

3. Бузынин А. Н., Осико В. В., Воронько Ю. К. и др. Пленки GaN и GaNAs на подложках монокристаллического и пористого Si и GaAs с подслоем флюорита. // Изв. РАН. Сер. физич. 2005. Т. 69. № 4. С. 211—217.

4. Wang S. J., Ong C. K., Xu S. Y. et al. Electrical properties of crystalline YSZ films on silicon as alternative gate dielectrics // Semicond. Sci. Technol. 2001. V. 16. P. L13—L16.

5. Wang S. J., Ong C. K. Rapid thermal annealing effect on the electrical properties of crystalline YSZ gate dielectrics // Semiconductor Science and Technology. 2003. V. 18. P. 154157.

6. Бузынин А. Н., Кравченко Н. В., Ломонова, Е. Е. Сидоров М. С., Трищенко М. А., Филачев А. М., Хакуашев П. Е. Перспективы использования флюорита как материала микро- и фотоэлектроники для создания фотоприемников: Докл. на

XX Междунар. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М., 2008.

7. Wang S. J. et al. // Semicond. Sci. Technol: Book, 2001. No 16. P. L13—L16.

8. Гришина Т. Н., Кичина Н. Н., Косухина Л. А., Сидоров М. С., Трищенко М. А., Трошков Е. А., Хакуашев П. Е., Хромова Т. А., Чинарева И. В. Фотоэлектрические свойства германиевых фотодиодов со слоями диоксида циркония, нанесенными магнетронным методом: Докл. на XX Междунар. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М., 2008.

Статья поступила в редакцию 9 октября 2008 г.

## Semiconductor photosensitive structures with cubic zirconia as passivating protective overcoat

A. N. Buzinin, E. E. Lomonova

A. M. Prokhorov Institute of General Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

T. N. Grishina, L. A. Kosuhina, M. S. Sidorov, M. A. Trishenkov, A. E. Troshkov,  
I. V. Chinareva, S. N. Yakunin

Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*Within the limits of use the program of cubic zirconia in photoelectronics samples multielement germanium photo diodes with a Gray code have been made. In addition the protective and stabilising covering has been put on device surfaces — a layer of zirconium dioxide —  $ZrO_2$ . Traditionally used low-temperature oxide  $SiO_2$  has certain disadvantage which managed to be eliminated thanks to a new stabilising covering. Comparison germanium devices with traditional oxide  $SiO_2$  and with new oxide  $ZrO_2$  has shown, that use of the last leads to essential advantages.*

PACS: 85.30.-z

УДК 621.383.8

## Неохлаждаемый матричный приемник ИК-излучения на основе термопневматического микромеханического преобразователя с оптоэлектронной системой считывания

А. В. Гельфанд, А. Г. Паулиш, В. Н. Федоринин

Новосибирский филиал Института физики полупроводников СО РАН "КТИ ПМ",  
г. Новосибирск, Россия

*Впервые получена и исследована матричная структура  $200 \times 200$  термопневматических микромеханических преобразователей (ячеек Голея) в составе неохлаждаемого приемника ИК-излучения с оптоэлектронной системой считывания. Элементы диаметром 100 мкм сформированы на подложке ZnSe и заполнены ксеноном. В качестве поглощающего слоя использовались слои  $SiO_2$  с полосой поглощения 8—14 мкм. При использовании оптики  $f/1$  температурная чувствительность составляла  $0,15 \text{ К/Гц}^{1/2}$ ; мощность, эквивалентная шуму,  $10 \text{ нВт/Гц}^{1/2}$ ; время срабатывания — менее 30 мс.*

PACS: 85.60.-q; 85.85.+j

## Введение

В настоящее время сформировались два основных направления в развитии технологии изготовления матричных фотоприемных устройств для регистрации ИК-изображения.

Первое направление базируется на полупроводниковых приемниках с фотоэлектрическим преобразованием сигнала [1]. Такие фотонные приемники обеспечивают хорошие пороговые характеристики и высокое быстродействие, но для этого требуется охлаждение фотоприемников до криогенных температур. Системы охлаждения делают такие фотоприемники громоздкими, дорогими и малонадежными, препятствуют широкому использованию соответствующих ИК-систем.

