

## Приемники излучения терагерцового диапазона (обзор)

И. С. Гибин, П. Е. Котляр

*Приведен обзор приемников излучения терагерцового диапазона. Отмечается, что терагерцовое излучение обладает большой проникающей способностью. Однако отсутствие источников и чувствительных детекторов терагерцового излучения в течение многих лет сдерживало исследования в этой области. В работе рассмотрены различные аспекты применения терагерцового излучения, а также основные виды и типы приемников этого излучения. Проведен анализ фотонных и тепловых приемников. Приведены подробные сведения о терагерцовых приемниках на основе ячеек Голя. Отмечается, что в настоящее время наблюдается резкая активизация исследований по созданию матричных детекторов с ячейками Голя. Для многих применений, таких как спектральное и многоцветное тепловидение, тепловые детекторы более применимы по сравнению с охлаждаемыми фотонными детекторами.*

*Ключевые слова:* терагерцовое излучение, ячейка Голя, фотонные приемники, тепловые приемники, оптико-акустические приемники, многоцветное тепловидение.

### Введение

Терагерцовый диапазон частот электромагнитного спектра является промежуточным между инфракрасным спектральным диапазоном со стороны коротких волн и радиочастотным СВЧ-диапазоном со стороны длинных волн. Терагерцовое излучение, как и радиоволны, обладает большой проникающей способностью (способно проникать через большой класс непроводящих материалов, таких как ткань, бумага, картон, дерево, камень, керамика, однако поглощается водой и металлом), и в то же время излучение этого диапазона легко фокусируется, подобно инфракрасному. Однако в этой спектральной области перестают хорошо работать как оптические методы – со стороны коротких волн, так и радиофизические методы – со стороны длинных волн. Поэтому оказывается очень сложным создать мощные и компактные источники и чувствительные приемники излучения для терагерцового спектрального диапазона. Отсутствие источников и чувствительных детекторов терагерцового излучения в течение

многих лет ограничивали как исследования, так и приложения.

Практически весь спектр исследовательских и прикладных задач может быть решен с помощью двух систем. Активные системы характеризуются использованием достаточно мощных источников терагерцового излучения, освещающих объект, и регистрацией отраженного либо рассеянного излучения. В таких системах оказывается достаточным иметь относительно малочувствительные приемники излучения, которые необязательно охлаждать. В пассивных системах, которые оперируют с терагерцовым излучением, испускаемым собственно объектом, т. е. без внешней терагерцовой подсветки, необходимо иметь на несколько порядков величины более чувствительные приемники излучения, которые необходимо охлаждать, причем желательно до очень низких температур вблизи абсолютного нуля.

В течение длительного времени в качестве источников субмиллиметрового излучения использовались излучатели типа «черного тела» и некоторые газовые лазеры. Ситуация изменилась в конце 1980-х, когда успехи в генерации и детектировании когерентных коротких импульсов ТГц-излучения стимулировали всплеск фундаментальных и прикладных исследований. Два новых типа источников терагерцового излучения вызвали рост интереса к длинноволновому излучению. Первый тип источника – генераторы терагерцового излучения, излучение в которых индуцируется короткоимпульсными (главным образом, фемтосекунд-

---

Гибин Игорь Сергеевич, гл.н.с., д.т.н.  
Котляр Петр Ефимович, с.н.с., д.г.-м.н.  
Институт автоматизации 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 5 марта 2018 г.

© Гибин И. С., Котляр П. Е., 2018

ными) лазерами. Имеются два основных варианта таких источников: источники, использующие фотопроводящие структуры и использующие электрооптические материалы [18, 31]. Второй вид источников терагерцового излучения – лазеры на свободных электронах [29], способные генерировать очень интенсивное и фактически монохроматическое излучение.

### Терагерцовый диапазон

Терагерцовый диапазон частот электромагнитного спектра (ТГц-диапазон) лежит между областью миллиметровых длин волн и инфракрасным диапазоном. В соответствии с ГОСТ 24375–80

и рекомендациями Международного союза электросвязи, ТГц-диапазон определяется как диапазон частот от 300 ГГц до 3 ТГц (диапазон длин волн от 1 до 0,1 мм). В соответствии со стандартом Международной организации по стандартизации (ISO), ТГц-диапазон лежит в области дальнего инфракрасного спектра, границы которого лежат в интервале 300 ГГц и 6 ТГц. В наиболее широкой интерпретации ТГц-диапазон занимает область частот от 100 ГГц до 10 ТГц (диапазон длин волн от 3 мм до 30 мкм). Таким образом, в определении границ ТГц-диапазона как со стороны нижних, так и со стороны верхних частот, а также границ лежащего рядом дальнего инфракрасного диапазона имеется неоднозначность (рис. 1).

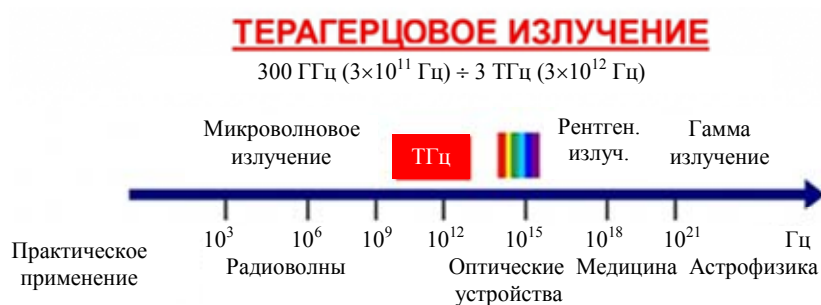


Рис. 1. Положение ТГц-диапазона на частотной шкале по [7] с изменениями.

В 2001 г. Кси-Ченг Жангом для терагерцового излучения (ТГцИ) введен в употребление термин «Т-лучи» [47]. Ранее такое излучение называлось субмиллиметровым, а еще раньше – далеким инфракрасным. Интерес к терагерцовому излучению обусловлен следующими его свойствами [19, 47, 51]:

ТГцИ – это неионизирующее излучение (энергия фотонов 0,04–0,004 эВ) (терагерцовый квант энергии меньше рентгеновского на девять порядков, а изображение для биосред является более контрастным по сравнению с ИК и оптическими);

ТГцИ хорошо проходит через мутные среды и мелкодисперсные материалы из-за резкого подавления рэлеевского рассеяния ( $1/\lambda^4$ ), подходит для определения вредных примесей в атмосфере (экологический мониторинг);

ТГцИ вследствие сильного поглощения большинством материалов предоставляет информацию о физических свойствах материалов;

ТГцИ – это область колебаний с малой энергией, в особенности у неорганических и металлоорганических соединений, колебаний биологически важных коллективных мод ДНК и белков (эффективная диагностика опухолей). Позволяет проводить исследование скелетных и крутильных колебаний, а также колебаний решетки твердых тел;

ТГцИ перспективно для транзисторов нового поколения, работающих на более высоких, чем сейчас частотах (высокоскоростная беспроводная связь);

ТГцИ эффективно для изучения вселенной, огромная часть излучения которой приходится на практически не изученный терагерцовый диапазон.

Заметим, что терагерцовое излучение эффективно поглощается атмосферным воздухом (узкие окна прозрачности существуют около 35, 96, 140 и 220 ГГц).

На рис. 2–5 представлены примеры решения различных прикладных задач с использованием терагерцового излучения.

