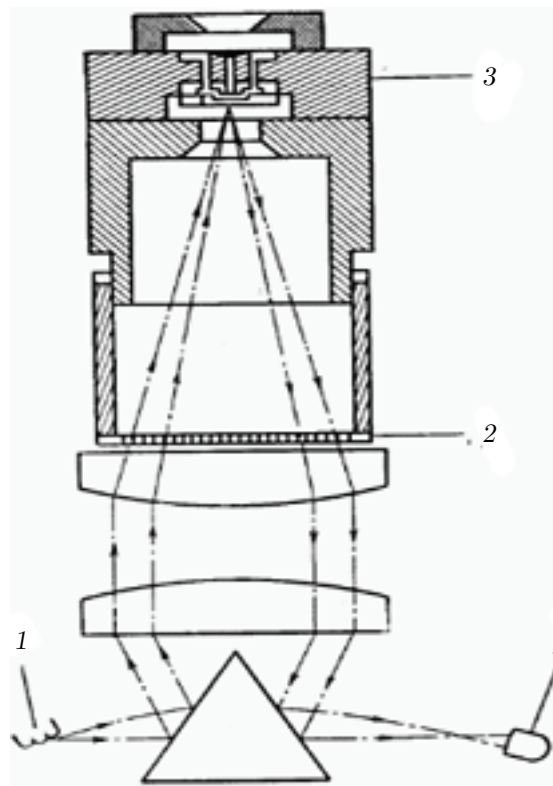


Рис. 14. Оптический микрофон Голея: 1 — источник света, 2 — решётка, 3 — ОАП, 4 — фотоприёмник

которого (из условия получения необходимого коэффициента отражения) более чем в 30 раз превышает толщину однослойного графена. Поэтому схема считывания Голея оказывается практически несовместимой с графеновой мембраной.

Туннельный преобразователь в качестве детектора микродеформаций гибкой мембраны. Изобретение туннельного микроскопа в 1981 г. Биннигом и Рорером [70] не только совершило переворот в исследовании наноструктур, но и послужило фактически началом широкого использования туннельного эффекта в экспериментальной физике в качестве основы для сверхчувствительного датчика микроперемещений.

В 1991–1995 гг. группа исследователей NASA разработала принципиально новую конструктивную схему ОАП [71]. В ней для считывания прогиба гибкой разделительной мембраны впервые был использован туннельный преобразователь микроперемещений (рис. 15). Такие туннельные преобразователи представляют собой миниатюрные сверхвысокочувствительные датчики с высоким разрешением, работающие с перемещениями порядка долей ангстрема и основанные на электронном туннелировании, которое первоначально было разработано для использования в туннельных микроскопах. По теоретическим оценкам разрешение туннельного датчика в 10 раз лучше, чем у интерферометра Майкельсона [72].

Принцип действия туннельных преобразователей перемещений [73] основан на эффекте туннелирования электронов (возникновении туннельного тока) в электродном контакте типа игла—плоскость с тонким (толщиной порядка 1 нм) межэлектродным слоем диэлектрика (вакуума, газа). Характерные значения туннельного тока составляют величину порядка 1 нА при напряжениях порядка 0,1 В и расстоянии 1 нм между электродами. Туннельные преобразователи характеризуются чрезвычайно высокой чувствительностью

