

УДК 621.383.4/5

Матричные фотоприемные устройства коротковолнового инфракрасного диапазона спектра с лавинным усилением сигнала на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs

Н.И. Яковлева, К.О. Болтарь, М.В. Седнев, А.И. Патрашин, Н.А. Иродов

Проведен анализ матричных фотоприемных устройств формата 320x256 элементов на основе гетероэпитаксиальных структур $Al_xGa_{1-x}N$ (ГЭС InGaAs) с $p-i-n$ -фотодиодами, работающих в режиме лавинного усиления. Гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) с фоточувствительным слоем InGaAs i -типа проводимости выращивались методами мосгидридной эпитаксии (МОСГЭ) на подложках InP. Качество $p-i-n$ -фотодиодов, работающих в режиме лавинного усиления, оценивалось по измерению вольт-амперных характеристик. Лавинное усиление начиналось при напряжениях минус 15 В, определен коэффициент лавинного усиления для архитектуры прибора с общей областью поглощения и усиления.

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

Ключевые слова: InGaAs, InP, коротковолновый инфракрасный спектральный диапазон, гетероэпитаксиальные структуры, лавинный $p-i-n$ -фотодиод, матрица фоточувствительных элементов, фотоприемное устройство.

Введение

В настоящее время в опто- и фотоэлектронике развивается ряд новых направлений, связанных с разработкой фотоприемных устройств (ФПУ), работающих в активном-импульсном режиме. Данные фотоприемные устройства построены на матрицах фоточувствительных элементов (МФЧЭ) с лавинным усилением сигнала, что не только существенно увеличивает чувствительность детектирующей оптико-электронной системы по сравнению с обычными матрицами $p-n$ - и $p-i-n$ -фотодиодов [1–3], но и позволяет реализовать усовершенствованные методы регистрации сверхслабых оптических сигналов и обработки 3D-изображений [4–6].

В последнее время в коротковолновой ИК-области спектра (SWIR) лидирующие позиции занимают матричные фотоприемные устройства на основе соединений арсенидов индия-галлия (InGaAs), выращенные методами мосгидридной эпитаксии (МОСГЭ) и молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках InP [1–5]. Данные ФПУ на основе InGaAs показывают уникальные возможности в области детектирования фотосигналов. Подобно оптико-электронным системам

наблюдения, работающим в видимом диапазоне спектра, матричные ФПУ SWIR-диапазона работают по отраженному излучению, что позволяет при смещении области спектральной чувствительности в сторону видимого диапазона проводить детектирование в двух диапазонах – видимом и инфракрасном. Изменяя состав тройного раствора поглощающего слоя InGaAs, можно достигать максимума токовой чувствительности и высокого отношения сигнал/шум для выбранной длины волны при заданном напряжении смещения. Тройные растворы InGaAs на основе соединений InAs/GaAs могут изменять ширину запрещенной зоны от 0,35 эВ (3,5 мкм) для InAs до 1,43 эВ (0,87 мкм) для GaAs. Дополнительно, новые принципы конструирования и обработки данных с помощью матриц лавинных фотодиодов позволяют получать объемное 3D-изображение наблюдаемых объектов и определять их местоположение с высокой точностью, что крайне важно для совершенствования оптико-электронной аппаратуры нового поколения [7–9].

Таким образом, для создания современной инфракрасной оптико-электронной аппаратуры прогнозируемым передовым научно-техническим решением является разработка лавинных матричных коротковолновых фотоприемных устройств, сформированных в гетероэпитаксиальных структурах тройных соединений InP/InGaAs с параметрами, не уступающими лучшим зарубежным и отечественным аналогам, а также разработка методов считывания и обработки сигналов и построения 3D-изображений.

Целью данной работы являлся анализ матричных фотоприемных устройств формата 320x256 элементов на основе гетероэпитаксиальных структур $Al_xGa_{1-x}N$ (ГЭС InGaAs) с $p-i-n$ -фотодиодами, работающих в режиме лавинного усиления.

