

УДК 621.383.4/5

Матричные фотоприемные модули ультрафиолетового диапазона спектра на основе гетероэпитаксиальных структур AlGaN

И.Д. Бурлаков, К.О. Болтарь, Н.И. Яковлева, Н.В. Кравченко,
М.В. Седнев, Д.В. Смирнов, Н.А. Иродов

Разработаны матричные ультрафиолетовые фотоприемные модули формата 320×256 элементов на основе гетероэпитаксиальных структур $Al_xGa_{1-x}N$ (ГЭС AlGaN), чувствительные в видимом-слепом и солнечно-слепом диапазонах УФ-диапазона. ГЭС AlGaN выращивались методами моcгидридной эпитаксии (МОС) и молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на сапфировых подложках. Для считывания фотосигнала с матриц $p-i-n$ -фотодиодов использовалась БИС считывания на основе трансимпедансного усилителя с емкостной обратной связью. Качество $p-i-n$ -фотодиодов оценивалось по измерению вольтамперных характеристик. Темновые токи, измеренные между разделенными элементами в мезоструктуре, составили менее 10^{-13} А, а сопротивление более $3 \cdot 10^{13}$ Ом.

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

Ключевые слова: AlGaN, GaN, ультрафиолетовый спектральный диапазон, гетероэпитаксиальные структуры, $p-i-n$ -фотодиод, матрица фоточувствительных элементов, ультрафиолетовый фотоприемный модуль.

Введение

Актуальность применения солнечно-слепых (СС) и видимо-слепых (ВС) ультрафиолетовых фотоприемных модулей (УФМ) на основе двойных и тройных соединений GaN/AlGaN определяются высокой эффективностью, фотоэлектрическими параметрами, малым весом, приемлемыми габаритными показателями. УФМ предназначены для применения в оптико-электронных системах различного назначения [1, 2].

Бурлаков Игорь Дмитриевич, зам. генерального директора¹, профессор³.

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК¹, профессор².

Яковлева Наталья Ивановна, зам. начальника НИЦ¹.

Седнев Михаил Васильевич, начальник участка¹.

Кравченко Николай Владимирович, начальник ПТК¹.

Смирнов Дмитрий Валентинович, инженер¹.

Иродов Никита Александрович, инженер¹.

¹ ОАО «НПО «Орион»».

Россия, 111396, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2
Тел.: (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт.

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

³ Московский институт радиоэлектроники и автоматики (МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78

Статья поступила в редакцию 3 июня 2013 г.

© Бурлаков И.Д., Болтарь К.О., Яковлева Н.И., Седнев М.В., Кравченко Н.В., Смирнов Д.В., Иродов Н.А., 2013

В настоящее время в России и за рубежом основное внимание уделяется технологии производства высококачественных нитридных соединений для детектирования в УФ-диапазоне. На сегодняшний день разработаны: фоторезисторы [3], диоды Шоттки [4, 5, 6], фотодиоды на основе $p-n$ -переходов [7], лавинные фотодиоды [8] и фототранзисторы.

Фотодиоды на основе $p-n$ -переходов привлекательны благодаря высоким напряжениям пробоя и высоким скоростям носителей заряда, что обеспечивает возможность быстрого преобразования оптического сигнала в электрический при высоких температурах детектирования [9]. Фотоприемники на основе структур с барьером Шоттки обладают высоким быстродействием и квантовой эффективностью. Фотоприемники на основе лавинных диодов имеют высокое усиление фотосигнала над уровнем помех и шумов, что в перспективе необходимо для работы в высокочувствительном режиме Гейгера, когда возможна регистрация одиночных фотонов. Наиболее перспективными считаются $p-i-n$ -фотодиоды на основе гетероэпитаксиальных структур AlGaN/GaN, которые позволяют реализовать наибольшие значения обнаружительной способности и вольтовой чувствительности. В настоящее время разработки фотоприемников ультрафиолетового диапазона спектра активно проводятся как в России [10–12], так и за рубежом [13].

Для создания современной оптико-электронной отображающей аппаратуры прогнозируемым передовым научно-техническим решением является разработка технологии матричных ультрафиолетовых фотоприемных устройств, сформированных в гетероэпитаксиальных УФ-структурах двойных и тройных соединений GaN/AlGaN с параметрами, не уступающими зарубежным и отечественным аналогам.

