

Матричный фотоприемный модуль на основе гетероструктуры InGaAs/InP для формирователей 3D-изображений в коротковолновом ИК-диапазоне

И. Д. Бурлаков, П. А. Кузнецов, И. С. Моцев, К. О. Болтарь, Н. И. Яковлева

Представлен первый отечественный матричный фотоприемный модуль (ФПМ) коротковолнового ИК-диапазона для активно-импульсных формирователей изображения. В состав ФПМ входит матрица p-i-n-фотодиодов на основе гетероструктуры InGaAs/InP формата 320×256 с шагом 30 мкм, большая интегральная схема (БИС) считывания фотосигналов, термоэлектрический охладитель и герметичный корпус с сапфировым окном. Основной особенностью ФПМ является возможность функционирования в четырех режимах: пассивный, активно-импульсный 3D, активно-импульсный 2D, асинхронный бинарный. Гибкое сочетание указанных режимов позволяет получить максимум информации о наблюдаемых объектах. Информация о дальности, формируемая в каждом пикселе ФПМ, в совокупности с яркостными сигналами, позволяет осуществить синтез 3D-изображений объектов. В работе приведены основные параметры ФПМ и примеры ИК-изображений, полученных в различных режимах функционирования. Приводятся дальнометрические расчеты в зависимости от мощности и угла расходимости лазерного излучения. Рассматриваются основные источники погрешности при вычислении разрешения по дальности.

Ключевые слова: БИС считывания, фотоприемный модуль, активно-импульсный режим.

Введение

Возможность круглосуточного обнаружения, распознавания и идентификация объектов на больших дальностях является важной практической задачей, для решения которой в настоящее время широко используются тепловизионные системы. Однако они не обеспечивают получение информации о дальности расположения объектов и целей. Решением задачи стробирования объек-

тов по дальности является использование систем с активно-импульсными преобразователями изображений в коротковолновом диапазоне инфракрасного спектра [1–3]. При этом для подсветки исследуемой области применяют импульсное излучение лазера с длиной волны 1,54 мкм, соответствующее безопасной для глаз области спектра и окну прозрачности атмосферы. В настоящее время зарубежными фирмами DRS, Goodrich, Sofradir, Xenics и др. ведутся интенсивные исследования и разработки фотоприемных устройств (ФПУ) на основе полупроводниковых гетероструктур A_3B_5 и A_2B_6 коротковолнового ИК-диапазона спектра для перспективных оптико-электронных систем активного формирования трехмерных ИК-изображений. Разработанные на их основе системы моноимпульсного типа позволяют получать инфракрасное 3D-изображение (координаты точек изображения и дальность) высокого разрешения на больших дальностях в неблагоприятных внешних условиях. Результаты этих разработок представляют значительный интерес при создании перспективных образцов как военной и специальной техники, так и техники гражданского применения.

Основу современных фотоприемных устройств для активно-импульсных преобразователей изображений составляют матрица p-i-n- или лавинных

Бурлаков Игорь Дмитриевич^{1,2}, зам. генерального директора по инновациям и науке, зав. кафедрой, профессор, д.т.н.

Кузнецов Петр Александрович¹, главный специалист.

Моцев Иван Сергеевич¹, начальник дизайн-центра.

Болтарь Константин Олегович^{1,3}, начальник НТК, профессор, д.ф.-м.н.

Яковлева Наталья Ивановна¹, главный научный сотрудник, к.т.н.

АО «НПО «Орион».

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

E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский технологический университет (МИРЭА).

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

³ Московский физико-технический институт.

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

Статья поступила в редакцию 1 августа 2017 г.

© Бурлаков И. Д., Кузнецов П. А., Моцев И. С., Болтарь К. О., Яковлева Н. И., 2017

фотодиодов, а также многофункциональная БИС считывания фотосигнала. Основной особенностью БИС считывания является введение во все входные ячейки функции измерения дальности до произвольной точки исследуемого объекта, но при этом сохраняется и функция формирования обычного 2D-изображения по сигналам яркости.

В настоящее время наибольшее распространение в качестве материала для матричных ФПУ коротковолнового ИК-диапазона получило тройное соединение $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ [4–8]. Состав с $x = 0,53$ обеспечивает достаточную чувствительность в спектральном диапазоне 0,9–1,7 мкм и не требует дополнительного охлаждения, а также обеспечивает согласование параметров кристаллической решетки при выращивании на подложке InP.

Целью данной работы является представление результатов разработки первого отечественного фотоприемного модуля (ФПМ) формата 320×256 элементов на основе матрицы $p-i-n$ -фотодиодов из гетероструктуры $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$ для активно-импульсных преобразователей изображений коротковолнового ИК-диапазона.

Состав фотоприемного модуля

Разработанный ФПМ состоит из следующих основных элементов: матрица фотодиодов на основе гетероструктуры InGaAs/InP формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм, состыкованная через индиевые столбики с большой интегральной схемой (БИС) считывания фотосигналов; термоэлектрический охладитель (ТЭО); герметичный корпус. Внешний вид ФПМ представлен на рис. 1.

Матрица фоточувствительных элементов выполнена на основе двойной гетероструктуры $\text{InGaAs}-\text{InGaAlAs}-\text{InAlAs}$ [2], состоящей из оптически прозрачной подложки InP n -типа проводимости, на которой выращен буферный слой InP n -типа проводимости с концентрацией электронов $n = 5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ для получения омического n -контакта. На буферном слое располагается поглощающий слой InGaAs толщиной $\sim 2,0$ мкм n -типа проводимости с концентрацией $n = 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Далее формируется тонкий (~ 50 нм) слой InGaAlAs n -типа с градиентным изменением энергии запрещенной зоны для согласования кристаллических решеток поглощающего слоя $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ и широкозонного нелегированного слоя InAlAs ,

расположенного в области $p-n$ -перехода. Следом за ним формируется верхний высоколегированный слой InGaAs p -типа с концентрацией дырок $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, к которому изготавливается омический p -контакт. Таким образом, каждый фоточувствительный элемент (ФЧЭ) матрицы представляет собой двойную гетероструктуру $N-i-B-P$ -типа. Предложенная гетероструктура позволяет уменьшить темновые токи почти на два порядка, что позволило, в конечном итоге, проводить исследования при комнатной температуре фоточувствительной матрицы и без использования ТЭО.