Яковлева Наталья Ивановна, зам. начальника НИЦ¹.

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК¹, профессор².

Седнев Михаил Васильевич, начальник участка¹.

Патрашин Александр Иванович, ведущий научный сотрудник¹.

Иродов Никита Александрович, инженер¹.

¹ОАО «НПО «Орион»».

Россия, 111396, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2

Тел.: (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт.

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

Статья поступила в редакцию 10 марта 2014 г.

© Яковлева Н.И., Болтарь К.О., Седнев М.В.,

Патрашин А.И., Иродов Н.А., 2014

Изготовление матрицы фоточувствительных элементов

Матрицы фоточувствительных элементов формата 320x256 элементов для работы в режиме лавинного усиления изготавливались на основе гетероэпитаксиальных слоев InGaAs/InP с различным количеством слоев заданного типа проводимости из тройных и четверных соединений арсенидов (InGaAs, AlInAs, AlGaInAs), выращенных методами могибридной эпитаксии с оптимизацией параметров по толщине и уровню легирования в процессе роста [10, 11]. Оптимальная температура роста ГЭС InGaAs составляла $T = 610\text{--}630$ °С, а соотношение мольных долей полупроводниковых соединений A^3B^5 выбиралось, исходя из заданного спектрального диапазона. При условии структурного совершенства исходного материала фундаментальные характеристики, присущие рабочему фоточувствительному слою InGaAs (прямозонная диаграмма, высокие коэффициент поглощения и квантовая эффективность) позволяют достигать максимально возможных фотоэлектрических параметров ФПУ на основе InGaAs [12]. Использование

современного ростового оборудования позволяет в рабочем поглощающем слое получить низкий уровень фоновой концентрации $n = (0,5\text{--}2,0) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и высокие значения подвижности носителей заряда (в пределах $7800\text{--}9000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ для электронов) при температуре $T = 300 \text{ К}$.

Для изготовления матриц фоточувствительных элементов с лавинным усилением сигнала используются два варианта технологии: планарная и мезоструктурная [13]. Планарная технология изготовления матрицы фоточувствительных элементов лучше отработана и дает меньшие значения темновых токов, но требует прецизионного легирования слоев и защитного двухступенчатого кольца. Мезотехнология получения МФЧЭ менее отработана и в настоящее время не обеспечивает малых темновых токов, как в планарном варианте, но более перспективна с точки зрения разделения элементов структуры между собой, что позволяет устранить взаимосвязь между чувствительными элементами. На рис. 1 представлены различные варианты планарной архитектуры для МФЧЭ. На рис. 2 представлен вариант мезоструктуры.

