

Фотоэлектроника

УДК 621.383.4/5

Твердотельная фотоэлектроника ультрафиолетового диапазона (обзор)

К. О. Болтарь, И. Д. Бурлаков, В. П. Пономаренко, А. М. Филачёв, В. В. Сало

В статье рассмотрено современное состояние с разработкой фотоприемников и фотоприемных устройств, работающих в диапазоне длин волн электромагнитного излучения 0,1—0,38 мкм. Приведен обзор мировых достижений и тенденций развития этой области фотоэлектроники на основе различных полупроводниковых материалов. Рассмотрены основные физико-технические проблемы создания второго поколения ультрафиолетовых фотоприемных модулей на основе соединений A^{III}-N.

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: ультрафиолет, «солнечно-слепой», «видимо-слепой», твердый раствор.

Введение

К оптико-электронным системам относят системы, работающие в спектральных диапазонах электромагнитного излучения 0,1÷0,4, 0,4÷0,9, 1÷3, 3÷5, 8÷14 и более микрометров. Это связано с тем, что большинство объектов природного или искусственного происхождения обладают собственным тепловым излучением в диапазоне от 1 до 14 мкм. В области 0,4—0,6 мкм лежит спектр максимума излучения Солнца. В этих же интервалах располагаются «окна прозрачности» земной атмосферы. Ряд объектов в космосе обладает собственным излучением с длинами волн, лежащими в

ультрафиолетовом диапазоне. Естественными источниками ультрафиолетового излучения в земных условиях являются солнечная радиация и вспышки молний во время грозных разрядов. К числу искусственно создаваемых источников УФ-излучения относятся факелы стартующих ракет, вспышки выстрелов стрелкового и артиллерийского оружия.

Ультрафиолетовый диапазон принято делить на несколько поддиапазонов: *A* (Near UV) — 0,32—0,38 мкм, *B* (Middle UV) — 0,28—320 мкм и *C* (Far UV) — 0,1—0,28 мкм.*

Коротковолновое солнечное УФ-излучение с длинами волн менее 0,2 мкм практически полностью поглощается атмосферой Земли (рис. 1) и до ее поверхности не доходит.

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК¹, профессор³.

Бурлаков Игорь Дмитриевич, заместитель генерального директора¹, профессор².

Пономаренко Владимир Павлович, главный конструктор¹, профессор³.

Филачёв Анатолий Михайлович, генеральный директор, профессор¹.

Сало Владимир Васильевич, советник генерального директора¹.

¹ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.

Тел. 8 (499) 374-94-00.

E-mail: idbur@orion-ir.ru, orion@orion-ir.ru,

ponomarenko@orion-ir.ru

²Московский институт радиоэлектроники и автоматики (МГТУ МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78.

³Московский физико-технический институт

(государственный университет).

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2014 г.

© Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Пономаренко В. П., Филачёв А. М., Сало В. В., 2014

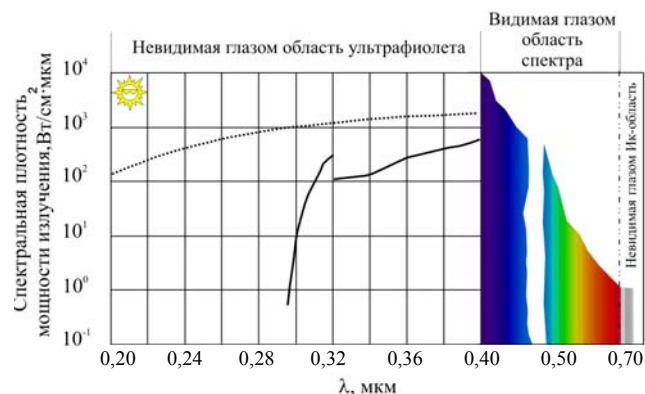


Рис. 1. Интенсивность солнечного УФ-излучения, достигающего земной поверхности (сплошные кривые). Пунктиром показана спектральная плотность излучения на границе земной атмосферы и космоса

* В литературе могут указываться другие границы поддиапазонов.

Чрезвычайная важность УФ-диапазона связана с той ролью, которую этот диапазон играет в различных областях человеческой деятельности, таких как медицина, экологический мониторинг атмосферы, криминалистика, идентификация биологических веществ, пищевая промышленность, астронавигация, астрофизические исследования, фотолитография и многие другие. Наличие УФ-компоненты в излучении ракетных двигателей позволяет не только обнаруживать, но и ясно различать ракетный факел и корпус ракеты на значительных удалениях от точки наблюдения.

В ультрафиолетовой области спектра интенсивность солнечного излучения в основном определяется озоновым слоем атмосферы. Коэффициент поглощения света газообразным озоном в видимой области спектра мал (менее $0,06 \text{ см}^{-1}$), но в УФ-области в диапазоне $\lambda = 0,2 \div 0,3 \text{ мкм}$ (полоса Хартмана) достигает значений 150 см^{-1} , причём максимум поглощения расположен при $\lambda = 0,255 \text{ мкм}$ [1]. В земной атмосфере основное количество озона (озоновый слой) находится на высотах $10 \div 50 \text{ км}$ с максимумом, расположенным на высоте $20 \div 25 \text{ км}$. Средняя толщина озонового слоя, по оценкам, составляет при нормальных условиях $2,5 \div 3 \text{ мм}$, на экваторе $\sim 2 \text{ мм}$, вблизи полюсов $\sim 4 \text{ мм}$. В области «озоновой дыры», т. е. локального уменьшения содержания озона над Землей, толщина озонового слоя может уменьшаться до значений $\leq 1 \text{ мм}$. Вне области озоновой дыры, т. е. при толщине озонового слоя не менее 2 мм , солнечное излучение в УФ-области сильно подавляется, в частности, в диапазоне $0,24 \div 0,27 \text{ мкм}$ — более чем на 10 порядков. Поэтому фотоприёмники УФ-излучения, не обладающие фоточувствительностью в области длин волн больше $\sim 0,28 \text{ мкм}$, не чувствительны к солнечному излучению. Их называют «солнечно-слепыми», в отличие от «видимо-слепых» фотоприёмников, не обладающих чувствительностью в области длин волн $\lambda > 0,38 \text{ мкм}$. Очевидно, что «солнечно-слепые» фотоприёмные устройства способны регистрировать объекты и при сильном солнечном фоне, поскольку практически не реагируют на этот фон, тогда как другие приёмники видимого и ИК-диапазонов «слепнут» в таких фоновых условиях. В военной сфере «видимо-слепая» фотоэлектроника зачастую остается единственным пассивным средством обнаружения самолетов при малых углах подлета со стороны Солнца.

