

УДК 621.383.4/5

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

## Фотосенсорика коротковолнового ИК-диапазона спектра

К. О. Болтарь, И. Д. Бурлаков, Н. И. Яковлева, А. В. Полесский, П. А. Кузнецов,  
П. С. Лазарев, В. С. Рудневский, М. В. Седнев

*Представлены достижения в области создания высокочувствительных фотоприемных устройств (ФПУ) на основе гетероструктур InGaAs с широкозонным барьерным слоем InAlAs коротковолнового инфракрасного диапазона спектра. Предложены конструктивные решения построения ФПУ спектрального диапазона 0,9–1,7 мкм с малой неоднородностью параметров и дефектностью пикселей менее 0,5 %. Рассмотрены возможности расширения спектрального диапазона в коротковолновую до 0,5 мкм и в длинноволновую до 2,2 мкм области спектра ФПУ на основе гетероструктур InGaAs.*

*Изложены принципы конструирования активно-импульсных систем, использующих ФПУ на основе InGaAs формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм, измеряющих расстояние до цели в спектральном диапазоне 0,9–1,7 мкм. Исследованы параметры матричного инфракрасного дальномера на основе ФПУ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм, обеспечивающего разрешение по дальности до 0,6 м.*

*Ключевые слова:* InGaAs, GaAs, коротковолновый (SWIR) инфракрасный (ИК) спектральный диапазон, гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС), матрица фоточувствительных элементов (МФЧЭ), фотоприемное устройство (ФПУ), ИК-камера, макет инфракрасного матричного дальномера.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-6-479-498

### 1. Введение

Фотоприемные устройства коротковолнового инфракрасного (ИК) диапазона спектра используются в различных областях гражданского и специального применения благодаря миниатюрным габаритам, малой рассеиваемой мощности, использованию маломощных охла-

дителей [1, 2]. Одной из важных областей их применения являются низкофонные системы, которые при регистрации высокотемпературных целей имеют важные преимущества по сравнению с тепловизорами, работающими нестабильно вследствие высокого уровня фона и температурного перегрева. Данные преимущества заставляют разработчиков переходить

**Болтарь Константин Олегович**<sup>1,2</sup>, нач. НТК, профессор, д.ф.-м.н.

**Бурлаков Игорь Дмитриевич**<sup>1,3</sup>, зам. генерального директора по инновациям и науке, профессор, д.т.н.

**Яковлева Наталья Ивановна**<sup>1</sup>, гл.н.с., д.т.н.

**Полесский Алексей Викторович**<sup>1,3</sup>, гл. конструктор по НИОКР, к.т.н.

**Кузнецов Петр Александрович**<sup>1</sup>, гл. специалист.

**Лазарев Павел Сергеевич**<sup>1,2</sup>, вед. инженер.

**Рудневский Владимир Сергеевич**<sup>1</sup>, вед. инженер-электроник, к.ф.-м.н.

**Седнев Михаил Васильевич**<sup>1</sup>, нач. участка, к.т.н.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

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

E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

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

<sup>3</sup> МИРЭА – Российский технологический университет. Россия, 119454, Москва, пр-т Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 08 ноября 2021 г.

© Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Яковлева Н. И., Полесский А. В., Кузнецов П. А., Лазарев П. С., Рудневский В. С., Седнев М. В., 2021

в коротковолновый инфракрасный диапазон спектра (Short Wavelength Infrared Range – SWIR –  $\lambda = 1\text{--}3$  мкм), детектирование в области которого стабильно и предсказуемо, а темновые токи матриц фотодиодов, определяющие шумы системы, составляют порядка единиц фА.

При работе в коротковолновом ИК-диапазоне спектра используется излучение искусственных (лазеры, диоды) или естественных (Солнце, Луна) источников, отраженное от объектов наблюдения, поэтому в полученном изображении присутствуют тени и контраст, что делает его, близким к видимому, а, следовательно, удобным для человеческого восприятия. В безлунные ночи можно воспользоваться свечением ночного неба, вызванного фотохимической реакцией гидроксидов в верхних слоях атмосферы на высотах  $\sim 85$  км, поэтому ФПУ на основе InGaAs успешно работают в условиях низкой видимости.

В области коротких длин волн размер дифракционного пятна рассеяния оптической системы близок к длине излучения и размеру фоточувствительного элемента (ФЧЭ) фотодиодной матрицы, что важно при построении изображения высокого разрешения и качества. Разрешение оптики и матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) в SWIR-диапазоне сравнимы, поэтому возможно наблюдение уникальных особенностей и мелких деталей объектов, что дополнительно повышает вероятность их распознавания и идентификации. В то время как в длинноволновом ИК-диапазоне спектра пятно рассеяния объектива, как правило, существенно превышает размеры ФЧЭ, что приводит к уменьшению разрешения и «размазыванию» изображения.

Криогенные технологии, применяемые для охлаждения ФПУ средневолнового и длинноволнового ИК-диапазонов, весьма дороги, они увеличивают габариты, рассеиваемую мощность и уменьшают ресурс безотказности, поэтому первоочередной задачей любой ИК-системы является увеличение рабочей температуры и переход на маломощные микрокриогенные системы (МКС). Малые габариты оптических систем, электроники и матриц, детектирующих излучение в SWIR диапазоне, обусловило применение малоразмерных модулей термоэлектрического охла-

ждения (ТЭО) и привело к снижению массы, габаритов, рассеиваемой мощности, а, в конечном счете, стоимости приборов.

Решаемая мировыми разработчиками задача увеличения рабочей температуры ФПУ требует также нетривиальных подходов к улучшению параметров качества (обнаружительной способности, эквивалентной шуму разности температур), что можно осуществить за счет запланированного изменения зонной диаграммы полупроводниковой структуры. Применение технологий конструирования зонной диаграммы эпитаксиальных полупроводниковых структур позволило создать новые архитектуры ФЧЭ, обеспечивающие подавление отдельных механизмов генерации – рекомбинации, а за счет включения в состав структуры барьерного слоя – блокирование протекания одного из типов носителей заряда. В результате темновые токи ФПУ коротковолнового диапазона существенно уменьшились, это сделало возможным считывание сверхмалых потоков излучения, вплоть до нескольких фотонов. Перспективной областью применения таких ФПУ является детектирование объектов в условиях слабой видимости, а также задачи высокоскоростной локации и позиционирования.

Сравнительный анализ фоточувствительных ИК-материалов, пригодных для изготовления матричных и многорядных ФПУ коротковолнового ИК-диапазона спектра для работы в пассивном и активно-импульсном режимах выявляет на сегодняшний день два основных конкурентоспособных направления: ФПУ на основе тройных соединений кадмий-ртуть-теллур (КРТ, HgCdTe) [3, 4, 5] и ФПУ на основе тройных соединений индий-галлий-арсенид (InGaAs) [6, 7].

Параллельно с разработкой ФПУ на основе InGaAs и HgCdTe проводятся работы по конструированию новых фоточувствительных материалов. Так моделирование зонной диаграммы и совершенствование методов выращивания привели к созданию малоразмерных квантовых структур и метаматериалов, расширяющих границы инфракрасной фотоэлектроники.

Спектральные характеристики токовой чувствительности фотодиодов на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs показы-

вают их пригодность для приборов ночного видения (ПНВ) [8] и волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) [9]. Непрерывное совершенствование характеристик таких устройств является определяющим в условиях жесткой конкуренции. Повышение характеристик ФПУ достигается путем внедрения новых решений в процесс производства, поэтому в работе рассматриваются новые технологические решения при изготовлении ФПУ на основе InGaAs. В работе также представлены миниатюрные SWIR-камеры, изображение которых сравнивается с изображением камер видимого диапазона. Относительно новой и наиболее перспективной областью применения являются инфракрасные матричные дальномеры на основе ГЭС InGaAs, поэтому в фокусе рассмотрения настоящей статьи находятся также

принципы построения систем инфракрасной дальнометрии.

## 2. Полупроводниковые материалы, чувствительные в коротковолновом ИК-диапазоне спектра

Материалы, детектирующие излучение в коротковолновом ИК-диапазоне спектра включают двойные, тройные и многокомпонентные полупроводниковые соединения, работающие на эффекте собственной проводимости, выращенные на оптически прозрачных монокристаллических подложках (табл. 1). В табл. 1 дополнительно представлены ожидаемые диапазоны фоточувствительности для ФПУ на основе полупроводниковых материалов SWIR-диапазона.

Таблица 1

**Полупроводниковые соединения, работающие на эффекте собственной проводимости в коротковолновом ИК-диапазоне спектра, подложки и спектральные диапазоны фоточувствительности**

Полупроводниковое соединение	Подложка	Спектральный диапазон, мкм
PbS	NaCl	1,0–3,6
PbSe	BaF <sub>2</sub>	1,5–5,8
InSb	InSb	1,0–5,5
InAs	GaAs	1,0–3,1
Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As (0 ≤ x ≤ 1)	GaAs	0,4–1,1
Ga <sub>x</sub> In <sub>1-x</sub> As Ga <sub>0,47</sub> In <sub>0,53</sub> As (0,4 ≤ x ≤ 0,6)	InP	0,4–2,5 0,9–1,7
Ga <sub>x</sub> In <sub>1-x</sub> As <sub>y</sub> P <sub>1-y</sub> (x = 0,47y; 0 ≤ y ≤ 1)	InP	1–3
Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As <sub>y</sub> Sb <sub>1-y</sub> (x = 12y; 0 ≤ x ≤ 1)	GaSb	2–3
Ga <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> As <sub>1-y</sub> Sb <sub>y</sub> (x = 1,1y; 0 ≤ x ≤ 1)	GaSb	2–3
Hg <sub>1-x</sub> Cd <sub>x</sub> Te (0 ≤ x ≤ 1)	CdZnTe, GaAs, Ge, Si	1–16

Для оценки возможности работы ФПУ одновременно в пассивном и в активном-импульсном режимах необходимо сравнить уровень предельных параметров на основе представленных полупроводниковых материалов, что позволяет сделать ряд следующих важных выводов.

Широко используемые в прошлом столетии ФПУ на основе InAs и халькогенидов четвертой группы уступают ФПУ на основе HgCdTe и InGaAs по пороговым характеристикам. Перспективные ФПУ на основе сверхрешеток второго типа (InAs/GaSb) для коротковолнового диапазона находятся в ста-

дии разработок и их промышленное производство пока не просматривается.