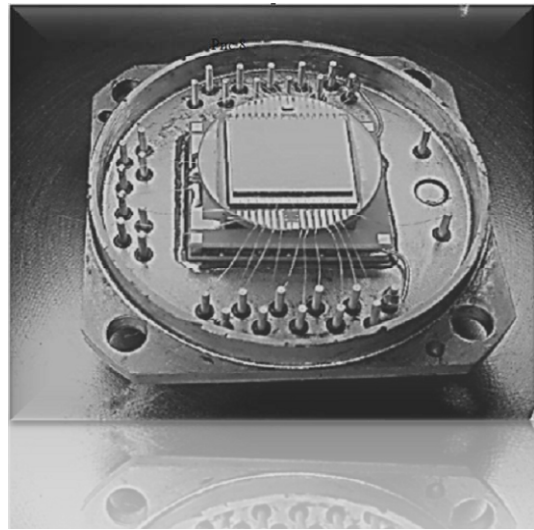


Рис. 1. Внешний вид фотоприемного модуля в корпусированном варианте с ТЭО без крышки с входным окном.

Многофункциональная БИС считывания

Разработанная многофункциональная БИС считывания имеет оригинальную входную ячейку, структурная схема которой приведена на рис. 2, а. В качестве ближайшего аналога разработанной БИС считывания рассматривалась интегральная схема считывания компании SEA-LETI (Франция) формата 320×256 [17] для матрицы лавинных КРТ-фотодиодов. Структурная схема входной ячейки данного аналога приведена на рис. 2, б.

Входная ячейка разработанной БИС считывания имеет ряд принципиальных отличий от аналога, что позволило реализовать четыре режима функционирования, а именно: пассивный, активно-импульсный 3D, активно-импульсный 2D и асинхронный бинарный, в то время как в аналоге реализованы только первые два режима.

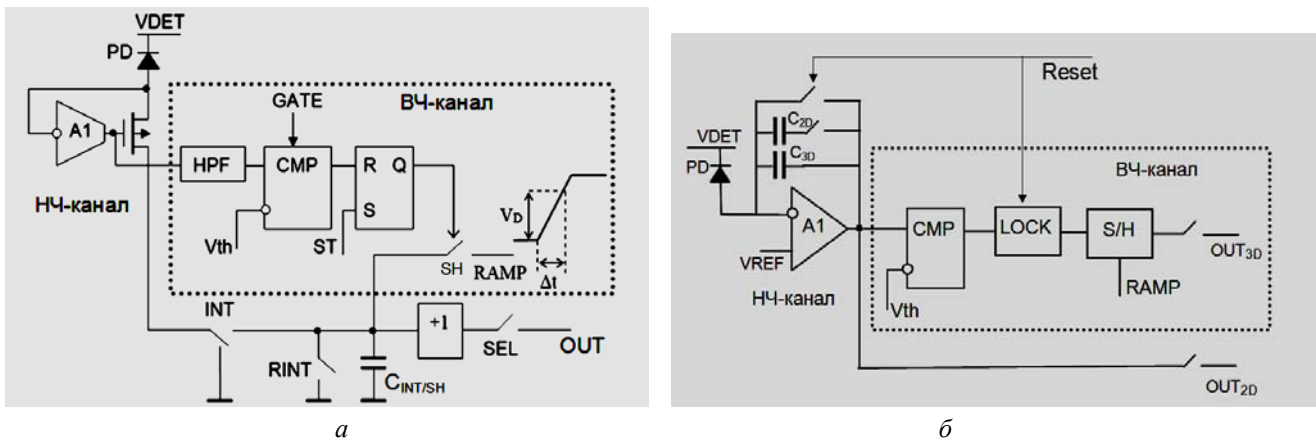


Рис. 2. Структурные схемы входной ячейки: а) схема разработанной БИС считывания; б) схема ближайшего зарубежного аналога.

Рассмотрим более подробно основные режимы функционирования разработанной БИС считывания и ФПМ на ее основе.

1. Пассивный режим

Этот режим используется для 2D-визуализации объектов, излучающих или отражающих излучение в коротковолновом ИК-диапазоне 0,9—1,7 мкм. В этом режиме импульсом накопления

INT активируется низкочастотный (НЧ) канал входной ячейки, а высокочастотный (ВЧ) канал деактивируется стробирующим импульсом GATE. Пример полученного ИК-изображения в пассивном режиме ФПМ приведен на рис. 3, а в сравнении с изображением с камеры видимого диапазона на рис. 3, б. В коротковолновом ИК-диапазоне наблюдается гораздо более высокий контраст изображения и увеличенная дальность распознавания объектов.



а



б

Рис. 3. Изображения в пассивном режиме: а) в коротковолновом ИК-спектре; б) в видимом спектре.