Основные фоточувствительные материалы

При развитии твердотельной фотоэлектроники ультрафиолетового диапазона был опробован и получил развитие целый ряд полупроводниковых материалов. В прошлом столетии эти работы на-

чались с освоения методов изготовления кремниевых фотодиодов [2], уже зарекомендовавших себя к тому времени в качестве элементов солнечной энергетики. Однако высокая чувствительность кремниевых фотоприёмников с шириной запрещенной зоны $E_g = 1,12 \text{ эВ}$ к видимому и инфракрасному излучению потребовала использования более широкозонных полупроводников.

Сначала исследовались непрямозонные полупроводники — карбиды кремния 6H-SiC с шириной запрещенной зоны $E_g = 3,0 \text{ эВ}$ и 4H-SiC ($E_g = 3,23 \text{ эВ}$). Длинноволновая граница чувствительности для них составила $0,41$ и $0,38 \text{ мкм}$, соответственно.

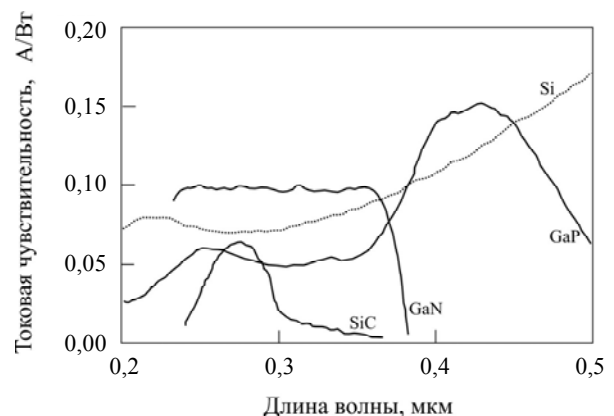


Рис. 2. Спектральная чувствительность Si, GaP, GaN, SiC

Приборы могли работать при высоких температурах и имели высокое пробивное напряжение. В 1970—1980 гг. наиболее распространенным материалом для УФ-приёмников становится непрямозонный полупроводниковый фосфид галлия GaP [3, 4] с шириной запрещенной зоны $E_g = 2,26 \text{ эВ}$ (рис. 3, а) и его твердые растворы с арсенидом галлия GaAs ($E_g = 1,42 \text{ эВ}$). На их основе можно было изготавливать селективные фотодиоды ультрафиолетового диапазона, практически не чувствительные в видимой области спектра, но работающие при более высокой, по сравнению с кремнием, рабочей температуре и обладающие повышенной радиационной стойкостью (рис. 4). Достигнутый порог чувствительности для GaP-фотодиодов с барьером Шоттки, образованном на границе раздела Au-n-GaP , составил $(1-2) \cdot 10^{-14} \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ (при частоте $\leq 100 \text{ Гц}$). Эти фотодиоды обладали широким динамическим диапазоном: линейность сохранялась в интервале $10^{-12} \text{—} 10^{-2} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$. Токовая чувствительность в максимуме спектральной характеристики ($\lambda_{\text{max}} = 0,43 \text{—} 0,44 \text{ мкм}$) достигала величины $0,06 \text{ А} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Разработанные фотодиоды сохраняли рабочие характеристики в температурном интервале $-190 \div +200 \text{ }^\circ\text{C}$ [3]. Меняя состав $\langle x \rangle$ твердого раствора $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$, можно было изменять область спектральной чувствительности прибора,

переходя от интервала 0,25—0,68 мкм (при $x = 0,40$) к интервалу 0,25—0,75 мкм (при $x = 0,25$).

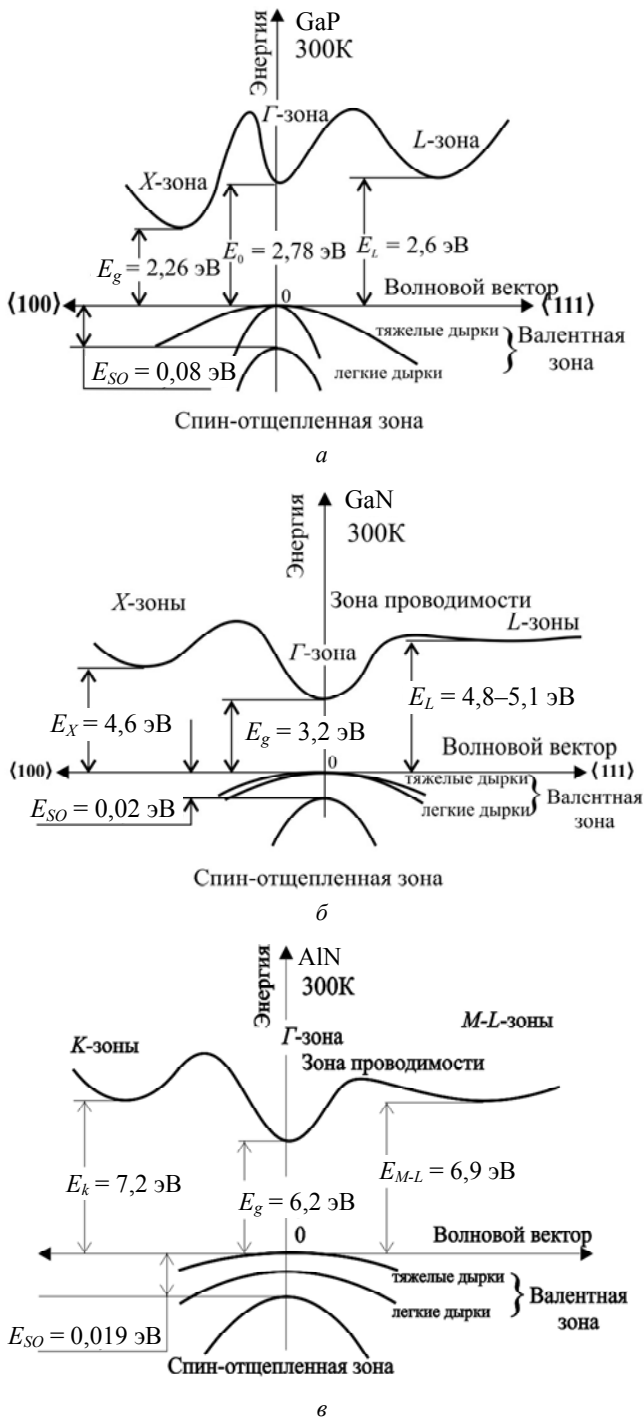


Рис. 3. Упрощенное строение энергетических зон GaP, GaN, AlN

Однако, ни GaP, ни GaAs, ни твердые растворы $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ не позволяли изготавливать «солнечно-слепые» фотоприемные устройства. Необходимость в «солнечно-слепых» фотоприемниках, главным образом для обнаружения ракетных факелов, привела в середине прошлого столетия к разработке новых широкозонных полупроводниковых материалов. Сначала на основе азотосодержащих бинарных прямозонных соединений —

нитрида галлия GaN ($E_g = 3,2$ эВ, рис. 3, б), нитрида алюминия AlN ($E_g = 6,2$ эВ, рис. 3, в), нитрида бора BN ($E_g = 4,5—5,5$ эВ), а затем и твердых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Среди тройных твердых растворов при изготовлении УФ-фотоприемников часто встречается и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ — непрямозонный полупроводник при $x > 0,45$, становящийся прямозонным при $x \leq 0,45$, с $E_g = 2,1$ эВ для $x = 0,8$. К числу наиболее широкозонных полупроводниковых соединений относится также искусственный алмаз C — непрямозонный полупроводник с $E_g = 5,5$ эВ. Фотоприемники на его основе имеют длинноволновый край фоточувствительности вблизи 0,22 мкм и могут использоваться для регистрации вакуумного ультрафиолета (0,01—0,2 мкм). Кроме того, приборы на основе алмаза отличаются особой химической устойчивостью к различного рода агрессивным средам.