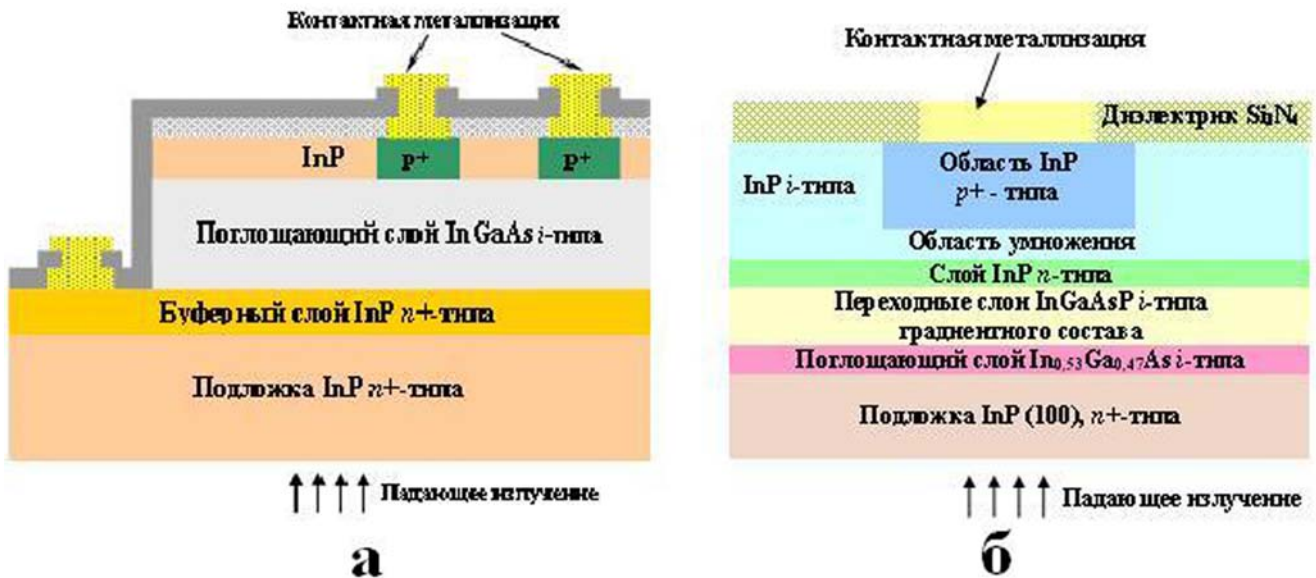


Рис. 1. Архитектура МФЧЭ для лавинного фотоприемного устройства.

а) Классический вариант планарной $p-i-n$ архитектуры.

б) Вариант планарной $p-i-n$ -архитектуры с разделенными слоями поглощения и умножения.

Классический вариант $p-i-n$ -архитектуры представлен на рис. 1, а, и он содержит широкозонную подложку InP, толщина которой составляет ~ 350 мкм; буферный слой InP $n+$ -типа проводимости, к которому формируется n -контакт; поглощающий слой $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ i -типа проводимости; верхний слой широкозонного материала InP, который служит для уменьшения темновых токов и сохранения приемлемого качества границы раздела слаболегированного слоя InGaAs i типа проводимости. Локальный электронно-дырочный переход (область $p+$ -типа) образован диффузией цинка или кадмия [14]. Верхний слой металлизации двухслойной системы (титан/золото) напыляется в вакууме. Она является частью контактной системы, обеспечивающей гибридную считывания сигнала с помощью индиевых микроконтактов.

Данный классический $p-i-n$ -фотодиод можно использовать в лавинном режиме усиления при соответствующих напряжениях смещения. Тогда область поглощения InGaAs i -типа проводимости служит одновременно областью умножения носителей заряда.

Простые гетероструктуры на основе InGaAs/InP для лавинных фотоприемников с единой областью поглощения и умножения вытесняются более сложными гетероструктурами с разделенными областями умножения и поглощения [4, 5, 15]. На рис. 1, б представлен вариант архитектуры МФЧЭ на основе $p-i-n$ -диодов для работы в лавинном режиме из InGaAs/InP, который состоит из следующих слоев: прозрачной в коротковолновой ИК-области спектра подложки из InP $n+$ -типа проводимости; поглощающего слоя $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ i -типа проводимости

толщиной ~1,5 мкм; переходных слоев четверного соединения InGaAsP переменного состава; слоя InP, легированного кремнием Si *n*-типа проводимости с концентрацией доноров $N_D = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и толщиной ~0,3 мкм; слоя InP *i*-типа проводимости, в котором методом диффузии цинка или кадмия формируется область *p*⁺-типа проводимости.

Сверху обе структуры (см. рис. 1, а и б) защищаются диэлектрическим покрытием Si₃N₄, полученным низкотемпературным плазмохимическим осаждением (ПХО). В качестве антиотражающего покрытия используется слой нитрида кремния Si₃N₄. Для вскрытия активной области и контактных окон в пленке нитрида кремния применяется сухое плазмохимическое травление через маску фоторезиста. Для подключения фотодиодов к схеме считывания изготавливаются контакты, которые формируются к области *p*⁺-типа проводимости и к подложке InP. Для подавления краевых эффектов локальный электронно-дырочный переход (область *p*⁺ типа) может формироваться двойной диффузией кадмия Cd или Zn, что определяет более глубокий профиль перехода в центральной области, чем на периферии.