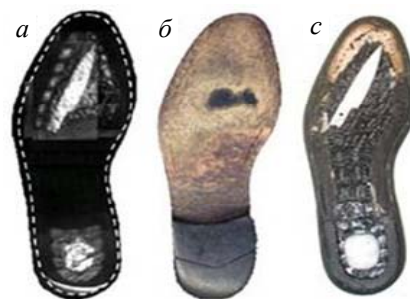
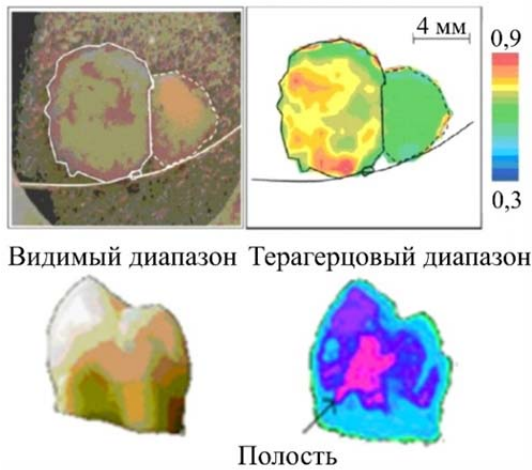
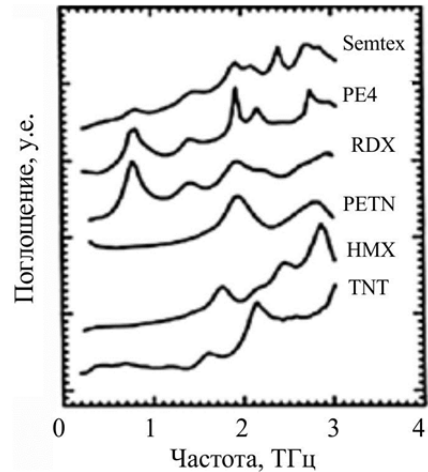


Рис. 2. Изображение керамического ножа и взрывчатого вещества Semtex, спрятанных в подошве обуви. Слева представлено терагерцовое изображение ботинка, справа и в центре – изображение в видимом диапазоне частот. Изображение справа сделано с удаленной подошвой [8].



**Рис. 3.** Использование терагерцовых систем построения изображений в медицинских целях. Сверху представлен пример обнаружения злокачественной опухоли на ранней стадии развития. При этом красным цветом представлены раковые клетки. На изображении снизу представлено обнаружение полостей при диагностике целостности зубов, выполненное в терагерцовом диапазоне частот [8].



**Рис. 4.** Использование терагерцовых систем в целях дистанционной идентификации химических веществ. Характеристики пропускания некоторых взрывчатых веществ (для наглядности характеристики приведены с вертикальным сдвигом) [10].

**Рис. 5.** Пример работы импульсной активной системы радиовидения, работающей с отраженным от объекта излучением [15]. Компенсация задержки в тракте сигнала позволяет получать изображения слоев, расположенных внутри исследуемого объекта. Слева сверху приведена фотография исследуемого объекта (чемодан) в видимом диапазоне частот. Слева внизу приведено терагерцовое изображение поверхности объекта. Справа сверху приведено терагерцовое изображение пакета, лежащего внутри чемодана. Справа внизу представлено терагерцовое изображение содержимого пакета. На последней картинке отчетливо видны нож и пистолет, лежащие внутри исследуемого багажа.



Специфика ТГц-диапазона, как промежуточного между микроволновым и ИК, позволяет выделить два основных подхода к разработке методов детектирования: продвижение «вверх» по диапазону (частот) электронных микроволновых приборов и перенос «вниз» методов создания оптоэлектронных устройств.

### Терагерцовые приемники излучения

Известно, что приемники излучения классификационно делятся на следующие классы:

- класс фотонных (квантовых) фотоприемников, в которых энергия фотона преобразуется в некоторую первичную реакцию фотоприемника;

- класс тепловых, в которых энергия фотонов преобразуется в тепло, а реакция фотоприемника возникает как следствие повышения температуры чувствительного элемента.

Принципиальным недостатком фотонных фотоприемников является то обстоятельство, что энергия фотона обратно пропорциональна длине волны излучения ( $E = hc / \lambda$ , где  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света;  $\lambda$  – длина волны), что делает их применение невозможным при длинах волн более 20 мкм даже в случае криогенного охлаждения.

Тепловые фотоприемники имеют постоянную обнаружительную способность в диапазоне 1–2000 мкм, а в диапазоне 20–2000 мкм являются

фактически единственным классом фотоприемных устройств, пригодных для практического применения (см., например, Киес Р. Дж. и др. Фотоприемники видимого и ИК-диапазонов. М. Радио и связь, 1985, стр. 64, рис. 2.22).

Удельная обнаружительная способность фотоприемников в интервале 1–1000 мкм представлена на рис. 6.

В последние годы появилось большое число оригинальных и обзорных работ, посвященных приемникам дальнего инфракрасного и терагерцового диапазонов [28, 30, 36, 45, 49]. Вопросам конструирования неохлаждаемых приемников излучения посвящены работы [17, 20, 21, 23]. Традиционно используемые в микроволновом и ИК-диапазонах тепловые приемники излучения [12, 19, 35, 41, 48] работают при температурах, близких к комнатной. К тепловым приемникам

относят различные виды болометров, пироэлектрические детекторы, оптоакустические преобразователи и др. Преимущества неохлаждаемых детекторов заключаются в относительной простоте действия, а также в их способности работать при комнатной температуре в широкой полосе частот. Их NEP (noise equivalent power) (эквивалентная мощность шумов – ЭМШ) находится в диапазоне  $10^{-9}$ – $10^{-11}$  Вт/Гц<sup>0,5</sup>, но их применение в ТГц-системах ограничивается низким быстродействием, которое, в лучшем случае, составляет десятки миллисекунд. Хотя неохлаждаемые детекторы обладают меньшей чувствительностью и большей инерционностью по сравнению с охлаждаемыми фотоэлектрическими МПИ, системы с такими приемниками не используют дорогостоящих устройств охлаждения, имеющих ограниченный срок наработки.