2. Активно-импульсный 3D-режим

В этом режиме (дальномерном) импульсом GATE активируется ВЧ-канал входной ячейки, а импульсом INT прерывается процесс накопления фототока в НЧ-канале, работающем в пассивном режиме. В момент приема фоточувствительными элементами лазерного излучения, отраженного от наблюдаемых объектов, на входе схемы буферной инжекции возникает импульс фототока i_p с длительностью t_p , задержанный на время распространения излучения $\Delta t_d = 2D/c$, где D – дальность

наблюдаемого объекта, c – скорость света. В результате действия местной обратной связи через инвертирующий усилитель буферной инжекции A1 на затворе входного p -МОП-транзистора возникает отрицательный импульс напряжения

$$\Delta U_g = -i_p t_p / (C_{gd} + t_p g_m), \quad (1)$$

где g_m – крутизна входного МОП-транзистора, C_{gd} – емкость перехода между затвором и истоком этого транзистора. После прохождения через высокочастотный RC-фильтр (HPF), этот импульс попадает на неинвертирующий вход компаратора

СМР. 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 $C_{INT/SH}$ сигнала дальности V_d , равного значению линейно-нарастающего напряжения V_{RAMP} в момент времени $t_2 = t_1 + \Delta t_d = t_1 + 2D/c$, где t_1 – момент начала линейного роста V_{RAMP} . Импульс GATE является синхронизирующим в дальномерном режиме, его начало и ширина определяют диапазон измерения дальности. Низкий

уровень импульса GATE деактивирует работу высокочастотного канала, что значительно снижает интенсивность ложных срабатываний триггера в ждущем режиме и при считывании сигнала дальности на выход БИС.

На рис. 4 приведены примеры ИК-изображений для сравнения дальномерного режима (с лазерным излучателем на $\lambda = 1,54$ мкм и $t_p = 50$ нс) с пассивным режимом. Изменения дальности имитировались временем задержки ($\Delta t = 100$ – 300 нс) момента излучения лазерного импульса относительно начала роста сигнала RAMP. При этом за счет высокочастотной фильтрации и стробирования в дальномерных кадрах игнорировались фрагменты пассивного изображения в виде горячей нити и пиксели с дефектными фоточувствительными элементами.

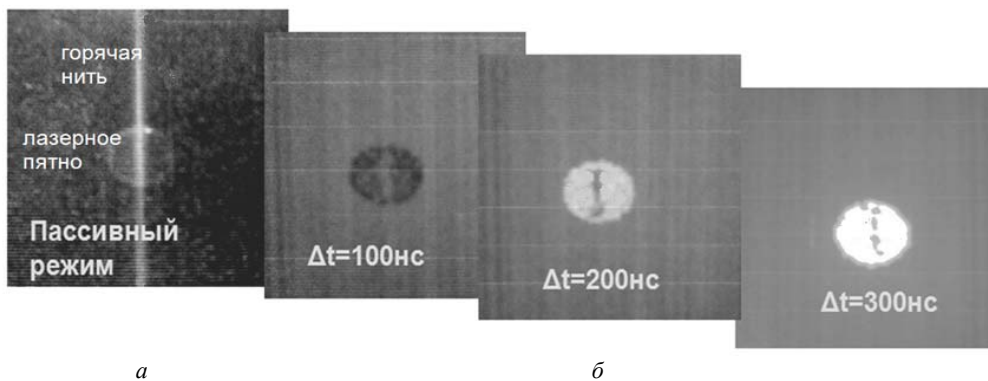


Рис. 4. Изображения пятна импульсного лазерного излучения: а) в пассивном режиме; б) в активно-импульсном 3D-режиме с различными временными задержками, имитирующими изменение дальности.

3. Асинхронный бинарный режим

Этот режим используется для определения факта облучения «чужими» импульсами лазерного излучения. Структурная схема ВЧ-канала остается без изменений, но, в отличие от дальномерного режима, в этом режиме, во-первых, ведется прием асинхронных лазерных импульсов, т. е. приходящих в произвольный момент времени, кроме интервала считывания; во-вторых, выходной сигнал является бинарным, поскольку напряжение RAMP имеет только два фиксированных уровня – низкий и высокий. При подаче импульса предустановки ST все емкости накопления замыкаются на низкий уровень напряжения RAMP ключом SH. В облученных ячейках, где возник импульсный фототок выше порогового, происходит размыкание ключа SH. Перед началом считывания напряжение RAMP переводится на 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 лазерными импульсами фиксируется пикселями с низким уровнем

напряжения. В частном случае импульс ST может быть однократным, тогда в RS-триггерах входных ячеек информация об облучении будет храниться постоянно, т. е. до следующей предустановки ST или выключения питания. Такой режим может использоваться для запоминания траекторий движения источника лазерного излучения, что продемонстрировано на рис. 5.

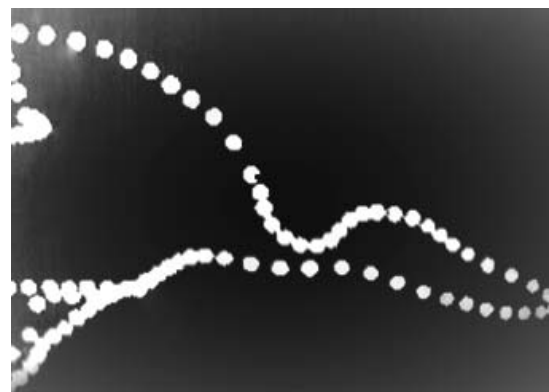


Рис. 5. Запоминание траектории движения источника импульсного лазерного излучения в асинхронном бинарном режиме.

4. Активно-импульсный 2D-режим

Этот режим предназначен для активно-импульсных приборов ночного видения. Отличается от пассивного режима наблюдением только подсвеченных объектов, т. е. с глубиной просмотра, определяемой стробирующими импульсами GATE или INT. Следует отметить, что при наблюдении малоподвижных объектов с пошагово изменяемой задержкой стробирующего импульса (режим «sliding gate») возникает альтернативный вариант реконструкции 3D-изображения из последовательности кадров с 2D активно-импульсным изображением [11, 15, 16].