Второе направление связано с тепловыми детекторами. В них радиационное поглощение излучения приводит к нагреву чувствительного элемента и изменению его свойств: проводимости (болومتر), спонтанной поляризации (пирозлектрические матрицы) [1]. В отличие от фотонных приемников тепловые детекторы обычно работают при комнатной температуре. До недавнего времени они отличались невысокой чувствительностью и большой инерционностью, однако были дешевле и удобнее в использовании.

Последние успехи в развитии технологии болометрических и пирозлектрических детекторов коренным образом меняют направление разработок формирователей теплового изображения [2, 3]. Температурная чувствительность неохлаждаемых формирователей изображения достигла 0,05 К. Ожидается, что цена таких систем существенно снизится, и ИК-камеры станут широко распространенными приборами в ближайшем будущем. Тем не менее как полупроводниковые, так и болометрические матрицы представляют собой сложную высокоинтегрированную структуру, где на одном кристалле формируются фотоприемные элементы, система считывания и усиления сигнала. Создание современных матриц требует поддержки технологических норм на уровне 0,3—0,5 мкм. Высокая степень интеграции структур и необходимость использования криогенных систем определяют высокую стоимость современных тепловизионных систем и сравнительно низкую их надежность. Диапазон чувствительности таких приемников обычно составляет 8—14 мкм.

Снижение коэффициента интеграции и, как следствие, повышение надежности и уменьшение стоимости изделий могут быть достигнуты за счет разделения технологий изготовления матричных приемных устройств и системы считывания. Известны технические решения, в которых используются тепловые детекторы ИК-излучения, энер-

гия которых преобразуется в механическое перемещение элемента микромеханического преобразователя [4—7]. В данных устройствах для регистрации перемещений применяются оптические методы считывания, базирующиеся на широкоформатных кремниевых ПЗС-матрицах. Такое схемотехническое решение позволяет в значительной мере упростить технологический процесс изготовления матричных тепловизионных модулей, поскольку исключает процессы разработки специализированных мультиплексных систем считывания. Режим считывания и кадрового интегрирования величины сигнала осуществляется непосредственно мультиплексной системой кремниевой ПЗС-матрицы. При определенных оптических схемах считывания получаемое изображение может регистрироваться непосредственно глазом человека, без использования кремниевой матрицы. Это так называемые системы прямого видения, в которых происходит прямое преобразование ИК-излучения в видимое без промежуточных электронных преобразователей и усилителей. В таких изделиях единственным потребителем энергии является светодиод видимого диапазона.

В настоящей работе для регистрации ИК-излучения предлагается использовать матрицу термопневматических микромеханических преобразователей (ММП). Термопневматический ММП (ячейка Голея) [8] представляет собой полый цилиндр (рис. 1), заполненный газом, в котором один торец является поглотителем излучения, а противоположный представляет собой гибкую мембрану с зеркальным покрытием.

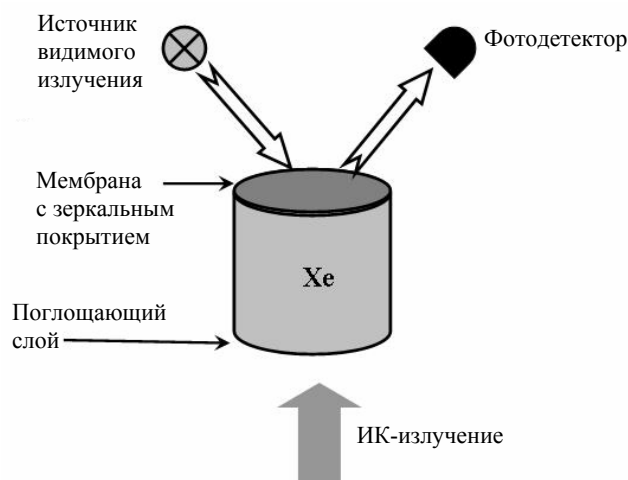


Рис. 1. Схема ячейки Голея

Поглощение излучения приводит к нагреву поглотителя, а затем и газа, заполняющего объем ММП, который, расширяясь, деформирует мембрану. Деформация последней приводит к отклонению отраженного светового луча видимого диапазона, что регистрируется фотодетектором.