Использование тройных (четверных и многокомпонентных) соединений с настраиваемой на спектральный диапазон шириной запрещенной зоны является необходимым условием для создания многофункциональных ФПУ со сложной архитектурой и высокими фотоэлектрическими параметрами. К настоящему времени максимальные фотоэлектрические параметры достигнуты у ФПУ на основе ГЭС HgCdTe. Тройной раствор InGaAs рассматривается как альтернатива материалу КРТ в коротковолновом ИК-диапазоне спектра, а

конструирование «зонной диаграммы» и совершенствование технологии изготовления ФПУ на его основе, выводят InGaAs на ведущие позиции в фотоэлектронике SWIR-диапазона.

Существенно повысился интерес к соединениям на основе антимонида индия ( $\text{InSb}$ ,  $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ ,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ ,  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ ), выращенных эпитаксиальными методами и работающих в коротковолновой области спектра. На сегодняшний день приборы на основе антимонидов уверенно занимают нишу средневолнового ИК-диапазона спектра и пока не конкурируют с  $\text{HgCdTe}$  и  $\text{InGaAs}$  в коротковолновом ИК-диапазоне.

Среди многочисленных полупроводниковых соединений  $\text{A}_3\text{B}_5$  группы арсенидов, детектирующих излучение в коротковолновой области ИК-диапазона, наиболее перспективно тройное соединение  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  с областью fotocувствительности 0,9–1,7 мкм, кристаллическая решетка которого соответствует подложке  $\text{InP}$ , а характеристика спектральной чувствительности близка к характеристике светимости ночного неба. На рис. 1 представлены спектральные характеристики токовой чувствительности ФПУ на основе  $\text{InGaAs}$  с различными значениями граничной длины волны от 1,9 до 2,6 мкм («Teledyne Scientific & Imaging», США).

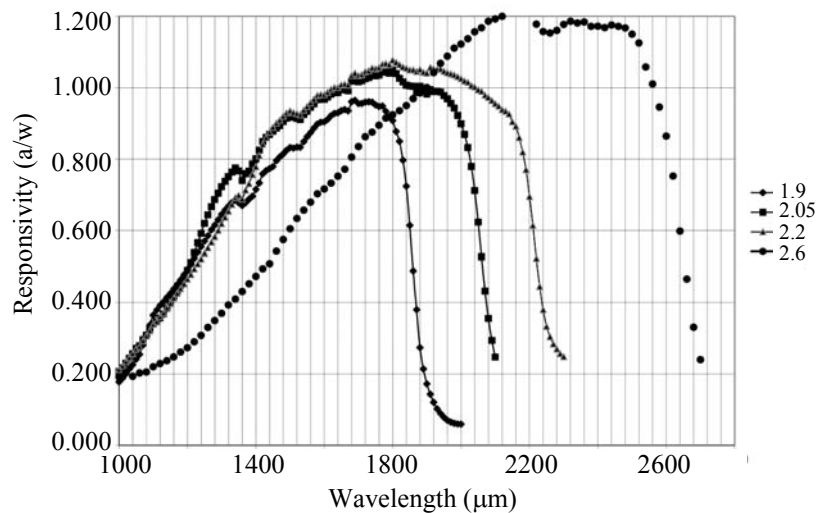


Рис. 1. Спектральные характеристики токовой чувствительности ФПУ на основе  $\text{InGaAs}$  с граничной длиной волны от 1,9 до 2,6 мкм.

Тройные растворы  $\text{InGaAs}$  на основе бинарных соединений  $\text{InAs}$ – $\text{GaAs}$  имеют ширину запрещенной зоны от 0,35 эВ (3,5 мкм) для  $\text{InAs}$  до 1,43 эВ (0,87 мкм) для  $\text{GaAs}$ . При изменении содержания  $\text{In}(\text{Ga})$  в поглощающем слое  $\text{InGaAs}$  токовая чувствительность может достигать максимума для заданной длины волны при высоком отношении сигнал/шум. Расширение спектрального диапазона fotocувствительности ФПУ на основе ГЭС  $\text{InGaAs}$  в видимую область спектра до 0,4 мкм и в инфракрасную область спектра до 2,6 мкм свя-

зано с различными задачами, стоящими перед разработчиками. Известно, что на диапазон 2,0–2,5 мкм приходится большая часть излучения инфракрасных целей с температурами 270–300 К по сравнению с диапазоном 0,9–1,7 мкм, в том числе и излучения ночного неба, как показано на рис. 2 [10], поэтому граничная длина волны в области ~2,0–2,5 мкм является желательной для детектирования высокотемпературных целей в сложных метрологических и ночных условиях.

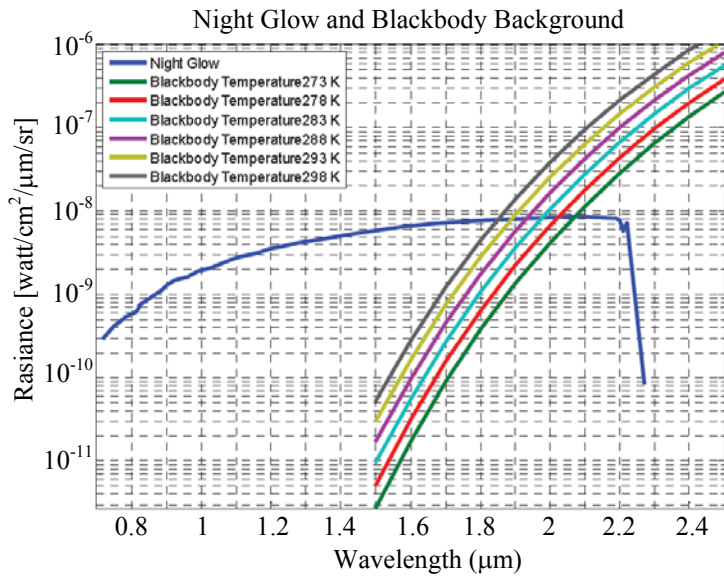


Рис. 2. Спектральные характеристики излучательной способности ночного неба и черного тела в диапазоне  $T = 270\text{--}300\text{ K}$ .

### 3. ФПУ на основе ГЭС InGaAs с широкозонным барьерным слоем

Состав ФПУ на основе InGaAs представлен на диаграмме (рис. 3), ФПУ включает вакуумный корпус с блоком фоточувствительным, который в свою очередь состоит из гибридной сборки МФЧЭ и БИС, размещенных на растре, выполняющем разводку управляющих и считывающих сигналов.

На рис. 4 представлена конструкция ФПУ в двух исполнениях: первый вариант (а) – в корпусе с ТЭО и второй вариант (б) – без ТЭО в миниатюрном электронном корпусе без охладителя.

Преимуществом второго варианта является малые габариты и рассеиваемая мощность. Гибридная сборка матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) и БИС, помещается в корпус микросхемы и распаивается непосредственно на плату управляющей электроники, фрагмент которой представлен на рис. 5, а. Плата располагается в специальном корпусе (не показано) и в дальнейшем используется в изделиях применения.

ственно на плату управляющей электроники, фрагмент которой представлен на рис. 5, а. Плата располагается в специальном корпусе (не показано) и в дальнейшем используется в изделиях применения.

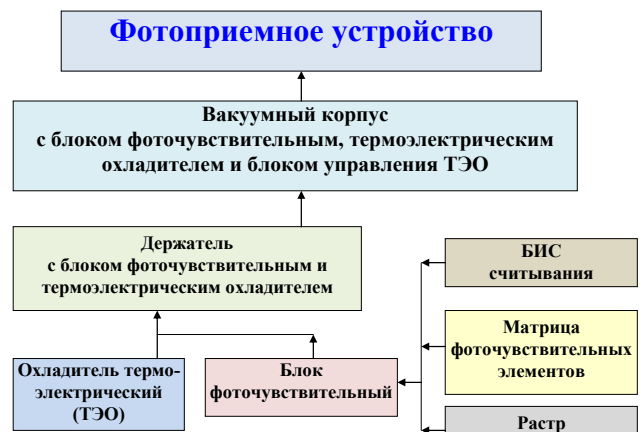
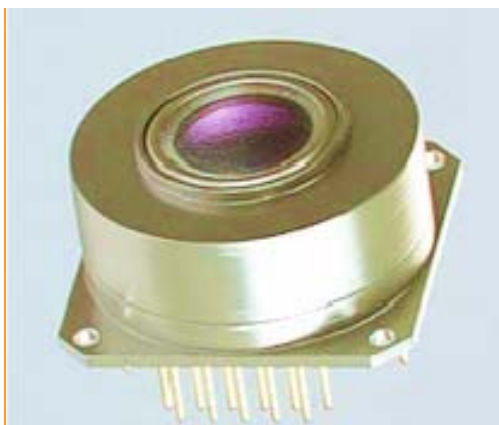
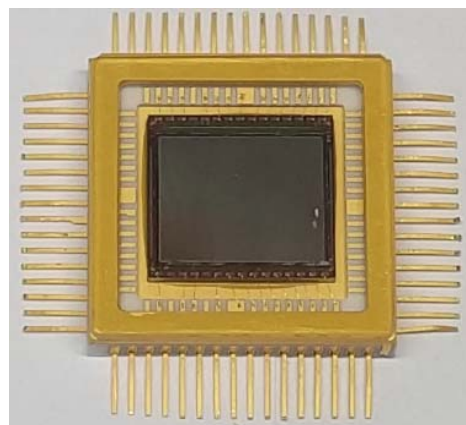


Рис. 3. Состав ФПУ на основе InGaAs.



а) ФПУ в корпусе с ТЭО



б) ФПУ в миниатюрном корпусе

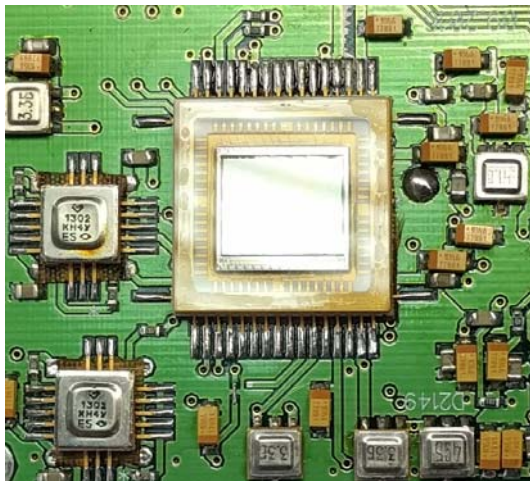
Рис. 4. Конструкция ФПУ двух исполнений.

