

УДК 621.383.4/5

**Фотоприемные модули на основе гетероэпитаксиальных структур AlGaN**

*К.О. Болтарь, Н.И. Яковлева, Н.В. Кравченко,  
М.В. Седнев, А.В. Никонов, М.А. Трищенко*

*Исследованы матричные ультрафиолетовые фотоприемные модули (УФМ) формата 320x256 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 молибденной эпитаксии (МОС) и молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на сапфировых подложках. Качество  $p-i-n$ -фотодиодов оценивалось по измерению вольт-амперных характеристик.*

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

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

**Введение**

В настоящее время разработки фотоприемников ультрафиолетового (УФ) диапазона спектра активно проводятся как в России [1–3], так и за рубежом [4]. В Государственном научном центре «НПО «Орион» проводятся разработки по созданию ультрафиолетовых матричных фотоприемных устройств на основе группы нитридов для современной оптико-электронной отображающей аппаратуры ультрафиолетового диапазона спектра. Фотоприемные устройства и фотоприемные оптико-электронные системы на основе ультрафиолетовых матриц, сформированных в гетероэпитаксиальных УФ-структурах двойных и тройных соединений GaN/AlGaN с высоким значением обнаружительной способности порядка  $10^{13}$  см<sup>2</sup>·Вт<sup>-1</sup>·Гц<sup>1/2</sup> предназначены для решения широкого круга задач, в том числе для полного спектрального исследования Солнца и космического пространства.

Среди задач в ультрафиолетовой области спектра наиболее актуальными являются прогнозы

влияния изменчивости Солнца на глобальные изменения климата Земли, озоносферу, среднюю, верхнюю атмосферу, а возможно, и биосферу, в том числе через изменчивость космической погоды.

Указанные исследования возможны только при построении новых оптико-электронных систем космического мониторинга [5, 6] с использованием фотоприемных устройств ультрафиолетового диапазона спектра, основой которых являются матрицы фоточувствительных элементов, построенные на фоторезисторах [7], диодах Шоттки [8–10], фотодиодах с  $p-n$ -переходами [11] и лавинных фотодиодах [12].

Особое внимание при создании УФ-модулей (УФМ) уделялось вопросам обеспечения требуемых уровней технических и фотоэлектрических характеристик при эксплуатации. Проведено исследование схем накопления и инжекции фототока в БИС считывания [13]. Сделан выбор схемы считывания с трансимпедансным усилителем для минимизации шумов при преобразовании оптического сигнала в электрический.

**Исследуемые образцы матриц фоточувствительных элементов**

Тип матрицы фоточувствительных элементов диктуется решаемой задачей и условиями эксплуатации фотоприемного устройства. 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 [14]. Фотоприемники на основе структур с барьером Шоттки обладают

Болтарь Константин Олегович, нач. НТК<sup>1</sup>, профессор<sup>2</sup>.

Яковлева Наталья Ивановна, зам. нач. НИЦ<sup>1</sup>.

Кравченко Николай Владимирович, нач. ПТК<sup>1</sup>.

Седнев Михаил Васильевич, нач. участка НТК<sup>1</sup>.

Никонов Антон Викторович, инженер НИЦ<sup>1,2</sup>.

Трищенко Михаил Алексеевич, вед. спец. ПТК<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>ОАО «НПО «Орион»».

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

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

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт.

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

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2013 г.

© Болтарь О.К., Яковлева Н.И., Кравченко Н.В., Седнев М.В., Никонов А.В., Трищенко М.А., 2013