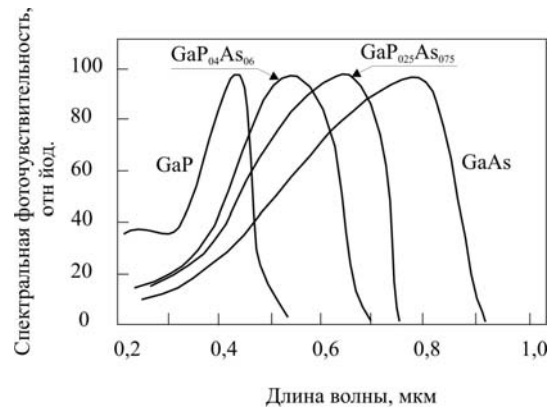


Рис. 4. Спектральная чувствительность GaP, GaAs и твердых растворов $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ [2]

В основном, проблема полупроводниковых материалов для «солнечно-слепой» фотоэлектроники была решена в конце прошлого столетия с помощью твердых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, которые позволяли изготавливать высококачественные фотоприемные устройства с длинноволновой границей фоточувствительности, меняющейся в широких пределах (рис. 5).

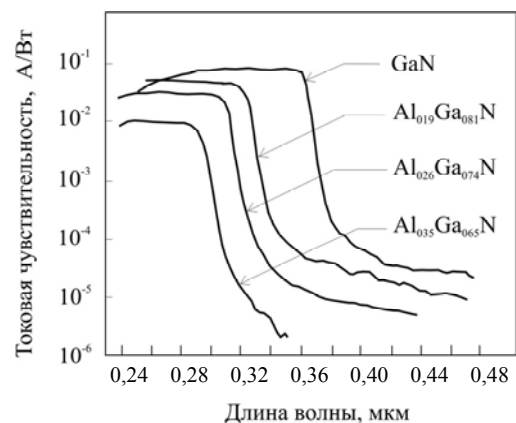


Рис. 5. Спектральная чувствительность твердых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ [9]

Описанию свойств перечисленных полупроводниковых соединений и способов их выращивания посвящено несколько монографий и справочников [5—11], опубликованных в 2000-х годах.

Структуры фоточувствительных элементов УФ-приемников

В качестве структур фоточувствительных элементов для фотоприемников на основе вышеописанных полупроводников были разработаны и испытаны структуры с $p-n$ -гомопереходом, $p-i-n$ -структуры, структуры металл-полупроводник с барьерами Шоттки, структуры металл-полупроводник-металл, лавинные фотодиоды, низкотемпературные структуры с использованием сверхпроводимости, а также многочисленные типы структур с гетеропереходами. Описанию их свойств посвящены работы [4, 12—19].

В настоящее время можно выделить несколько направлений развития УФ-фотоэлектроники с использованием твердотельной базы, испытывающих стремительное развитие.

Сюда относятся квантоворазмерные структуры, в т. ч. с использованием материала ZnO для создания фоточувствительных элементов на основе квантовых нитей [20—23] и структур с квантовыми ямами [24].

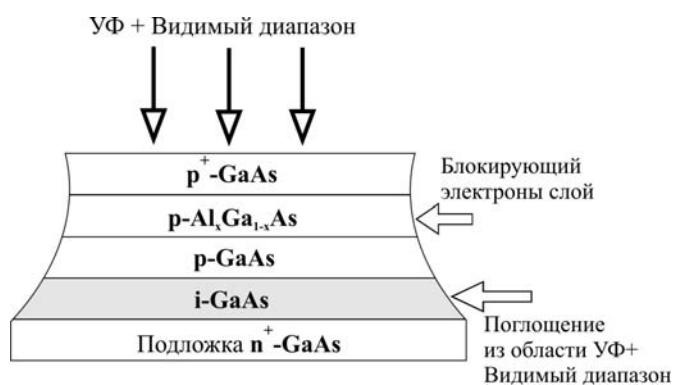
Другое направление связано с созданием сверхширокополосных матричных фотоприемных

устройств для задач космической астрофизики, гиперспектральной селекции, мониторинга атмосферы и т. п., включая ультрафиолетовый и ближний ИК-диапазоны спектра. Такие фотоприемные устройства должны обладать высокой чувствительностью в интервале длин волн от 0,2 до 2—2,5 мкм. Для их создания развиваются методы проектирования с использованием многослойных гетероструктур на основе GaAs, AlGaAs, InGaAs, InAsP, совмещаемых в единую структуру при помощи специально разрабатываемых буферных слоев.

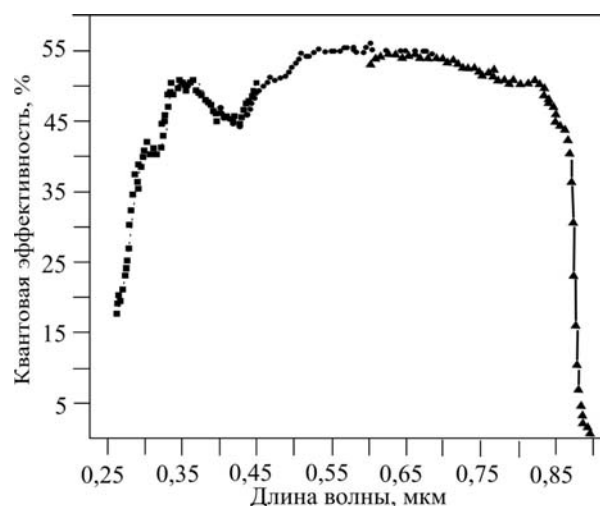
В качестве примера можно привести матричные структуры, описанные в работе [25]. На их основе можно изготовить широкополосную матрицу с чувствительностью от ультрафиолета (0,25 мкм) до ближней ИК-области спектра (2,2 мкм).

Сначала проектируется структура с чувствительностью в ультрафиолетовой и видимой областях (рис. 6). Основой для нее служит $p-i-n^+$ -структура из GaAs (рис. 6, а). На рис. 6, б показана спектральная характеристика фоточувствительности такой структуры.

