

Камера коротковолнового инфракрасного диапазона спектра с матричным фотоприемным устройством на основе гетероструктур InGaAs/InP

*К. А. Хамидуллин, Д. Л. Балиев, П. С. Лазарев, К. О. Болтарь,
А. В. Полесский, И. Д. Бурлаков, Е. Л. Чепурнов, Н. И. Гусарова, С. В. Попов*

Приведены результаты разработки и испытаний камеры коротковолнового инфракрасного диапазона спектра 0,9–1,7 мкм на основе первого отечественного матричного фотоприемного устройства формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм. Данное ФПУ создано на базе гетероструктуры InGaAs/InP и имеет пониженную температурную зависимость чувствительности. Рассмотрены основные компоненты камеры, приведены их основные характеристики. Показаны преимущества и основные области применения камеры как в составе мультиспектральных оптико-электронных систем, так и в качестве самостоятельного прибора.

Ключевые слова: гетероструктура InGaAs/InP, коротковолновый инфракрасный диапазон, ИК-камера, МФПУ, SWIR.

Введение

В настоящее время одним из перспективных направлений при решении наземных задач инфракрасного (ИК) технического зрения является применение малогабаритных ИК-камер коротковолнового инфракрасного диапазона спектра [1, 2].

В англоязычной литературе подобный диапазон обычно обозначается как SWIR (Short Wavelength Infrared Range).

Коротковолновый ИК-диапазон спектра (1–2,5 мкм) занимает промежуточное положение между областью чувствительности камер видимого диапазона и тепловизионным средневолновым ИК-диапазоном. В наземных условиях в этом диапазоне превалирует излучение от тех же источников, что и в видимом диапазоне, а изображение формируется за счет отраженного от объектов излучения (см. рис. 1, а, б), в отличие от тепловизионных изображений, для формирования которых используется собственное тепловое излучение объектов (см. рис. 1, в).

Хорошо видимыми в коротковолновом ИК-диапазоне становятся также объекты, нагретые до температур выше 200 °С, так как они начинают заметно излучать именно в этом диапазоне (см. рис. 2). Заметим, что поскольку используется отраженное излучение, то на изображениях есть тени и контраст. Изображения при этом сопоставимы с видимым изображением по разрешающей способности и деталям, что делает объекты легко узнаваемыми и обуславливает одно из основных преимуществ коротковолнового ИК-диапазона, а именно, возможность объектной или индивидуальной идентификации. В то же время коэффициенты отражения и поглощения в коротковолновом ИК-диапазоне спектра отличаются от коэффициентов отражения и поглощения в видимом и тепловизионных диапазонах спектра, что дает дополнительную информацию о наблюдаемых объектах.

Хамидуллин Камиль Алиевич¹, начальник отдела.

Балиев Дмитрий Леонидович¹, инженер 1 кат.

Лазарев Павел Сергеевич¹, инженер 1 кат.

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

Полесский Алексей Викторович¹, главный метролог.

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

Чепурнов Евгений Леонидович¹, генеральный директор, к.э.н.

Гусарова Наталья Иннокентьевна⁴, ведущий специалист, к.т.н.

Попов Сергей Викторович⁴, первый зам. генерального директора, д.т.н.

¹ АО «НПО «Орион».

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

E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт

(государственный университет).

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

³ Московский технологический университет (МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

⁴ АО «Швабе».

Россия, 129366, просп. Мира, 176.

E-mail: mail@shvabe.com

Статья поступила в редакцию 8 декабря 2017 г.

© Хамидуллин К. А., Балиев Д. Л., Лазарев П. С., Болтарь К. О., Полесский А. В., Бурлаков И. Д., Чепурнов Е. Л., Гусарова Н. И., Попов С. В., 2017

