

УДК 621.383.4/5

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz,
07.57.Kp, 85.60.Dw**Задачи импортозамещения и создание современных фотоприемных модулей***К. О. Болтарь, И. Д. Бурлаков, Н. И. Яковлева, П. В. Власов, П. С. Лазарев*

В последние годы наблюдается быстрое совершенствование изделий фотоники, обусловленное использованием многослойных гетероструктур, выращенных на основе перспективных материалов; конструированием структуры фоточувствительного элемента (ФЧЭ) для достижения минимального темнового тока, что в свою очередь приводит к смене поколений матричных фотоприемных модулей (ФПМ). В работе рассматриваются ФПМ, детектирующие излучение в различных спектральных диапазонах ИК-области спектра: на основе эпитаксиальных структур InSb в диапазоне 3–5 мкм; на основе квантово-размерных QWIP-структур из GaAs/AlGaAs в диапазоне 7,8–9,3 мкм; на основе ХВп-структур из InGaAs в диапазоне 0,9–1,7 мкм. Показаны наиболее близкие зарубежные аналоги и определены пути дальнейшего развития.

Ключевые слова: InSb, ХВп-структура, QWIP, фотоприемный модуль (ФПМ), обнаружительная способность.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-2-170-182

1. Введение

Для эффективного решения задачи обнаружения, распознавания и идентификации целей при любом освещении в любую погоду, ФПМ ИК-диапазона спектра постоянно совершенствуются за счет улучшения фотоэлек-

трических параметров, снижения массогабаритных и мощностных характеристик. Ключевыми параметрами высокоэффективных охлаждаемых ФПМ являются обнаружительная способность, пространственное разрешение и температурная чувствительность.

В последние годы наблюдается ускорение развития изделий фотоники, обусловленное созданием многослойных гетероструктур на основе перспективных материалов, совершенствованием структуры ФЧЭ для достижения минимального темнового тока, что в свою очередь приводит к смене поколений ФПМ во всех спектральных диапазонах ИК-области спектра [1–4]. Два важных направления технологического производства изделий фотоники, развивающиеся в направлении достижения предельных параметров и системных требований, включают полупроводниковые материалы группы A_3B_5 и группы A_2B_6 .

Наиболее развитым является направление группы A_2B_6 , включающее тройной раствор теллурида кадмия-ртути (HgCdTe, КРТ), чувствительный во всех поддиапазонах ИК-области спектра от 1 мкм до 14 мкм. В будущем

Болтарь Константин Олегович^{1,2}, нач. НТК, профессор, д.ф.-м.н.

Бурлаков Игорь Дмитриевич^{1,3}, зам. ген. директора по инновациям и науке, профессор, д.т.н.

Яковлева Наталья Ивановна¹, гл.н.с., д.т.н.

Власов Павел Валентинович¹, вед. инженер.

Лазарев Павел Сергеевич^{1,2}, гл. специалист.

¹АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: ogion@ogion-ir.ru

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

³МИРЭА – Российский технологический университет.

Россия, 119454, Москва, пр-т Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 14 марта 2022 г.

© Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Яковлева Н. И., Власов П. В., Лазарев П. С., 2022

ождается, что благодаря уникальным свойствам и совершенствованию технологии область применения КРТ будет только расширяться [5–7].

Практически не отстают от КРТ материалы группы A_3B_5 : бинарное соединение антимонида индия (InSb) [8], чувствительное в диапазоне спектра 3–5 мкм и тройные растворы на основе сурьмы [9, 10]: InAsSb, InGaSb, InAlSb, предназначенные для детектирования излучения в коротковолновом и средневолновом ИК-диапазонах спектра. При больших значениях состава $x \sim 0,8$ изделия на основе тройного раствора $InAs_{1-x}Sb_x$ с граничной длиной волны до $\lambda_{0,5} \approx 8$ мкм детектируют излучение и в длинноволновом диапазоне спектра.

В коротковолновом ИК-диапазоне конкуренцию материалу HgCdTe составляет тройное соединение InGaAs [11], спектральная характеристика фоточувствительности которого при содержании арсенида индия $x = 0,53$ мол. дол. соответствует характеристике излучения ночного неба. Разработки в сфере визуализации в коротковолновой ИК-области (SWIR, от 0,9 до 1,7 микрон), будут востребованы в широком круге специальных применений.

Третье поколение ИК-систем обеспечивает дополнительные возможности, к которым относятся: мегапиксельный формат, высокая кадровая частота, лучшее тепловое разрешение, повышенная температура, работа в нескольких диапазонах спектра и встроенная цифровая обработка сигналов.

Не менее значимыми разработками последнего времени стали полупроводниковые материалы с конструируемой запрещенной зоной, к которым можно отнести многослойные структуры с барьерными слоями, введение которых позволяет кардинально уменьшить темновые токи. Такие структуры получили название XVn -структур [12], в их состав, согласно аббревиатуре, входят: X -слой коллектора n - или p -типа проводимости; V – барьерный слой и поглощающий n -слой. По сравнению с матрицами фотодиодов на основе p - n -перехода, за счет устранения области пространственного заряда (ОПЗ) в слое поглощения и блокирования перемещения основных носителей заряда, XVn -структуры имеют

уменьшенных шумов, что позволяет работать без потери качества при более высоких температурах. Поглощающие слои могут быть либо бинарными соединениями (InSb, InAs), либо тройными растворами (InAsSb, InGaSb, InAlSb). На основе структур с конструируемой зонной диаграммой формируются сверхрешетки (SLS) первого T1SL (GaAs/AlCaAs) [13] и второго T2SL (InAs/GaSb) типа [14]. В РФ в настоящее время активно развиваются следующие перспективные направления фотоники на основе ИК-материалов группы A_3B_5 и A_2B_6 :

- ФПМ на основе эпитаксиальных структур InSb;
- ФПМ на основе XVn -структур;
- ФПМ на основе сверхрешеток первого, второго и третьего типов.

Развитие каждой из перечисленных перспективных технологий имеет отдельную ценность, уникальный круг решаемых задач, а также большое значение в области создания опико-электронных систем (ОЭС) и систем визуализации нового класса.

2. Полноформатные ФПМ на основе антимонида индия

Создание отечественного тепловизионного канала для ОЭС бронетанковой техники необходимо для обеспечения конкурентоспособности с зарубежными разработками. Из литературных источников известно [15], что длинноволновый спектральный диапазон 8–12 мкм (LWIR) является крайне желательным для решения задачи обнаружения низкотемпературных целей. Тем не менее, в условиях средних широт ФПМ диапазона 3–5 мкм, по утверждению специалистов, практически не уступают ФПМ LWIR-диапазона. Поэтому изделия импортного производства – тепловизоры «Catherine-FC» фирмы «Sofradir», первоначально устанавливаемые в ОЭС БТТ, без потери качества заменяются на тепловизоры на основе ФПМ из InSb.

На рис. 1 (*a, б*) показаны тепловизоры модификации камеры «Catherine», тепловизионный прицел (*в*), и пример изделия БТТ (*г*), в котором он используется [16].

