

УДК 621.396, 538.9, 681.7

ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЕ ПРИЁМНИКИ ИК- И ТГЦ-ИЗЛУЧЕНИЯ С НАНООПТОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ ОДНОСЛОЙНОГО ГРАФЕНА

© И. С. Гибин, П. Е. Котляр

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

Приведён аналитический обзор оптико-акустических приёмников (ОАП), основанных на ячейках Голя, применительно к использованию в инфракрасном (ИК) и терагерцовом (ТГц) диапазонах излучения. Представлена история появления и развития ОАП с первых работ Белла, Хейса, Голя и до настоящего времени. Отмечены преимущества ОАП, заключающиеся в постоянной и высокой чувствительности в широкой области спектра и наивысшей среди тепловых приёмников обнаружительной способности. Рассмотрены основные характеристики мембран — главных элементов ОАП, проанализированы физические свойства графена как наиболее предпочтительного материала для мембран. Предложены три конструктивные группы ОАП: одиночные ячейки с оптическим считыванием информации и конденсаторным микрофоном, селективные приёмники с газовым наполнением камер и матричные приёмники. Даны оценки, показывающие, что применение мембран из SLG-графенов позволяет создать приёмники ИК- и ТГц-излучения с ячейками порядка десятков микрон с предельно высокой чувствительностью. Предложена новая конструктивная схема матричных терагерцовых оптико-акустических приёмников с применением мембран из гексагтриграфена (C)₆₃₍₆₎, обладающих рекордными характеристиками.

Ключевые слова: терагерцовые приёмники, графеновые мембраны, ячейки Голя, чувствительные к ТГц-излучениям.

DOI: 10.15372/AUT20210107

Введение. В основе оптико-акустического приёмника (ОАП) — эквивалента пневматического приёмника и ячейки Голя — 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 объёме при поглощении модулированного на звуковой частоте излучения. 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 данного газа поглощать инфракрасную радиацию и от интенсивности радиации.

В 1597 г. Г. Галилей изобрёл первый прибор для наблюдения за изменением температуры — термоскоп. Галилеевский термометр состоял из открытой стеклянной трубки с припаянным шариком. В вертикальную трубку вводили каплю воды, которая, поднимаясь и опускаясь, указывала на увеличение или уменьшение тепла [4]. Французский учёный Ж. Шарль в 1787 г. экспериментально нашёл зависимость давления газа от температуры при постоянном объёме.

В настоящее время газовым термометром измеряют температуры от 2 до 1300 К с предельно достижимой точностью 0,002–0,03 К. Газовый термометр применяется в качестве

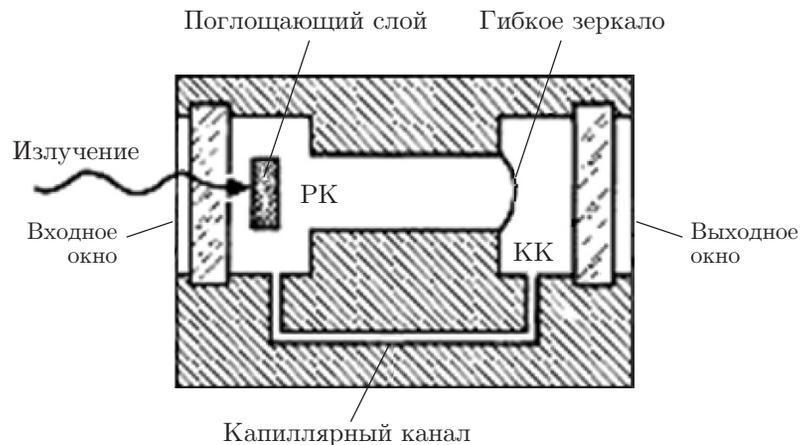


Рис. 1. Схема пневматического приёмника ИК-излучения

первичного термометрического прибора, с помощью которого определяются температуры реперных точек по Международной практической температурной шкале.

Эволюция от газового термометра к пневматическому приёмнику инфракрасного излучения, получившему название ячейки Голея, проходила по двум направлениям. Первое направление — оптимизация теплофизических процессов в расширительной камере, второе — оптимизация процессов считывания информации применительно к конкретным задачам.