Архитектура МФЧЭ для лавинного ФПУ, реализуемая на основе мезаструктуры в слоях InGaAs/ InP с общей областью поглощения и умножения, представлена на рис. 2.

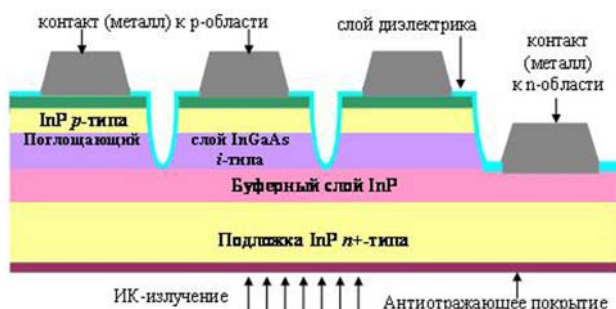


Рис. 2. Мезаструктура матрицы фоточувствительных элементов для лавинного ФПУ.

Гетероструктура разделяется на мезафотодиоды с помощью операции ионно-лучевого травления. Затем напыляется защитное покрытие, в котором с помощью операции травления вскрываются окна до контактных слоев *n*- и *p*-типа проводимости. После этого формируются омические контакты к слоям *n*- и *p*-типа. Излучение поглощается в рабочем слое InGaAs, создавая фототок, включающий генерированные в этом слое носители заряда. Носители заряда диффундируют к *p-n*-переходу на границе раздела со слоем InP, где разделяются электрическим полем, внося вклад в фототок. Лавинное умножение происходит на границе раздела слоев InGaAs и InP. Шум-фактор зависит и может регулироваться коэффициентом лавинного умножения *M*, который, в свою очередь, определяется приложенной к фотодиоду разностью потенциалов и толщиной слоя умножения.

Применение полупроводниковых слоев AlInAs в качестве областей умножения вместо InP позволяет добиться существенного повышения фотоэлектрических параметров лавинных ФПУ. Это достигается, благодаря более высокому отношению коэффициентов ударной ионизации в AlInAs по сравнению с InP. Таким образом,

создание эффективной ГЭС на основе структуры InGaAs/ AlInAs/InP способно обеспечить получение лавинных фотодиодов с более низкими темновыми токами и улучшенными частотными и шумовыми свойствами. Одной из задач улучшения параметров лавинных фотодиодов на основе мезаструктуры является уменьшение поверхностных токов и шумов.

Исследование параметров лавинных фотодиодов

Фотоприемные устройства с лавинным усилением сигнала или лавинные фотомодули на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs так же, как и обычные фотодиодные структуры, построенные на элементах с *p-i-n*-фотодиодами, представляют собой фоточувствительные приборы, в которых при поглощении излучения с энергией фотона $h\nu > \Delta E_g$ (где *h* – постоянная Планка, *ν* – оптическая частота (Гц), ΔE_g – ширина запрещенной зоны полупроводника, происходит генерация электронно-дырочных пар. Неосновные носители заряда, возникающие вследствие поглощения внешнего излучения, диффундируют к переходу, где разделяются полем области пространственного заряда (ОПЗ).

