

## От газового термометра до терагерцовой матрицы (обзор)

И. С. Гибин, П. Е. Котляр

*Рассмотрены история изобретения и развития газового термометра и появления на его основе оптико-акустических приемников (ОАП), начиная с первых работ Белла, Хейса, Голея и до настоящего времени. Отмечены преимущества ОАП, заключающиеся в постоянной и высокой чувствительности в широкой области спектра и наивысшей среди тепловых приемников обнаружительной способности. Рассмотрены основные характеристики мембран – основных элементов ОАП, проанализированы физические свойства графена как наиболее предпочтительного материала для мембран. Проведены оценки, показывающие, что применение мембран из SLG-графенов позволяет создавать приемники ИК- и ТГц-излучения с ячейками порядка десятков микрон, имеющими предельно высокую чувствительность. Предложена новая конструктивная схема неохлаждаемых матричных гелий-графеновых оптико-акустических приемников, обладающих теоретически предельными чувствительностью и быстродействием и расширенным до гелиевых температур рабочим диапазоном.*

*Ключевые слова:* термоскоп, газовый термометр, оптико-акустический преобразователь, чувствительность, графеновые мембраны, перфорация, ТГц-матрицы.

**DOI:** 10.51368/2307-4469-2021-9-4-337-346

### Введение

В истории экспериментальной физики газовый термометр занимает особое место. Вряд ли можно назвать другой прибор, который за четыреста с лишним лет не только не устарел, но фактически положил начало теплофизике и термодинамике, превратился в первичный термометрический прибор

и послужил основой целого ряда калориметрических измерительных устройств инфракрасного и терагерцового диапазонов. 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 первичного термометрического прибора. При помощи газового термометра определены температуры реперных точек Международной практической температурной шкалы.

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

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

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

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН.

Россия, 630090, г. Новосибирск,

проспект Академика Коптюга, 1.

Статья поступила в редакцию 28 мая 2021 г.

© Гибин И. С., Котляр П. Е., 2021

### К истории изобретения газового термометра

В работах по истории физики [1, 2] Галилео Галилей считается основоположником термодинамики и первым человеком,

который изобрел термометр. В сочинениях Галилея нет ни одного упоминания о технологии создания термометра, однако ученики Галилея, Нелли и Вивиани, утверждали, что в 1597 году Галилей на лекциях демонстрировал прибор, названный им термоскопом. Галилеевский термоскоп (рис. 1) состоял из открытой стеклянной трубки с припаянным шариком. В вертикальную трубку вводили каплю воды, которая, поднимаясь и опускаясь, указывала на увеличение или уменьшение тепла [3]. Позднее конструкция была видоизменена. В вертикально стоящую капиллярную трубку с шариком, обращенным вниз, вводили каплю жидкости, которая поднимаясь и опускаясь, указывала на увеличение или уменьшение тепла. В 1604 году появляется первое письменное описание устройства и впервые вводится термин термометр, выполненное голландцем Корнелием Дреббелем. Изобретение термометра также приписывают лорду Бэкону, Роберт Фладду, Санкториусу (врач Венеция, Италия), Скарпи, К. Дреббелю, Порте и Саломону де Каус.

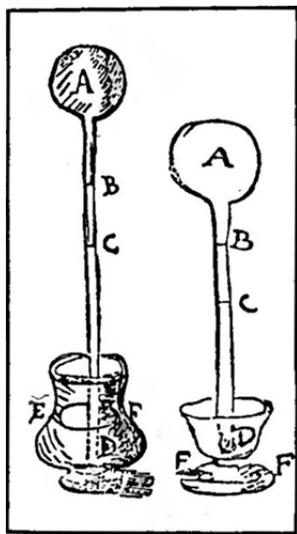


Рис. 1. Термоскоп Галилея (рисунок XVII в. по [3]).

Все эти термометры были воздушные и состояли из сосуда с трубкой, содержащего воздух, отделённый от атмосферы каплей жидкости (жидкостным поршнем), они изменяли свои показания и от изменения температуры, и от изменения атмосферного давления.