Современный пневматический приёмник (рис. 1) состоит из термпневматического актюатора — наполненной газом камеры, содержащей тонкую плёнку, поверхность которой покрыта слоем вещества, сильно поглощающего принимаемое излучение. Один из торцов расширительной камеры (РК) герметически закрыт пластиной из прозрачного для инфракрасного излучения материала (входное окно), второй — тонкой подвижной и упругой мембраной, на внешнюю (по отношению к газовой камере) поверхность которой нанесено металлическое зеркальное покрытие. Поступающее в камеру излучение поглощается внутренней металлической пластиной и нагревает газ, который, расширяясь, изгибает зеркальную мембрану. Для того чтобы приёмник не был подвержен изменениям внешних давления и температуры, газовая камера дополнена компенсационной камерой (КК), расположенной между зеркальной мембраной, выходным окном и капиллярным каналом, с помощью которого уравнивается давление по обе стороны разделительной мембраны.

Преимущества оптико-акустических приёмников: постоянная и высокая чувствительность ($1 \cdot 10^5$ В/Вт) в широкой области спектра (5–1000 мкм), наивысшая среди тепловых приёмников обнаружительная способность, близкая к характеристикам идеальных тепловых приёмников, и возможность работы при комнатной температуре [5] (рис. 2). 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 мощности шума $1,4 \cdot 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2} по сравнению с охлаждаемыми тепловыми приёмниками.

Теоретические аспекты проблемы повышения чувствительности ОАП. Теории оптико-акустических приёмников посвящён ряд работ [6, 7], в которых в основном рассматриваются теплофизические процессы возбуждения звуковых колебаний под действием прерывистого потока радиации (геометрия камер, конструкция поглощающего элемента). В [7] выполнен вывод выражения пороговой чувствительности ОАП при отсутствии дробового шума, учитывающий геометрические параметры конструкции и теплофизические

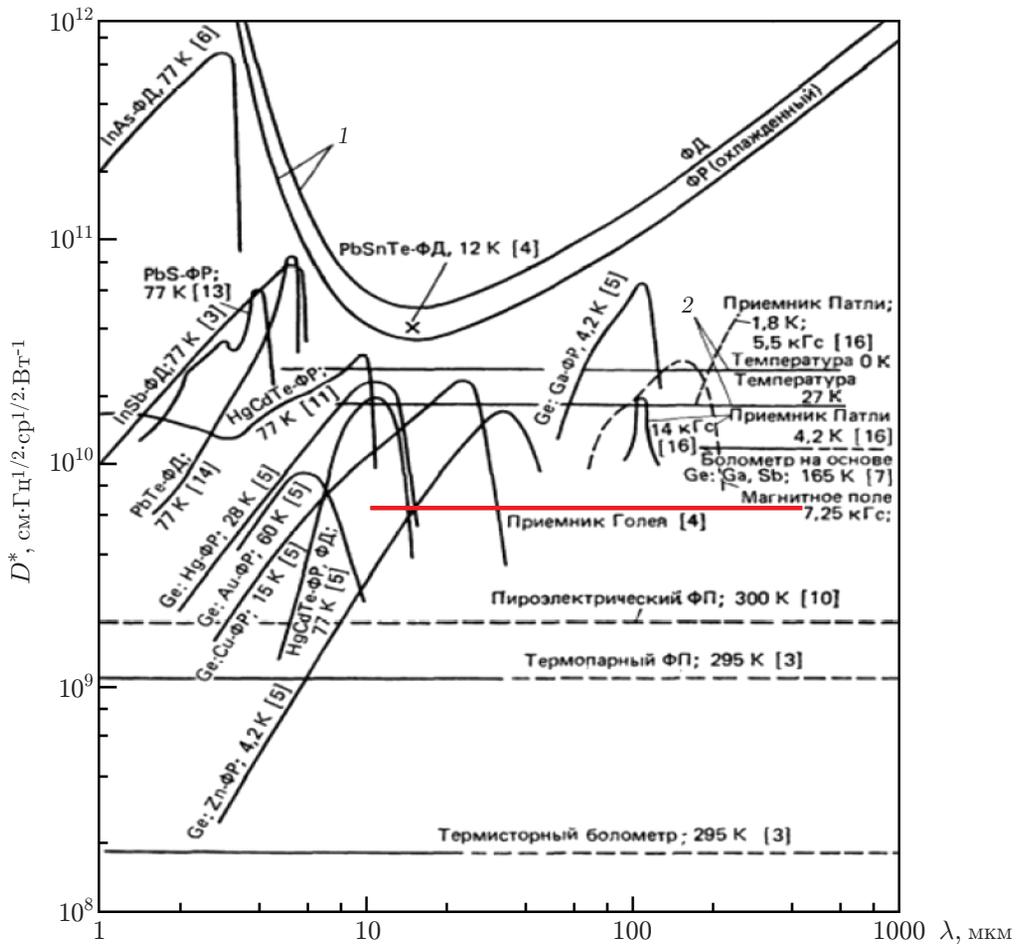


Рис. 2. Удельная обнаружительная способность фотоприёмников D^* в интервале 1–1000 мкм [5]

