

5-25-2018

ARSENID INDIA IN MULTI-CHANNEL PHOTOELECTRONICS

B G. Weiner

*Institute of Semiconductor Physics named after A.V. Rzhanova SB RAS, Novosibirsk State University,
Novosibirsk, Russia, BGV@isp.nsc.ru*

Follow this and additional works at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi>

Recommended Citation

Weiner, B G. (2018) "ARSENID INDIA IN MULTI-CHANNEL PHOTOELECTRONICS," *Scientific-technical journal*: Vol. 22 : Iss. 5 , Article 2.

Available at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi/vol22/iss5/2>

This Article is brought to you for free and open access by 2030 Uzbekistan Research Online. It has been accepted for inclusion in Scientific-technical journal by an authorized editor of 2030 Uzbekistan Research Online. For more information, please contact sh.erkinov@edu.uz.

UDC 535-15

1. ARSENID INDIA IN MULTI-CHANNEL PHOTOELECTRONICS

B.G. Weiner

Institute of Semiconductor Physics named after A.V. Rzhanova SB RAS,
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia, e-mail: BGV@isp.nsc.ru

***Abstract.** The review paper considers photovoltaic processes occurring in homoepitaxial films irradiated both directly from the planar side and from the side of the heavily doped substrate on which they are grown. Primary attention is paid to the applied aspects associated with the use of InAs in multi-cell photoelectronics. The examples demonstrate the versatility and high efficiency of using indium arsenide-MIS structures in multichannel spectrometry and matrix thermal imaging.*

Key words: solid-state electronics, arsenide-indium MIS structure, multichannel spectrometry, matrix thermal imaging.

АРСЕНИД ИНДИЯ В МНОГОКАНАЛЬНОЙ ФОТОЭЛЕКТРОНИКЕ

Б.Г. Вайнер

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия, e-mail: BGV@isp.nsc.ru

***Аннотация.** В обзорной работе рассмотрены фотоэлектрические процессы, протекающие в гомоэпитаксиальных пленках, облученных как непосредственно с планарной стороны, так и со стороны сильнолегированной подложки, на которой они выращены. Преимущественное внимание уделено прикладным аспектам, связанным с применением InAs в многоэлементной фотоэлектронике. На примерах продемонстрирована многогранность и высокая эффективность использования арсенид-индиевых МДП-структур в многоканальной спектрометрии и матричном тепловидении.*

Ключевые слова: твердотельной электроники, арсенид-индиевая МДП-структура, многоканальная спектрометрия, матричное тепловидение.

Узкозонный полупроводник типа A^3B^5 арсенид индия нельзя отнести к классу "популярных" материалов твердотельной электроники. Однако, его практическую значимость для многоканальной (многоэлементной) фотоэлектроники трудно переоценить. В обзорной работе представлен ряд научных результатов, подтверждающих этот факт. Рассмотрены фотоэлектрические процессы, протекающие в гомоэпитаксиальных пленках, облученных как непосредственно с планарной стороны, так и со стороны сильнолегированной подложки, на которой они выращены. Представлена физика квантовомеханических явлений в электронных слоях обогащения с учетом особенностей зонной структуры полупроводника и неидеальности границы раздела полупроводник-диэлектрик. Преимущественное внимание уделено прикладным аспектам, связанным с применением InAs в многоэлементной фотоэлектронике. На примерах продемонстрирована многогранность и высокая эффективность использования арсенид-индиевых МДП-структур в многоканальной спектрометрии и матричном тепловидении.

I. ВВЕДЕНИЕ

Научный и практический интерес к полупроводниковым структурам, чувствительным в инфракрасной (ИК) области спектра, остается на неизменно высоком уровне, что во многом предопределено широкими возможностями создаваемых на их базе детекторов излучения, позволяющих не только решать актуальные научно-технические задачи, но и глубже познавать явления и законы природы. Предложены разнообразные принципы построения детекторов и фотоприемных устройств (ФПУ), активно внедряемых в практику

[1, 2]. Созданы фоточувствительные приборы, основанные на собственном поглощении излучения, примесном поглощении, поглощении с использованием свойств гетеропереходов, полупроводниковых сверхрешеток, квантовых ям, детекторы, осуществляющие неселективное поглощение энергии фотонов, и другие. Направляются усилия на конструирование отдельных фотоэлементов и фоточувствительных матриц с использованием, так называемых, квантовых точек [3].