Ячейка Голя имеет наибольшую чувствительность среди детекторов, работающих при комнатной температуре, и ровную, не зависящую от длины волны, спектральную характеристику. Детектор на основе одиночной ячейки Голя GC-1P производства TYDEX J.S.Co. (С.-Петербург) имеет диапазон чувствительности 1—8000 мкм, эквивалентную мощность шума (NEP) на частоте 20 Гц, равную  $1,4 \cdot 10^{-10}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>; оптическую чувствительность  $1,0 \cdot 10^5$  В/Вт; скорость отклика 30 мс. Создание матричного приемника на базе хорошо себя зарекомендовавшего одиночного детектора позволит проявить эти преимущества на более высоком конструктивно-технологическом уровне.

### Методика изготовления матричной структуры ММП

Изготовление матричной структуры ММП (рис. 2, а) проводили в два этапа с использованием технологии lift-off. На поверхности стеклянной пластины формировался полиимидный слой толщиной около 50 нм. Затем на полиимидную пленку наносили поглощающий слой SiO<sub>2</sub> толщиной 150—250 нм, имеющий полосу поглощения в диапазоне 8—14 мкм. Далее методом фотолитографии формировалась структура элементов поглощающего слоя. На полученную структуру наносили слой фоторезиста толщиной 20 мкм, в котором

вскрывались окна диаметром 100 и шагом 120 мкм, совпадающие с элементами поглощающего слоя. К полученной структуре, используя высокие адгезионные свойства фоторезиста, приклеивалось входное окно, выполненное из керамики ПО-4 (ZnSe) толщиной 2,5 и диаметром 30 мм. После наклейки окна всю структуру помещали в водную среду, в результате чего стеклянная пластина отсоединялась от структуры, и матрица элементов поглощающего слоя оставалась на входном окне. На рис. 2, а внизу показан вид сверху на элемент поглощающего слоя, представляющего собой свободно висящую пленку, закрепленную на двух кронштейнах для уменьшения теплоотвода. Мембранный слой изготавливался по аналогичной технологии, за исключением толщины мембраны, которая состояла из слоев алюминия толщиной 10—15 нм и SiO<sub>2</sub> толщиной 60—80 нм. Суммарная толщина мембраны не превышала 100 нм. Вторая часть матрицы с мембранными структурами совмещалась с поглощающими ячейками, механически сдавливалась. В результате происходила диффузионная сварка слоев фоторезиста. Присоединение матрицы с мембранными структурами проводилось в атмосфере ксенона в целях заполнения замкнутого объема термопневматической ячейки газом с низкой теплопроводностью. Удаление стеклянного носителя с поверхности мембраны также проводили путем помещения всей конструкции в водную среду.