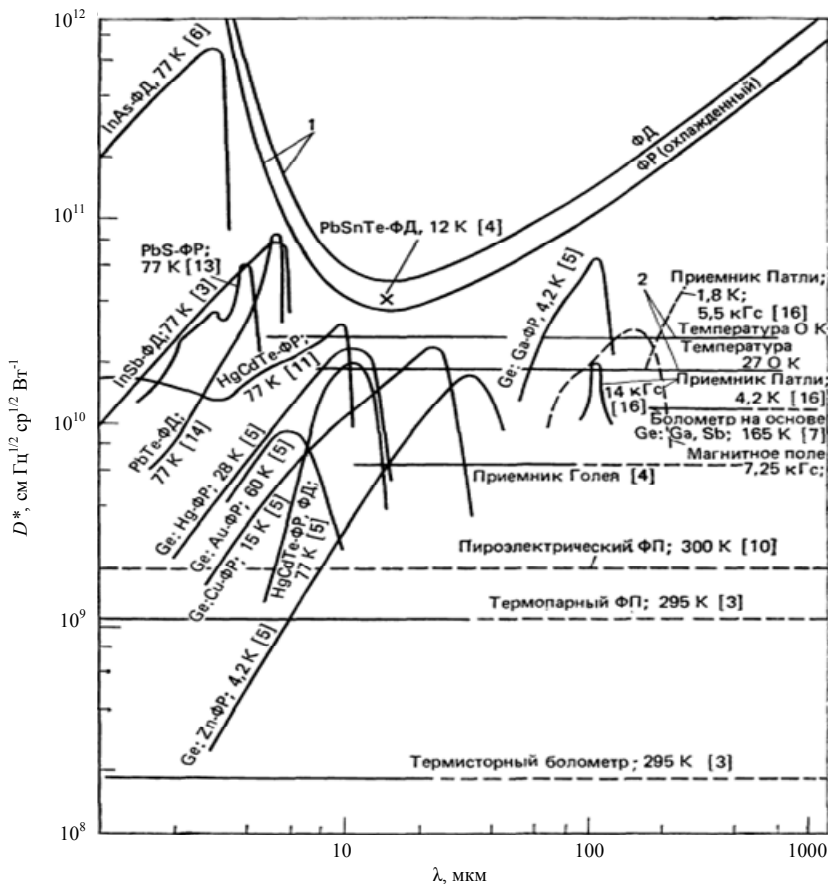


Рис. 6. Удельная обнаружительная способность фотоприемников  $D^*$  в интервале 1–1000 мкм по данным [48].

В классе тепловых приемников особого внимания заслуживает приемник Голея [3, 4, 14], превосходящий в 5–15 раз по предельной обнаружительной способности пироэлектрические, термопарные и термисторные болометры (тоже работающие без криогенного охлаждения), и относящийся к числу наиболее широкополосных. Приемник Голея представляет собой разновидность волномерических газовых термометров, в которых измеряется изменение объема (volume)

газа с изменением температуры, и основан на газовом законе Ж. Шарля.

### Ячейка Голея

В отечественной литературе одновременно существует несколько названий одного и того же устройства: пневматический приемник излучения [14], оптико-акустический приёмник [22], оптико-пневматический измерительный преобразователь

излучения [27], термопневматический детектор [25].

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

В 1597 г. Галилео Галилей изобрел 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 [42]. Французский ученый Ж. Шарль в 1787 г. нашел экспериментально зависимость давления газа от температуры при постоянном объеме. Газовый закон Шарля: *для данной массы газа отношение давления газа к его температуре постоянно, если объем газа не меняется.* 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.

В зависимости от конструкции разделительного элемента, воспринимающего разность давлений между расширительной и компенсационной камерами, газовые термометры делятся на термометры с жидкостным поршнем и термометры с гибкой мембраной.

Эволюция от газового термометра к пневматическому приемнику 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.

В основе оптико-акустического приемника (синоним пневматического приемника и ячейки Голея) инфракрасного излучения лежит обнаруженный в 1880 г. Александром Беллом [1] и исследованный Тиндалем [13] и Рентгеном [33] оптико-акустический эффект. Этот эффект заключается в том, что если газ, способный поглощать инфракрасную радиацию, подвергнуть облучению потоком модулированного инфракрасного излучения, то в результате возникает колебание температуры газа и его давления, а также акустические колебания. Частота колебаний зависит от частоты модуляции потока, а интенсивность колебаний — от способности данного газа поглощать инфракрасную радиацию и от интенсивности радиации.

Современный пневматический приемник (рис. 7) состоит из 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 покрытие. Поступающее в камеру излучение поглощается внутренней металлической пластиной и нагревает газ, который, расширяясь, изгибает зеркальную мембрану. Для того чтобы приемник не был подвержен изменениям внешнего 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 зеркальной мембраны.

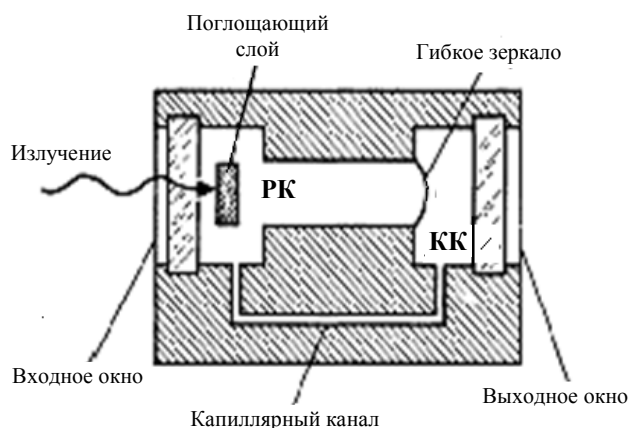


Рис. 7. Схема пневматического приемника ИК-излучения.

В 1936 г. Хейс [5] сообщил о ряде принципиальных усовершенствований классического газового термометра. Он поместил внутрь расширительной камеры специальный элемент, поглощающий исследуемое излучение, и применил принцип динамического конденсатора для отсчетной системы. Для этого одна из стенок расширительной камеры была выполнена в виде металлической мембраны, выполнявшей роль подвижной пластины, что позволяло свести измерение деформации к измерению электрической емкости.

В зависимости от конструкции поглощающего элемента газовые термометры могут быть не только широкополосными, но и селективными. В 1938 г. была опубликована работа М. Л. Вейнгерова [22], 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  $\text{CO}$ , двуокись углерода  $\text{CO}_2$ , метан  $\text{CH}_4$ . Как следствие, спектральная чувствительность такого устройства определяется спектром поглощения заполняющего камеру газа. Отсчетная система в устройстве М. Л. Вейнгера на основе динамического конденсатора повторяла устройство Хейса. В зарубежной литературе приемники такого типа носят название приемников Паттерсона-Мосса [36].

Разработчик радарных систем Марсель Голей (США) усовершенствовал приемник Хейса и использовал его для идентификации инфракрасных выбросов самолетов [3, 4, 14]. 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.

Пневматические приемники Голя фирмы Unicam Instrument (Кембридж, Англия) [34, 35] имеют (при площади приемной поверхности, равной  $7 \text{ мм}^2$ , частоте модуляции  $f = 11 \text{ Гц}$  и полосе пропускания усилителя  $\Delta f = 0,1 \text{ Гц}$ ) эквивалентную мощность шумов (ЭМШ) (noise equivalent power)  $\leq 5 \times 10^{-11} \text{ Вт}$ , причем, минимальное значение ЭМШ, равное  $3 \times 10^{-11} \text{ Вт}$ , остается, по-видимому, непреодолимым. В этом приемнике излучение поглощается в тонком слое алюминия, напыленном на полимерную пленку. Поглощение в алюминии практически постоянно в широкой области от ультрафиолетовых до миллиметровых волн. Окно приемника Голя должно быть прозрачно для излучения в исследуемой области. Для длин волн  $\lambda > 50 \text{ мкм}$  применяются кварцевые окна толщиной  $0,5 \text{ мм}$ . Поэтому чувствительность  $R$  практически постоянна от ультрафиолетовой до миллиметровой области и обычно заключается в пределах  $(3-4) \times 10^5 \text{ В/Вт}$ . Чувствительность начинает падать, когда длина волны становится сравнимой с толщиной слоя алюминия. Пневматические приемники при мощности излучения до  $3 \times 10^{-6} \text{ Вт}$  обладают линейностью чувствительности  $R$ , лучшей 1%. Преимущества пневматических приемников: постоянная и большая чувствитель-

ность в широкой области спектра и возможность работы при комнатной температуре. К недостаткам относятся относительно большая постоянная времени, чувствительность к механическим вибрациям и относительно большие значения ЭМШ по сравнению с охлаждаемыми тепловыми приемниками.

