

**Мембраны оптико-акустических приемников излучения***И. С. Гибин, П. Е. Котляр*

*Рассмотрено влияние параметров гибкой разделительной мембраны на порог чувствительности оптико-акустического приемника излучения ИК и ТГц диапазонов. Проведены обобщенные расчеты чувствительности мембран, выполненных на основе традиционных материалов: серебро, полиметилметакрилат, нитрид кремния. Анализируется перспективность применения однослойного графена, как наиболее перспективного материала для создания мембран. Показано, что графен является идеальным материалом для изготовления гибкой мембраны из-за его атомной толщины, высокой прочности, газонепроницаемости и высокой электропроводности. Представлены обобщенные расчеты чувствительности мембран из классического графена и его аллотропных модификаций. Показано, что повышение чувствительности при изготовлении мембран из классического графена составляет порядка 9 000, а из гексагриграфена порядка 300 000 по сравнению с наиболее чувствительными мембранами из полиметилметакрилата. Показано, что высокая прозрачность и высокая электропроводность графена являются решающими для выбора схемы приемник Хейса с динамическим конденсатором.*

*Ключевые слова:* мембрана, чувствительность, однослойный графен, упругие характеристики, оптические свойства.

**Ссылка:** Гибин И. С., Котляр П. Е. // Прикладная физика. 2020. № 2. С. 90.

**Reference:** I. S. Gibin and P. E. Kotlyar, Applied Physics, No. 2, 90 (2020).

**Введение**

В основе оптико-акустического приемника (синоним пневматического приемника и ячейки Голея) инфракрасного излучения лежит эффект, обнаруженный в 1880 г. А. Беллом [1] и исследованный Тиндалем, назвавшим эксперименты А. Белла «гениальными и оригинальными» [2], и Рентгеном [3]. Этот эффект проявляется в виде пульсаций давления газа в замкнутом объеме при поглощении модулированного на звуковой частоте излучения. Возникновение этого эффекта связано с

преобразованием части энергии возбужденных излучением молекул в тепловую энергию среды за счет безизлучательных переходов. Частота колебаний зависит от частоты модуляции потока, а интенсивность колебаний – от способности данного газа поглощать инфракрасную радиацию и от интенсивности радиации.

В 1946 г. А. Гершбергер (США) [4] наблюдал оптико-акустический эффект в сантиметровом диапазоне длин волн.

Преимущества оптико-акустических приемников, в основе которых лежит эффект Белла-Тинделя: постоянная и высокая чувствительность ( $1 \times 10^5$  В/Вт) в широкой области спектра (5–1000 мкм) и возможность работы при комнатной температуре. К недостаткам относятся относительно большая постоянная времени (0,6 мс – для ячеек с гелиевым наполнением и 10–20 мс для ксеноновых), чувствительность к механическим вибрациям и относительно большие значения эквивалентной

**Гибин Игорь Сергеевич**, гл.н.с., д.т.н., профессор.

**Котляр Петр Ефимович**, гл. спец., д.г.-м.н., профессор.

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН.  
Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика  
Коптюга, 1.

E-mail: gibin@iae.nsk.su; 21031940@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12 апреля 2020 г.

мощности шума (NEP)  $1,4 \times 10^{-10}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> по сравнению с охлаждаемыми тепловыми приемниками.

### Виды оптико-акустических приемников

Классификационно, в зависимости от технической реализации системы отсчета прогиба гибкой разделительной мембраны в настоящее время можно выделить два типа приемников – приемник Хейса с динамическим микрофоном и приемник Голея с оптической системой считывания [5].

В 1936 г. Хейс [6] сообщил о ряде принципиальных усовершенствований классического газового термометра. Он поместил внутрь расширительной камеры специальный элемент, поглощающий исследуемое излучение, представляющий собой мелкодисперсную форму древесного угля – «fluff», и тонкую металлическую разделительную мембрану, образующую часть динамического конденсатора для отсчетной системы. Мембрана была изготовлена из дюралюминия толщиной 25,4 мкм и выполняла роль подвижной пластины. Введение в компенсационную камеру дополнительного плоского электрода, расположенного напротив колеблющейся мембраны, позволяло свести измерение деформации к измерению электрической емкости. Конструкция приемника Хейса представлена на рис. 1, а на рис. 2 современный аналог конструкции Хейса, отличающийся лишь применением пленочного поглощающего элемента.

