

Матричный оптико-акустический приемник ТГц излучения с нанооптоэлектромеханическими элементами на основе перфорированного SLG графена

И. С. Гибин, П. Е. Котляр

Рассмотрено развитие неохлаждаемых многоэлементных приемников излучения на основе оптико-акустических преобразователей от первого в истории техники матричного приемника Голя до современных конструктивных решений, включающих применение графеновых разделительных мембран. Проведены обобщенные расчеты чувствительности мембран, выполненных на основе графенов и традиционных материалов, таких как полиметилметакрилат и нитрид кремния. Анализируется перспективность применения однослойного графена (SLG – single-layer graphene), как наиболее перспективного материала для выполнения мембран. Показано, что гексаграфен $C_{63(6)}$ является идеальным материалом для изготовления гибкой мембраны из-за его атомной толщины, высокой прочности, газонепроницаемости и высокой электропроводности. Показано, что повышение чувствительности оптоакустических приемников излучения (ОАПИ) при изготовлении мембран из графенов позволяет конструировать матричные системы с малыми диаметрами мембран при сохранении метрологических параметров однокамерных ОАПИ приборов. Рассмотрена конструкция матричного оптико-акустического приемника ТГц излучения предельной чувствительности, в которой используется перфорированный SLG графен.

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

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

Reference: I. S. Gibin and P. E. Kotlyar, Applied Physics, No. 3, 76 (2020).

Введение

Совокупность уникальных характеристик, присущих оптико-акустическим приемникам излучения (ОАПИ), таких как чрезвычайно широкий рабочий диапазон используемых длин волн (0,4–8000 микрон), высокое значение чувствительности (1×10^5 В/Вт) и ее относительное постоянство во всей рабочей области, высокая обнаружительная способность ($7,0 \times 10^9$ см·Гц^{0,5}/Вт), низкий уровень эквивалентной мощности шума (NEP) порядка 1×10^{-10} Вт/Гц^{0,5}, достаточно малое время задержки ответа, порядка 10 мс и возможность использова-

ния устройства без охлаждения обеспечили широкое использование ОАПИ в основном, в инфракрасной и терагерцовой спектроскопии, аналитическом приборостроении и прецизионной метрологии [1, 2].

В настоящее время наблюдается резкая активизация исследований по созданию матричных ОАПИ инфракрасного и терагерцового диапазонов, необходимых для многих применений, таких как системы технического зрения, спектральное и многоцветное тепловидение.

Матричные детекторы с ОАПИ

Известно, что впервые матричный ОАПИ с 61 ячейкой для спектрального диапазона 8–14 мкм был сконструирован Г. Залем и М. Голеем для обнаружения воздушных целей и представлен для эксплуатационных испытаний в Береговой артиллерийский совет (Форт Монро, штат Вирджиния) в ноябре–декабре 1938 года. В открытой печати описание устройства появилось лишь в 1946 г. [3].

В основу устройства была положена оптико-акустическая ячейка Хейса [4]. Корпус блока рас-

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

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

Институт автоматики и электрометрии СО РАН.

Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика

Коптюга, 1.

Тел.: +7(913) 464-27-06; +7(903) 935-16-31.

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

Статья поступила в редакцию 02 июня 2020 г.

© Гибин И. С., Котляр П. Е., 2020

ширительных камер устройства представлял собой стальной диск, в котором было выполнено 61 отверстие, которые расположены по гексагональной сетке (см. рис. 1). Торцы диска были подвергнуты оптической шлифовке. Залей и Голей заменили расположенный в расширительной камере Хейса поглощающий исследуемое излучение элемент, представлявший собой мелкодисперсную форму древесного угля – «fluff», и занимавший большую часть полости, поглощающей пленкой. Новый теплопоглощающий элемент представлял собой коллодиевую пленку толщиной около 500 Å с вакуумным напылением тонкого слоя сурьмы. Этим обеспечивалась малая теплоемкость поглотителя и тепловая развязка от стенок расширительной камеры.

Блок детектирующих гибких мембран представлял собой латунную пластину с аналогичной системой отверстий. Соединения между блоками осуществлялись с помощью отдельных медных трубок. Все 61 отверстия расширительных камер перекрывались одной большой термопоглощающей пленкой. Детектирующая гибкая металлическая мембрана Хейса была заменена коллоидной пленкой толщиной приблизительно 300 Å, перекрывавшей все отверстия латунного блока. Система камер 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.

