

**Неохлаждаемые матричные терагерцовые преобразователи изображений.  
Принципы конструирования***И. С. Гибин, П. Е. Котляр*

*Рассмотрены проблемы, с которыми сталкиваются разработчики неохлаждаемых матричных преобразователей изображений на основе оптико-акустических преобразователей. Показано, что уменьшение апертуры отдельной ячейки (размера пикселя) приводит к катастрофическому падению чувствительности. Анализируются возможные пути сохранения в матричных системах чувствительности, присущей одиночным оптико-акустическим преобразователям с апертурой порядка 5 мм. Анализируются структура и геометрия ячейки, оптимизация геометрии поглотителя ИК-излучения. Рассматривается как альтернатива существующим системам матричный приемник излучения с жидкостными поршнями, запатентованный авторами.*

*Ключевые слова:* оптико-акустический преобразователь, расширительная камера, мембрана, апертура ячейки, чувствительность, матрица ячеек, жидкостный поршень.

**Ссылка:** Гибин И. С., Котляр П. Е. // Прикладная физика. 2019. № 4. С. 80.

**Reference:** I. S. Gibin and P. E. Kotlyar, Prikl. Fiz., No. 4, 80 (2019).

**Введение**

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 возрас-

танию 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 и в значительной степени их размерами, а также оптикой системы видения.

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 Голея.

Принцип действия ячеек Голея основан, как правило, на оптическом детектировании теплового расширения газа, заключенного в замкнутом объеме. Поэтому такие датчики обычно называют оптико-акустическими детекторами (или, иногда, термопневматическими детекторами) [1–14].

**Гибин Игорь Сергеевич**<sup>1,2</sup>, г.н.с., д.т.н. профессор.  
**Котляр Петр Ефимович**<sup>1</sup>, вед. инженер, д.г.-м.н., профессор.

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет.

Россия, 630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20.

Статья поступила в редакцию 30 мая 2019 г.

Целью данной работы является рассмотрение проблем, с которыми сталкиваются разработчики неохлаждаемых матричных преобразователей изображений на основе оптико-акустических преобразователей.

### Существующие разработки

Ячейки Голея являются одним из наиболее эффективных детекторов терагерцового излучения. Наиболее важными их достоинствами являются рекордно высокая среди тепловых приемников и постоянная обнаружительная способность в диапазоне 1–3000 мкм, простота и отсутствие высоких требований на точность изготовления. Однако одиночный детектор не позволяет получать изображение в реальном времени, так как требует сложных и дорогостоящих систем сканирования, а типичный размер входного окна традиционных ячеек Голея составляет от 5 до 10 мм, что де-

лает проблематичным их использование для получения изображений с приемлемым разрешением. Указанные недостатки могут быть устранены созданием матричного приемника с ячейками на базе одиночных оптико-акустических преобразователей, размеры которых сопоставимы с характерной рабочей длиной волны [15].

В патенте США 7045784 В1 (Method and apparatus for micro-Golay cell infrared detectors [11]) описано устройство, которое представляет собой герметизированную сборку элементарных ячеек Голея, выполненную на микроканальной пластине (МКП). Схема устройства представлена на рис. 1, а. Заметим, что современные технологии изготовления МКП-пластин позволяют получать миниатюрные трубчатые каналы, диаметр которых может составлять 2–20 мкм при толщине пластины 200–500 мкм. Разброс диаметров каналов порядка 1,3 %.