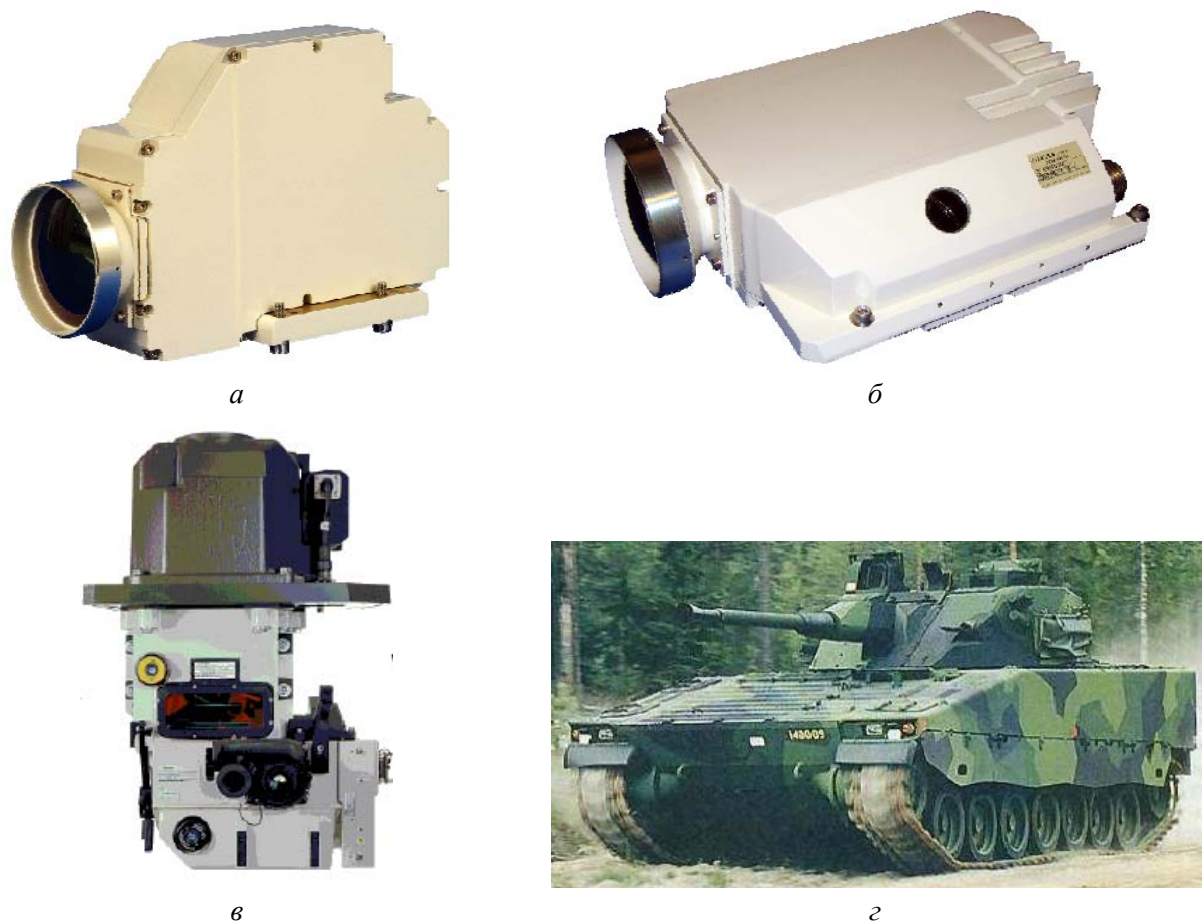


Рис. 1. Комплектующие ОЭС бронетанковой техники: а – тепловизионная камера «Catherine», фирма «Sofradir»; б – тепловизионная камера «Catherine» (модификация); в – танковый прицел; г – пример БТТ 14BQD9

В отечественных образцах БТТ тепловизор «Catherine-FC» заменен на тепловизионный канал, использующий матричный фотоприемный модуль, изготовленный на основе матрицы фотодиодов из объемного InSb,

детектирующей излучение в средневолновом ИК-диапазоне спектра. На рис. 2 представлен отечественный тепловизионный канал (а) и примененный ФПМ (б).

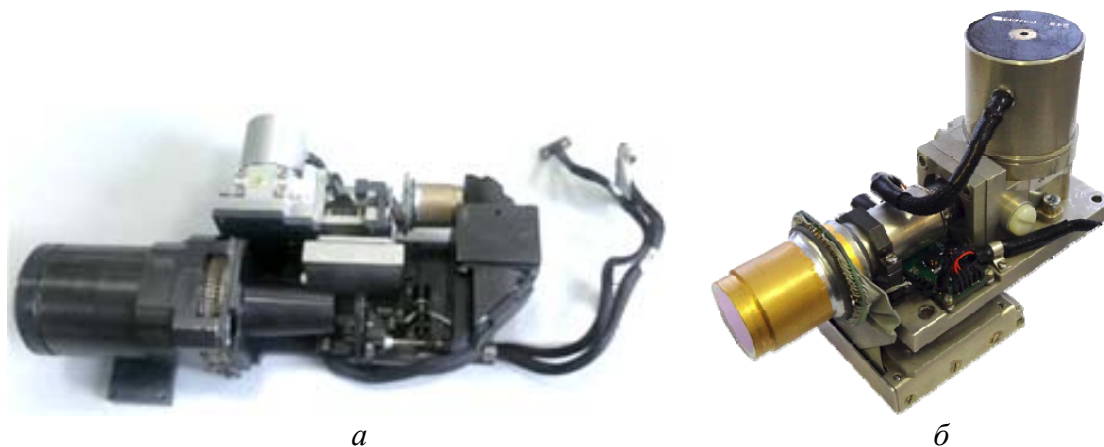


Рис. 2. Тепловизионный канал отечественного производства: а – тепловизионный канал; б – ФПМ на основе InSb

Полноформатные модули формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм на основе объемного антимонида индия производятся серийно, и, хотя применение данных модулей ограничено средневолновым ИК-диапазоном спектра, ФПМ обеспечивает значение эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ, NETD) NETD ~25 мК и менее, в то время как температурная чувствительность зарубежного образца не превышала ~60 мК.

Технология производства многослойных гетероструктур на основе тройных и четверных растворов на основе сурьмы (InAsSb, InGaSb, InAlSb и др.), детектирующих излучение в средневолновой и коротковолновой ИК-областях спектра, в РФ только развивается. Основные трудности связаны с оптимизацией процесса роста и подготовки на отечественном оборудовании оптически прозрачных подложек «epi-ready». Критическим узлом ФПМ, определяющим параметры ФПМ и ОЭС, является матрица фоточувствительных элементов, формируемая в многослойных гомо- и гетероструктурах на основе двойных, тройных и многокомпонентных соединениях

сурьмы. Чтобы улучшить параметры ФПМ, наряду с бинарным соединением InSb, в многослойные структуры вводятся слои на основе тройных растворов, таких как $Al_xIn_{1-x}Sb$ и $InAs_{1-x}Sb_x$ [17, 18].