Современными трендами являются в спектрометрии – применение линейных многоканальных детекторов электромагнитного излучения, размещенных в открытом отверстии монохроматора, вместо выходной щели, а в тепловидении – использование матричных фотоприемников, не требующих оптико-механического сканирования. Это на 2-3 порядка увеличивает быстродействие и, при прочих равных условиях, во столько же раз улучшает чувствительность оптической аппаратуры, поскольку механическое сканирование поля обзора заменяется практически безынерционным – электронным.

Интерес к многоэлементным фоточувствительным системам на основе узкозонного полупроводника типа A^3B^5 – арсенида индия – долгое время почти отсутствовал, хотя можно было понять, что такие структуры позволяют в области собственного поглощения InAs охватить важный для многих спектрометрических приложений диапазон от видимого вплоть до 3.05 мкм, в котором, в частности, открывалась привлекательная возможность их использования для широкодиапазонной многоканальной спектрометрии.

Идея построения тепловидения на основе арсенид-индиевых фотоэлементов была, в свою очередь, интересна тем, что из всех полупроводниковых соединений, потенциально пригодных для тепловидения высокого пространственного и температурного разрешения, область фундаментального поглощения InAs соответствовала наиболее коротковолновому участку (вблизи 3 мкм) на шкале электромагнитных волн. Перспективность построения матричного тепловидения на базе InAs-детекторов следовала из фундаментальных свойств теплового излучения, обеспечивающих заметно большую контрастность изображения в коротковолновой ИК области по сравнению с длинноволновой. Более того, объединенная в гибридную микросхему с кремниевым мультиплексором арсенид-индиевая фотоприемная матрица обладала узким спектральным диапазоном чувствительности (ширина рабочей полосы много меньше средней рабочей длины волны детектора).

Коротковолновая и узкая спектральная область чувствительности представлялась для тепловидения весьма перспективной, поскольку здесь можно было ожидать большего динамического диапазона детекторов тепловизионных камер в силу не столь существенного влияния фонового излучения, приводящего к быстрому заполнению и последующему переполнению ячеек длинноволновых ИК фотоприемников. Арсенид-индиевые детекторы с шириной запрещенной зоны полупроводника около 0.4 эВ допускают работу при более высоких температурах, чем длинноволновые с шириной зоны 0.2 эВ и меньше. При меньших длинах волн и в условиях спектральной узкополосности следовало ожидать и лучшего пространственного разрешения оптической системы ввиду ослабления дифракционных ограничений и отсутствия хроматических аберраций.

Отметим, что в матричных ИК ФПУ в качестве элементов используют, в основном, p-n переходы или фотоспротивления, а структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) применяют обычно лишь для видимого диапазона. Такое положение, главным образом, обусловлено технологическими причинами. В МДП-структурах на основе узкозонных полупроводников типа A^3B^5 или A^2B^6 требования к качеству диэлектрика (пористость < 10 пор/см², пробивные напряжения > 30 В) при площади фотоприемной матрицы порядка 1 см² являются весьма трудновыполнимыми. Прежде всего, это связано с ограничением на температуру синтеза диэлектрических пленок (не более 100-200 °С). В то же время, привлекательность МДП-технологии для матричных ИК ФПУ очевидна хотя бы в силу

резкого упрощения технологического маршрута, где количество фотолитографических слоев можно сократить с обычных 7-8 до 3.

