

Солнечнослепые и видимослепые фотодетекторы на основе AlGaNИ. А. Ламкин^{1,*}, С. А. Тарасов^{1,†}, С. Ю. Курин^{2‡}¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ), факультет электроники, кафедра микро- и нанoeлектроники Россия, 19737, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5²Санкт-Петербургский Академический университет – научно-образовательный центр нанотехнологий РАН(СПб АУ НОЦНТ РАН), Лаборатория нанoфотоники Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8/3

(Статья поступила 20.09.2013; Подписана в печать 04.04.2014)

Твердый раствор AlGaN с максимальной энергией ширины запрещенной зоны 6,1 эВ позволяет изготавливать ультрафиолетовые (УФ) оптоэлектронные устройства, работающие в широком УФ-А, В, С спектральном диапазоне с минимальной длиной волны $\lambda = 210$ нм. Тем не менее, изготовление низкоомных омических контактов к $Al_xGa_{1-x}N$ с высоким содержанием Al ($x > 0.5$) является трудной и актуальной задачей. Наилучшие результаты по созданию фотодиодов на основе AlGaN получены с использованием Au (15 нм) в качестве барьера и Ti/Al (15/35 нм) омического контактов. С увеличением содержания Al в твердом растворе наблюдался сдвиг в коротковолновую область к глубокому УФ (солнечнослепой) диапазону с минимальной длиной волны красной границы 250 нм, которая наблюдалась в структурах с содержанием алюминия выше, чем $x = 0.6$.

PACS: 42.66.Lc

УДК: 621.315.592

Ключевые слова: фотодиод, твердый раствор AlGaN, барьер Шоттки, ультрафиолет

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы большой интерес проявляется к устройствам на основе твердых растворов AlGaN. Нитриды широко используются для люминесцентных устройств [1]. Полупроводниковые твердые растворы нитрида галлия и алюминия со структурой вюрцита можно использовать в качестве ультрафиолетовых фотоприемников для таких устройств как датчики пламени, детекторы радиационной дозиметрии, фотоприемники для мониторинга атмосферного озона, обнаружения загрязнений, солнечного слепого и поляризационно-чувствительного детектирования [2–4]. Так же фотодиоды на основе твердых растворов $Al_xGa_{1-x}N$ являются привлекательным кандидатом для применения во многих датчиках ультрафиолетового света, таких как, датчики обнаружения ракетного шлейфа, датчики для калибровки и мониторинга устройств медицинских и биологических приложений и других коммерческих приложений, таких как плазменная диагностика и контроль [5]. Сейчас эти роли в основном выполняют фотоэлектронные умножители и кремниевые детекторы. Однако фотоэлектронные умножители сложны в эксплуатации и обладают высокой стоимостью. Кремний имеет узкую ширину запрещенной зоны (1.1 эВ) и, следовательно, требует применения фильтров для работы в качестве ультрафиолетовых фотодетекторов. Кроме того, fotocувствительность в ультрафиолетовой области у кремниевых

фотоприемников существенно снижается. Фотоприемники на основе фосфида галлия также могут быть использованы для УФ-детектирования. Фотодиоды на базе барьера Шоттки Ag-GaP могут быть использованы в качестве «видимослепых» фотодетекторов [6, 7]. Однако они имеют непрямую структуру зон, что сказывается на их параметрах. В отличие от запрещенной зоны $Al_xGa_{1-x}N$, которая путем изменения доли AlN в твердом растворе может быть изменена в диапазоне между 3.4 и 6.2 эВ, что позволяет создать фотодиоды с длинноволновой границей фотоответа в диапазоне 360–200 нм [8–11].

Надежность полупроводников AlGaN также дает потенциал для стабильной работы устройств на их основе в агрессивных средах. SiC хотя и имеет высокую надежность, однако карбид кремния имеет ширину запрещенной зоны 2.9 эВ, что меньше чем у GaN, и нет возможности варьирования ширины запрещенной зоны как у $Al_xGa_{1-x}N$. Поэтому детекторы на основе SiC так же могут требовать применения дорогостоящих оптических фильтров.

1. ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

При создании фотодиодов на основе контактов металл-полупроводник большое значение имеет качество поверхности эпитаксиального слоя AlGaN. Основные проблемы получения идеального интерфейса связаны с методом выращивания эпитаксиальных слоев нитридов. Существует три основных метода выращивания эпитаксиальных слоев полупроводниковых нитридов: молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ), газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений

*E-mail: ialamkin@mail.ru

†E-mail: satarasov@mail.ru

‡E-mail: csergey.kurin@spbau.com

(МОГФЭ), хлоридно-гидридная эпитаксия (ХГЭ).

В работе исследовались образцы, выращенные двумя методами: молекулярно-пучковой эпитаксией с плазменной активацией азота в металл-обогащенных условиях и хлоридно-гидридной эпитаксией.

Проблемы с большим количеством дислокаций связаны, в первую очередь, с резким снижением структурного качества AlGaN гетероструктур при увеличении содержания Al выше 20%. При этом плотность прорастающих дислокаций (ПД) может достигать $> 10^{11} \text{ см}^{-2}$, что при отсутствии сильно выраженных эффектов локализации, приводит к резкому снижению эффективности фотодиодов. Использование подложки Al₂O₃, обладающей большим кристаллическим средством к материалам III-N, а также сравнительно толстых буферных слоев AlN дает более высокое качество поверхности структуры. Введение на начальных стадиях роста трехстадийного буферного слоя AlN и короткопериодной решетки AlN/AlGaN позволило получить удовлетворительное структурное качество слоев, имевших плотность прорастающих дислокаций 10^9 – 10^{10} см^{-2} и полуизолирующие свойства при отсутствии легирования.

Высокая плотность дислокаций, а также высокая себестоимость выращивания слоев методами молекулярно-пучковой эпитаксии или газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений ограничивает возможность создания качественных и дешевых фотоприемников. Для решения вышеуказанных проблем были исследованы образцы, выращенные методом хлоридно-гидридной эпитаксией. Данный метод имеет ряд технологических преимуществ перед МПЭ, а также позволяет добиться значительного снижения себестоимости производства эпитаксиальных слоев твердых растворов AlN-GaN. В частности, ХГЭ позволяет получать эпитаксиальные слои высокого кристаллического качества, обеспечивая при этом возможность управления скоростью роста в широких пределах: от долей микрометра до десятков и сотен микрометров в час. Плотность дислокаций в используемых образцах варьировалась в диапазоне от $9 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ до $8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$.

Фотоприемники на основе контактов металл-полупроводник создавались методом вакуумного термического резистивного напыления металла на эпитаксиальные слои твердого раствора Al_xGa_{1-x}N. В настоящее время формирование тонких пленок методом вакуумного термического напыления является самой распространенной и дешевой технологией, используемой при создании полупроводниковой электроники. Выбор такого метода создания омических контактов позволил существенно снизить расходы при создании фотодиодов.

Проведению процесса напыления металлов предшествует подготовительный этап, который включает в себя обработку образцов, масок, держателя, испарителя, распыляемого металла, рабочего объема вакуумной установки. Обработка образцов производится погружением в изопропиловый спирт, четыреххлористый угле-

род, перекись водорода, различные кислоты. Маски обрабатывались изопропиловым спиртом с последующей промывкой в дистиллированной воде. Так же эффект очистки имеет нагрев образцов в вакууме до температур порядка 300 °С непосредственно перед напылением [12].

Омические контакты создавались по оптимизированной технологии: структура контакта — Ti/Al, где титан является подслоем для алюминия. Толщина титанового слоя составляла 15 нм, а алюминиевого — 35 нм [13, 14]. Для сильнолегированных образцов *n*-AlGaN можно было использовать однослойные алюминиевые контакты с последующим отжигом в вакууме при температуре 800 °С в течение 30 мин для получения омической вольтамперной характеристики. Однако использование двухслойного контакта Ti/Al позволяет снизить контактное сопротивление и уменьшить время и температуру отжига. Так же использование сильнолегированных эпитаксиальных слоев не возможно при создании фоточувствительных структур на основе барьера Шоттки. Кроме того, для слаболегированного твердого раствора *n*-типа AlN-GaN не удалось добиться омической характеристики при использовании однослойного контакта даже проводя отжиг при температуре 930 °С в течение длительного времени. Поэтому предпочтение было отдано двухслойным контактам Ti/Al. Для получения омической характеристики проводился отжиг при температуре 750 °С в течение 10 мин (рис. 1). Дальнейшее увеличение температуры незначительно влияло на вольтамперную характеристику. Чтобы не допустить окисления титана и алюминия, особенно при высоких температурах, отжиг проводился в вакууме при давлении остаточных газов 10^{-3} мм рт. ст.