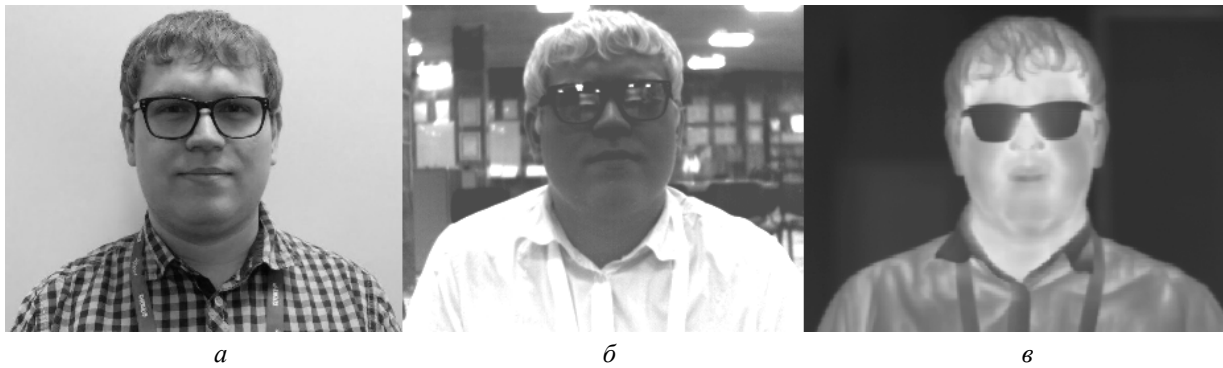


Рис. 1. Изображения в видимом (а), коротковолновом ИК (б) и средневолновом ИК (в) диапазонах спектра.

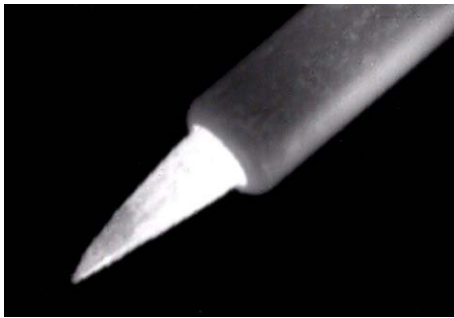


Рис. 2. Нагретый паяльник в коротковолновом ИК-диапазоне спектра.

Вследствие уменьшенного релеевского рассеяния света на более длинных волнах, чем в видимой области спектра, камеры коротковолнового ИК-диапазона обеспечивают наблюдение в присутствии дыма и тумана.

Некоторые материалы, например полиэтилен, прозрачны в коротковолновом ИК-диапазоне, другие же материалы, как, например, вода, начинают сильно поглощать излучение коротковолнового ИК-диапазона. Большинство оптических материалов, используемых для изготовления окон, линз и покрытий, работающих в видимом диапазоне, прозрачны и в коротковолновом ИК-диапазоне, что существенно снижает стоимость приборов, а также позволяет проводить наблюдения через обычные окна.

Камеры коротковолнового ИК-диапазона на основе твердотельных матричных фотоприемных устройств (МФПУ), как правило, не требуют охлаждения фоточувствительных матриц, имеют малые габариты и энергопотребление, что открывает для них хорошие перспективы применения.

На основе созданного впервые в России в АО «НПО «Орион» отечественного МФПУ на основе гетероструктур InGaAs [3–6] разработана малогабаритная камера коротковолнового ИК-диапазона. Целью данной работы являлось представление результатов разработки и испытаний этой камеры для диапазона спектра 0,9–1,7 мкм.

Тройное полупроводниковое соединение InGaAs

Основным фоточувствительным материалом для работы в коротковолновом ИК-диапазоне спектра в настоящее время является тройное полупроводниковое соединение $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, которое давно применяется в качестве исходного материала при изготовлении фотоприемников для быстродействующих волоконных линий связи и дальнометрии, а также линейчатых фотодетекторов в спектроскопии. Путем варьирования содержания индия в составе этого тройного соединения можно получать различные границы спектральной чувствительности, в совокупности перекрывая весь коротковолновый ИК-диапазон спектра.

Гетероэпитаксиальные слои InGaAs выращивают, как правило, на подложке InP, прозрачной в коротковолновом ИК-диапазоне спектра. Слой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $x = 0,53$ является согласованным по постоянной решётки с подложкой InP, имеет ширину запрещённой зоны 0,74 эВ и покрывает диапазон чувствительности от 0,9 до 1,7 мкм. Кроме того, он является хорошо технологически отработанным как в производстве исходных гетероструктур [7, 8], так и при изготовлении матриц фоточувствительных элементов [3]; поэтому $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с 53% InAs часто называют «стандартный InGaAs» без указания величин « x » и « $1-x$ ».