Целью данной работы являлась разработка матричных УФМ формата 320×256 элементов на основе гетероэпитаксиальных структур $Al_xGa_{1-x}N$ (ГЭС AlGaN), чувствительных в видимом-слепом и солнечно-слепом секторах УФ-диапазона.

Изготовление матрицы фоточувствительных элементов

Матрицы фоточувствительных элементов формата 320×256 элементов на основе нитридов изготавливались на основе гетероэпитаксиальных слоев GaN/AlGaN, выращенных методами осаждения из металлоорганических соединений (МОС) и молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Отработка отдельных технологических процессов изготовления матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) проводилась на основе гетероэпитаксиальных структур с различным количеством слоев заданного типа проводимости из двойных и тройных соединений нитридов. После проведения отработки технологических процессов наиболее перспективной была признана архитектура, представленная на рис. 1.

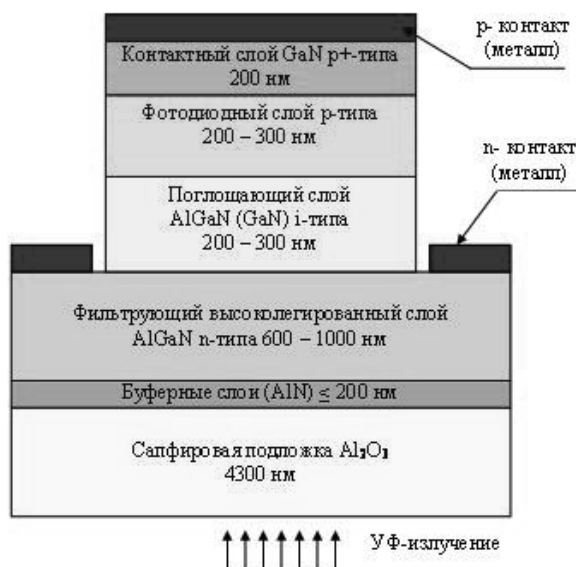


Рис. 1. Схематическое представление $p-i-n$ -архитектуры для ультрафиолетовой матрицы

Выбранная $p-i-n$ -архитектура на основе гетероструктуры из AlGaN/GaN состояла из:

- прозрачной в УФ-диапазоне спектра сапфировой подложки;
- буферного слоя AlN для уменьшения плотности дислокаций в последующих слоях структуры;
- высоколегированного фильтрующего, уменьшающего плотность дефектов слоя AlGaN n^+ -типа проводимости, состав которого зависел от выбранного типа ФПУ (солнечно-слепой диапазон – $Al_{0,64}Ga_{0,36}N$; видимо-слепой диапазон – $Al_{0,23}Ga_{0,77}N$) и к которому формировался N -контакт. Данный слой имеет ширину запрещенной зоны, большую по сравнению с поглощающим слоем, для того чтобы фотоны могли достигать рабочего фоточувствительного слоя, не поглощаясь в нем. Состав фильтрующего слоя определяет коротковолновую границу спектральной чувствительности;
- поглощающего слоя (солнечно-слепой диапазон – $Al_{0,45}Ga_{0,55}N$; видимо-слепой диапазон – GaN) собственного типа проводимости с шириной запрещенной зоны, обеспечивающей эффективное поглощение излучения в заданном спектральном диапазоне, состав которого определял длинноволновую границу спектральной чувствительности;
- фотодиодного слоя $Al_{0,45}Ga_{0,55}N$ (GaN) p -типа проводимости;
- высоколегированного слоя GaN p^+ -типа проводимости, к которому формировался p -контакт.

Технология изготовления ультрафиолетового фотоприемного модуля формата 320×256 элементов на основе гетероэпитаксиальных структур AlGaN представляла собой совокупность большого числа технологических операций, оптимальная организация которых имела большое значение для производства изделия данного формата. Наиболее критическими технологическими операциями изготовления ФПУ являлись:

- прецизионное формирование мезоструктур в ГЭС AlGaN;
- формирование омических контактов к областям p - и N -типов проводимости;
- измерение сверхмалых значений темнового тока;
- контроль функционирования кремниевой БИС на основе трансимпедансного усилителя.