В 1938 г. была опубликована работа М. Л. Вейнгерова [8], в которой сообщалось о создании селективного газового приемника. В нем излучение поглощает заполняющий расширительную камеру газ, содержащий в молекуле два и более различных атома, например, окись углерода CO, двуокись углерода CO<sub>2</sub>, метан CH<sub>4</sub>. Как следствие, спектральная чувствительность такого устройства определяется спектром поглощения заполняющего камеру газа. Отсчетная система в устройстве М. Л. Вейнгерова на основе динамического конденсатора повторяла устройство Хейса. В зарубежной литературе приемники такого типа носят название приемников Паттерсона-Мосса [7]. Работы Вейнгерова положили начало широкому применению оптико-акустических приемников с динамическим конденсатором в газовой спектроскопии.

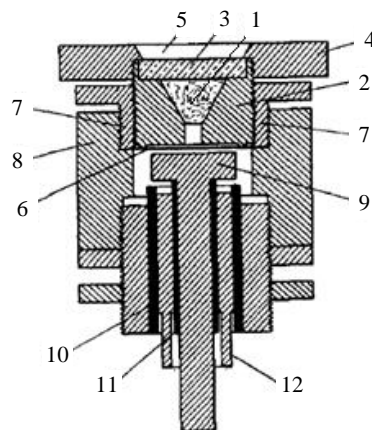


Рис. 1. Оптико-акустический приемник Хейса 1936 г по [6]: 1 – мелкодисперсный поглотитель; 2 – блок расширительной камеры; 3 – входное окно; 4 – удерживающий фланец; 5 – входная апертура; 6 – гибкая металлическая мембрана; 7 – кольцевая оправка гибкой мембраны; 8 – металлический корпус; 9 – плоский металлический электрод.

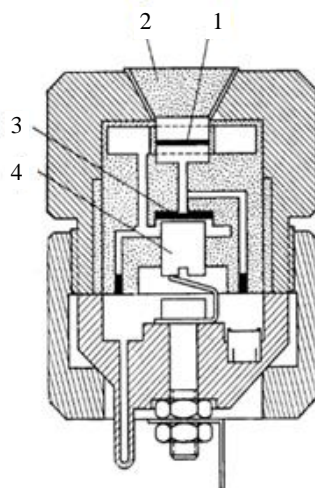


Рис. 2. Современный оптико-акустический приемник ONERA (Office National d'Etudes et de Recherches Aerospatiales) по [7]: 1 – входное окно; 2 – мембрана поглотитель; 3 – гибкая металлическая мембрана; 4 – плоский металлический электрод.

Разработчик радарных систем Марсель Голей (США) усовершенствовал приемник Хейса и использовал его для идентификации инфракрасных выбросов самолетов [9–11]. Он заменил расположенный в расширительной камере поглощающий элемент, занимавший большую часть полости, поглощающей мембраной, представляющей собой тонкий слой золотой черни на полупроницаемой подложке из коллодия. Этим обеспечивалась малая теплоемкость поглотителя и тепловая развязка от стенок расширительной камеры. Сама камера заполнялась ксеноном, обладающим низкой теплоемкостью и высокой теплопроводностью. Голей также применил серебряное покрытие гибкой мембраны для оптического считывания и впервые использовал интерфе-

рометрические методы измерения деформации для измерения инфракрасного излучения.

Теории оптико-акустических приемников был посвящен ряд работ [12–18], в которых в основном рассматривались теплофизические процессы возбуждения звуковых колебаний под действием прерывистого потока радиации (геометрия камер, конструкция поглощающего элемента) и только в немногих – пороговая чувствительность, определяемая конструкцией гибкой мембраны и способом считывания ее прогиба. В работе Н. А. Панкратова и Л. М. Виноградовой «Селективные оптико-акустические приемники радиации с оптическим, электродинамическим и конденсаторным микрофоном» [17] сделан вывод о том, что «приемник с конденсаторным микрофоном при соблюдении оптимальных условий имеет ту же пороговую чувствительность, какую имеют приемники с оптическим и электродинамическим микрофонами», а в работе [7] указывается, что «приемник ONERA (с динамическим микрофоном) обладает наивысшей обнаружительной способностью (несколько выше, чем у приемников Голея), очень близкой к характеристикам идеальных тепловых приемников».

