

УДК 621.396, 538.9, 681.7
EDN: GUBNLB

PACS: 85.30 Dw 84.40.Ba



Снижение восприимчивости к акустическим и вибрационным шумам оптико-акустических преобразователей

П. Е. Котляр

Оптико-акустические приемники (ОАП) излучения имеют эквивалентную мощность шума (NEP) $1,4 \times 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2} в спектральном диапазоне 0,3–10000 мкм и не требуют вакуумирования и термостабилизации. Диапазон исследуемых с помощью ОАП сигналов охватывает как постоянные потоки ИК- и ТГц-излучения мощностью до 10^{-11} Ватт, изменения температуры на 10^{-6} – 10^{-7} К, так и фемтосекундные тераваттные лазерные импульсы. Основным недостатком ОАП является сверхчувствительность к вибрациям. Показано, что гибкая мембрана, выполняющая роль датчика давления, одновременно является акселерометром в котором сила, действующая на мембрану определяется её инерционной массой. Так как однослойный графен (SLG) является самым легким конструкционным материалом с поверхностной плотностью $0,77 \times 10^{-7}$ г/см², использование гибкой мембраны из SLG обеспечивает снижение восприимчивости ОАП к акустическим и вибрационным шумам более чем на три порядка без применения каких либо устройств виброзащиты.

Ключевые слова: оптико-акустический преобразователь, пороговая чувствительность, ускорение, акселерометр, гибкая мембрана, однослойный графен, инерционная масса.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-51-55

Введение

Оптико-акустические приемники (ОАП) излучения имеют эквивалентную мощность шума (NEP) $1,4 \times 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2} в спектральном диапазоне 0,3–10000 мкм и не требуют вакуумирования и термостабилизации [1]. Диапазон исследуемых с помощью ОАП сигналов охватывает как постоянные потоки ИК- и ТГц-излучения мощностью до 10^{-11} Ватт,

изменения температуры на 10^{-6} – 10^{-7} К, так и фемтосекундные тераваттные лазерные импульсы [2, 3]. 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 делающая их ограничено пригодными для использования в широкой практике. Природа этого явления объясняется тем, что гибкая мембрана, выполняющая роль датчика давления, одновременно является акселерометром.

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

Котляр Петр Ефимович, и. о. в.н.с., д.г.-м.н., профессор.
E-mail: kotlyarpe@iae.nsk.su; 21031940@mail.ru
Институт автоматизации и электрометрии СО РАН.
Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

Статья поступила в редакцию 17 октября 2022 г.

© Котляр П. Е., 2022

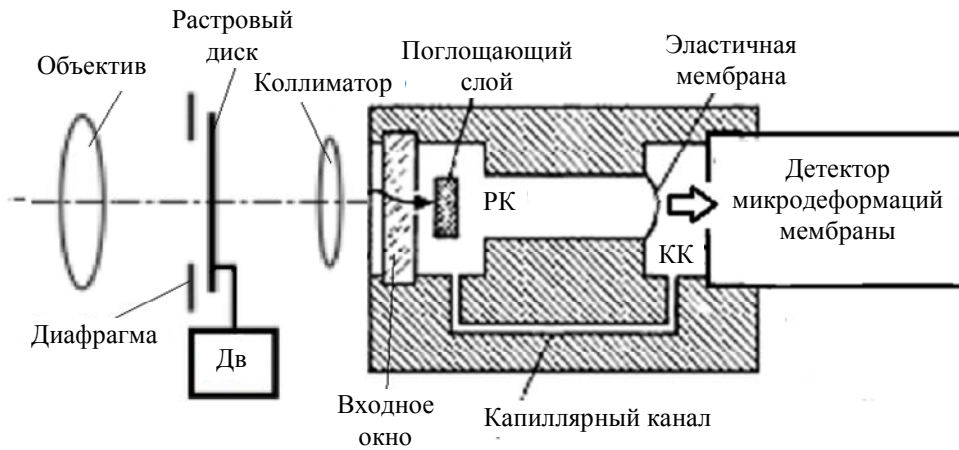


Рис. 1. Конструктивная схема оптико-акустических приемников излучения

Поступающее в расширительную камеру РК модулированное излучение поглощается металлической пленкой и нагревает газ, пульсации давления которого вызывают колебания эластичной мембраны. Величина прогиба эластичной мембраны является мерой величины поглощенной энергии излучения. Для того чтобы приемник не был подвержен изменениям внешнего давления и температуры, расширительная камера РК дополнена компенсационной камерой КК и капиллярным каналом, при помощи которого уравнивается давление по обе стороны эластичной мембраны. Преобразования в ОАП осуществляются по схеме ($h\nu \rightarrow \text{тепло} \rightarrow P(T) \rightarrow \delta(P) \rightarrow \text{электрический сигнал}$), 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 определена как произведение парциальных чувствительностей фототермического S_{I-T} , термоакустического S_{T-P} , акустомеханического $S_{P-\delta}$ и механоэлектрического $S_{\delta-U}$ звеньев преобразования:

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

Датчик давления ОАП на основе гибкой мембраны полностью повторяет конструктивную схему осевого акселерометра [4], то есть узел гибкой мембраны фактически объединяет в себе два датчика: датчик давления газа, нагретого поглощенным излучением и одно-

временно осевой акселерометр, который измеряет составляющую линейного ускорения перпендикулярную плоскости гибкой мембраны.

Восприимчивость к акустическим и вибрационным шумам

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) [4, 5]. Структурная схема осевого акселерометра линейных ускорений представлена на рис. 2.

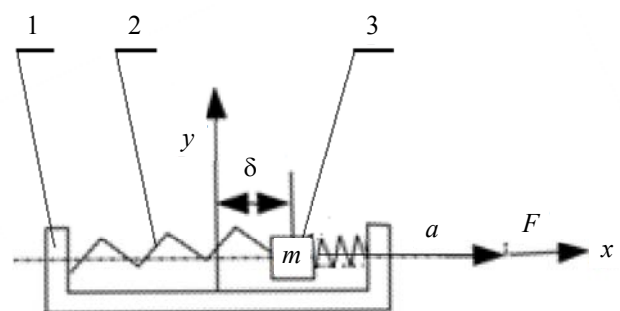


Рис. 2. Структурная схема осевого акселерометра линейных ускорений: 1 – корпус; 2 – пружины подвеса; 3 – инерционная масса

Принцип действия акселерометра основан на измерении силы инерции, развиваемой инерционной массой при ее движении с ускорением. В соответствии с вторым законом Ньютона сила, действующая на гибкую мембрану и вызывающая её дополнительный прогиб равна произведению её массы на ускоре-

ние $F = m \times a$. При ускорении преобразователя в направлении, перпендикулярном плоскости гибкой мембраны на последнюю помимо давления, вызванного расширением газа действует также сила инерции. Такой акселерометр, инерционная масса которого определяется масса гибкой мембраны измеряет составляющую линейного ускорения совпадающую с продольной осью ОАП.

Величина, определяющая отношение массы гибкой мембраны к коэффициенту её жесткости является вибрационной чувствительностью ОАП $S_{\text{виб}}$

$$S_{\text{виб}} = m / D$$

где D – коэффициент жесткости (Па·м³).

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

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 счет снижения жесткости гибкой мембраны приводит к одновременному повышению вибрационной чувствительности, а любые методы демпфирования приводят к снижению температурной чувствительности.

Существует простой способ практически полного устранения восприимчивости ОАП к акустическим и вибрационным шумам без применения каких-либо устройств виброзащиты, основанный на использовании малоинерционных гибких мембран на основе однослойного графена [6].

Инерция мембраны характеризуется массой единицы площади ρ (в кг/м²). 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 сравним инерционности классической биморфной мембраны, использованной NASA в туннельном ОАП Т. W. Kenny [7, 8], выполненной из классического материала микроэлектроники нитрида кремния толщиной 0,7 мкм с проводящим покрытием слоем золота толщиной 2000 Å на основе MEMS технологии и мембраны их однослойного графена.

$$\begin{aligned} n &= \frac{\rho_N \Delta_N + \rho_{\text{Au}} \Delta_{\text{Au}}}{\rho_G \Delta_G} = \\ &= \frac{3,17 \times 0,7 \times 10^{-4} + 19,32 \times 2 \times 10^{-5}}{3,17 \times 10^{-7}} = \\ &= \frac{6,083 \times 10^{-4}}{3,17 \times 10^{-7}} = 7900 \end{aligned}$$

где ρ_N – плотность нитрида кремния – 3,17 г/см³; ρ_{Au} – плотность золота – 19,32 г/см³; Δ_N – толщина слоя нитрида кремния – 0,7×10⁻⁴ см; Δ_{Au} – толщина слоя золота – 2×10⁻⁵ см, $\rho_G \Delta_G$ – поверхностная плотность графена – 0,77×10⁻⁷ г/см².

Таким образом, применение графеновой мембраны обеспечивает снижение восприимчивости ОАП к вибрационным шумам более чем на три порядка.