На рис. 3 показаны результаты расчета температурной зависимости ширины запрещенной зоны E_g трех соединений на основе сурьмы, которые наиболее часто используются для области поглощения: а) InSb; б) $Al_xIn_{1-x}Sb$; в) $InAs_{1-x}Sb_x$.

Из рис. 3б и 3в видно, что тройные растворы ($Al_xIn_{1-x}Sb$, $InAs_{1-x}Sb_x$) более широкозонны по сравнению с бинарным соединением InSb (рис. 3а), что подтверждает возможность эффективного уменьшения G-R-процессов в структурах, а следовательно, снижения шумов. Выбор тройных растворов также определяется возможностью применения конструирования зонной диаграммы, которое позволяет уменьшить темновые токи. Параметры ФПМ на основе InSb можно предварительно оценить по температурной зависимости темнового тока, являющейся в первом приближении суммой диффузионного и G-R ШРХ токов.

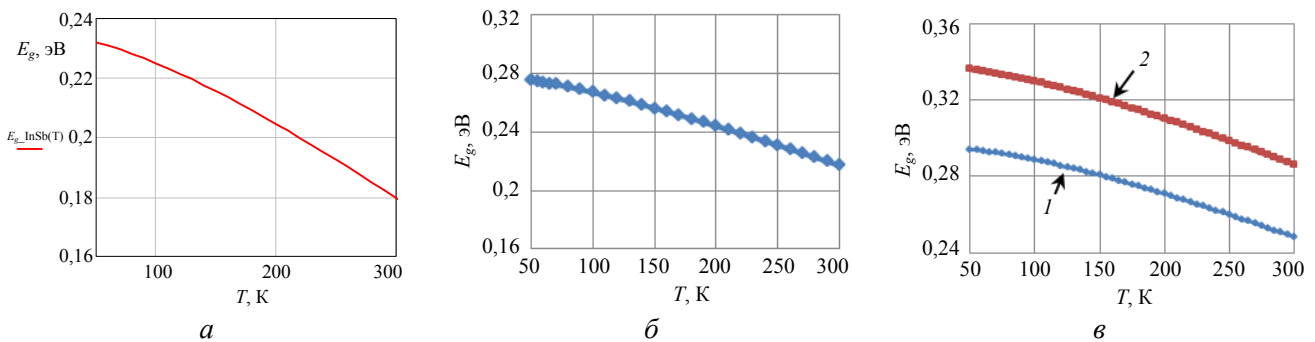


Рис. 3. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны для материалов на основе сурьмы: а – зависимость E_g от температуры для InSb; б – зависимость E_g от температуры для $Al_xIn_{1-x}Sb$ состава $x = 0,03$; в – зависимость E_g от температуры для $InAs_{1-x}Sb_x$ двух составов: (1) $x = 0,15$; (2) $x = 0,09$

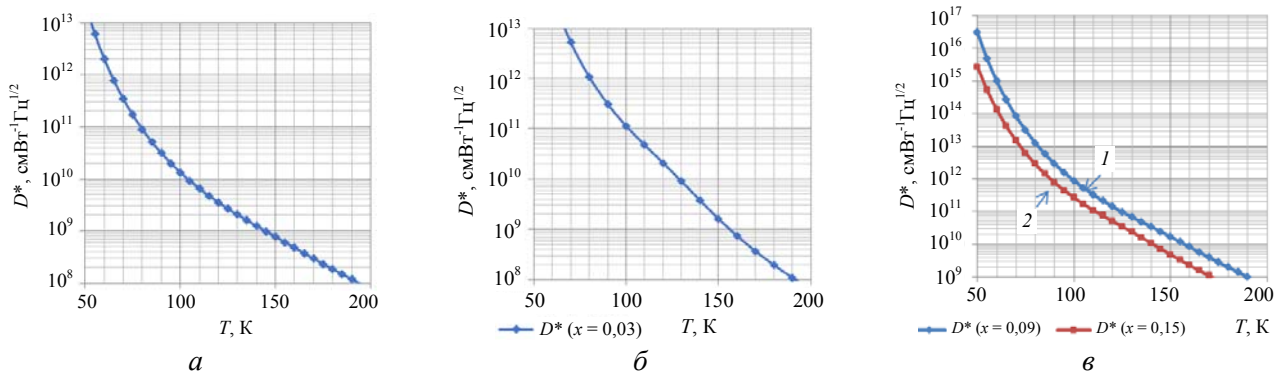


Рис. 4. Температурная зависимость обнаружительной способности D^* для материалов на основе сурьмы: а – зависимость D^* от температуры для InSb; б – зависимость D^* от температуры для $Al_xIn_{1-x}Sb$ состава $x = 0,03$; в – зависимость D^* от температуры для $InAs_{1-x}Sb_x$ двух составов: (1) $x = 0,15$; (2) $x = 0,09$

На рис. 4 представлены температурные зависимости обнаружительной способности D^* для ФПМ на основе двойного и тройных растворов $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ и $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$.

Из рис. 4 видно, что при одной и той же рабочей температуре обнаружительная способность ФПМ на основе тройных растворов ($\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$, $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$) может быть увеличена на один-два порядка по сравнению с ФПМ на основе InSb . Однако, необходимо также отметить, что, увеличивая ширину запрещенной зоны, мы сдвигаем граничную длину волны ФПМ в более коротковолновую область спектра. Таким образом, новые возможности ОЭС могут быть реализованы при использовании ФПМ на основе перспективных тройных растворов группы антимонидов ($\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$, $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$), имеющих фотоэлектрические параметры на 1–2 порядка выше по сравнению с бинарным соединением InSb .

Для повышения параметров ФПМ на основе объемного InSb использовались гомоэпитаксиальные слои InSb-on-InSb . Слои вы-

рачивались методом МЛЭ на оптически прозрачной высоколегированной подложке InSb , толщина эпитаксиальных слоев InSb составляла 4–5 мкм (рис. 5).

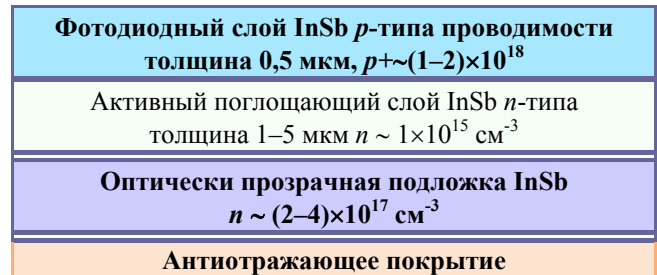


Рис. 5. Структура InSb-on-InSb

Для последующего изготовления МФЧЭ проводились прецизионное травление и ионная имплантация Be для получения высоколегированного p^+ -слоя на поверхности структуры. Матрицы на основе эпитаксиального InSb изготавливались по мезоструктурной технологии. Фрагмент МФЧЭ схематично показан на рис. 6.