На рис. 5, б показано устройство полномасштабного контроля ФПУ на основе InGaAs, используемое на этапе предварительного контроля параметров до распайки выводов микросхемы на плату предусилителя, что позволяет осуществлять предварительный отбор микросхем, а затем проверенные МФПУ с параметрами, удовлетворяющими заданным критериям качества, распаивать на миниатюрные печатные платы.

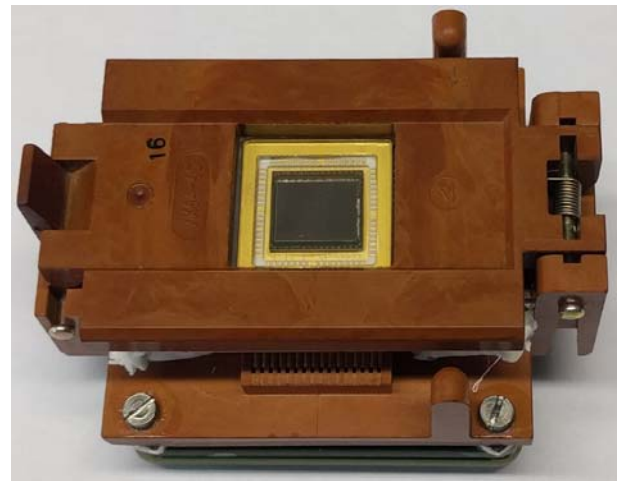
МФЧЭ на основе InGaAs изготавливаются ведущими разработчиками по планарной [11] и мезаструктурной [12] технологии (рис. 6). Наиболее распространенной архитектурой ФЧЭ является трехслойная  $p-i-n$ -структура, включающая два высоко легированных слоя  $p$ - и  $n$ -типа между которыми располагается слаболегированный поглощающий  $i$ -слой, как показано на рис. 6, а.

Обе технологии имеют недостатки, так у планарных МФЧЭ наблюдается высокая взаимосвязь между ФЧЭ при снижении шага в матрице менее 15 мкм (поскольку длина диффузии неосновных носителей заряда в области поглощения в несколько раз превышает шаг), для мезо-технологии крайне сложным является обеспечение минимального технологического зазора между ФЧЭ при высоком коэффициенте заполнения и минимальном коэффициенте взаимосвязи.

Для устранения указанных недостатков в АО «НПО «Орион» предложена, реализована и исследована барьерная архитектура ФЧЭ на основе InGaAs ( $p+/B/n/n+$ -типа) со сверхмалыми темновыми токами и шумами, обеспечивающая предельные параметры в рабочем спектральном диапазоне 0,9–1,7 мкм (рис. 7).

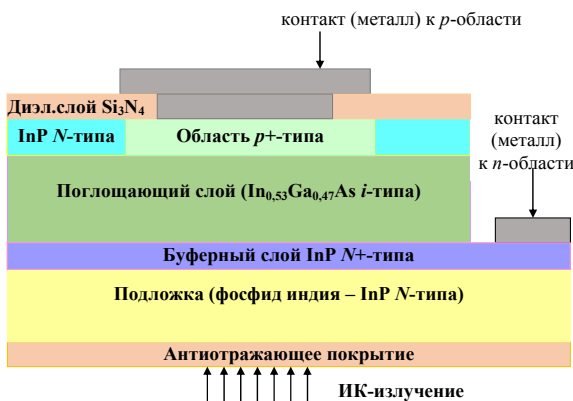


а) фрагмент электроники считывания

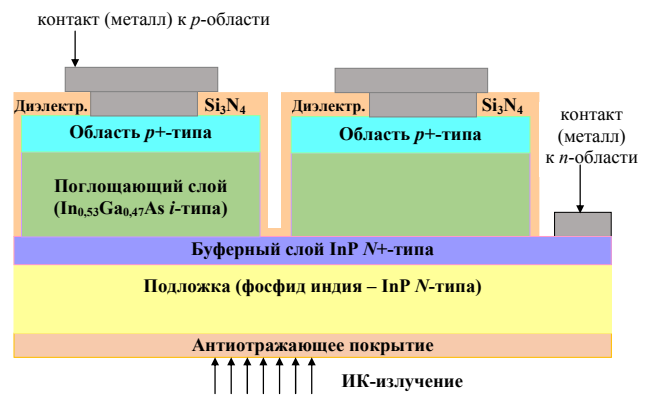


б) устройство полномасштабного контроля

Рис. 5. Элементы конструкции ФПУ на основе InGaAs.



а) планарная МФЧЭ



б) мезаструктурная МФЧЭ

Рис. 6. Наиболее часто используемые архитектуры ФЧЭ: а) – планарная; б) – мезаструктурная.

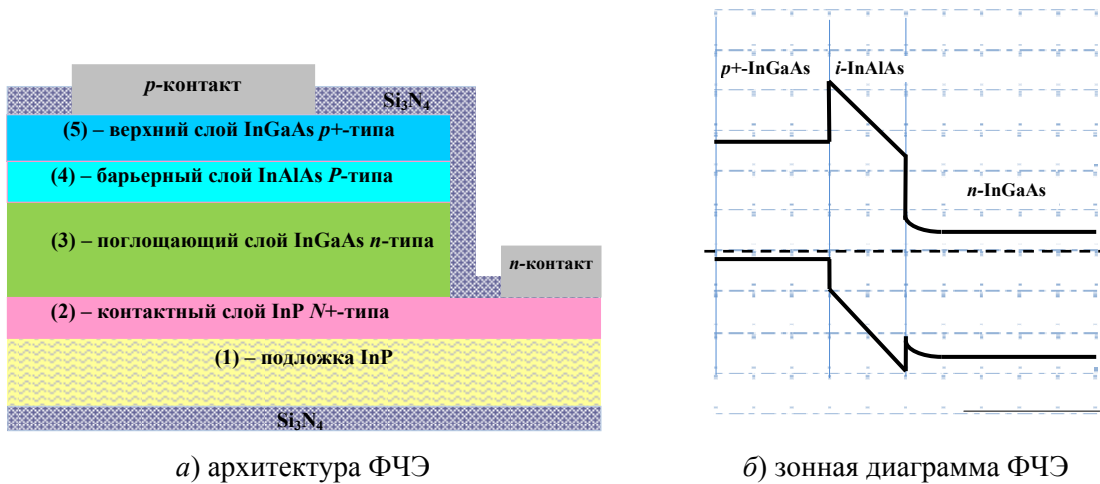


Рис. 7. Архитектура ФЧЭ на основе InGaAs (а) и зонная диаграмма (б) с широкозонным барьерным слоем в области p–n-перехода.

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 уменьшает токи туннелирования и генерации-рекомбинации через центры ШРХ. На рис. 7, б схематично представлена зонная диаграмма p+/B/n/n+-архитектуры ФЧЭ на основе InGaAs.

В табл. 2 представлены параметры слоев барьерной архитектуры ФЧЭ. Нумерация слоев начинается с подложки.

Таблица 2

**Барьерная p+/B/n/n+-структура**

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

Согласно табл. 2 p+/B/n/n+-структура включает:

- высоколегированную оптически прозрачную подложку InP (1) с концентрацией доноров  $N_D = (1–2) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , подложка имеет антиотражающее покрытие из нитрида кремния Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>;

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

- активный поглощающий слой In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>As n-типа проводимости (3) толщиной 2,0–2,5 мкм с концентрацией доноров  $N_D = (1–2,5) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ;

- широкозонный барьерный (B) слаболегированный слой In<sub>0,52</sub>Al<sub>0,48</sub>As (4), толщина которого составляет 0,1 мкм с концентрацией носителей  $n \sim (1–2) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , пассивирующий поглощающий слой;

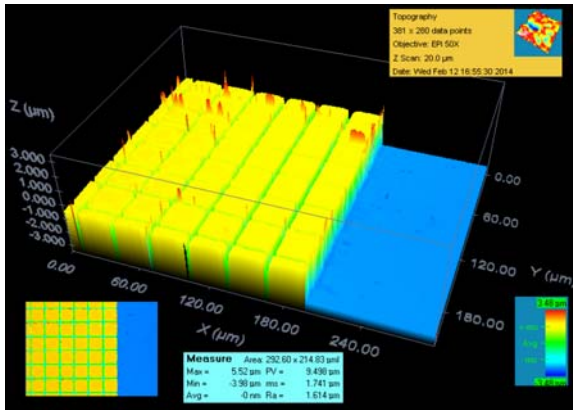
- контактный высоколегированный слой In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>As p+-типа (5) толщиной ~ 0,15 мкм для создания омического контакта к p-областям.

В валентной зоне в соответствии с моделью Андерсона [13] структура имеет небольшой разрыв энергетического уровня (~0,2 эВ), который может быть удален с помощью введения градиентного слоя с двумя сверхтонкими высоколегированными δ-слоями по его границам, при этом высота барьерного слоя в зоне проводимости должна быть достаточной для блокирования перемещения основных носителей заряда (электронов).

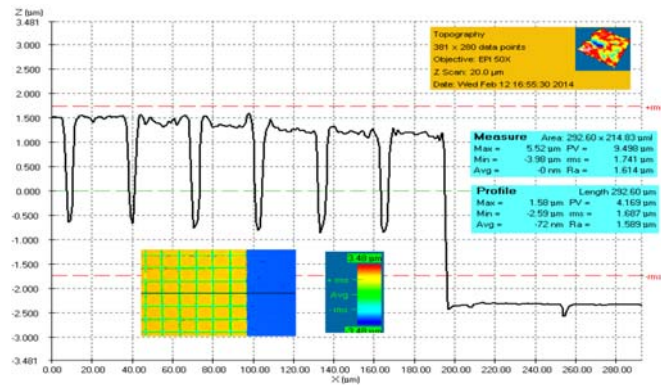
Главная задача технологии изготовления МФЧЭ состоит в уменьшении зазора между чувствительными элементами при сохранении

высокого коэффициента заполнения и обеспечения приемлемого коэффициента взаимосвязи между ФЧЭ. Операция ионно-плазменного травления ионами Ar структуры с финишным жидкостным дотравливанием для получения ФЧЭ с минимальным зазором используется

для получения мезаструктурных матриц. На рис. 8, а, б представлены фрагмент мезаструктуры и типичный профиль МФЧЭ с шагом между элементами 30 мкм при проведении операции травления до барьерного слоя  $Al_{0,48}In_{0,52}As$  через маску фоторезиста [14].