параметры её элементов:

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

где выражение под корнем характеризует интенсивность тепловых флуктуаций газа в РК 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 РК; 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. Казалось бы, что преобразование в цепочке «излучение — температура — давление» весьма благоприятно для миниатюризации преобразователей и создания на их основе низкороговых неохлаждаемых матричных приёмников излучения. Однако ситуация осложняется и делает это практически невозможным за счёт преобразования в системе регистрации сигнала.

Существует принципиальное ограничение, которое практически исключает построение низкороговых матриц большой размерности. Известно, что величина прогиба δ цен-

тра плоской мембраны, закреплённой по контуру, при малых перемещениях под действием давления P вычисляется по формуле

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

где R — рабочий радиус мембраны (по контуру закрепления); h — толщина мембраны; E , μ — модуль упругости (кГ/см^2) и коэффициент Пуассона материала мембраны соответственно [8]. Из выражения (2) путём дифференцирования прогиба по давлению можно получить выражение чувствительности, из которого следует, что уменьшение диаметра гибкой мембраны сопровождается её катастрофическим падением.

Следовательно, создание низкопороговых неохлаждаемых матричных приёмников излучения, обладающих пороговыми значениями чувствительности, достигнутыми серийно выпускаемыми современными голеевскими приёмниками с большой апертурой (3–10 мм), требует принципиально нового подхода.

Этот подход базируется на использовании уникальных физических характеристик однослойного графена (SLG) и его аллотропных модификаций при конструировании гибких мембран оптико-акустических преобразователей. Выбор однослойного графена обусловлен в первую очередь тем, что он является самым тонким из известных плёночных материалов. Ввиду того что графен обладает практически полной прозрачностью ($T \approx 98\%$), возникает вопрос о выборе оптимальной схемы считывания информации о прогибе графеновой мембраны. Для реализации оптической схемы считывания (схема Голея) на мембрану должен наноситься отражающий слой серебра или сурьмы толщиной порядка 100 \AA , что исключает достижения предельных характеристик ОАП. В то же время использование принципа динамического конденсатора (схема Хейса) [9] с учётом высокой проводимости графена позволяет значительно упростить конструкцию системы считывания и обеспечивает достижение теоретически предельных характеристик ОАП.

В [10] сделан 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». В [11] указывается, что «приёмник ONERA (с динамическим микрофоном) обладает наивысшей обнаружительной способностью (несколько выше, чем у приёмников Голея), очень близкой к характеристикам идеальных тепловых приёмников».

Параметры, характеризующие гибкую мембрану. Гибкой мембраной называется тонкая, равномерно растянутая плёнка, у которой толщина много меньше диаметра ($h \ll 2R$), обладающая распределённой инерцией и упругостью [8].

Гибкая мембрана характеризуется:

- 1) инерцией — массой единицы площади ρ (кг/м^2);
- 2) упругостью — силой натяжения τ ($\text{Н} \cdot \text{м}$);
- 3) коэффициентом жёсткости D ($\text{Па} \cdot \text{м}^3$):

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \sigma^2)}; \quad D = D_M D_T = \frac{E}{12(1 - \sigma^2)} h^3, \quad (3)$$

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

4) чувствительностью γ — величиной прогиба центра плоской мембраны, закреплённой по контуру, при малых перемещениях под действием давления P (м/Па):

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

5) резонансной частотой ($1/c$):

$$f_0 = \frac{\alpha}{4\pi} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} \left(\frac{h}{R^2}\right); \quad f_0 = f_{\text{ом}} f_{\text{ог}} = \frac{\alpha}{4\pi} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} \left(\frac{h}{R^2}\right), \quad (5)$$

где α — мода колебаний; ρ — плотность материала мембраны.

Выражения жёсткости, чувствительности и резонансной частоты целесообразно представить в виде двух сомножителей. Сомножитель с подстрочным индексом (м) характеризует физические свойства материала мембраны, а сомножитель с подстрочным индексом (г) — геометрические параметры мембраны.