### Параметры, характеризующие гибкую мембрану

Мембраной называется тонкая, равномерно растянутая пленка, обладающая распределенной инерцией и упругостью [19, 20].

Гибкая мембрана характеризуется:

1. инерцией – массой единицы площади  $\rho$  (в кг/м<sup>2</sup>);
2. упругостью – силой натяжения  $\tau$  (в Н·м);
3. коэффициентом жесткости  $D$  (Па·м<sup>3</sup>)

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

$$D = D_m \times D_r = \frac{E}{12(1-\sigma^2)} \times h^3$$

где  $E$ ,  $\sigma$  – модуль упругости в Паскалях и коэффициент Пуассона материала мембраны соответственно;  $h$  – толщина мембраны.

4. чувствительностью  $\gamma$  (м/Па)

$$\gamma = \frac{3(1-\sigma^2)R^4}{16Eh^3} \quad (2)$$

$$\gamma = \gamma_m \times \gamma_r = \frac{3(1-\sigma^2)R^4}{16E} \times \frac{R^4}{h^3}$$

$R$  – рабочий радиус мембраны (по контуру закрепления);

5. резонансной частотой (1/с)

$$f_o = \frac{\alpha}{4\pi} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} \left( \frac{h}{R^2} \right) \quad (3)$$

$$f_o = f_{om} \times f_{or} = \frac{\alpha}{4\pi} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} \times \left( \frac{h}{R^2} \right)$$

где  $\alpha$  – мода колебаний;  $\rho$  – плотность материала мембраны.

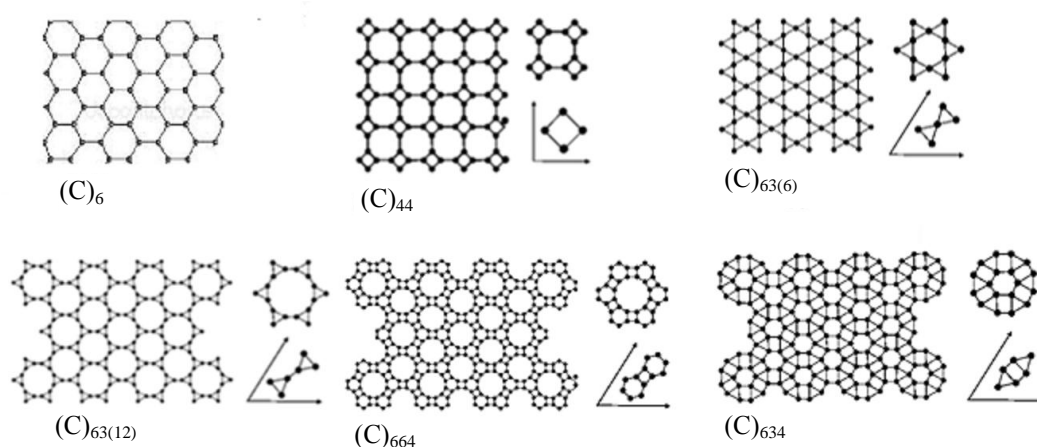
Выражения жесткости, чувствительности и резонансной частоты целесообразно представить в виде двух сомножителей. Сомножитель с подстрочным индексом (<sub>м</sub>) характеризует физические свойства материала мембраны, а сомножитель с подстрочным индексом (<sub>г</sub>) – геометрические параметры мембраны.