На следующем этапе проектируется структура с чувствительностью вплоть до 2,2 мкм (рис. 7). Длинноволновая граница фоточувствительности здесь определяется шириной запрещенной зоны слоя $i\text{-In}_{0.72}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$, равной 0,57 эВ, что соответствует $\lambda_{cp} = 2,2$ мкм. На последнем этапе разрабатываются методы объединения структур, представленных на рис. 6, а и 7.



а



б

Рис. 6. Структура для регистрации излучения из УФ- и видимой областей спектра (а) и спектральная характеристика ее фоточувствительности [25]

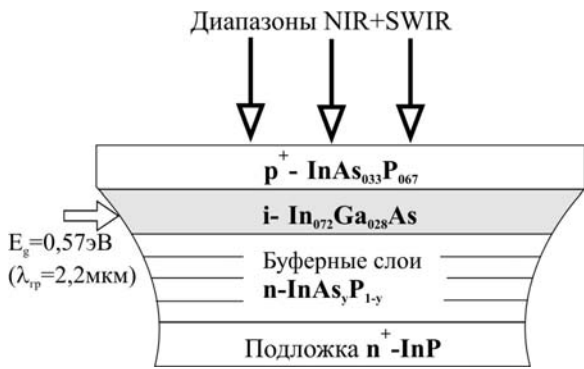


Рис. 7. Структура для регистрации излучения в диапазоне от 1,0 до 2,2 мкм [25]

Устройство фотоприемной ячейки широкополосной матрицы показано на рис. 8.

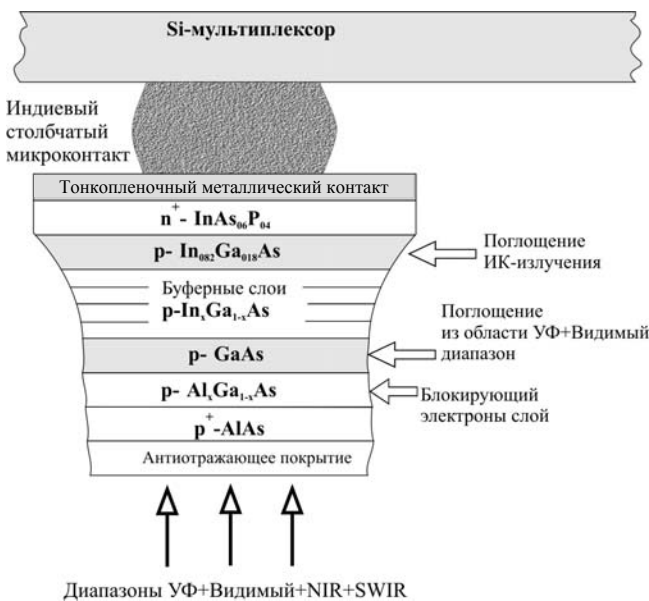


Рис. 8. Структура ячейки для регистрации излучения в спектральном интервале 0,25—2,2 мкм [25] на основе GaAs, AlGaAs, InGaAs, InAsP

Монохромные УФ-матрицы на основе AlGaN

Матрицы фоточувствительных элементов формата 320×256 элементов «видимо-слепого» и «солнечно-слепого» УФ-диапазонов изготавливались на основе гетероэпитаксиальных слоев GaN/AlGaN, выращенных методами осаждения из металлоорганических соединений (МОС) [26] и молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [27]. При формировании гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) AlGaN/AlN на подложках α-Al₂O₃ (0001) методом МОС-гидридной эпитаксии в качестве источников алюминия, галлия и азота использовались TMAI, TMGa и NH₃, соответственно. Газоносителем является водород. Источниками легирующей примеси n- и p-типа служили SiH₄ и Cd₂Mg.

Отработка 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 конструкции МФЧЭ [28—30] наиболее перспективной была признана архитектура, представленная на рис. 9.

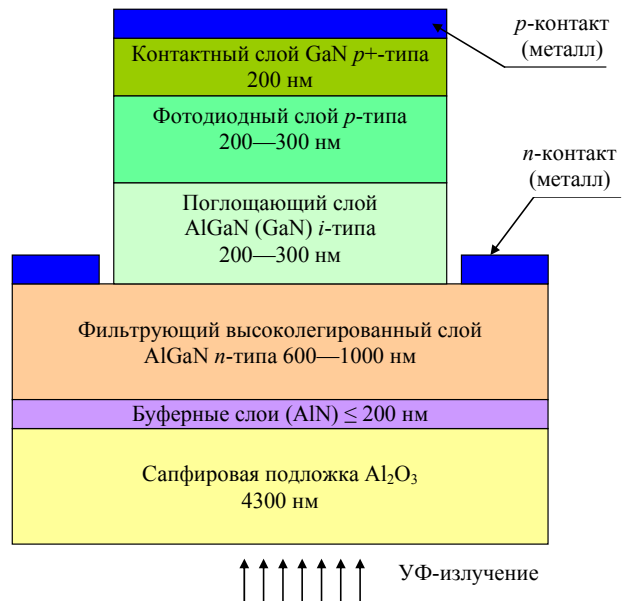


Рис. 9. P-i-n архитектура ультрафиолетовой матрицы ФЧЭ

Выбранная p-i-n-архитектура на основе гетероэпитаксиальной структуры 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 оптическое излучение и уменьшающего плотность дефектов слоя AlGaN n⁺-типа проводимости, состав которого зависел от выбранного типа фотоприемного устройства (ФПУ): для «солнечно-слепого» диапазона — Al_{0,64}Ga_{0,36}N, для «видимо-слепого» диапазона — Al_{0,23}Ga_{0,77}N. К этому же слою формируется 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 эф-

фективное поглощение излучения в заданном спектральном диапазоне, состав которого определял длинноволновую границу спектральной чувствительности;

- фотодиодного слоя $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{N}$ (GaN) p -типа проводимости;

- высоколегированного слоя GaN p^+ -типа проводимости, к которому формировался p -контакт.

Изготовленная на основе такой структуры матрица ФЧЭ стыкуется с кремниевой БИС считывания сигнала с входными ячейками на основе трансимпедансного усилителя.

Изготовление ультрафиолетового матричного ФПУ формата 320×256 элементов на основе гетероэпитаксиальных структур AlGaN представляет собой совокупность большого числа операций, оптимальная организация которых имеет большое значение. Наиболее критическими операциями изготовления ФПУ являлись:

- прецизионное формирование меза-структур в ГЭС AlGaN;

- формирование омических контактов к областям p - и n -типов проводимости;

- измерение сверхмалых значений темнового тока.

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 AlGaN проводились обширные исследования. Вследствие ограниченных возможностей жидкостного травления основные усилия были направлены на разработку методов сухого ионно-лучевого травления. Процесс проводился на стандартном техническом оборудовании, при этом энергия ионов аргона Ar^+ в пучке составила $U = 1$ кэВ, ионный ток — $J = 200$ мкА/см². 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. 10.