Одной из перспективных оптоэлектронных систем со структурой МДП являются приборы с зарядовой инжекцией. По определению, данному в [4], приборами с зарядовой инжекцией (ПЗИ) называются твердотельные приемники изображения с поверхностным каналом, в которых для считывания, хранения и сканирования использованы инжекция и перенос заряда внутри отдельных фоточувствительных ячеек. Следует учитывать ряд принципиальных отличий МДП-ПЗИ элементов на основе InAs от хорошо изученных в этой области кремниевых МДП-ПЗИ ячеек, а по ряду признаков – и от других структур, используемых в ИК технике, в частности, в тепловизорах. Перечисленные ниже факторы способны отразиться на физических характеристиках и результатах практического применения арсенид-индиевых фотоприемных ячеек:

1) арсенид-индиевая система обладает температурной неустойчивостью, требующей при создании МДП-структур использовать низкотемпературные (100–200 °С) технологии;

2) электронное сродство χ в InAs на 0.9 эВ превышает χ в Si, что влияет на высоты граничных потенциальных барьеров в структурах с одинаковыми диэлектриками;

3) стандартные измерения на Si и на узкозонных полупроводниках типа A^3B^5 проводят при разной температуре (300 К и 80 К), от которой зависит соотношение между полевыми и термоактивационными механизмами в процессах инжекции и переноса заряда;

4) фундаментальные свойства InAs, в частности, его зонная структура, существенно отличаются от полупроводников IV группы;

5) из-за низкой плотности электронных состояний в зоне проводимости поверхностный изгиб зон здесь заметно больше, чем в Si [5], что влияет на распределение электрического поля в МДП-структуре и на высоту потенциального барьера InAs-диэлектрик;

6) в тепловизионном исполнении арсенид-индиевая ячейка является спектрально-узкополосной [6], что принципиально отличает ее от многих других ИК фотоприемников;

7) при спектрметрическом применении такая ячейка является спектрально-широкополосной, функционирующей одновременно в ИК и видимой частях спектра, что не характерно для многих ИК фотоприемников;

8) арсенид-индиевая МДП-структура сама является накопительной ячейкой ПЗИ, в отличие от многих других ИК фотоприемников (фотодиоды, барьеры Шоттки, многослойные меза-структуры), где накопительная ячейка перенесена в кремниевый мультиплексор.

Заметим, что помимо фундаментальных и прикладных задач, направленных на исследование арсенид-индиевых полупроводниковых структур, важной проблемой выступает методологическая. А именно, с учетом изученных физических явлений и процессов в МДП-ПЗИ структурах, их спектральных характеристик, особенностей функционирования требуется разработать адекватные методики использования данных фотоприемников в многоканальной спектрметрии и матричном тепловидении, новые принципы и методы измерений разнообразных физических величин.

Настоящая работа обобщает материалы и ключевые научные результаты, полученные по вышеупомянутым проблемам.

II. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В МДП-СТРУКТУРАХ

При создании и эксплуатации детекторов ИК излучения нами было обнаружено и исследовано множество интересных физических явлений, протекающих в МДП-структурах. Так, в частности, было показано, что при отсоединении фоточувствительной ячейки от ячейки кремниевого мультиплексора на соседних площадках возникает избыточный

фотоответ, обусловленный подтеканием "чужих" фотоносителей, методом ИК-зондирования исследована "анатомия" такого избыточного фотоответа и др.

Наше квантовомеханическое рассмотрение слоев обогащения электронами поверхности на неидеальной границе раздела полупроводник-диэлектрик [5] дало путь к пониманию физических процессов в таких сложных системах. Количественный квантовомеханический анализ подобных слоев, индуцированных вблизи *неидеальной* (реальной) поверхности полупроводников, представляет значительные трудности и до последнего времени не проводился. Решение этой задачи еще более усложнено, когда мы имеем дело с узкозонными полупроводниками, для которых характерны низкая плотность состояний в зоне проводимости и ее непараболичность.

В нашей работе [5] предложен и реализован оригинальный подход, существенно облегчающий и реально позволяющий проводить физический анализ подобных систем с возможностью самосогласованного решения уравнений Пуассона и Шредингера в приповерхностных электронных слоях на границе узкозонный полупроводник - диэлектрик. Физическая модель учитывает непараболичность зоны проводимости, вырождение электронного газа и остальные принципиальные особенности, характерные для таких полупроводниковых систем. Особое значение имеет то, что рассмотренная модель допускает наличие естественного переходного слоя на границе между полупроводником и диэлектриком.