### Физические свойства графена

Графен, толщина одного слоя которого составляет 0,355 нм, является самым тонким из известных пленочных материалов. Помимо предельно достижимой атомарной толщины графен имеет ряд предельно высоких значений физических констант. Графен имеет высокую механическую прочность: она соответствует так называемой «теоретической прочности бездефектного твердого тела» и в настоящее время является рекордной (модуль Юнга  $E$  – порядка 1 ТПа). В своем бездефектном виде графен демонстрирует рекордную прочность на растяжение ( $\approx 130$  ГПа) и превосходные упругие свойства (максимальная степень упругой деформации составляет  $\approx 25\%$ ). Поверхностная плотность графена (0,77 мг/м<sup>2</sup>). Помимо указанного, графен обладает высокой электропроводностью, непроницаемостью для

газов (в том числе и гелия), практически полной прозрачностью ( $T \approx 98\%$ ) и химической инертностью [21–23]. Перечисленные параметры свидетельствуют о том, что **графен является идеальным материалом для изготовления гибкой мембраны** из-за его высокой прочности, его атомной толщины и высокой электропроводности. Низкая жесткость на изгиб имеет решающее значение для чувствительности к отклонению в ответ на изменения температуры газа, заключенного в расширительной камере устройства, а высокая электропроводность мембраны упрощает конструкцию динамического конденсатора.

В настоящее время помимо классического графена  $(C)_6$  получены и исследованы его аллотропные формы [24]:  $(C)_{44}$  – октатетраграфен (октаграфен),  $(C)_{63(6)}$  – гексатриграфен,  $(C)_{63(12)}$  – додекатриграфен,  $(C)_{664}$  – додекагексатетраграфен и  $(C)_{634}$  – гексатетратриграфен, упругие константы которых существенно различаются. На рис. 3 представлена кристаллическая структура аллотропных форм графена, а в табл. 1 их упругие характеристики (строки 1 и 2) и результаты расчетов составляющей чувствительности однослойных графеновых мембран (строки 3, 4 и 5), обусловленные значениями модуля Юнга  $E_2$  и коэффициента Пуассона.



**Рис. 3.** Кристаллическая структура (слева), супрячейка (вверху справа) и элементарная ячейка (внизу справа) графенов:  $(C)_6$  – графен,  $(C)_{44}$  – октатетраграфен (октаграфен),  $(C)_{63(6)}$  – гексатриграфен,  $(C)_{63(12)}$  – додекатриграфен,  $(C)_{664}$  – додекагексатетраграфен,  $(C)_{634}$  – гексатетратриграфен по [25].

**Таблица 1**

**Результаты расчетов  $\gamma_m$  – составляющей чувствительности однослойных графеновых мембран (строки 3, 4 и 5), обусловленные значениями модуля Юнга  $E_2$  и коэффициента Пуассона**

Параметр	$(C)_6$	$(C)_{44}$	$(C)_{44}$	$(C)_{63(6)}$	$(C)_{63(12)}$	$(C)_{664}$	$(C)_{634}$
$E_2$ (ГПа)	921	527	177	17	131	620	18
$[\sigma]$	0,17	0,66	0,88	0,63	0,62	0,63	0,62
$1 - \sigma^2$	0,9711	0,5644	0,2256	0,6031	0,6156	0,6031	0,6156
$3(1 - \sigma^2)/16E \cdot 10^{-13}$	1,977	2,008	2,358	66,5	8,811	1,82	64,125

Множитель  $10^{-13}$  в последней строке столбца «Параметр» обусловлен тем, что значение модуля Юнга  $E_2$  подставляется в выражение  $\gamma_m$  (2) в Паскалях. Как следует из расчетов чувствительность однослойных мембран, изготовленных из гексатриграфена  $(C)_{63(6)}$  выше аналогичных, изготовленных из классического графена  $(C)_6$  в 33,6 раза, что обуслов-

лено значительно более высоким значением модулем Юнга  $E_2$  графена  $(C)_6$ .

В табл. 2 представлены результаты расчетов составляющей чувствительности, обусловленные значениями модуля Юнга  $E_2$  и коэффициента Пуассона однослойных мембран, изготовленных из классического графена  $(C)_6$ , гексатриграфена  $(C)_{63(6)}$ , серебра, полиметилметакрилата и нитрида кремния.