а) фрагмент мезаструктуры, маска 29×29 мкм



б) профилограмма поверхности после жидкостного дотравливания, размер маски 29×29 мкм, размер пикселя у основания 30×30 мкм

Рис. 8. Фрагмент мезаструктурной матрицы на основе  $InGaAs$ .

Глубина травления при изготовлении мезаструктуры задавалась временем и скоростью травления ионами аргона ( $Ar^+$ ) с энергией 1 кэВ и плотностью тока  $0,2 \text{ mA/cm}^2$ . Широкозонный барьерный слой  $Al_{0,48}In_{0,52}As$ , согласованный по периоду решетки с поглощающим слоем  $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ , является слоем «стоп-травление». Благодаря широкозонности он защищает поверхность поглощающего слоя  $InGaAs$  и позволяет разделить фоточувствительные элементы, не выводя боковые области  $p$ - $n$ -переходов на поверхность. Пассивация поверхности структуры выполняется напылением нитрида кремния ( $Si_3N_4$ ) для нейтрализации и защиты поверхности ФЧЭ. После нанесения диэлектрического слоя проводится формирование окон на меза-областях под напыление контактных металлов Ni/Au и изготовление индиевых микроконтактов.

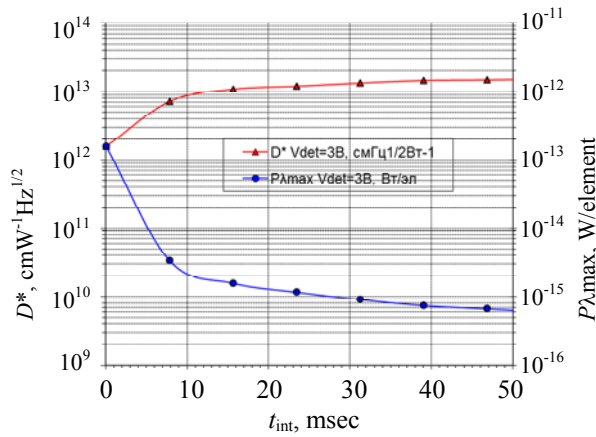
Минимальный зазор между ФЧЭ составил – 1 мкм, проработаны варианты двух- и пяти-микронного зазоров. При травлении до буферного слоя коэффициент взаимосвязи не превышал 1 %, при травлении до широкозонного барьерного слоя коэффициент взаимосвязи составил ~5 %.

На рис. 9, а, б для ФПУ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм представлены зависимости: (а) среднего значения удельной обнаружительной способности  $D^*$  и пороговой мощности  $P_{\text{пор}}$  от напряжения обратного смещения при различных значениях времени накопления; (б) характеристики спектральной чувствительности. Значение емкости накопления в ячейках БИС составило 10 фФ.

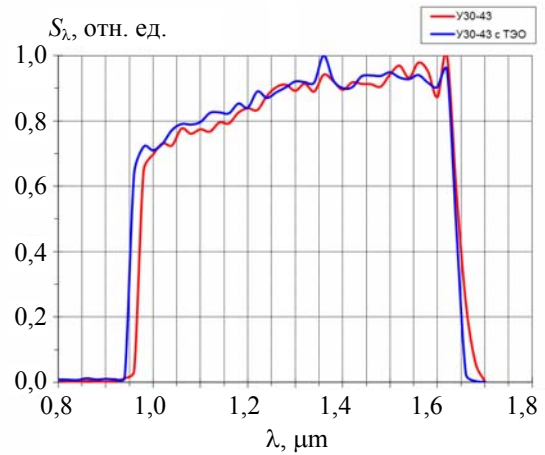
Таким образом, барьерная архитектура позволяет эффективно подавлять диффузионную, генерационно-рекомбинационную ШРХ, туннельные и поверхностную составляющие темнового тока, а примененное мезатравление до барьерного слоя при формировании матрицы и защита боковых поверхностей диэлектрическим слоем необходимы для разделения ФЧЭ и уменьшения поверхностных темновых токов.

На рис. 10, а представлено изображение человека на фоне лесного массива в условиях тумана, полученное с помощью SWIR – ФПУ формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм, а для сравнения на рис. 10, б показано то же изображение в видимом диапазоне спектра, полученное с помощью кремниевой ПЗС-матрицы.





а) обнаружительная способность и пороговая мощность



б) характеристика спектральной чувствительности

Рис. 9. Основные параметры ФПУ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм.



а) ИК – изображение, полученное с помощью ФПУ формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм

б) видимое изображение, полученное с помощью кремниевой ПЗС-матрицы

Рис. 10. Примеры изображений.

Из рис. 10 видно, что изображение отдельных элементов и деталей в ИК-диапазоне спектра существенно лучше проработано, по сравнению с видимым диапазоном, наблюдается бóльшая информативность и высокое пространственное разрешение.

Результаты технологических разработок в области создания гетероэпитаксиальных структур и образцов ИК ФПУ внедрены в тех-

нологические процессы получения полноформатных ФПУ 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. 11, а показана малоразмерная SWIR-камера, на рис. 11, б показан объектив, примененный для получения изображений.



а) инфракрасная камера



б) объектив

Рис. 11. Камера SWIR-диапазона спектра.

Поскольку принцип детектирования объектов в SWIR-диапазоне аналогичен видимому, 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.

Ниже в табл. 3 представлены параметры ряда камер SWIR-диапазона, разработанных и изготавливаемых в АО «НПО «Орион».

Проведены разработки в области создания ФПУ с граничной длиной волны  $\lambda \sim 2,0$  мкм на основе тройного раствора InGaAs. Расширение спектрального диапазона чувствительности до границы окна прозрачности атмосферы более 2 мкм является важной научно-технической задачей, которая решалась увеличением мольной доли  $x$  в фоточувствительном слое  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  до значения  $x \approx 0,67$  мол. дол. Возможная конструкция гетероструктуры показана на рис. 12.

Структуры (рис. 12) выращивались в АО «НИИ «Полюс» на  $n+$ -подложке InP методом МОС-гидридной эпитаксии [15] с поглощающим слоем  $\text{In}_{0,67}\text{Ga}_{0,33}\text{As}$ , оптимальная толщина которого составляла 1,5–3 мкм для достижения максимального значения токовой чувствительности в спектральном диапазоне 1,0–2,1 мкм. Ампер-ваттная чувствительность элемента размером  $40 \times 40$  мкм, измеренная при потоке излучения  $\Phi = 1,5 \times 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup>, составила 0,44 А/Вт при напряжении обратного смещения  $V = -0,1$  В. На рис. 13 представлен край спектральной характеристики чувстви-

тельности ФПУ, изготовленного на основе структуры (рис. 12), в зависимости от волнового вектора  $k$  в диапазоне температур минус 40 – плюс 25 °С.

Длина волны правой границы спектральной характеристики по уровню 0,1 при комнатной температуре  $T = +25$  °С смещается до значения 2,06 мкм при изменении состава поглощающего слоя от  $x = 0,53$  до значения  $x \approx 0,67$  мол.дол. ФПУ расширенного спектрального диапазона до 2,0–2,2 мкм требует сверхнизкого охлаждения до температур минус 30 – минус 50 °С. Наблюдается также усложнение технологии эпитаксиального выращивания и возрастает дефектность структур из-за рассогласования постоянной кристаллической решетки оптически прозрачной подложки InP с поглощающим слоем  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  при увеличении состава  $x \geq 0,53$  мол. дол.

Задача сдвига границы фоточувствительности в более длинноволновую область может быть также решена выбором перспективных материалов на основе коллоидных квантовых точек, чувствительных в области длин волн 0,4–2,0 мкм при температуре  $T = 273$ –300 К. Использование МФЧЭ на основе нанокристаллов сульфида свинца (PbS), синтезированных методами жидкостной химии в дисперсных средах [16], позволит снизить стоимость элементной базы, предназначенной для использования как в изделиях фотоэлектроники, так и в изделиях широкого потребления (смартфоны и др.).

Таблица 3

Характеристики ряда камер SWIR-диапазона

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

Контактный $p+$ -слой $\text{In}_{0,67}\text{Ga}_{0,33}\text{As}:\text{Zn}$	$5 \times 10^{18}$	0,15 мкм
Фотодиодный $p+$ -слой $\text{InAs}_{0,6}\text{P}_{0,4}:\text{Zn}$	$2 \times 10^{18}$	0,2 мкм
Поглощающий $n$ -слой $\text{In}_{0,67}\text{Ga}_{0,33}\text{As}$	$2,5 \times 10^{16}$	1,5 мкм
Буферный $n$ -слой ( $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}:\text{Si}$ )	$5 \times 10^{17}$	1,5 мкм
Буферный $n$ -слой (InP:Si)	$5 \times 10^{17}$	1,5 мкм
Подложка InP (100) $n$ -типа, $\varnothing 50,8$ мм	$2 \times 10^{18}$	350 мкм

Рис. 12. Структура ФЧЭ с граничной длиной волны, смещенной в длинноволновую область.