Рис. 10. Зависимость глубины ионно-лучевого травления от времени процесса

На рис. 10 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. 11 представлены результаты отработки процесса ионного травления и формирования мезаструктуры с глубиной порядка 1 мкм и шириной травленного канала ~6 мкм.

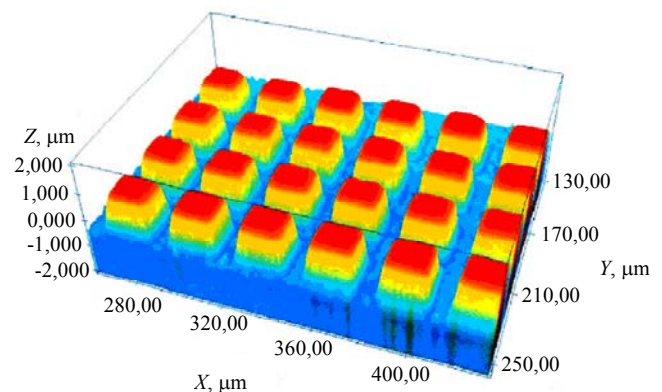


Рис. 11. Профилограмма сформированной мезаструктуры в ГЭС AlGaN

Идеальный омический 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 металла, который бы позволил обеспечить идеальное зна-

чение 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: 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 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 [31].

Для создания контакта к p^+ -GaN контактному слою использовалась металлическая система Ni/Au. 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, а толщина Au — 100 нм.

Для создания омического контакта к n^+ -контактному слою AlGaN использовалась металлическая система Ti/Al/Ni/Au, где Ti уменьшает высоту барьера, а Al — металл, образующий контакт. Напыление указанных металлических слоев проводилось путем магнетронного распыления. Толщины Ti и Al составили 30 и 150 нм, толщины Ni и Au составили 30 и 100 нм, соответственно. Контакты, полученные к AlGaN n^+ -типа и GaN n^+ -типа проводимости, были омическими сразу после напыления (рис. 12).

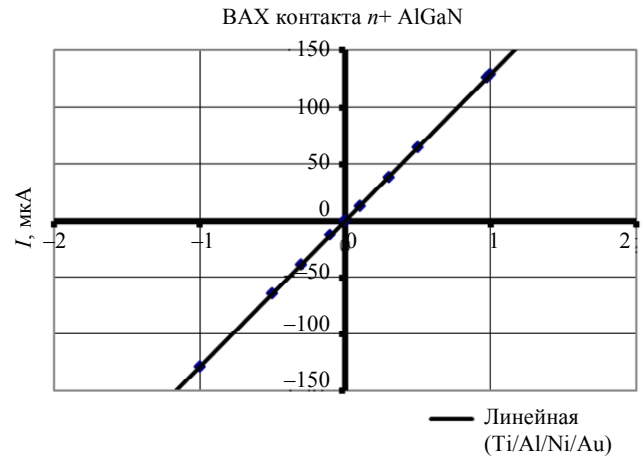


Рис. 12. ВАХ контакта $Me-n^+$ -AlGaN

Для считывания сигнала с матриц ФЧЭ на основе AlGaN использовалась кремниевая БИС считывания [32] с входной ячейкой, выполненной на основе емкостного трансимпедансного усилителя (СТИА) в отличие от ФПУ средневолнового и длинноволнового инфракрасного диапазонов спектра, в которых применяется схема входной ячейки с прямой инъекцией (DI). Использование данного типа входной ячейки обусловлено низкими темновыми токами и низким уровнем шума $p-i-n$ -фотодиодов из AlGaN.

Для стабилизации температуры ФЧЭ с БИС считывания герметизируются в корпус с термоэлектрическим охладителем (рис. 13).



Рис. 13. Ультрафиолетовый фотоприемный модуль

Исследованы характеристики матриц УФ-фотодиодов, а также «солнечно-слепых» и «видимо-слепых» ультрафиолетовых модулей, изготовленных на основе структур ГЭС AlGaN/GaN, 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. 10. Спектральные характеристики фотодиодных элементов «солнечно-слепого» и «видимо-слепого» УФМ-формата

320×256 элементов с шагом 30 мкм представлены на рис. 14 и 15.

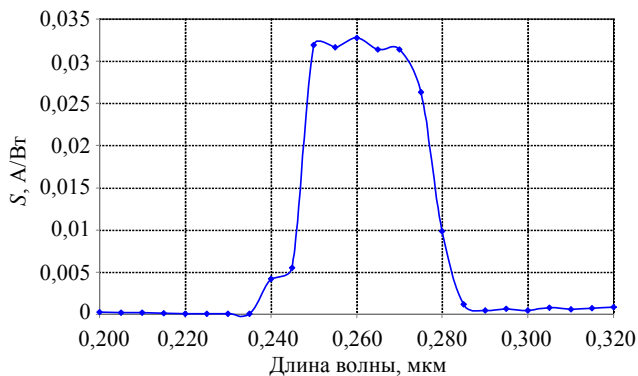


Рис. 14. Спектральная характеристика чувствительности УФМ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм солнечно-слепого диапазона

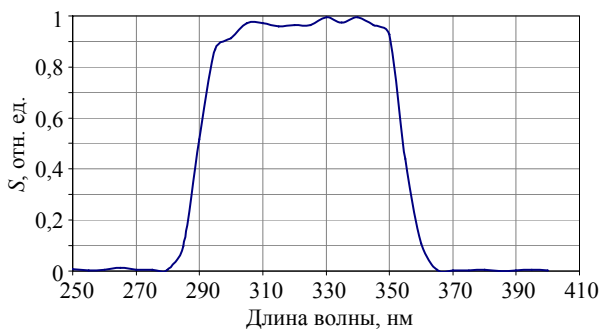


Рис. 15. Спектральная характеристика чувствительности УФМ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм видимо-слепого диапазона

В матрицах *p-i-n*-фотодиодов УФМ исследованы вольтамперные характеристики: фотодиоды в ГЭС AlGa_N, изготовленные методами МОС и МЛЭ, имеют малые токи утечки и сопротивления 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. 16.

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 меж-

ду разделенными элементами в «видимо-слепых» и «солнечно-слепых» мезаструктурах фотодиодов, составили менее 10^{-13} А, а сопротивление более $3 \cdot 10^{13}$ Ом. У изготовленных матриц имеется чувствительность к УФ-излучению даже при освещении с лицевой стороны, практически полностью закрытой металлизацией, через малые боковые зазоры в мезаструктурах. Оценки показали, что в исследованных УФМ из-за малых темновых и фоновых токов в УФ-диапазоне уровень шумов УФМ в значительной мере определяется шумом БИС считывания, а не собственным шумом AlGa_N-фотодиодов.