В отличие от ФПУ на основе фотодиодов, работающих при небольших напряжениях смещения, лавинные ФПУ работают при напряжениях смещения, близких к пробивным, для *p-i-n*-архитектуры на основе гетероэпитаксиальных слоев InGaAs/InP, причем напряжение лавинного умножения достигалось при значениях обратного напряжения смещения минус 15 В. Умножение фототока в лавинных ФПУ происходит благодаря ударной ионизации носителей заряда. В сильных электрических полях ($E > 10^4 \text{ В/см}$) носители заряда, проходя путь от одного соударения до другого, приобретают энергию, достаточную для ионизации атомов кристалла и рождения новых электронно-дырочных пар. После соударения первичные и вторичные электроны продолжают двигаться к *n*-области, а вторичные дырки – к *p*-области, создавая новые электронно-дырочные пары. Коэффициенты ударной ионизации электронов и дырок α и β зависят от напряженности электрического поля *E* и свойств материала.

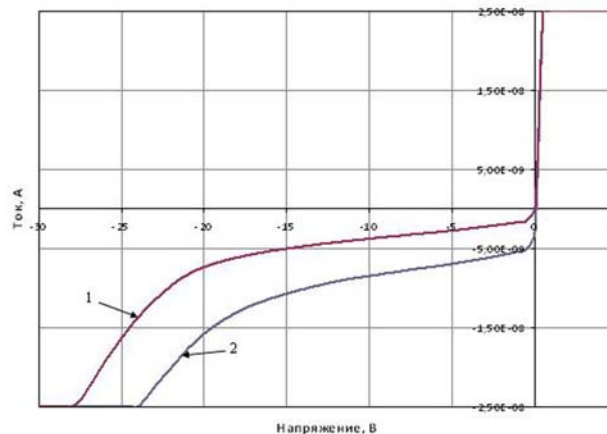


Рис. 3. ВАХ лавинного фотодиода на основе гетероструктуры InGaAs/InP: 1 – ВАХ диода при отсутствии освещения; 2 – ВАХ диода при освещении со стороны подложки структурой излучением на длине волны 1,06 мкм.

Исследования качества ФПУ с лавинным усилением на основе InGaAs проводились по измерениям вольт-амперных характеристик (ВАХ) в темновом режиме и в режиме засветки внешним излучением. ВАХ одного из $p-i-n$ фотодиодов матрицы фоточувствительных элементов на основе арсенидов формата 320x256 элементов с шагом 30 мкм и размером ФЧЭ 20x20 мкм с засветкой внешним излучением и без него приведена на рис. 3.

Матрица фоточувствительных элементов формата 320x256 элементов с шагом 30 мкм и размером ФЧЭ 20x20 мкм на основе ГЭС InGaAs, выращенных методом МОСГЭ, изготавливалась на основе мезаструктуры (рис. 2) с единой областью поглощения и умножения. Из приведенных ВАХ следует, что изготовленные матрицы $p-i-n$ -фотодиодов начинают работать в лавинном режиме при обратном напряжении смещения минус 15 В. При больших значениях обратных напряжений смещения ток начинает изменяться нелинейно за счет эффекта лавинного умножения носителей заряда.

При большом обратном напряжении смещения носители заряда на длине свободного пробега ускоряются электрическим полем до энергий, достаточных для ударной ионизации кристаллической решетки, создавая при этом новые носители заряда, которые также участвуют в ионизации. Процесс ударной ионизации характеризуется средним коэффициентом умножения M , который определяется как отношение суммы фототока и темнового тока в режиме лавинного умножения $I = I_{ph}^* + I_d^*$ к сумме фототока и темнового тока при малых напряжениях смещения $I_0 = I_{ph} + I_d$. При этом величина коэффициента умножения сильно зависит от соотношения коэффициентов ионизации электронов и дырок и выражается, как уже сказано, в виде следующего соотношения:

$$M = \frac{I}{I_0}.$$

На рис. 4 представлены зависимости коэффициента умножения от напряжения.