В пневматическом приемнике ИК-излучения ONERA (*Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales*) французского центра аэрокосмических исследований объединены оптимизация теплофизических процессов в расширительной камере, предложенная Голеем, и считывание деформации гибкой мембраны с помощью динамического конденсатора. Расширительная и компенсационная камеры заполнены ксеноном под давлением около  $90 \text{ мм.рт.ст.}$  В расширительную камеру помещена полупроницаемая пленка из коллодия с покрытием черным золотом толщиной в  $100 \text{ \AA}$ . Динамический конденсатор образован гибкой мембраной с серебряным покрытием и неподвижным электродом. По данным [41], обнаружительная способность устройства несколько выше, чем у приемника Голя, и достигает значения  $4 \times 10^9 \text{ см Гц}^{0,5} \text{ Вт}^{-1}$ . Постоянная времени составляет около  $20 \text{ мс}$  при частоте модуляции  $10 \text{ Гц}$ . Из неселективных приемников, работающих без охлаждения, приемник ONERA обладает наивысшей обнаружительной способностью, очень близкой к характеристикам идеальных тепловых приемников.

Упрощенную конструкцию пневматического приемника предложили А. А. Сивков и В. В. Гуд [44]. Его схема представлена на рис. 8. Здесь лучистая энергия поглощается поглотителем 5 и нагревает газ в камере 3, который, расширяясь, деформирует мембрану 4. Это приводит к изменению

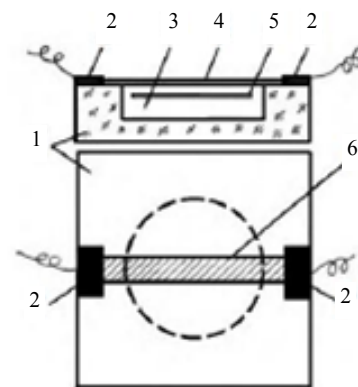


Рис. 8. Схема пневматического приемника А. А. Сивкова и В. В. Гуда [44]. 1 – стеклянный корпус; 2 – электроды; 3 – рабочая камера; 4 – мембрана; 5 – поглотитель; 6 – тензометрическая фольга.

электрического сопротивления тензометрической фольги 6. Авторы предполагали возможное улучшение всех характеристик, в частности, за счет сочетания тензометрического эффекта с болометрическим. Однако, прибор по рабочим параметрам значительно уступал серийным оптико-акустическим преобразователям (ОАП).

Постоянная времени оптико-акустического преобразователя 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 имеют типичное значение скорости отклика 20–30 мс. Однако снижение постоянной времени сопровождается падением чувствительности приемника [37, 43].

Отмеченное большое значение скорости отклика является основным недостатком голеевских детекторов и матриц на их основе. Однако для «смотрящих» тепловизионных систем, применяемых для регистрации медленно протекающих процессов или для наблюдения объектов с небольшими скоростями перемещения, этот недостаток практически несущественен.

Спектральная область чувствительности ОАП определяется поглощательными свойствами абсорбционной пленки и прозрачностью входного окна. Чувствительность ячейки Голея ограничена только температурным шумом теплообмена между поглощающей пленкой и газом, заполняющим приемник, поэтому можно получить очень высокую чувствительность ( $D^* \gg 3 \times 10^9$  (см Гц<sup>1/2</sup> Вт<sup>-1</sup>) и вольт-ваттная чувствительность  $10^5$ – $10^6$  В/Вт). Чувствительность устройства существенно зависит от частоты модуляции потока входного излучения (частотная чувствительность) и имеет явно выраженный максимум. На низких частотах спад чувствительности объясняется тем, что давление в расширительной камере успевает выровняться с давлением в компенсационной камере. На высоких частотах спад чувствительности обусловлен

инерционностью гибкой мембраны. Массу мембраны подбирают такой, чтобы акустический резонанс наблюдался при частоте, равной частоте модуляции или близкой к ней.

Для многих применений необходимо «многоцветное» тепловидение и для такой функции тепловые детекторы, обладающие постоянством удельной обнаружительной способности в предельно широком диапазоне длин волн, значительно более применимы по сравнению с охлаждаемыми фотонными детекторами.

Результаты анализа патентных материалов [50] показывают, что за последние 15 лет наблюдается резкая активизация исследований по созданию матричных детекторов с ячейками Голея в следующих направлениях: повышение пространственного разрешения, многоспектральный режим, перестраиваемость, стабильность диапазона.

Отечественная фирма «Tydex •J.S.Co» [9, 25] в настоящее время выпускает три модификации ячеек Голея, отличающихся материалом входного окна: GC-1P (окно-полиэтилен высокой плотности (HDPE)), GC-1T (окно-полиметилпентен (TPX)), GC-1D (окно-алмаз).

#### **Оптоакустический детектор GC-1D фирмы «Tydex •J.S.Co»**

Как уже отмечено, ячейка Голея является одним из наиболее эффективных детекторов терагерцового излучения. Она имеет превосходную чувствительность при комнатной температуре и неселективный фотоотклик в широком диапазоне длин волн. Основное применение: мониторинг и контроль среднего ИК и ТГц излучений.

Технические параметры ячеек Голея фирмы «Tydex •J.S.Co» представлены в табл. 1.

В табл. 2 представлены основные характеристики неохлаждаемых ТГц-детекторов по данным работы [26], а именно: эквивалентная мощность шума (NEP – noise equivalent power), быстродействие, диапазон рабочих частот.

Таблица 1

**Параметры ячеек Голея фирмы «Tudex •J.S.Co»**

|   |  |
|---|--|
| Диаметр входного конуса, мм   | 11,0   |
| Диаметр входного окна, мм   | 6,0  |
| Материал входного окна  | алмаз  |
| Рабочий диапазон длин волн, микрон  | 0,4–8000   |
| Рекомендуемая регистрируемая мощность, Вт, до   | $1 \times 10^{-5}$                                   |
| Оптимальная частота модуляции, Гц   | $15 \pm 5$   |
| Эквивалентная мощность шума (NEP) @ 15 Гц:<br>типичное значение, Вт/Гц <sup>1/2</sup><br>минимальное значение, Вт/Гц <sup>1/2</sup>   | $1,4 \times 10^{-10}$<br>$0,8 \times 10^{-10}$       |
| Оптическая чувствительность @ 15 Гц:<br>типичное значение, В/Вт<br>максимальное значение, В/Вт  | $1 \times 10^5$<br>$1,5 \times 10^5$                 |
| Скорость отклика:<br>типичное значение, мс<br>минимальное значение, мс  | 30<br>25   |
| Обнаружительная способность (D*) на апертуре входного конуса:<br>типичное значение, см $\times$ Гц <sup>1/2</sup> /Вт<br>максимальное значение, см $\times$ Гц <sup>1/2</sup> /Вт | $7,0 \times 10^9$<br>$11,0 \times 10^9$              |
| Рабочий диапазон давлений окружающей среды, мм.рт.ст  | $760 - 10^{-3}$                                      |
| Температура работы и хранения, °C   | 5–40   |
| Влажность, %  | без специальных требований                           |
| Вибрации  | рекомендуется избегать вибраций в диапазоне 1–100 Гц |
| Напряжение питания, В   | 100/115 $\pm$ 10 %, 220/230 $\pm$ 10 %               |
| Частота переменного тока, Гц  | 50–60  |
| Внешние размеры, Д $\times$ Ш $\times$ В, мм  | 126 $\times$ 45 $\times$ 87                          |
| Масса, кг   | 0,8  |