Таблица 2

**Сравнительный анализ чувствительности мембран, изготовленных из различных материалов и, их конструктивная толщина**

Параметр	Графен (C) <sub>6</sub>	Графен (C) <sub>63(6)</sub>	Серебро	Полиметилметакрилат ПММА	Нитрид кремния
E <sub>2</sub> (ГПа)	921	17	80	7,5	270
[σ]	0,17	0,63	0,37	0,35	0,27
1 – σ <sup>2</sup>	0,9711	0,6031	0,8631	0,8775	0,9271
3(1 – σ <sup>2</sup> )/16E 10 <sup>-13</sup>	1,977	66,5	20,2	219,4	6,44
h <sub>min</sub> (нм)	0,355	0,355	10–20	40–100	10–20

Результаты расчетов показывают, что составляющая чувствительности  $\gamma_m$  для всех классических мембран, изготовленных из серебра, полиметилметакрилата и нитрида кремния, превышает чувствительности мембран, изготовленных из графена (C)<sub>6</sub> (см. строку 4). Так отношение чувствительностей  $\gamma_m$  полиметилметакрилата и гекса триграфена (C)<sub>63(6)</sub> составляет  $219,4/66,5 = 3,3$  раза, а полиметилметакрилата и графена (C)<sub>6</sub> составляет  $219,4/1,977 = 110,97$  раз. Однако, если учесть геометрическую составляющую чувствительности и принять отношение толщин мембран из полиметилметакрилата и графена равным 100 ( $40/0,355 = 112$ ) и учесть, что толщина мембраны входит в выражение чувствительности (2) как  $1/h^3$ , то **сравнительное повышение чувствительности для графена (C)<sub>6</sub> составит порядка 9 000, а для гекса триграфена (C)<sub>63(6)</sub> порядка 300 000.**

### Хейс или Голей?

Гибкие разделительные мембраны, как для приемников Хейса, так и для приемников Голея, должны быть газонепроницаемыми и обладать высокой разрывной прочностью и низкой изгибной жесткостью. Принципиальное различие в конструкциях мембран состоит в том, что для приемников Хейса мембраны должны обладать металлической проводимостью и иметь электрический вывод, а мембраны приемников Голея должны иметь отражающее покрытие. Эволюция конструкций мембран проходила в направлении последовательного перехода от металлических мембран из дюралюминия, серебра, никеля, легированных титановых сплавов ВТ16 или ВТ35 тол-

щиной 0,1–0,15 мм к полимерным мембранам (полиметилметакрилат ПММА) [26] толщиной несколько десятков нм, покрытых отражающим слоем серебра или сурьмы толщиной порядка 100А и широко применяемым в микроэлектронике тонким пленкам нитрида кремния.

В последнее время появился ряд публикаций [27–29], в которых сообщается о перспективах использования однослойного графена в оптико-акустических приемниках Голея.

Выбор конструктивной схемы оптико-акустического приемника определяется оптическими свойствами и электропроводностью графена. Классический графен (C)<sub>6</sub> прозрачен во всем диапазоне длин волн видимого света и ближней части ИК-излучения, имея показатель преломления, изменяющийся в интервале от 1,6 (при  $\lambda = 405$  нм) до 2,5 (при  $\lambda = 1060$  нм). Высшие графены имеют узкие зоны непрозрачности в оптическом диапазоне. При поглощении света графеном доминируют различные механизмы в зависимости от длины волны, как показано на рис. 4 и 5. В видимом, ближнем и частично в среднем ИК-диапазонах преобладают межзонные переходы, что приводит к независимому от длины волны оптическому поглощению, равному 2,3 % (для однослойного графена) (зона 1 рис. 5). На средних инфракрасных частотах наблюдается минимальное поглощение из-за запрета Паули (зона 2 рис. 5). В дальнем инфракрасном и в ТГц диапазонах имеется характерная особенность пропускания (пик Друде на терагерцевых частотах) (зона 3 рис. 5), обусловленная преобладанием внутризонных переходов.

Классический графен (C)<sub>6</sub> считается наиболее электропроводящим из известных материалов. Однако, в последние годы получены результаты, показывающие, что коэф-

коэффициент электропроводности высших графенов может в разы превышать коэффициент электропроводности классического графена.