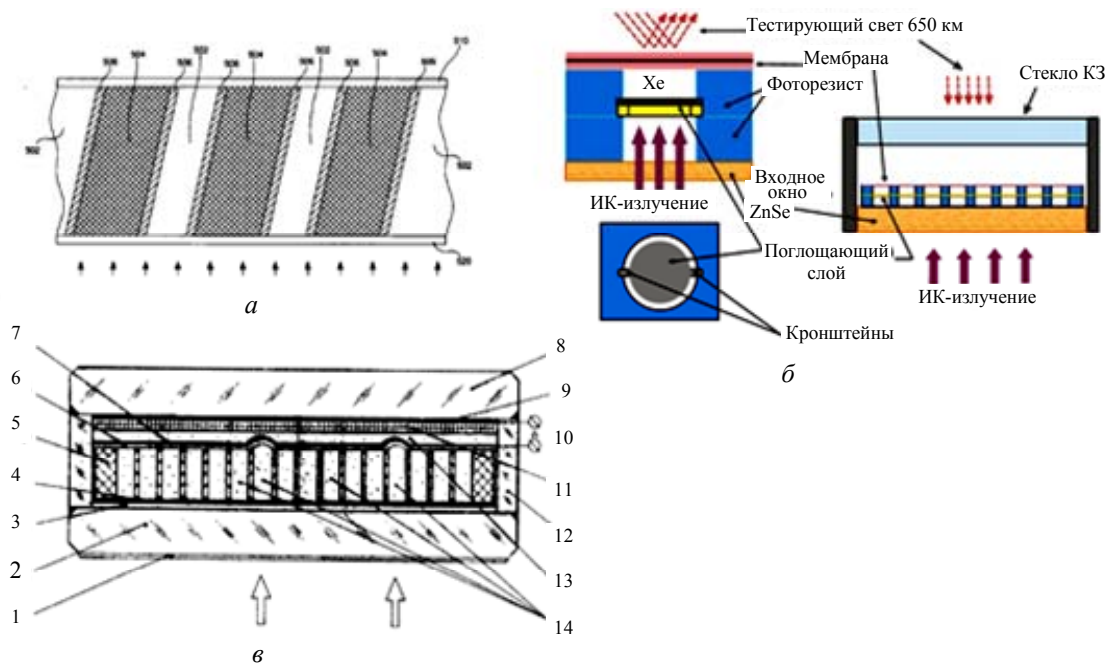


Рис. 1. Схемы матричных приемников Голея: а – по патенту США 7045784; б – по патенту RU 2414688; в – по патенту RU 2561338.

Один торец газонаполненной ячейистой структуры является входным окном для электромагнитного излучения и закрыт недеформируемой мембраной, 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 «КТИПМ» [12] детально описываются техно-

логия изготовления и метрологические характеристики модуля неохлаждаемого матричного ФПУ, названного авторами термопневматическим микромеханическим преобразователем. Схема термопневматического элемента и матричного приемника представлены на рис. 1, б. 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.

В патенте RU 2561338C1 [13] описывается матричный приемник ИК-излучения, основанный на матричной структуре 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 конструкций 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 классических голеевских матриц с большой размерностью. 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 (с размерностью  $\text{кГс/см}^2$ ) и коэффициент Пуассона материала мембраны соответственно [7].

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.

### Конструктивные особенности оптико-акустических приемников

Оптико-акустический приемник ИК-излучения по своим характеристикам приближается к идеальному приемнику, ограниченному лишь фотонными шумами. Однако он отличается от идеального прибора наличием тепловой связи поглотителя со стенками расширительной камеры и потерями на отражение, возникающими во входном окне расширительной камеры. Повышение эффективности преобразования излучения в акустическое давление на мембрану достигается за счет минимизации потерь входного излучения (оптимизация поглотителя), за счет исключения распространения тепловой энергии через стенки конструкции матричного приемника в соседние ячейки и увеличения амплитуды колебаний мембраны за счет резонансной раскачки.

В первых экспериментах по исследованию оптико-акустического эффекта, выполненных Беллом [1], было обнаружено, что усиление оптико-акустического сигнала возможно за счет такого явления, как акустический резонанс. В дальнейшем в работах [2, 5, 6] было разработано множество конструктивных вариантов резонансных оптико-акустических ячеек, с помощью которых и была продемонстрирована эффективность данного метода. Белл предложил использовать акустический резонанс в расширительной камере, частоту модуляции входного радиационного потока и собственную частоту мембраны для увеличения амплитуды колебаний. Однако практическое использование акустического резонанса в

оптико-акустических приемниках затрудняется тем, что при повышении добротности при-

емник становится крайне чувствительным к толчкам.