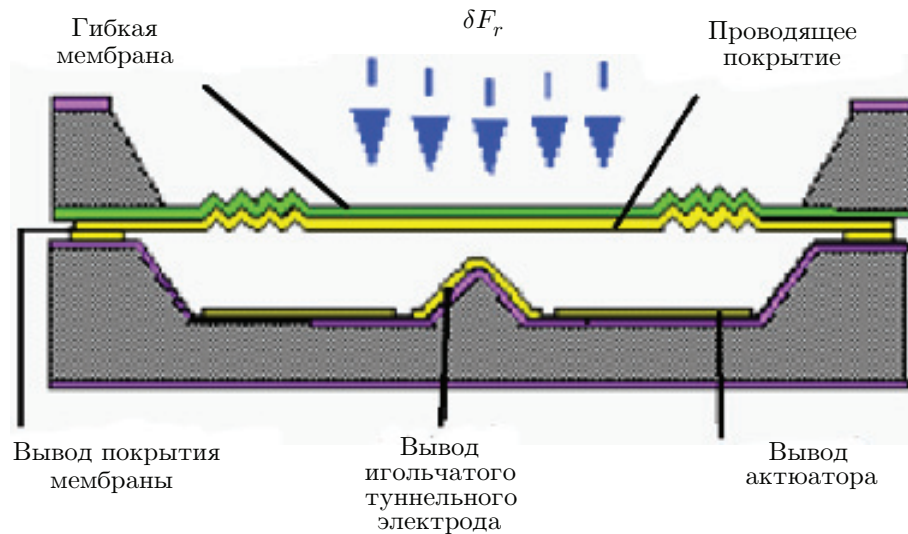


Рис. 15. Блок туннельного преобразователя [71]

к перемещению [74]. Разрешение, нормальное к поверхности, достигает 0,01 нм. Процесс туннелирования является практически безынерционным и может быть использован при температурах от долей градуса Кельвина до 1000 К.

Впервые использование туннельного эффекта для считывания прогиба гибкой мембраны ОАП предложено в [71] и детально описано в [29, 61].

Оптико-акустический приёмник выполнен по классической двухкамерной схеме с туннельным преобразователем для считывания прогиба гибкой мембраны. Все конструктивные элементы ОАП выполнены в MEMS-технологии микрообработки Si и Pytex. Корпус преобразователя выполнен в виде трёх блоков. Между входным и промежуточным блоками расположена газопроницаемая мембрана с поглотителем лучистой энергии, выполненном в виде платиновой плёнки толщиной 100 Å. Туннельный преобразователь (см. рис. 15) образован эластичной гофрированной мембраной, изготовленной из нитрида кремния толщиной 0,7 мкм с проводящим покрытием слоем золота толщиной 2000 Å, выполняющей роль подвижного туннельного электрода. На внутренней поверхности третьего блока, обращённой в сторону гибкой мембраны, расположен иглообразный туннельный электрод и кольцевой электрод системы электростатического управления зазором туннелирования. Расширительная камера заполнена воздухом при атмосферном давлении.

Преобразователь микроперемещения представляет собой туннельный контакт, образованный неподвижным и подвижным электродами, функционирующий следующим образом (см. рис. 15). Управляющим сигналом ОАП является туннельный ток, возникающий при подаче разности потенциалов V между графеновой мембраной и неподвижным туннельным электродом. Туннелирование электронов возможно при величине зазора между туннельными электродами в единицы или десятки ангстрем. Так как динамический диапазон прогибов гибкой мембраны δ_{\max} на несколько порядков превышает величину туннельного зазора, то для поддержания туннельного тока используются электростатический актюатор и отрицательная обратная связь, поддерживающие неизменным туннельный зазор. При подаче линейно возрастающей разности потенциалов между электродом системы электростатического управления и графеновой мембраной возникает кулоновская сила, под действием которой графеновая мембрана прогибается в сторону туннельного электрода и зазор ($\Delta - \delta_{\max}$) уменьшается до появления туннельного тока. Электростатический актюатор позволяет осуществлять регулирование расстояния между гибкой мембраной

и неподвижным туннельным игольчатым электродом с высокой точностью (при изменении туннельного зазора на 1 \AA сила тока меняется на порядок). Петля обратной связи состоит из предварительного усилителя, располагаемого вблизи туннельного промежутка для минимизации шумов и наводок, разностного усилителя, фильтра низких частот, оконечного усилителя и электростатического актюатора, регулирующего величину туннельного промежутка. Фактически в устройстве впервые применена компенсационная схема измерений, в которой давление расширяющегося газа на мембрану уравнивается электростатической силой актюатора, а туннельный ток выступает в роли своеобразного нуля-органа [71].

В рамках контракта было изготовлено 30 макетов туннельных ОАП, которые работали с NEP лучше чем $8 \cdot 10^{-10} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$ при 25 Гц, диаметре гибкой мембраны 2 мм, напряжении на туннельном зазоре 150 мВ и напряжении на электростатическом актюаторе, достигающем 150 В. Расчётная чувствительность, определяемая как смещение центральной точки мембраны на единицу изменения температуры газа, составила $S = 15,5 \text{ мкм/К}$. Разрешение туннельного преобразователя в полосе пропускания 1 Гц, рассчитанное по данным частотной характеристики, составило 29 пм [61], что соответствует температурному разрешению 1,7 мкК. Шум был обусловлен чувствительностью преобразователя к механическим вибрациям.

