

УДК 621.383.4/5

## Гетероструктуры AlGaN/AlN и солнечно-слепые $p-i-n$ -фотоприемники на их основе

К.О. Болтарь, И.В. Чинарева, М.В. Седнев, А.А. Лопухин, А.А. Мармалюк,  
А.В. Мазалов, Д.Р. Сабитов, В.А. Курешов, А.А. Падалица

*Представлены результаты работы по созданию AlGaN/AlN-гетероструктур на подложках сапфира методом МОС-гидридной эпитаксии, пригодных для изготовления матриц ультрафиолетовых  $p-i-n$ -фотодиодов солнечно-слепых фотоприемных устройств и результаты исследований ультрафиолетовых матричных фотоприемников формата  $320 \times 256$  на их основе. Методом высокоразрешающей микроскопии исследованы дефекты поверхности ГЭС-структур AlGaN и их влияние на дефектность элементов ультрафиолетовых матричных фотоприемников.*

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

*Ключевые слова:* AlGaN, солнечно-слепые фотодиоды,  $p-i-n$ -фотодиоды, ультрафиолетовые фотодиоды, МОС-гидридная эпитаксия.

### Введение

Перспективным направлением развития современной микрофотоэлектроники является разработка крупноформатных матриц фоточувствительных элементов ультрафиолетового диапазона спектра на основе гетероэпитаксиальных  $p-i-n$ -структур GaN/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N [1].

Широкое многообразие задач, связанных с необходимостью детектировать излучение УФ-диапазона, предопределило целый ряд подходов по практической реализации соответствующих фотопреобразователей, в т.ч. на основе полупроводниковых материалов [2]. В последнее время

обозначилась тенденция к расширению использования нитридов III-группы (III-N) для решения указанных задач. Особенно привлекательным выглядит применение системы материалов AlN–GaN для создания солнечно-слепых фотоприемников благодаря непрерывному ряду твердых растворов и широкому диапазону изменения ширины запрещенной зоны. Известная проблема в технологии гетероструктур (ГС) на основе III-N заключается в отсутствии коммерчески доступных собственных подложек.

В настоящее время в качестве подложечного материала широко применяется сапфир, прозрачный во всем видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах длин волн. Это позволяет осуществлять ввод излучения через подложку и формировать матрицы фотодиодов для создания солнечно-слепых фотоприемников. Существенным недостатком сапфировых подложек является сильное несоответствие периодов кристаллических решеток сапфира и III-N, что затрудняет прямое получение ГС с высоким кристаллическим совершенством. В литературе описан ряд технологических приемов, направленных на повышение качества гетероэпитаксиальных слоев. Значительное их число сводится к использованию промежуточных буферных слоев (БС) [3–6]. 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 ГС.

Для рассматриваемых ГС на основе AlGaN вполне закономерным представляется выбор AlN

**Болтарь Константин Олегович**, начальник НТК<sup>1</sup>, профессор<sup>2</sup>

**Чинарева Инна Викторовна**, ведущий инженер технолог<sup>1</sup>

**Седнев Михаил Васильевич**, начальник участка<sup>1</sup>

**Лопухин Алексей Алексеевич**, начальник участка<sup>1</sup>

**Мармалюк Александр Анатольевич**, зам. генерального директора<sup>3</sup>, профессор<sup>4</sup>

**Мазалов Александр Владимирович**, инженер<sup>3</sup>

**Сабитов Дамир Равильевич**, инженер<sup>3</sup>

**Курешов Владимир Александрович**, ведущий инженер-технолог<sup>3</sup>

**Падалица Анатолий Алексеевич**, начальник отдела<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, 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, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

<sup>3</sup>ОАО «НИИ «Полнос» им. М.Ф.Степанаха»,

Россия, 117342, г. Москва, ул. Введенского, 3.

<sup>4</sup>МИТХТ им. М.В.Ломоносова,

Россия, 119571, Москва, проспект Вернадского, 86.