Первым способом перехода ФПМ в активно-импульсный 2D-режим (традиционным для приборов ночного видения на электронно-оптических преобразователях) является использование только импульса INT для стробирования по дальности. Для этого достаточно перевести БИС в пассивный режим накопления (импульс GATE='0' в неактивном состоянии), т. е. использовать только НЧ-канал ячейки. Несмотря на простоту, у этого способа имеются два недостатка. Основным недостатком состоит в том, что при малой длительности импульса INT (1 мкс и ниже) заряд, генерированный фототоком ФЧЭ, не успевает полностью перетечь через открытый ключ INT в емкость накопления, что приводит к потере части заряда и снижает чувствительность ячейки. Вторым недостатком проявляется при слишком больших длительностях импульса INT и состоит в том, что в необлученных ячейках происходит накопление неинформативного темнового тока, а также тока утечек дефектных ФЧЭ.

Второй, а именно, основной способ перехода в активно-импульсный 2D-режим состоит в стро-

бировании входной ячейки одновременно импульсами INT и GATE при постоянном уровне напряжения RAMP. Замкнутый ключ INT обеспечивает прохождение яркостных отраженных сигналов в накопительную емкость, а импульс GATE отвечает за глубину просмотра этих сигналов и в общем случае короче импульса INT. При подаче импульса предустановки ST все емкости накопления ячеек замыкаются на уровень RAMP 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 C_{int} заряжается импульсом фототока до напряжения фотосигнала

$$U_{int} = i_p t_p / C_{int}. \quad (2)$$

В необлученных ячейках емкости накопления/хранения остаются замкнутыми ключом SH на уровень напряжения RAMP, т. е. не накапливают темновые токи и токи утечек дефектных ФЧЭ, что является принципиальным отличием от первого способа.

На рис. 6 приведены изображения пятна от лазерного излучателя (ЛИ) и горячей нити для пассивного режима (рис. 6, а) и для режима активно-импульсного 2D (рис. 6, б) при длительности лазерного импульса, равной 50 нс. Очевидным отличием активно-импульсного 2D-режима является отсутствие дефектных пикселей (белых точек) на изображении и наличие изображения только лазерного пятна, что объясняется свойством ВЧ-канала пропускать, во-первых, только импульсные сигналы, во-вторых, импульсные сигналы с задержкой, находящейся в пределах стробирующего импульса GATE.

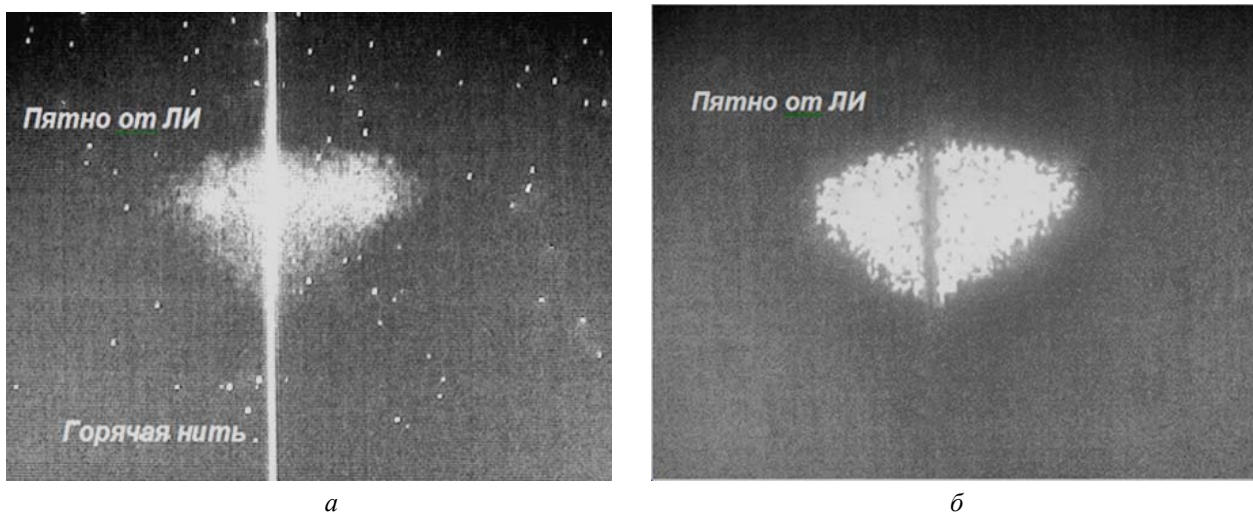


Рис. 6. Изображения отраженного пятна импульсного лазерного излучения: а) в пассивном режиме; б) в активно-импульсном 2D-режиме.

Пороговый поток ФПМ в активно-импульсном 3D-режиме

Величина порогового потока ФПМ необходима для расчета максимальной измеряемой дальности. Под пороговым потоком в активно-импульсном 3D-режиме понимается минимальная интенсивность импульса лазерного излучения (в ваттах или фотонах на элемент фоточувствительной матрицы), при которой происходит измерение дальности с заданной вероятностью. В моноимпульсном режиме измерения дальности (за один кадр) эта вероятность должна быть 100 %, в многоимпульсном режиме (по нескольким кадрам) вероятность измерения дальности по одному кадру может быть значительно снижена. Для получения максимальной дальности следует снижать порог срабатывания компараторов в ячейках БИС считывания до минимального значения при допустимом уровне ложных срабатываний компараторов [9] (например, не более 0,5 % пикселей).