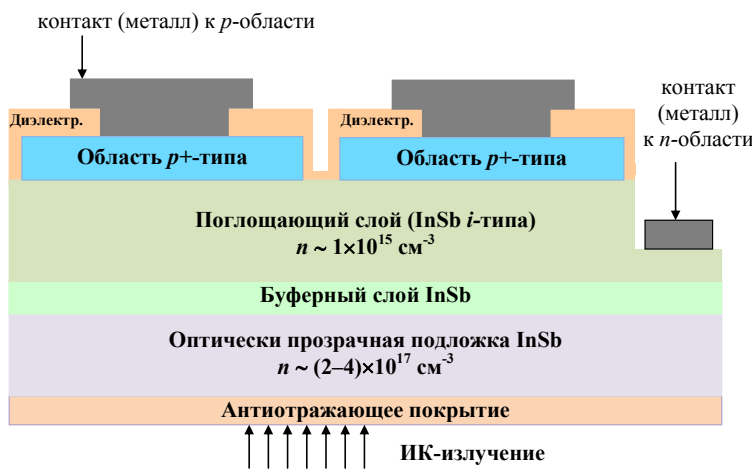


Рис. 6. Матрица фоточувствительных элементов

Технология включала травление верхнего p^+ -слоя для разделения структуры на мезаэлементы на глубину ~ 1 мкм, затем поверхность анодировалась и защищалась диэлектриком SiO_2 , а к отдельным ФЧЭ изготавливались металлические контакты, на которых формировались индиевые микроконтакты для последующей гибридации с кремниевой БИС. С тыльной стороны структуры наносилось антиотражающее покрытие ZnS . Среднее значение темнового тока по матрице фотодиодов формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм не превышало 25 пА; а для МФЧЭ

формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм, среднее значение темнового тока не превышает 20 пА.

Таким образом, метод МЛЭ с предварительной тщательной подготовкой подложки позволяет формировать кристаллически совершенные слои эпитаксиального InSb (InSb-on-InSb), пригодные для изготовления фоточувствительных матриц высокого разрешения. Исследования основных параметров ФПМ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм на основе структур InSb-on-InSb представлены на рис. 7.

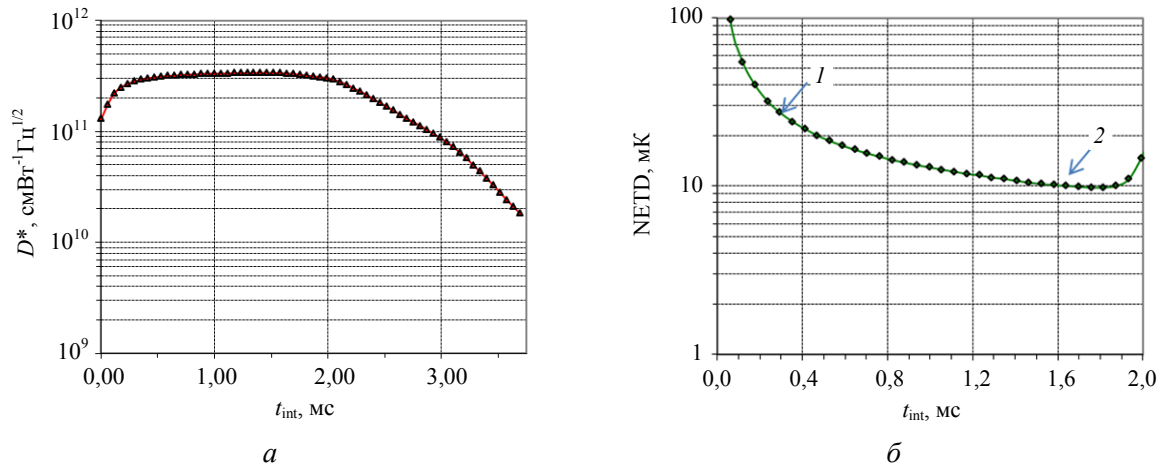


Рис. 7. Основные фотозлектрические параметры ФПМ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм на основе структуры InSb-on-InSb: а – D^* в зависимости от времени накопления; б – ЭШРТ в зависимости от времени накопления

Среднее по ФЧЭ значение обнаружительной способности D^* при времени накопления $t_{\text{int}} = 1,4$ мс (рис. 7а) составило более $\geq 2 \times 10^{11}$ $\text{смВт}^{-1}\text{Гц}^{1/2}$. Среднее значение эквивалентной шуму разности температур с холодной диафрагмой 60° в рабочем режиме при времени накопления $t_{\text{int}} = 1,6$ мс составило $\sim 10,5$ мК (рис. 7б). Значение ЭШРТ минимально при лучшем в серии измерений времени накопления $t_{\text{int}} = 1,6$ мс.

Таким образом, за счет выращивания тонких кристаллически совершенных эпитаксиальных слоев InSb удастся уменьшить темновые токи и добиться фотозлектрических параметров на уровне лучших зарубежных аналогов.

3. ФПМ на основе квантоворазмерных структур

Для систем, устанавливаемых на разнообразные транспортные средства, компания «Sofradir» выпустила компактный QWIP-фотодетектор формата 384×288 элементов с шагом 25 мкм длинноволнового ИК диапазона спектра. Данный фотодетектор, устанавливаемый в семейство тепловизоров «Catherine-XP T», обеспечивает необходимые параметры качества, такие как: как высокая чувствительность, высокое разрешение и увеличенная дальность действия [19].

На рис. 8а показана стационарная камера с QWIP-фотодетектором «VEGA-LW-RM4» на основе матрицы формата 384×288 элементов с

шагом 25 мкм (рис. 8б), детектирующей излучение в длинноволновой ИК-области спектра.

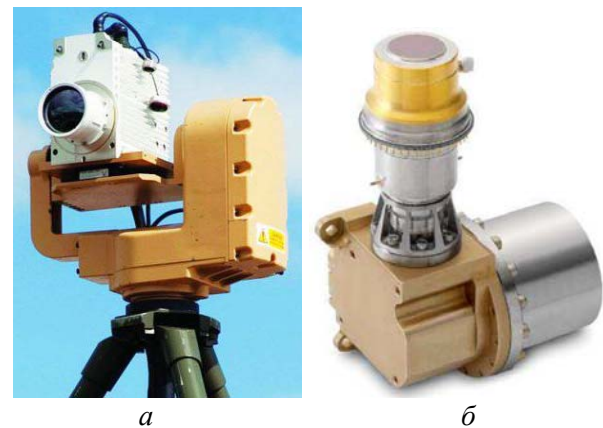


Рис. 8. Стационарная камера с QWIP-ФПМ «VEGA-LW-RM4» на основе матрицы формата 384×288 элементов с шагом 25 мкм: а – стационарная камера; б – ФПМ VEGA-LW-RM4 (формат 384×288, шаг 25 мкм)

На рис. 9а показано распределение по МФЧЭ эквивалентной шуму разности температур (NETD, ЭШРТ), среднее значение NETD составляет 45 мК. На рис. 9б показано ИК-изображение тестового объекта, полученное с помощью QWIP-ФПМ.