В дальнейшем прибор Галилея был существенно улучшен членами флорентийской «Академии опытов». К 1657 году они снабдили его шкалой (из бусин одинакового размера, закрепленных на трубке) и удалили воздух из резервуара и трубки. Тем самым влияние атмосферного давления исключалось. Хотя они и не присвоили точкам шкалы определенных числовых значений, им удалось установить постоянство точки плавления льда. Роберт Гук усовершенствовал итальянский прибор, введя в жидкостный поршень для удобства считывания показаний красный краситель и сделав устройство для нанесения шкалы. В 1664 г. в книге «Микрография» он впервые сформулировал принцип изготовления сравнимых термометров, не сохраняя строго постоянными их размеры, что пытались делать флорентийцы. Его метод был основан на равных приращениях объема с ростом температуры, начиная с точки замерзания воды.

В 1702 году французский ученый Гийом Амонтон разработал газовый термометр постоянного объема. В термометре Амонтона температура определялась как величина, пропорциональная давлению газа и, таким образом, для создания температурной шкалы была необходима лишь одна реперная точка. Амонтон определил постоянную термодинамическую точку — точку кипения воды, много работал над измерениями зависимости объема воздуха от температуры. Амонтон пришёл к идее абсолютного нуля температуры, который, по его подсчётам, равнялся  $-239,8^{\circ}\text{C}$ .

Однако первый термоскоп, о котором знает история, известен из работ древнегреческих ученых, работавших в Александрии. Филон Византийский (III или II вв. до н. э.) в своем сочинении «Механика» описал прибор для тепловых измерений — термоскоп, состоящий из двух связанных трубочкой сферических сосудов [4]. Сосуд 1 частично заполнялся водой, а остальное пространство было заполнено воздухом

(рис. 2). Сосуд 2 полностью заполнялся воздухом. При освещении сосуда 2 солнцем, воздух из него по трубке переходит в сосуд 1, что можно было наблюдать по пузырькам, выходящим из трубки. Если, напротив, поместить сосуд 2 в тень, то вода поднималась по трубке и частично переливалась в него из сосуда 1. Филон не только открыл и в многочисленных конструкциях использовал расширение воздуха при нагревании (это было известно еще египетским жрецам), но и создал прибор, позволяющий судить о повышении или понижении температуры.

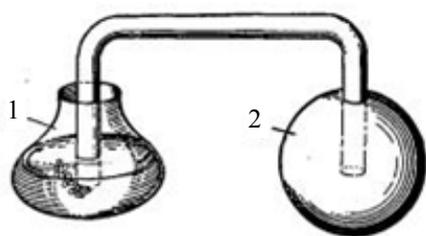


Рис. 2. Термоскоп Филона Византийского по [4].

Изображенные в книге Марио Льюцци [2], из которой заимствован рис. 2, два термоскопа Галилео Галилея отличались лишь тем, что в них трубка была прямой, а не изогнутой и, судя по эскизу, изготовлялась заодно со стеклянным (а не свинцовым, как у Филона) шаром.

Устройство термоскопа Филона (рис. 2) стало известно только по описанию Герона Александрийского, сделанному в трактате «Пневматика» [5]. В 1547 году Алеотти перевел «Пневматику» Герона с арабского на итальянский, а в 1575 году Ф. Коммандине перевел ее на латынь. Основываясь на этой работе, авторитетные европейские исследователи начали экспериментировать с идеей расширения воздуха при его нагреве. Первым решением стало появление воздушного термоскопа, создание которого, видимо, стоит рассматривать как совместное изобретение нескольких учёных. Однако для превращения термоскопа в термометр необходимо было установить

принципы сопоставления уровня жидкости в трубке с температурой тела.