Для определения порогового потока фотонов N_p в активно-импульсном 3D-режиме необходимо использовать пассивный режим в качестве вспомогательного. Пороговый поток вычисляется через минимальный заряд Q_{\min} , сфотогенерированный лазерным импульсом длительностью t_p в ячейке, при котором вероятность измерения дальности за один кадр в активно-импульсном 3D-режиме становится ниже 100 %:

$$N_p = Q_{\min} / \eta q = \Delta U_{\text{out}} C_{\text{int}} / \eta q k_p, \quad (3)$$

где ΔU_{out} – измеренное в пассивном режиме изменение напряжения на накопительных емкостях ($C_{\text{int}} = 0,05$ пФ) в облученных лазером ячейках; k_p – коэффициент передачи сигнала ячеек при считывании на выход БИС ($\approx 0,9$); η – квантовая эффективность ФЧЭ на основе InGaAs/InP ($\approx 0,8$); q – заряд электрона. Пороговая мощность излучения P_{th} рассчитывается через пороговый поток фотонов N_p из соотношения

$$P_{\text{th}} = N_p \eta q / S_\lambda t_p, \quad (4)$$

где S_λ – токовая чувствительность ФЧЭ на длине волны излучения (0,9 А/Вт при $\lambda = 1,54$ мкм).

Разрешение по дальности в активно-импульсном 3D-режиме

Разрешение по дальности σ_d определяется выражением

$$\sigma_d = c \sigma_t / 2, \quad (5)$$

где c – скорость света, σ_t – среднеквадратичное отклонение времени задержки отраженного лазерного импульса, т. е. временное разрешение. Существуют три фундаментальных фактора, влияющие на точность измерения времени задержки: шум на входе порогового устройства (компаратора) ячеек БИС считывания (см. рис. 7, а); скорость нарастания сигнала перед пороговым устройством (см. рис. 7, б); «зернистость» изображения (*speckle noise*) в плоскости ФЧЭ из-за когерентности лазерного излучения (см. рис. 7, в).

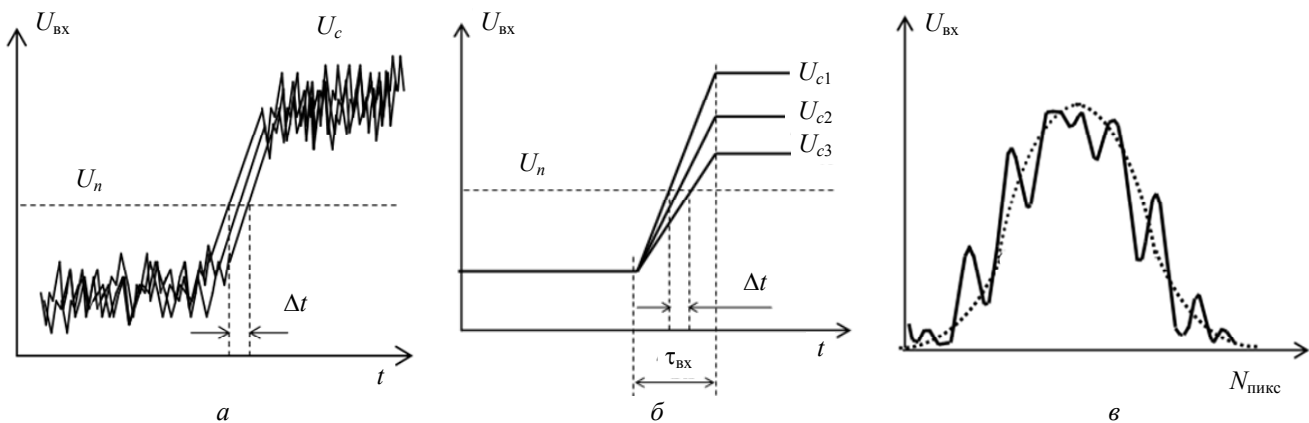


Рис. 7. Три фундаментальных фактора, влияющие на точность измерения времени задержки: а) шум на входе порогового устройства; б) скорость нарастания сигнала перед пороговым устройством; в) «зернистость» изображения в плоскости ФЧЭ из-за когерентности лазерного излучения.

Первый фактор проявляется в виде шумового «дрожания» момента нарастания импульсного сигнала U_c и, соответственно, сводится к временной неопределенности Δt момента пересечения этим сигналом уровня порогового напряжения U_n . СКО этой неопределенности представляет вре-

менное разрешение σ_t . Второй фактор проявляется в том, что при интегрировании импульса фототока с длительностью t_p момент пересечения сигналом U_c уровня порогового напряжения U_n зависит от величины этого сигнала. В результате, также получается неопределенность Δt при измерении вре-

мени задержки. Наиболее проблематичным является случай с изображением лазерного пятна малого размера (несколько пикселей). В этом случае сигнал U_c от пятна очень быстро меняется в пределах от 0 до U_{max} , что приводит к увеличению неопределенности Δt . Третий фактор еще больше усугубляет временную неопределенность, поскольку «зернистость» изображения является нестабильной, т. е. изображение «кипит».

Существенно ослабить влияние второго и третьего факторов можно увеличением порога относительно максимума сигнала на входе порогового устройства, например, за счет снижения диаметра диафрагмы. В этом случае образуется т. н. однопиксельный режим измерения дальности (см. рис. 8), поскольку остальные пиксели с сигналами меньше порогового уровня не пропускаются пороговым устройством. В результате, остается только первый шумовой фактор неопределенности при измерении времени задержки.

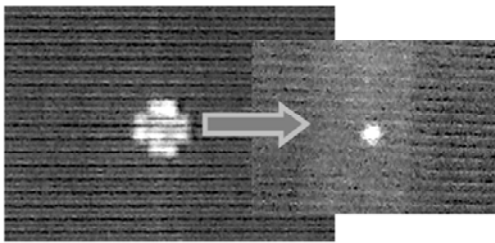


Рис. 8. Переход в однопиксельный режим измерения дальности.