При напылении выпрямляющих контактов установлено, что очистка образца в четыреххлористом углеводе в течении 5 минут позволяет добиться наименьшего сопротивления, что можно объяснить наилучшим удалением органических и иных загрязнений с поверхности полупроводника.

Для соблюдения эффекта полупрозрачности толщины контакта должна быть 15 нм. В работе исследовались эпитаксиальные слои *n*-типа электропроводности.

2. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЗДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ФОТОДИОДОВ

Исследование спектральных характеристик проводилось с помощью дифракционного решеточного монохроматора с источником света на базе ксеноновой лампы с колбой, не поглощающей ультрафиолетовую составляющую излучения. Измерения автоматизированы с использованием персонального компьютера, который регистрирует и сохраняет показания, а также управляет положением дифракционной решетки.

На рис. 2 изображены спектральные характеристики

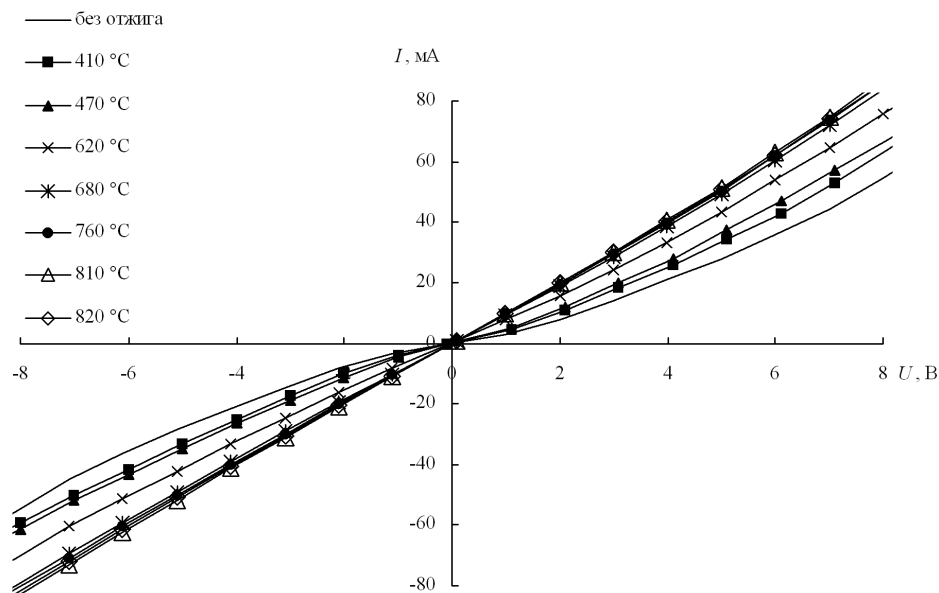
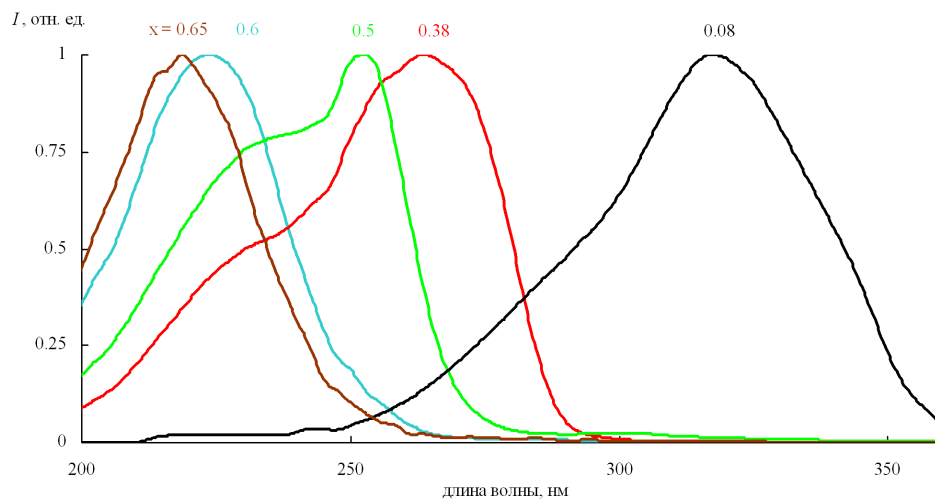