Французский ученый Ж. Шарль в 1787 г. т. е. раньше, чем Гей-Люссак, экспериментально установил зависимость давления газа от температуры при постоянном объеме. Газовый закон Шарля: **давление данной массы газа при постоянном объеме прямо пропорционально абсолютной температуре.**

Французский физик Анри Виктор Реньо в результате многочисленных работ по изучению расширения газов в 1842 г. пришел к следующим выводам: 1 – все газы расширяются одинаково в одних и тех же температурных интервалах; 2 – расширение одного и того же газа в одних и тех же температурных интервалах независимо от начальной плотности его. Это позволило сделать вывод, что газ является приближением к идеальному рабочему веществу для термометра.

В 1848 г. английский физик Вильям Томсон (лорд Кельвин) доказал возможность создания абсолютной шкалы температур, нуль которой не зависит от свойств вещества, заполняющего термометр. Точкой отсчета в «шкале Кельвина» послужило значение абсолютного нуля:  $-273,15^{\circ}\text{C}$ . При этой температуре прекращается тепловое движение молекул. Следовательно, становится невозможным дальнейшее охлаждение тел [6].

Один из самых старых и популярных способов измерения температуры, основанный на регистрации объемного расширения газа при его нагревании, сохранившийся до настоящего времени, – это классический газовый термометр переменного давления.

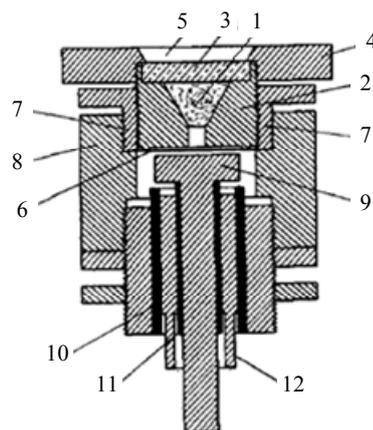
### Оптико-акустический эффект и оптико-акустические преобразователи

В основе оптико-акустического приемника (ОАП, синоним пневматического приемника и ячейки Голея) инфракрасного излучения лежит эффект, обнаруженный в

1880 г. А. Беллом [7]. В 1881 открытие было подтверждено в работах Дж.Тиндаля (назвавшим эксперименты А. Белла «гениальными и оригинальными») [8] и Рентгена [9]. 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 безызлучательных переходов. Частота колебаний зависит от частоты модуляции потока, а интенсивность колебаний – от способности данного газа поглощать инфракрасную радиацию и от интенсивности радиации. А. Белл безуспешно пытался использовать обнаруженный эффект для организации оптических линий связи.

В 1936 г. Х. В. Хейс [10] 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 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. 3.

Преобразования в оптико-акустическом приемнике Хейса осуществляются по схеме ( $h\nu \rightarrow \text{тепло} \rightarrow P(T) \rightarrow \delta(P) \rightarrow C(\delta) \rightarrow \text{электрический сигнал}$ ), а основные конструктивные решения успешно используются до настоящего времени, например, в оптико-акустическом приемнике ONERA (Office National d'Etudes et de Recherches Aeronautiques) по [11].

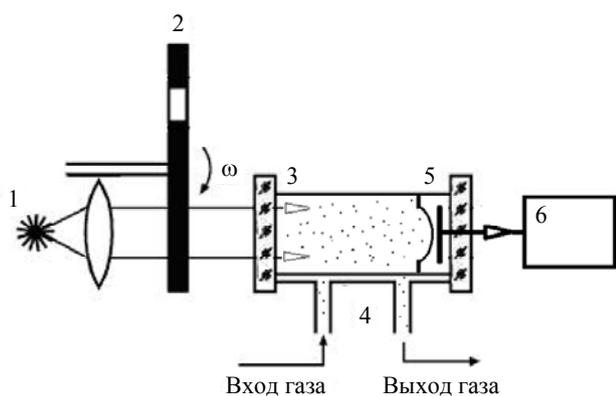


*Рис. 3. Оптико-акустический приемник Хейса 1936 г по [6]: 1 – мелкодисперсный поглотитель; 2 – блок расширительной камеры; 3 – входное окно; 4 – удерживающий фланец; 5 – входная апертура; 6 – гибкая металлическая мембрана; 7 – кольцевая оправка гибкой мембраны; 8 – металлический корпус; 9 – плоский металлический электрод; 10, 11 – стеклянные трубчатые изоляторы; 12 – экранирующая токопроводящая трубка.*