Таблица 2

**Характеристики неохлаждаемых терагерцовых детекторов**

| Тип детектора                                   | Частота модуляции (время отклика), Гц (с) | Рабочая частота, ТГц | Шумовая эквивалентная мощность, Вт/Гц <sup>0,5</sup> |
|---|---|----------------------|--|
| Ячейка Голея                                    | < 20                                      | < 30                 | $10^{-9} - 10^{-10}$                                 |
| Микроячейка Голея                               | < 30                                      | < 0,1                | $(1-3) \times 10^{-9}$                               |
| Пирозлектрик                                    | $(25 \times 10^{-6})$                     | < 20                 | $5 \times 10^{-10}$                                  |
| Микроболометры на основе VO <sub>x</sub>        | < 100                                     | < 4,3                | $> 3 \times 10^{-10}$                                |
| Микроболометры на основе Vi                     | < 10 <sup>6</sup>                         | < 3                  | $2 \times 10^{-10}$                                  |
| Микроболометры на основе Nb                     | –   | < 30                 | $5 \times 10^{-11}$                                  |
| Микроболометры на основе Ti                     | 530                                       | < 0,3                | $4 \times 10^{-11}$                                  |
| Микроболометры на основе Ni                     | 30  | < 0,1                | $2 \times 10^{-11}$                                  |
| Диоды Шоттки                                    | < 10 <sup>10</sup>                        | < 10                 | $> 10^{-10}$   |
| Диоды Шоттки (с нулевым смещением)              | –   | –                    | $2 \times 10^{-12}$                                  |
| Диоды Мотта                                     | –   | < 0,1                | $10^{-12}$   |
| Si MOSFET <sup>1</sup>                          | 10 <sup>4</sup>                           | 0,6                  | $3 \times 10^{-10}$                                  |
| Si FET <sup>1</sup>                             | –   | 0,7                  | $> 10^{-10}$   |
| Si CMOS <sup>1</sup>                            | –   | –                    | $5 \times 10^{-11}$                                  |
| Мембрана на основе SiN                          | < 200                                     | 1,6–4,3              | $10^{-9}$  |
| HgCdTe HEB                                      | < 10 <sup>8</sup>                         | 0,03–1,5             | $4 \times 10^{-10}$                                  |
| GaAs/InGaAs 3D плазмонный детектор <sup>1</sup> | $(10^{-9})$                               | 1                    | $8 \times 10^{-8}$                                   |
| Коммерческий GaAs HEMT <sup>1</sup>             | –   | 0,6                  | $3 - 10^{-8}$  |

<sup>1</sup> Измерение параметров производилось в узкой полосе частот.



В настоящее время определились и основные области применения ячеек Голея. Помимо традиционной ИК-спектроскопии добавилась ТГц-спектроскопия, аналитическое приборостроение и прецизионная метрология. Ниже представлены только два примера из этих областей.

По программе SOLAR-T Института космических исследований РАН разработано бортовое устройство ТГц-детектирования для наблюдения солнечных вспышек из стратосферы. Прибор предназначен для определения спектральных форм терагерцового излучения солнечных вспышек. Построенная система SOLAR-T, содержащая модули сбора данных и телеметрии, была успешно протестирована. В конструкции SOLAR-T использованы два детектора в виде ячеек Голея, расположенные за фильтрами низких частот, полосовыми фильтрами на 3 и 7 ТГц и резонансными камертонными модуляторами. SOLAR-T позволяет определить относительные изменения температуры, меньшие, чем 1 К, причем с субсекундным временным разрешением [32].

Измеритель абсолютной терагерцовой мощности, выпускающийся фирмой Thomas Keating, Ltd., состоит из двух компонентов: измерительной головки и блока обработки сигнала на базе модуля сбора данных USB-6211 фирмы National Instrument [46]. Он предназначен для измерения мощности терагерцовой ЭМ-волны в открытом пространстве. Прибор обеспечивает 10%-точность при эквивалентной шумовой мощности порядка  $5 \text{ мкВт/Гц}^{1/2}$ . Диапазон рабочих частот – от 30 ГГц до 3 ТГц и выше. Измерительная головка представляет собой фотоакустический детектор.

Наиболее важной характеристикой терагерцовых приемников в тепловизионных задачах является флуктуационная чувствительность приемника. Как следует из представленных данных, в настоящее время спектральная чувствительность как тепловых, так и фотонных приемников излучения, работающих без охлаждения, близка к теоретически возможной с учетом всех видов шумов. Фотонные приемники излучения, работающие без охлаждения, имеют сопоставимую пороговую чувствительность, но значительно (на много порядков) превосходят тепловые по быстродействию. Основным преимуществом неохлаждаемых приемников излучения являются малое энергопотребление и относительно низкая стоимость.

## Матричные детекторы с ячейками Голея

Основным направлением развития ИК-матриц неохлаждаемых детекторов остается увеличение формата (числа детекторов) и уменьшение размеров чувствительных элементов. Если нужно за время  $T$  получить изображение из  $n$  строк и  $m$  кадров с использованием одиночного фотоприемника, то на каждый элемент придется время  $T/(n \times m)$ . В матричном приемнике изображение на каждом из элементов формируется в течение всего времени кадра  $T$ , что эквивалентно возрастанию чувствительности в  $n \times m$  раз. Именно это обстоятельство приводит к тому, что наряду с тремя основными параметрами, характеризующими приемник излучения, появляется четвертый – размерность матрицы.

Для систем технического зрения дальность обнаружения ограничивается не только чувствительностью пикселей, но в значительной степени и их размерами, а также оптикой системы видения. В настоящее время наиболее распространенными для ИК-области являются матрицы микроболлометров, объем выпуска которых превосходит 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 Голея.

В патенте США 7045784 В1 (Method and apparatus for micro-Golay cell infrared detectors [40]) описано устройство, которое представляет собой герметизированную сборку элементарных ячеек Голея, выполненную на микроканальной пластине (МКП), заполненную газом, один торец которой является входным окном для электромагнитного излучения и закрыт недеформируемой мембраной, а противоположный торец закрыт гибкой мембраной с зеркальным покрытием с внешней стороны. Система визуализации пространственного распределения электромагнитного излучения в патенте не детализирована. Судя по рисункам патента, основой матрицы является микроканальная пластина ЭОП, в которой геометрия элементарного канала (расширительной камеры) далека от оптимальной.

В работах Новосибирского филиала Института физики полупроводников СО РАН «КТИ ПМ» [4, 38] детально описываются технология изготовления и метрологические характеристики модуля неохлаждаемого матричного ФПУ, названного авторами термопневматическим микромеханическим преобразователем. Схема термопневматического элемента и матричного приемника представлены на рис. 9.