Рис. 1: Влияние температуры отжига на ВАХ Ti/Al контакта

Рис. 2: Спектральные характеристики фотоприемников на основе барьера Шоттки Au-n-Al_xGa_{1-x}N

ки фотодиодов, длинноволновая граница чувствительности которых определяется шириной запрещенной зоны твердого раствора $A_xGa_{1-x}N$. Видно, что в созданных экспериментальных образцах эффект надбарьерного переноса практически не проявился. Возможно, это связано с тем, что при толщине выпрямляющего контакта менее 15 нм свет в нем слабо поглощался.

Исследования показали, что после длинноволнового края поглощения, обусловленного шириной запрещенной зоны, характеристика не спадает до нуля, а есть чувствительность. Известно, что высота барьера металл-полупроводник характеризует длинноволновый край чувствительности таких образцов. В таких

образцах наблюдалось существенно проявление надбарьерного переноса на спектральных характеристиках (рис. 3).

Как видно из рис. 4, использование твердого раствора AlGaN, в котором доля алюминия $x = 0.08$, позволяет создать «видимослепой» ультрафиолетовый фотоприемник. Такой фотоприемник обладает чувствительностью в диапазоне длин волн 200–360 нм. Кроме того, он практически не чувствителен к излучению длинной волны более 370 нм, что позволяет его применять для детектирования ультрафиолетового излучения при сильной внешней засветке видимым светом.

Увеличение доли алюминия в структуре позволило

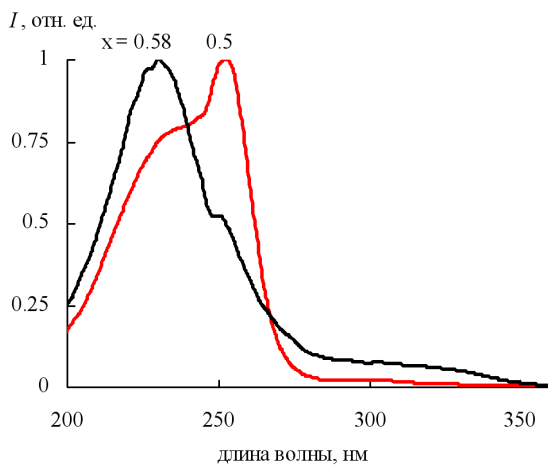


Рис. 3: Спектральные характеристики фотоприемников на основе барьера Шоттки $Au-n-Al_xGa_{1-x}N$ с эффектом надбарьерного переноса

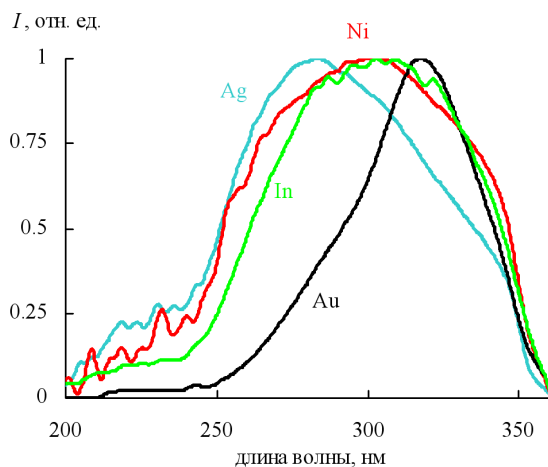


Рис. 4: Спектральная характеристика фотодиода на основе барьера Шоттки к $Al_{0.08}Ga_{0.92}N$ с различным металлом выпрямляющего контакта

сместить край чувствительности в коротковолновую область, в том числе создать «солнечнослепой» фотоприемник при значении $x = 0.38$ (см. рис. 5). Красная граница «солнечнослепого» ультрафиолетового фотодиода составила 290 нм. При значении x больше 0.8 диапазон чувствительности структуры $Al_xGa_{1-x}N$ будет находиться уже в вакуумном ультрафиолете, длина волны которого меньше 200 нм.