Несмотря на то, что для коротковолнового ИК-диапазона спектра существуют камеры на основе материала CdHgTe [9–12], подавляющее число публикаций о разработках камер для этого диапазона посвящено именно материалу InGaAs «стандартного состава».

Матричное фотоприемное устройство

В АО «НПО «Орион» (впервые в России) было разработано и освоено в производстве МФПУ на основе гетероструктур InGaAs на подложке InP формата 320×256 элементов с шагом фоточувствительных элементов 30 мкм [3–6]. При

изготовлении матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) использовались гетероструктуры InGaAs/InP «стандартного состава» отечественного производства [7, 8].

Гибридная сборка, состоящая из МФЧЭ, состыкованной с кремниевой БИС считывания, расположена на двухкаскадном термоэлектрическом охладителе, работающем на эффекте Пельтье. Вся сборка установлена в корпусе МФПУ с оптическим окном (см. рис. 3). Подчеркнем, что термоэлектрический охладитель при этом используется для термостабилизации, а не для глубокого охлаждения фотоприемника.

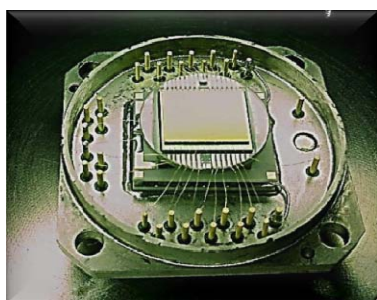


Рис. 3. МФПУ на основе гетероструктуры InGaAs. Устройство в корпусе, но без входного окна.

МФЧЭ выполнена на основе *nVp*-структуры с барьерным и пассивирующим широкозонным слоем [13]. Состав слоев полупроводниковой структуры приведен в табл. 1. Данное решение позволило улучшить параметры МФПУ по сравнению с выполненными ранее разработками по планарной и мезотехнологии [14].

Таблица 1

Состав слоев гетероэпитаксиальной *nVp*-структуры

Материал слоя	Толщина слоя, нм
p^{++} (In _{0,53} Ga _{0,47} As:Zn)	50
p^+ (In _{0,53} Ga _{0,47} As:Zn)	100
Нелегированный (Al _{0,48} InAs)	100
p (AlIn _{0,53} GaAs)	5
n (AlIn _{0,53} GaAs)	54
Плавный переход Al-Ga	
n^+ (In _{0,53} Ga _{0,47} As)	5
n (In _{0,53} Ga _{0,47} As)	2100
n^+ (InP)	340
Подложка n^+ InP (100)	

БИС считывания сигнала МФПУ имеет трансимпедансные усилители и накопительную емкость 10 фФ в каждой ячейке. Стыковка МФЧЭ и БИС считывания производилась с помощью холодной сварки столбчатых микроконтактов из индия [15].

Основные параметры МФПУ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры МФПУ

Наименование параметра	Значение, величина
Спектральный диапазон	900–1700 нм
Формат	320×256 элементов
Материал фоточувствительного слоя	InGaAs
Шаг фоточувствительных элементов	30 мкм
Удельная обнаружительная способность	10^{13} см×Вт ⁻¹ ×Гц ^{1/2}

Оптическая система

Одним из преимуществ коротковолнового ИК спектра является, как уже сказано, хорошее пропускание серийных марок оптического стекла. Ввиду этого отсутствует необходимость использования специальных марок стекол или кристаллов в качестве материалов линз объективов, окон и светофильтров. Объективы, оптимизированные для коротковолнового ИК-диапазона спектра, т. е. с высоким светопропусканием и хорошей степенью коррекции остаточных aberrаций, серийно выпускают ряд фирм США и Японии [16].

Вместе с тем возможно применение и обычных объективов для видимого диапазона. В работе [17] проведен анализ возможности применения отечественных серийных фотографических объективов для работы совместно с МФПУ диапазона спектра 0,9–1,7 мкм с шагом ФЧЭ 30×30 мкм и размером МФЧЭ, соответствующим формату 320×256 элементов. Анализ показал некоторое падение светопропускания и качества изображения по сравнению с видимым диапазоном спектра, особенно при большом количестве линз и высоких относительных отверстиях. Для работы в диапазоне спектра 0,9–1,7 мкм авторы [17] рекомендуют отечественные объективы «Индустар-71» и «Юпитер-8».