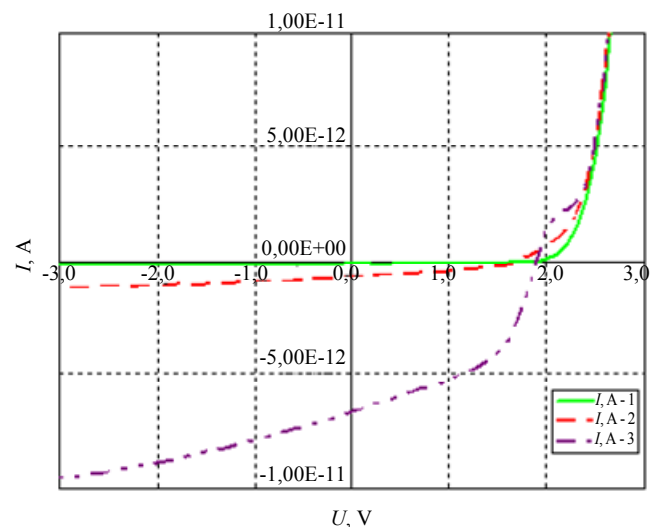


Рис. 16. ВАХ тестового *p-i-n*-фотодиода: 1 — при отсутствии освещения; 2 и 3 — при освещении структуры со стороны подложки излучением светодиода с максимумом на длине волны 265 нм с малым и большим уровнем (10^{-4} Вт/см²) освещенности

Удельная обнаружительная способность УФМ при кадровой частоте 18 Гц превышает 10^{13} см³·Вт⁻¹·Гц^{1/2}.

Сравнительные характеристики УФМ на основе AlGa_N и искусственного алмаза представлены в таблице 1.

Основная проблема при изготовлении МФЧЭ на основе AlGa_N 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 фотодиодов на несколько порядков выше, чем требования для светодиодов УФ-диапазона из этого полупроводникового материала. На рис. 17 представлено изображение фрагмента матрицы фотодиодов в темном поле микроскопа, изготовленной в ГЭС AlGa_N, выращенной методом МЛЭ.

Таблица 1

Параметр	BAE Systems, США	ООО «УралАлмаз-Инвест, РФ	ОАО «НПО «Орион», РФ
Фоточувствительный материал	GaN/AlGaN	C — алмаз	GaN/AlGaN
Формат, элементов	256×256	64×64	320×256
Спектральный диапазон фоточувствительности, мкм	видимо-слепой, солнечно-слепой	солнечно-слепой	видимо-слепой, солнечно-слепой
Максимальная длина волны излучения в «солнечно-слепом» диапазоне спектра, мкм	0,27—0,28	0,21	0,27—0,28
Квантовая эффективность, %	80	70—80	80
Токовая чувствительность, А/Вт	0,17	0,13	0,17
Размер ФЧЭ, мкм	20×20	30×30	20×20
Шаг ФЧЭ, мкм	30	50	30
Рабочее напряжение, В	0—1	200	0—1
Темновой ток, А	$\sim 10^{-15}$	н/д	$\sim 10^{-14}$
Удельная обнаружительная способность, $\text{см}\cdot\text{Вт}^{-1}\cdot\text{Гц}^{1/2}$	$\sim 10^{13}$	$\sim 10^{13}$	10^{13}

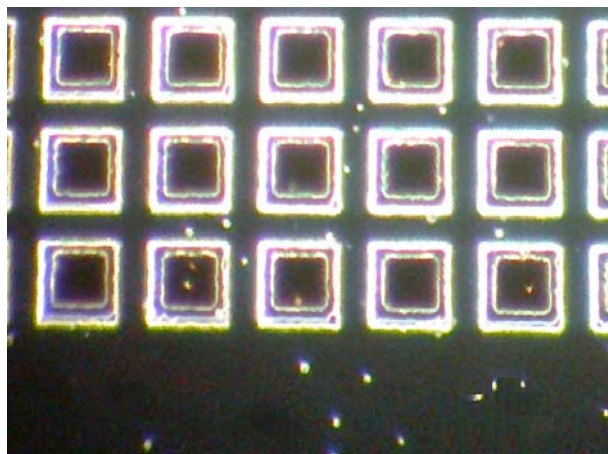
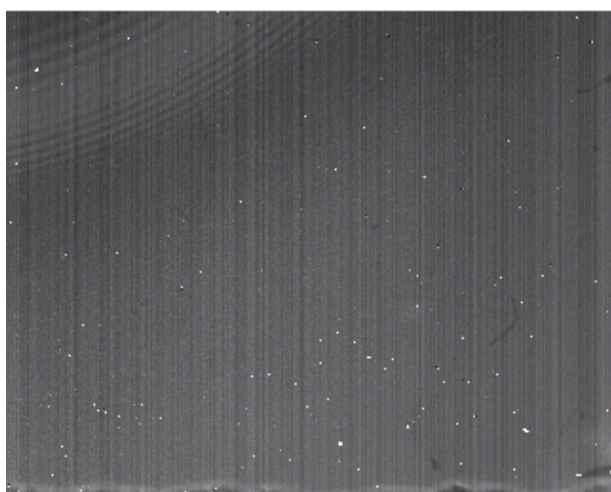


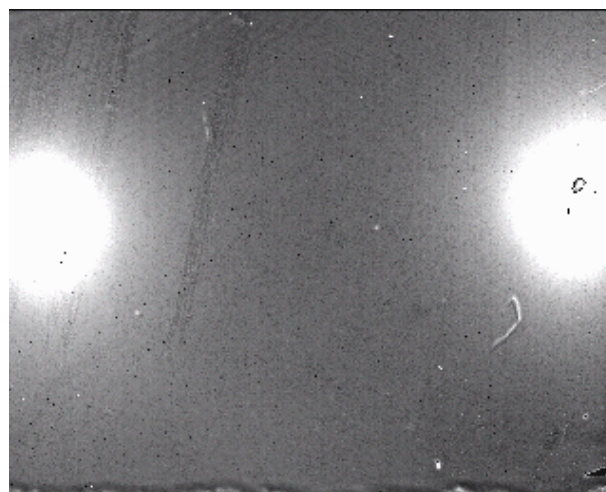
Рис. 17. Изображение фрагмента матрицы фотодиодов в темном поле микроскопа

На рис. 17 отчетливо видны светящиеся точки, соответствующие ростовым дефектам структуры AlGaN. Фотодиоды, содержащие указанные структурные дефекты особенно на боковой поверхности мезаструктур, имеют повышенные токи утечки и рассматриваются как дефектные элементы УФМ. Поэтому на сегодняшний день основной задачей при выращивании ГЭС AlGaN, как методом МОС, так и МЛЭ является уменьшение плотности дислокаций и структурных дефектов в фотоувствительном слое AlGaN (GaN).