Теоретические вопросы, связанные с фундаментальным пределом обнаружения смещения с помощью туннельных преобразователей, были рассмотрены в [74, 75].

В [61] впервые выполнены оценки общего шума и основных составляющих шумов, ограничивающих пороговые сигналы ОАП, и получено следующее уравнение:

$$(\text{NEP})^2 = 4k_{\text{B}}T^2G + \frac{2e(G^2 + (\omega C)^2)}{I\alpha^2} + 16A\sigma k_{\text{B}}T^5,$$

где k_{B} — постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$), T — рабочая температура, ω — частота модуляции, A — площадь поглотителя, σ — постоянная Стефана — Больцмана ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$).

Первое слагаемое в общий шум обусловлено флуктуациями температуры газа в расширительной камере, второе слагаемое связано с дробовым шумом в туннельном токе, а третье обусловлено фотонным шумом. Для идеального ОАП фотонный шум будет наибольшим членом в выражении для NEP.

Несмотря на использование туннельного датчика микроперемещений, обладающего рекордными и предельными пороговыми характеристиками, в [61] не удалось добиться столь же революционных улучшений метрологических характеристик разработанного устройства.

Перспективной представляется попытка совмещения уникальных возможностей двух прорывных технологий — использование однослойного графена для изготовления гибкой мембраны и туннельного детектора микродеформаций (рис. 16), предпринятая в [76].

Кантилеверный MEMS-микрофон был разработан по 7-й рамочной программе ЕС «Создание миниатюрного газового сенсора». Работы проводились с 2008 по 2012 гг. силами консорциума, состоящего из восьми участников: VTT — Технического Исследовательского Центра Финляндии (координатор), Gasera Oy (Финляндия), University of Turku (Финляндия), QinetiQ (Великобритания), ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН (Россия), Selex (Италия), Doble (Норвегия), Dräger (Германия) [77].

Задача проекта состояла в создании портативного высокочувствительного газового сенсора, основанного на использовании оптико-акустического эффекта, твердотельного микрофона, интерференционной системы считывания, соединённых воедино с помощью новейших методов интеграции.

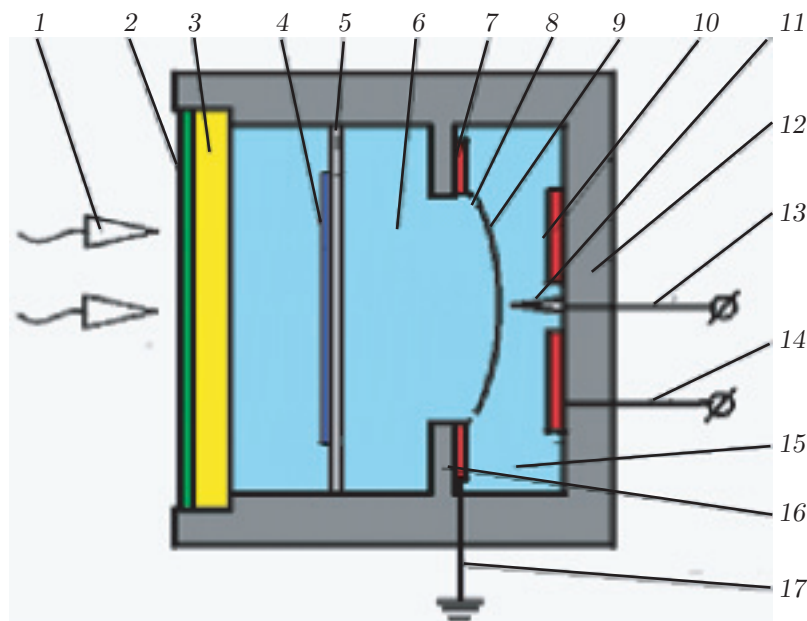


Рис. 16. Туннельный гелий-графеновый ОАП: 1 — исследуемое излучение, 2 — просветляющее покрытие, 3 — входное окно, 4 — поглощающий слой, 5 — коллоидная плёнка со сквозной пористостью, 6 — расширительная камера ОАП, 7 — подстилающий контактный слой золота, 8 — микроотверстия краевой перфорации мембраны, 9 — графеновый мембранный слой, 10 — кольцевой электрод электростатического актюатора, 11 — неподвижный туннельный электрод, 12 — корпус преобразователя, 13 — вывод неподвижного туннельного электрода, 14 — вывод электрода электростатического актюатора, 15 — компенсационная камера, 16 — шайбовидная перегородка, 17 — вывод электрода графеновой мембраны