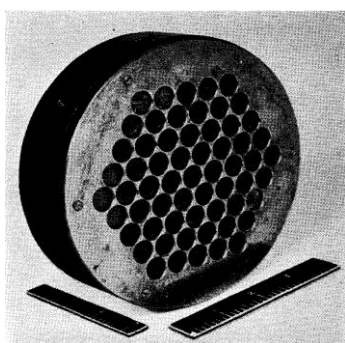


Рис. 1. Фотография 61 ячейчатого ИК матричного ОАПИ по [3].

Первый в истории техники ИК матричный фотоприемник был неотъемлемой частью первой армейской радиолокационной системы США SCR-268-TI.

Проблемы, связанные с попытками создания матричных неохлаждаемых приемников излучения ИК- и ТГц-диапазонов, анализировались в [2, 5].

В настоящее время наиболее распространенными для ИК-области являются матрицы микроболометров, объем выпуска которых превышает

выпуск ИК-детекторов всех разновидностей вместе взятых. Несмотря на столь жесткую конкуренцию, в последнее 20-летие наблюдается заметная активизация попыток создания матричных детекторов с ячейками Голя.

Известны работы последних лет по созданию матричного приемника с ячейками на базе одиночных оптико-акустических преобразователей, размеры которых сопоставимы с характерной рабочей длиной волны.

В патенте США 7045784 В1 (Method and apparatus for micro-Golay cell infrared detectors [6]) описано устройство, которое представляет собой герметизированную сборку элементарных ячеек Голя, выполненную на микроканальной пластине (МКП).

В работах Новосибирского филиала Института физики полупроводников СО РАН «КТИПМ» [7] детально описываются технология изготовления и метрологические характеристики модуля неохлаждаемого матричного ФПУ.

Теории оптико-акустических приемников было посвящено значительное количество работ, в которых в основном рассматривались теплофизические процессы возбуждения звуковых колебаний под действием прерывистого потока радиации (геометрия камер, конструкция поглощающего элемента) и только в немногих [8–10] – пороговая чувствительность, определяемая конструкцией гибкой мембраны и способом считывания ее прогиба.

Цепочка преобразований в оптико-акустических приемниках включает: поглощение излучения специальным поглощающим элементом, преобразование поглощенного излучения в тепло, нагрев газа, заполняющего расширительную камеру, расширение газа и создание избыточного давления в расширительной камере. На этом этапе процессы описываются следующим выражением:

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

где P_0 – статическое давление газа в расширительной камере; T – термодинамическая температура; G – тепловая проводимость газ-камеры; C_v – теплоемкость газа, заполняющего расширительную камеру; ω – круговая частота модуляции; Q – амплитуда теплового потока, поглощенного в камере.

Все эти процессы очень хорошо изучены и предельно оптимизированы.

Под чувствительностью мембранного узла обычно понимается отношение изменения величины прогиба центра плоской мембраны к вызвавшему этот прогиб изменению давления. Из-

вестно [11], что величина прогиба γ центра плоской мембраны, закрепленной по контуру, при малых перемещениях под действием давления P вычисляется по формуле (2) и может быть представлена как произведение парциальных чувствительностей (3):

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

$$\gamma = \gamma_M \times \gamma_\Gamma = \frac{3(1-\sigma^2)R^4}{16E} \frac{1}{h^3} \quad (3)$$

где R – рабочий радиус мембраны (по контуру закрепления); h – толщина мембраны; E , σ – модуль упругости, кГ/см² и коэффициент Пуассона материала мембраны соответственно; γ_M – составляющая чувствительности, обусловленная физическими свойствами материала мембраны; γ_Γ – составляющая чувствительности, обусловленная геометрией мембраны.

Из приведенного выражения γ_Γ следует, что уменьшение диаметра чувствительных элементов сопровождается катастрофическим падением чувствительности, которое лишь частично может быть компенсировано уменьшением толщины мембраны.

В описаниях конструкций серийно производимых отечественных и зарубежных ОАПИ геометрические параметры и материал разделительной гибкой мембраны не указываются. Как правило, приводится лишь площадь приемной поверхности, которая колеблется от 7 до 60 мм², что соответствует диаметрам ячейки от 3 до 9 мм. В общем случае диаметр гибкой мембраны не обязательно равен диаметру расширительной камеры, но имеет тот же порядок. Столь большие камеры практически непригодны для матричных преобразователей больших размерностей [1, 12, 13].

Следовательно, создание матричных ОАПИ, обладающих значениями чувствительности, сопоставимой с достигнутой одиночными устройствами большой апертуры, требует использования принципиально новых мембранных материалов.