Оптико-акустический приемник излучения оказался широко востребован в технике обнаружения излучений ИК-диапазона [12]. Преимущества оптико-акустических приемников: постоянная и высокая чувствительность ( $1 \times 10^5$  В/Вт) в широкой области спектра (5–1000 мкм), наивысшая среди тепловых приемников обнаружительная способность, близкая к характеристикам идеальных тепловых приемников, 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 мощности шума (NEP)  $1,4 \times 10^{-10}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> по сравнению с охлаждаемыми тепловыми приемниками [13].

Вторую конструктивную группу образуют селективные ОАПИ. В 1938 г. была опубликована работа М. Л. Вейнгерова [14], в которой сообщалось о создании принципиально нового селективного газового приемника – «спектрофона» – с чувствительностью от ультрафиолетовой до

миллиметровой области спектра. В нем излучение поглощается заполняющим расширительную камеру газом, содержащим в молекуле два и более различных атома, например, окись углерода  $\text{CO}$ , двуокись углерода  $\text{CO}_2$ , метан  $\text{CH}_4$ . Как следствие, спектральная чувствительность такого устройства определяется спектром поглощения заполняющего камеру газа. В принципе, все атомы, молекулы и их соединения, имеющие спектр поглощения на том или ином участке электромагнитного спектра, могут быть определены оптико-акустическим методом. Отсчетная система в устройстве Вейнгера на основе динамического конденсатора повторяла устройство Хейса (рис. 4). В зарубежной литературе приемники такого типа носят название приемников Паттерсона-Мосса [11].



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

Работы М. Л. Вейнгера положили начало широко развивающемуся газоаналитическому приборостроению, включающему аппаратуру экологического мониторинга и аппаратуру для скрининговой неинвазивной медицинской диагностики на основе измерений газового состава выдыхаемого человеком воздуха [15, 16].

Разработчик радарных систем Марсель Голей (США) усовершенствовал приемник

Хейса и использовал его для идентификации и инфракрасных выбросов самолетов [17, 18]. 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 интерферометрические методы измерения деформации для измерения инфракрасного излучения.

Пневматический приемник Голея (ячейка Голея) приближается по своим характеристикам к идеальному приемнику, ограниченному фотонными шумами. Однако он отличается от идеального прибора наличием тепловой связи расширительной камеры со стенками и потерями на отражение, возникающими на входном окне.

В 1946 г. А. Гершбергер (США) [19] впервые наблюдал оптико-акустический эффект в сантиметровом диапазоне длин волн.

## Современный ОАП

Современный пневматический приемник [20, 21] (рис. 5) состоит из термопневматического актюатора – наполненной газом камеры, содержащей тонкую пленку, 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 по-

крытие. Поступающее в камеру излучение поглощается металлической пленкой и нагревает газ, который, расширяясь, изгибает эластичную мембрану. Для того чтобы приемник не был подвержен изменениям внешних давления и температуры, газовая камера дополнена компенсационной камерой (КК), расположенной между зеркальной мембраной и выходным окном, и капиллярным каналом, при помощи которого уравнивается давление по обе стороны разделительной мембраны. По этой причине ОАП не регистрирует постоянный сигнал.

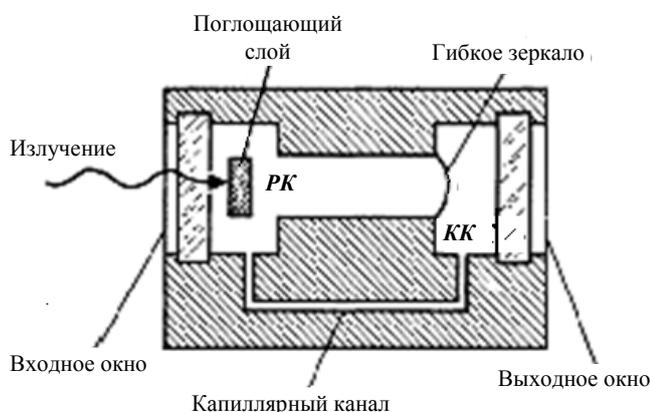


Рис. 5. Схема пневматического приемника ИК-излучения по [20].