Для аппроксимации электростатического потенциала в приповерхностном слое полупроводника предложено и обосновано использование новой аналитической функции – модифицированного потенциала Кратцера. До настоящего времени в литературе были описаны и применялись для областей пространственного заряда лишь две подобные аппроксимации – треугольная и экспоненциальная потенциальные ямы.

Для случая неидеальной границы раздела с применением предложенного метода получены волновые функции и дискретный энергетический спектр электронов в слоях обогащения узкозонных полупроводников типа A^3B^5 n-InSb и n-InAs в широком диапазоне поверхностных концентраций электронов – вплоть до 10^{13} см⁻².

Развитый подход дает новые возможности для более точного и глубокого изучения известных и впервые создаваемых систем узкозонный полупроводник - диэлектрик.

Изучено и опубликовано большое количество других значимых результатов в обсуждаемом направлении. Приведем пример одного из них.

Действие сильного электрического поля приводит не только к изменению зарядового состояния диэлектрика под полевым электродом, но и к перераспределению заряда в плоскости МДП-структуры за границами этого электрода. Подобные явления часто называют краевыми эффектами. При подаче отрицательного смещения на полевой электрод заряд отрицательного знака растекается за пределы полевого электрода вдоль поверхности диэлектрической пленки, формируя охранный зарядовый пояс на внешней стороне диэлектрика и, соответственно, индуцируя слой обогащения в полупроводнике р-типа вдоль границы МДП-элемента. При некотором критическом напряжении происходит перезарядка указанной области диэлектрика под действием краевого поля, что приводит к увеличению скорости генерации неосновных носителей в приповерхностной области полупроводника. Нами был осуществлен следующий эксперимент.

На МДП-структурах с непрозрачным полевым электродом измерялась конденсаторная фотоэдс (краевая фотоэдс). Спектральный состав излучения источника обеспечивал режим собственного поглощения в полупроводнике и позволял исключить из рассмотрения фотоинжекцию в диэлектрик. Поток модулировался с частотой 10 Гц. Фотоэдс регистрировалась фазочувствительным нановольтметром Unipan 232В. В процессе измерений образец находился при температуре жидкого азота и был защищен от внешнего фона охлаждаемым экраном. Инжекция заряда в диэлектрик достигалась кратковременным

приложением импульсного отрицательного смещения на полевой электрод. При измерении сигнала краевой фотоэдс структура находилась под инвертирующим потенциалом.

В исходном состоянии (до сильнополевого импульсного воздействия) фотосигнал обусловлен носителями, генерированными светом как непосредственно в области краевого поля, так и на расстоянии диффузионной длины от нее. Было предположено, что отрицательный заряд, растекшийся в результате сильнополевого воздействия вдоль поверхности диэлектрика, расширит эффективную площадь фоточувствительной части области пространственного заряда. При непрозрачном электроде это должно было существенно увеличить фотосигнал, измеряемый на МДП-структуре, что нами и наблюдалось в эксперименте: было обнаружено, что фотоответ, связанный с краевой фотоэдс, увеличивался до двукратной величины по мере того, как отрицательное напряжение инжекции электронов в диэлектрик возрастало по абсолютной величине с 50 до 100 В, а напряжение плоских зон МДП-структуры смещалось при этом на 30 В.

Такой эффект увеличения фотоответа в результате латерального дрейфа заряда в МДП-структурах следует учитывать при проектировании и эксплуатации ИК фотоприемных устройств.

III. МНОГОКАНАЛЬНАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ И МАТРИЧНОЕ ТЕПЛОВИДЕНИЕ НА ОСНОВЕ АРСЕНИД-ИНДИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Оптимальным конструктивным решением в производстве интегральных схем на основе InAs и других узкозонных полупроводников является изготовление гибридных микросхем, в которых устройство считывания и предварительной обработки сигналов выполнено на кремнии. Такая конфигурация была реализована и в нашей работе.

