

Исследование матричного фотоприемного модуля SWIR диапазона в дальномерном режиме

П. А. Кузнецов, И. С. Мощев

Представлен первый отечественный матричный фотоприемный модуль (ФПМ) SWIR 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 считывания фотосигналов; термоэлектрический охладитель и герметичный корпус с сапфировым окном. Основной особенностью ФПМ является возможность функционирования в 3-х режимах: пассивный 2D, активно-импульсный 3D (дальномерный), 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 представлены результаты исследования ФПМ, работающего в активно-импульсном 3D (дальномерном) режиме. Приводятся результаты эксперимента по созданию эффекта 3D-изображения, подтверждающие возможность ФПМ детектировать с высоким разрешением разноудаленные объекты.

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

Ссылка: Кузнецов П. А., Мощев И. С. // Успехи прикладной физика. 2020. Т. 8. № 6. С. 472.

Reference: P. A. Kuznetsov and I. S. Moschev, Usp. Prikl. Fiz. **8** (6), 472 (2020).

Введение

Важной практической задачей современных фотоприемных систем является обнаружение и идентификация объектов в различных погодных условиях, включая

ночное время суток, туман, задымление и другие факторы ухудшения видимости. Для лучшего обнаружения могут быть применены как математические методы – суммирование подкадров, автоматическая коррекция, так и программно-аппаратные решения в виде систем формирования изображения с активной подсветкой. В данной статье рассматривается принцип построения 3D-изображения в коротковолновом ИК-диапазоне при помощи активной системы.

Решением задачи стробирования объектов по дальности является использование систем с активно-импульсными фор-

Кузнецов Петр Александрович, главный специалист.

Мощев Иван Сергеевич, нач. дизайн-центра.
АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 30 октября 2020 г.

© Кузнецов П. А., Мощев И. С., 2020

мирователями изображений [1–3]. При этом для подсветки исследуемой области в системах коротковолнового ИК-диапазона 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 3D-изображение (координаты точек изображения и дальность) высокого разрешения на больших дальностях в неблагоприятных внешних условиях. Результаты этих разработок представляют также интерес при создании перспективных образцов как военной и специальной техники, так и гражданского применения.

Основу современных фотоприемных устройств для активно-импульсных преобразователей изображений составляют матрица $p-i-n$ или лавинных фотодиодов, а также многофункциональная интегральная схема считывания и обработки фотосигнала. Особенностью ИС считывания является введение во все входные ячейки функции измерения дальности до произвольной точки исследуемого объекта, при этом сохраняется 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 $In_xGa_{1-x}As/InP$ [4–8]. Состав с $x = 0,53$ обеспечивает чувствительность в спектральном диапазоне 0,9–1,7 мкм и не требует дополнительного охлаждения, а так-

же обеспечивает согласование параметров кристаллической решетки при выращивании на подложке InP.

В работе представлены результаты исследования работы режима формирования 3D-изображения фотоприемного модуля (ФПМ) формата 320×256 элементов на основе матрицы $p-i-n$ фотодиодов коротковолнового ИК-диапазона из $In_{0,53}Ga_{0,47}As/InP$.

Состав фотоприемного модуля

Разработанный ФПМ состоит из следующих основных элементов (рис. 1):

- матрица фоточувствительных элементов (ФЧЭ) (1) на основе гетероструктуры $In_{0,53}Ga_{0,47}As/InP$ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм;
- интегральная схема считывания (ИС) фотосигналов (2);
- коммутирующий растр (3);
- термоэлектрический охладитель (ТЭО) (4);
- корпус с герметичными выводами (5).

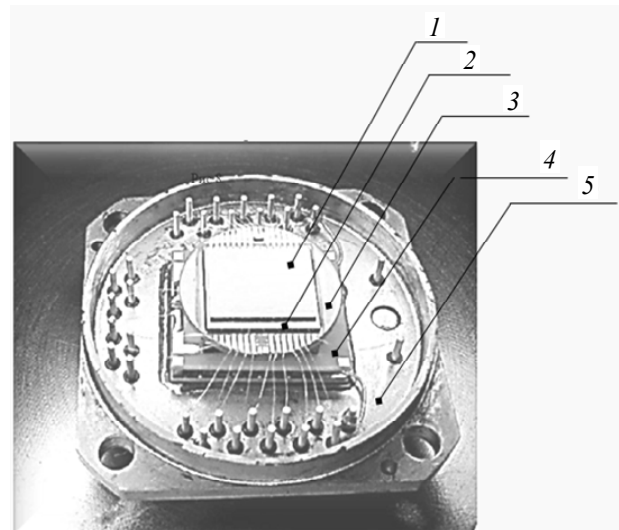


Рис. 1. Внешний вид фотоприемного модуля в корпусированном варианте с ТЭО без крышки с входным окном.