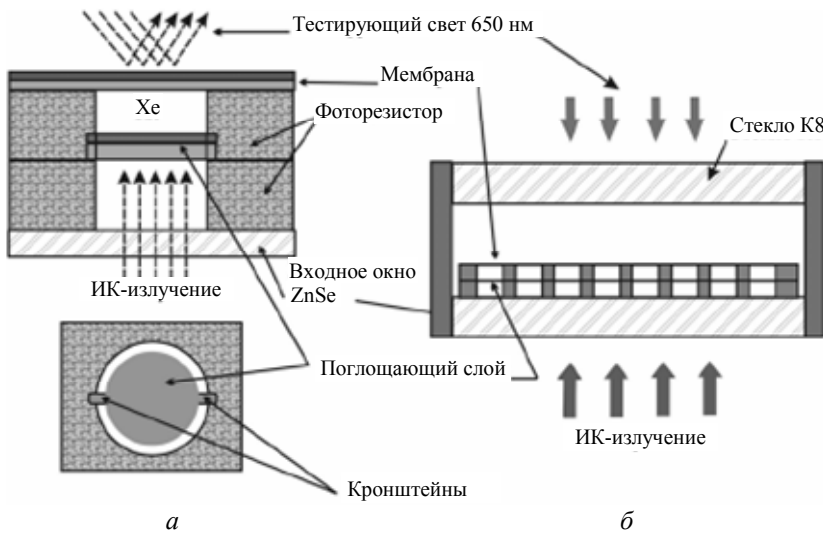


Рис. 9. Схема элемента термопневматического ММП (а) и матричного приемника (б) [24].

Авторы приводят следующие параметры разработанного матричного термопневматического преобразователя размерностью  $200 \times 200$ : окно элементарной ячейки 100 и шаг 120 мкм, время отклика – не более 30 мс, температурная чувствительность на частоте 1 Гц –  $0,15 \text{ К/Гц}^{1/2}$ , эквивалентная мощность шума на частоте 1 Гц с оптикой  $f/1$  составила  $1,1 \times 10^{-8} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$ , модуль упругости мембраны 45–55 ГПа. Одним из основных путей повышения чувствительности термопневматического детектора, по мнению авторов, является уменьшение толщины мембранного слоя. Разработана технология изготовления мембран с толщинами 100 нм, и возможно дальнейшее снижение толщины в целях повышения чувствительности детектора.

В патенте RU 2561338 C1 [39] описывается матричный приемник ИК-излучения, основанный на матричной структуре из ячеек Голея, в которой пространственное распределение электромагнитной энергии преобразуется в геометрический рельеф металлизированной гибкой мембраны. Визуализация этого рельефа осуществляется с помощью сопряженной электролюминесцентной панели, которая представляет собой электролюминофорный конденсатор, состоящий из тонкого слоя электролюминофора, нанесенного на прозрачное проводящее покрытие внутренней поверхности выходного окна. Второй обкладкой конденсатора является металлизированная поверхность гибкой мембраны.

Основным общим недостатком этих работ является резкое снижение чувствительности устройств при создании многоэлементных матриц с ограниченными габаритными размерами (т. е. при уменьшении диаметра элементарной ячейки Голея).

Существует принципиальное ограничение, которое практически исключает построение клас-

сических голеевских матриц. Известно, что величина прогиба  $\delta$  центра плоской мембраны, закрепленной по контуру, при малых перемещениях под действием давления  $P$  вычисляется по формуле

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

где  $R$  – рабочий радиус мембраны (по контуру закрепления);  $h$  – толщина мембраны,  $E$ ,  $\mu$  – модуль упругости  $\text{кГ/см}^2$  и коэффициент Пуассона материала мембраны соответственно [16]. Из приведенного выражения следует, что уменьшение размеров чувствительных элементов сопровождается катастрофическим падением чувствительности. Следовательно, создание голеевских матриц при сохранении значений чувствительности, достигнутых голеевскими приемниками с большой апертурой, требует принципиально нового подхода.

В [11] сообщается о создании нового миниатюрного приемника Голея, изготовленного с применением микротехнологий. Для обнаружения термического расширения малого газового объема был использован туннельный датчик перемещения. В результате NEP опытного образца прибора была лучше  $3 \times 10^{-10} \text{ Вт Гц}^{-1/2}$  при 25 Гц.

В лаборатории Oak Ridge National Laboratory [6] разработана микробалка из полупроводниковых материалов, таких как кремний или GaAs. Инновационный подход к тепловому сканированию основан на изгибе ФРА-микробалок из двух материалов при поглощении ими ИК-фотонов. Система включает ИК-линзу, ФРА-микробалку и детектор изгиба. Для измерения изгиба могут применяться пьезорезистивный, оптический или емкостной методы, а также преобразовательный метод электронного туннелирования. Исследователи пришли к выводу, что пьезорезистивный метод не является чувствительным вследствие нагре-

ва балки из-за протекающего по ней тока. Более точным считается лазерный оптический метод, однако он не согласуется с измерением отклонений массива балок одновременно. Емкостной метод, основанный на измерении изменений в емкости между балкой и подложкой, занимает промежуточное место по чувствительности и простоте исполнения и поэтому может использоваться в будущем.

Оптические системы, в которых измеренный ими изгиб балок преобразуется в оптическое изображение, проецируемое на обычную монохроматическую CCD- или CMOS-камеру, являются одними из самых перспективных. Характеристики системы в значительной степени определяются характеристиками этих камер (динамический диапазон, шумы, разрешение).

Хотя все эти схемы считывания могут достигать высокой чувствительности и низкого уровня шумов, только оптический метод является бесконтактным для микромеханических сенсорных элементов и не требует размещения однокристалльной электроники и проводной архитектуры. Производство основано на методах поверхностной микромеханики, перспективных для массового выпуска и с целью получения больших оптических форматов. В качестве источника света используется маломощный лазерный диод. Без использования специальной обработки данных исследователям удалось достичь работы устройства при комнатной температуре с алгоритмом вычитания фона. NETD и время срабатывания датчиков составляют 500 мК и 6 мс соответственно.

### Заключение

В работе выполнен обзор приемников излучения терагерцового диапазона. Отмечается, что терагерцовое излучение обладает большой проникающей способностью. Однако отсутствие источников и чувствительных детекторов терагерцового излучения в течение многих лет сдерживало исследования в этой области. В работе рассмотрены различные аспекты применения терагерцового излучения, а также основные виды и типы приемников этого излучения. Проведен сравнительный анализ фотонных и тепловых приемников.

Несмотря на значительный прогресс в разработке фотонных приемников излучения, приемники Голея не утратили своего значения. На сегодняшний день датчики на основе одиночной ячейки Голея имеют наибольшую чувствительность среди детекторов, работающих при комнатной температуре и не требующих вакуумирования и термостабилизации. Они имеют постоянную спектральную чувствительность в рекордно широком спектральном диапазоне до 30 ТГц.