Физические свойства графена. Известно, что графен обладает множеством уникальных физических свойств [12, 13]. 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, чем в первую очередь в соответствии с выражением (2) определяется предельная чувствительность мембранных преобразователей.

2. Высокая механическая прочность соответствует так называемой «теоретической прочности бездефектного твёрдого тела» и в настоящее время является рекордной (модуль Юнга E — порядка 1 ТПа). В своём бездефектном виде графен демонстрирует рекордную прочность на растяжение (≈ 130 ГПа).

3. Превосходные упругие свойства (максимальная степень упругой деформации составляет $\approx 25\%$ и нулевая жёсткость на изгиб).

4. Однослойный графен характеризуется отсутствием гистерезиса при повторных циклах нагружения, кроме того, уникальным сочетанием прочностных и эластичных свойств, обладает 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 его 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 в первую очередь из-за его высокой прочности, атомной толщины и высокой электропроводности. Низкая жёсткость на изгиб имеет решающее значение для чувствительности к отклонению в ответ на изменения температуры газа, заключённого в РК устройства, а высокая электропроводность мембраны упрощает конструкцию динамического конденсатора.

В настоящее время, помимо классического графена (C)₆, получены и исследованы его аллотропные формы [14]: (C)₄₄ — октаэдраграфен (октаграфен), (C)₆₃₍₆₎ — гексаэдраграфен, (C)₆₃₍₁₂₎ — додекаэдраграфен, (C)₆₆₄ — додекагексаэдраграфен и (C)₆₃₄ — гексаэдраграфен, 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 расчётов составляющей чувствительности однослойных графеновых мембран (строки 3, 4 и 5), обусловленные значениями модуля Юнга E_2 и коэффициента Пуассона.

Множитель 10^{-13} в последней строке первого столбца обусловлен тем, что значение модуля Юнга E_2 подставляется в выражение γ_m (2) в паскалях. Как следует из расчётов,

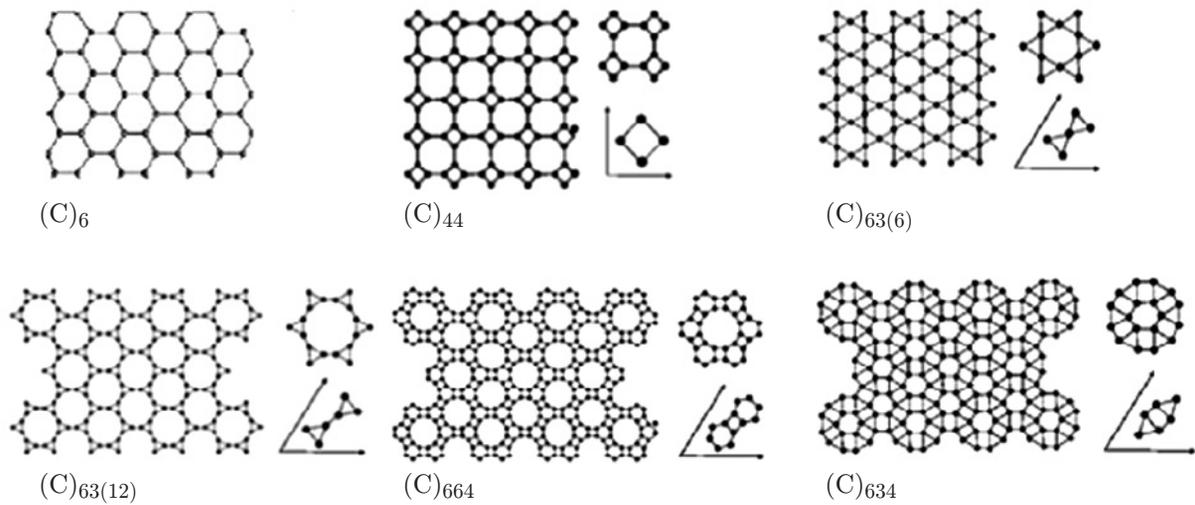


Рис. 3. Кристаллическая структура (слева), супраячейка (вверху справа) и элементарная ячейка (внизу справа) графенов: $(C)_6$ — графен, $(C)_{44}$ — октатетраграфен (октаграфен), $(C)_{63(6)}$ — гексатриграфен, $(C)_{63(12)}$ — додекатриграфен, $(C)_{664}$ — додекагексатетраграфен, $(C)_{634}$ — гексатетратриграфен [14]