Расчет временного разрешения производится из выражения

$$\sigma_v = \sigma_s(dV_{RAMP} / dt), \quad (6)$$

где σ_v — среднее квадратичное отклонение напряжения шума на выходе БИС считывания, измеренное в ячейке с зафиксированным сигналом дальности с вероятностью 100 %, dV_{RAMP} / dt — скорость изменения напряжения VRAMP, подаваемого на вход БИС считывания. При исследовании ФПМ максимальная скорость изменения VRAMP составляла 1 мВ/нс, при этом среднее квадратичное отклонение напряжения шума в режиме измерения дальности составляло 2 мВ. Из выражения (6) следует, что временное разрешение будет 2 нс, а разрешение по дальности $\sigma_d = 30$ см.

Максимальная измеряемая дальность

Расчет максимальной дальности L_{max} производится из выражения, называемым основным соотношением лазерной дальнометрии [12]:

$$L_{max} = D/2[(P_0/P_{th})\tau_1\tau_2\rho_0\zeta \exp(-2\alpha L_{max})]^{1/2}, \quad (7)$$

где D — диаметр объектива перед ФПМ; P_0/P_{th} — отношение излучаемой мощности лазерного импульса к пороговой мощности ФПМ; τ_1 и τ_2 — коэффициенты пропускания оптических систем излучателя и ФПМ соответственно; ρ_0 — коэффициент отражения объекта; α — коэффициент потерь в атмосфере; ζ — отношение площади объекта S_0 к площади лазерного пятна на расстоянии L_{max} с углом расходимости пучка γ в радианах. При площади объекта больше площади лазерного пятна имеем выражение:

$$\zeta = 1 - \exp(-0,9S_0/\gamma^2 L_{max}^2). \quad (8)$$

Когда площадь объекта много больше площади лазерного пятна, выражение (8) упрощается:

$$\zeta = 0,9S_0/\gamma^2 L_{max}^2. \quad (9)$$

Если по расчету коэффициент ζ оказывается больше 1, то его значение принимается равным 1. Из соотношения (7) можно выразить отношение мощностей через максимальную дальность L_{ma} :

$$P_0/P_{th} = 4L_m^4\gamma^2 \exp(2\alpha L_{max})/0,9S_0D^2\tau_1\tau_2\rho_0, \quad \text{при } \zeta \ll 1; \quad (10)$$

$$P_0/P_{th} = 4L_m^2 \exp(2\alpha L_{max})/D^2\tau_1\tau_2\rho_0, \quad \text{при } \zeta = 1. \quad (11)$$

На рис. 9 приведены результаты расчета максимальной дальности для мощности излучения 10^6 Вт (энергия лазерного импульса 50 мДж при длительности импульса 50 нс) и рассчитанной пороговой мощности 10^9 Вт, т. е. при $P_0/P_{th} = 10^{15}$.

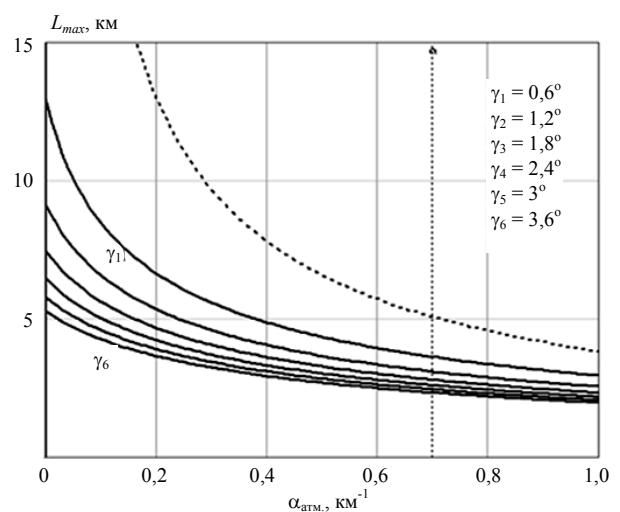


Рис. 9. Максимальная дальность L_{max} в зависимости от коэффициента пропускания атмосферы $\alpha_{атм}$ и от угла расходимости γ лазерного луча. Пунктирная линия соответствует $\gamma \sim 0^\circ$

На рис. 10 приведена зависимость максимальной дальности от отношения P_0/P_{th} при коэффициенте $\alpha = 1,1 \text{ км}^{-1}$. Расчет этого коэффициента производится для пониженного пропускания атмосферы, в зависимости от уровня осадков, по формуле из работы [12]:

$$\alpha = 0,21J^{0,74}, \quad (12)$$

где J – уровень осадков (мм/час), т. е. имеем $\alpha = 1,1 \text{ км}^{-1}$ при $J = 10 \text{ мм/час}$.

Из приведенных зависимостей следует, что увеличение максимальной дальности за счет снижения угла расходимости гораздо более эффек-

тивно, чем увеличение отношения P_0/P_{th} . Стремление угла расходимости к нулю ($\gamma \rightarrow 0$) означает, что угол расходимости становится меньше углового разрешения ФПМ:

$$\gamma < \delta\omega = d/F, \quad (13)$$

где d – шаг пикселей фоточувствительной матрицы (30 мкм), F – фокусное расстояние объектива (50 мм). В этом случае изображение лазерного пятна укладывается полностью в одну фоточувствительную площадку, как в обычном дальнометре, и достигается максимальная измеряемая дальность.