Результаты разработки камеры

На основе разработанного МФПУ создана отечественная камера коротковолнового ИК-диапазона спектра, показанная на рис. 4. Основные параметры камеры приведены в табл. 3.



Рис. 4. Камера коротковолнового ИК-диапазона спектра.

Таблица 3

Параметры камеры

Наименование параметра	Значение, величина
Спектральный диапазон работы	900–1700 нм
Формат	320×256
Время накопления	30 мкс – 1000 мс
Кадровая частота	1–200 Гц
Разрядность АЦП	14 бит
Интерфейс	USB 2.0 и выше, разъем USB mini-B
Потребляемая мощность (без ТЭО)	0,3А@5В
Максимальная потребляемая мощность ТЭО	0,8А@12В
Размеры, без объектива (В×Ш×Г)	62 мм × 56 мм × 60 мм
Вес	250 г
Крепление для объектива	C-mount

Оригинальная гетероструктура фоточувствительного элемента позволила избежать сильной зависимости чувствительности от температуры, а также обеспечила высокие параметры фоточувствительности. Поэтому термоэлектрический охладитель используется для термостабилизации МФЧЭ, а не для охлаждения, что позволяет снизить геометрический шум при изменении температуры внешней среды.

Области применения

Одним из направлений использования камер коротковолнового ИК диапазона спектра является ночное видение [2]. В этом диапазоне спектра средняя величина естественной облученности в безлунную ночь на два порядка выше, чем в диапазоне 0,4–0,9 мкм (см. рис. 5), а прозрачность атмосферы существенно выше [2, 16, 18].

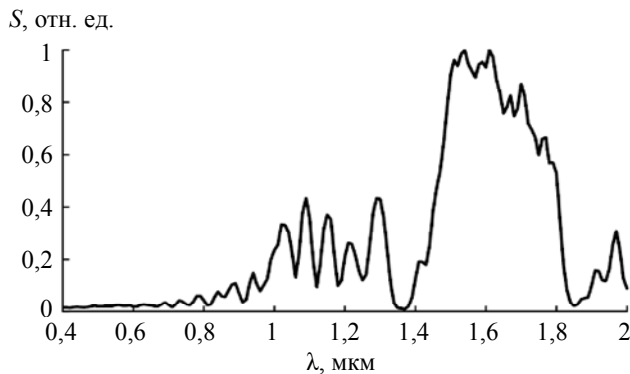


Рис. 5. Спектральный состав естественного излучения в безлунную ночь [18].

Вместе с тем следует учитывать тот факт, что уровень излучения ночного неба в коротко-

волновом ИК-диапазоне нестабилен и не всегда коррелирует с уровнем освещенности в видимом диапазоне спектра, как показано в работе [19]. Здесь исследователи отметили падение уровня облученности в коротковолновом ИК-диапазоне в течении одной ночи; при этом уровень освещенности в видимом диапазоне оставался неизменным.

Заметим, что в диапазоне спектра 0,9–1,7 мкм рэлеевское рассеяние меньше, чем в диапазоне 0,4–0,9 мкм [13, 16, 17]. В условиях туманов и дымов коротковолновый ИК-диапазон спектра обеспечивает большую дальность работы, чем видимый и ближний инфракрасный диапазоны.

Для сравнения работы в различных диапазонах спектра были произведены испытания камеры коротковолнового ИК-диапазона спектра и монохромной камеры с КМОП-матрицей на основе кремния, формата 768×576 элементов. На рис. 6 представлены изображения тест-объекта в виде штриховой миры с шириной штриха 117 мм, установленной на расстоянии 80 м. Изображения получены с помощью камеры видимого диапазона на основе КМОП-матрицы и камеры коротковолнового ИК-диапазона в условиях дымовой завесы искусственного происхождения. Как показали эти испытания, камера коротковолнового ИК-диапазона обеспечивает большую дальность работы, чем камера на основе ПЗС-матрицы.

На рис. 7 представлены изображения строительного крана, наблюдаемого через камеру на основе ПЗС-матрицы и камеру коротковолнового ИК диапазона в туманный день.

Таким образом, камера, работающая в коротковолновом ИК-диапазоне спектра, имеет преимущество перед камерами видимого диапазона при работе в условиях тумана и дыма.