В рамках проекта были созданы и испытаны высокоэффективные микрофоны кантилеверного типа, система интерференционного считывания, позволяющая измерять отклонения кантилевера, соответствующие расстоянию 0,001 нм.

Исследования завершились выпуском фирмой Gasera Ltd. оптико-акустического преобразователя РА-301 [78], структурная схема которого представлена на рис. 17.

В структурной схеме ОАП РА301 впервые применено два конструктивных новшества: 1) кремниевый кантилевер, изготовленный травлением пластины кремния на изоляторе, установленный в расширительной камере на расстоянии 13 мм от плоскости поглотителя (размеры кантилевера 4 мм × 1 мм × 10 мкм); 2) смещение кантилевера из-за акустической волны регистрируется с пикометрическим разрешением компактным лазерным интерферометром, встроенным в прибор РА-301.

Оцифрованный выходной сигнал модуля интерферометра обрабатывается в программе LabVIEW для выполнения быстрого преобразования Фурье.

В детальном описании конструкции и экспериментальных исследований [79] отмечается, что перемещение свободного конца кантилевера на два порядка превышает перемещение средней точки натянутой мембраны при том же значении давления (не указываются при этом параметры мембраны). Замена классической мембраны кантилевером обеспечивает линейный динамический диапазон детектора, расширенный до 80 дБ, начиная с шумового эквивалента мощности 6 нВт/Гц^{1/2} до 600 мВт в диапазоне длин

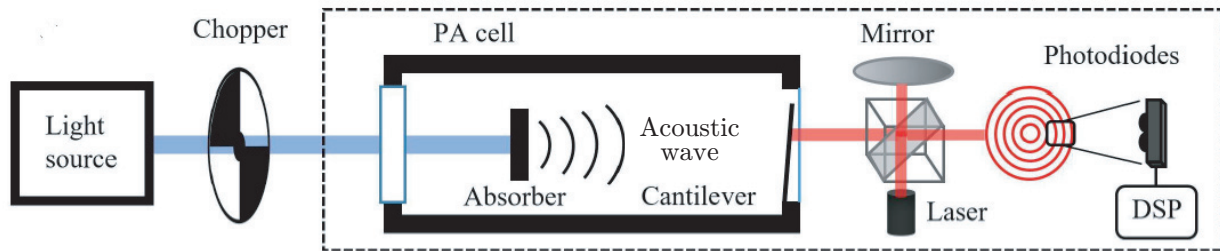


Рис. 17. Структурная схема ОАП PA-301 фирмы Gasera Ltd. [78]

волн от 325 нм до 25 мкм. В то же время, несмотря на применение лазерного интерферометра, по значениям NEP ($5,6 \text{ нВт/Гц}^{1/2}$) и удельной обнаружительной способности ($D^* = 1,6 \cdot 10^8 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$) он уступает параметрам классической ячейки Голея фирмы Tydex J. S. Co. Главным преимуществом консольного микрофона является его превосходная линейность в расширенном динамическом диапазоне.

В [80] обобщены последние достижения в технических средствах обнаружения микродеформаций кантилевера, таких как интерферометр Майкельсона, интерферометр Фабри — Перо, ёмкостные, пьезоэлектрические и пьезорезистивные детекторы.