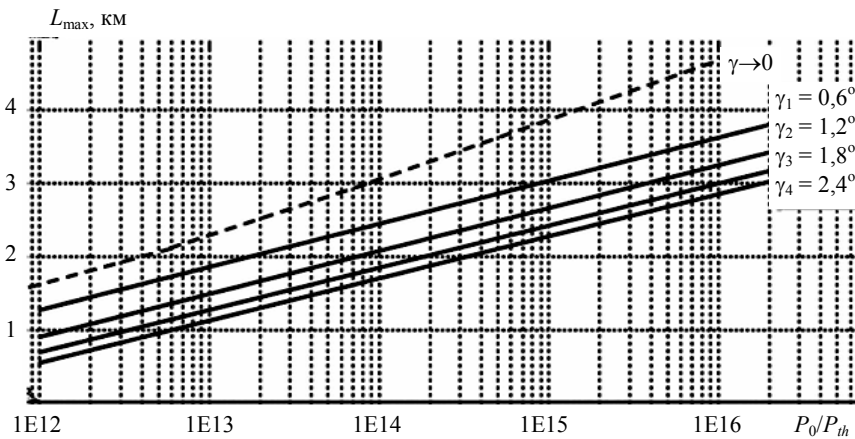


Рис. 10. Максимальной дальности в зависимости от мощности излучения, отнесенной к пороговой мощности, и от угла расходимости лазерного луча γ .

В активно-импульсных формирователях 3D-изображения, кроме увеличения измеряемой дальности, не менее важна идентификация объекта. В соответствии с критерием Джонсона [13], для идентификации объекта требуется не менее 12 пикселей изображения на критическом размере этого объекта. При заданном угле расхождения γ количество пикселей N_p в изображении условно квадратного объекта приблизительно равно

$$N_p \approx (\gamma/\delta\omega)^2. \quad (14)$$

Например, минимально допустимый угол расхождения лазерного излучения при идентификации по критерию Джонсона равен

$$\begin{aligned} \gamma_{\min} &\approx \sqrt{N_p} \delta\omega = 12 \times 30 \text{ мкм} / 50 \text{ мм} = \\ &= 7,2 \text{ мрад} = 0,41^\circ. \end{aligned} \quad (15)$$

В ФПМ предусмотрен режим фиксированного «окна» формата 32×32 , который позволяет оптимальным образом сочетать требования по дальности и по углу обзора. Суть режима состоит в считывании сигналов изображения в «окне» 32×32 элементов и с последовательным перемещением этого «окна» (сканированием) в пределах всей области интереса. Максимальная кадровая частота в

«окне» 32×32 элементов, включая межстрочные такты, равна 4,8 кГц при частоте считывания пикселей 12 МГц и работе на один информационный выход. При этом частота опроса полного кадра 320×256 составляет порядка 60 Гц.

Основные параметры ФПМ

Основные параметры ФПМ, рассчитанные и измеренные при $T = 293 \text{ К}$, сведены в таблицу.

Из основного соотношения лазерной дальнометрии следует, что в условиях плохой видимости ($\alpha > 0,5 \text{ км}^{-1}$) увеличение максимальной измеряемой дальности за счет увеличения мощности лазерного импульса или за счет снижения пороговой мощности (например, при использовании лавинных фотодиодов малоэффективно. Более эффективным является снижение угла расходимости лазерного пучка до оптимального предела и использование опроса в малоформатном «окне» 32×32 элементов в сочетании с последовательным перемещением «окна» в пределах полного угла обзора. В разработанном ФПМ рассчитанное разрешение по дальности составляет $\sigma_d = 30 \text{ см}$ в однокадровом (моноимпульсном) режиме измерения дальности. Для улучшения разрешения по дальности необходимо уменьшение длительности лазер-

ного импульса до 5–10 нс в сочетании с увеличением токовой чувствительности фотодетекторов. С этой точки зрения, целесообразно применение лавинных фотодиодов. Кроме того, для низкод-

намичных объектов улучшение разрешения по дальности может быть достигнуто усреднением сигналов дальности по большому числу моноимпульсных кадров.

Таблица

Основные параметры ФПМ

Наименование параметра	Значение параметра	Примечания
Спектральный диапазон	0,9–1,7 мкм	без спектрального фильтра
Формат матрицы	320×256	
Шаг элементов	30 мкм	
Режим накопления/считывания	Snapshot/ ITR	
Тип входа ячейки	Буферная инжекция	
Потребляемая мощность	140 мВт	при $U_{пит} = +3$ В
Количество информационных выходов	8 или 1	программируется
Максимальная частота считывания	20 МГц	при тактовой частоте 10 МГц
Емкость накопления	0,05 пФ	
Режимы работы	– пассивный (INT='1', GATE='0') – активно-импульсный 3D (INT='0', GATE='1') – асинхронный бинарный (INT='0', GATE='1') – активно-импульсный 2D (INT='1', GATE='1')	
Пороговая мощность	1 нВт/элемент	в активно-импульсном 3D режиме, лазерный импульс с $t_{имп.} = 50$ нс, $\lambda = 1,54$ мкм
Время накопления	0,2 мкс–10 мс	в зависимости от режима
Максимальная кадровая частота	2 кГц	при считывании на 20 МГц, 8 выходов с полным кадром
Временное разрешение	2 нс	в активно-импульсном 3D режиме
Максимальная измеряемая дальность	~ 7 км	в активно-импульсном 3D-режиме для условий хорошей видимости ($\alpha = 0,2$ км ⁻¹), угле расходимости излучения 0,6°, мощности лазерного импульса 10 ⁶ Вт

Заключение

В статье представлен первый разработанный в России твердотельный фотоприемный модуль формата 320×256 элементов для активно-импульсных формирователей изображения в коротковолновом ИК-диапазоне.

Разработанный ФПМ выполнен на основе оригинальной двойной гетероструктуры InGaAs–InGaAlAs–InAlAs, позволяющей значительно снизить темновые токи фотодиодов и обеспечить работу ФПМ при комнатной температуре без использования ТЭО. Специализированная БИС считывания расширяет функциональные возможности ФПМ до четырех режимов: пассивный, активно-импульсный 3D, активно-импульсный 2D, асинхронный бинарный.