Основу ИС считывания составляет матрица входных ячеек, стыкуемая с матрицей ФЧЭ посредством индиевых микро-

контактов. Входная ячейка, структурная схема которой приведена на рис. 2, имеет ряд схемных особенностей, позволяющих реализовать три основных режима функ-

ционирования БИС считывания, рассмотренных в работе [9]: пассивный 2D, активно-импульсный 3D (дальномерный) и асинхронный бинарный.

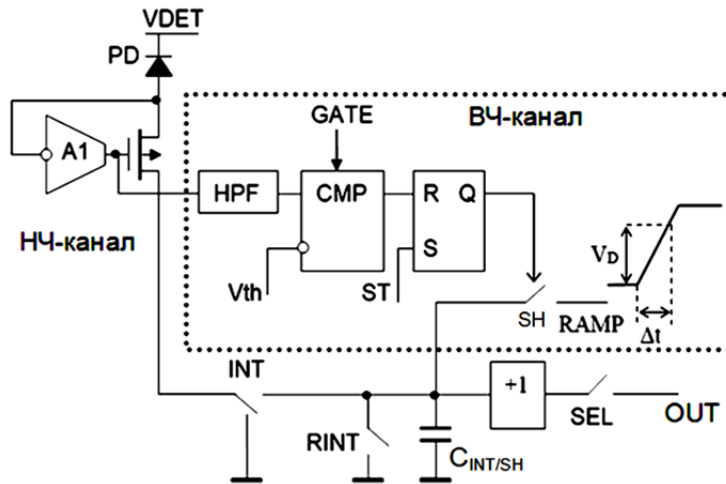


Рис. 2. Структурная схема входной ячейки разработанной ИС считывания.

Функционирование ФПМ в активно-импульсном 3D-режиме

В активно-импульсный 3D-режиме, называемом также дальномерным, производится формирование сигналов дальности до произвольной точки исследуемого объекта за счет детектирования, отраженных от этого объекта, лазерных импульсов, при этом сохраняется функция формирования обычного 2D-изображения по сигналам яркости. В этом режиме импульсом GATE активируется высокочастотный (ВЧ) канал ячейки, содержащий фильтр высоких частот HPF, компаратор напряжения CMP, RS-триггер, вход внешнего сигнала RAMP (рис. 2), при этом, импульсом INT прерывается процесс накопления фототока в низкочастотном (НЧ) канале, работающем в пассивном режиме в качестве интегратора фототока. В момент приема фоточувствительными элементами лазерного излучения, отраженного от наблюдаемых объектов, на входе схемы буферной инжекции A1 возникает импульс фототока, задержанный на время распространения излучения $\Delta t_d = 2D/c$, где D – дальность наблюдаемого объекта, c – скорость света. В результате действия

обратной связи через усилитель буферной инжекции A1 на затворе входного p -МОП транзистора возникает импульс напряжения отрицательной полярности. После прохождения через высокочастотный фильтр HPF, этот импульс попадает на неинвертирующий вход компаратора CMP. При значении фототока больше порогового, напряжение на этом входе, опускается ниже опорного уровня V_{th} и выход компаратора переключается из высокого логического состояния в низкое. В результате, выход RS-триггера Q также переключаются в инверсное состояние и находится в нем до прихода 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 $t_1 = t_0 + \Delta t_d = t_0 + 2D/c$, где t_0 – момент начала линейного роста V_{Ramp} . Импульс Gate является синхронизирующим в дальномерном режиме, его начало и ширина определяют диапазон измерения дальности (рис. 3). Низкий уровень импульса Gate дезактивирует работу ВЧ-канала, что значительно снижает интенсивность ложных срабатываний RS-триггера

в ждущем режиме при считывании сигнала дальности на выход БИС. На рис. 4 приведены примеры ИК-изображений для сравнения дальномерного режима (лазерный излучатель с $\lambda = 1,54 \text{ мкм}$ и $t_p = 50 \text{ нс}$) с пассивным режимом. Изменения дальности имитировались временем задержки Δt_d момента излучения лазерного импульса относительно начала роста сигнала Ramp. При этом за счет высокочастотной фильтрации и стробирования импульсом GATE в дальномерных кадрах игнорировались фрагменты пассивного изображения в виде горячей нити и пиксели с дефектными фоточувствительными элементами.