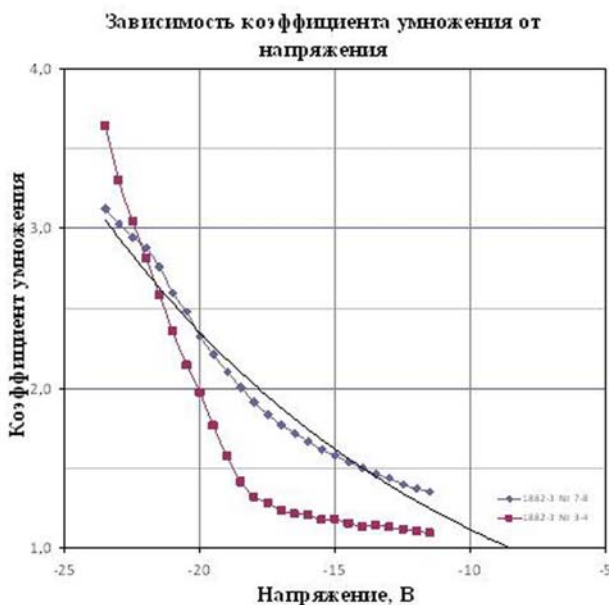


Рис. 4. Зависимости коэффициента умножения от напряжения МФЧЭ, изготовленных на основе ГЭС InGaAs.

Достигнутые на сегодняшний день на изготовленных образцах коэффициенты лавинного усиления фототока невелики – от 2 до 4. Тем не менее, полученные результаты экспериментально подтверждают возможность создания матричных лавинных фотодиодов по разрабатываемой ОАО «НПО «Орион» технологии. Основная проблема при изготовлении МФЧЭ с лавинным усилением состоит в обработке сигнала фотодиодов с большими токами утечек, которые могут привести к пробоем ячейки интегральной схемы считывания сигнала. Поэтому на сегодняшний день основной задачей при выращивании ГЭС InGaAs как методом МОСГЭ, так и молекулярно-лучевой эпитаксией является уменьшение плотности дислокаций и структурных дефектов в фоточувствительном слое InGaAs (InP).

Анализ полученных экспериментальных результатов подтверждает показанную при теоретическом анализе необходимость пространственного разделения областей поглощения и умножения и существенного сокращения толщины области умножения в 5–10 раз для уменьшения коэффициента шума и уменьшения напряжения на подложке МФЧЭ до приемлемых для кремниевых БИС считывания напряжений порядка 5 В.

Заключение

Архитектура матриц $p-i-n$ -фотодиодов на основе тройных и двойных соединений арсенидов InGaAs/InP с заданными электрофизическими характеристиками позволяет реализовывать фотоприемные устройства с параметрами, близкими к лучшим мировым достижениям, в том числе с лавинным усилением сигнала. ФПУ, благодаря лавинному усилению, имеют существенно большую чувствительность по отношению к традиционной архитектуре без внутреннего усиления. При этом они детектируют не только двумерное изображение наблюдаемых объектов, но и получают информацию о дальности объектов наблюдения.

Для уменьшения коэффициента шума и уменьшения напряжения на подложке МФЧЭ до приемлемых для кремниевых БИС считывания напряжений, примерно, 5 В необходимо пространственно разделить области поглощения и умножения слоев, толщина которого, приблизительно, составит 0,1–0,2 мкм.

Литература

1. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. – М.: Физматкнига, 2011.
2. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Современное состояние и магистральные направления развития современной фотоэлектроники. – М.: Физматкнига, 2010.
3. Guellec F., Tchagaspian M., Ballet P., et al. // Proc. SPIE. 2008. V. 6940. P. 69402N(1).
4. Richard M., Heinrichs X, Brian F. Aull, et al. Three-Dimensional Laser Radar with APD Arrays / e-mail: heinrichs@LL.mit.edu.
5. Itzler Mark A., Entwistle Mark, Owens Mark, et al. // Proc. SPIE. 2010. V. 7780. P. 77801M.
6. Ping Yuan, Rengarajan Sudharsanan, Xiaogang Bai, et al. // Proc. SPIE. 2011. V. 8037. P. 803712.
7. Дирочка А.И., Корнеева М.Д., Филачев А.М. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 37.
8. Корнеева М.Д., Пономаренко В.П., Филачев А.М. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 47.
9. Корнеева М.Д., Пономаренко В.П., Филачев А.М. // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 82.