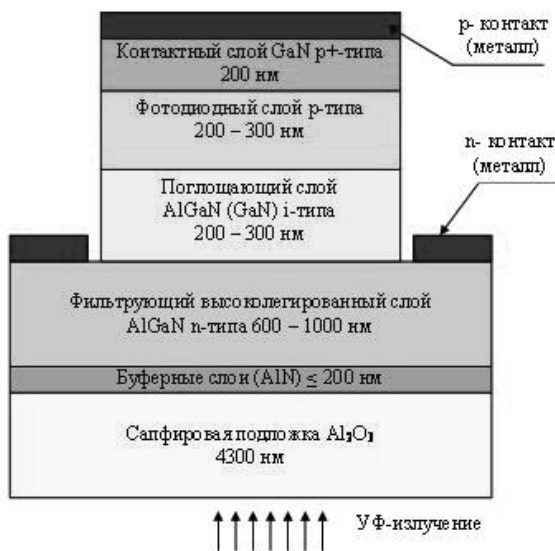


Рис. 1. Схематическое представление  $p-i-n$  архитектуры для ультрафиолетовой матрицы

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 AlGaIn/GaN, которые позволяют реализовать наибольшие значения обнаружительной способности и вольтовой чувствительности.

Технология изготовления матриц фоточувствительных элементов ультрафиолетового фотоприемного модуля формата 320x256 элементов на основе гетероэпитаксиальных структур AlGaIn представляла собой совокупность технологических операций, наиболее критическими из которых являлись:

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

Матрицы фоточувствительных элементов формата 320x256 элементов на основе нитридов изготавливались на основе гетероэпитаксиальных слоев GaN/AlGaIn, 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 ко-

личеством слоев заданного типа проводимости из двойных и тройных соединений нитридов. После проведения отработки технологических процессов наиболее перспективной была признана архитектура, представленная на рис. 1.

Выбранная  $p-i-n$ -архитектура на основе гетероструктуры из AlGaIn/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 AlGaIn  $n+$ -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.

Для считывания сигнала с матриц ФЧЭ на основе AlGaIn использовалась кремниевая БИС считывания с входной ячейкой, выполненной на основе емкостного трансимпедансного усилителя (СТИА). Использование данного типа входной ячейки обусловлено низкими темновыми токами и низким уровнем шума  $p-i-n$ -фотодиодов из AlGaIn.

#### Формирование мезаструктур в ГЭС AlGaIn

Кристалл матрицы формата 320x256 (с шагом 30 мкм) имел габаритные размеры фоточувствительной области 9,6x7,7 мм. Толщина эпитаксиальных фоточувствительных и фотодиодных слоев нитридов, выращенных на подложках  $Al_2O_3$ , выбиралась из условия достижения максимальной квантовой эффективности и составляла от 0,2 до 0,3 мкм. Фотодиодная матрица формировалась

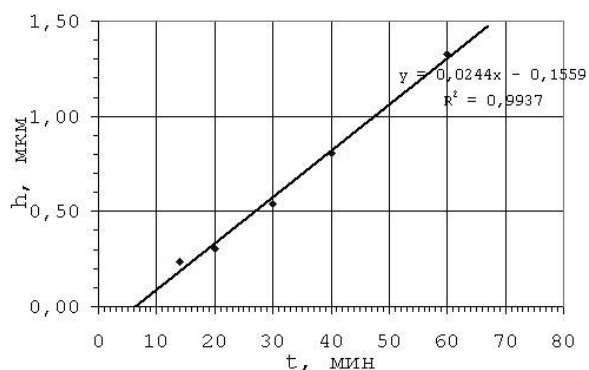


Рис. 2. Зависимость глубины травления от времени травления

с помощью разделения верхних эпитаксиальных слоев на мезообласти, составляющие отдельно выделенные элементы.

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 [15]. 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, ионный ток —  $J = 200$  мкА/см<sup>2</sup>. Охлаждение рабочего столика с образцом до температуры  $T = -5$  °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.

На 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 отработки технологического процесса ионного травления и формирования тестовой мезаструктуры. Значение

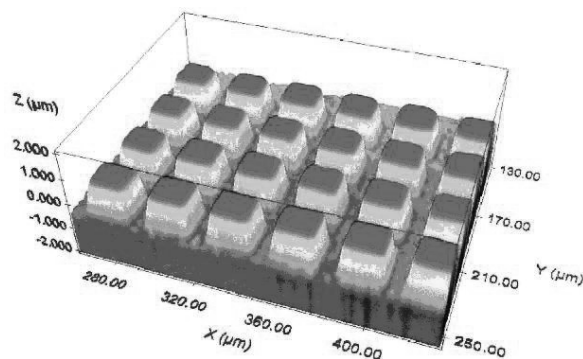


Рис. 3. Формирование мезаструктур в ГЭС AlGaIn

ние глубины травления составило порядка 1 мкм, а ширина травленного канала — 6 мкм.