Возникает естественный вопрос: почему использование новой элементной базы, обладающей чрезвычайно высокой чувствительностью к перемещению чувствительного элемента датчика давления, достигающей 10^{-2} – 10^{-3} нм, не повлекло за собой революционных изменений метрологических параметров ОАП? В рассматриваемых случаях это связано с отсутствием комплексного подхода при конструировании. Например, работы Kenyu и других авторов, проводившиеся в дографеновую эпоху, привели к созданию туннельного ОАП с температурным разрешением лишь 1,7 мК из-за чувствительности преобразователя к механическим вибрациям. Другое, безусловно, очень перспективное направление, связанное с заменой эластичной мембраны кантилевером, также не привело к революционным изменениям метрологических параметров ОАП. В первых экспериментах по созданию микромеханических сенсоров использовались стандартные коммерческие кантилеверы для зондовой микроскопии, обладающие достаточно высокой жёсткостью. В дальнейшем промышленностью был освоен выпуск кантилеверов без иглы, с алюминиевым или золотым отражающим покрытием на обратной стороне консоли и электропроводящей консолью [81]. Все серийно производимые кантилеверы изготавливаются из кремния или нитрида кремния и имеют толщину консоли не менее 1,5 мкм. Принципиально новые возможности кантилеверного микрофона открываются при изготовлении нанокантилеверов из однослойного графена и графеновых нанолент, теоретически обладающих нулевой изгибной жёсткостью [82, 83].

Заключение. Оптико-акустические преобразователи, принцип действия которых основан на детектировании теплового расширения газа, заключённого в замкнутом объёме, и известные как ячейка Голея, первоначально предназначенные для измерения слабых потоков излучения ИК-диапазона, за 70 лет эволюционного развития значительно расширили области применения, включив в первую очередь газовую ИК-спектроскопию высокого разрешения и ТГц-спектроскопию. За этот период ОАП успешно выдержали конкуренцию с приборами аналогичного назначения, использующими тепловые или фотонные принципы работы. Эволюционные изменения конструкции ОАП были обусловлены развитием МЭМС-технологии и тонкоплёночной микроэлектроники. Открытие графена и исследование его физических свойств привели к новым подходам к конструированию ОАП. Использование однослойного графена для изготовления наномембран, нанокантилеверов и туннельных детекторов является переломным моментом в достижении предельных пара-

метров ОАП, необходимых для современного аналитического приборостроения во многих областях науки и техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Киес Р. Дж., Краузе П. В., Патли Э. Г. и др.** Фотоприёмники видимого и ИК-диапазонов. М.: Радио и связь, 1985. 328 с.
2. **Мальшев В. И.** Введение в экспериментальную спектроскопию. М.: Наука, 1979. 480 с.
3. **Иглакова А. Н., Ошлаков В. К., Селезнев Л. В., Тихомиров Б. А.** Оптико-акустическая калориметрия фемтосекундных лазерных импульсов // Оптика атмосферы и океана. 2015. № 4. С. 354–358
4. **Панкратов Н. А., Слободская П. В.** К истории оптико-акустического газоанализатора // Оптический журнал. 1993. № 6. С. 73–74.
5. **Гибин И. С., Котляр П. Е.** От газового термометра до терагерцовой матрицы (обзор) // Успехи прикладной физики. 2021. 9, № 4. С. 337–346.
6. **Bell A. G.** On the production and reproduction of sound by light // Am. Journ. Science. 1880. 20, N 118. P. 305–324.
7. **Tyndall J.** Action of an intermittent beam of radiant heat upon gaseous matter // Proc. Roy. Soc. London. 1881. 31, Iss. 206–211. P. 307–317.
8. **Roentgen W. C.** On tones produced by the intermittent irradiation of a gas // Phil. Mag. Ser. 5. 1881. 11, N 68. P. 308–311.
9. **Hershberger W. D.** The absorption of microwaves by gases // Journ. Appl. Phys. 1946. 17. P. 495.
10. **Putley E. H.** Thermal detectors // Infrared Phys. 1964. 4. P. 1–8.
11. **Ross R. T.** Thermodynamic Limitations on the Conversion of Radiant Energy into Work // Journ. Chem. Phys. 1966. 45, N 1. P. 1–8.
12. **Бреслер П. И.** Оптические абсорбционные газоанализаторы и их применение. Л.: Энергия, 1980. 164 с.
13. **Панкратов Н. А., Нарыкин Н. И., Макарова И. П.** Тепловые приёмники излучения. Л.: ГОИ, 1980. 172 с.
14. **Hayes H. V.** A new receiver of radiant energy // Rev. Sci. Instrum. 1936. 7, N 5. P. 202–204. DOI: 10.1063/1.1752121.
15. **Pat. 2557096 US.** Radiation detecting device /M. J. T. Golay. 1947. P. 23.
16. **Golay M. J. T.** Theoretical consideration in heat and infrared detection, with particular reference to the pneumatic detector // Rev. Sci. Instrum. 1947. 18, Iss. 5. P. 347–356. DOI: 10.1063/1.1740948.
17. **ТГп материалы – TYDEX.** URL: <http://www.tydexoptics.com> (дата обращения: 20.03.2023).
18. **Ангерер Э.** Техника физического эксперимента. М.: ГИФМЛ, 1963. 455 с.
19. **Лебедева В. В.** Экспериментальная оптика. 4-е изд. М.: МГУ, 2005. 282 с.
20. **Talghader J. J., Gawarikar A. S., Shea R. P.** Spectral selectivity in infrared thermal detection // Light: Science & Applications. 2012. P. 1–11. e24. DOI: 10.1038/lsa.
21. **Viengerov M. L.** New method of gas analysis based on Tyndall |Roentgen opto-acoustic effect // Dokl. Akad. Nauk SSSR. 1938. 19. P. 687–688.
22. **Шоль Ж., Марфан И., Мюнш М. и др.** Приёмники инфракрасного излучения. М.: Мир, 282 с.
23. **Агранат М. Б., Ильина И. В., Ситников Д. С.** Применение терагерцовой спектроскопии для дистанционного экспресс-анализа газов // ТВТ. 2017. 55, вып. 6. С. 759–774.