Спектральная область чувствительности ОАП определяется прозрачностью входного окна и спектральными характеристиками поглощающего слоя. Фирма «Tydex •J.S.Co» [21] в оптоакустическом детекторе GC-1P в качестве материала входного окна использует полиэтилен высокой плотности (HDPE), обеспечивающий рабочий диапазон 15–8000 мкм, в детекторе GC-1T за счет применения **полиметилпентена (TRX) рабочий диапазон** расширяется вплоть до ультрафиолетовых длин волн 0,3–8000 мкм, а в детекторе GC-1D – алмаз, обеспечивающий рабочий диапазон 0,4–8000 мкм. Для длин волн  $\lambda > 50$  мкм применяются кварцевые окна толщиной 0,5 мм.

В качестве поглощающего слоя обычно используют полупрозрачные металлические пленки. Максимальное поглощение

( $A = 50\%$  и  $R = T = 25\%$ ) соответствуют такой толщине пленки, когда её сопротивление при поверхности  $1\text{ см}^2$  равно половине волнового сопротивления свободного пространства, т. е. 188 Ом. Этому условию отвечают пленки толщиной порядка 10 нм. Такие пленки обладают очень малой теплоемкостью и в то же время поглощают половину падающего на них излучения [22].

Постоянная времени ОАП определяется отношением теплоемкости поглощающей пленки к теплопроводности газа. Наименьшей постоянной времени порядка 1 мс обладает ОАП, наполненный газом с высокой теплопроводностью – гелием. Серийно выпускаемые ячейки с ксеноновым наполнением (30–100 мм рт. ст.) имеют типичное значение скорости отклика 10–20 мс. Однако снижение постоянной времени сопровождается падением чувствительности приемника.

Сечение капиллярного канала должно обеспечивать выравнивание давления в расширительной и компенсационной камерах за время, равное половине периода модуляции.

ОАП работают при комнатной температуре, так как полимерные и металлические гибкие мембраны теряют эластичность при охлаждении.

Значительно расширился динамический диапазон исследуемых с помощью ОАП сигналов. В настоящее время оптоакустическая калориметрия применяется как для регистрации постоянных потоков излучения, так и фемтосекундных лазерных импульсов [23].

Идеи, заложенные в эффект Белла-Тиндаля нашли продолжение в бурно развивающихся в настоящее время работах по оптической генерации звука в жидкостях [24].

## Новые разработки ОАП

Необходимо отметить два знаковых события, произошедших в начале XXI века.

Первое – изобретение квантово-каскадных лазеров, стимулировавшее бурное развитие исследований в ТГц-области спектра. Второе – открытие графена и исследование его физических свойств.

Графеновая революция привела к новым подходам к конструированию ОАП. В последнее время появился ряд публикаций [25–27], в которых сообщается о перспективах использования графена в оптико-акустических приемниках Голея. Известно, что графен обладает множеством уникальных физических свойств [28, 29]. Выделим только те из них, которые являются определяющими при конструировании гибких мембран ОАП.

Толщина одного слоя графена составляет 0,355 нм, **он является самым тонким из известных пленочных материалов.** Этим определяется предельная чувствительность мембранных преобразователей.

– Однослойный графен SLG (*single-layer graphene*) характеризуется уникальным сочетанием прочностных и эластичных свойств.

– Обладает непроницаемостью для газов (в том числе и для гелия).

– Обладает очень высокими адгезивными свойствами за счет сил Ван дер Ваальса.

– Обладает рекордно высокой электропроводностью.

Перечисленные свойства свидетельствуют о том, что однослойный графен (SLG) является идеальным материалом для изготовления гибкой мембраны. В 2013 г. в исследовательском центре IBM имени Томаса Уотсона разработали технологию получения однослойных листов графена размером до 10 сантиметров.