Для считывания сигнала с матриц ФЧЭ на основе AlGaN использовалась кремниевая БИС считывания с входной ячейкой, выпол-

ненной на основе емкостного трансимпедансного усилителя (СТИА) в отличие от ФПУ средневолнового и длинноволнового инфракрасного диапазонов спектра, в которых применяется схема входной ячейки с прямой инжекцией (DI). Использование данного типа входной ячейки обусловлено низкими темновыми токами и низким уровнем шума $p-i-n$ -фотодиодов из AlGaIn. По сути, в настоящее время уровень шумов ФПУ определяется шумом БИС считывания, а не собственным шумом AlGaIn-фотодиодов.

Прецизионное формирование мезаструктур в ГЭС AlGaIn

Группа нитридов благодаря своей химической инертности является сложной для проведения операции химического травления. Прочные связи в кристаллической решетке являются характерными признаками для нитрида галлия GaN по сравнению с другими полупроводниками. Энергия химической связи атомов кристаллической решетки для GaN составляет 8,92 эВ/атом, а для AlN – 11,52 эВ/атом, соответственно. Условия проведения и режимы травления элементов группы нитридов значительно отличаются от кремния, фосфида галлия и других полупроводников с хорошо изученными процессами травления. Поэтому для разработки процессов травления полупроводниковых соединений (Al)GaN проводились обширные исследования. Вследствие ограниченных возможностей жидкостного травления основные усилия были направлены на разработку методов сухого ионно-лучевого травления.

Процесс проводился на стандартном технологическом оборудовании, при этом энергия ионов аргона Ar^+ в пучке составила $U = 1$ кэВ, плотность ионного тока $-J = 200$ мкА/см². Охлаждение рабочего столика с образцом до тем-

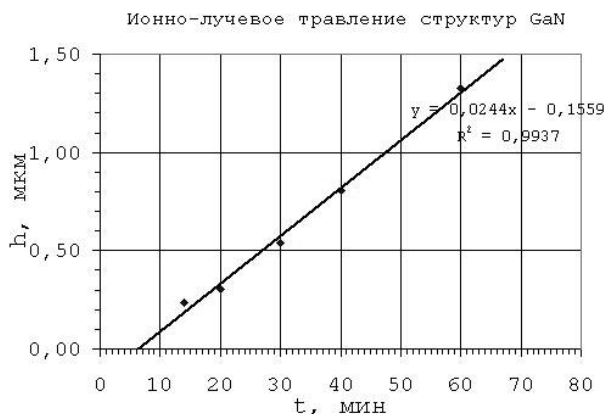


Рис. 2. Зависимость глубины травления от времени травления.

пературы $t = -5$ °С позволило использовать в качестве маски фоторезист. Время травления варьировалось в зависимости от толщины эпитаксиальных слоев. Зависимость глубины травления от времени показана на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что зависимость глубины травления от времени с достоверностью 99% аппроксимируется прямой линией. Угол наклона этой прямой определяет скорость травления, которая составила $V = 0,0244$ мкм/мин. Сдвиг по оси времени позволил определить время, необходимое для обработки поверхности до начала травления GaN, которое составило $t_0 = 6,4$ мин.

На рис. 3 представлены результаты обработки технологического процесса ионного травления и формирования тестовой мезаструктуры. Значение глубины травления составило порядка 1 мкм, а ширина травленного канала – 6 мкм.

Формирование омических контактов

При эксплуатации важно, чтобы полупроводниковый прибор подключался к внешнему устройству без существенного изменения его вольтамперной характеристики и дополнительного падения напряжения. Это может быть достигнуто только с помощью низкоомных омических контактов к рабочим слоям структуры. Омические контакты должны быть стабильными термически и химически.

Идеальный контакт возникает в том случае, когда при соединении с полупроводником не возникает барьера для потока носителей заряда при подаче положительного или отрицательного напряжения смещения. Это условие выполняется, если работы выхода полупроводника и металла близки по значению и не возникает поверхностных состояний, которые смещают уровень Ферми. Из-за больших значений работы выхода полупроводниковых соединений на основе нитридов имеются трудности с выбором

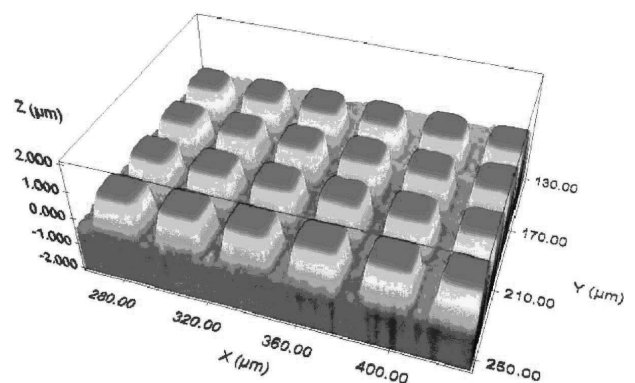


Рис. 3. Формирование мезаструктур в ГЭС AlGaIn.