Отечественные разработчики аппаратуры используют тепловизоры на основе QWIP-ФПМ, изготовленных на основе сверхрешеток первого типа GaAs/AlGaAs [20]. Инфракрасные ФПМ на основе квантово-размерных структур представляют собой устройства с конструируемой шириной запрещенной зоны, использующие электронные переходы на

внутризонных локальных уровнях при поглощении фотонов излучения, при этом переходы носителей заряда возможны только в узкозонных слоях квантово-размерной структуры. Для инфракрасного обнаружения параметры квантовых ям настраиваются таким образом, чтобы разность энергий между первым и вторым квантованными состояниями соответствовала энергии поглощения ИК-фотона, а фотопроводимость осуществляется за счет возбуждения электронов из слоев с размерным квантованием в состояния над барьером и последующего дрейфа их во внешнем электрическом поле.

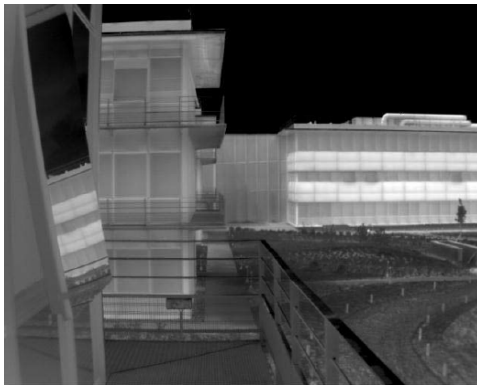
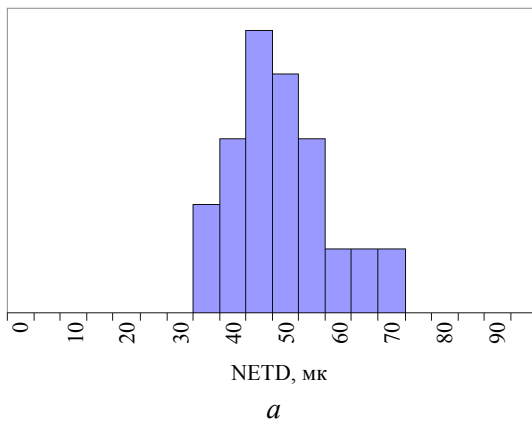


Рис. 9. Распределение ЭШРТ по МФЧЭ (а) и ИК-изображение тестового объекта, полученное с помощью QWIP-ФПМ (б)

На рис. 10 представлен российский тепловизионный канал на основе QWIP-фото модуля. По желанию заказчика QWIP-ФПМ изготавливается форматом 384×288 элементов с шагом 25 мкм или 640×512 элементов с шагом 20 мкм.

На рис. 11 показаны: (а) схематическое представление матрицы в QWIP-структуре и (б) фотография отдельных элементов МФЧЭ с дифракционной решеткой на поверхности.



Рис. 10. Тепловизионный канал (а) и QWIP-фото модуль (б), входящий и его состав

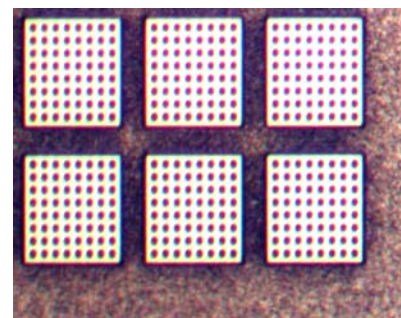
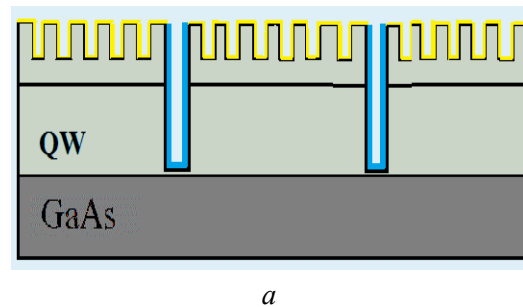


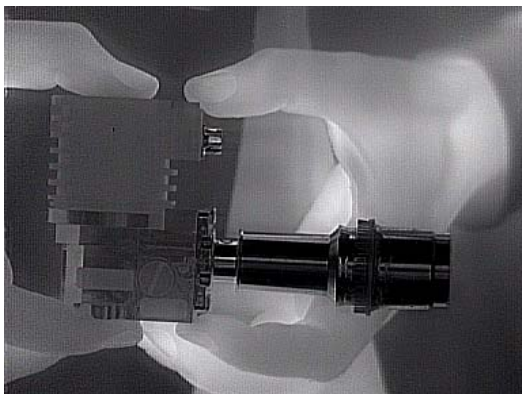
Рис. 11. Схематическое представление матрицы в QWIP-структуре (а) и фотография отдельных элементов МФЧЭ с дифракционной решеткой на поверхности (б)

Основные характеристики QWIP-фото модуля формата 384×288 элементов с шагом 25 мкм представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметр	Значение
Формат, элементов	384×288
Шаг элементов, мкм	25
ЭШРТ, мК	35
Время выхода на режим в НКУ, мин.	5
Максимальная кадровая частота	120 Гц
Количество дефектных элементов	0,2 %
Количество дефектных элементов в центральной зоне 30×30 элементов	0
Потребляемая мощность МКС в НКУ	12 Вт
Потребляемая мощность МКС +55С	14,5 Вт

На рис. 12 показаны тепловизионные изображения, полученные с помощью QWIP-фотомодуля формата 384×288 элементов с шагом 25 мкм.



а



б

Рис. 12. Тепловизионные изображения, полученные с помощью QWIP-фотомодуля формата 384×288 элементов с шагом 25 мкм. а – ИК-изображение; б – ИК-изображение

4. ФПМ на основе барьерной структуры

Разработка и дальнейшее развитие формирователей изображения, работающих в ко-

ротковолновой ИК-области спектра способствуют дополнительной визуализации скрытых целей и успеху разведывательных операций в условиях тумана и задымления. Формирователи изображения SWIR-диапазона предлагают дополнительные преимущества, включая: представление изображений подобного видимому излучению; функционирование при наличии слабых атмосферных ночных свечений; обнаружение скрытых целей, замаскированных лесными насаждениями, непрозрачными материалами и определение дальности до объектов.

Для изготовления МФЧЭ в гетероструктурах InGaAs/InP коротковолнового ИК-диапазона спектра компания «Sofradir» (Франция) применяет планарную технологию формирования $p-i-n$ -фотодиодов [21, 22]. На рис. 13 схематично представлены фрагменты планарных МФЧЭ с подложкой и без нее для расширения чувствительности в видимый диапазон спектра.

