

УДК 621.382

Структура фоточувствительных элементов и ИС считывания для матричных фотоприемных устройств ультрафиолетового диапазона

А. А. Зайцев, С. С. Хромов

Рассмотрены основные области применения и преимущества твердотельных матричных фотоприемных устройств для ультрафиолетовой области спектра. Рассмотрена типичная структура фоточувствительных элементов и принципы построения интегральной схемы считывания. Предложен вариант ячейки считывания размером 30×30 мкм на основе емкостного трансимпедансного усилителя. Приведена структурная схема аналогового канала разрабатываемой интегральной схемы (ИС) считывания. Представлено сравнение с аналогом.

PACS: 85.60 Gz

Ключевые слова: фоточувствительный элемент, матричное фотоприемное устройство, структура, УФ-диапазон.

Введение

В настоящее время в связи с развитием соответствующих областей науки и техники резко возрос интерес к многоэлементным фотоприемным устройствам (ФПУ) для ультрафиолетовой (УФ) области спектра на основе твердотельных приемников излучения.

Вследствие поглощения солнечного излучения молекулами кислорода и озона, содержащимися в земной атмосфере, область спектра, примерно, от 240 до 285 нм называется "солнечно-слепой". Твердотельные фотоприемники излучения, работающие в данной области спектра, называют "солнечно-слепыми", так как они способны чувствовать излучение в узком окне спектра, свободном от влияния со стороны солнца. Естественно, это справедливо, только если фотоприемник находится в достаточной близости к поверхности земли.

Несмотря на большие успехи в создании многоэлементных твердотельных ИК-фотоприемников, в последнее время практически не существовало аналогичных устройств для УФ-области спектра. В основном это было связано с отсутствием подходящих фоточувствительных материалов. Однако успехи в освоении нитридов III-группы, в том числе таких материалов, как GaN и AlGaN, позволили устранить этот пробел.

Благодаря чувствительности только в узком спектральном окне, низким значениям "темновых"

токов и большой радиационной стойкости фотоприемники на основе нитридов III-группы могут работать без дополнительных оптических фильтров и систем охлаждения, что особенно важно для космического и авиационного применения [1].

Твердотельные "солнечно-слепые" фотоприемники УФ-излучения применяются в случаях, когда необходимо наблюдать источники УФ-излучения на фоне видимого или ИК-излучений. Существует множество коммерческих, промышленных, военных и космических областей применения твердотельных УФ-фотоприемников. Среди основных применений можно отметить контроль содержания озона в атмосфере, УФ-астрономию, системы связи, обнаружение возгораний, геодезию и картографию, контроль процессов сгорания, медицину, научные исследования, системы обнаружения ракет, средства ПВО, обнаружение и идентификацию биологических соединений, а также ряд других задач, связанных с необходимостью получения изображений в УФ-области спектра [1, 2].

В данной статье проанализированы основные существующие структуры фоточувствительных элементов и ИС считывания для матричных фотоприемных устройств УФ-диапазона, а также представлен разработанный проект ИС считывания с размером ячейки 30×30 мкм, учитывающий доступный уровень кремниевой технологии (проектная норма 0,8 мкм).

Фотоприемники для УФ-диапазона

Основные усилия сейчас сосредоточены на получении фотодиодов на основе материала $Al_xGa_{1-x}N$, который позволяет управлять граничной длиной волны путем изменения состава сплава за счет изменения ширины запрещенной зоны [1].

Зайцев Алексей Андреевич, ведущий инженер-электроник.
Хромов Сергей Сергеевич, начальник дизайн-центра.
ФГУП «НПО "Орион"».
Россия, 111123, Москва, Шоссе Энтузиастов, 46/ 2.
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 12 мая 2011 г.

© Зайцев А. А., Хромов С. С., 2012

AlGaN по своим характеристикам является идеальным полупроводниковым сплавом для создания высококачественных приемников УФ-излучения. Он имеет прямую структуру энергетических зон и высокий коэффициент поглощения ($>10^5 \text{ см}^{-1}$). Ширина запрещенной зоны варьируется от 6,1 эВ для AlN (фундаментальное поглощение с длины волны $\lambda = 200 \text{ нм}$) до 3,4 эВ для GaN ($\lambda = 365 \text{ нм}$), перекрывая тем самым важную часть УФ-спектра (рис. 1).