Изображение осветителя, состоящего из двух светодиодов ($\lambda = 265$ нм), получено «солнечно-слепым» УФМ (на основе ГЭС AlGaN формата 320×256 с шагом 30 мкм при времени накопления $T_n = 0,63$ мс) и представлено на рис. 18.



а



б

Рис. 18. Изображения, полученные с УФМ формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм солнечно-слепого диапазона на основе ГЭС AlGaN:

а — без освещения, (230 точечных дефектов), б — при освещении двумя светодиодами ($\lambda = 265$ нм).
Время накопления $T_n = 0,63$ мс

Недостатком сапфировых подложек является сильное несоответствие периодов кристаллических решеток сапфира и соединений $A^{III}-N$, что затрудняет прямое получение ГЭС с высоким кристаллическим совершенством. В литературе описан ряд приемов, направленных на повышение качества гетероэпитаксиальных слоев. Значительное их число сводится к использованию промежуточных буферных слоев (БС) [33—37]. С учетом обеспечения возможности ввода регистрируемого излучения через подложку, естественным требованием к БС является значение ширины запрещенной зоны, превышающее аналогичный параметр для всех остальных слоев ГЭС. Для рассматриваемых ГЭС на основе AlGaIn вполне закономерным представляется выбор AlN в качестве материала БС. Среди существующего разнообразия БС наиболее перспективным представляется подход по снижению плотности дислокаций благодаря использованию сверхрешеток, которые останавливают продвижение дислокаций в вышележащие слои, что и способствует релаксации упругих напряжений, вызванных несоответствиями параметров решеток подложки и растущего слоя [38, 39]. Причем элементы сверхрешетки должны быть подобраны таким образом, чтобы ширина запрещенной зоны каждого из них была не меньше ширины запрещенной зоны фильтрующего слоя. Проблема дефектности ГЭС на основе AlGaIn в настоящее время одна из наиболее актуальных.

На рис. 19 представлено изображение «видимо-слепого» УФМ. В отличие от изображений в видимом и ИК-диапазонах, заметен малый динамический диапазон яркости изображения и отсутствие деталей на небе, что характерно для изображений в отраженном свете при рассеянном освещении и может быть удобно для компьютерного распознавания объектов на изображении.



Рис. 19. Изображение видимо-слепого УФМ на основе ГЭС AlGaIn формата 320×256 с шагом 30 мкм

Выводы

Наиболее перспективным направлением построения матричных фотоприемников «видимо-слепого» и «солнечно-слепого» ультрафиолетового диапазона является использование матриц $p-i-n$ -фотодиодов на основе гетероэпитаксиальных структур AlGaIn/GaN.

Ультрафиолетовые модули на основе мезоструктур матриц $p-i-n$ -фотодиодов соединений нитридов AlGaIn/GaN имеют характеристики, близкие к лучшим мировым достижениям как для «видимо-слепого», так и для «солнечно-слепого» УФ-диапазонов.

Проблема дефектности ГЭС на основе AlGaIn на сапфировой подложке — наиболее актуальная в настоящее время для создания ультрафиолетовых модулей, которая может быть решена оптимизацией промежуточных буферных слоев.

Достигнутые результаты могут служить базой для создания на основе AlGaIn более сложных перспективных фотоприемников и матриц, в том числе с лавинным усилением для использования в качестве счетчиков единичных фотонов.

Литература

1. Koller L. R. Ultraviolet Radiation, — New York: Wiley&Sons. 1965.
2. Полупроводниковые фотоприемники: ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра. Под ред. В. И. Стафеева. — М.: Радио и связь, 1984.
3. Анисимова И. Д., Стафеев В. И. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 41.
4. Бланк Т. В., Гольдберг Ю. А. // ФТП. 2003. Т. 37. № 9. С. 1025.
5. Sadao Adachi. Properties of Semiconductor Alloys. Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors. — J. Wiley and Sons, Ltd., 2009.
6. Dilute III-V Nitride Semiconductors and Materials Systems. Physics and Technology. Ed. A. Erol. / Springer Series in Materials Science. 2008. V.105.
7. III-Nitride Semiconductors: Electrical, Structural and Defect Properties. Ed. O. Manasreh. / Elsevier Science B. V., 2000.
8. Gallium Nitride Electronics. Ed. R.Quay. / Springer Series in Materials Science. 2008. V. 96.
9. Oxide and Nitride Semiconductors. Processing, Properties and Applications. Eds. T.Yao and Soon-Ku Hong. / Advanced in Material Research, Springer, 2009. V. 12.
10. Ruterana P., Albrecht M., Neugebauer J. Nitride Semiconductors. Handbook on Materials and Devices. — Wiley-VCH, Verlag GmbH&Co. KGaA, 2003.
11. Markoc H. Handbook of Nitride Semiconductors and Devices. V.1: Materials Properties, Physics and Growth, 2008; V. 2: Electronics and Optical Progress in Nitrides, 2008.
12. Бурлаков И. Д., Войцеховский А. В., Несмелов С. Н. и др. // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 6. С. 46.
13. Бурлаков И. Д., Войцеховский А. В., Несмелов С. Н. и др. // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 7. С. 37.
14. Halain J.-P.; Debaize A.; Gillis J.-M.; et al. // Proc. SPIE. 2014. V. 9144.
15. Sood Ashok K., Welse Roger E., Richwine Robert A., et al. // Proc. SPIE. 2012. V. 8375.

16. Koda Y., Kuroda R., Nakazawa T., et al. // Proc. SPIE. 2013. V. 8659.
17. Heather C. Chiamori, Chetan Angadi, Ateeq Suria, et al. // Proc. SPIE. 2014. V. 9113.
18. Abhay Joshi, Shubhashish Datta // Proc. SPIE. 2012. V. 8385.
19. Mazin Benjamin A., Bumble Bruce, Meeker Seth R., et al. // Optics Express. 2012. V. 20. No. 2.
20. Rivera Abdiel, Zeller John, Manzur Tariq, et al. // Proc. SPIE. 2012. V. 8540.
21. Rivera Abdiel, Mazady Anas, Zeller John, et al. // Proc. SPIE. 2013. V. 8626.
22. Bayram C., Shiu K. T., Zhu Y., et al. // Proc. SPIE. 2013. V. 8626.
23. Rivera Abdiel, Mazady M. Anas, Zeller John, et al. // Proc. SPIE. 2013. V. 8711.
24. Zhang Sheng-Kun, Wang Wubao, Alfano Robert R., et al. // Proc. SPIE. 2012. V. 8262.
25. Joshi Abhay, Datta Shubhashish // Proc. SPIE. 2012. V. 8385.
26. Болтарь К. О., Чинарева И. В., Седнев М. В. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1, № 4. С. 488.
27. Малин Т. В., Гилинский А. М., Мансуров В. Г. и др. / Тезисы докладов 9-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы». — С.-Петербург. 2013.
28. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Яковлева Н. И. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 344.
29. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Филачев А. М. и др. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 54.
30. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Сиднев М. В. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 200.
31. Stratton R. / in Tunneling Phenomena in Solids, 1967 NATO Advanced Study Institute at RisE Denmark (eds E. Burstein and S. Lundqvist) — Plenum Press, New York, 1969.
32. Зайцев А. А., Хромов С. С. // Прикладная физика. 2012. № 1. С. 110.
33. Amano H., Sawaki N., Akasaki I., et al. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 48. P. 353.
34. Kuznia J. N., Asif Khan M., Olson D. T., et al. // J. Appl. Phys. 1993. V. 73 (9). P. 4700.
35. Lorenz K., Gonsalves M., Kim W., et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. No. 21. P. 3391.
36. Lee I.-H., T. G., Park Y. // J. Cryst. Growth. 2002. V. 234. P. 305.
37. Jiang H. X., Lin J. Y. // Opto-Electronics Review. 2002. V. 10(4). P. 271.
38. Bourret-Courchense E. D., Kellermann S., Yu K. M., et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. No. 22. P. 3562.
39. Sakai S., Wang T., Morishima Y., et al. // J. Cryst. Growth. 2000. V. 221. P. 334.