Для многих применений, таких как спектроскопия и «многоцветное» тепловидение, тепловые детекторы, обладающие постоянством удельной обнаружительной способности в предельно широком диапазоне длин волн, значительно более применимы по сравнению с охлаждаемыми фотонными детекторами [45]. Помимо применения для решения широкого круга специальных задач, ячейка Голея (так же, как и газовый термометр) стала основным прецизионным измерителем мощности ТГц-излучения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Bell F. F. // *Phyl. Mag.* 1881. Vol. 11. P. 510.
2. Discrete\_Pyros\_2014\_V2.0 [Электронный ресурс]. Gentec Electro-Optics (Gentec-EO) /THZ Detectors/QS-THZ/QS-THZSPECIFICATIONS[сайт]—[https://gentec-ontent/downloads/specifications-sheet/Discrete\\_Pyros\\_2014\\_V2.0.pdf](https://gentec-ontent/downloads/specifications-sheet/Discrete_Pyros_2014_V2.0.pdf)
3. Golay M. J. E. // *Rev. Sci. Instrum.* 1947. Vol. 18. P. 357.
4. Golay M. J. E. // *Rev. Sci. Instrum.* 1949. Vol. 20. P. 816.
5. Hayes H. V. // *Rev. Sci. Instr.* 1936. Vol. 7. P. 202.
6. Mahalik N P. *Datskos, Panos*, MEMS based Calorimetric Spectroscopy — Oak Ridge National Laboratory, <http://www.mnl.ornl.gov>
7. Электронное научное издание "Электроника и информационные технологии". [http://www.mrsu.ru/ru/i\\_activity/](http://www.mrsu.ru/ru/i_activity/)
8. <http://www.teraview.co.uk>. Applications of Terahertz Light
9. <http://www.tydex.ru> Tydex offers high-precision large optics, astro-mirrors, and systems.
10. Kemp M. C., Taday R. F., Cole B. E. et al. // *Proceedings of SPIE.* 2003. Vol. 5070.
11. Kenny T. W., Reynolds J. K., Podosek J. A. // *Rev. Sci. Instrum.* 1996. Vol. 67. P. 112.
12. Sizov F., Rogalski A. THz detectors revive-*Progress in Quantum Electronics* 34 (2010).
13. Tyndall J. // *Proc. Roy. Soc. London.* 1881. Vol. 31. P. 3-7-317.
14. Zahl H. A., Golay M. J. E. // *Rev. Sci. Instr.* 1946. Vol. 17. No. 11.
15. Zimdars D., White J., Stuck G., et al. // *International Journal of High Speed Electronics and Systems.* 2007. Vol. 17. No. 2.
16. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов. — М.: Машиностроение, 1981.
17. Барко А. В., Войцеховский А. В., Левашкин А. Г., Коханенко А. П. // *Известия высших учебных заведений, физика.* 2015. Т. 58. № 8/2. С. 283.
18. Анцыгин В. Д., Николаев Н. А. // *Автометрия.* 2011. Т. 47. № 4. С. 23 [перевод: Antsygin V. D., Nikolaev N. A. Efficiency of generation of terahertz radiation in GaAs, InAs, and InSb crystals // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* 2011. Vol. 47. No. 4. P. 338–344].
19. Братман В. Л., Литвак А. Г., Суворов Е. В. // *УФН.* 2011. Т. 181. С. 867.
20. Бреслер П. И. Элементы теории и расчета оптико-акустических газоанализаторов на основе некоторых закономерностей поглощения инфракрасной радиации газами. Автоматические газоанализаторы. — Изд. ЦИТИЭлектропром, 1961.
21. Вакс В. Л., Домрачева Е. Г., Ластовкин А. А. и др. // *Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского.* 2013. № 6 (1). С. 81.
22. Вейнгеро М. Л. // *Доклады АН СССР,* 1938. Т. 19. № 9. С. 687.

23. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А., Мальцев П. П. // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 2 (139). С. 28.
24. Гельфанд А. В., Паулиш А. Г., Федоринин В. Н. // Прикладная физика. 2009. № 2. С. 109.
25. Детектор Голея. [Электронный ресурс]. /Тидекс /Продукты /ТГц приборы /Детекторы Голея [сайт] – [http://www.tydexoptics.com/pdf/Golay\\_cell.pdf](http://www.tydexoptics.com/pdf/Golay_cell.pdf)
26. Ермолаев Д. М.. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук – Черноголовка-2015.
27. Измерения в оптоэлектронике. Термины и определения Часть III Средства измерений и их элементы Госстандарт России. – Москва 2004.
28. Ильин Е. М., Ищенко Д. В., Климов А. Э. и др. // Вестник СибГУТИ. 2016. № 3. С. 176.
29. Князев Б. А. Терагерцовое излучение: генерация и применение. – Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, НГУ-2012.
30. Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 82.
31. Кочуров Л. А. Диссерт. на соиск. уч. ст.к. ф-м.н. – Саратов, 2016.
32. Кропотов Г., Кауфманн П. // Фотоника. 2013. № 5. С. 57.
33. Марио Льюцци. История физики. – М.: Издат. Мир, 1970.
34. Мозер Й.-Ф., Штефен Г., Кнейбюль Ф. // УФН. 1969. Т. 99. Вып. 3. С. 469.
35. Мосс Т. С. // УФН. 1962. Т. LXXVIII. № 1. С. 93.
36. Неизвестный И. Г., Климов А. Э., Шумский В. Н. // УФН. 2015. Т. 185. Вып. 10. С. 1031.
37. Панкратов Н. А. // Оптико-механическая промышленность. 1957. № 2. С. 37.
38. 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.
39. Гибин И. С., Котляр П. Е., Гузучкин В. И. Патент RU2561338 С1 МПК G01J 5/42 Устройство для визуализации инфракрасного излучения. 2015. Бюл. № 8.
40. Патент США 7045784 В1 Method and apparatus for micro-Golay cell infrared detectors, 2003.
41. Шоль Ж., Марфан И., Мюни М. и др. Приемники инфракрасного излучения. – М.: Мир, 1969.
42. Розенберг Ф. История физики. – Гос .тех.-теор. издат. М-Л. 1933.
43. Салль А. О. Инфракрасные газоаналитические измерения: Погрешности и информационная способность инфракрасных газоанализаторов. – М.: Издат. стандартов, 1971.
44. Сивков А. А., Гуд В.В. // ПТЭ. 1967. № 1. С. 195.
45. Сизов Ф. Ф. // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. 2015. Т. 12. № 1. С. 26.
46. Алавердян С. А., Боков С. И., Булгаков В. О. и др. Терагерцовый диапазон частот: электронная компонентная база, вопросы метрологического обеспечения / Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. – М.: ЦНИИ «Электроника», 2012.
47. Т-лучи: физика и возможности применения [http://www.phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2014/05\(108\)-2014/20654](http://www.phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2014/05(108)-2014/20654)
48. Кюес Р. Дж., Краузе П.В., Патли Э.Г. и др. Фотоприемники видимого и ИК-диапазонов. – М.: Радио и связь, 1985.
49. Хохлов Д. Р. // УФН. 2006. Т. 176. № 9. С. 983 [Phys. Usp., 49, 955 (2006)].
50. Черевко А. Г., Ильин Е. М., Моргачев Ю. Д., Полубехин А. И. // Вестник СибГУТИ. 2015. № 2. С. 164.
51. Электромагнитные волны терагерцового диапазона. Программа фундаментальных исследований Президиума РАН № 29. Отчет за 2005 г.

PACS: 85.30 Dw 84.40.Ba

## Terahertz radiation detectors (a review)

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

Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
1 Akademika Koptuga av., Novosibirsk, 630090, Russia  
E-mail: [gibin@iae.nsk.su](mailto:gibin@iae.nsk.su); [21031940@mail.ru](mailto:21031940@mail.ru)

*Received March 5, 2018*

***The article provides a review of terahertz range radiation receivers. It is pointed out that terahertz radiation possesses a high penetrating power. However, lack of sources and sensitive detectors of terahertz radiation for many years used to restrain the research in this sphere. The work observes different aspects of the use of terahertz radiation and the main types and kinds of receivers of this radiation. The analysis of photon and thermal receivers is undertaken. Detailed data of terahertz receivers on the basis of cells of Galea are provided. It is noted that nowadays quick revitalization of research on matrix detectors with cells of Goley is observed. It is noted that for many applications, such as spectroscopy and multicolourthermovision, thermal detectors are more applicable in comparison with cooled photon detectors.***

***Keywords:*** terahertz radiation, cells of Goley, photon receivers, thermal receivers, optical acoustic receivers, multicolourthermovision, matrix detectors.