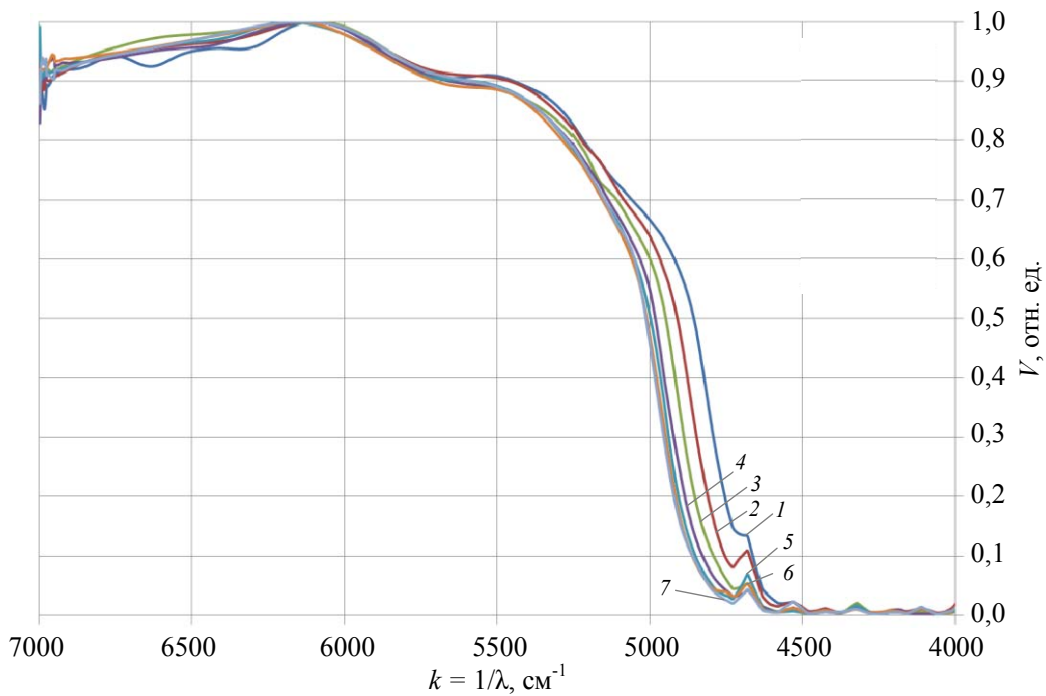


Рис. 13. Край спектральной характеристики чувствительности в зависимости от волнового вектора  $k$  в диапазоне температур минус 40 – плюс 25 °С (кривая 1 – +25 °С; 2 – +2,5 °С; 3 – -14 °С; 4 – -27 °С; 5 – -36 °С; 6 – -40 °С; 7 – -42 °С).

#### 4. Построение инфракрасного матричного дальномера на основе ФПУ SWIR-диапазона

Задача построения 3D-изображений с мгновенным определением дальности до объектов наблюдения в ИК-диапазоне спектра является весьма актуальной для систем навигации и распознавания целей. В основу функционирования активно-импульсных систем заложен импульсный метод измерения дальности, предложенный в 1936 г. академиком А. А. Лебедевым, получивший название метода стробирования по дальности (Gated Viewing) [17]. Сущность метода сводится к тому, что объект облучается короткими импульсами, длительность которых значительно меньше времени распространения излучения до объекта и обратно. Принимающая часть прибора снабжена быстродействующим затвором, открывающимся в определенное время в такт с посылаемыми и принимаемыми импульсами излучения. Отраженное от цели излучение детектируется принимающей системой в момент активации затвора, а дальность до объекта рассчитывается по временному интервалу, равного проходу излучения до объекта и обратно.

Для задачи определения дальности необходимы высокочувствительные матричные ФПУ, спектральная характеристика которых соответствует лазерным источникам с длинами волн 1,06; 1,31; 1,55 мкм, поэтому для детектирования излучения наиболее подходящим является матричное ФПУ на основе InGaAs. Такие ФПУ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм спектрального диапазона 0,9–1,7 мкм на основе ГЭС InGaAs, разработаны в АО «НПО «Орион» [18]. На рис. 14 представлена упрощенная структурная схема инфракрасного матричного дальномера.



Рис. 14. Структурная схема инфракрасного матричного дальномера.

В состав матричного дальномера входят источник излучения, в качестве которого обычно выступает импульсный лазер (твердо-

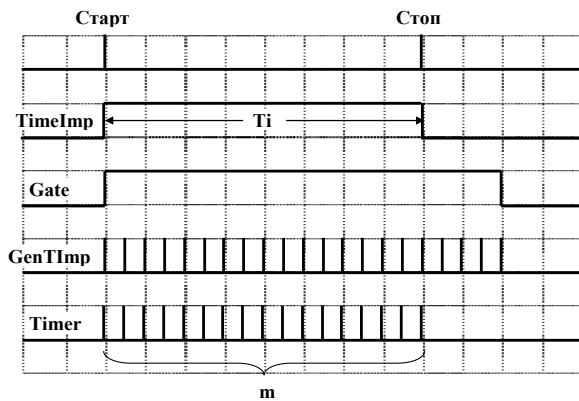
тельный или полупроводниковый), две оптические системы: передающая (от источника) и принимающая (с помощью МФПУ). В состав также включены электронная система управления (ЭСУ) и система обработки данных (СОД) с выводом изображений на экран монитора.

Электронная система управления синхронизирует работу импульсного лазера и МФПУ с помощью устройства синхронизации, определяет время между старт-импульсом и отраженным от цели стоп-импульсом, управляет системой обработки данных, уменьшает погрешность полученных результатов. Система обработки данных осуществляет сохранение, интерпретацию и вывод данных на устройство отображения.

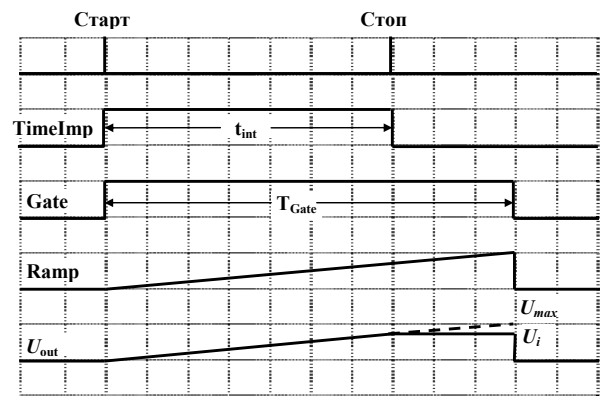
Суть работы инфракрасного матричного дальномера состоит в том, что излучение от источника (импульсного лазера) формируется с помощью передающей оптической системы в параллельный поток с малым углом расходимости, который направляется в сторону цели. Отраженное от цели излучение детектируется принимающей системой, которая со-

держит объектив, фокусирующий излучение от объекта в плоскость матричного ФПУ. Уровень отраженного сигнала мал, поэтому МФПУ должно обладать высокими пороговыми характеристиками или возможностью усиления фотосигнала выше порогового значения.

Передача и прием импульсов излучения синхронизованы по времени, поэтому в состав системы управления должно входить устройство измерения времени. Измерение времени начинается от момента возникновения лазерного старт-импульса и завершается в момент приема отраженного от объекта стоп-импульса, который детектируется МФПУ. По способу измерения временного интервала дальномеры разделяются на цифровые и аналоговые. На рис. 15, а показана тактовая диаграмма, реализующая измерение временного интервала между старт- и стоп-импульсами с помощью цифрового метода [19], на рис. 15, б – тактовая диаграмма реализующая измерение временного интервала между старт- и стоп-импульсами с помощью аналогового метода [20].



а) цифровой метод



б) аналоговый метод

Рис. 15. Тактовая диаграмма для измерения дальности: (а) цифровой метод; (б) – аналоговый метод, где Старт- и Стоп-импульсы, излучаемый и отраженный от объекта импульсы;  $TimeImp$  – прямоугольный временной импульс дальности;  $Gate$  – стробирующий импульс;  $GenTImp$  – генератор тактовых импульсов с периодической последовательностью счетных импульсов;  $Timer$  – таймер, считающий  $m$  тактовых импульсов между старт и стоп-импульсами;  $Ramp$  – генератор линейно изменяющегося напряжения;  $U_{out}$  – напряжение сигнала на выходе  $i$ -го элемента МФПУ;  $U_{max}$  – максимальное напряжение.

Цифровой метод измерения времени, как правило, подразумевает наличие в электронной системе управления генератора тактовых импульсов и счетчика (таймера), который осуществляет непосредственный счет тактовых импульсов от старт-импульса до стоп-импульса. Как представлено на рис. 15, а с

момента возникновения старт-импульса запускается счетчик тактовых импульсов генератора, который подсчитывает количество импульсов  $m$ , попадающих в диапазон временного интервала старт-стоп =  $T_i$ . Такой счетчик должен располагаться в каждой элементарной ячейке БИС, гибридизированной с

элементом ФПУ. Дальность  $L$  до цели будет равна произведению скорости света  $c$  на интервал между старт-стоп-импульсами, поделенного на  $2n$ , где  $n$  – показатель преломления среды распространения излучения (обычно, для среды – воздух  $n = 1$ )

$$L = \frac{c \times T_i}{2n}.$$

Счетчик работает только во время наличия стробирующего импульса Gate, длительность которого обычно превышает длительность  $T_i$  между импульсами старт и стоп. Цифровой метод отличается хорошей линейностью и большим динамическим диапазоном. Недостатком является погрешность счета, если в диапазон  $T_i$  не укладывается целое количество тактовых импульсов.

В представленном в данной работе инфракрасном матричном дальномере используется аналоговый метод измерения дальности. Тактовая диаграмма, объясняющая суть данного метода представлена на рис. 15, б. Суть метода заключается в том, что в момент возникновения старт-импульса включается генератор переменного напряжения Ramp, который формирует линейно нарастающий им-

пульс напряжения, заряжающий емкость накопления в каждой элементарной ячейке БИС считывания. В момент прихода стоп-импульса (отраженный импульс от объекта) заряд емкости прекращается, и напряжение на выходе  $i$ -го элемента ( $U_i$ ) в момент прихода стоп-импульса запоминается на выходе ячейки и трактуется как градация цвета (яркости) при построении изображения по дальности. Дальность  $L_i$  до цели будет равна произведению скорости света  $c$  на время активации дальномерного режима  $T_{Gate}$ , на отношение  $\left(\frac{U_i}{U_{max}}\right)$  выходного напряжения  $U_i$   $i$ -го элемента к максимально возможному напряжению  $U_{max}$  на элементе матрицы, поделенного на  $2n$ , где  $n$  – показатель преломления среды распространения излучения

$$L_i = \frac{cT_{Gate}}{2n} \times \frac{U_i}{U_{max}}.$$

Блок-схема, примененная в разработанном ФПУ формата 320×256 элементов, поясняющая аналоговый метод определения дальности до объекта, представлена на рис. 16.