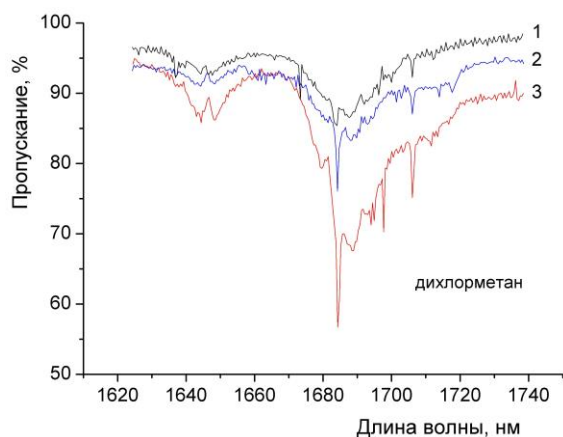


Рис. 1. Спектры пропускания паров дихлорметана, полученных путем естественного испарения разного количества вещества, помещенного в жидкой фазе в оптическую кювету: 1 – одна капля, 2 – три капли, 3 – десять капель. Спектры представляют собой отношение измеренного в эксперименте фотоответа к фотоответу, полученному детектором до добавления жидкости в кювету.

Созданное и подробно изученное нами линейное фотоприемное устройство на основе InAs, предназначенное для спектрометрических измерений, состояло из четырех автономных линейных гибридных микросхем, расставленных в шахматном порядке в два параллельных ряда. Лейко-сапфировый пьедестал толщиной 250 мкм служил переходным звеном между ПЗИ-линейкой, содержащей 128 МДП-структур, и кремниевым мультиплексором с последовательным считыванием сигналов. Выступление элементов за пределы пьедестала позволяло исключить прохождение лучей сквозь дополнительную оптическую среду (лейко-сапфир). Такой 512-элементный детектор был конструктивно совмещен с монохроматором Jobin-Yvon HR-320. Пример спектра пропускания паров дихлорметана, измеренного с помощью описанного спектрометрического устройства, приведен на рис. 1.

Матричные фоточувствительные гибридные микросхемы формата 128×128 принципиально отличались по исполнению от линейных фотоприемных модулей. Их построение схематично представлено на рис. 2. Промежуточный пьедестал здесь отсутствовал, и 128 × 128 = 16384 МДП-ячеек соединялись с соответствующими им считывающими ячейками кремниевого мультиплексора напрямую способом "flip chip" (перевернутый чип) через индиевые столбики. Засветка фотоэлементов, сформированных на гомоэпитаксиальном слое InAs, осуществлялась с тыльной стороны сильнолегированной арсенид-индиевой подложки, обращенной к объективу. Мультиплексор

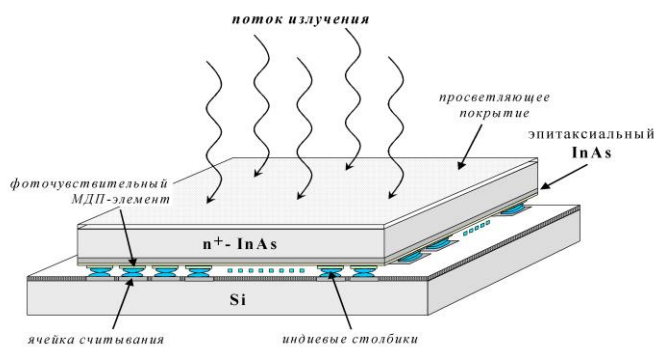


Рис. 2. Схематическое изображение устройства гибридного матричного фоточувствительного модуля 128×128, предназначенного для коротковолнового спектрально-узкополосного тепловидения.