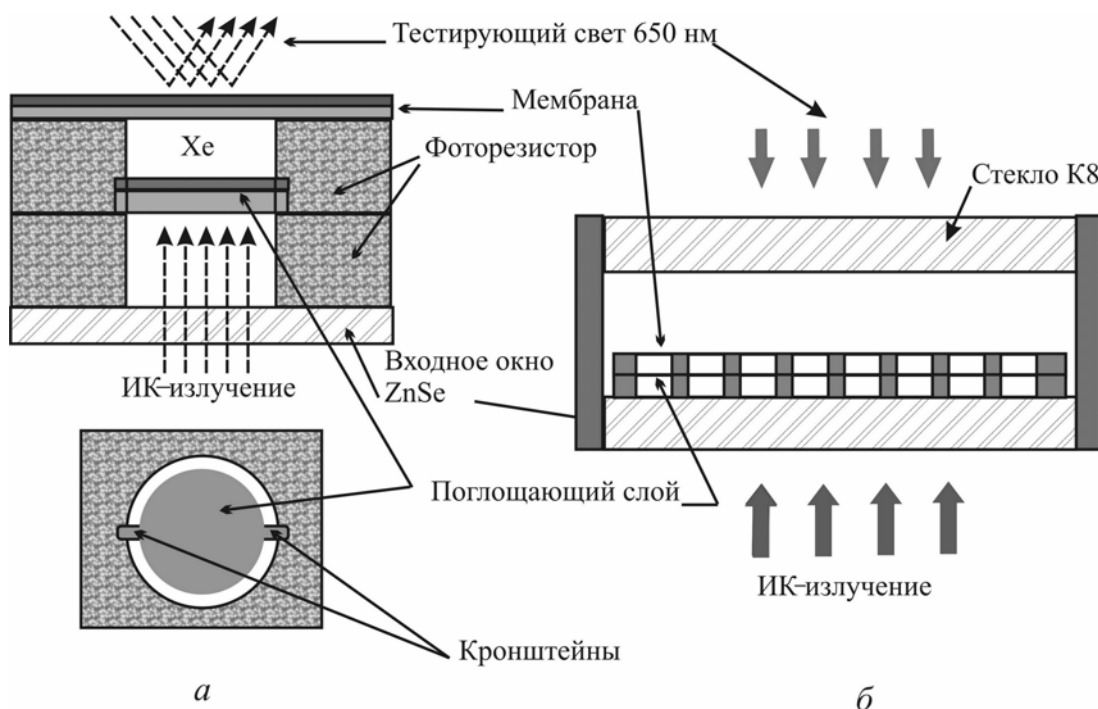


Рис. 2. Схема элемента термопневматического ММП (а) и матричного приемника (б)

В работе были разработаны технологические приемы обработки поверхности стекла и способы отслаивания матрицы, позволившие проводить данный процесс с высокой воспроизводимостью [9]. Полученную конструкцию матричного термопневматического детектора на носителе ZnSe помещали в замкнутый газовый объем, с одной стороны ограниченный пластиной ZnSe, а с другой стороны — выходным окном, выполненным из стекла К8 (см. рис. 2, б). Данная конструкция автоматически обеспечивала режим равенства внутреннего давления в термопневматической ячейке и внутреннего давления в общей камере при изменении давления и температуры окружающей среды.

### Оптическая система считывания с многоэлементной структуры ММП

Дифференциальный оптический метод регистрации перемещения мембраны основан на интерференции двух поляризованных световых волн, которые распространяются параллельно, но пространственно разнесены на половину диаметра термопневматической ячейки [9]. На рис. 3, а представлена схема измерительной оптической схемы. Излучение от светодиода проходит через конденсор, поляризатор, делительную пластину, микрообъектив и пластину Савара и падает на мембранную поверхность термопневматических ячеек. Далее изображение мембранной поверхности проецируется в плоскость ПЗС-матрицы, перед которой установлены компенсатор и анализатор. Излучение, прошедшее через поляризатор, линейно поляризовано и совпадает с плоскостью падения излучения на светоделительную пластину. Излучение, прошедшее пластину Савара, пространственно расщепляется на две взаимно ортогональные поляризованные компоненты. После отражения от мембранной поверхности термопневматических ячеек и прохождения компенсатора одна из поляризованных компонент сдвигается по фазе на  $90^\circ$ , а с помощью анализатора амплитуды обеих компонент уравниваются. В результате возникает интерференция двух компонент, поляризованных уже в одной плоскости. На рис. 3, б представлено интерференционное изображение фрагмента матрицы микроакустических ячеек, полученное с помощью описанной схемы. При поглощении ИК-излучения термопневматической ячейкой и нагрева газа происходит сдвиг мембраны относительно исходного положения, что приводит к изменению интерференционной картины. Программное обеспечение ПЗС-камеры выводит на монитор изменение интерференционной картины относительно исходной, которая за-

поминается как темновой кадр. В результате пространственное распределение интенсивности разностного сигнала отражает пространственное распределение интенсивности ИК-излучения. Данная система считывания регистрирует прогибы мембран на уровне 1—2 нм и является, на наш взгляд, наиболее устойчивой схемой к воздействиям температуры и механических колебаний.