Графеновые мембраны

В настоящее время лучшие мембраны изготавливаются из тончайших слоев силикона или полиамида (ПАК-3, ПАК-5) толщиной несколько десятков нанометров с отражающим металлическим покрытием толщиной порядка 100 ангстрем [14].

Мембраной называется тонкая, равномерно растянутая пленка, обладающая распределенной инерцией и упругостью. Инерция мембраны

характеризуется массой единицы площади ρ (в кг/м²), а упругость – силой натяжения τ (в Н·м). Из определения следует, что минимальной инерцией будут обладать предельно тонкие мембраны, изготовленные на основе 2D материалов.

Графен, толщина одного слоя которого составляет 0,335 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 (≈ 130 ГПа) и превосходные упругие свойства (максимальная степень упругой деформации составляет $\approx 25\%$). Помимо указанного графен обладает высокой электропроводностью, непроницаемостью для большинства жидкостей и газов, практически полной прозрачностью и химической инертностью [15, 16].

Авторами были выполнены обобщенные расчеты чувствительности мембран, выполненных как на основе традиционных материалов: серебро, полиметилметакрилат, нитрид кремния, так и из однослойного *SLG* классического графена и его аллотропных модификаций [17] и показано, что графен является идеальным материалом для изготовления гибкой мембраны из-за его атомной толщины, высокой прочности, газонепроницаемости и высокой электропроводности.

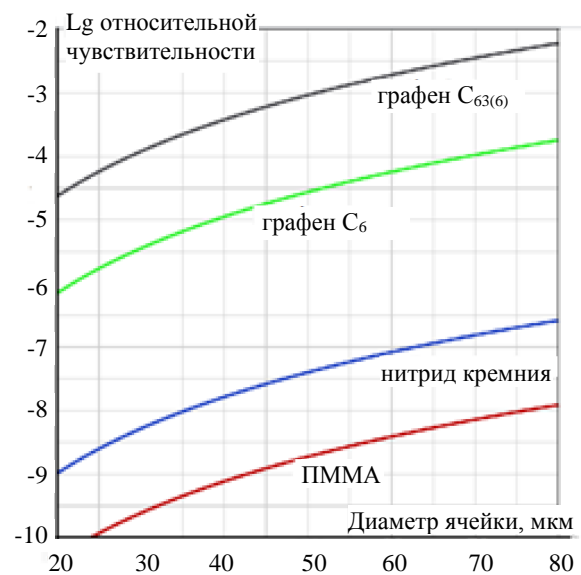


Рис. 2. Зависимость Lg относительной чувствительности гибкой мембраны от её диаметра для: графена C_6 , гексаграфена $C_{63(6)}$, нитрида кремния толщиной 10 нм и полиметилметакрилат ПММА толщиной 40 нм.

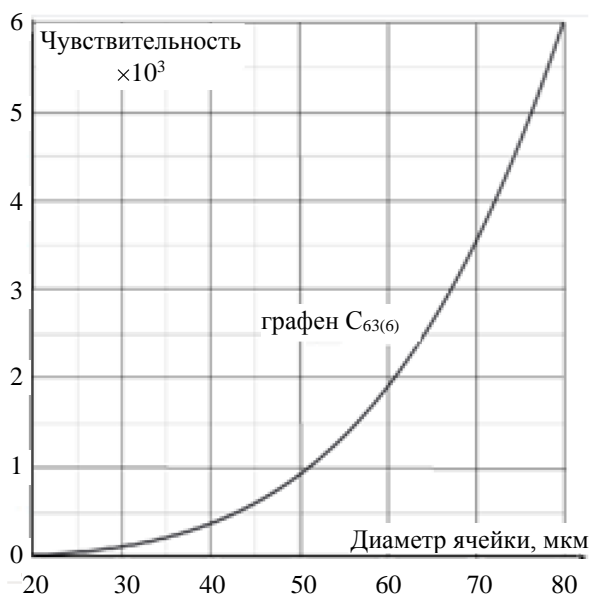


Рис. 3. Зависимость чувствительности гибкой мембраны из гексаграфена $C_{63(6)}$ от её диаметра.

Результаты расчетов показывают, что сравнительное повышение чувствительности при изготовлении мембран из классического SLG графена составляет порядка 9 000, а из гексаграфена порядка 300 000 по сравнению с наиболее чувствительными мембранами из полиметилметакрилата.