Таблица 1

Результаты расчётов γ_m — составляющей чувствительности однослойных графеновых мембран

Параметр	Графены						
	$(C)_6$	$(C)_{44}$	$(C)_{44}$	$(C)_{63(6)}$	$(C)_{63(12)}$	$(C)_{664}$	$(C)_{634}$
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
$3(1 - \sigma^2)/(16E), 10^{-13}$	1,977	2,008	2,358	66,5	8,811	1,82	64,125

чувствительность однослойных мембран, изготовленных из гексатриграфена $(C)_{63(6)}$, выше аналогичных, созданных из классического графена $(C)_6$ в 33,6 раза, что обусловлено значительно более высоким значением модуля графена $(C)_6$.

В табл. 2 представлены результаты расчётов 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.

Результаты расчётов [15] показывают, что составляющая чувствительности γ_m для всех классических мембран, изготовленных из серебра, полиметилметакрилата и нитрида кремния, превышает чувствительность мембран изготовленных графенов (см. строку 4 в табл. 1). Так, отношение чувствительности γ_m полиметилметакрилата и гексатриграфена $(C)_{63(6)}$ составляет $219,4/66,5 = 3,3$ раза, а полиметилметакрилата и графена $(C)_6$ — $219,4/1,977 = 110,97$ раза. Однако если учесть геометрическую составляющую чувствительности и принять отношение толщин мембран из полиметилметакрилата и графена равным 100 ($40/0,355 = 112$), а также учесть, что толщина мембраны входит в выражение чувствительности (4) как $1/h^3$, то сравнительное повышение чувствительности для графена $(C)_6$ составит порядка 9 000, а для гексатриграфена $(C)_{63(6)}$ — порядка 300 000.

Таблица 2

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

Параметр	Графен (C) ₆	Графен (C) ₆₃₍₆₎	Серебро	Полиметилметакрилат (ПММА)	Нитрид кремния
E_2 (ГПа)	921	17	80	7,5	270
$[\sigma]$	0,17	0,63	0,37	0,35	0,27
$1 - \sigma^2$	0,9711	0,6031	0,8631	0,8775	0,9271
$3(1 - \sigma^2)/(16E), 10^{-13}$	1,977	66,5	20,2	219,4	6,44
h_{\min} (нм)	0,355	0,355	10–20	40–100	10–20
$\delta_n/\delta_{(C)_6}$	1	33,6	$4,57 \cdot 10^{-4}$	$7,7 \cdot 10^{-5}$	$1,45 \cdot 10^{-4}$

Свойства мембраны и принцип считывания информации о прогибе. В последнее время появился ряд публикаций [16–20], в которых сообщается о перспективах использования однослойного графена в оптико-акустических приёмниках Голея. Классификационно в зависимости от технической реализации системы отсчёта прогиба гибкой разделительной мембраны можно выделить два типа приёмников: приёмник Хейса с динамическим микрофоном и приёмник Голея с оптической системой считывания. Гибкие разделительные мембраны как для приёмников Хейса, так и для приёмников Голея должны быть газонепроницаемыми и обладать высокой разрывной прочностью и низкой изгибной жёсткостью.

Принципиальное различие в конструкциях мембран состоит в том, что для приёмников Хейса мембраны должны обладать металлической проводимостью и иметь электрический вывод, а мембраны приёмников Голея — отражающее покрытие. Эволюция конструкций мембран проходила в направлении последовательного перехода от металлических мембран из дюралюминия, серебра, никеля, легированных титановых сплавов ВТ16 или ВТ35 толщиной 0,1–0,15 мм к полимерным мембранам (полиметилметакрилат — ПММА) [21] толщиной несколько десятков нанометров, покрытым отражающим слоем серебра или сурьмы толщиной порядка 100Å и широко применяемым в микроэлектронике в виде тонких плёнок нитрида кремния.