Фотодиоды защищались диэлектрическим покрытием SiO<sub>2</sub> или Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. В центре каждого элемента матрицы фоточувствительных элементов на основе AlGaIn формировались контактные окна 0,016×0,016 мм, металлизация в которых обеспечивала p-контакт к каждому фотодиоду. По периферии кристалла располагались металлизированные контактные окна к базовой области n-типа проводимости, общей для всех фотодиодов матрицы. Для контакта с кремниевой БИС на p- и n-контактах выращивались индиевые столбики.

### 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 заряде 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 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 (AlGaIn) и других соединений на основе нитри-

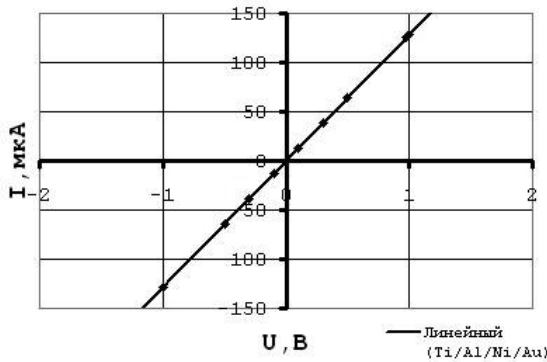


Рис. 4. ВАХ контакта Me-AlGaN  $n^+$ -типа проводимости

дов, 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: высокий уровень легирования поверхности контактного слоя и химическое воздействие на поверхность полупроводника.

Высокий уровень легирования достигался специальным выращиванием верхнего высолегированного  $p^+$ -слоя с концентрацией носителей заряда  $N_A \geq 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . При этом реализуется режим полевой эмиссии, который характерен для сильно легированных 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 [16].

Для создания контакта к  $p^+$ -GaN контактно-му слою использовалась металлическая система Ni/Au. Предварительно перед формированием контактов поверхность слоя GaN подвергалась ионной обработке 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 составила 100 нм.

Для создания омического контакта к контактно-му  $n^+$ -слою AlGaN использовалась металлическая система Ti/Al/Ni/Au, где Ti — уменьшает высоту барьера, Al — 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 (рис. 4).

### Исследование образцов УФ

Исследованы матрицы УФ-фотодиодов, изготовленные в структурах ГЭС AlGaIn, выращенных методами МОС-гидридной (ОАО «Полус», 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.

Исследования качества матриц  $p-i-n$ -фотодиодов УФ-модулей 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  $3 \cdot 10^{13} \text{ Ом}$ , 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 320x256 элементов с шагом 30 мкм и размером ФЧЭ 24x24 мкм<sup>2</sup> видимо-слепого спектрального диапазона приведена на рис. 5. Кривая 1 — ВАХ тестового диода при отсутствии освещения. Кривые 2 и 3 получены при освещении со стороны подложки структуры излучением светодиода спектрального диапазона 265 нм с малым и большим уровнем освещенности излучения до  $10^{-4} \text{ Вт/см}^2$ .

В  $p-i-n$ -фотодиодах, изготовленных из широкозонных материалов на основе двойных и тройных соединений нитридов алюминия-галлия, концентрация неосновных носителей заряда мала, и, следовательно, диффузия носителей не является доминирующей составляющей темного тока. Из-за большой ширины запрещенной зоны вклад туннельного тока также мал. Поэтому генерационно-рекомбинационные процессы и токи утечек

вносят основной вклад в темновой ток. Для обратных смещений возможными механизмами, имеющими заметный вклад в проводимость фотодиодов на основе GaN, являются прыжковая проводимость, ток Пула-Френкеля, а также токи утечки [17].