Перспективным представляется также использование оптико-электронных каналов, работающих в коротковолновом ИК-диапазоне, в составе мультиспектральных систем в качестве дополнительного канала или для замены видимого канала. Это хорошо проиллюстрировано в [20], где авторы по результатам летных экспериментальных испытаний показали необходимость использования канала коротковолнового ИК-диапазона спектра в дополнение к видимому и тепловизионному в авиационной системе наблюдения. Дополнение системы третьим каналом на основе камеры коротковолнового ИК-диапазона позволило в условиях низкой облачности и низкого температурного контраста зафиксировать положение взлетно-посадочной полосы, в то время как видимый и тепловизионный каналы оказались в данных условиях существенно менее эффективны (рис. 8).

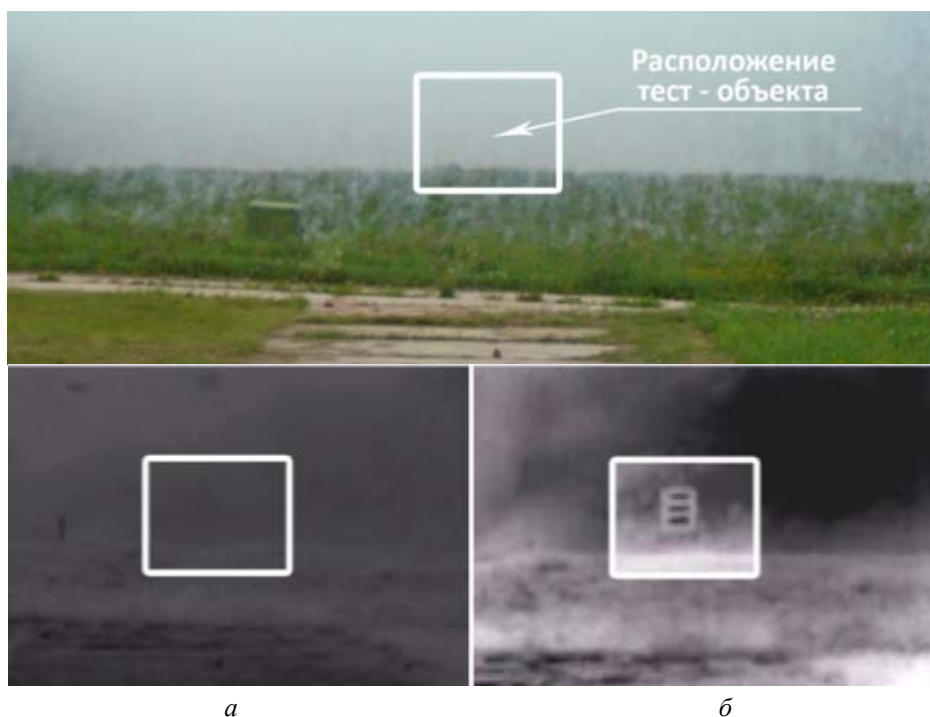


Рис. 6. Наблюдение мира в присутствии дымовой завесы в видимом (а) и в коротковолновом ИК (б) диапазонах спектра. Формат видимого изображения 768×576, формат изображения коротковолнового ИК-диапазона спектра 320×256. Сверху – цветное видимое изображение.

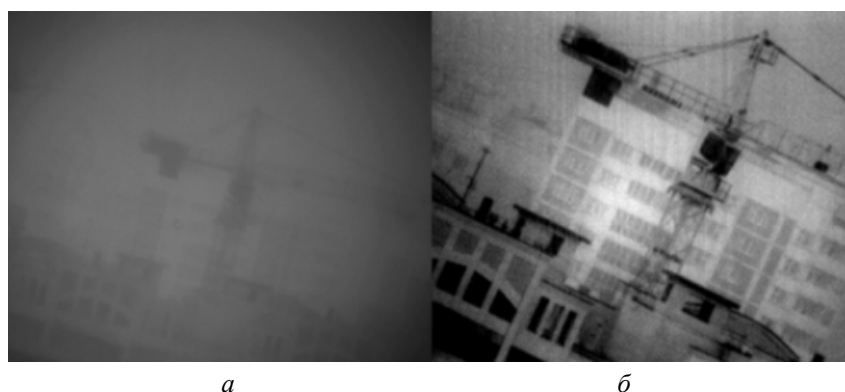


Рис. 7. Наблюдение через туман в видимом (а) и коротковолновом ИК (б) диапазонах спектра. Фокусное расстояние 1200 мм, расстояние до объекта 6 км.