металла, который бы позволил обеспечить идеальное значение работы выхода для создания омического контакта с полупроводником. Кроме того, работа выхода полупроводника может существенно изменяться при изменении уровня легирования. Фактически для широкозонных полупроводников, таких как GaN (AlGaN) и других соединений на основе нитридов, не существует металла с достаточно большой работой выхода, чтобы сформировать идеальный омический контакт к материалу p -типа проводимости. Условия усложняются при больших эффективных массах носителей заряда, что характерно для широкозонных полупроводников. Поэтому для формирования омических контактов исследовались следующие возможности, а именно, высокий уровень легирования поверхности контактного слоя и химическое воздействие на поверхность полупроводника.

Высокий уровень легирования достигался специальным выращиванием верхнего высоколегированного p^+ -слоя с концентрацией носителей заряда $N_A \geq 10^{18} \text{ см}^{-3}$. При этом реализуется режим полевой эмиссии, который характерен для сильнолегированных полупроводников, в которых область обеднения мала настолько, что даже холодные электроны, находящиеся на уровне дна зоны проводимости или на уровне энергии, соответствующей уровню Ферми, могут туннелировать из полупроводника в металл. При условии невозможности подобрать работы выхода металла и полупроводника это именно тот случай, который позволяет наиболее близко подойти к обеспечению омических контактов, хотя при этом должна быть обеспечена очень высокая концентрация легирующих примесей [14].

Для создания контакта к контактному p^+ -GaN-слою использовалась металлическая система Ni/Au. Предварительно перед формированием контактов поверхность для слоя GaN проводилась ионная обработка для увеличения количества дефектов за счет механического повреждения поверхности. Дополнительно для улучшения качества контактов проводился отжиг при температуре $t = 600 \text{ }^\circ\text{C}$. Чистота источника Ni контролировалась методом Оже-спектроскопии и составила 99,6%. Оба слоя металла напылялись в течение единого процесса методом электронно-лучевого испарения. Толщина Ni составила 30 нм, толщина Au – 100 нм.

Для создания омического контакта к контактному N^+ -AlGaN-слою использовалась металлическая система Ti/Al/Ni/Au, где Ti уменьшает высоту барьера, а Al – это контакт,

образующий металл. Напыление указанных металлических слоев проводилось путем магнетронного распыления. Толщины Ti/Al составили 30 и 150 нм, толщины Ni/Au составили 30/100 нм, соответственно.

Измерения ВАХ проводились с помощью анализатора параметров полупроводников фирмы Hewlett Packard. Контакты, полученные к AlGaN N^+ -типа и GaN N^+ -типа проводимости, были омическими сразу после напыления (см. рис. 4).

Исследование образцов УФ-фотодиодов

Исследованы матрицы УФ-фотодиодов, изготовленные в структурах ГЭС AlGaN, выращенных методами МОС-гидридной (ОАО «Полюс», ООО «Элма-Малахит») и молекулярно-лучевой (ИФП СО РАН) эпитаксии. Структуры, изготовленные обоими методами, имели архитектуру, представленную на рис. 1, и были пригодны для изготовления ультрафиолетовых фотоприемных устройств как солнечно-слепого, так и видимо-слепого диапазонов УФ-области спектра. Спектральная характеристика для элемента солнечно-слепой матрицы фотодиодов формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм представлена на рис. 5.

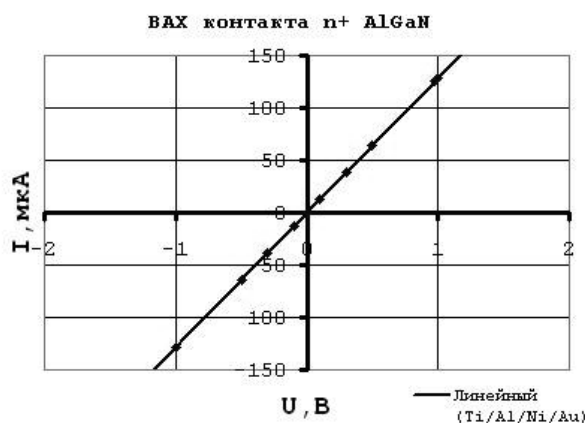


Рис. 4. ВАХ контакта Me -AlGaN N^+ -типа проводимости.