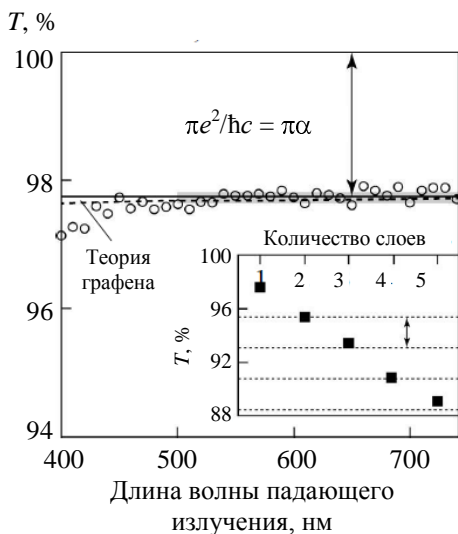


Рис. 4. Спектр пропускания графена, (теоретические расчеты и экспериментальные данные) по [30].

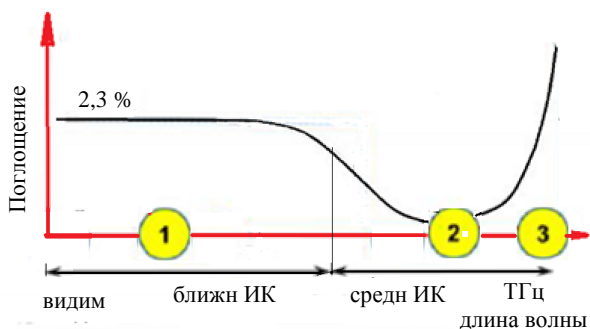


Рис. 5. Типичный спектр поглощения однослойного графена по [31] с изменениями.

Высокая прозрачность графена делает нерациональным его использование в конструктивных схемах оптико-акустических приемников с оптическим считыванием (ячейка Голея). Нанесение на графеновую мембрану высокоотражающего слоя (толщина которого значительно превышает толщину однослойного графенового листа) практически делает ее неконкурентной по сравнению с конструкциями с динамическим конденсатором (схема Хейса см. рис. 1, 2).

Чувствительность оптико-акустического приемного устройства существенно зависит от частоты модуляции потока входного излучения (частотная чувствительность) и имеет явно выраженный максимум. На низких частотах

спад чувствительности объясняется постоянной времени уравнительного капиллярного канала. На высоких частотах спад чувствительности обусловлен инерционностью гибкой мембраны, которая характеризуется массой единицы площади  $\rho$  (в  $\text{кг}/\text{м}^2$ ). Так как поверхностная плотность однослойного графена имеет рекордно малое значение  $0,77 \text{ мг}/\text{м}^2$  в схеме Хейса одновременно с достижением теоретически предельной чувствительности достигается и предельно низкая инерционность мембраны.

### Заключение

В высокочувствительных оптико-акустических приемниках заинтересован целый ряд областей: от классической оптической спектроскопии до исследований в бурно развивающемся ТГц диапазоне. Использование классических конструктивных схем и материалов позволило создать устройства с характеристиками, весьма приближенными к характеристикам идеальных тепловых приемников [5]. Однако, между идеальной и достигнутой характеристиками все еще лежит порядок, который не удавалось преодолеть последние 30–50 лет. Появление графена с его уникальными физическими характеристиками, максимально соответствующими требованиям к материалу основного критического компонента оптико-акустических приемников – гибкой разделительной мембраны – открывает принципиально новый этап в конкуренции тепловых и фотонных устройств.

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

### ЛИТЕРАТУРА

1. Bell A. G. // Journal of the Society of Telegraph Engineers. December 8, 1880.
2. Tyndall J. // Proc. Roy. Soc. London. 1881. Vol. 11. P. 307.
3. Roentgen W. C. // Phil. Mag. Ser. 5, 1881. Vol. 11. № 68. P. 308.
4. Hershberger W. D. // Phys. Rev. 1946. Vol. 69 (A). P. 695.