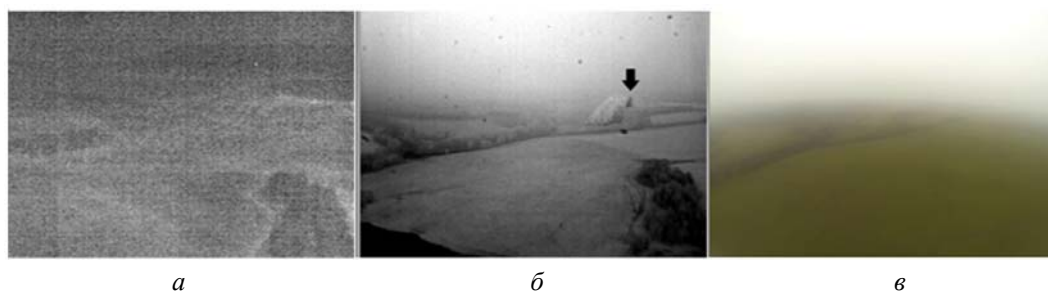


Рис. 8. Наблюдение бетонной взлетно-посадочной полосы через туман в тепловизионном (а), в коротковолнового ИК (б) и видимом (в) диапазонах спектра. Нижняя граница облаков 80 метров, температурный контраст объекта и фона 0,6 °С [20].

Еще одной областью применения камер коротковолнового ИК-диапазона является определение содержания влаги в исследуемых образцах, что может обеспечить их применение в сельском хозяйстве, пищевой промышленности и других отраслях экономики, а также для поиска объектов на воде. Данные возможности проиллюстрированы на рис. 9.

Некоторые материалы, непрозрачные в видимом диапазоне, становятся прозрачными в ко-

ротковолновом ИК-диапазоне, например, пленка тонировки стекол автомобиля (см. рис. 10).

Отдельным интересным направлением является исследование предметов искусства. Так, в данном спектральном диапазоне тонкие слои масляной краски являются прозрачными, в то время как сажа, уголь, графитный карандаш, тушь и иные углеродсодержащие материалы хорошо отражают излучение (см. рис. 11).

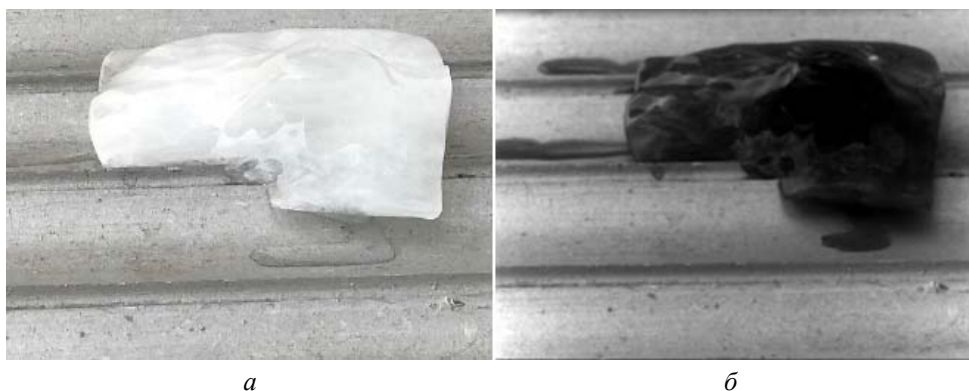


Рис. 9. Кусок льда в видимом (а) и в коротковолновом ИК (б) диапазонах спектра.



Рис. 10. Тонированное стекло (светопропускание 5 %) в видимом (а) и в коротковолновом ИК (б) диапазонах спектра.