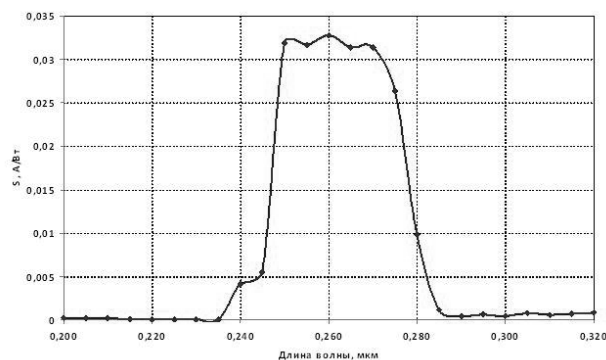


Рис. 5. Спектральная характеристика чувствительности фотодиода солнечно-слепого диапазона.

Исследования качества матриц $p-i-n$ -фотодиодов УФМ проводились по измерениям вольтамперных характеристик. Полученные ВАХ для лучших фотодиодов в ГЭС AlGaIn, изготовленных методами МОС и МЛЭ, имеют малые токи утечек и сопротивление более $3 \cdot 10^{13}$ Ом, что позволяет изготавливать УФМ как для видимо-слепых, так и солнечно-слепых применений с фотоэлектрическими характеристиками, соответствующими лучшим зарубежным аналогам. ВАХ тестового фотодиода матрицы фоточувствительных элементов на основе нитридов формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм и размером ФЧЭ 24×24 мкм видимо-слепого спектрального диапазона приведена на рис. 6.

Из приведенных ВАХ следует, что изготовленные матрицы $p-i-n$ -фотодиодов работоспособны в широком диапазоне обратных напряжений смещения от 0 до минус 6 В. При больших значениях обратных напряжений смещения ток изменяется нелинейно. Темновые токи, измеренные между разделенными эле-

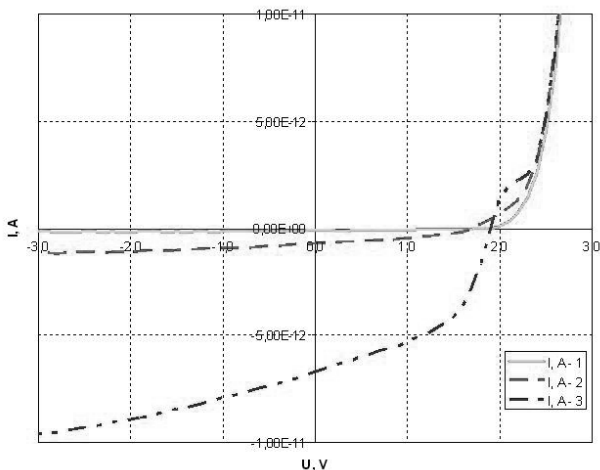


Рис. 6. ВАХ фотодиода: 1 – ВАХ тестового диода при отсутствии освещения; 2 и 3 – ВАХ тестового диода при освещении со стороны подложки структуры излучением светодиода спектрального диапазона 265 нм с малым и большим уровнем освещенности излучения до 10^{-4} Вт/см².

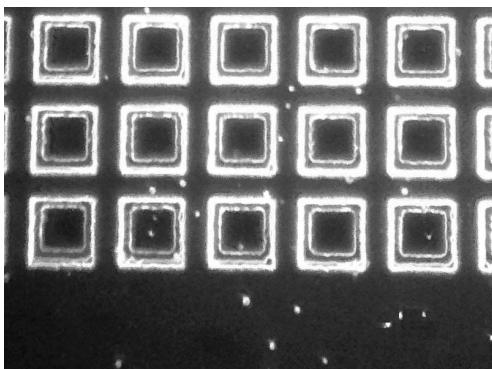


Рис. 7. Изображение фрагмента матрицы фотодиодов в темном поле микроскопа.

ментами в ВС и СС мезоструктурах составили менее 10^{-13} А, а сопротивление более $3 \cdot 10^{13}$ Ом. У изготовленных матриц имеется чувствительность к УФ-излучению.