Результаты расчетов [30] показывают, что по чувствительности мембраны, изготовленные из графена, значительно превосходят все классические, изготовленные из серебра, полиметилметакрилата и нитрида кремния. Так, повышение чувствительностей мембран, изготовленных гра-

фена (C)<sub>6</sub>, составит порядка 9 000, а для гексатриграфена (C)<sub>63(6)</sub> порядка 300 000 по сравнению с мембранами из полиметилметакрилата толщиной 40 нм.

Применение однослойного графена для выполнения гибкой мембраны и гелиевого заполнения камер позволяет создать ОАП, обладающий теоретически предельными чувствительностью и быстродействием, и расширить рабочий диапазон преобразователя вплоть до гелиевых температур [31]. Такое устройство приближается по своим характеристикам к идеальному приемнику, ограниченному фотонными шумами. Однако он отличается от идеального прибора наличием тепловой связи расширительной камеры со стенками и потерями на отражение, возникающими на входном окне.

Проведенные оценки показывают [32], что применение мембран из SLG-графенов позволяет создавать неохлаждаемые мегапиксельные матричные гелий-графеновые оптоакустические приемники ИК- и ТГц-излучения с ячейками порядка десятков микрон при сохранении предельно высокой чувствительности, сопоставимой с устройствами с большой апертурой. Такие матрицы крайне необходимы для многих применений, таких как системы технического зрения, визуализация изображений терагерцового диапазона, спектральное и многоцветное тепловидение.

## Заключение

Классический газовый термометр за четырьмя десятилетиями с момента изобретения несколько не устарел. В настоящее время он превратился в первичный термометрический прибор и послужил основой для создания целого ряда калориметрических измерительных устройств инфракрасного и терагерцового диапазонов. Оптико-акустические преобразователи (ОАП), принцип действия которых основан на детектировании теплового

расширения газа, заключенного в замкнутом объеме, и известные как ячейка Хейса, ячейка Голя, первоначально предназначенные для измерения слабых потоков излучения ИК-диапазона, за 70 лет эволюционного развития значительно расширили область применения, включив, в первую очередь, газовую ИК-спектроскопию высокого разрешения. За этот период ОАП успешно выдержали конкуренцию с приборами аналогичного назначения, использующими тепловые или фотонные принципы работы. Эволюционные изменения конструкции ОАП были обусловлены развитием тонкопленочной микроэлектроники.

Открытие графена и исследование его физических свойств привели к новым подходам к конструированию ОАП.

Использование однослойного графена для изготовления мембран ОАП является переломным моментом в достижении параметров, необходимых для современного аналитического приборостроения во многих областях науки и техники.

Создание неохлаждаемых мегапиксельных матричных гелий-графеновых оптоакустических приемников ИК- и ТГц-излучения с ячейками порядка десятков микрон при сохранении предельно высокой чувствительности, сопоставимой с устройствами с большой апертурой, открывает принципиально новый этап в конкуренции тепловых и фотонных устройств.

---

*Исследование выполнено за счет средств  
субсидии на финансовое обеспечение  
выполнения государственного задания  
№ 121022000116-0 в ИАиЭ СО РАН.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Розенберг Ф. История физики. Часть вторая. История физики в новое время. – М.-Л.: Гос. тех.-теор. издат., 1933.
2. Льюис Марио. История физики. – М.: Изд-во МИР, 1970.