Использование для изготовления мембран SLG графенов предельно малой толщины 0,335 нм, позволяет перейти к конструкциям ОАПИ с диаметром отдельной ячейки порядка десятков мкм, при сохранении чувствительности, сопоставимой с достигнутой одиночными устройствами большой апертуры.

Матричный оптико-акустический преобразователь с SLG мембраной

Современный оптико-акустический преобразователь объединяет в себе два узла: собственно, оптическую ячейку, в которой происходит преобразование поглощенного входного радиационного потока в тепловую волну с частотой модуляции потока, и систему преобразования акустического давления тепловой волны в считываемый сигнал. Наряду с чувствительностью основной характеристикой матричных преобразователей излучения ИК- и ТГц-диапазонов является разрешающая способность, которая определяется возможностью предельного уменьшения размеров элементарных оптико-акустических ячеек и расстояний между ними. Таким образом, размерность матрицы определяется компромиссом между требуемой чувствительностью и разрешающей способностью. Ми-

нимальные 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 мкм.

Преобразователь представляет собой гибридную конструкцию, состоящую из оптико-акустической фотоприемной матрицы и сопряженной с ней с помощью индиевых столбиков кремниевой микросхемы такой же размерности, выполняющей функции накопления, усиления и коммутации фотосигнала.

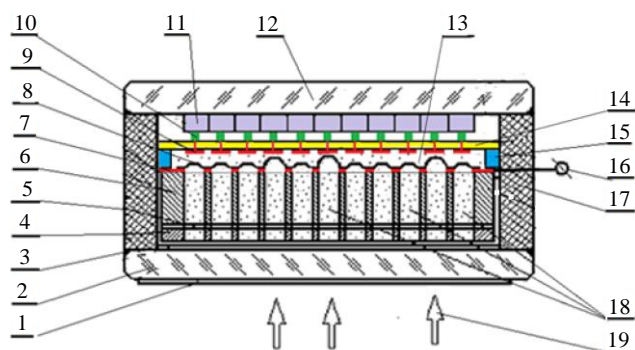


Рис. 4. Структура неохлаждаемого матричного оптико-акустического преобразователя с SLG мембраной: 1 – просветляющее покрытие; 2 – входное окно; 3 – герметизирующий клеевой слой; 4 – нижний блок рабочих ячеек; 5 – поглощающий слой; 6 – верхний блок рабочих ячеек; 7 – подстилающий контактный слой золота; 8 – графеновый мембранный слой; 9 – неподвижные электроды динамических конденсаторов; 10 – индиевые микростолбики; 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 – корпусной блок матрицы; 18 – расширительные камеры ОАП; 19 – анализируемое излучение.

Фотоприемная матрица состоит из двух блоков (нижний 4, верхний 6), выполненных из фотоситалла и установленных в корпусной шайбе 17. Через герметизирующий клеевой слой 3 шайба закрыта входным окном 2 с просветляющим покрытием 1. Геометрическое положение отверстий в блоках 4 и 6, образующих расширительные камеры ОАП, определяется структурой используемого мультиплексора. Внутри каждой рабочей камеры, между блоками 4 и 6 располагается поглощающий элемент 5 в виде тонкой пленки сурьмы или алюминия. Максимальное поглощение 50 % излучения соответствует толщине пленки, имеющей сопротивление при поверхности 1 см²,

равное половине волнового сопротивления свободного пространства 188 Ом. Толщина поглощающей пленки порядка 0,01–0,05 мкм. 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 микроперфорированного *SLG* графена, наложенного на подстилающий слой золота. Герметизация расширительных камер «краевая заделка микромембран» осуществляется за счет сил Ван-дер-Ваальса. Микроперфорация *SLG* графена может выполняться зондовым микроскопом, который обладает атомным разрешением и способен детектировать в двумерном кристалле отверстия атомного размера. Зонд микроскопа можно использовать для прожигания отверстий диаметром от 1 до 100 нанометров путём подачи на него короткого импульса напряжения [18].

Краевая микроперфорация графенового слоя обеспечивает выравнивание давления по обе стороны мембраны путем перетекания газа из расширительных камер в общую компенсационную камеру и, тем самым, восстановление положения гибкой мембраны в исходное положение в моменты, когда поток входного излучения перекрыт обтюратором, и компенсацию изменений внешнего давления и температуры, заменяя традиционные микрокапиллярные каналы. Диаметр отверстий микроперфорации должен обеспечивать считывание информации о величине прогиба гибкой мембраны.