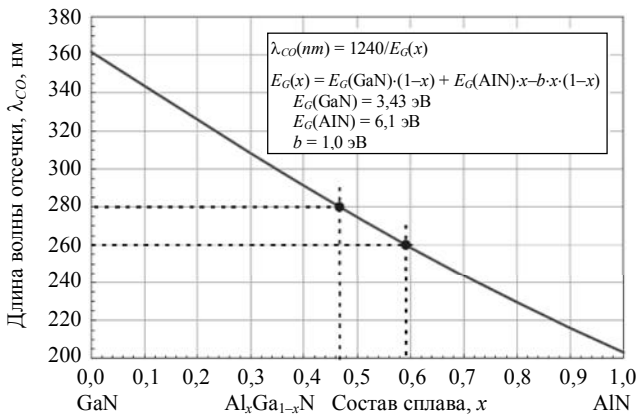


Рис. 1. Зависимость длины волны отсечки от состава сплава AlGaN

Ширина запрещенной зоны может быть задана такой, чтобы приемник был чувствителен только к излучению короче 280 нм. Именно такой диапазон называется "солнечно-слепым". Широкая запрещенная зона позволяет создавать приемники с высоким импедансом и низкими тепловыми токами утечки. Другим немаловажным преимуществом данного материала является наличие технологии легирования *n*- и *p*-типами примеси. AlGaN является прочным, радиационно-устойчивым материалом и может выдерживать высокие температуры. Данный материал был хорошо исследован и освоен, так как широко применяется для источни-

ков излучения видимого и УФ-диапазонов, а также в радиочастотной электронике.

Существует большое количество твердотельных фотоприемников на основе AlGaN и GaN, среди которых *p-n*- и *p-i-n*-фотодиоды, фотодиоды с барьером Шотки, детекторы типа металл-полупроводник-металл, лавинные фотодиоды и фототранзисторы. Однако наибольшее распространение все-таки получили *p-i-n*-фотодиоды [2].

Наиболее часто применяемым методом получения слоев AlGaN является метод осаждения металлоорганических соединений из газовой среды (MOCVD), который обеспечивает более низкие токи утечки получаемых фотоприемников по сравнению с изделиями, получаемыми методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МВЕ).

Фоточувствительные элементы (ФЧЭ) формируются на прозрачной для УФ-излучения подложке, чаще всего на сапфире (рис. 2) [2]. Первый слой *n*-AlGaN, легированный кремнием, представляет собой общий контакт для всех элементов матрицы ФЧЭ (оконный слой). Состав данного слоя определяет нижнюю границу спектра пропускаемого излучения. Следующий слой однородно легированного *n*-AlGaN, имеющий меньшую ширину запрещенной зоны по сравнению с оконным слоем, служит основной областью поглощения УФ-излучения и формирует с ним изотипный *n-n*-гетеропереход. Состав данного слоя определяет верхнюю границу спектра пропускаемого излучения. Следующий слой *p*-AlGaN, легированный магнием, формирует гомопереход со слоем поглощения. Последний слой *p*-GaN также легирован магнием и формирует омический контакт со слоем металлизации. Для разделения ФЧЭ используется мезоструктура, получаемая методом плазменного травления.