24. **Степанов Е. В.** Методы высокочувствительного газового анализа молекул-биомаркеров в исследованиях выдыхаемого воздуха // Тр. Института общей физики им. А. М. Прохорова. 2005. **61**. С. 5–47.
25. **Панкратов Н. А.** Современные оптико-акустические приёмники излучения // Оптический журнал. 1994. № 5. С. 5–6.
26. **Pat. 218475 SU.** Оптико-акустический приёмник инфракрасной радиации /Н. А. Панкратов, М. В. Робачевский. Заявл. 02.03.1967; Опубл. 15.04.1990.
27. **Гроссорг Ж.** Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М.: Мир, 1988. 416 с.
28. **Гибин И. С., Котляр П. Е.** Неохлаждаемые матричные терагерцовые преобразователи изображений. Принципы конструирования // Прикладная физика. 2019. № 4. С. 80–86.
29. **Pat. 5436452 US.** Uncooled tunneling infrared sensor /Т. Kenny, W. J. Kaiser, J. A. Podosek, et al. 1995. P. 14.
30. **Панкратов Н. А.** О соотношении удельной и пороговой чувствительности камеры неселективного оптико-акустического приёмника с его постоянной времени // Оптико-механическая промышленность. 1957. № 2. С. 16–19
31. **Ledvosinska E., Szkopek T., Guermoune A., Siaj M.** Application of grapheme membrane in micro-Goley cell array // Proc. of the SPIE. 2012. **8261**. 82610A. DOI: 10.1117/12.910454.
32. **Putley E. H.** The detection of sub-mm radiation // Proceedings of the IEEE. 1963. **51**, Iss. 11. P. 1–38.
33. **Ross R. T.** Thermodynamic limitations on the conversion of radiant energy into Work // Journ. Chem. Phys. 1966. **45**, N 1. P. 1–8.
34. **Панкратов Н. А.** Неселективный оптико-акустический приёмник с оптическим микрофоном // Оптико-механическая промышленность. 1960. № 1. С. 37
35. **Potter R. F., Eisenman W. L.** Infrared photodetectors: A review of operational detectors // Appl. Opt. 1962. **1**, Iss. 5. P. 567.
36. **Детектор Голея.** Тидекс/Продукты /ТГц приборы /Детекторы Голея. URL: http://www.tydexoptics.com/pdf/Golay_cell.pdf (дата обращения: 20.03.2023).
37. **Корляков А. В.** Сверхтонкие мембраны в микросистемной технике // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 8 (85). С. 17–26.
38. **Hasikin K., Soin N., Ibrahim F.** Micro-diaphragm performance analysis for polyimide diaphragm // Proc. of the IEEE Int. Conference on Semiconductor Electronics. Malacca, Malaysia, 2010. P. 293–296. DOI: 10.1109/СМЭЛЕК.2010.5549367.
39. **Wallace P. R.** The band theory of graphite // Phys. Rev. 1947. **71**, Iss. 9. 622.
40. **Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V. et al.** Electric field effect in atomically thin carbon films // Science. 2004. **306**, Iss. 5696. P. 666. DOI: 10.1126/science.1102896.
41. **Lee C., Wei X., Kysar J. W., Hone J.** Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene // Science. 2008. **321**, Iss. 5887. P. 385–388.
42. **Браже Р. А., Кочаев А. И., Мефтахутдинов Р. М.** Графены и их физические свойства. Ульяновск: УЛГТУ, 2016. 139 с.
43. **Bunch J., Verbridge S., Aldenet J., Van der Zande A. M.** Impermeable atomic membranes from graphene sheets // Nanoletters. 2008. **8**, Iss. 8. P. 2458–2462.
44. **Ali A., Khan A., Karimov Kh.** Pressure sensitive sensors based on carbon nanotubes, graphene, and its composites // Research Article. Open Access. **2018**. Article 9592610. 12 p. DOI: 10.1155/2018/9592610.
45. **Fan K., Suen J. Y., Padilla W. J.** Graphene metamaterial spatial light modulator for infrared single pixel imaging // Opt. Express. 2017. **25**, N 21. P. 25318–25325.