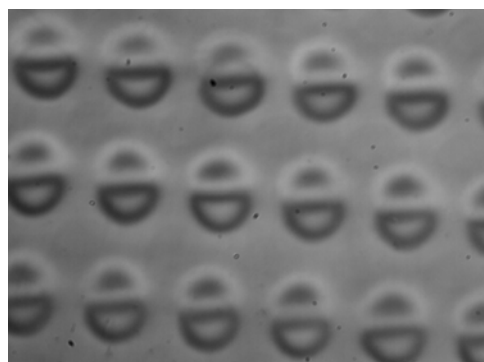
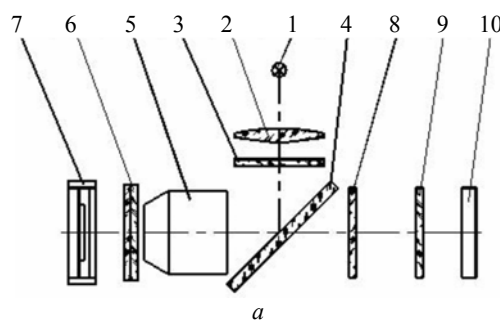


Рис. 3. Схема оптической системы считывания (а) и полученное с ее помощью интерференционное изображение фрагмента матрицы термопневматических ММП (б):

- 1 — светодиод; 2 — конденсор; 3, 9 — поляризаторы;  
4 — светоделитель; 5 — микрообъектив; 6 — пластина Савара; 7 — матрица термопневматических ММП;  
8 — компенсатор; 10 — ПЗС-камера

### Экспериментальные результаты

Результаты измерения механических свойств мембраны показали, что значение эффективного модуля упругости мембраны составляет 45—55 ГПа (модуль упругости кварца, по данным различных источников, 60—65 ГПа). В этой связи одним из основных путей повышения чувствительности термопневматического детектора является уменьшение толщины мембранного слоя. Разработанная технология изготовления мембран с толщинами 100 нм не является критической, и возможно дальнейшее снижение толщины в целях повышения чувствительности детектора.

Важным параметром является способность мембран сохранять свои упругие свойства. Мембраны подвергали многократному воздействию внешнего статического давления в диапазоне

( $100 \pm 25$ ) кПа, и они сохраняли свои механические свойства. Изменений, связанных с пластическими деформациями, не наблюдалось.

Собственная температурная чувствительность ячеек ММП определяется двумя факторами: величиной механического перемещения и амплитудным разрешением сигнала системой оптической регистрации. Измерения собственной температурной чувствительности термопневматических ячеек проводили косвенным методом путем измерения минимального перепада давления между внешним и внутренним объемами, при котором оптическая система еще регистрирует механическое перемещение мембраны.

Известно, что изменение температуры газовой среды приводит к расширению газа, а при замкнутом объеме — к изменению давления согласно уравнению Менделеева—Клапейрона.

Изменение температуры ячейки на  $1^\circ\text{C}$  приводит к изменению давления на 365 Па при исходном давлении 100 кПа. На рис. 4, а показана временная зависимость сигнала с выхода системы регистрации при периодическом изменении давления в ячейке на различную величину. Минимальное регистрируемое давление составило

5 Па, что соответствует изменению температуры ячейки на  $0,015\text{ K}$ . Собственная температурная чувствительность болометрической ячейки матрицы фирмы ULIS составляет  $0,010\text{ K}$ . Собственная чувствительность болометрической ячейки была измерена путем прямого кондуктивного прогрева ячейки нагревательным элементом типа "Пельтье".

Таким образом, собственная чувствительность представленного термопневматического преобразователя близка к уровню современных болометрических датчиков.

Радиационная чувствительность измерялась с помощью макета абсолютно черного тела (АЧТ). На рис. 4, б слева показана временная зависимость отклика ячейки ММП при экспозиции излучением АЧТ, нагретого до  $200^\circ\text{C}$ . Время отклика составило не более 30 мс. Температурная чувствительность на частоте 1 Гц составила  $0,15\text{ K/Гц}^{1/2}$ . Эквивалентная мощность шума (NEP) на частоте 1 Гц с оптикой  $f/1$  составила  $1,1 \cdot 10^{-8}\text{ Вт/Гц}^{1/2}$ . На рис. 4, в показан кадр с изображением объекта, нагретого до температуры  $200^\circ\text{C}$ , полученный с помощью матричного термопневматического преобразователя размерностью  $200 \times 200$ .