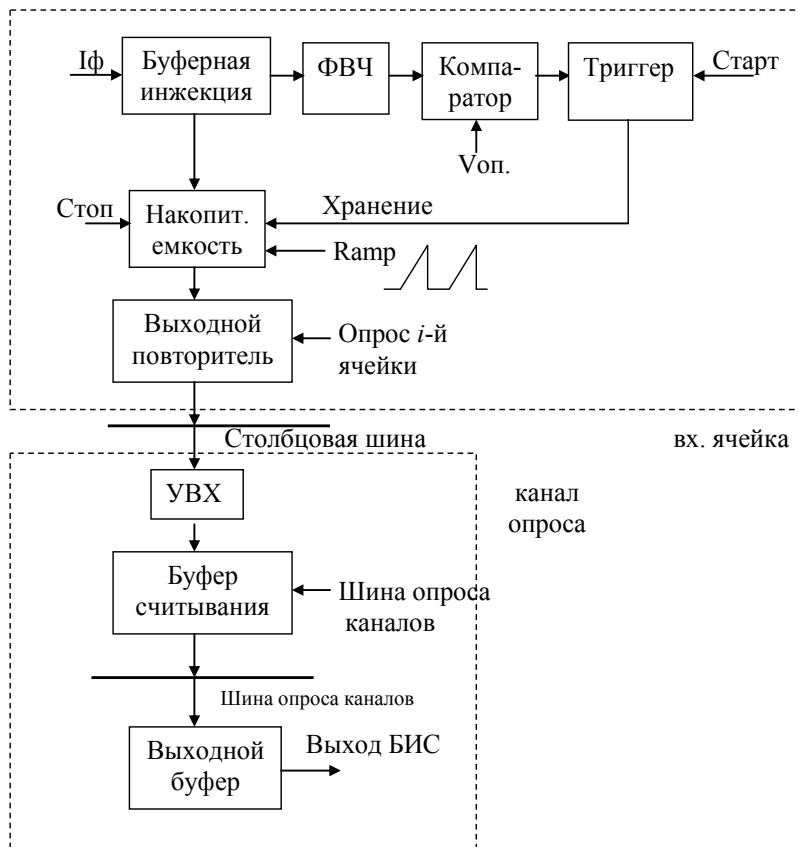


Рис. 16. Структурная схема входной ячейки БИС считывания (аналоговый метод).

Схема работает во время наличия стробирующего импульса Gate заданной длительности. Режим дальномера активируется подачей импульса Start на вход RS-триггера. Одновременно проводится запуск импульсного лазера и генератора Ramp, который формирует линейно нарастающее напряжение, заряжающее емкость интегрирования  $C_{int}$ . После облучения объектов сцены импульсным лазерным излучением, через время задержки на  $i$ -м элементе  $\Delta t_i$ , пропорциональное дальности  $L_i$  до объекта, отраженное лазерное излучение генерирует во входных ячейках БИС импульсный фотосигнал. После высокочастотной фильтрации при условии превышения фотосигнала некоторого порогового напряжения  $V_{th}$ , выход компаратора переключается в инверсное логическое состояние. RS-триггер, предустановленный сигналом «Старт», запоминает это состояние, и заряд емкости прекращается. Текущее значение линейного напряжения Ramp запоминается на емкости накопления/хранения в виде сигнала дальности  $U_i = U_{ramp}(\Delta t_i)$ . Накопленный на емкости заряд пропорционален времени задержки  $\Delta t_i$  и соответственно, измеряемой дальности. Временное разрешение аналогового метода составляет  $\Delta t_{min} = \pm 2$  нс.

При работе на больших дальностях возможен режим работы с задержкой подачи импульса Gate, при этом время задержки  $T_{delay}$  трактуется как увеличение дальности

$$\Delta L_i = \frac{cT_{delay}}{2n}.$$

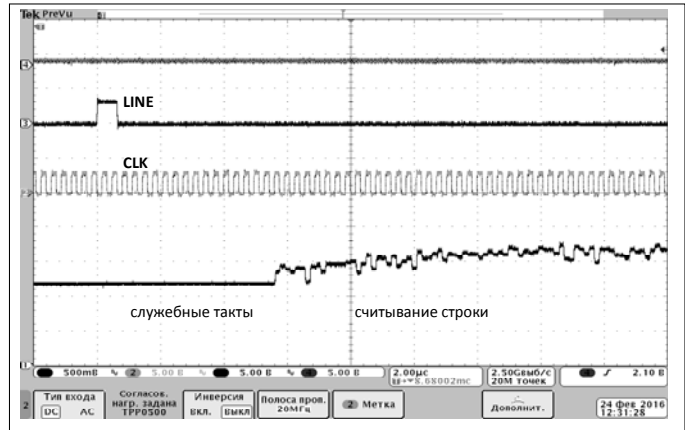
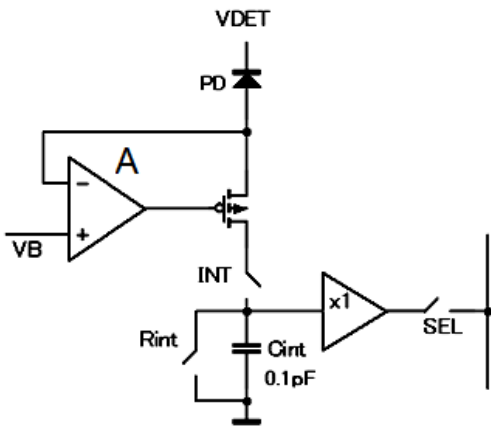
В каждой входной ячейке БИС считывания происходит усиление и запоминание напряжения, пропорционального расстоянию до объектов наблюдения. На выходе БИС считывания формируется матрица дальности, которую при наличии соответствующей электронной обработки можно откалибровать по яркости распределения фотосигнала низкочастотного канала и построить трехмерное изображение. Учитывая сложность и насыщенность электронными компонентами для реализации пассивного и активно-импульсного режимов на одной микросхеме, БИС разрабатывалась по КМОП-технологии с проектной нормой 0,18 мкм.

Разработанное ФПУ функционируют в четырех режимах реального времени: пассивном с построением двумерных изображений по яркости объектов наблюдения с кадровой частотой 50 Гц; активно-импульсном дальномерном с определением дальности до объектов наблюдения с максимальной кадровой частотой 2 кГц, разрешением по дальности 0,6 м и временным разрешением 2 нсек; активно-импульсном с заданной глубиной по дальности (АИ ПНВ); асинхронном бинарном для обнаружения сторонних импульсов лазерного излучения.

#### 4.1 Пассивный режим

Пассивный режим работы используется для визуализации объектов, излучающих или отражающих излучение в ИК-диапазоне спектра. Для его реализации применяется низкочастотный канал входной ячейки, принципиальная электрическая схема и тактовая диаграмма работы которого представлены на рис. 17, а, б. В разработанной БИС входной фотосигнал предварительно усиливается и снимается с выхода усилителя А каскада буферной инжекции.

Как представлено на схеме (рис. 17, а) фотодиод PD с подложкой  $n$ -типа подключается к источнику питания VDET и истоку  $p$ -МОП транзистора, включенному по схеме буферной инжекции (BDI) с дифференциальным усилителем А в обратной связи. При малых фототоках схема обеспечивает более высокую линейность, по сравнению с включением фотодиода по схеме с прямой инжекцией. Накопление фототока происходит на емкости накопления/хранения  $C_{int}$  при замкнутом ключе INT. При размыкании ключа INT емкость  $C_{int}$  переходит в режим хранения накопленного сигнала, который по импульсу опроса SEL считывается на столбцовую шину. ФПУ в пассивном режиме работает при подаче тактовых импульсов Line и CLK на входы БИС, при этом на выходе в одноканальном режиме с кадровой частотой 50 Гц происходит формирование напряжений фотосигнала элементов матрицы (рис. 17, б).



а) принципиальная электрическая схема

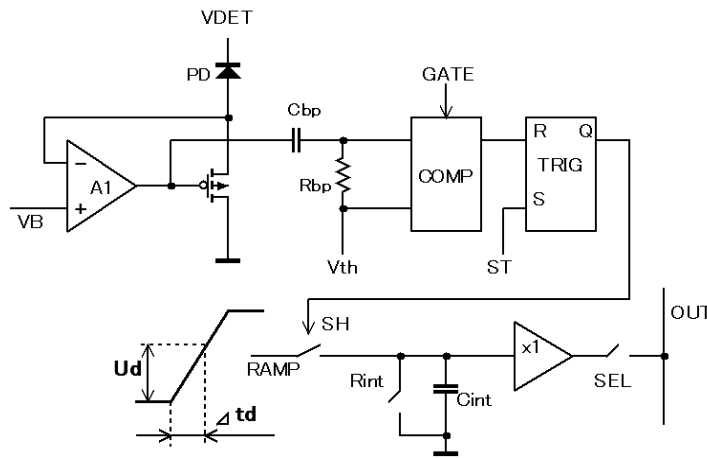
б) считывание фотосигнала в одноканальном режиме

Рис. 17. Принципиальная электрическая схема и тактовая диаграмма работы низкочастотного канала входной ячейки.

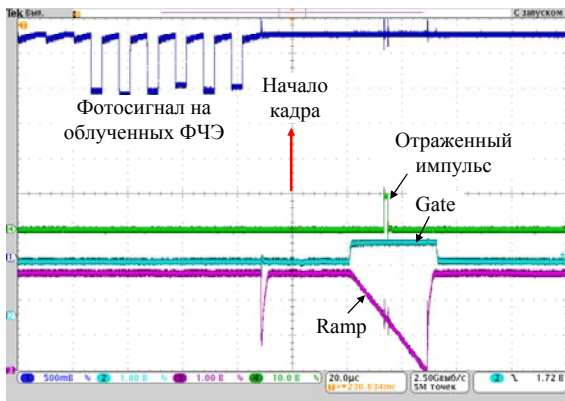
### 4.2 Дальномерный режим

В дальномерном режиме используется высокочастотный канал входной ячейки, принципиальная электрическая схема и тактовая диаграмма управления которого представ-

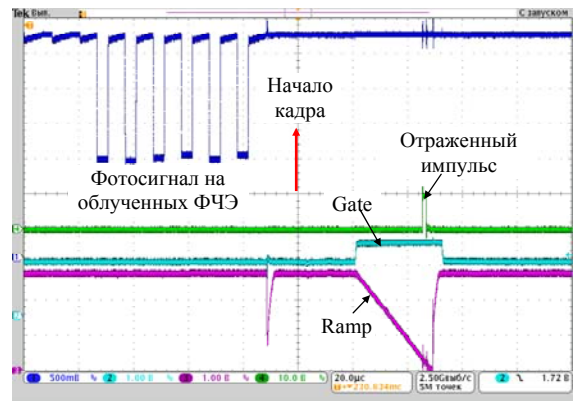
лены на рис. 18, а–в. На рис. 18, б, в показаны тактовые импульсы Gate и Ramp; импульс, отраженный от цели, в результате детектирования которого на облученных фотодиодах МФЧЭ формируются импульсы выходного фотосигнала, соответствующих дальности до цели.