При аппроксимации прямой ветви вольтамперной характеристики фотодиода формулой вида

$$I_{\text{фл}}(V) = I_0 \cdot \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right)$$

можно вычислить параметр неидеальности  $n$ , который характеризует его качество фотодиода. При исследованиях ВАХ фотодиодов на основе нитридов было получено, что параметр неидеальности  $n$  практически всегда превышает значение  $n > 2$ . Объяснение высоких значений коэффициентов неидеальности (теоретические значения для диффузионного и генерационного-рекомбинационного токов, соответственно, равны  $n = 1$  и  $n = 2$ ), изложено в работе [18] и может быть связано с формированием контактов к  $p$ -слою проводимости  $p-i-n$ -фотодиода. Известно, что изготовление омического контакта к  $p$ -области является одной из наиболее технологически трудных операций при изготовлении фотодиодов для соединений нитридов AlGaN [19] из-за невозможности выбора металла с нужной работой выхода. Уменьшение коэффициента неидеальности ВАХ достигается дополнительным легированием контактного слоя  $p^+$ -типа проводимости.

Основная проблема при изготовлении МФЧЭ состоит в большом количестве фотодиодов с большими токами утечек, которые приводят к дефектным элементам в УФМ, т.к. требование к токам утечек и дифференциальному сопротивлению фо-

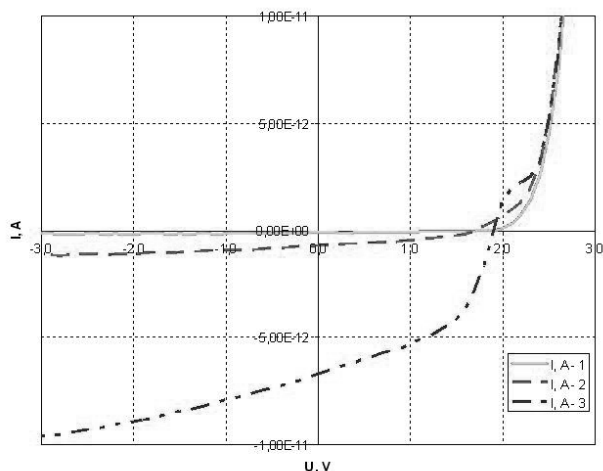


Рис. 5. ВАХ фотодиода (1 — ВАХ тестового диода при отсутствии освещения; 2 и 3 — ВАХ тестового диода при освещении со стороны подложки структуры излучением светодиода спектрального диапазона 265 нм с малым и большим уровнем освещенности излучения до  $10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup>)

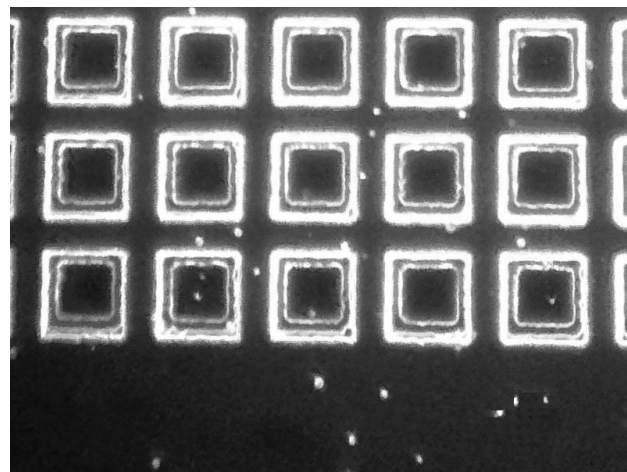


Рис. 6. Изображение фрагмента матрицы фотодиодов в темном поле микроскопа

тодиодов на несколько порядков выше, чем требования для светодиодов УФ-диапазона из этого полупроводникового материала. На рис. 6 представлено изображение фрагмента матрицы фотодиодов в темном поле микроскопа, изготовленной в ГЭС AlGaIn, выращенной методом МЛЭ.

На рис. 6 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 МOC, так и МЛЭ является уменьшение плотности дислокаций и структурных дефектов в фоточувствительном слое AlGaIn (GaN).