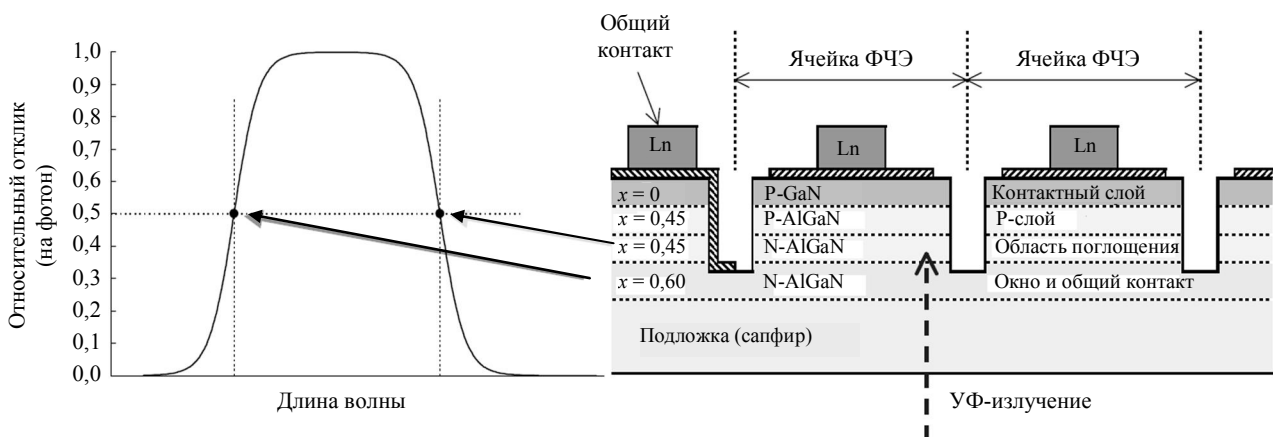


Рис. 2. Структура ФЧЭ на основе AlGaN

AlGaN-, $p-i-n$ -фотодиоды с тыловой засветкой, работающие при нулевом смещении, имеют ряд преимуществ. При нулевом смещении ток через фотодиоды пренебрежительно мал, так что шум типа $1/f$ не является серьезной проблемой. В идеале, слой поглощения имеет столь малую концентрацию примеси, что его обеднение наступает даже при нулевом напряжении смещения. Таким образом, собирание носителей, сгенерированных УФ-излучением, происходит только за счет электрического поля и не зависит от их диффузии, что особенно важно для таких материалов, как AlGaN, в которых диффузионная длина сравнительно мала ($<0,1$ мкм). В результате, появляется возможность достичь высокой квантовой эффективности.

Фотодиоды с данной структурой имеют темновой ток порядка $0,1$ пА и динамическое сопротивление не менее $1 \cdot 10^{13}$ Ом, а также хорошо совместимы со стандартным для ИК-ФПУ методом гибридации с помощью индиевых микроконтактов.

ИС считывания для УФ ФПУ

Для считывания сигнала с матрицы ФЧЭ на основе AlGaN используют кремниевую ИС считывания с входной ячейкой, выполненной на основе емкостного трансимпедансного усилителя (СТИА) (рис. 3). Применение данного типа входной ячейки

ключа сброса емкости интегрирования (сброс происходит закорачиванием емкости) [3, 4]. Накопление заряда происходит на емкости интегрирования, величина которой определяет коэффициент усиления схемы. Вследствие эффекта Миллера, состоящего в увеличении эквивалентной емкости, включенной в цепь обратной связи инвертирующего усилителя, ее значение можно выбрать достаточно малым, что положительно скажется на уровне КТС-шума. Схема СТИА обеспечивает стабильное напряжение смещения фотодиода, линейную функцию передачи сигнала, высокое усиление, низкий входной импеданс.

Выходная часть ячейки может состоять из ключа выборки или транзисторного повторителя, а также содержать схему выборки и хранения (УВХ) для реализации режима параллельного считывания и накопления. Также довольно часто применяют схему двойной коррелированной выборки (ДКВ) для улучшения шумовых характеристик. Однако добавление УВХ и ДКВ в ячейку считывания приводит к значительному увеличению ее габаритов даже при использовании технологических процессов с нормами порядка $0,35$ мкм.

К недостаткам данного типа ячейки считывания можно отнести большие габариты, которые существенно больше, чем у ячеек с прямой инжекцией (DI) и на основе истокового повторителя (SFD), а также значительное энергопотребление и, как