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

Три конструктивные группы ОАП. Гибкая разделительная мембрана, изменяющая свой прогиб при изменении давления в расширительной (абсорбционной) камере, является общим и определяющим конструктивным элементом для всех ОАП. Представленная на рис. 1 классическая конструктивная схема ОАП в зависимости от способа регистрации прогиба гибкой мембраны подразделяется на две группы: конструктивная схема Хейса с динамическим конденсатором (для измерения изменений ёмкости или частоты генерации LC-контура) и более известная конструктивная схема Голея, в которой используется отражающее металлическое покрытие полимерной мембраны для интерферометрического измерения деформации. Первоначально разработанные ещё в конце 30-х гг. прошлого века для систем разведки в ИК-диапазоне ОАП, даже производимые по классической

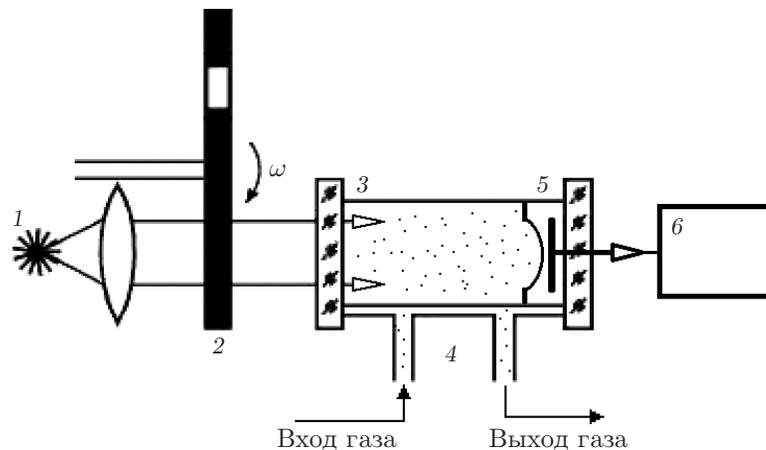


Рис. 4. Конструктивная схема опто-акустического газоанализатора: 1 — источник ИК-излучения; 2 — модулятор; 3 — абсорбционная камера; 4 — система забора проб газа; 5 — динамический микрофон; 6 — регистрирующее устройство

технологии и выдержавшие конкуренцию со стороны полупроводниковых фотоприёмных устройств, не утратили своего значения и широко применяются для решения современных научных и прикладных задач. Использование SLG-графенов для изготовления мембран обеспечивает не только рекордное повышение чувствительности, но и расширение диапазона рабочих температур в отрицательную область, что очень важно для аэрокосмических применений [22, 23].

Вторую конструктивную группу образуют селективные ОАП. В 1938 г. была опубликована работа М. Л. Вейнгерова [24], в которой сообщалось о создании селективного газового приёмника. В нём излучение поглощает заполняющий РК газ, содержащий в молекуле два и более различных атома, например окись углерода (CO), двуокись углерода (CO₂), метан (CH₄). Как следствие, спектральная чувствительность такого устройства определяется спектром поглощения заполняющим камеру газа. Отсчётная система в устройстве М. Л. Вейнгерова на основе динамического конденсатора повторяла устройство Хейса (рис. 4).

В зарубежной литературе приёмники такого типа носят название приёмников Паттерсона — Мосса [11]. Создание перестраиваемых по длине волны лазерных ИК-источников излучения и ОАП с графеновыми мембранами открывает принципиально новый этап в развитии газоаналитической аппаратуры, аппаратуры экологического мониторинга, аппаратуры для скрининговой неинвазивной медицинской диагностики на основе измерений газового состава выдыхаемого человеком воздуха [25, 26].

Третью конструктивную группу образуют матричные ОАП. Особенно острая потребность в таких устройствах существует при необходимости визуализации ИК- и ТГц-излучения во многих применениях, таких как системы технического зрения, спектральное и многоцветное тепловидение. Многочисленные попытки создания малогабаритных матричных ОАП при изготовлении разделительных мембран из традиционных материалов сопровождались резким падением их чувствительности (в соответствии с выражением (4) 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 опто-акустических ячеек и расстояний между ними. Таким образом, размерность матрицы обуславливается