3. Транковский С. История создания термометра. <http://www.randewy.ru › nav › histor7>.
4. Liber Philonis de ingeniisspiritualius, в книге HeronisAlexanini opera quae supersuntomnia, vol. I, Lipsiae, 1899, p. 462.
5. The Pneumatics of Hero of Alexandria (from the original greek translated for and edited by Bennet Woodcroft) <http://www.history.rochester.edu/steam/hero/index.html>
6. Куинн Т. Температура. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985.
7. Bell A. G. // Journal of the Society of Telegraph Engineers. December 8, 1880.
8. Tyndall J. // Proc. Roy. Soc. London. 1881. Vol. 31. P. 307.
9. Roentgen W. C. // Phil. Mag. Ser. 5. 1881. Vol. 11. № 68. P. 308.
10. Hayes H. V. // Review of Scientific Instruments. 1936. № 7. P. 202.
11. Шоль Ж., Марфан И., Мюни М. и др. Приемники инфракрасного излучения. – М.: Мир, 1969.
12. Гибин И. С., Котляр П. Е. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 2. С. 117.
13. Кюес Р. Дж., Краузе П. В., Патли Э. Г. и др. Фотоприемники видимого и ИК-диапазонов. – М.: Радио и связь, 1985.
14. Вейнгеро М. Л. / Доклады АН СССР. 1938. Т. 19. № 9. С. 687.
15. Агранат М. Б., Ильина И. В., Ситников Д. С. // ТВТ. 2017. Т. 55. Вып. 6. С. 759.
16. Степанов Е. В. // Труды института общей физики им. А. М. Прохорова. 2005. Т. 61. С. 5–47.
17. Golay M. J. E. // Rev. Sci. Instrum. 1947. Vol. 18. P. 357.
18. Golay M. J. E. // Rev. Sci. Instrum. 1949. Vol. 20. P. 816.
19. Hershberger W. D. // Phys. Rev. 1946. Vol. 69 (A). P. 695.
20. Гроссорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. – М.: Мир, 1988.
21. Детектор Голя [Электронный ресурс]. /TYDEX/ Продукты /ТГц приборы /Детекторы Голя [сайт] – [http://www.tydexoptics.com/pdf/Golay\\_cell.pdf](http://www.tydexoptics.com/pdf/Golay_cell.pdf)
22. Лебедева В. В. Экспериментальная оптика. 4-е изд. – М.: Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 2005.
23. Иглакова А. Н. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2015. № 4. С. 354.
24. Лямушев Л. М., Седов Л. В. // Акустический журнал. 1981. Т. XXVII. Вып. 1. С. 5.
25. Ledwosinska E. et al. Article in materials SPIE – International Society of Optical Engineering 8624, March 2013.
26. Fan K., Suen J. Y., Padilla W. J. // Optics Express. 2017. Vol. 25. № 21.

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. Lee C., Wei X., Kysar J. W., Hone J. // Science. 2008. Vol. 321. P. 385.

29. Браже Р. А. Графены и их физические свойства. – Ульяновск: УЛГТУ, 2016.

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

31. Патент RU2746095 С1 Оптико-акустический приемник инфракрасного и ТГц излучения / Гибин И. С., Котляр П. Е., 2021.

32. Гибин И. С., Котляр П. Е. // Прикладная физика. 2020. № 3. С. 76.

PACS: 85.30 Dw, 84.40.Ba

## From a gas thermometer to a terahertz matrix (a review)

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

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](mailto:gibin@iae.nsk.su), [21031940@mail.ru](mailto:21031940@mail.ru)

*Received May 28, 2021*

***The history of the invention and development of the gas thermometer and the appearance of optical-acoustic receivers (OAP) based on it, starting from the first works of Bell, Hayes, Golay, and up to the present time, are considered. The advantages of the OAP, consisting in a constant and high sensitivity in a wide range of the spectrum and the highest detection ability among thermal receivers, are noted. The main characteristics of membranes – the main elements of OAP – are considered, and the physical properties of graphene, as the most preferred material for membranes, are analyzed. Estimates have been made showing that the use of SLG graphene membranes makes it possible to create IR and THz radiation receivers with cells of the order of tens of microns with extremely high sensitivity. A new design scheme is proposed for uncooled matrix helium-graphene optical-acoustic receivers with theoretically extreme sensitivity and speed and an operating range extended to helium temperatures.***

**Keywords:** thermoscope, gas thermometer, opto-acoustic transducer, sensitivity, graphene membranes, perforation, THz matrices.

**DOI:** 10.51368/2307-4469-2021-9-4-337-346

### REFERENCES

1. F. Rosenberg, History of Physics. Part two. The history of Physics in modern times. (State tech. – theor. published by M.-L. 1933) [in Russian].