46. **Ledwosinska E., Rogalski A.** Graphene-based materials in the infrared and terahertz detector families // *Adv. Opt. Photon.* 2019. **11**, Iss. 2. P. 314–379. DOI: 10.1364/AOP.11.000314.
47. **Rogalski A.** Graphene-based materials in the infrared and terahertz detector families // *Proc. of the ATTRACT TWD Symposium: Trends, Wishes and Dreams in Detection and Imaging Technologies.* Barcelona, Spain, 30 June - 1 July, 2016.
48. **Betz-Güttner E., Truccolo D., Cefarin N.** Graphene Golay micro-cell arrays for a color-sensitive TeraHertz imaging (GRANT) // *ATTRACT Final Conference.* 2021. P. 1–5.
49. **Образцова Е. Д., Рыбин М. Г., Образцов П. А.** Оптические свойства графена / *Углеродная фотоника.* М.: Наука, 2017. С. 261–293.
50. **Андреева Л. Е.** Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1981. 391 с.
51. **Гибин И. С., Котляр П. Е.** Мембраны оптико-акустических приёмников излучения // *Прикладная физика.* 2020. № 2. С. 90–97.
52. **Пат. 2265913С2 RU.** Перфорированная мембрана для чувствительного элемента микро-механического прибора / А. В. Корляков, В. В. Лучинин, С. В. Бельх. Заявл. 15.12.2003; Опубл. 20.05.2005.
53. **Заркевич Н. А.** Перфорированный графен как носитель информации: перфокарта атомного масштаба // *Тр. МФТИ.* 2012. **4**, № 3. С. 95–90.
54. **Гибин И. С., Котляр П. Е.** Гелий-графеновый оптико-акустический преобразователь предельной чувствительности // *Прикладная физика.* 2021. № 3. С. 78–84.
55. **Глухова О. Е., Кириллова И. В., Жничков Р. Ю.** Прочностные свойства 1D- и 2D-размерных углеродных структур как наноматериала для космических технологий // *Нано-структуры. Математическая физика и моделирование.* 2011. **5**, № 1/2. С. 5–38
56. **Кардашев Н. С., Новиков И. Д., Лукаш В. Н. и др.** Обзор научных задач для обсерватории Миллиметрон // *УФН.* 2014. **184**, № 12. С. 1319–1352.
57. **Кропотов Г., Кауфманн П.** Терагерцевые фотометры для наблюдений солнечных вспышек из космоса // *Фотоника.* 2013. № 5/41. С. 40–50.
58. **Распопов В. Я.** Микро-механические приборы. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
59. **Пат. 2391673С2 RU.** Нанoeлектромеханический датчик ускорения / С. Ф. Скорина, Ю. В. Гамов. 2008. URL: https://i.moscow/patents/ru2391673c2_20100610 (дата обращения: 24.07.2023).
60. **Котляр П. Е.** Устранение восприимчивости к акустическим и вибрационным шумам оптико-акустических преобразователей // *Прикладная физика.* 2022. № 6. С. 51–55.
61. **Kenny T. W., Reynolds J. K., Podosek J. A. et al.** Micromachined infrared sensors using tunneling displacement transducers // *Rev. of Sci. Instrum.* 1996. **67**, Iss. 112. P. 112–128.
62. **Zahl H., Golay M.** Pneumatic heat detector // *Rev. Sci. Instrum.* 1946. **17**, N 11. P. 511.
63. **Котляр П. Е., Гибин И. С.** Оптико-акустические приёмники ИК- и ТГц-излучения с нанооптоэлектромеханическими элементами на основе однослойного графена // *Автометрия.* 2021. **57**, № 1. С. 57–67. DOI: 10.15372/AUT20210107.
64. **Swiss Terahertz.** URL: <https://www.swissterahertz.com/> (дата обращения: 20.03.2023).
65. **Graphene companies catalogue.** Graphenea, Inc. URL: https://www.grapheneconf.com/companies_catalogue/ (дата обращения: 20.03.2023).
66. **Русграфен.** URL: <https://www.rusgraphene.ru/market> (дата обращения: 20.03.2023).
67. **Cho J. H., Cayll D. R., Behera D., Cullian M.** Towards repeatable, scalable graphene integrated micro-nanoelectromechanical systems (MEMS/NEMS) // *Micromachines.* 2022. **13**, Iss. 1. P. 27. DOI: 10.3390/mi13010027.
68. **Дадаян Ю. А.** Датчик давления. М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2015. 29 с.