Расширительные и компенсационная камеры заполняются газом с низкой теплоемкостью и высокой теплопроводностью. При заполнении камер гелием обеспечивается постоянная времени порядка 1 мс, а при заполнении ксеноном постоянная времени возрастает до нескольких десятков мс, однако значительно возрастает чувствительность.

Выбор конструктивной схемы считывания информации о прогибе гибкой мембраны определяется оптическими свойствами и электропроводностью графена. Графен прозрачен во всем диапазоне длин волн видимого света и ближней части ИК-излучения и является наиболее электропроводящим из известных материалов. Именно сочетание этих свойств является решающим при выборе конденсаторной (Хейсовской) схемы считывания [17]. В [9] сделан вывод о том, что «приемник с конденсаторным микрофоном при соблюдении оптимальных условий имеет ту же пороговую чувствительность, какую имеют приемники с оптическим».

Блок динамических конденсаторов расположен в компенсационной камере 13 и образован общим графеновым слоем 8 и переходной платой неподвижных электродов 14, расположенных непосредственно напротив перекрытых графеновым слоем расширительных камер 18. Между верхним блоком рабочих ячеек 6 и переходной платой неподвижных электродов 14 устанавливается распорная шайба микрофонного блока 15, нормирующая межэлектродный зазор. Неподвижные электроды 9 через переходную плату неподвижных электродов 14 соединяются с индиевыми микростолбиками 10 мультиплексора.

Анализируемое излучение 19 проходит через входное окно 2 (выполненное из прозрачного в исследуемом диапазоне длин волн материала, отсекающего коротковолновую часть спектра, но имеющее просветляющее покрытие 1 на наружной плоскости), проникает в систему расширительных камер 18 и поглощается в тонкой металлической пленке 5, нагревая ее. Нагретый поглощающий элемент 5 нагревает газ, заполняющий камеру. За счет модуляции входного излучения возникает тепловая волна, давление которой приводит к деформации графенового слоя и смещению его (над каждой расширительной камерой), уменьшая таким образом зазор между обкладками динамического конденсатора. Изменение емкости динамического конденсатора приводит к изменению электрического потенциала затвора входного каскада сопряженного интегрального усилителя и появлению на выходе усилителя электрического сигнала, пропорционального смещению центра графеновой микромембраны.

Таким образом, пространственное распределение электромагнитной энергии входного анализируемого излучения преобразуется в совокупность электрических сигналов на выходе сопряженной интегральной матрицы электронных усилителей 11.

Предлагаемая конструкция принципиально отличается от существующих устройств использованием в качестве мембранного материала однослойного перфорированного графена с краевой перфорацией.

Заключение

Предложенная авторами конструкция матричного неохлаждаемого приемника ИК- и ТГц-излучения базируется на классических принципах построения известных матричных фотоприемных устройств, состоящих из оптико-акустической фотоприемной матрицы и сопряженной с ней с помощью индиевых столбиков с стандартной кремниевой КМОП-микросхемой такой же раз-

мерности, выполняющей функции накопления, усиления и коммутации сигнала. В связи с тем, что графен, используемый для изготовления разделительных мембран, является самым тонким из известных пленочных материалов, такое устройство может быть отнесено к нанооптоэлектромеханическим. Микроперфорация мембран позволяет значительно упростить конструкцию ОАПИ в матричном исполнении.

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

Предложенные матричные ОАПИ инфракрасного и терагерцового диапазонов могут быть эффективно использованы для многих современных применений, таких как терагерцовые радары, системы технического зрения, спектральное и многоцветное тепловидение.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Детектор Голя [Электронный ресурс]. /Тидекс /Продукты /ТГц приборы /Детекторы Голя [сайт] – http://www.tydexoptics.com/pdf/Golay_cell.pdf.