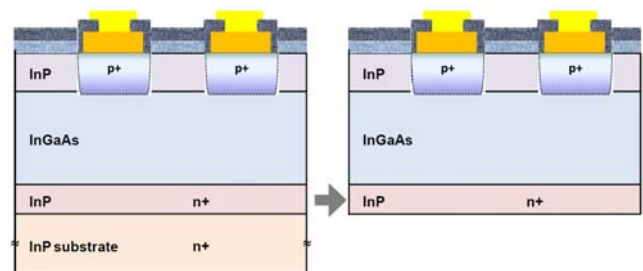


Рис. 13. Фрагменты планарных МФЧЭ с подложкой из InP и без нее («Sofradir», Франция)

Гетероструктуры выращиваются на подложках InP диаметром до 4-х дюймов методом эпитаксии из металлоорганических соединений. Области $p+$ -типа создаются в широкозонных слоях InP n -типа проводимости диффузией цинка (Zn-diffusion). Верхний слой пассивируется нитридом кремния. В $p-i-n$ -структурах с областью поглощения, практически совпадающей с ОПЗ фотодиода, темновой ток определяется в основном механизмом генерации-рекомбинации Шокли-Рида-Холла (ШРХ) через центры захвата в запрещенной зоне.

Концепция архитектуры фотоприемника с барьерным слоем предложена в работе [23], в ней использовалась многослойная фоторезисторная структура на основе HgCdTe. Данная концепция предполагала выравнивание ва-

лентных зон в nVn -структуре, что теоретически позволяло неосновным носителям заряда – дыркам беспрепятственно перемещаться к контакту, в то же время как барьер, располагаемый в зоне проводимости, ограничивал передвижение потока основных носителей заряда – электронов. Не так давно данная идея по-

лучила новое развитие при построении новых гетероструктур на основе материалов группы A_3B_5 .

Основная идея построения барьерной архитектуры ФЧЭ на основе InGaAs ($p+/B/n/n+$ -типа), примененная в отечественном ФПМ, схематично показана на рис. 14(а, б).

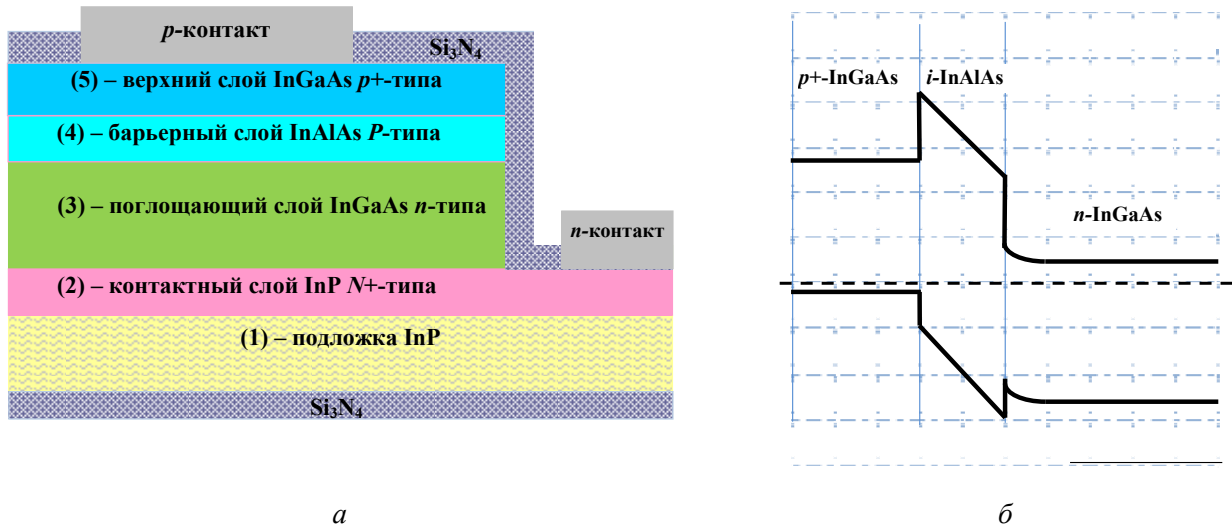


Рис. 14. Архитектура ФЧЭ на основе InGaAs и зонная диаграмма с широкозонным барьерным слоем в области $p-n$ -перехода: а – архитектура ФЧЭ; б – зонная диаграмма ФЧЭ

По своей сути $p+/B/n/n+$ -архитектура ФЧЭ основывается на $p-i-n$ -структуре, в области ОПЗ которой размещается широкозонный барьерный слой (B). Барьерный слой блокирует ток основных носителей заряда (электронов), а поскольку располагается в области $p-n$ -перехода, то существенно умень-

шает токи туннелирования и генерации-рекомбинации через центры ШРХ. На рис. 14б схематично показана зонная диаграмма $p+/B/n/n+$ -архитектуры ФЧЭ на основе InGaAs. В таблице 2 представлены параметры слоев барьерной архитектуры ФЧЭ. Нумерация слоев начинается с подложки.

Таблица 2

Барьерная $p+/B/n/n+$ -структура

Тип слоя	Концентрация, $см^{-3}$	Толщина, мкм
5 – контактный $p+$ -слой InGaAs	$1,6 \times 10^{18}$	0,2
4 – барьерный P -слой InAlAs, слаболегированный	$(1-2) \times 10^{15}$	0,1
3 – поглощающий n -слой InGaAs	$(2-4) \times 10^{16}$	2,0
2 – контактный $N+$ -слой InP	5×10^{17}	0,35
1 – оптически прозрачная подложка InP n -типа	2×10^{18}	350–400

Согласно таблице 2 $p+/B/n/n+$ -структура включает:

- высоколегированную оптически прозрачную подложку InP (1), подложка имеет антиотражающее покрытие из нитрида кремния Si_3N_4 ;

- высоколегированный контактный слой InP $N+$ -типа проводимости (2) толщиной $\sim 0,3-1,0$ мкм, к нему формируется n -контакт;

- активный поглощающий слой $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ n -типа проводимости (3) толщиной $2,0-2,5$ мкм;

– широкозонный барьерный (B) слаболегированный слой InAlAs (4), толщина которого составляет 0,1 мкм, пассивирующий поглощающий слой;

– контактный высоколегированный слой InGaAs p -типа (5) толщиной $\sim 0,15$ мкм для создания омического контакта к p -областям.

В валентной зоне в соответствии с моделью Андерсона [24] структура имеет небольшой разрыв энергетического уровня ($\sim 0,2$ эВ), который может быть удален с помощью введения градиентного слоя с двумя сверхтонкими высоколегированными δ -слоями по его границам [25].

Результаты технологических разработок в области создания барьерных структур и образцов ИК ФПМ внедрены в технологические процессы получения полноформатных ФПМ спектрального диапазона 0,9–1,7 мкм с шагом 15 мкм на основе гетероструктур InGaAs для изготовления малогабаритных камер SWIR-диапазона спектра высокого разрешения.

На рис. 15 ($a, б$) показана малоразмерная SWIR-камера.