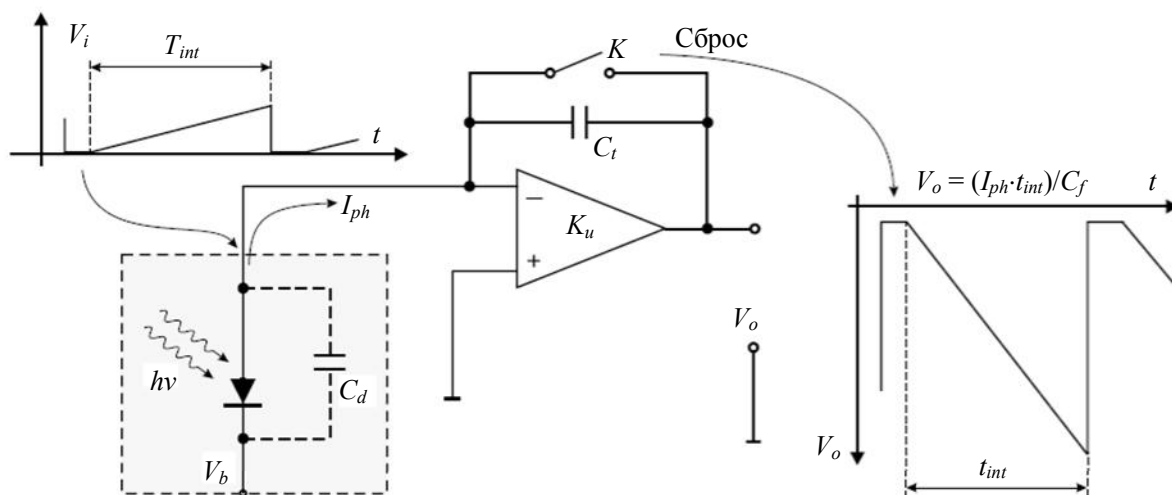


Рис. 3. Функциональная схема ячейки считывания на основе емкостного трансимпедансного усилителя

обусловлено низкими темновыми токами и низким уровнем шума AlGaN-фотодиодов. По сути, в настоящее время уровень шумов ФПУ определяется шумом ИС считывания, а не собственным шумом AlGaN-фотодиодов.

Ячейка считывания типа СТИА состоит из инвертирующего усилителя (чаще каскадного типа, реже дифференциального), емкости интегрирования, включенной в цепь обратной связи усилителя,

следствие, большую выделяемую мощность. Последний недостаток, в основном, существенен для ИС считывания, работающих при криогенных температурах, в то время как AlGaN-фотодиоды не требуют специального охлаждения.

ИС считывания для AlGaN-фотодиодов с ячейкой считывания на основе емкостного трансимпедансного усилителя обладают всеми стандартными для схем этого класса возможностями. Среди

которых отметим главные: поддержка различных режимов считывания (конвейерный, последовательное и параллельное чтение и накопление), динамическое изменение размеров считываемой области, прямое и реверсивное считывание, переключение усиления в ячейке, изменение времени накопления, переключение количества выходов, последовательный интерфейс управления. Данные ИС считывания также можно использовать для работы с InGaAs-фотодиодами без каких-либо изменений.

По данным зарубежных публикаций, наибольшим форматом ФПУ, разработанным на данный момент, является формат 320×256 с шагом ячейки 30 мкм. Данное ФПУ разработано французской фирмой Thales Research and Technology [5] и использует ИС считывания ISC9809 фирмы Indigo с СТИА-ячейкой считывания. В качестве ФЧЭ используются AlGaIn-фотодиоды с барьером Шотки. Английской фирмой BAE Systems разработано ФПУ формата 256×256 с шагом 30 мкм на основе AlGaIn-, *p-i-n*-фотодиодов и собственной ИС считывания с входной ячейкой типа СТИА [2]. Бельгийская фирма IMEC в 2010 г. сообщила о разработке ФПУ формата 256×256 на основе AlGaIn-фотодиодов с шагом 10 мкм с построчным режимом накопления [6], т. е. интегрирование фототока выбранной строки матрицы ФЧЭ происходит в СТИА-каналах секции накопления, а не в ячейках считывания.

Проект ИС считывания

Основываясь на предыдущем опыте проектирования ИС считывания для InGaAs-фотодиодов форматов 128×128 и 320×256 с упрощенной схемой емкостного трансимпедансного усилителя [7], а также учитывая уровень доступной кремниевой технологии (проектная норма 0,8 мкм), разработан проект ИС считывания с размером ячейки 30×30 мкм.

Принципиальная схема ячейки считывания, представленная на рис. 4, основана на классической КМОП-схеме емкостного трансимпедансного усилителя. Ячейка состоит из усилительного *n*-МОП-транзистора (M1), нагрузочного *p*-МОП-транзистора (M2), емкости интегрирования (C_{fb}) в обратной связи усилителя, *n*-МОП-ключа (M3) сброса емкости, выходного истокового повторителя и ключа выборки строки на *n*-МОП-транзисторах (M4, M5).