Основная проблема при изготовлении МФЧЭ состоит в большом количестве фотодиодов с большими токами утечек, которые приводят к дефектным элементам в УФМ, поскольку требование к токам утечек и дифференциальному сопротивлению фотодиодов на несколько порядков выше, чем требования для светодиодов УФ-диапазона из этого полупроводникового материала. На рис. 7 представлено изображение фрагмента матрицы фотодиодов в темном поле микроскопа, изготовленной в ГЭС AlGaIn, выращенной методом МЛЭ.

На этом рисунке отчетливо видны светящиеся точки, соответствующие дефектам структуры AlGaIn. Фотодиоды, содержащие указанные структурные дефекты, имеют повышенные токи утечки и рассматриваются как дефектные элементы УФМ. Поэтому на сегодняшний день основной задачей при выращивании ГЭС AlGaIn как методом МОС, так и МЛЭ является уменьшение плотности дислокаций и структурных дефектов в фоточувствительном слое AlGaIn (GaIn).

Заключение

Топология матриц $p-i-n$ -фотодиодов на основе тройных и двойных соединений нитридов AlGaIn/GaIn с заданными электрофизическими характеристиками позволяет реализовывать фотоприемные модули с параметрами, близкими к лучшим мировым достижениям.

Изготовление фотодиодных матриц формата 320×256 элементов на основе мезоструктур из AlGaIn/GaIn видимо-слепого и солнечно-слепого диапазонов проводилось методом ионно-лучевого травления. Качество $p-i-n$ -фотодиодов оценивалось по измерению вольтамперных характеристик. Темновые токи, измеренные между разделенными элементами в мезоструктуре составили менее 10^{-13} А, а сопротивление более $3 \cdot 10^{13}$ Ом.

Литература

1. Long J.P., Varadaraajan S., Matthews J., and Schetzina J.F. // Opto-ElectroN. Rev. 2002. V. 10. No. 4. P. 251
2. Khan M. Asif, Shatalov M., Maruska H.P., et Al. // JournAl of Applied Physics. 2005. V. 44. No. 10. P. 7191
3. Khan M.A., Kuznia J.N., Olson D.T., et Al. // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 60. P. 2917
4. Khan M.A., Kuznia J.N., Olson D.T., et Al. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63. P. 2455.

5. Katz O., Garber V., Meyler B., et Al. // Appl. Phys. Lett. 2001. V.79. P. 1417
6. Katz O., Bahir G., and Salzman J. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. P. 4092.
7. Chen Q., Khan M.A., Sun C.J., and Yang J.W. // ElectroN. Lett. 1995. V. 31. P. 1781.
8. McClintock Ryan, Cicek Erdem, Vashaei Zahra, et Al. // Proc. of SPIE. 2007. V. 7780. P. 77801B-2-13.
9. Cohen Zhu T., Liu L., et Al. // IEEE APES AustiN. 2005. P. 311
10. Бурлаков И.Д., Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Гринченко Л.Я., // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 6. С. 46
11. Бурлаков И.Д., Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Журавлев К.С. // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 7. С. 37
12. Алтухов А.А., Митягин А.Ю., Клочкова А.М., Орлова Г.А. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. № 3. С. 3
13. Reine M.B. etc. // Proc. of SPIE. 2006. V. 6119. P. 611901-1
14. Stratton R. (1969) Tunneling in Schottky barrier rectifiers, in Tunneling Phenomena in Solids, 1967 NATO Advanced Study Institute at RisE Demmark (eds E. Burstein and S. Lundqvist), Plenum Press, New York.

UV FPAs based on AlGaN heterostructures

*I.D. Burlakov, K.O. Boltar, N.I. Iakovleva, N.V. Kravchenko, M.V. Sednev,
D.V. Smirnov, N.A. Irodov*

Orion R&P AssociatiON
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

UV visible-blind and solar-blind 320×256 FPAs based on the $Al_xGa_{1-x}N$ heterostructures have been developed and investigated. $Al_xGa_{1-x}N$ heterostructures were grown by both MOCVD and MBE methods on sapphire substrates. The readout circuit (ROIC) on the basis of the capacitive transimpedance amplifier (CTIA) was used to integrate and read AlGaN p-i-n photodiodes currents. The dark current of AlGaN p-i-n photodiodes in mesa-structure with pitch 30 μm was less than 10^{-13} A and differential resistance was more than $3 \cdot 10^{13}$ Ohm.

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

Keywords: AlGaN, GaN, UV range, heterostructures, p-i-n photodiode, FPA, UV detector module.

Bibliography – 14 references

Received June 3, 2013