Результаты разработки ФПМ представляют интерес при создании перспективных оптико-электронных систем как для военной и специальной техники, так и для устройств гражданского применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И., Залетаев Н. Б. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.
2. Яковлева Н. И., Болтарь К. О. // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 66.
3. Ли И. И. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 4. С. 407.
4. Андреев Д. С., Залетаев Н. Б., Трищенко М. А., Чинарева И. В. // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 86.
5. Залетаев Н. Б., Болтарь К. О., Лопухин А. А., Чинарева И. В., Габбасова Э. В. // Прикладная физика. 2015. № 4. С. 71.
6. Андреев Д. С., Гришина Т. Н., Залетаев Н. Б., Трищенко М. А. // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 86.
7. Балиев Д. Л., Лазарев П. С., Болтарь К. О. // Прикладная физика. 2014. № 5. С. 54.
8. Яковлева Н. А., Болтарь К. О., Седнев М. А., Лопухин А. А., Коротаев Е. Д. // Прикладная физика. 2015. № 1. С. 87.
9. Langof L., Nussinson D., Ilan E., Elkind S., et al. // Proc. of SPIE. April 2011. Vol. 8012, Infrared Technology and Applications XXXVII, pp. 80120F-13.
10. SENSOR+TEST Conference 2011, IRST² Proceeding.
11. Gohler B., Lutzman P. // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9649. Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies and Applications.
12. Назаров В. Н., Балаилов И. Ф. Энергетическая оценка импульсных лазерных дальномеров. Электронный учебник. – СПб: ИТМО.
13. Грузевич Ю. К. Оптико-электронные приборы ночного видения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014.
14. Кузнецов П. А., Моцев И. С. / Труды XXIV МНТК по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, 24–27 мая, 2016 г. С. 213–215.
15. Laurenzis M., Christnacher F., Monnin D., et al. // Opt. Eng. 2012. Vol. 51. No. 6, P. 061303,

16. Göhler B., Lutzmann P. // Proc. SPIE. 2010. Vol. 7835. P. 783504.

17. Perrais G., Rothman J., Destefanis G., Tribolet P., et al. // Proc. of SPIE. 2008. Vol. 6940. P. 69402N.

PACS: 85.60 Dw

Matrix photodetector module based on the InGaAs/InP heterostructures for the 3D imagers in the shortwave IR range

I. D. Burlakov^{1,2}, P. A. Kuznetsov¹, I. S. Moschev¹, K. O. Boltar^{1,3}, and N. I. Yakovleva¹

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

² Moscow Technological University (MIREA)
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

³ Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutsky al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Received August 1, 2017

The paper presents the first Russian matrix photodetector module (PDM) of the short-wave infrared (SWIR) range for active-pulse imagers. The composition of the PDM includes components: a matrix of p-i-n photodiodes based on InGaAs / InP heterojunctions of 320×256 format with 30 μm pitch; a Read-Out Integrated Circuit (ROIC) for reading photosignals; thermoelectric cooler and hermetically sealed case with sapphire window. The main feature of PDM is the possibility of functioning in four modes: passive, active-impulse 2D, active-impulse 3D, asynchronous binary. A flexible combination of these modes allows to get maximum information about the observed objects. An information about the range is formed in each pixel of the PDM, in conjunction with the luminance signals. It allows the synthesis of 3D images of objects. The basic parameters of PDM and IR images obtained in these operating modes are given in this paper. Also, range calculations are given as depending on the power and angle of divergence of the laser radiation. The main sources of error at calculating the distance resolution are considered.

Keywords: SWIR, ROIC, photodetector module, active imaging.

REFERENCES

1. I. D. Burlakov, L. Y. Grinchenko, A. I. Dirochka, and N. B. Zaletaev, Usp. Prikl. Fiz., **2** (2), 134 (2014).
2. N. I. Yakovleva and K. O. Boltar, Prikl. Fiz., No. 3, 66 (2015).
3. I. I. Lee, Usp. Prikl. Fiz., **2** (4), 407 (2014).
4. D. S. Andreev, N. B. Zaletaev, et al., Prikl. Fiz., No. 4, 86 (2012).
5. N. B. Zaletaev, K. O. Boltar, A. A. Lopukhin, et al., Prikl. Fiz., No. 4, 71 (2015).
6. D. S. Andreev, T. N. Grishina, et al., Prikl. Fiz., No. 4, 90 (2014).
7. D. L. Baliev, P. S. Lasarev, and K. O. Boltar, Prikl. Fiz., No. 5, 54 (2014).
8. N. I. Yakovleva, K. O. Boltar, M. V. Sednev, et al., Prikl. Fiz., No. 1, 87 (2015).
9. L. Langof, D. Nussinson, E. Ilan, S. Elkind, et al. Proceedings of SPIE, **8012**, Infrared Technology and Applications XXXVII (April 2011).
10. SENSOR+TEST Conference 2011, IRST² Proceeding.
11. B. Gohler and P. Lutzman, Proceedings of SPIE, **9649**, Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies and Applications (October 16, 2015).
12. V. N. Nazarov and I. F. Balashov, *Energy Estimation of Pulsed Laser Range Finders*. (ITMO, SPb) [in Russian].
13. Y. K. Gruzevich, *Optoelectronic Night Vision Devices*. (Fizmatlit, Moscow, 2014) [in Russian].
14. P. A. Kuznetsov and I. S. Moschev, *Proceedings of the XXIV International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices*. (Moscow, 2016).
15. M. Laurenzis, F. Christnacher, D. Monnin, et al., Opt. Eng. **51** (6), 061303 (2012).
16. B. Göhler and P. Lutzmann, Proceedings of SPIE, **7835**, 783504 (2010).
17. G. Perrais, J. Rothman, G. Destefanis, P. Tribolet, et al., Proceedings of SPIE, **6940**, 69402N, (2008).