а) принципиальная электрическая схема



б)



в)

Рис. 18. Принципиальная электрическая схема (а) высокочастотного канала входной ячейки и тактовая диаграмма считывания фотосигнала в режиме дальномера (б, в) с различным временем прихода Стоп-импульса.

Как представлено на рис. 18, *a* в момент приема матрицей фотодиодов отраженного от объекта лазерного излучения, на входе схемы буферной инжекции (BDI) возникает импульс фототока  $I_{ph}$  с длительностью  $t_p$  и задержанный на время  $\Delta t_d = 2L/c$ , где  $\Delta t_d$  – время задержки лазерного импульса;  $L$  – расстояние до объекта наблюдения;  $c$  – скорость света. В результате обратной связи через инвертирующий усилитель А1 на затворе входного  $p$ -МОП транзистора возникает отрицательный импульс напряжения

$$\Delta U_g = \frac{-I_{ph} \times t_p}{(C_{gs} + t_p \times g_m)}$$

где  $g_m$  – крутизна входного МОП транзистора,  $C_{gs}$  – емкость перехода между затвором и истоком входного МОП-транзистора.

После прохождения через разделительную емкость высокочастотного RC-фильтра, этот импульс попадает на неинвертирующий вход компаратора. При значении фототока больше порогового, напряжение на этом входе, опускается ниже опорного уровня  $V_{th}$  и выход компаратора, на время действия импульса фототока, переключается из высокого логического состояния в низкое. В результате, выход RS-триггера  $Q$  также переключается в инверсное состояние и находится в нем до прихода следующего импульса предустановки ST. Инверсия сигнала  $Q$  приводит к размыканию ключа SH и запоминанию на емкости накопления/хранения сигнала дальности  $U_d$ , равного значению напряжения  $V_{ramp}$  в момент времени  $t = t_1 + \Delta t_d + t_2$ , где  $t_1$  – момент начала линейного роста  $V_{ramp}$ ,  $\Delta t_d$  – время прихода отраженного лазерного импульса;  $t_2$  – время задержки срабатывания компаратора. Задержка  $t_2$  зависит от интенсивности отраженного излучения и, как правило, минимальна при больших уровнях сигнала (малой дальности) и возрастает при увеличении дальности  $L$ . Возможна калибровка значения задержки  $t_2$  для каждого элемента матрицы фотодиодов по реальной мощности излучения, падающего на каждый элемент ФПУ, при этом  $t_2$  измеряется в режиме АИ ПНВ.

Импульс Gate является синхронизирующим в дальномерном режиме, его начало и

длительность определяют диапазон измерения дальности.

### 4.3 Асинхронный бинарный режим

Асинхронный бинарный режим работы используется для определения факта облучения оптико-электронного тракта сторонними импульсами лазерного излучения. Структурная схема высокочастотного канала остается без изменений, но, в отличие от дальномерного режима, в асинхронном режиме, во-первых, ведется прием асинхронных лазерных импульсов, т. е. приходящих в произвольный момент времени и приводящих к отключению ключа SH, кроме интервала считывания; во-вторых, выходной сигнал является бинарным, поскольку напряжение Ramp имеет только два уровня – низкое и высокое. Перед началом считывания напряжение Ramp переводится в высокий уровень, и необлученные ячейки следуют за этим уровнем. Напротив, облученные ячейки остаются на низком уровне, поскольку в них SH ключ разомкнут. Таким образом, факт облучения оптико-электронного тракта сторонними лазерными излучателями фиксируется ФПУ с отображением с помощью ФЧЭ с низким уровнем фотосигнала.

В частном случае стартовый импульс (ST) может быть однократным, тогда в RS-триггерах входных ячеек информация об облучении будет храниться постоянно, до следующей предустановки ST или выключения питания. Такой режим может использоваться для запоминания траекторий движения источника лазерного излучения, данная опция отсутствует в ячейке БИС зарубежных разработчиков.

На рис. 19 представлен имитатор цели в виде расфокусированного пятна лазерного светодиода, который перемещается в области наблюдения.

По траектории перемещения можно определить дальность до цели и скорость перемещения (при более высокой скорости расстояние между точками изображения цели больше, чем при меньшей). Таким образом, возможно определение координат и скорости лазерной системы навигации потенциального противника.



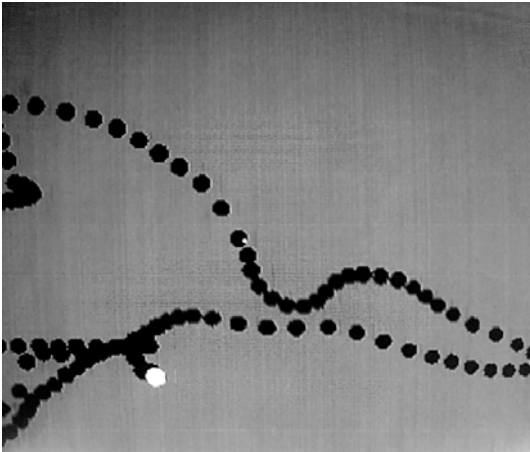


Рис. 19. Тестовая траектория движения имитатора цели.

#### 4.4 Активно-импульсный режим, имитирующий работу прибора ночного видения (АИ ПНВ)

Режим АИ ПНВ используется в активно-импульсных приборах ночного видения и отличается от обычного режима наблюдением только подсвеченных объектов, с глубиной просмотра, определяемой импульсом (стробом) Gate. Следует отметить, что при наблюдении малоподвижных объектов с пошагово-изменяемым по времени импульсом Gate (режим «sliding gate») возникает альтернативный вариант реконструкции 3D-изображения из последовательности кадров с двухмерной обработкой.

Способ перехода в асинхронный режим состоит в стробировании компаратора. Временные диаграммы БИС считывания в этом режиме такие же, как в дальномерном режиме, но с заземленным входом Ramp. При подаче импульса предустановки старт все емкости накопления/хранения ячеек замыкаются на землю через ключ SH. В момент приема отраженного лазерного импульса в облученных ячейках возникает импульс фототока. Если этот момент попадает в интервал импульса Gate, то происходит размыкание ключа SH и емкость накопления/хранения  $C_{int}$  заряжается через  $p$ -МОП транзистор, включенный по

схеме ВДИ с дифференциальным усилителем А, импульсом фототока до напряжения

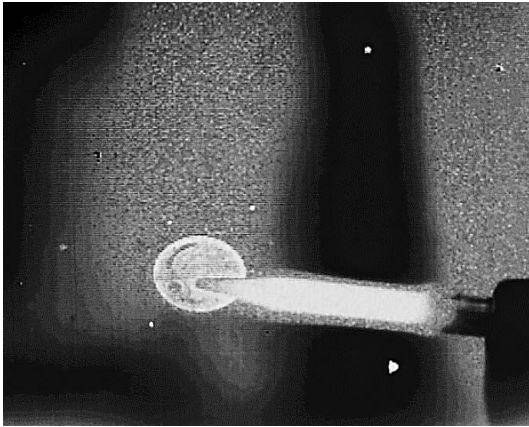
$$U_{int} = \frac{\int_0^{T_{Gate}} I_{ph} dt}{C_{int}}.$$

В необлученных ячейках емкости накопления/хранения остаются замкнутыми ключом SH на землю, и в них нет накопления темного тока.

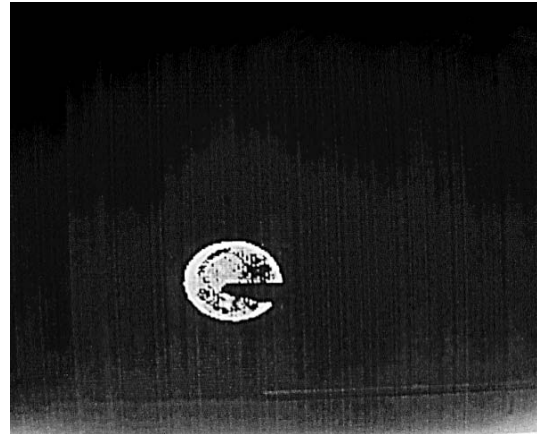
Таким образом, представленная входная ячейка БИС реализует ряд преимуществ, что, в конечном счете, позволяет выделить полезный сигнал на уровне шумов и значительно повысить чувствительность высокочастотного дальномерного канала. Благодаря объединению в единой ячейке различных функций, разработанная БИС считывания обладает следующими преимуществами: поддержка пассивных и активных режимов работы; динамическое изменение размеров считываемой области; прямое и реверсивное считывание; переключение усиления в ячейке; изменение времени накопления; переключение количества выходов; последовательный интерфейс управления; измерение дальности до объектов наблюдения; регистрация сторонних лазерных излучателей. Источник лазерного излучения входит в состав отдельного канала, при этом время включения импульсного лазерного излучателя и приема ответного импульса синхронизируется.

На рис. 20, а, б приведены ИК-изображения в пассивном (а) и дальномерном (б) режимах (лазерный излучатель с длиной волны  $\lambda = 1,54$  мкм и шириной импульса излучения  $t_p = 50$  нс).

На рис. 20, а представлено пассивное изображение тест-объекта (разогретый паяльник) на фоне расфокусированного пятна лазерного излучателя; на рис. 20, б изображение в режиме дальномера с фиксированной глубиной по дальности. За счет временной фильтрации в дальномерном режиме игнорируются фрагменты обычного изображения и пиксели с дефектными ФЧЭ.



а) пассивное изображение (2D) – паяльник на фоне расфокусированного пятна лазерного излучателя



б) изображение в режиме дальномера (3D) – лазерный излучатель, паяльник не виден из-за временной фильтрации

Рис. 20. Примеры изображений в различных режимах.

Полученный экспериментально в одно-пиксельном режиме минимально детектируемый пороговый поток составляет  $P_{\text{пор}} = 1$  нВт/элемент при длительности импульса 50 нс при этом минимальное напряжение на элементе матрицы фотодиодов примерно в шесть раз превышает шум, как показано на рис. 21, что позволяет оценить пороговый поток в фотонах на элемент, который будет равен  $\sim 300$  фот./эл.