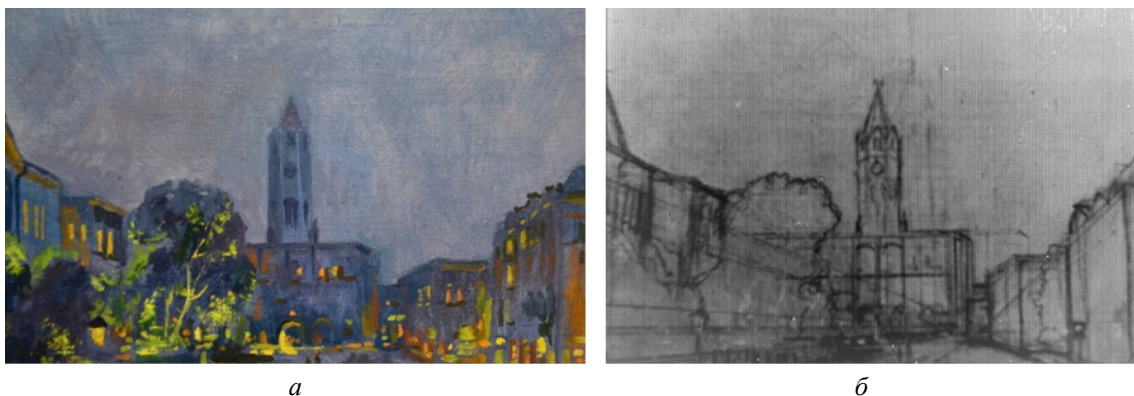


Рис. 11. Картина «1-ая Мещанская улица». Художник Цыганов С. В. Изображение в видимом (а) и в коротковолновом ИК (б) диапазонах спектра.

Можно констатировать, что имеется еще ряд других важных и интересных областей применения коротковолновой ИК-камеры, число которых постоянно расширяется.

Заключение

Создание первой камеры на основе отечественного серийно выпускаемого в АО «НПО «Орион» МФПУ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм, работающего в коротковолновом ИК-диапазоне спектра 0,9–1,7 мкм позволяет создавать в России оптико-электронную аппаратуру коротковолнового ИК-диапазона спектра различного назначения на отечественной компонентной базе.

Изображения, получаемые с помощью камеры коротковолнового ИК-диапазона спектра, по сравнению с камерами видимого диапазона спектра и тепловизорами, дают дополнительную информацию о наблюдаемых объектах, позволяют обнаруживать замаскированные объекты и осуществлять их идентификацию.

Особенности и уникальные возможности коротковолнового ИК-диапазона позволяют использовать данную камеру как самостоятельное изделие для решения задач в плохих погодных условиях в присутствии дымов, туманов и др., а также дает возможность одновременной работы с системами дальнометрии и целеуказания, работающими как на традиционной длине волны (1,06 мкм), так и на перспективной, безопасной для зрения длине волны (1,54 мкм).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И., Залетаев Н. Б. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.
2. Gusarova N. I., Koshchavtsev N. F., Popov S. V. // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. Vol. 61. No. 10. P. 1211.
3. Андреев Д. С., Болтарь К. О., Власов П. В., Иродов Н. А., Лопухин А. А. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 47.
4. Андреев Д. С., Лопухин А. А., Хакушаев П. В., Чинарёва И. В. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 74.
5. Залетаев Н. Б., Болтарь К. О., Лопухин А. А., Чинарёва И. В., Габбасова Э. В. // Прикладная физика. 2015. № 4. С. 71.
6. Балиев Д. Л., Лазарев П. С., Болтарь К. О. // Прикладная физика. 2014. № 5. С. 54.
7. Мармалюк А. А., Панин А. А., Сабитов Д. Р., Ладугин М. А., Падалица А. А. / Труды XXIII научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва. 2014). С. 37.
8. Шаронов Ю. П., Макарова Э. А., Седнев М. В., Ладугин М. А., Яроцкая И. В. // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 83.
9. Breiter R., Benecke M., et al. Proc. SPIE. 2016. Vol. 9819. P. 981908
10. Каталог фирмы Spectral Imaging, Ltd.
11. Каракозов Ю. С., Болтарь К. О., Моисеев А. Н., Чиясов А. В., Степанов Б. С. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 601.
12. Филачев А. М., Никонов А. В., Болтарь К. О., Моисеев А. Н., Чиясов А. В., Степанов Б. С. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 37.
13. Седнев М. В., Болтарь К. О., Иродов Н. А., Демидов С. С. // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 73.
14. Болтарь К. О., Чинарёва И. В., Лопухин А. А., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 10.
15. Акимов В. М., Болтарь К. О., Васильева Л. А., Иродов Н. А., Климанов Е. А. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 3. С. 281.
16. Волков В. Г. // Спецтехника и связь. 2016. № 2. С. 2.
17. Горелик Л. И., Мазин М. Г. // Прикладная физика. 2012. № 3. С. 86.
18. Gerald C. Holst; Keith A. Krapels // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9820. P. 98200C
19. Uwe Adomeit, Jürgen Krieg // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9641 P.
20. Аконджанян Ю. А., Биланчук В. В. и др. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2014. № 5. С. 60.