Коротковолновый край определяется в первую очередь состоянием границы раздела металл-полупроводник и соответствующим значением скорости поверхностной рекомбинации. Наибольшую чувствительность коротковолновой области демонстрировали структуры с золотым контактом, что можно объяснить наименьшей скоростью поверх-

ностной рекомбинации в таких образцах. Однако спектральная характеристика фоточувствительной структуры на основе эпитаксиального слоя с долей алюминия $x = 0.65$ (см. рис. 2), имеет более резкий спад коротковолновой части спектра. Такой эффект можно объяснить сильным поглощением ультрафиолетового света в этом диапазоне длин волн при проведении измерений в атмосфере.

Исследования спектральных характеристик с различными металлами выпрямляющих полупрозрачных контактов показало высокую чувствительность экспериментальных фотодиодов с золотым контактом. Данный контакт обеспечивает не только более высокую фоточувствительность, но также обладает рядом других преимуществ, например стойкостью к окислению и высокой проводимостью. Так же он не окисляется с течением времени в отличие от серебра и облегчает присоединение золотых проводников при монтаже кристалла в корпус фотодетектора.

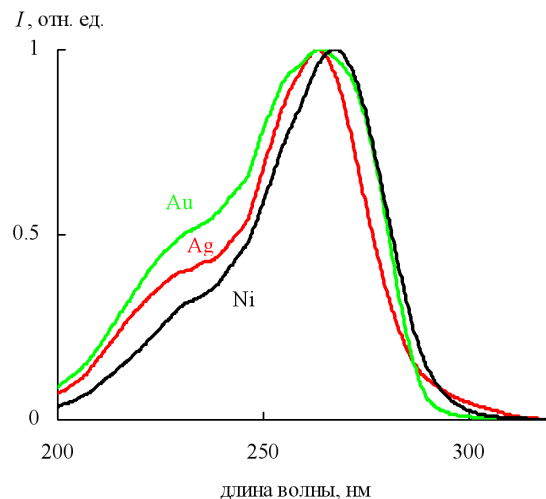


Рис. 5: Спектральная характеристика фотодиода на основе барьера Шоттки к $Al_{0.38}Ga_{0.62}N$ с различным металлом выпрямляющего контакта

На положение длинноволнового края оказывает влияние значение высоты потенциального барьера Шоттки, состав полупроводника и примеси в нем. Коротковолновый край в первую очередь определяется состоянием границы раздела металл-полупроводник и соответствующим значением скорости поверхностной рекомбинации. Наибольшую чувствительность коротковолновой области демонстрируют структуры с золотым контактом, что можно объяснить наименьшей скоростью поверхностной рекомбинации в таких образцах.

На скорость поверхностной рекомбинации должно оказывать сильное влияние наличие органических и иных загрязнений на поверхности полупроводника перед нанесением металла. В этой связи большую роль будет играть метод очистки подложки. Исследования показали, что правильная очистка позволяет су-

щественно повысить фоточувствительность структуры. Наилучшие результаты дает очистка в четыреххлористом углероде.

Часть структур было подвергнуто термообработке с целью изучения возможного влияния продолжительности отжига на спектральные характеристики структур. Установлено, что термообработка структуры с золотым контактом позволяет увеличить фоточувствительность в 4 раза.

На основании приведенных исследований можно сделать вывод о высокой перспективности фоточувствительных структур с золотыми контактами. Золотой контакт обеспечивает не только более высокую фоточувствительность, но также обладает рядом других преимуществ, таких как, стойкость к окислению и высокую проводимость.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданы экспериментальные образцы ультрафиолетовых фотоприемников на основе контактов металл-твердые растворы $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с различной долей x алюминия. Установлено, что термообработка структуры с золотым контактом позволяет увеличить фоточувствительность в 4 раза. Установлено, что важней-

шее влияние на характеристики контакта оказывают параметры предварительной очистки поверхности эпитаксиального слоя. Для лучшей адгезии металла к поверхности эпитаксиального слоя необходимо использовать подогрев. Показано, что температура подогрева образца во время напыления должна быть 300°C . Для наблюдения эффекта полупрозрачности толщина контакта должна быть 15 нм.

Золотой полупрозрачный контакт обеспечил не только более высокую фоточувствительность, но также обладает рядом других преимуществ, таких как, стойкость к окислению, высокую проводимость и технологичность. Это позволяет говорить о наибольшей перспективности его использования при создании исследуемых фотодиодов.