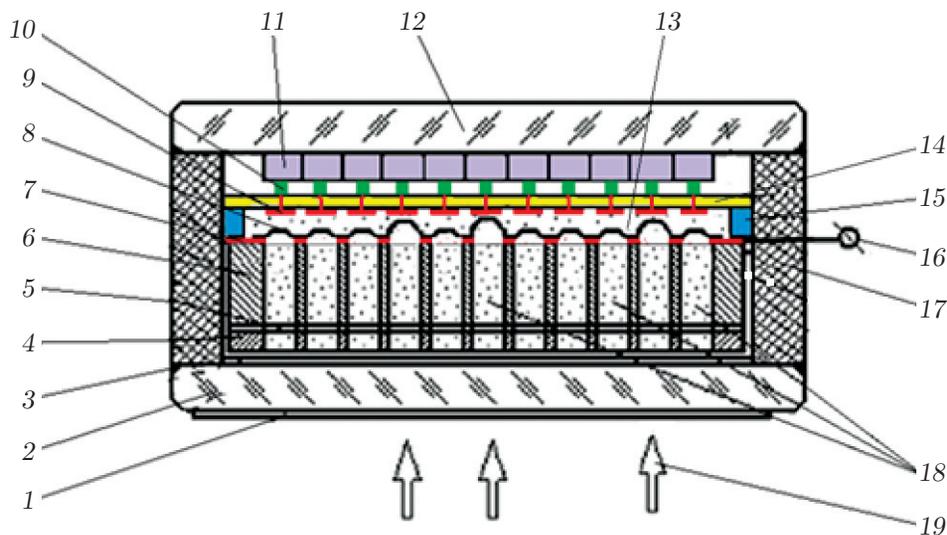


Рис. 5. Структура неохлаждаемого матричного оптико-акустического преобразователя с SLG-мембраной [27]: 1 — просветляющее покрытие; 2 — входное окно; 3 — герметизирующий клеевой слой; 4 — нижний блок рабочих ячеек; 5 — поглощающий слой; 6 — верхний блок рабочих ячеек; 7 — подстилающий контактный слой золота; 8 — графеновый мембранный слой; 9 — неподвижные электроды динамических конденсаторов; 10 — индиевые микростволбики; 11 — мультиплексор; 12 — подложка матрицы электронных усилителей; 13 — компенсационная камера; 14 — переходная плата неподвижных электродов; 15 — распорная шайба микрофонного блока; 16 — общий вывод графеновых мембран; 17 — корпусный блок матрицы; 18 — расширительные камеры ОАП; 19 — анализируемое излучение

компромиссом между требуемой чувствительностью и разрешающей способностью. Минимальные значения размеров элементарных оптико-акустических ячеек ограничены дифракционными эффектами и сильно варьируют 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.

Преобразователь (рис. 5) представляет собой гибридную конструкцию, состоящую из оптико-акустической фотоприёмной матрицы и сопряжённой с ней с помощью индиевых столбиков стандартной кремниевой микросхемы такой же размерности, выполняющей функции накопления, усиления и коммутации фотосигнала.

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 [27].

На торцевую поверхность верхнего блока 6, подвергнутого оптической полировке, методом термического напыления в вакууме наносится подстилающий контактный слой золота 7, имеющий наружный вывод 16. Разделительная мембрана между расширительными 18 и общей компенсационной 13 камерами выполняется как единый лист SLG-графена, наложенного на подстилающий слой золота. Герметизация РК (краевая заделка микромембран) осуществляется за счёт сил Ван-дер-Ваальса.

Проведённые оценки показывают, что применение мембран из SLG-графенов позволяет создать ОАП излучения с ячейками порядка десятков микрон при сохранении предельно высокой чувствительности, сопоставимой с устройствами с большой апертурой.

В связи с тем, что графен, используемый для изготовления разделительных микро-мембран, является самым тонким из известных плёночных материалов, такое устройство может быть отнесено к нанооптоэлектромеханическим. Микроперфорация мембран позволяет значительно упростить конструкцию ОАП в матричном исполнении.