5. Гибин И. С., Котляр П. Е. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 2. С. 117.
6. Hayes H. V. // Review of Scientific Instruments. 1936. Vol. 7. P. 202.
7. Шоль Ж., Марфан И., Мюниш М. и др. Приемники инфракрасного излучения. – М.: Мир, 1969.
8. Вейнгер М. Л. // Доклады АН СССР. 1938. Т. 19. № 9. С. 687.
9. Golay M. J. E. // Rev. Sci. Instrum. 1947. Vol. 18. P. 357.
10. Golay M. J. E. // Rev. Sci. Instrum. 1949. Vol. 20. P. 816.
11. Zahl H., Golay M. // Review of Scientific Instruments 17, 511 (1946);
12. Бреслер П. И. Элементы теории и расчета оптико-акустических газоанализаторов на основе некоторых закономерностей поглощения инфракрасной радиации газами. В кн. Автоматические газоанализаторы. – М.: Изд. ЦИНТИ Электропром, 1961.
13. Бункин Ф. В. Комиссаров В. М. // Акуст. ж. 1973. Т. 19. № 3. С. 305.
14. Ляшнев Л. М., Наугольных К. А. // Акуст. ж. 1976. Т. 22. № 4. С. 625.
15. Панкратов Н. А. // Оптико-механическая промышленность. 1957. № 2. С. 37.
16. Панкратов Н. А. // Оптика и спектроскопия. 1957. Вып. 5.
17. Панкратов Н. А., Виноградова Л. М. Селективные оптико-акустические приемники радиации с оптическим, электродинамическим и конденсаторным микрофоном: В сб. "Автоматические газоанализаторы. Серия ТС-9". – М.: Изд. ЦИНТИ Электропром, 1961.
18. Салль А. О. // Оптика и спектроскопия. Часть 1. 1959, 6, 2. Часть 2. 1959, 6, 4.
19. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов. – М.: Машиностроение, 1981.
20. Водяник В. И. Эластичные мембраны. – М.: Машиностроение, 1974.
21. Браже П. А. Графены и их физические свойства. – Ульяновск: УлГТУ, 2016.
22. Bunch J. S. et al. // Science. 2007. Vol. 315. P. 490. doi:10.1126/science.1136836.
23. Lee C., Wei X., Kysar J. W., Hone J. // Science. 2008. Vol. 321. P. 385–8.
24. Браже П. А., Кочаев А. И., Мефтахутдинов Р. М. // Инжиниринг и технологии. 2016. Т. 1 (1). С. 1.
25. Браже П. А. и др. // Физика твердого тела. 2011. № 7. С. 1406.
26. Hasikin K., N. Soim N., F. Ibrahim F. // ICSE Proc. 2010. Malacca, Malaysia. P. 293.
27. Ali A., Khan A., Karimov Kh. Research Article | Open Access Volume 2018 | Article 9592610 | 12 pages | <https://doi.org/10.1155/2018/9592610>
28. Fan K., Suen J. Y., Padilla W. J. // OPTICS EXPRESS. 16 Oct 2017. Vol. 25. № 21.
29. Ledwosinska E. others. Article in materials SPIE – International Society of Optical Engineering 8624, March 2013.
30. Low T., Avouris P. // ACS nano. 2014. Vol. 8. № 2. P. 1086.
31. Образцова Е. Д., Рыбин М. Г., Образцов П. А. Оптические свойства графена // Углеродная фотоника. – М.: 2017. С. 261–293.

PACS: 85.30 Dw 84.40.Ba

## Membranes of optical-acoustic radiation receivers

*I. S. Gibin and P. E. Kotlar*

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch  
of the Russian Academy of Science  
1 Koptug Ave., Novosibirsk, 630090, Russia  
E-mail: gibin@iae.nsk.su, 21031940@mail.ru

*Received April 12, 2020*

***The article looks into the influence of flexible separatory membrane parameters on the sensitivity threshold of optical-acoustic radiation receiver of IR and THz ranges. Generalised calculations of membrane sensitivity, made on the basis of traditional materials: silver, polymethyl methacrylate, silicon nitride, have been fulfilled. The article analyses prospects of the use of single-layer graphene as the most advanced material for membranes making. It is shown that graphene is the ideal material for making a flexible membrane because of its atomic thickness, high durability, gas impermeability and high conductivity. The article represents generalized calculations of sensitivity if membranes made of classical graphene and its allotropic modifications. It is shown that comparative raise of sensitivity while making the membranes of classical graphene is about 9000, whereas making the membranes of hexatrigraphene is about 300000***