2. Mario Llozzi, History of Physics. (Ed. MIR, M., 1970) [in Russian].

3. S. Trankovsky, The history of the thermometer. <http://www.randewy.ru> > nav > histor7.

4. Liber Philonis de ingeniisspiritualius, in the Bookheronisalexanini opera quae supersuntomnia, vol. I, Lipsiae, 1899, p. 462.

5. The Pneumatics of Hero of Alexandria (from the original Greek translated for and edited by Bennet Woodcroft) <http://www.history.rochester.edu/steam/hero/index.html>

6. T. Quinn, *Temperature* (Mir, Moscow, 1985) [in Russian].
7. A. G. Bell, *Journal of the Society of Telegraph Engineers*. December 8, (1880).
8. J. Tyndall, *Proc. Roy. Soc. London* **31**, 307 (1881).
9. W. C. Roentgen, *Phil. Mag. Ser. 5*, **11** (68), 308 (1881).
10. H. V. Hayes, *Review of Scientific Instruments*, No. 7, 202 (1936).
11. J. Scholl, I. Marfan, M. Munsch, et al. *Receivers of infrared radiation* (Mir, Moscow, 1969) [in Russian].
12. I. S. Gibin and P. E. Kotlyar, *Usp. Prikl. Fiz.* **6** (2), 117 (2018).
13. R. J. Kies, P. V. Krause, E. G. Patli, et al. *Photodetectors of the visible and IR ranges*. (Radio and Communication, Moscow, 1985) [in Russian].
14. M. L. Weingerov, *Reports of the USSR Academy of Sciences* **19** (9), 687 (1938).
15. M. B. Agranat, I. V. Ilina, D. S. Sitnikov, *High Temperature* **55** (6), 759 (2017).
16. E. V. Stepanov, *PROCEEDINGS OF THE PROKHOROV INSTITUTE OF GENERAL PHYSICS* **61**, 5-47 (2005).
17. M. J. E. Golay, *Rev. Sci. Instrum.* **18**, 357 (1947).
18. M. J. E. Golay, *Rev. Sci. Instrument*, **20**, 816 (1949).
19. W. D. Hersberger, *Phys. Rev.* **69** (A), 695 (1946).
20. Grossorgge. *Infrared thermography. Fundamentals, technique, application* (Mir, Moscow, 1988).
21. Goley detector. [Electronic resource]. / TYDEX/ Products /THz devices /Golay Detectors [website] – [http://www.tydexoptics.com/pdf/Golay\\_cell.pdf](http://www.tydexoptics.com/pdf/Golay_cell.pdf)
22. V. V. Lebedeva, *Experimental optics*. (Moscow: Faculty of Physics of Lomonosov Moscow State University, 2005) [in Russian].
23. A. N. Iglakova, et al., *Optics of the atmosphere and ocean*, No. 4, 354 (2015).
24. L. M. Lyamichev and L. V. Sedov, *Acoustic Journal* **XXVII** (1), 5 (1981).
25. E. Ledwosinska, et al., Article in materials SPIE – International Society of Optical Engineering 8624 • March 2013.
26. K. Fan, J. Y. Suen, and W. J. Padilla, *Optics Express* **25** (21), (2017).
27. A. Ali, A. Khan, Kh. Karimov, Research Article | Open Access Volume 2018 |Article 9592610 | 12 pages | <https://doi.org/10.1155/2018/9592610>
28. C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar, and J. Hone, *Science* **321**, 385 (2008).
29. R. A. Braze *Graphenes and their features* (Ul'yanovsk, 2016).
30. I. S. Gibin and P. E. Kotlyar, *Applied Physics*, No. 2, 90 (2020) [in Russian].
31. I. S. Gibin and P. E. Kotlyar *RF Patent RU2746095 C1* (2021) [in Russian].
32. I. S. Gibin and P. E. Kotlyar, *Applied Physics*, No. 3, 76 (2020) [in Russian].