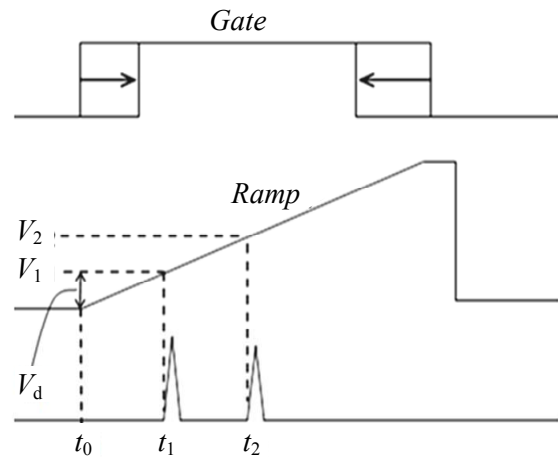


Рис. 3. Преобразование временной задержки отсроченных лазерных импульсов t_1, t_2 в сигналы напряжения V_1, V_2 , пропорциональные дальности.

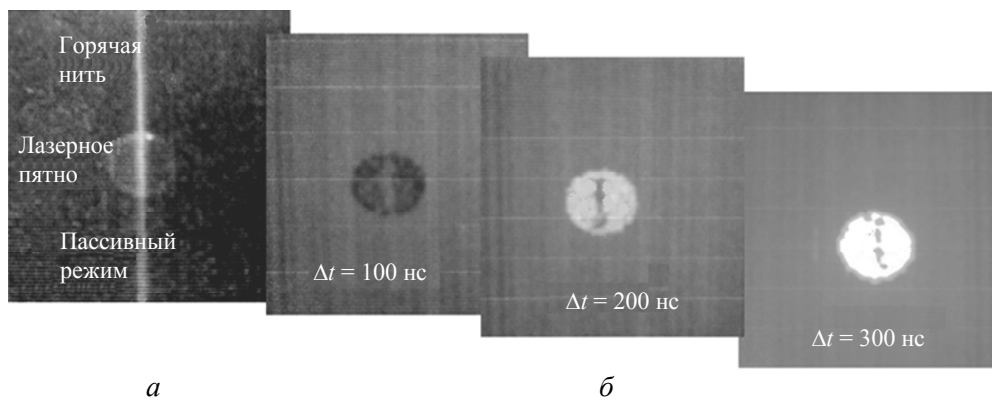


Рис. 4. Изображения пятна от импульсного лазерного излучения: а) – в пассивном режиме; б) – в активно-импульсном 3D-режиме с различными временами задержки, имитирующими изменение дальности.

Для демонстрации эффекта 3D-изображения была собрана оптическая схема на рис. 5. Здесь фотоприемный модуль (ФПМ) с объективом детектирует импульсы от двух лазерных излучателей ЛИ1 и ЛИ2, питающихся от соответствующих генераторов импульсного напряжения ГИ1, ГИ2. Генераторы импульсов и ФПМ запускаются сигналом Gate, при поступлении которого выдается опорный

сигнал Ramp и излучаются два лазерных импульса с индивидуально регулируемой временной задержкой Δt относительно сигнала Gate. Изменение временной задержки лазерного импульса имитирует изменение дальности объекта, от которого происходит отражение излучения. Визуализация сигналов дальности с выхода ФПМ происходила на TV-мониторе, без дополнительной обработки.