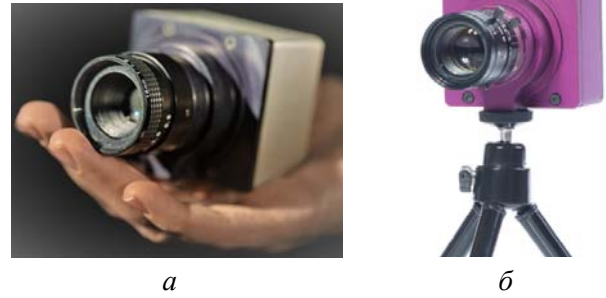


Рис. 15. Камера SWIR-диапазона спектра: a – инфракрасная камера; $б$ – камера на штативе

На рис. 16а представлено изображение человека на фоне лесного массива в условиях тумана, полученное с помощью SWIR – ФПМ формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм, а для сравнения на рис. 16б показано то же изображение в видимом диапазоне спектра, полученное с помощью кремниевой ПЗС-матрицы.



Рис. 16. Примеры изображений: a – ИК-изображение, полученное с помощью ФПМ формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм; $б$ – видимое изображение, полученное с помощью кремниевой ПЗС-матрицы

Из рис. 16 видно, что изображение отдельных элементов и деталей в SWIR-диапазоне спектра существенно лучше проработано, по сравнению с видимым диапазоном, т. е. наблюдается бóльшая информативность и высокое пространственное разрешение. Поскольку принцип детектирования объектов в SWIR-диапазоне аналогичен видимому (VIS),

то для приборов не требуется специальная оптика, которая так важна для средневолнового и длинноволнового ИК-диапазонов спектра, и с успехом применяются объективы на основе широко используемых оптических стекол. В таблице 3 представлены параметры ряда камер SWIR-диапазона.

Таблица 3

Параметры камер SWIR-диапазона

Наименование	Формат	Макс. частота кадров	Интерфейс	Размер, мм
SWIR-320	320×256	200	USB2.0	56×62×50
SWIR-320-1	320×256	240	Gigabit Ethernet, USB2.0	56×62×50
SWIR-640	640×512	50	Video (PAL), RS-485, LVDS	56×79×75
SWIR-640-1	640×512	60	USB	56×62×50
SWIR-640-2	640×512	50	Gigabit Ethernet, USB2.0	56×62×50
SWIR-640-3	640×512	50	Gigabit Ethernet, USB2.0	56×62×50

5. Заключение

Представлены разработки в области создания высокочувствительных современных фотоприемных модулей, пригодных для задачи импортозамещения, которая способствует успешному развитию отечественной науки и промышленности. Инновационными разработками являются топологии матриц фото-чувствительных элементов на основе: ЭС InSb; квантоворазмерной гетероструктуры GaAs/AlGaAs; барьерной ГЭС InGaAs, общей задачей которых является дополнительное снижение темновых токов, увеличение температурной чувствительности, а также уменьшение габаритных и мощностных показателей. Показаны основные фотоэлектрические параметры перспективных ИК-фотомодулей, работающих в SWIR, MWIR и LWIR диапазонах, которые по уровню не уступают лучшим зарубежным аналогам. Для ИК-фотомодулей разработаны алгоритмы и цифровые модули обработки сигналов с выводом на устройства отображения, обладающие современными интерфейсами: USB, Camera-Linc и Ithernet.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rogalski A. // Progress in Quantum Electronics. 2012. № 36. P. 342.
2. Болтарь К. О., Яковлева Н. И., Лопухин А. А., Власов П. В. // Прикладная физика. 2021. № 6. С. 30.
3. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Яковлева Н. И., Полесский В. В., Кузнецов П. А., Лазарев П. С., Рудневский В. С., Седнев М. В. // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 6. С. 479.
4. Болтарь К. О., Лопухин А. А., Власов П. В., Яковлева Н. И. // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 6. С. 513.
5. Péré-Laperne Nicolas, Berthoz Jocelyn, Taalat Rachid, Rubaldo Laurent, Kerlain Alexandre, Carrère Emmanuel. // Proc. of SPIE. 2016. Vol. 9819. P. 981920.
6. Reibelo Y., Rouvie A., Nedelcu A., Augey T., Péré-Laperne N., Rubaldo L., Billon-Lanfrey D. // Proc. of SPIE. 2013. Vol. 8896. P. 88960B.
7. Lutz H., Breiter R., Eich D., Figgemeier H., Oelmaier R., Rutzinger S., Schenk H., Wendler J. // Proc. of SPIE. 2017. Vol. 10177. P. 101771A.
8. Gershon G., Avnon E., Brumer M., Freiman W., Karni Y., Niderman T., Ofer O., Rosenstock T., Seref D., Shiloah N., Shkedy L., Tessler R., Shtrichman I. // Proc. of SPIE. 2017. Vol. 10177. P. 101771I.
9. Klipstein Philip, Klin Olga, Grossman Steve, Snapi Noam, Lukomsky Inna, Brumer Maya, Yassen Michael, Aronov Daniel, Berkowicz Eyal, Glozman Alex, Fishman Tal, Magen Osnat, Shtrichman Itay, Weiss Eliezer. // Proc. of SPIE. 2011. Vol. 8012. P. 80122R.
10. Razeghi M. // Eur. Phys. J. AP. 2003. № 23. P. 149.
11. Rouvié A., Huet O., Hamard S., Truffer J. P., Pozzi M., Decobert J., Costard E., Zécri M., Maillard P., Reibel Y., Pécheur A. // Proc. of SPIE. 2013. Vol. 8704. P. 870403.
12. Klipstein P. C. // Proc. SPIE. 2008. Vol. 6940. P. 6940-2U.
13. Arslan Y., Colakoglu T., Torunoglu G., Aktas O., Besicki C. // Infrared Physics & Technology. 2013. Vol. 59. P. 108.
14. Klipstein P. C., Livneh Y., Glozman A., Grossman S., Klin O., Snapi N., Weiss E. // Journal of Electronic Materials. 2014. Vol. 43. P. 2984.
15. Rubaldo Laurent, Taalat Rachid, Berthoz Jocelyn, Maillard Magalie, Péré-Laperne Nicolas, Brunner Alexandre, Guinedor Pierre, Dargent L., Manissadjian A., Reibel Y., Kerlain A. // Proc. of SPIE. 2017. Vol. 10177. P. 101771E.
16. Cocle Olivier, Rannou Christophe, Forestier Bertrand, Jouglu Paul, Bois Philippe F., Costard Eric M., Manissadjian A., Gohier D. // SPIE Defense & Security. 2007. Vol. 6542. P. 127.
17. Бакаров А. К., Гутаковский А. К., Журавлев, К. С., Ковчавцев А. П., Торопов А. И., Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А. // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. Вып. 6. С. 900.

18. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А., Торопов А. И., Журавлев К. С., Фадеев В. В. // Прикладная физика. 2016. № 3. С. 58.
19. Cocle O., Gauthier F.-H., Quilghini G., Bois P. F., Costard E. M. // Proc. SPIE. 2003. Vol. 5074. P. 715.
20. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Власов П. В., Лопухин А. А., Чалый В. П., Кацавец Н. И. // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 37.
21. Rouvié A., Coussement J., Huet O., Truffer J. P., Pozzi M., Oubensaid E. H., Hamard S., Chaffraix V., Costard E. // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9451. P. 945105.
22. Coussement J., Rouvié A., Oubensaid E.H., Huet O., Hamard S., Truffer J. P., Pozzi M., Maillart P., Reibel Y., Costard E., Billon-Lanfrey D. // Proc. of SPIE. 2014. Vol. 9070. P. 907005.
23. Maimon S., Wicks G. W. // Applied Physics Letters. 2006. Vol. 89. P. 151109.
24. Anderson R. I. // Solid State Elec. 1962. Vol. 5. P. 341.
25. Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Седнев М. В., Никонов А. В. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 5. С. 465.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

Import replacement and creation of modern photodetector modules

K. O. Boltar^{1,2}, I. D. Burlakov^{1,3}, N. I. Iakovleva¹, P. V. Vlasov¹, and P. S. Lazarev^{1,2}

¹Orion R&P Association, JSC

9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru

²Moscow Institute of Physics and Technology

9 Institskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

³MIREA – Russian Technological University

78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia

Received March 14, 2022

In recent years, rapid improvement of photonics products has been observed due to the use of multilayer heterostructures grown on the basis of perspective materials; the photosensitive element construction to achieve a minimum dark current, which in turn leads to a change of FPA generation. Several different types of photodetector modules, such as: based on InSb epitaxial structures for the range of 3–5 μm; based on GaAs/AlGaAs QWIP-structures for the range of 7.8–9.0 μm; based on InGaAs XBn-structures for the range of 0.9–1.7 μm, have been developed and investigated. The foreign analogues are shown, and the advantages given by the new capabilities offered by new detector technologies are considered.

Keywords: InSb, XBn-structure, QWIP-structure, photodetector module, detectivity D*.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-2-170-182

REFERENCES

1. A. Rogalski, Progress in Quantum Electronics, No. 36, 342 (2012).
2. K. O. Boltar, N. I. Iakovleva, A. A. Lopukhin, and P. V. Vlasov, Applied Physics, No. 6, 30 (2021) [in Russian].
3. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, N. I. Iakovleva, A. V. Polessky, P. A. Kuznetsov, P. S. Lazarev, V. S. Rudnevsky, and M. V. Sednev, Usp. Prikl. Fiz. **9** (6), 479 (2021).
4. K. O. Boltar, A. A. Lopukhin, P. V. Vlasov, and N. I. Iakovleva, Usp. Prikl. Fiz. **9** (6), 513 (2021).

5. Nicolas Péré-Laperne, Jocelyn Berthoz, Rachid Taalat, Laurent Rubaldo, Alexandre Kerlain, Emmanuel Carrère, and Loïc Dargent, *Proc. of SPIE* **9819**, 981920 (2016).
6. Y. Reibelo, A. Rouvie, A. Nedelcu, T. Augey, N. Pere-Laperne, L. Rubaldo, and D. Billon-Lanfrey, *Proc. of SPIE* **8896**, 88960B (2013).
7. H. Lutz, R. Breiter, D. Eich, H. Figgemeier, R. Oelmaier, S. Rutzinger, H. Schenk, and J. Wendler, *Proc. of SPIE* **10177**, 101771A (2017).
8. G. Gershon, E. Avnon, M. Brumer, W. Freiman, Y. Karni, T. Niderman, O. Ofer, T. Rosenstock, D. Seref, N. Shiloah, L. Shkedy, R. Tessler, and I. Shtrichman, *Proc. of SPIE* **10177**, 101771I (2017).
9. Philip Klipstein, Olga Klin, Steve Grossman, Noam Snapi, Inna Lukomsky, Maya Brumer, Michael Yassen, Daniel Aronov, Eyal Berkowicz, Alex Glozman, Tal Fishman, Osnat Magen, Itay Shtrichman, and Eliezer Weiss, *Proc. of SPIE* **8012**, 80122R (2011).
10. M. Razeghi, *Eur. Phys. J. AP*, No. 23, 149 (2003).
11. A. Rouvié, O. Huet, S. Hamard, J. P. Truffer, M. Pozzi, J. Decobert, E. Costard, M. Zécri, P. Maillart, Y. Reibel, and A. Pécheur, *Proc. of SPIE* **8704**, 870403 (2013).
12. P. C. Klipstein, *Proc. SPIE* **6940**, 6940-2U (2008).
13. Y. Arslan, T. Colakoglu, G. Torunoglu, O. Aktas, and C. Besikci, *Infrared Physics & Technology* **59**, 108 (2013).
14. P. C. Klipstein, Y. Livneh, A. Glozman, S. Grossman, O. Klin, N. Snapi, and E. Weiss, *Journal of Electronic Materials* **43**, 2984 (2014).
15. Laurent Rubaldo, Rachid Taalat, Jocelyn Berthoz, Magalie Maillard, Nicolas Péré-Laperne, Alexandre Brunner, Pierre Guinedor, L. Dargent, A. Manissadjian, Y. Reibel, and A. Kerlain, *Proc. of SPIE* **10177**, 101771E (2017).
16. Olivier Cocle, Christophe Rannou, Bertrand Forestier, Paul Jouglu, Philippe F. Bois, Eric M. Costard, A. Manissadjian, and D. Gohier, *SPIE Defense & Security* **6542**, 127 (2007).
17. A. K. Bakarov, A. K. Gutakovsky, K. S. Zhuravlev, A. P. Kovchavtsev, A. I. Toropov, I. D. Burlakov, K. O. Boltar, P. V. Vlasov, and A. A. Lopukhin, *Tech. Phys.* **87** (6), 900 (2017).
18. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, P. V. Vlasov, A. A. Lopukhin, A. I. Toropov, K. S. Juravlev, and V. V. Fadeev, *Applied Physics*, No. 3, 58 (2016) [in Russian].
19. O. Cocle, F-H. Gauthier, G. Quilghini, P. F. Bois, and E. M. Costard, *Proc. SPIE* **5074**, 715 (2003).
20. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, P. V. Vlasov, A. A. Lopukhin, V. P. Chaliy, and N. I. Katsavec, *Applied Physics*, No. 6, 37 (2016) [in Russian].
21. A. Rouvié, J. Coussement, O. Huet, J. P. Truffer, M. Pozzi, E. H. Oubensaid, S. Hamard, V. Chaffraix, and E. Costard, *Proc. of SPIE* **9451**, 945105 (2015).
22. J. Coussement, A. Rouvié, E. H. Oubensaid, O. Huet, S. Hamard, J. P. Truffer, M. Pozzi, P. Maillart, Y. Reibel, E. Costard, and D. Billon-Lanfrey, *Proc. of SPIE* **9070**, 907005 (2014).
23. S. Maimon and G. W. Wicks, *Applied Physics Letters* **86**, 151109 (2006).
24. R. I. Anderson, *Solid State Elec.* **5**, 341 (1962).
25. N. I. Iakovleva, K. O. Boltar, M. V. Sednev, and A. V. Nikonov, *Usp. Prikl. Fiz.* **4** (5), 465 (2016).