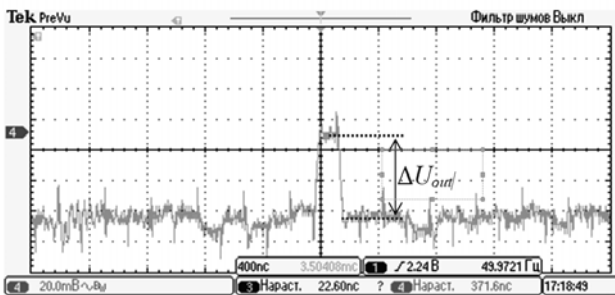


Рис. 21. Измерение амплитуды выходного сигнала ФПУ от лазерного импульса в активно-импульсном режиме с облучением одного элемента мощностью  $P_{\text{пор}} = 1$  нВт/элемент при длительности импульса 50 нс.

Таким образом, ФПУ нового типа функционируют в четырех режимах реального времени: пассивном с построением двумерных изображений по яркости объектов наблюдения с кадровой частотой 50 Гц; активно-импульсным дальномерным с определением дальности до объектов наблюдения с максимальной кадровой частотой 2 кГц, раз-

решением по дальности 0,6 м и временным разрешением 2 нсек; активно-импульсным с заданной глубиной по дальности (АИ ПНВ); асинхронном бинарном для обнаружения сторонних импульсов лазерного излучения. Исследован макет матричного инфракрасного дальномера на основе ФПУ формата  $320 \times 256$  элементов с шагом 30 мкм, который обеспечивает пороговый поток  $\sim 300$  фот./эл.

## 5. Заключение

В работе представлены разработки в области создания высокочувствительных ФПУ формата  $320 \times 256$  элементов с шагом 30 мкм и формата  $640 \times 512$  с шагом 15 мкм коротковолнового ИК-диапазона спектра. Инновационной разработкой является топология матрицы фоточувствительных элементов на основе барьерной ГЭС InGaAs, которая направлена на дополнительное снижение темновых токов по сравнению с  $p-i-n$ -структурой. Важным преимуществом ФПУ на основе InGaAs является то, что они не требуют криогенного охлаждения и работают при температуре охлаждения ТЭО или при НКУ без ТЭО, что существенно удешевляет их стоимость. Представлены миниатюрные SWIR-камеры на основе ФПУ формата  $320 \times 256$  элементов с шагом 30 мкм и формата  $640 \times 512$  с шагом 15 мкм спектрального диапазона 0,9–1,7 мкм с цифровым видеосигналом, интерфейсами: USB, Camera-Linc и Ithernet. Рассмотрены возмож-

ности расширения спектрального диапазона в коротковолновую до 0,5 мкм и в длинноволновую до 2,2 мкм области спектра ФПУ на основе гетероструктур InGaAs.

Показаны новые возможности использования матричных ФПУ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм коротковолнового ИК-диапазона спектра (0,9–1,7 мкм), существенно превышающие обычное пассивное наблюдение объектов. Для конструирования инфракрасного матричного дальномера разработаны высокочувствительная матрица и многофункциональная кремниевая схема обработки фотосигнала. Макет матричного инфракрасного дальномера работает с максимальной кадровой частотой 2 кГц и временным разрешением 2 нсек, что обеспечивает разрешение по дальности до 0,6 м.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И., Залетаев Н. Б. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.
2. Joshi Abhay M., Heine Frank, Feifel Thomas. Rad-hard, Ultra-fast, InGaAs Photodiodes for Space Applications // Spaceborne Sensors III, edited by Richard T. Howard, Robert D. Richards, Proc. of SPIE Vol. 6220, 622003, (2006), doi: 10.1117/12.666055, pp. 622003-1-622003-14.
3. Rogalski A. // Rep. Prog. Phys. 2005. Vol. 68. P. 2267.
4. Lei Wen, Antoszewski Jarek, Faraone Lorenzo // Applied Physics Reviews. 2015. Vol. 2. P. 041303.
5. Piotrowski J., Rogalski A. High-Operating-Temperature Infrared Photodetectors. – Bellingham: SPIE Press, 2007.
6. Болтарь К. О., Чинарева И. В., Лопухин А. А., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 10.
7. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Современное состояние и магистральные направления развития современной фотоэлектроники. – М.: Физматкнига, 2010.
8. Figgemeier H., Benecke M., Hofmann K., Oelmaier R., Sieck A., Wendler J., Ziegler J. // Proc. of SPIE. 2014. Vol. 9070. P. 907008.
9. Friman R. Volokono-opticheskie sistemy svyazi. – М.: Tekhnosfera, 2003.
10. Leinert Ch., et al. // Astronomy and Astrophysics Supplement Series. 1997.
11. 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.
12. Rutz F., Kleinow P., Aidam R., Heussen H., Bronner W., Sieck A., Walther M. // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9481. P. 948107.
13. Anderson R. // Solid-State Electronics. 1962. Vol. 5. P. 341.
14. Седнев М. В., Болтарь К. О., Шаронов Ю. П., Лопухин А. А. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 51.
15. Болтарь К. О., Иродов Н. А., Седнев М. В., Мармалюк А. А., Ладугин М. А., Рябоштан Ю. Л. // Прикладная физика. 2017. № 6. С. 49.
16. Попов В. С., Егоров А. В., Пономаренко В. П. // Прикладная физика. 2020. № 5. С. 50.
17. Gohler B., Lutzman P. // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9649. P. 96490I.
18. Бурлаков И. Д., Кузнецов П. А., Моцев И. С., Болтарь К. О., Яковлева Н. И. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 383.
19. Бокианский В. Б., Бондаренко Д. А., Вязовых М. В., Животовский И. В., Сахаров А. А., Семенов В. П. Лазерные приборы и методы измерения дальности: учеб. пособие / под ред. В. Е. Карасика. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012.
20. Кузнецов П. А., Моцев И. С. / Труды 24-й научной конференции и школы по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, 2016). С. 213–215.

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

### SWIR Photosensory

K. O. Boltar<sup>1,2</sup>, I. D. Burlakov<sup>1,3</sup>, N. I. Iakovleva<sup>1</sup>, A. V. Polessky<sup>1,3</sup>, P. A. Kuznetsov<sup>1</sup>,  
P. S. Lazarev<sup>1,2</sup>, V. S. Rudnevsky<sup>1</sup>, and M. V. Sednev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Orion R&P Association, JSC  
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

<sup>3</sup> MIREA – Russian Technological University  
78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia

Received November 11, 2021

***In this paper, we report on the design, the fabrication, and performance of SWIR photo-modules using sensitive two-dimensional arrays based on InGaAs-heterostructures. The design of suggested InGaAs-heterostructure includes InAlAs wideband barrier layer and high sensitive absorber InGaAs layer which are increasing the uniformity and operability of focal plane array (FPA), so the number of defect elements are less than 0.5 %. The possibilities of spectral range expanding into short-wavelength to 0.5  $\mu\text{m}$  and into long-wavelength to 2.2  $\mu\text{m}$  regions have been considered.***

***The operation principals of active-pulse system for 0.9–1.7  $\mu\text{m}$  spectral range based on InGaAs 320 $\times$ 256 FPA with 30  $\mu\text{m}$  pitch have been presented. The investigations showed that the infrared gated-viewing system based on the InGaAs 320 $\times$ 256 FPA provided a spatial resolution of 0,6 m.***

***Keywords:*** InGaAs, Short Wavelength Infrared Spectrum Range, Heteroepitaxial Structures, Focal Plane Array (FPA), IR-Camera, Laboratory demonstrator based on InGaAs FPA for gated viewing.

**DOI:** 10.51368/2307-4469-2021-9-6-479-498

#### REFERENCES

1. I. D. Burlakov, L. Y. Grinchenko, A. I. Dirochka, N. B. Zaletaev, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (2), 131 (2014).
2. Abhay M. Joshi, Frank Heine, and Thomas Feifel, *Proc. of SPIE* **6220**, 622003 (2006), doi: 10.1117/12.666055
3. A. Rogalski, *Rep. Prog. Phys.* **68**, 2267 (2005).
4. Wen Lei, Jarek Antoszewski, and Lorenzo Faraone, *Applied Physics Reviews.* **2**, 041303 (2015).
5. J. Piotrowski and A. Rogalski, *High-Operating-Temperature Infrared Photodetectors*. (SPIE Press, Bellingham, 2007).
6. K. O. Boltar, I. V. Chinareva, A. A. Lopuhin, and N. I. Iakovleva, *Applied Physics*, No. 5, 10 (2013) [in Russian].
7. A. M. Filachov, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *A review on advances in the solid-state photoelectronics*. (Fizmatkniga, Moscow, 2010).
8. H. Figgemeier, M. Benecke, K. Hofmann, R. Oelmaier, A. Sieck, J. Wendler, and J. Ziegler, *Proc. of SPIE* **9070**, 907008 (2014).
9. R. Friman, *Fiber-optical communication systems*. (Tekhnosfera Publ., Moscow, 2003).
10. Ch. Leinert, et al., *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* (1997).
11. 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).
12. F. Rutz, P. Kleinow, R. Aidam, H. Heussen, W. Bronner, A. Sieck, and M. Walther, *Proc. of SPIE* **9481**, 948107 (2015).
13. R. Anderson, *Solid-State Electronics* **5**, 341 (1962).
14. M. V. Sednev, K. O. Boltar, Y. P. Sharonov, and A. A. Lopukhin, *Applied Physics*, No. 4, 51 (2014) [in Russian].
15. K. O. Boltar, N. A. Irodov, M. V. Sednev, A. A. Marmalyuk, M. A. Ladugin, and Yu. L. Ryaboshtan, *Applied Physics*, No. 6, 49 (2017) [in Russian].
16. V. S. Popov, A. V. Egorov, and V. P. Ponomarenko, *Applied Physics*, No. 5, 50 (2020) [in Russian].
17. B. Gohler and P. Lutzman, *Proceedings of SPIE* **9649**, 96490I (2015).
18. I. D. Burlakov, P. A. Kuznetsov, I. S. Moschev, K. O. Boltar, and N. I. Yakovleva, *Usp. Prikl. Fiz.* **5** (4), 383 (2017).
19. V. B. Bokshansky, D. A. Bondarenko, M. V. Vyazov, I. V. Zhivotovsky, A. A. Sakharov, and V. P. Semenov, *Laser devices and distance measurement methods: Study guide*, edited by V. E. Karasik. (Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 2012).
20. P. A. Kuznetsov and I. S. Moschev, in *Proc. of the 24th Scientific Conference and School on Photoelectronics and Night Vision Devices* (Moscow, 2016), pp. 213–215.