## REFERENCES

1. F. F. Bell, *Phyl. Mag.* **11**, 510 (1881).
2. Discrete\_Pyros\_2014\_V2.0 [Electronic source]. /Gentec Electro-Optics (Gentec-EO) /THz Detectors /QS-THZ/ QS-THZ SPECIFICATIONS [site] – [https://gentec-eo.com/Content/downloads/specifications-sheet/Discrete\\_Pyros\\_2014\\_V2.0.pdf](https://gentec-eo.com/Content/downloads/specifications-sheet/Discrete_Pyros_2014_V2.0.pdf)
3. M. J. E. Golay, *Rev. Sci. Instrum.* **18**, 357 (1947).
4. M. J. E. Golay, *Rev. Sci. Instrum.* **20**, 816 (1949).
5. H. V. Hayes, *Rev. Sci. Instrum.* **7**, 202, (1936).
6. <http://www.mnl.ornl.gov> Mahalik N. P. Datskos, Panos, “MEMS based Calorimetric Spectroscopy”, Oak Ridge National Laboratory, <http://mnl.ornl.gov>.
7. [http://www.mrsu.ru/ru/i\\_activity](http://www.mrsu.ru/ru/i_activity). Electronic science edition “Electronics and information technology”.
8. <http://www.teraview.co.uk>. Applications of Terahertz Light.
9. <http://www.tydex.ru> Tydex offers high-precision large optics, astro-mirrors, and systems.
10. M. C. Kemp, R. F. Taday, B. E. Cole et al., *Proceedings of SPIE* **5070**, (2003).
11. T. W. Kenny, J. K. Reynolds, and J. A. Podosek, *Rev. Sci. Instrum.* **67**, 112 (1996).
12. F. Sizov and A. Rogalski, *THz detectors revive-Progress in Quantum Electronics* (2010).
13. J. Tyndall, *Proc. Roy. Soc. London.* **31**, 3-7-317 (1881).
14. H. A. Zahl and M. J. E. Golay, *Re. Sci. Inst.* **17** (11), (1946).
15. D. Zimdars, J. White, G. Stuck, et al., *International Journal of High Speed Electronics and Systems* **17** (2), (2007).
16. L. E. Andreyeva, *Elastic elements of devices.* (Mashinost., Moscow, 1981) [in Russian].
17. A. V. Barko, A. V. Voytsekhovskiy, A. G. Levashkin, and A. P. Kohanenko, *Russian Physics Journal* **58**, 283 (2015).
18. V. D. Antsygin and N. A. Nikolaev, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* **47**, 338 (2011).
19. V. L. Bratman, A. G. Litvack, and E. V. Souvorov, *Terahertz range acquisition: sources and applications.* *Physics-Uspekh* **181**, 867 (2011).
20. P. I. Bresler, *Elements of theory and calculation of optical-acoustic gas analyzers on the base of some rules of infrared radiation absorption by gases. Automatic gas analyzers.* (Edition Central Institution of scientific and technical information. Electronic industry, 1961) [in Russian].
21. V. L. Vaks, E. G. Domracheva, A. A. Lastovkin, and others. *Vestnik of Nizhniy Nivgorod University*, No. 6 (1), 81 (2013).
22. M. L. Veingerov, *Doklady Akademii Nauk USSR* **19** (9), (1938).
23. A. V. Voytsekhovskiy, S. N. Nesselov, N. A. Koulchitsky, A. A. Melnikov, and P. P. Maltsev, *Nano- and microsystem technique*, No. 2, 28 (2012).
24. A. V. Gelfand, A. G. Paulin, and V. N. Fedorinin, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 109 (2009).
25. Golay detector. [http://www.tydexoptics.com/pdf/Golay\\_cell.pdf](http://www.tydexoptics.com/pdf/Golay_cell.pdf).
26. D. M. Ermolayev, PhD Thesis (Candidate’s Dissertation) (Chernogolovka, 2015).
27. Optoelectronics measurements. Terms and definitions. Part III. Means of measurements and their elements. State Committee for the Russian Federation for Standardization and Metrology. Moscow (2004).
28. E. M. Ilyin, D. V. Ishchenko, A. E. Klimov, et al., *Vestnik of Siberian State University of telecommunication and information technology*, No. 3, 176 (2016).
29. B. A. Knazev, *Terahertz radiation: generation and application* (Institute of Nuclear Physics named after G. I. Boudker Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, NSU-2012).
30. M. D. Korneyeva, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 82 (2011).
31. L. A. Kochkurov, PhD Thesis (Candidate’s Dissertation) (Saratov – 2016).
32. G. Kropotov and P. Kaufmann, *Photonics*, No. 5, 57 (2013).
33. Mario Liotti and Mario Gliozzi, *The history of physics.* (Mir. Moscow, 1970) [in Russian].
34. J. F. Moiser, G. Stephen, and F. Kneibul, *Sov. Phys. Usp.* **99** (3), 469 (1969).
35. T. S. Moss, *Sov. Phys. Usp.* **LXXVIII** (1), (1962).
36. I. G. Neizvestny, A. E. Klimov, and V. N. Shoumsky, *Phys. Usp.* **185**, 1031 (2015).
37. N. A. Pankratov, *Optiko-mechanicheskaya Prom.* No. 2, (1957).
38. Patent RU 2414688, IPC G01J 5/42. 20.03.2011, Bulletin No. 8.
39. Patent RU2561338 C1 IPC G01J 5/42. 27.08.2015, Bulletin No. 8.
40. Patent USA 7045784 B1 Method and apparatus for micro-Golay cell infrared detectors, 2003.
41. J. Sholl, M. Marfan, M. Munsh, et al., *Infrared radiation detectors.* (Mir, Moscow, 1969) [in Russian].
42. F. Rosenberg, *History of physics* (Gos Tech TeorIzdat M-L, 1933) [in Russian].
43. A. O. Sall, *Infrared gas analytical measurements: errors and information ability of infrared gas analysis apparatus.* (Moscow, Edition of Standards 1971) [in Russian].
44. A. A. Sivkov and V. V. Gud, *PTE*, No. 1, 195 (1967).
45. F. F. Sizov, *Sensor Electronics and Microsystem Technologies* **12** (1), 26 (2015).
46. S. A. Alavrdian, S. I. Bokov, V. O. Boulgakov, et al., *Terahertz frequency range: electronic component base, questions of metrological support – Electronic technique reviews. Series 1. Ultra-high frequencies electronics.* (Moscow, CSRI “Electronics”, 2012) [in Russian].
47. T-rays: physics and application opportunities, [http://www.phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2014/05\(108\)-2014/20654](http://www.phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2014/05(108)-2014/20654)
48. P. G. Kies, P. V. Krause, A. G. Patley, et al., *Photoelectric receivers of visible and IR ranges* (Radio Svyaz, 1985) [in Russian].
49. D. R. Hohlov, *Phys. Usp.* **49**, 955 (2006).
50. A. G. Cherevko, E. M. Ilyin, Yu. D. Morgachev, and A. I. Polubekhin, *Vestnik of Siberian State University of telecommunication and information technology*, No. 2, 164 (2015).
51. *Electromagnetic waves of the terahertz range*, in the Fundamental Research Program Ifysve of the Russian Academy of Sciences, Presidium Report No. 29 (2005).