Short wave infrared camera with a focal plane array based on the InGaAs/InP heterostructures

K. A. Khamidullin¹, D. L. Baliev¹, P. S. Lazarev¹, K. O. Boltar^{1,2}, A. V. Polesskiy¹, I. D. Burlakov^{1,3}, E. L. Chepurnov¹, N. I. Gusarova⁴, and S. V. Popov⁴

¹ Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

³ Moscow Technological University (MIREA)
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

⁴ Shvabe Holding
176 Prospekt Mira, Moscow, 129366, Russia
E-mail: mail@shvabe.com

Received December 8, 2017

Consideration is given to the results of development and testing of a camera for short wave infrared spectrum range (0.9–1.7 μm). This camera is founded on the 320×256 focal plane array, the first in Russia, which has a low-temperature dependence of sensitivity and pixel pitch of 30 μm . The FPA is based on the InGaAs/InP heterostructure. The main components and parameters of the camera are considered. The advantages and applications of the camera are shown both in the composition of multi-spectral optoelectronic systems and as an independent device.

Keywords: heterostructures, InGaAs, short wave infrared spectrum range, SWIR spectrum range, SWIR camera.

REFERENCES

1. I. D. Burlakov, L. Ya. Grinchenko, A. I. Dirochka, and N. B. Zaletaev, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (2), 131 (2014).
2. N. I. Gusarova, N. F. Koshchavtsev, and S. V. Popov, *Journal of Communications Technology and Electronics* **61** (10), 1211 (2016).
3. D. S. Andreev, K. O. Boltar, P. V. Vlasov, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 1, 47 (2014).
4. D. S. Andreev, A. A. Lopukhin, P. V. Khakuashev, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 1, 74 (2014).
5. N. B. Zaletaev, K. O. Boltar, A. A. Lopukhin, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 4, 71 (2015).
6. D. L. Baliev, P. S. Lazarev, and K. O. Boltar, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 54 (2014).
7. A. A. Marmalyuk, A. A. Panin, D. R. Sabitov, M. A. Ladugin and A. A. Padalitsa, in *Proc. XXIII Intern. Conf. Photoelectronics* (Orion R&P Association, Moscow, 2014), p. 37.
8. J. P. Sharonov, E. A. Makarova, M. V. Sednev, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 6, 83 (2016).
9. R. Breiter, M. Benecke, et al., *Proc. SPIE* **9819**, 981908 (2016).
10. Catalog of Spectral Imaging, Ltd.
11. Yu. S. Karakozov, K. O. Boltar, A. N. Moiseev, et al., *Usp. Prikl. Fiz.* **1** (5), 601 (2013).
12. A. M. Filachev, A. V. Nikonov, K. O. Boltar, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 6, 37 (2013).
13. M. V. Sednev, K. O. Boltar, N. A. Irodov, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 3, 73 (2015).
14. K. O. Boltar, I. V. Chinareva, A. A. Lopukhin, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 5, 10 (2013).
15. V. M. Akimov, K. O. Boltar, L. A. Vasil'eva, et al., *Usp. Prikl. Fiz.* **3** (3), 281 (2015).
16. V. G. Volkov, *Spetsstekhnika i Svyaz*, No. 2, 2 (2016).
17. L. I. Gorelik and M. G. Mazin, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 86 (2012).
18. Gerald C. Holst and Keith A. Krapels, *Proc. SPIE* **9820**, 98200C (2016).
19. Uwe Adomeit and Jürgen Krieg, *Proc. SPIE* **9641**, 964104 (2015).
20. Yu. A. Akopdzhanyan, V. V. Bilanchuk, et al., *Vestnik Bauman Moscow Gos. Tekh. Univers. Ser. Priborostr.*, No 5, 60 (2014).