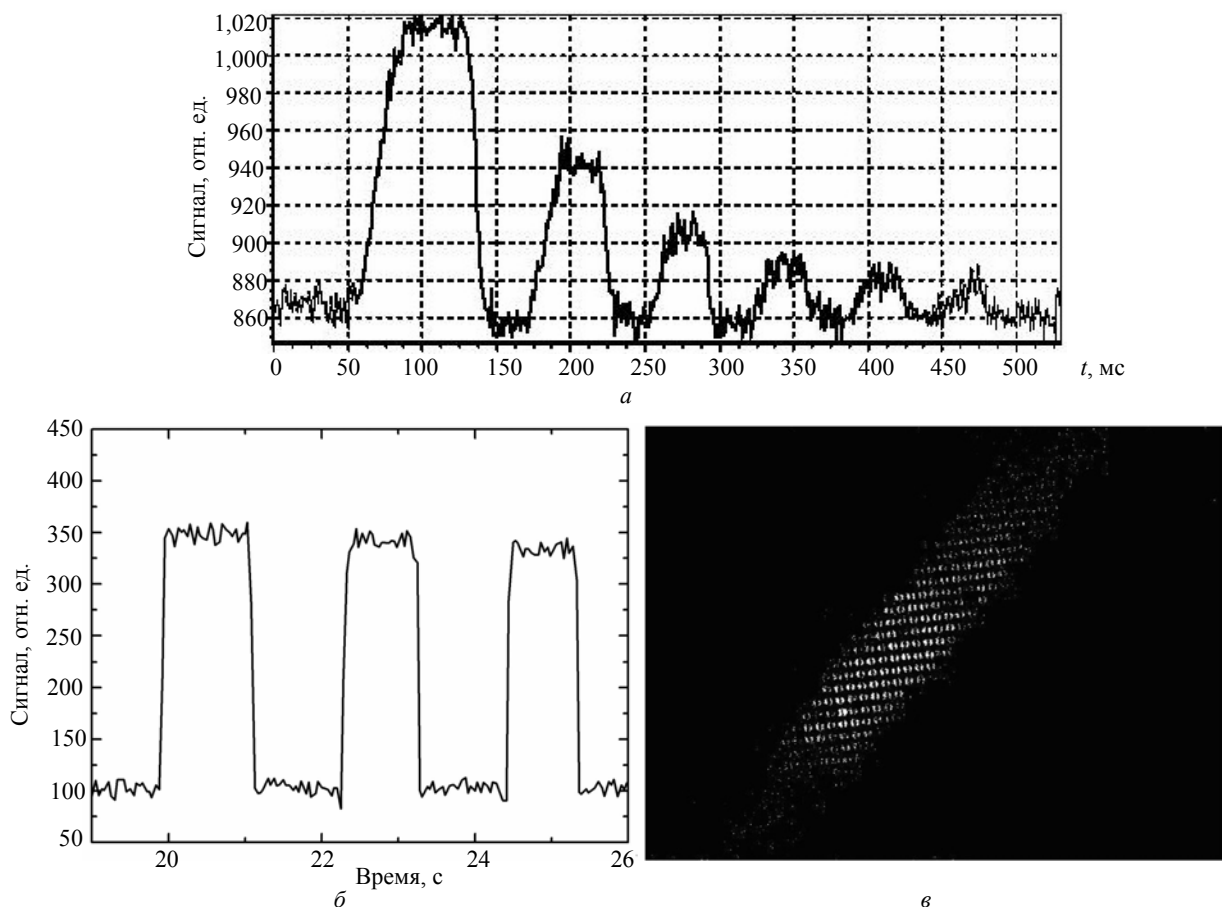


Рис. 4. Отклик сигнала от термопневматической ячейки:

а — на периодическое изменение давления в приемнике на величину 100, 50, 25, 15, 10, 5 Па, соответственно; б — на периодическую засветку излучением АЧТ при температуре  $200^\circ\text{C}$ ; в — кадр с изображением тела, нагретого до  $200^\circ\text{C}$ , полученный с помощью матричного термопневматического ММП размерностью  $200 \times 200$  и оптической системой считывания

## Выводы

Модуль неохлаждаемого матричного ФПУ на основе технологии ММП обладает уникальными для приемников ИК-диапазона свойствами — возможностью приема излучения в широком диапазоне спектра электромагнитного излучения, возможностью работы в широком диапазоне температуры окружающей среды без криостатирования, относительно низкой себестоимостью.