### Заключение

Наиболее перспективным направлением построения УФМ является использование матриц  $p-i-n$ -фотодиодов на основе гетероэпитаксиальных структур AlGaIn/GaN, которые позволяют реализовать наибольшие значения обнаружительной способности и вольтовой чувствительности. Матрицы формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм формировались с помощью разделения верхних эпитаксиальных слоев на мезообласти в гетероструктурах AlGaIn/GaN, выращенных на подложках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, с толщиной эпитаксиальных фоточувствительных и фотодиодных слоев нитридов от 0,2 до 0,3 мкм для достижения максимальной квантовой эффективности.

Превышение коэффициентов неидеальности вольтамперной характеристики  $p-i-n$ -фотодиодов значения  $n > 2$  связано с влиянием технологии получения омических контактов на качество переходов. Уменьшение коэффициента неидеальности ВАХ достигается дополнительным легированием контактного слоя.

## Литература

1. Бурлаков И.Д., Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Гринченко Л.Я. // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 6. С. 46
2. Бурлаков И.Д., Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Журавлев К.С. // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 7. С. 37
3. Алтухов А.А., Митягин А.Ю., Клочкова А.М., Орлова Г.А. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. № 3. С. 3
4. Reine M.B. et al. // Proc. of SPIE. 2006. V. 6119. P. 611901–1
5. Long J.P., Varadaraajan S., Matthews J., and Schetzina J.F. // Opto-Electron. Rev. 2002. V. 10. No. 4. P. 251
6. Khan M. A., Shatalov M., Maruska H.P. et al. // Japanese Journal of Applied Physics. 2005. V. 44. No. 10. P. 7191
7. Khan M.A., Kuznia J.N., Olson D.T. et al. // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 60. P. 2917.
8. Khan M.A., Kuznia J.N., Olson D.T. et al. // Appl. Phys. Lett. 1993. V.63. P. 2455
9. Katz O., Garber V., Meyler B. et al. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. P. 1417
10. Katz O., Bahir G., and Salzman J. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. P. 4092.
11. Chen Q., Khan M.A., Sun C.J., and Yang J.W., // Electron. Lett. 1995. V. 31. P. 1781.
12. McClintock Ryan, Cicek Erdem, Vashaei Zahra et al. // Proc. SPIE. 2007. V. 7780. P. 77801B-2
13. Хромов С.С., Зайцев А.А. // Прикладная физика. 2011. № 1. С. 112
14. Cohen T. Zhu L. Liu M. et al. // IEEE APEC Austin. 2005. P. 311
15. Бурлаков И.Д., Болтарь К.О., Седнев М.В. // Прикладная физика. 2007. № 5. С. 58
16. Stratton R. Tunneling in Schottky barrier rectifiers, in Tunneling Phenomena in Solids, 1967 NATO Advanced Study Institute at RisE Denmark, Plenum Press, New York.
17. Hadis M. Handbook of Nitride Semiconductors and Devices. 2002. V. 2
18. Shah J. M. et al. // Journal of Applied Physics. 2003. V. 94. No. 4
19. McClintock R. et al. // Proc. of SPIE. 2001. V. 4288.

UV FPAs based on AlGa<sub>x</sub>N heterostructures

*K.O. Boltar, N.I. Yakovleva, N.V. Kravchenko,  
M.V. Sednev, A.V. Nilonov, and M.A. Trishenkov*

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

*UV visible-blind and solar-blind 320x256 FPAs based on the Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N heterostructures have been developed and investigated. Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>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 AlGa<sub>x</sub>N p-i-n photodiodes currents. The dark current of AlGa<sub>x</sub>N p-i-n photodiodes in mesa-structure with pitch 30 μm was less than 10<sup>-13</sup> A and differential resistance was more than 3·10<sup>13</sup> Ohm.*

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

Keywords: AlGa<sub>x</sub>N, GaN, UV range, heteroepitaxial structures, p-i-n photodiode, FPA.

Bibliography — 19 references

Received September 10, 2013