полупроводникового материала допустим только тогда, когда в качестве элемента, вырабатывающего фотоответ, рассматривается фотоприемная матрица в отрыве от процедуры накопления, системы считывания и обработки сигнала. Рассмотрение фоточувствительных ячеек применительно к их использованию в составе многоканального ФПУ некорректно без учета конечной емкости накопительной ячейки и ограничений, налагаемых считывающим мультиплексором. Основными лимитирующими факторами последнего являются ограниченность его быстродействия и емкости накопительных ячеек. Эти два фактора, определяемые исключительно уровнем кремниевой технологии сегодняшнего дня, приводят к тому, что температурная чувствительность коротковолновой арсенид-индиевой МДП-структуры способна при определенных условиях оказаться выше, чем чувствительность длинноволновых детекторов излучения, таких, например, как фотодиоды на основе InSb или КРТ.

Работая с матричными детекторами на основе InAs, мы имеем дело с заметно более коротковолновыми приемниками излучения по сравнению с широко используемыми для тепловидения в окнах прозрачности атмосферы 3–5 мкм (InSb и др.) и 8–14 мкм (КРТ и др.). Данное свойство дает заметные преимущества арсенид-индиевым тепловизионным системам, поскольку позволяет производить регистрацию сигналов в условиях малых фонов и малого числа фотонов, а потому полностью использовать все время кадра для параллельного накопления сигнала непосредственно на элементах МДП-матрицы. Последнее подтверждает рис. 3, демонстрирующий результаты нашего расчета числа фотонов, поглощаемых за время накопления фотоэлементами, созданными на

арсенид-индиевой подложки, обращенной к объективу. Мультиплексор один раз за период, равный времени накопления заряда в ячейке (время кадра), производит последовательный опрос всех ПЗИ-элементов, считывание с них сигналов, зарядовое усиление и дальнейший последовательный вывод сигналов на единый выход.

Долгое время считалось, что тепловизионные свойства систем тем лучше, чем более длинноволновую область охватывает ИК детектор. Однако, такой подход к выбору

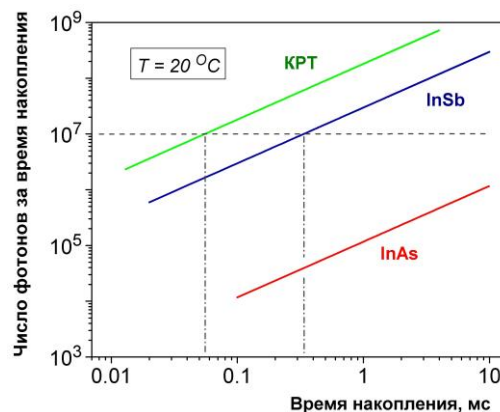


Рис. 3. Характерное число фотонов, поглощаемых ячейкой за время накопления, рассчитанное для трех разных полупроводников, применяемых в тепловидении. Температура излучающего объекта задана равной 20 °С.

трех полупроводниках, используемых в тепловидении, с учетом характерных для них спектральных диапазонов чувствительности при одинаковых апертурах засветки.

Видно, что заполнение накопительной ячейки емкостью 10^7 электронов происходит в случаях InSb и КРТ настолько быстро (рассматриваются фотонетрические приемники, а число фотонов растет с уменьшением энергии кванта), что, не имея возможности реализовать соответствующую столь высокую частоту кадров, время накопления приходится искусственно сокращать, используя для регистрации сигнала лишь малую долю времени кадра. На длинах волн, характерных для InAs, ситуация, напротив, благоприятная, и все время кадра здесь можно использовать для накопления заряда. Дальнейшее продвижение в коротковолновую область не является предпочтительным для тепловизионной техники в силу резкого падения испускательной способности нагретых тел при уменьшении длины волны и, при этом, возрастающего участия солнечного и близкого к видимому фонового излучения, отраженного от визуализируемых нагретых поверхностей.

Если, помимо сказанного, еще и учесть, что согласно фундаментальным свойствам теплового излучения контрастность изображения на коротких длинах волн выше, чем на длинных [7], то InAs вполне обоснованно может рассматриваться как оптимальный материал для применения в тепловизорах медицинского и иного назначений, где не требуется изучать объекты, находящиеся при слишком низких (меньше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) температурах [8-10]. В частности, нами было показано, что такие тепловизоры способны предоставлять уникальную научную информацию при изучении адсорбционно-десорбционных и низкотемпературных каталитических процессов, развивающихся на поверхности твердых тел [11, 12].