2. Гибин И. С., Котляр П. Е. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 2. С. 117.
3. Zahl H., Golay M. // The Review of Scientific Instruments. 1946. Vol. 17. № 11. P. 511.
4. Hayes H. V. // Rev. Sci. Instr. 1936. Vol. 7. № 5. P. 202.
5. Гибин И. С., Котляр П. Е. // Прикладная физика. 2019. № 4. С. 80.
6. Патент US 7045784 B1. Method and apparatus for micro-Golay cell infrared detectors, 2003.
7. Кузнецов С. А., Федоринин В. Н., Гельфанд А. В., Паулиш А. Г. Патент RU 2414688, МПК G01J 5/42. Матричный приёмник терагерцового излучения. 2011. Бюл. № 8.
8. Golay Marcel J. E. // Rev. Sci. Instr. 1947. Vol. 18. P. 347.
9. Панкратов Н. А. // Оптико-механическая промышленность. 1957. № 2. С. 16.
10. Свидзинский К. К., Фетисов Е. А. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 367.
11. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов. – М.: Машиностроение, 1981.
12. Мозер Й.-Ф., Штефен Г., Кнейбольд Ф. // УФН. 1969. Т. 99. Вып. 3. С. 469.
13. Мосс Т. С. // УФН. 1962. Т. LXXVIII. № 1. С. 93.
14. Аюпов Б. М., Баковец В. В., Паулиш А. Г. и др. // Журнал структурной химии. 2010. Т. 51. С. 73.
15. Bunch J. S. et al. // Science. 2007. Vol. 315. P. 490. doi:10.1126/science.1136836.
16. Lee C., Wei X., Kysar J. W., Hone J. // Science. 2008. Vol. 321. P. 385–8.
17. Гибин И. С., Котляр П. Е. // Прикладная физика. 2020. № 2. С. 90.
18. Заркевич Н. А. // Труды МФТИ. 2012. Т. 4. № 3. С. 85.

PACS: 85.30Dw84.40 Ba

Matrix optical-electronic terahertz radiation receiver with nanooptoelectromechanical elements on the base of perforated SLG graphene

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

Received June 2, 2020

The article observes the development of uncooled multielement radiation receivers on the base of optical-acoustic converters from the very first Golay cell pneumatic detector to the modern constructive decisions including the use of graphene separation membranes. The article demonstrates generalized calculations of membranes sensitivity, fulfilled on the base of graphenes and traditional materials, such as polymethylmethacrylate and silicon nitride. The article analyses the prospects of the use of single-layer graphene (SLG) as the most perspective material for membrane manufacture. Hexathreegrphene is

shown to be the ideal material for flexible membrane production due to its atomic thickness, high resistance, gastightness and high electric conductivity. It is shown that gain in sensitivity of optical-acoustic radiation receivers during the manufacture of membranes from graphene allows to construct matrix systems with small diameter membranes while saving metrological parameters of single-stage optical-acoustic radiation receiving devices. The article sees into the construction of matrix optical-acoustic receiver of terahertz radiation of the top-of-the-range sensitivity in which perforated SLG graphene is used.

Key words: membrane, sensitivity, one-layer graphene, elastic characteristics, optical properties.

REFERENCES

1. Golay detector [electronic resource]. /Tidex/Products/THz devices/ Golay detectors [site] – http://www.tydexoptics.com/pdf/Golay_cell.pdf.
2. I. S. Gibin and P. E. Kotlar, *Success of applied physics* **6** (2), 117 (2018).
3. H. Zahl and M. Golay, *The Review of Scientific Instruments* **17** (11), 511 (1946).
4. H. V. Hayes, *Rev. Sci. Instr.* **7** (5), 202 (1936).
5. I. S. Gibin and P. E. Kotlar, *Applied physics* No. 4, 80 (2019).
6. Patent US 7045784 B1. Method and apparatus for micro-Golay cell infrared detectors, 2003.
7. S. A. Kuznetsov, V. N. Fedorinin, A. V. Gelfand, and A. G. Paulish, Patent RU 2414688, МПК G01J 5/42. Matrix photo receiver of terahertz radiation. 2011. Bul. № 8.
8. J. E. Golay Marcel, *Rev. Sci. Instr.* **18**, 347 (1947).
9. N. A. Pankratov, *Optical-mechanical industry*, № 2, 16 (1957).
10. K. K. Svidzinsky and E. A. Fetisov, *Success of applied physics* **1** (3), 367 (2013).
11. L. E. Andreeva, *Elastic elements of devices* (Mechanic engineering, Moscow, 1981).
12. J. F. Mozer, G. Stephen, and F. Kneibek, *Successes of physical sciences* **99** (3), 469 (1969).
13. T. S. Moss, *Successes of physical sciences* **LXXVIII** (1), 93 (1962).
14. B. M. Aupov, V. V. Bakovets, A. G. Paulish and Co., *Structural Chemistry Journal* **51**, 73 (2010).
15. J. S. Bunch et al., *Science* **315**, 490 (2007) doi:10.1126/science.1136836.
16. C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar, and J. Hone, *Science* **321**, 385–8 (2008).
17. I. S. Gibin and P. E. Kotlar, *Applied physics*, № 2, 90 (2020).
18. N. A. Zarkevich, *Proceedings of Moscow Physical – Technical Institute* **4** (3), 85 (2012).