Несмотря на невысокие значения чувствительности и разрешения, модуль неохлаждаемого матричного ФПУ на основе технологии ММП может найти применение в составе ряда тепловизионных систем военного и гражданского назначения, в которых достижимые уровни указанных параметров реализуются путем работы на небольших расстояниях до наблюдаемых объектов.

Раздельная система приема и регистрации ИК-изображения существенно упрощает технологию изготовления приемника и значительно снижает его стоимость. Кроме того, такой приемник является радиационно стойким, так как не содержит радиационно нестойких материалов, а изображение может быть выведено по каналу волоконно-оптической связи. Раздельная система приема и считывания является гибкой к выбору материала входного окна и поглощающего слоя, что позволяет соответствующим подбором материалов создавать как селективные, так и неселективные приемники в диапазоне длин волн 1—1000 мкм, что перекрывает весь ближний и дальний ИК, а также

терагерцовый диапазоны. Масштабы внедрения технологии ММП в перспективе будут определяться относительной дешевизной опытных образцов данных изделий по сравнению с решениями в рамках иных технологий.

Предлагается использовать неохлаждаемые модули на основе термопневматических ММП в тепловизионных системах двойного назначения (в том числе для получения изображения объектов в условиях тумана, пыли, дыма, радиации); приборах контроля технического состояния энергонасыщенных и радиационно опасных объектов; системах охраны и безопасности; оснащать пользовательские станции терагерцового излучения относительно недорогими двухкоординатными фотоприемниками.

## Литература

1. *Рогальский А.* Инфракрасные детекторы: Пер. с англ./ Под ред. А. В. Войцеховского. — Новосибирск: Наука, 2003.
2. *Wood R. A., Foss N. A.*//*Laser Focus World*, June 1993. P. 101.
3. *Whatmore R. W.*//*Ferroelectrics*, 1991. V. 118. P. 241.
4. *Amantea R., Knoedler C. M., Pantuso F. P., Patel V., Sauer D. J., Tower J. R.*//*Proc. SPIE*. 1997. V. 3061. P. 210.
5. *Manalis S. R. et al.*//*Appl. Phys. Lett.* 1997. V. 70. P. 3311.
6. *Dong F., Zhang Q., Chen D., Miao Z., Xiong Z., Guo Z., Li C., Jiao B., Wu X.*//*Ultramicroscopy*, 2008. V. 108. P. 579.
7. *LeMieux M. C., McConney M. E., Lin Y. H., Singamaneni S., Jiang H., Bunning T. J., Tsukruk V. V.*//*Nano. Lett.* 2006. V. 6. P. 730.
8. *Golay M. J. E.*//*Rev. Sci. Instrum.* 1947. V. 18. P. 357.
9. *Федорин В. Н.*: Пат. 2157513 от 05.03.1999.

Статья поступила в редакцию 9 октября 2008 г.

## Uncooled matrix IR detector based on optoacoustic cells and optoelectronic reading system

*A. V. Gelfand, A. G. Paulish, V. N. Fedorinin*

Novosibirsk Branch of Institute of Semiconductor Physics SB RAN "KTI PM",  
Novosibirsk, Russia

*The matrix structure 200×200 of optoacoustic cells (OAC) for uncooled IR detector with optoelectronic reading system is fabricated and investigated at the first time. Cells 100 μm in diameter shaped on ZnSe window and filled by xenon. Photosensitive layer consisted of SiO<sub>2</sub> film with adsorption range 8—14 μm. Flexible membrane 0.15 μm of thick consisted of SiO<sub>2</sub> and Al films. Radiation temperature sensitivity and noise equivalent power with optics f/1 were 0.15 K/Hz<sup>1/2</sup> and 10 nW/Hz<sup>1/2</sup>, respectively, and the thermal response time was below 30 ms.*

PACS: 85.60.-q; 85.85.+j