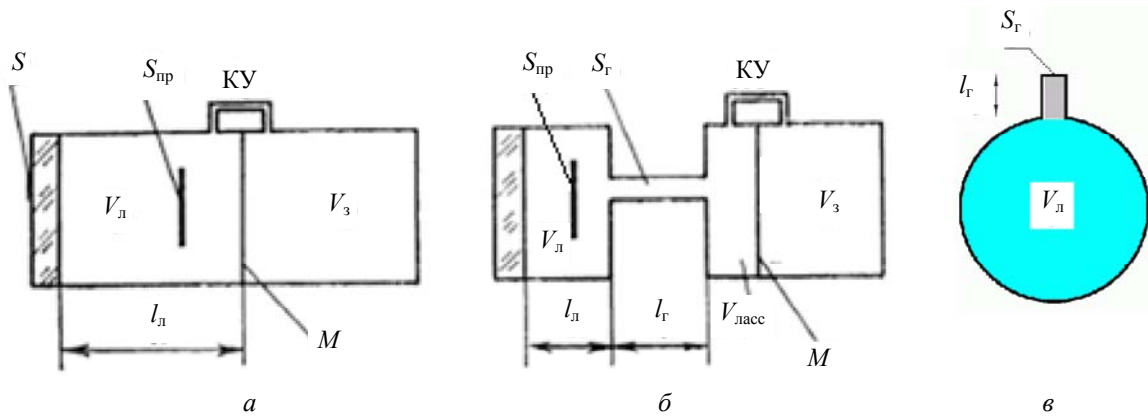


Рис. 2. Расчетные схемы оптико-акустических приемников по [8] с изменениями: а – классическая двухкамерная схема; б – двухкамерная схема с акустическим резонатором в расширительной камере; в – резонатор Гельмгольца. Используются обозначения: М – мембрана; КУ – капиллярный канал для уравнивания статического давления по обе стороны мембраны;  $l_r$  – глубина лучеприемника (расширительной камеры);  $l_r$  – длина горла резонатора;  $S_r$  – площадь сечения горла.

В прекрасном обзоре В. Н. Панкратова [10], посвященном конструированию оптико-акустических преобразователей, к сожалению, практически не рассматриваются вопросы повышения чувствительности преобразователей за счет резонансной раскачки упругого элемента. В то же время фактически во всех конструкциях присутствует двухкамерная схема с акустическим резонатором в расширительной камере (см. рис. 2). Формула для определения частоты собственных колебаний такого резонатора имеет вид:

$$f = \frac{C_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S_r}{L_r V_L}}$$

где  $f$  – частота, Гц;  $C_0$  – скорость звука в газе расширительной камеры;  $S$  – сечение горла,  $m^2$ ;  $V$  – объем расширительной камеры,  $m^3$ ;  $L$  – длина горла резонатора, м.

В расширительной камере возможно возбуждение лишь волн, для которых выполняется условие:

$$\lambda < \sqrt[3]{V_L}$$

Оптимальная глубина лучеприемной камеры, при которой оптико-акустический преобразователь обладает максимальной чувствительностью, определяется формулой:

$$l_{opt} = k \sqrt{\frac{\varrho}{f c_v}}$$

где  $k$  – эмпирический коэффициент;  $f$  – частота модуляции потока излучения;  $c_v$  и  $\varrho$  – соответственно удельные теплоемкость и теплопроводность газа при постоянном объеме.

На основе термоакустических и электрических аналогий М. Голеем была предложена эквивалентная расчетная схема, представленная на рис. 3.