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние годы была решена крупная научная проблема, состоящая в разработке и развитии базовых физических принципов построения спектрально-широкополосной многоканальной спектрометрии и коротковолнового спектрально-узкополосного матричного тепловидения на основе использования фоточувствительных арсенид-индиевых МДП-ПЗИ структур с зарядовой инжекцией.

Достоверно установлено, что арсенид-индиевые фоточувствительные ПЗИ-элементы со структурой МДП можно полноценно использовать в многоканальных линейчатых и матричных ФПУ, предназначенных для широкодиапазонной спектрометрии и спектрально-узкополосного тепловидения. При этом доказано, что InAs может рассматриваться как оптимальный материал для применения в тепловизорах медицинского и иного назначений, когда не требуется изучать объекты слишком низких (к примеру, меньших $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) температур.

Есть основания надеяться, что в ближайшем будущем для использования в спектральной области до $3\text{ }\mu\text{m}$, где чувствительны структуры на основе InAs, появится немалое количество новых детекторов, и многие материалы проработанной и представленной здесь работы приобретут еще большую актуальность.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00956). Автор благодарен мсье Жан-Люку де Маншану (Франция) за его участие в получении спектра пропускания дихлорметана, приведенного на рис. 1.

References

- [1]. Filachyov A. M., Taubkin I. I., Trishenkov M. A. (2005) Tverdotelnaya fotoelektronika. Fizicheskie osnovi / M.: Fizmatkniga, 384 s.
- [2]. Rogalski A., Bielecki Z. (2004) Detection of optical radiation // Bull. Pol. Ac.: Tech., vol. 52, No. 1, p. 43–66.
- [3]. Vaillancourt J., Vasinajindakaw P., Lu X., Stintz A., Bundas J., Cook R., Burrows D., Patnaude K., Dennis R., Reisinger A., Sundaram M. (2009) A voltage-tunable multispectral 320×256 InAs/GaAs quantum-dot infrared focal plane array // Semicond. Sci. Technol., vol. 24, p. 045008 (4 pp.).
- [4]. Pribori s zaryadovoy svyazyu (1982) / Per. s angl. Pod red. D. F. Barba / M.: Mir, 1982. – 240 s.

- [5]. Vainer B. G. (2018) A pertinent approximation of the electrostatic potential in a quantized electron accumulation layer induced at a nonideal surface of a narrow-gap semiconductor // *International Journal of Numerical Modelling – Electronic Networks, Devices and Fields*, vol. 31, Iss. 1, p. e2260.
- [6]. Vainer B. G. (2000) Narrow spectral range infrared thermography in the vicinity of 3 μm operating wavelength // In: *Quantitative InfraRed Thermography 5, Eurotherm Seminar 64, QIRT'2000, Reims, France, July 18-21, 2000. Proceedings*. Ed. by D.Balageas, J.-L.Beaudoin, G.Busse, and G.M.Carlomagno / France, UTAP URCA, p. 84–91.
- [7]. Woolaway J. T. (1991) New sensor technology for the 3- to 5- μm imaging band // *Photonics Spectra*, vol. 25, No. 2, p. 113–119.
- [8]. Vainer B. G. (2005) FPA-based infrared thermography as applied to the study of cutaneous perspiration and stimulated vascular response in humans // *Phys. Med. Biol.*, vol. 50, p. R63–R94.
- [9]. Vainer B. G., Morozov V. V. (2017) Infrared thermography-based biophotonics: Integrated diagnostic technique for systemic reaction monitoring // *Physics Procedia*, vol. 86, p. 81–85.
- [10]. Vainer B. G. (2018) A novel high-resolution method for the respiration rate and breathing waveforms remote monitoring // *Annals of Biomedical Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10439-018-2018-6>.
- [11]. Vainer B. G. (2017) Up-to-date infrared thermography as a highly informative diagnostic technology successfully applied to thermodynamic studies // In: *XXI International Conference on Chemical Thermodynamics in Russia (RCCT-2017) (June 26-30, 2017, Novosibirsk, Russia): Abstracts / Novosibirsk: NIIC SB RAS*, p. 56.
- [12]. Vainer B. G., Fast S. S., Pyrjaev P. A., Moroz B. L. (2017) Phase transition- and catalytic chemical reaction-induced thermal manifestations in gas-solid heterogeneous systems monitored in real time using fast infrared thermography // In: *XXI International Conference on Chemical Thermodynamics in Russia (RCCT-2017) (June 26-30, 2017, Novosibirsk, Russia): Abstracts / Novosibirsk: NIIC SB RAS*, p. 318.