Solid-state photoelectronics of the ultraviolet range (a review)

K. O. Boltar, I. D. Burlakov, V. P. Ponomarenko, A. M. Filachev, and V. V. Salo

Orion Research-and Production Association
46/2 Entuziastov shosse, Moscow, 111123, Russia
E-mail: idbur@orion-ir.ru, orion@orion-ir.ru,
ponomarenko@orion-ir.ru

Received December 11, 2014

The current status of research and development of photodetectors and FPAs for the 0.1—0.38 μm radiation is presented in this article. A review of the world achievements on creating UV modules of second generation on the basis of the $A^{\text{III}}\text{-N}$ compounds has been made.

PACS: 85.60.-q

Keywords: ultraviolet, solar blind, visible blind, solid solution.

References

1. L. R. Koller, *Ultraviolet Radiation* (New York: Wiley&Sons. 1965).
2. *Semiconductor Photodetectors*. Call. Articl. Ed. by V. I. Stafeev (Radio I Svyaz', 1984) [in Russian].
3. I. D. Anisimova and V. I. Stafeev, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 41 (1999).
4. T. V. Blank and Yu. A. Gol'dberg, *Semiconductors* **37**, 1025 (2003).
5. Sadao Adachi, *Properties of Semiconductor Alloys. Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors*. (J.Wiley and Sons, Ltd., 2009).
6. *Dilute III-V Nitride Semiconductors and Materials Systems. Physics and Technology*. Ed. A. Erol. (Springer Series in Materials Science. 2008). V.105.
7. *III-Nitride Semiconductors: Electrical, Structural and Defect Properties*. Ed. O. Manasreh. (Elsevier Science B. V., 2000).
8. *Gallium Nitride Electronics*. Ed. R.Quay. (Springer Series in Materials Science. 2008). V. 96.
9. *Oxide and Nitride Semiconductors. Processing, Properties and Applications*. Eds. T.Yao and Soon-Ku Hong. (Advanced in Material Research, Springer, 2009). V. 12.
10. P. Ruterana, M. Albrecht, and J. Neugebauer, *Nitride Semiconductors. Handbook on Materials and Devices*. (Wiley-VCH, Verlag GmbH&Co.KGaA, 2003).

11. H. Markoc *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices. V.1: Materials Properties, Physics and Growth*, (2008).
12. I. D. Burlakov, A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, et al., *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, No. 6, 46 (2012).
13. I. D. Burlakov, A. V. Voitsekhovskii, S. N. Nesmelov, et al., *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, No. 7, 37 (2012).
14. J.-P. Halain; A. Debaize; J.-M. Gillis; et al., *Proc. SPIE* **9144**, (2014).
15. Ashok K. Sood, Roger E. Welsler, Robert A. Richwine, et al., *Proc. SPIE* **8375**, (2012).
16. Y. Koda, R. Kuroda, T. Nakazawa, et al., *Proc. SPIE* **8659**, (2013).
17. Heather C. Chiamori, Chetan Angadi, Ateeq Suria, et al., *Proc. SPIE* **9113**, (2014).
18. Abhay Joshi and Shubhashish Datta, *Proc. SPIE* **8385** (2012).
19. Benjamin A. Mazin, Bruce Bumble, Seth R. Meeker, et al., *Optics Express*. **20** (2), (2012).
20. Abdiel Rivera, John Zeller, Tariq Manzur, et al., *Proc. SPIE* **8540**, (2012).
21. Abdiel Rivera, Anas Mazady, John Zeller, et al., *Proc. SPIE* **8626**, (2013).
22. C. Bayram; K. T. Shiu; Y. Zhu; et al., *Proc. SPIE* **8626**, (2013).
23. Abdiel Rivera, M. Anas Mazady, John Zeller, et al., *Proc. SPIE* **8711**, (2013).
24. Sheng-Kun Zhang, Wubao Wang, Robert R Alfano, et al., *Proc. SPIE* **8262**, (2012).
25. Joshi Abhay and Datta Shubhashish, *Proc. SPIE* **8385**, (2012).
26. K. O. Boltar, I. V. Chinareva, M. V. Sednev, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 488 (2013).
27. T. V. Malin, A. M. Gilinsky, V. G. Mansurov, et al., in *Proc. 9th All-Russian Conf. Nitrides — Structures and Devices*. (SPb, Russia, 2013).
28. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, N. I. Iakovleva, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 344 (2013).
29. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 54 (2013).
30. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, M. V. Sidnev, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 200 (2013).
31. R. Stratton, in *Tunneling Phenomena in Solids, 1967 NATO Advanced Study Institute at RisE Denmark* Eds E. Burstein and S. Lundqvist (Plenum Press, New York, 1969).
32. A. A. Zaitsev and S. S. Khromov, *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 110 (2012).
33. H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, et al., *Appl. Phys. Lett.* **48**, 353 (1986).
34. J. N. Kuznia, Khan M. Asif, D. T. Olson, et al., *J. Appl. Phys.* **73** (9), 4700 (1993).
35. K. Lorenz, M. Gonsalves, W. Kim, et al., *Appl. Phys. Lett.* **77**, 3391 (2000).
36. T. G. I.-H. Lee and Y. Park, *J. Cryst. Growth*. **234**, 305 (2002).
37. H. X. Jiang and J. Y. Lin, *Opto-Electronics Review* **10** (4), 271 (2002).
38. E. D. Bourret-Courchense, S. Kellermann, K. M., Yu, et al., *Appl. Phys. Lett.* **77**, 3562 (2000).
39. S. Sakai, T. Wang, Y. Morishima, et al., *J. Cryst. Growth*. **221**, 334 (2000).