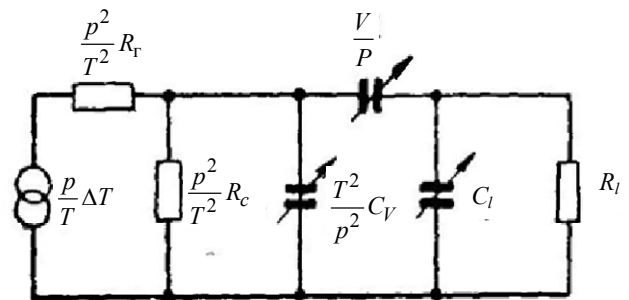


Рис. 3. Эквивалентная схема оптико-акустического приемника по Голее [3], где  $p$ ,  $V$  – давление и объем газа в расширительной камере приемника;  $R_r$  – тепловое сопротивление, обусловленное лучистым потоком от источника;  $C_v$  – теплоемкость газа в расширительной камере приемника при постоянном давлении;  $C_l$  – эффективная емкость мембраны, приведенная к емкости газа;  $R_l$  – пневматическое сопротивление утечке газа из приемника;  $R_c$  – сопротивление тепловому потоку от газа в окружающее пространство.

Из уравнения газового состояния

$$\frac{p}{P_0} + \frac{v}{V_L} = \frac{\vartheta}{T}$$

было получено приближенное выражение акустического давления на мембрану:

$$P = \frac{P_0 Q}{TG \sqrt{1 + \omega^2 C_v^2 / G^2}},$$

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

Из приведенного выражения следует, что для повышения чувствительности необходимо уменьшать как тепловую проводимость, так и теплоемкость вещества, находящегося в оптико-акустическом приемнике.

### Оптико-акустический преобразователь с жидкостным поршнем

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. Использование гибкой мембраны, предложенное Хейсом в 1936 г. (Hayes H. V.) [4] является далеко не единственным методом «визуализации» акустической волны. Достаточно обратиться к классическому газовому термометру, в котором разделительным элементом между расширительной и компенсационной камерой служит жидкостный поршень. Порог чувствительности термометрической ячейки с жидкостным поршнем определяется действием капиллярной силы, зависящей от поверхностного натяжения жидкости поршня, радиуса квазикапиллярной рабочей камеры, и силой вязкого трения. Действие капиллярной силы и силы вязкого трения на жидкостный поршень приводит к тому, что при поглощении инфракрасного излучения перемещение жидкостного поршня начинается только тогда, когда сила, обусловленная градиентом давления между рабочей и компенсационной камерами, превысит пороговое значение. В работе [9] показано, что возбуждение продольных колебаний позволяет осуществлять компенсацию

капиллярной силы и силы вязкого трения и значительно снизить порог чувствительности устройства. Принцип термометрической ячейки с жидкостным поршнем позволяет в значительной мере обойти ограничения чувствительности, присущее мембранам малого диаметра.

Задача создания эффективных неохлаждаемых матричных терагерцовых преобразователей, по мнению авторов данной работы [14], решается использованием гибридной фотоприемной матрицы, структура которой представлена на рис. 4.

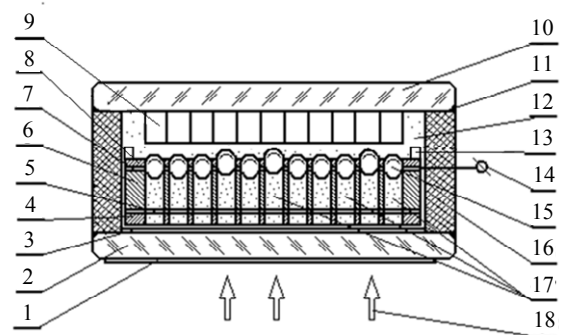


Рис. 4. Структура неохлаждаемых матричных терагерцовых преобразователей: 1 – просветляющее покрытие; 2 – входное окно; 3 – герметизирующий клеевой слой; 4 – нижний блок фотоприемных рабочих камер; 5 – поглощающий слой; 6 – средний блок фотоприемных рабочих камер; 7 – проводящий слой; 8 – верхний блок фотоприемных рабочих камер; 9 – матрица электронных усилителей; 10 – подложка матрицы электронных усилителей; 11 – кольцевой герметизирующий слой; 12 – компенсационная камера; 13 – кольцевой ультразвуковой возбуждатель; 14 – вывод проводящего слоя камеры; 15 – жидкостный поршень; 16 – распорная корпусная шайба; 17 – рабочие фотоприемные камеры; 18 – анализируемое ИК-излучение.