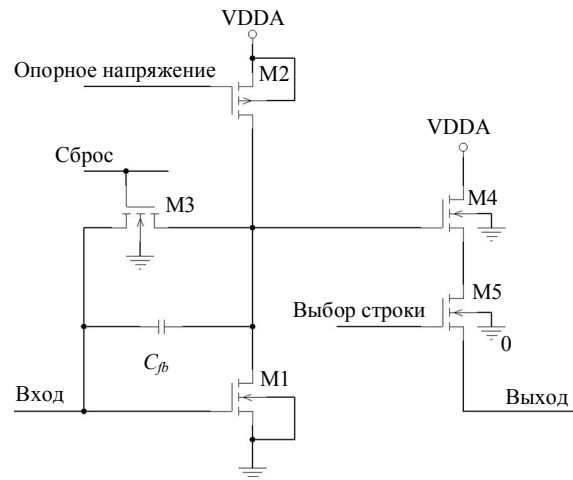


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема ячейки считывания

Упрощенная схема аналогового тракта обработки сигнала приведена на рис. 5. В ИС считывания использована архитектура коммутируемых пиксельных повторителей, аналогичная мультиплексорам формата 320×256 и 640×512 для ФЧЭ на основе InSb [8]. Такая схема при использовании ячейки считывания типа СТИА позволяет реализовать только режим конвейерного интегрирования и считывания. Для реализации режима мгновенной фотографии (snapshot) и считывания после или во время интегрирования (ITR, IWR) ячейка считывания должна включать еще и схему выборки-хранения, что не реализуемо при доступной технологии.

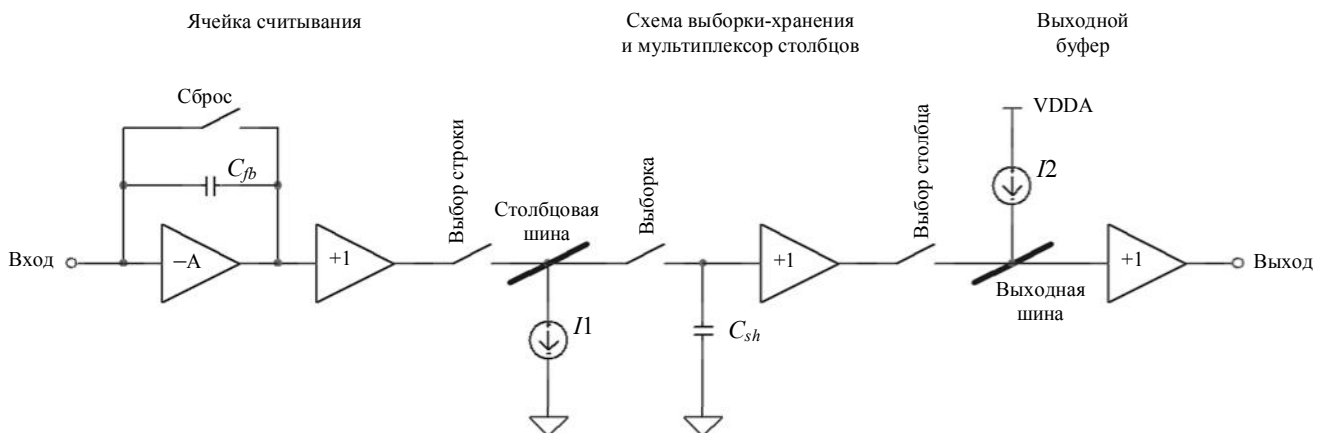


Рис. 5. Структурная схема аналогового тракта ИС считывания

Топология ячейки считывания, выполненная с проектными нормами 0,8 мкм с двумя слоями поликремния и двумя уровнями металлизации, представлена на рис. 6. В ИС считывания для компактности ячейки объединены зеркальным отображением по горизонтальной и вертикальной оси в модули 2×2.

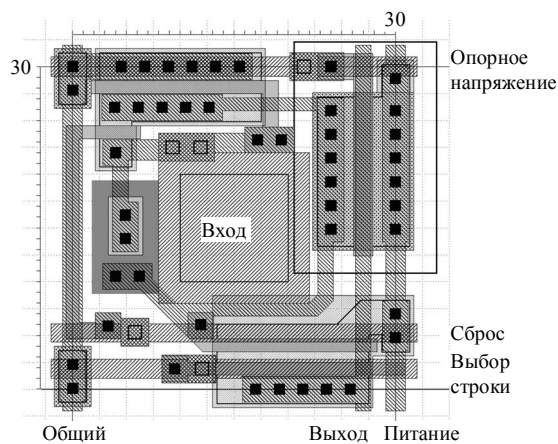


Рис. 6. Топология ячейки считывания

Основные расчетные параметры разрабатываемой ИС считывания и ее ближайшего аналога ISC9809 фирмы Indigo [9] приведены в таблице.