На основе твердого раствора $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с долей алюминия $x = 0.08$ удалось создать «видимослепой» ультрафиолетовый фотоприемник. Такой фотоприемник обладает чувствительностью в диапазоне длин волн 200–360 нм. Увеличение доли Al до 0.38 позволило реализовать экспериментальный «солнечно-слепой» ультрафиолетовый фотодиод, спектральная область чувствительности которого лежит в диапазоне 200–290 нм. Который не обладает чувствительностью к свету длиной волны более 300 нм.

-
- [1] *Menkovich E., Tarasov S., Lamkin I.* Functional Materials. **19**. № 2. P.233. (2012).
- [2] *Monroy E., Calle F., Pau J., Munoz E., Omnes F., Beaumont B., Gibart P.* Journal of Crystal Growth. **230**. P. 537. (2001).
- [3] *Tarasov C.* Петербургский журнал электроники. **49**. № 4. С. 132. (2006).
- [4] *Averin S., Kuznetsov P., Zhitov V., Alkeev N.* Opt. Quant. Electron. № 39. P. 181. (2007).
- [5] *Tarasov C.* Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. № 8. С. 17. (2008).
- [6] *Omnes F., Monroy E., Calle F., Munoz, Beaumont B., Gibart P.* Opto-Electronics Review. **8**. № 1. P. 43. (2000).
- [7] *Pikhtin A., Tarasov S., Kloth B.* IEEE Transactions on Electron Devices. **50**. № 1. С. 215. (2003).
- [8] *Ламкин И., Менькович Е., Тарасов С.* Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. № 153. С. 28. (2012).
- [9] *Sang Li-Wen, Qin Zhi-Xin and etc.* Chinese Physics Letters. **25**. № 1. P. 258. (2008).
- [10] *Lamkin I., Tarasov S.* Journal of Physics: Conference Series. **461**. 012025. (2013).
- [11] *Chen Q., Yang J., Osinsky A., Gangopadhyay S., Lim B., Anwar M., Asif Khan* Applied Physics Letters. **70**. № 17. P. 2277. (1997).
- [12] *Ламкин И., Тарасов С., Феоктистов А.* Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. № 5. С. 14. (2011).
- [13] *Luther B., Mohnney S., Jackson T., Asif Khan M., Chen Q., Yang J.* Applied Physics Letters. **70**. № 1. P. 57. (1997).
- [14] *Калинин Б., Ламкин И., Менькович Е., Тарасов С.* Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. № 5. С. 24. (2012).

Solarblind and visibleblind photodetectors based on the AlGaN

I. A. Lamkin^{1,a}, S. A. Tarasov^{1,b}, S. Yu. Kurin^{2,c}

¹Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Faculty of Electronics, Department of Micro- and nanoelectronics, St. Petersburg, 197376, Russia.

²Saint Petersburg Academic University, Nanotechnology Research and Education Centre RAS, Laboratory for Nanophotonics, St. Petersburg, 194021, Russia.

E-mail: ^aialamkin@mail.ru, ^bsatarov@mail.ru, ^csergey2011kurin@yandex.ru

AlGa_xN material system with the maximum band gap energy of 6.1 eV allows to manufacture ultraviolet (UV) optoelectronic devices working within a wide UV-A, B, C spectral range with a minimum wavelength of $\lambda = 210$ nm. However, fabrication of the low-resistance ohmic contact to Al_xGa_{1-x}N with a high Al content ($x > 0.5$) is a difficult and actual task.

The best results on the AlGa_xN-based Schottky-type photodetectors were obtained by using Au (15 nm) and Ti/Al (15/35 nm) as barrier and ohmic contacts, respectively. The sequential short-wavelength shift of the photo-response curves toward deep UV (solar-blind) range with the minimum achieved cut-off wavelength less than 250 nm was observed for the structures with a Al-content as high as $x = 0.6$.

PACS: 42.66.Lc

Keywords: photodiode, a solid solution of AlGa_xN, Schottky barrier, ultraviolet

Received 20.09.2013.

Сведения об авторах

1. Ламкин Иван Анатольевич — аспирант, инженер кафедры микро- и нанoeлектроники, факультет электроники СПбГЭТУ; тел.: 8 (921) 776-84-09, e-mail: ialamkin@mail.ru.
2. Сергей Анатольевич Тарасов — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ; тел.: (812) 234-31-64, e-mail: satarasov@mail.ru.
3. Курин Сергей Юрьевич — младший научный сотрудник, лаборатории нанoфотоники СПб АУ НОЦНТ РАН; e-mail: sergey.kurin@spbau.com.