Так же, как и классические матрицы неохлаждаемых болометров, преобразователь представляет собой гибридную конструкцию, состоящую из оптико-акустической фотоприемной матрицы и сопряженного с ней кристалла-мультиплексора такой же размерности. Фотоприемная матрица состоит из трёх блоков (нижний 4, средний 6, верхний 8), выполненных из фотоситала и установленных в корпусной шайбе 16. Через герметизирующий клеевой слой 3 шайба закрыта входным окном 2, а с противоположной стороны выход каждой рабочей камеры 17 закрыт подвижным жидкостным поршнем 15, несущим электрический заряд. Внутри рабочей камеры располагается

термически развязанный от ее стенок поглощающий элемент 5 в виде тонкой пленки металла с малой теплоемкостью (висмут, свинец), нанесенной на полиэфиновую пленку со сквозной пористостью. Система рабочих камер дополнена второй герметизированной компенсационной камерой 12, образованной наружной поверхностью жидких поршней и подложкой матрицы интегральных усилителей, обеспечивающей считывание, предварительное усиление и мультиплексирование сигналов фотоприёмной матрицы. Рабочие и компенсационная камеры заполняются газом с низкой теплоемкостью и высокой теплопроводностью (ксенон) и герметизируются, образуя дифференциальную систему, а с другой стороны камера через герметизирующий слой 11 закрыта подложкой 10 матрицы электронных усилителей.

Анализируемое ИК-излучение 18 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 рабочих камер 17, выполненных из трех блоков фотоситалла, 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 смещению в сторону компенсационной камеры 12 подвижного жидкостного поршня 15, выполненного из диэлектрической жидкости (конденсаторное масло) и несущего электрический заряд. Изменение положения заряженного жидкостного поршня приводит к изменению электрического потенциала затвора входного каскада сопряженного интегрального усилителя и появлению на выходе усилителя электрического сигнала, пропорционального смещению жидкостного поршня. Заряд поршней осуществляется от проводящего слоя 7, имеющего вывод 14. Таким образом, пространственное распределение электромагнитной энергии преобразуется в совокупность электрических сигналов на выходе сопряженной интегральной матрицы электронных усилителей 9. Компенсация изменения реологических свойств жидкости поршня при изменениях температуры окружающей среды

осуществляется подачей компенсирующего напряжения на ввод 14. Компенсация капиллярной силы и силы вязкого трения жидкостного поршня, определяющих порог чувствительности устройства, осуществляется с помощью продольных ультразвуковых колебаний системы рабочих камер с помощью кольцевого ультразвукового возбудителя 13. Предлагаемая конструкция принципиально отличается от устройств с фотоприемными камерами с мембранной стенкой, имеющими степенную зависимость прогиба мембраны от ее диаметра.

### Заключение

Рассмотренные в работе неохлаждаемые матричные терагерцовые преобразователи изображений обеспечивают непосредственное преобразование терагерцового излучения в видимое, т. е. являются преобразователями прямого действия, что облегчает условия их практического применения.

Предложенная авторами конструкция матричного неохлаждаемого приемника ИК- и ТГц-излучения базируется на принципах построения классических газовых термометров и хорошо освоенных гибридных КМОП-технологий.

---

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

### ЛИТЕРАТУРА

1. Bell A. G. // American Journal of Science. 1880. Vol. 20. P. 305.
2. Bell A. G. // Philos. Mag. 1881. Vol. 11. P. 510.
3. Golay M. J. E. // Rev. Sci. Instrum. 1949. Vol. 20. P. 816.
4. Hayes H. V. // Rev. Sci. Instr. 1936. Vol. 7. P. 202.
5. Roentgen W. G. // Phyl. Mag. 1881. Vol. 11. P. 308.
6. Tyndall J. // Proc. Roy. Soc. London. 1881. Vol. 31. P. 307.
7. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов. – М.: Машиностроение, 1981.
8. Бреслер П. И. Оптические абсорбционные газоанализаторы и их применение. – Л.: Энергия. Ленингр. отделение, 1980.