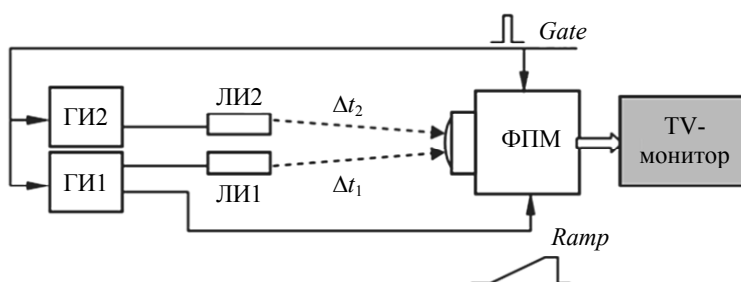


Рис. 5. Оптическая схема для демонстрации эффекта 3D-изображения, при функционировании ФПМ в дальномерном режиме.

На рисунке 6 приведены изображения расфокусированных лазерных пятен от ЛИ1 и ЛИ2 в пассивном и дальномерном режимах, имитирующие изображения разнесенных по дальности объектов. Временная задержка лазерных импульсов от ЛИ2 была установлена меньше на 1 мкс, относительно задержки лазерных импульсов от ЛИ1, что эквивалентно уменьшению дальности объекта на 150 метров. В результате, изображение пятна от ЛИ2 с меньшей задержкой в дальномерном режиме более темное, чем изображение пятна от ЛИ1 и, что характерно, пятно от ЛИ2 «загораживает» пятно от ЛИ1, создавая эффект 3D-изображения. Изображение в дальномерном режиме представлено однородным пятном, в отличие от пассивного режима, где яркостной сигнал из-за расфокусировки и интерференции отраженного излучения имеет крайне неравномерную зернистую структуру (спекл-шум). Измеренная по осциллограмме дальномерного сигнала разность сигналов от ЛИ1 и ЛИ2 дает перепад в 900 мВ. При среднеквадратичном значении напряжения шума на выходе ФПМ, равном 1,5 мВ, можно оценить разрешение

по дальности: $\sigma_d = 150 \text{ м} \times (1,5 \text{ мВ} / 900 \text{ мВ}) = 25 \text{ см}$. Расфокусировка изображения лазерных пятен делалась с целью создания резко неравномерной освещенности в плоскости ФЧЭ, типичной при приеме лазерного излучения, отраженного от произвольных объектов. Например, на рис. 7, а в яркостном изображении с расфокусировкой пятна в виде кольца наблюдается восьмикратный перепад сигнала от краев к центру пятна. При этом осциллограмма сигнала дальности на рис. 7, б имеет форму прямоугольника с плоской вершиной на которую, кроме полезного приращения 150 мВ при задержке 300 нс, наложен разброс пороговых напряжений компараторов в накопительных ячейках БИС считывания. Из осциллограммы следует на рис. 7, б, что этот разброс дает аддитивную погрешность в измерение дальности и, поэтому, не влияет на разрешение по дальности. Необходимым условием является линейность сигнала Ramp во всем диапазоне измерения дальности, что позволяет цифровой обработкой удалять указанную погрешность при коррекции сигнала дальности.

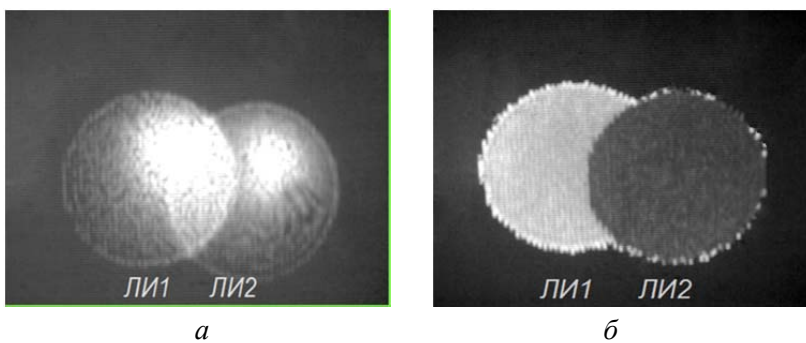


Рис. 6. Расфокусированные лазерные пятна от ЛИ1 и ЛИ2, имитирующие разнесенные по дальности объекты в: а) пассивном 2D-режиме; б) активно-импульсном (дальномерном) 3D-режиме.