Заключение. Анализ оптико-акустических приёмников на основе ячеек Голя показал, что они являются одними из лучших неохлаждаемых приёмников ИК- и ТГц-излучения по чувствительности, широте спектра и обнаружительной способности. Установлено, что графен, обладая множеством уникальных физических свойств, является наиболее предпочтительным материалом для применения в качестве мембран в ОАП. Однослойный SLG-графен является идеальным материалом для изготовления гибкой мембраны из-за высокой прочности, атомной толщины и высокой электропроводимости и обеспечивает создание ОАП предельной чувствительности. Полученные результаты позволяют создать высокоэффективные неохлаждаемые приёмники ТГц- и ИК-излучения для применения в современных оптико-электронных системах локации, наблюдения, слежения, спектроскопии и других.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bell A. G.** On the production and reproduction of sound by light // *Am. Journ. Science*. 1880. **20**, N 118. P. 305–324.
2. **Tyndall J.** Action of an intermittent beam of radiant heat upon gaseous matter // *Proc. Roy. Soc. London*. 1881. **31**. P. 307–317.
3. **Roentgen W. C.** On tones produced by the intermittent irradiation of a gas // *Phil. Mag. Ser. 5*. 1881. **11**, N 68. P. 308–311.
4. **Розенберг Ф.** История физики. Ч. 2: История физики в новое время. М.-Л.: Гос. тех.-теор. изд-во, 1933. 342 с.
5. **Киес Р. Дж., Краузе П. В., Патли Э. Г. и др.** Фотоприёмники видимого и ИК-диапазонов. М.: Радио и связь, 1985. 328 с.
6. **Бреслер П. И.** Элементы теории и расчёты оптико-акустических газоанализаторов на основе некоторых закономерностей поглощения инфракрасной радиации газами / Автоматические газоанализаторы. М.: ЦИНТИ Электропром, 1961. С. 210–224.
7. **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.
8. **Андреева Л. Е.** Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1981. 391 с.
9. **Hayes H. V.** A new receiver of radiant energy // *Rev. Scientific Instruments*. 1936. **7**, N 5. P. 202–204. DOI: 10.1063/1.1752121.
10. **Панкратов Н. А., Виноградова Л. М.** Селективные оптико-акустические приёмники радиации с оптическим, электродинамическим и конденсаторным микрофоном / Автоматические газоанализаторы. М.: ЦИНТИ Электропром, 1961. С. 234–248.
11. **Шоль Ж., Марфан И., Мюнш М. и др.** Приёмники инфракрасного излучения. М.: Мир, 1969. 283 с.
12. **Браже Р. А., Кочаев А. И., Мефтахутдинов Р. М.** Графены и их физические свойства. Ульяновск: УлГТУ, 2016. 139 с.

13. Lee C., Wei X., Li Q. et al. Elastic and frictional properties of grapheme // Phys. Status Solidi B. 2009. **246**, N 11–12. P. 2562–2567.
14. Браже Р. А., Кочаев А. И., Мефтахутдинов Р. М. Акустические и оптические свойства графенов // Инжиниринг и технологии. 2016. **1**, № 1. С. 1–23.
15. Гибин И. С., Котляр П. Е. Мембраны оптико-акустических приёмников излучения // Прикладная физика. 2020. № 2. С. 90–97.
16. Ledwosinska E., Szkopek T., Guermoune A., Sijaj M. Application of graphene membrane in micro-Golay cell array // Proc. SPIE. 2012. **8261**. 82610A. DOI: 10.1117/12.914054.
17. Ledwosinska E., Guermoune A., Sijaj M., Szkopek T. Fabrication and characterization of suspended graphene membranes for miniature Golay cells // Proc. SPIE. 2013. **8624**. 86240U. DOI: 10.1117/12.2008974.
18. Lazzarino M., Matruggio A., Cautero G. et al. Graphene-based Golay THz arrayed detectors: Poster presentation // Proc. of the ATTRACT TWD Symposium: Trends, Wishes and Dreams in Detection and Imaging Technologies. Barcelona, Spain, 30 June – 1 July, 2016.
19. 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.
20. Golay graphene trace matrices for terahertz color sensitive image sensor (GRANT EU Horizon 2020 N 777222). Italy, Consiglio Nazionale per le Ricerche – Istituto di nanoscienze.
21. Корляков А. В. Сверхтонкие мембраны в микросистемной технике // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 8 (85). С. 17–26.
22. Гибин И. С., Котляр П. Е. Приёмники излучения терагерцового диапазона (обзор) // Успехи прикладной физики. 2018. **6**, № 2. С. 117–129.
23. Кропотов Г., Кауфманн П. Терагерцевые фотометры для наблюдений солнечных вспышек из космоса // Фотоника. 2013. № 5/41. С. 40–50.
24. Viengerov M. L. New method of gas analysis based on Tyndall — Roentgen opto-acoustic effect // Dokl. Akad. Nauk SSSR. 1938. **19**. P. 687–688.
25. 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.
26. 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.
27. Гибин И. С., Котляр П. Е. Матричный оптико-акустический приёмник ТГц-излучения с нанооптоэлектромеханическими элементами на основе перфорированного SLG-графена // Прикладная физика. 2020. № 3. С. 76–82.

Поступила в редакцию 22.06.2020

После доработки 21.08.2020

Принята к публикации 07.09.2020