Список литературы

- [1]. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. (2005) *Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы / М.: Физматкнига*, 384 с.
- [2]. Rogalski A., Bielecki Z. (2004) Detection of optical radiation // *Bull. Pol. Ac.: Tech.*, vol. 52, No. 1, p. 43–66.
- [3]. Vaillancourt J., Vasinajindakaw P., Lu X., Stintz A., Bundas J., Cook R., Burrows D., Patnaude K., Dennis R., Reisinger A., Sundaram M. (2009) A voltage-tunable multispectral 320 \times 256 InAs/GaAs quantum-dot infrared focal plane array // *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 24, p. 045008 (4 pp.).
- [4]. *Приборы с зарядовой связью (1982) / Пер. с англ. Под ред. Д. Ф. Барба / М.: Мир, 1982. – 240 с.*
- [5]. Vainer B. G. (2018) A pertinent approximation of the electrostatic potential in a quantized electron accumulation layer induced at a nonideal surface of a narrow-gap semiconductor // *International Journal of Numerical Modelling – Electronic Networks, Devices and Fields*, vol. 31, Iss. 1, p. e2260.
- [6]. Vainer B. G. (2000) Narrow spectral range infrared thermography in the vicinity of 3 μm operating wavelength // In: *Quantitative InfraRed Thermography 5, Eurotherm Seminar 64, QIRT'2000, Reims, France, July 18-21, 2000. Proceedings*. Ed. by D.Balageas, J.-L.Beaudoin, G.Busse, and G.M.Carlomagno / France, UTAP URCA, p. 84–91.
- [7]. Woolaway J. T. (1991) New sensor technology for the 3- to 5- μm imaging band // *Photonics Spectra*, vol. 25, No. 2, p. 113–119.
- [8]. Vainer B. G. (2005) FPA-based infrared thermography as applied to the study of cutaneous perspiration and stimulated vascular response in humans // *Phys. Med. Biol.*, vol. 50, p. R63–R94.
- [9]. Vainer B. G., Morozov V. V. (2017) Infrared thermography-based biophotonics: Integrated diagnostic technique for systemic reaction monitoring // *Physics Procedia*, vol. 86, p. 81–85.
- [10]. Vainer B. G. (2018) A novel high-resolution method for the respiration rate and breathing waveforms remote monitoring // *Annals of Biomedical Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10439-018-2018-6>.
- [11]. Vainer B. G. (2017) Up-to-date infrared thermography as a highly informative diagnostic technology successfully applied to thermodynamic studies // In: *XXI International Conference on Chemical Thermodynamics in Russia (RCCT-2017) (June 26-30, 2017, Novosibirsk, Russia): Abstracts / Novosibirsk: NIIC SB RAS*, p. 56.
- [12]. Vainer B. G., Fast S. S., Pyrjaev P. A., Moroz B. L. (2017) Phase transition- and catalytic chemical reaction-induced thermal manifestations in gas-solid heterogeneous systems monitored in real time using fast infrared thermography // In: *XXI International Conference on Chemical Thermodynamics in Russia (RCCT-2017) (June 26-30, 2017, Novosibirsk, Russia): Abstracts / Novosibirsk: NIIC SB RAS*, p. 318.