Параметры	Разрабатываемая ИС считывания	ISC9809
Формат	320×256	320×256
Размер ячейки, мкм	30×30	30×30
Размер кристалла, мм	11,5×10,5	11,35×10,65
Технология изготовления	0,8 мкм КМОП, 2 металла, 2 поликремния	0,6 мкм КМОП, 3 металла, 2 поликремния
Схема считывания	СТИА	СТИА
Режим интегрирования и опроса	Конвейер	Snapshot ITR, IWR
Время интегрирования, мкс	20—10 000	> 0,5
Минимальное окно	16×8	32×8
Минимальный входной ток, пА	0,1	0,1
Максимальный входной ток, нА	5	50
Емкость интегрирования, пФ	20	10, 210
Шум считывания, е ⁻	65	70
Динамический диапазон, В	2,2	2,7
Выходы	2, 4	1, 2, 4
Частота считывания, МГц	4	5
Частота кадров, Гц	100, 200	100, 200, 346
Тип управления	Цифровой, последовательный	Цифровой, последовательный
Максимальная потребляемая мощность, мВт	100	150

Заключение

В данной статье на основе анализа существующих за рубежом структур ФЧЭ и ИС считывания для матричных ФПУ УФ-диапазона представлен разработанный проект ИС считывания с размером

ячейки 30×30 мкм, учитывающий доступный уровень кремниевой технологии (проектная норма 0,8 мкм). Предлагаемый проект ИС по своим основным характеристикам близок к зарубежным аналогам, однако уступает им по функциональным возможностям. В первую очередь, это касается отсутствия режима snapshot, для реализации которого необходимо использовать технологию с проектными нормами не хуже 0,6 мкм.

Литература

1. Rogalski A. // Opto-Electronics Review. 2004. V.12. No. 2. P. 221.
2. Reine M. B., Hairston A. et al. // Proc. of SPIE. 2006. V. 6119. P. 611901-1.
3. Bielecki Z. // Opto-Electronics Review. 2004. V. 12. No. 1. P. 129.
4. Hsieh C.-C., Wu C.-Y., Jih F.-W., Sun. T.-P. // IEEE Trans. on Circ. and Syst. for Video Tech. 1997. V.7. No. 4. P. 595.
5. Reverchon J.-L., Gourdel Y. et al. Status of AlGaIn Based Focal Plane Array for Near UV Imaging and Strategy to Extend This Technology to Far-UV by Substrate Removal. / International Conference of Space Optics. Toulouse, France. October 14—17, 2008.
6. Malinowski P. E., Duboz J.-Y. et al. 10 μm Pixel-to-Pixel Pitch Hybrid Backside Illuminated AlGaIn-on-Si Imagers for So-

lar Blind EUV Radiation Detection. International Electron Devices Meeting. / San Francisco, USA. December 6—8, 2010. P. 14.5.1.

7. Зайцев А. А., Хромов С. С., Кузнецов П. А. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 100.

8. Хромов С. С., Зайцев А. А. // Там же. С. 103.

9. ISC9809 Specification — FLIR Systems Inc., www.corebyindigo.com.

Photosensitive elements and ROIC structure for UV FPA

A. A. Zaitsev, S. S. Khromov
Orion R&P Association,
46/2 Enthusiasts shosse, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

The main applications and advantages of solid-state matrix FPA for the ultraviolet spectral region are considered. The typical structure of photosensitive elements and principles of construction of the readout integrated circuit are described. The variant of the readout cell based on capacitive transimpedance amplifier in the size $30 \times 30 \mu\text{m}$ is offered. The block diagram of the analog channel for the development integrated readout circuit is considered. Comparison with analogous is presented.

PACS: 85.60 Gz

Keywords: photosensitive element, focal plane array, structure, UV band.

Bibliography — 9 references.

Received May 12, 2011

* * *