9. Жежера Н. И. // Альманах современной науки и образования. 2012. № 9 (64). С. 58.

10. Панкратов Н. А. // Оптический журнал. 1994. № 5. С. 3.

11. Патент US 7045784 B1. Method and apparatus for micro-Golay cell infrared detectors, 2003.

12. 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.

13. Гибин И. С., Котляр П. Е., Гузучкин В. И. Патент RU2561338 C1 МПК G01J 5/42 Устройство для визуализации инфракрасного излучения. 2015. Бюл. № 8.

14. Гибин И. С., Котляр П. Е. Патент RU2682556 C1 МПК G01J 5/42. Высокоточный матричный приёмник инфракрасного и терагерцового излучения. 2019. Бюл. № 8.

15. Гибин И. С., Котляр П. Е. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 2. С. 117.

PACS: 85.30 Dw 84.40.Ba

## Uncooled matrix terahertz image converters. Design principles

*I. S. Gibin<sup>1,2</sup> and P. E. Kotlyar<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
1 Akademika Koptuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University  
20 K. Marks Ave., Novosibirsk, 630073, Russia

*Received May 30, 2019*

***The article discusses the problems which are faced by engineers of uncooled matrix converters of images on the basis of optical-acoustical converters. It is shown that aperture reduction of a separate cell (pixel-size) comes to extreme sensitivity fall. The article analyses the possible ways to save matrix systems sensitivity which is peculiar to single optical-acoustical converters with the aperture around 5 mm. The article analyses the structure and geometric pattern of the cell, optimization of the IR reflection absorbing material geometric pattern. Matrix reflection receiver with liquid – piston patented by the authors, is observed as the alternative to the existing systems.***

***Keywords:*** optical-acoustical converter, expansion chamber, membrane, cell aperture, sensitivity, matrix of cells, liquid – piston.

### REFERENCES

1. A. G. Bell, American Journal of Science **20**, 305 (1880).
2. A. G. Bell, Philos. Mag. **11**, 510 (1881).
3. M. J. E. Golay, Rev. Sci. Instrum. **20**, 816 (1949).
4. H. V. Hayes, Rev. Sci. Instr. **7**, 202 (1936).
5. W. G. Roentgen, Phyl. Mag. **11**, 308 (1881).
6. J. Tyndall, Proc. Roy. Soc. London **31**, 307 (1881).
7. L. E. Andreyeva, *Elastic elements of devices* (Moscow, Mechanic engineering, 1981).
8. P. I. Bresler, *Optical absorption gas analyzers and their application*. (L., Energy. Leningrad department, 1980).
9. N. I. Gegeera, Anthologiya Sovremennoi Nauki i Obrazovaniya, No. 9 (64), 58 (2012).
10. N. A. Pankratov, Optical Journal, No. 5, 3 (1994).
11. Patent US 7045784 B1. *Method and apparatus for micro-Golay cell infrared detectors*, (2003).
12. S. A. Kuznetsov, V. N. Fedorinin, and A. V. Gelfand, Patent RU 2414688, MPK G01J 5/42. *Matrix receiver of terahertz radiation*. Bul. No. 8, (2011).
13. I. S. Gibin, P. E. Kotlyar, and V. I. Guguchkin, Patent Патент RU2561338 C1 MPK G01J 5/42 *Infrared radiation visualization device*. Bul. No. 8, (2015).
14. I. S. Gibin and P. E. Kotlyar, Patent RU2682556 C1 MPK G01J 5/42. *Highly accurate matrix receiver of infrared and terahertz radiation*. Bul. No. 8, (2019).
15. I. S. Gibin and P. E. Kotlyar, Usp. Prikl. Fiz. **6** (2), 117 (2018).