69. **Панкратов Н. А., Виноградова Л. М.** Селективные оптико-акустические приёмники радиации с оптическим, электродинамическим и конденсаторным микрофоном / Автоматические газоанализаторы. М.: ЦИНТИЭлектропром, 1961. С. 234–248.
70. **Binnig G., Rohrer H.** Scanning Tunneling Microscopy — From Birth to Adolescence: Nobel Lecture. Stockholm, Dec. 8, 1986. P. 389–409.
71. **Kenny T. W., Waltman S. B., Reynolds J. K., Kaiser W. J.** Micromachined silicon tunnel sensor for motion detection // Appl. Phys. Lett. 1991. **58**. P. 100–102.
72. **Tabib-Azar M., Garcia-Valenzuela A.** Sensing means and sensor shells: A new method of comparative study of piezoelectric, piezoresistive, electrostatic, magnetic, and optical sensors // Sensors and Actuators A: Physical. 1995. **48**, Iss. 2. P. 87–100.
73. **Binnig G., Rohrer H., Gerber Ch., Weibel E.** Tunneling through a controllable vacuum gap // Appl. Phys. Lett. 1982. **40**, N 2. P. 178–180.
74. **Митрофанов В. П., Якимов В. Н.** Стандартный квантовый предел при измерении малых сил с использованием туннельного датчика // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1989. **30**, № 4. С. 36–41.
75. **Onofrio R., Presilla C.** Quantum limit in resonant vacuum tunnelling transducers // Europhysics Lett. 1993. **22**. P. 333.
76. **Пат. 2782352С1 RU.** Туннельный гелий-графеновый оптико-акустический приемник инфракрасного и ТГц-излучения /И. С. Гибин, П. Е. Котляр. 2022.
77. **Создание** миниатюрного газового сенсора. URL: <http://ioffeled.com»index.php?option=com...view=article...77> (дата публикации: 20.03.2023).
78. **РА-301 – Gasera.** URL: gasera.fi»product/ra301/ (дата публикации: 20.03.2023).
79. **Rossi J., Vainio M., Ikonen E., Sherema S.** Optical power detector with broad spectral coverage, high detectivity and large dynamic range // Opt. Lett. 2022. **47**, Iss. 7. P. 1689–1692. DOI: 10.1364/OL.455191.
80. **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. P. 1–11.
81. **Кантилеверы** для атомно-силовой микроскопии. URL: <https://angstrom.ru> (дата публикации: 20.03.2023).
82. **Rasuli R., Iraj Zad A., Ahadian M. M.** Mechanical properties of graphene cantilever from atomic force microscopy and density functional theory // Nanotechnology. 2010. **21**, N 18. 185503.
83. **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.

Поступила в редакцию 20.03.2023

После доработки 03.04.2023

Принята к публикации 10.04.2023