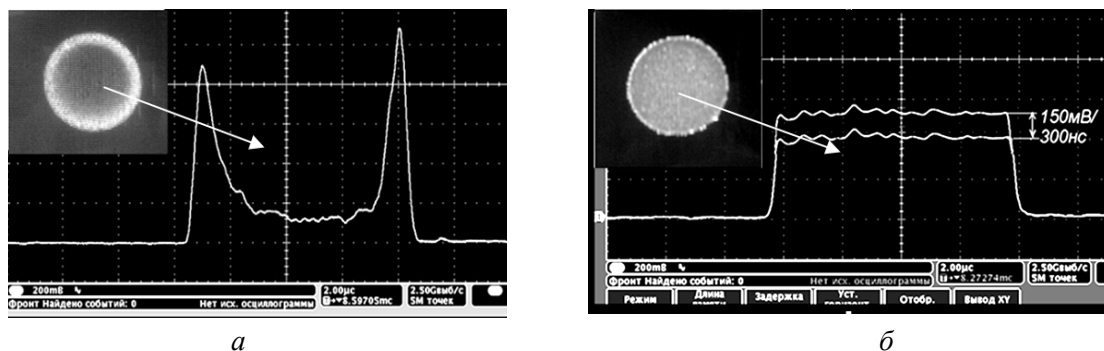


Рис. 7. Осциллограммы строчного сигнала от расфокусированного лазерного пятна в: а) пассивном 2D-режиме; б) активно-импульсном (дальномерном) 3D-режиме с Ramp = 500 мВ/мкс.

Заключение

Разработан первый в России фотоприемный модуль формата 320×256 элементов SWIR диапазона с функцией формирования 3D-изображения. ФПМ выполнен на основе гетероструктуры InGaA/InP, позволяющей значительно снизить темновые токи фотодиодов и обеспечить работу ФПМ при комнатной температуре без использования ТЭО. Как отмечалось в работе [9, 10] специализированная ИС считывания расширяет функциональные возможности ФПМ за счет введения режимов: пассивный 2D, активно-импульсный 3D (дальномерный), асинхронный бинарный. В работе уделено внимание исследованию ФПМ в активно-импульсном 3D (дальномерном) режиме и визуализации полученных результатов. Результаты разработки ФПМ с функцией формирования 3D-изображения представляют интерес при создании перспективных лидарных оптико-электронных систем как для военной и специальной техники, так и для 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. Башиев 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., Коротаяев Е. Д. // Прикладная физика. 2015. № 1. С. 87.
9. Кузнецов П. А., Моцев И. С. / Труды XXIV МНТК по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, 24–27 мая, 2016 г. С. 213–215.
10. Бурлаков И. Д., Кузнецов П. А., Моцев И. С., Болтарь К. О., Яковлева Н. И. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 4. С. 383.

PACS: 85.60 Dw

Study of the SWIR range photodetector array module in rangefinder mode

P. A. Kuznetsov and I. S. Moschev

Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

Received October 30, 2020

The paper presents the first in Russia matrix photodetector module (PDM) for the short-wave infrared (SWIR) range for active-pulse image formers. The composition of the PDM includes: 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 you to get maximum information about

the observed objects. Information about the range formed in each pixel of the PDM, in conjunction with the luminance signals, allows the synthesis of 3D images of objects. The paper presents the results of a study of a FPM operating in an active-pulse 3D (rangefinder) mode. The results of an experiment on creating a 3D image are presented, which confirm the ability of the PDM to detect objects at different distances with high resolution.

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, *Applied Physics*, No. 3, 66 (2015) [in Russian].
3. I. I. Lee, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (4), 407 (2014).
4. D. S. Andreev, N. B. Zaletaev, et al., *Applied Physics*, No. 4, 86 (2012) [in Russian].
5. N. B. Zaletaev, K. O. Boltar, A. A. Lopukhin, et al., *Applied Physics*, No. 4, 71 (2015) [in Russian].
6. D. S. Andreev, T. N. Grishina, et al., *Applied Physics*, No. 4, 90 (2014) [in Russian].
7. D. L. Baliev, P. S. Lasarev, and K. O. Boltar, *Applied Physics*, No. 5, 54 (2014) [in Russian].
8. N. I. Yakovleva, K. O. Boltar, M. V. Sednev, et al., *Applied Physics*, No. 1, 87 (2015) [in Russian].
9. P. A. Kuznetsov and I. S. Moschev, *Proceedings of the XXIV International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices*. (Moscow, 2016).
10. I. D. Burlakov, P. A. Kuznetsov, I. S. Moschev, K. O. Boltar, and N. I. Yakovleva, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (4), 383 (2017).