10. Gyuro I., in *Compound Semiconductor Industry Directory*, pp. 58–68 (Elsevier Science Ltd., 1996).
 11. Stringfellow G.B. *Organometallic Vapor-Phase Epitaxy: Theory and Practice* (2nd Edition). Academic Press, New York, 1999.
 12. Olsen G. H. and Ban V. S. // *Solid State Technology*. 1987. No. 2. P. 99.

13. Болтарь К.О., Чинарева И.В., Лопухин А.А., Яковлева Н.И. // *Прикладная физика*. 2013. № 5. С. 10.
 14. Demiguel Stéphane // *Proc. SPIE*. 2009. V. 7298. P. 729836.
 15. Андреев Д.С., Залетаев Н.Б., Хакуашев П.Е. и др. // *Прикладная физика*. 2013. № 6. С. 76

SWIR ADP FPAs based on InGaAs heterostructures

N. I. Yakovleva¹, K. O. Boltar^{1,2}, M. V. Sednev¹, I. A. Patrashin¹, and N. A. Irodov¹

¹ORION RD&P Center
 46/2 Entuziastov shosse, Moscow, 111123, Russia
 E-mail: orion@orion-ir.ru

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

Received March 10, 2014

SWIR ADP 320x256 FPAs based on p-i-n photodiodes in InGaAs heterostructures have been developed and investigated. The typical InGaAs/InP PIN heterostructures are formed by Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE) on n⁺-type InP substrates. The InGaAs/InP PIN photodiodes performance have been estimated by measuring current-voltage characteristics. APD arrays are designed using a mesa-passivated avalanche photodiode device array of p-i-n junctions in heterostructure with common absorption and multiplication regions. The optimal operating point for managing avalanche application depended on various factors has been started at 15 V bias and the multiplication coefficient was of 2-4.

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

Keywords: InGaAs, InP, SWIR, heterostructures, avalanche p-i-n photodiode, FPA, photo detector.

References

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
2. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *The Current Status and Main-Line Trackage for Development of Photoelectronics* (Fizmatkniga, Moscow, 2010) [in Russian].
3. F. Guellec, M. Tchagaspanian, P. Ballet, et al., *Proc. SPIE* **6940**, 69402N(1) (2008).
4. M. Richard, X. Heinrichs, F. Brian, et al., *Three-Dimensional Laser Radar with APD Arrays* (e-mail: heinrichs@LL.mit.edu).
5. Mark A. Itzler, Mark Entwistle, Mark Owens, et al., *Proc. SPIE* **7780**, 77801M (2010).
6. Ping Yuan, Rengarajan Sudharsanan, Xiaogang Bai, et al., *Proc. SPIE* **8037**, 803712 (2011).
7. A. I. Dirochka, M. D. Korneeva, and A. M. Filachev, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 37 (2011).
8. M. D. Korneeva, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 47 (2011).
9. M. D. Korneeva, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 82 (2011).
10. I. Gyuro, in *Compound Semiconductor Industry Directory*, (Elsevier Science Ltd., 1996), pp. 58–68.
11. G. B. Stringfellow. *Organometallic Vapor-Phase Epitaxy: Theory and Practice*, 2nd Edition (Academic Press, New York, 1999).
12. G. H. Olsen and V. S. Ban, *Solid State Technology*, No. 2, 99 (1987).
13. K. O. Boltar, I. V. Chinareva, A. A. Lopukhin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 10 (2013).
14. Stéphane Demiguel, *Proc. SPIE* **7298**, 729836 (2009).
15. D. S. Andreev, N. B. Zaletaev, P. E. Khakuashev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 76 (2013).