***compared to the most sensitive membranes made of polymethyl methacrylate. It is shown that high clarity and high conductivity of graphene are determining in choosing the scheme of Hayes receiver with a dynamic condenser.***

**Keywords:** membrane, sensitivity, single layer graphene, elastic constant, optical properties.

## REFERENCES

1. A. G. Bell, Journal of the Society of Telegraph Engineers, December 8 (1880).
2. J. Tyndall, Proc. Roy. Soc. London **31**, 307 (1881).
3. W. C. Roentgen, Phil. Mag. Ser. 5, **11** (68), 308 (1881).
4. W. D. Hersberger, Phys. Rev. **69**, 695 (A) (1946).
5. I. S. Gibin and P. E. Kotlar, Applied optics successes **6** (2), 117 (2018).
6. H. V. Hayes, Review of Scientific Instruments **7**, 202 (1936).
7. J. Schol, I. Marphan, M. Munsch and Co. *Infrared radiation receivers* (Mir, Moscow, 1969) [in Russian].
8. M. L. Veingerov, Reports of the Academy of Sciences of the USSR **19** (9), 687 (1938).
9. M. J. E. Golay, Rev. Sci. Instrum. **18**, 357 (1947).
10. M. J. E. Golay, Rev. Sci. Instrum. **20**, 816 (1949).
11. H. Zahl and M. Golay, Review of Scientific Instruments **17**, 511 (1946).
12. P. I. Bresler, *Elements of theory and calculations of optical – acoustic gas-analyser on the basis of some objective laws of infrared radiation absorption by gases Book. Automatic gas analyzers*. (Electroprom, Moscow, 1961) [in Russian].
13. F. V. Bounkit and V. M. Komissarov, Acoust. mag. **19** (3), 305 (1973).
14. L. M. Lamishev and K. A. Naugolnykh, Acoust. mag. **22** (4), 625 (1976).
15. N. A. Pankratov, Optical-mechanical industry, № 2, 37 (1957).
16. N. A. Pankratov, Optics and spectroscopy, № 5 (1957).
17. N. A. Pankratov and L. M. Vinogradova, *Selective optical-acoustic radiation receivers with optical, electrodynamic and condensing microphone. Alb. "Automatic gas analyzers / ser. TC-9" Central Institution of scientific-technical information of electrotechnical industry and instrumentation*. (Moscow, Izd. CINTI Elektroprom, 1961) [in Russian].
18. A. O. Sall, part 1. Optics and spectroscopy, 6, 2 (1959); part 2. Optics and spectroscopy 6, 4 (1959).
19. L. E. Andreeva, *Elastic elements of devices* (Engineering, Moscow, 1981) [in Russian].
20. V. I. Vodyanik, *Elastic membranes* (Engineering, Moscow, 1974) [in Russian].
21. R. A. Brage, *Graphenes and their physical properties* (UISTU, Ulianovsk, 2016).
22. J. S. Bunch et al., Science **315**, 490 (2007) doi:10.1126/science.1136836.
23. C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar, and J. Hone, Science **321**, 385–8 (2008).
24. R. A. Brage, A. I. Kochaev, and R. M. Meftakhutdinov, Engineering and Technologies **1** (1), 1 (2016).
25. R. A. Brage and Co., Physics of solid body, № 7, 1406 (2011).
26. K. Hasikin, N. Soin, and F. Ibrahim, ICSE Proc. 2010, Malacca, Malaysia P. 293.
27. A. Ali, A. Khan, and Kh. Karimov, Research Article | Open Access Volume 2018 | Article 9592610 | 12 pages | <https://doi.org/10.1155/2018/9592610>
28. K. Fan, J. Y. Suen, and W. J. Padilla, OPTICS EXPRESS **25** (21), (16 Oct 2017).
29. E. Ledwosinska and others, Article in materials SPIE – International Society of Optical Engineering 8624, (March 2013).
30. T. Low and P. Avouris, ACS nano **8** (2), 1086 (2014).
31. E. D. Obraztsova, M. G. Rybin, and P. A. Obraztsov, *Optical properties of graphene. Carbonic photonics* (M., Moscow, 2017) [in Russian].