Так как вибрационные шумы в исследованных конструкциях ОАП являются доминирующими и значительно превышают фотонный шум, шум обусловленный термическими флюктуациями газа и шум детектора прогиба мембраны [8], отношение температурной чувствительности к вибрационной может быть принято как отношение «сигнал–шум». Чувствительность акустомеханического $S_{p-\delta}$ звена преобразования прямо пропорциональна четвертой степени радиуса мембраны, а вибрационная чувствительность квадрату радиуса, следовательно отношение «сигнал–шум» при попытках миниатюризации преобразователя ухудшается по квадратичному закону.

Заключение

Так как гибкая мембрана ОАП фактически объединяет в себе датчик давления и датчик линейных ускорений повышение чувствительности к изменениям давления в расширительной камере за счет снижения жесткости гибкой мембраны приводит к одновременному повышению акустической чувствительности, а любые методы демпфирования приводят к снижению температурной чувствительности. Предельным случаем снижения инерционной массы, а следовательно и вибрационной чувствительности является использование мембран изготовленных из однослойного графена. Такие мембраны обеспечивают снижение восприимчивости ОАП к

акустическим и вибрационным шумам более чем на три порядка без применения каких-либо устройств виброзащиты.

Исследование выполнено за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания № АААА-А17-117052410034-6 в ИАиЭ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кис Р. Дж., Краузе П. В., Патли Э. Г. и др. Фотоприемники видимого и ИК-диапазонов. – М.: Радио и связь, 1985.

2. Малышев В. И. Введение в экспериментальную спектроскопию. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979.

3. Иглакова А. Н., Ошлаков В. К., Селезнев Л. В., Тихомиров Б. А. // Оптика атмосферы и океана. 2015. № 4. С. 354.

4. Распопов В. Я. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007.

5. Скорина С. Ф., Гамов Ю. В. Наноэлектромеханический датчик ускорения. Патент РФ RU 2 391 673 C2 от 2008.

6. Гибин И. С., Котляр П. Е. // Прикладная физика. 2020. № 2. С. 90.

7. Kenny T. W. et al. UNCOOLED TUNNELING INFRARED SENSOR. Pat. US 5.298.748 C1. 1994.

8. Kenny T. W. et al. // Review of Scientific Instruments. 1996. Vol. 67. P. 112.

PACS: 85.30 Dw 84.40.Ba

Elimination of susceptibility to acoustic and vibration noise of optical-acoustic transducers

P. E. Kotlyar

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Science
1 Koptug Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

Received October 17, 2022

Optical-acoustic receivers (OAP) of radiation have an equivalent noise power (NEP) of 1.4×10^{-10} W/Hz^{1/2} in the spectral range of 0.3–10000 μ m. and do not require evacuation and thermal stabilization. The range of signals studied using the FDA covers both constant fluxes of IR and THz radiation with a power of up to 10^{-11} watts, temperature changes by 10^{-6} – 10^{-7} K, and femtosecond terawatt laser pulses. The main disadvantage of PDA is its hypersensitivity to vibrations. It is shown that a flexible membrane acting as a pressure sensor is also an accelerometer in which the force acting on the membrane is determined by its inertial mass. Since single-layer graphene is the lightest structural material with a surface density of 0.77×10^{-7} g/cm², the use of a flexible membrane made of single-layer graphene reduces the susceptibility of the PDA to acoustic and vibration noise by more than three orders of magnitude without the use of any vibration protection devices.

Keywords: optical-acoustic transducer, threshold sensitivity, acceleration, accelerometer, flexible membrane, single-layer graphene, inertial mass.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-51-55

REFERENCES

1. R. J. Kies, P. V. Krause, E. G. Patli et al. *Photodetectors of visible and IR ranges*. (Radio and Communications, Moscow, 1985).
2. V. I. Malyshev, *Introduction to experimental spectroscopy*. (Nauka, The main edition of the physical and mathematical literature, Moscow, 1979).
3. A. N. Iglakova, V. K. Oshlakov, L. V. Seleznev, and B. A. Tikhomirov, *Optics of the atmosphere and ocean*, No. 4, 354 (2015).
4. V. Yu. Raspopov, *Micromechanical devices*. (Mechanical Engineering, Moscow, 2007).
5. S. F. Skorina and Yu. V. Gamov, Nanoelectromechanical acceleration sensor. RF patent RU 2 391 673 C2 from 2008.
6. I. S. Gibin and P. E. Kotlyar, *Applied Physics*, No. 2, 90 (2020) [in Russian].
7. T. W. Kenny et al. UNCOOLED TUNNELING INFRARED SENSOR. Pat. US 5.298.748 C1. 1994.
8. T. W. Kenny et al., *Review of Scientific Instruments* **67**, 112 (1996).