*Статья поступила в редакцию 30 июля 2013 г.*

© Болтарь К.О., Чинарева И.В., Седнев М.В., Лопухин А.А., Мармалюк А.А., Мазалов А.В., Сабитов Д.Р., Курешов В.А., Падалица А.А., 2013

в качестве материала БС [7]. Кроме того, получение слоев AlGaN *n*- и *p*-типа проводимости с низким удельным электрическим сопротивлением является непростой задачей [7]. Большое количество параметров оптимизации в технологии получения ГС AlGaN/AlN и формирования фоточувствительных элементов на их основе приводит к широкому спектру вариантов практической реализации и постоянно растущему числу публикаций на эту тему [9, 10].

Данная работа направлена на создание ГС AlGaN/AlN методом МОС-гидридной эпитаксии, пригодных к изготовлению на их основе солнечно-слепых *p-i-n*-фотоприемников.

### Метод выращивания гетероструктур

Гетероструктуры AlGaN/AlN формировались на подложках  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001) методом МОС-гидридной эпитаксии. TMAI, TMGa и NH<sub>3</sub> использовались в качестве источников алюминия, галлия и азота, соответственно. Водород являлся газом-носителем. Источниками легирующей примеси *n*- и *p*-типа служили SiH<sub>4</sub> и Cr<sub>2</sub>Mg. Схематическое изображение ГС AlGaN/AlN для солнечно-слепых *p-i-n*-фотоприемников представлено на рис. 1.

Для оценки кристаллического совершенства слоев ГС проведены измерения рентгеновских кривых качания симметричного отражения (0002) на двухосевом дифрактометре и определены ширины этих кривых на половине высоты пика. Электрофизические параметры образцов (концентрация и подвижность носителей заряда, удельное сопротивление) определяли измерением ЭДС Холла при комнатной температуре. Омические контакты формировали путем вжигания In при температуре 300 °С.

### Характеристики гетероструктур

Важным моментом при формировании ГС AlGaN/AlN на подложках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> является необходимость использования промежуточных БС, призванных повысить кристаллическое совершенство фоточувствительной структуры. Среди существующего разнообразия БС в данной работе выбран подход по снижению плотности дислокаций благодаря использованию сверхрешеток, которые останавливают продвижение дислокаций в вышележащие слои и способствуют релаксации упругих напряжений, вызванных несоответствиями параметров решеток подложки и растущего слоя [11–12]. При этом элементы сверхрешетки подобраны таким образом, чтобы ширина запрещенной зоны каждого из них была не меньше ширины запрещенной зоны фильтрующего слоя.

На рис. 2 приведено изображение рентгеновской кривой качания предложенного сверхрешеч-

точного БС. Видны отчетливые сателлитные пики, что свидетельствует о хорошем кристаллическом совершенстве и периодичности.

С использованием указанного БС выращены отдельные слои *n*-Al<sub>0,6</sub>Ga<sub>0,4</sub>N и *p*-Al<sub>0,45</sub>Ga<sub>0,55</sub>N, а также измерены их электрофизические характеристики. Для *n*-Al<sub>0,6</sub>Ga<sub>0,4</sub>N получены значения удельного электрического сопротивления, подвижности и концентрации носителей заряда на уровне

р-контакт	
Контактный слой p-GaN, 250 нм	
Фотодиодный слой p-Al <sub>0,45</sub> Ga <sub>0,55</sub> N, 170 нм	
Поглощающий слой i-Al <sub>0,45</sub> Ga <sub>0,55</sub> N, 200 нм	п-контакт
Фильтрующий слой n-Al <sub>0,6</sub> Ga <sub>0,4</sub> N, 400 нм	
Буферный слой, 1500 нм	
Сапфировая подложка с двухсторонней полировкой	

Рис. 1. Схематическое изображение ГС AlGaN/AlN и фоточувствительного элемента на ее основе.

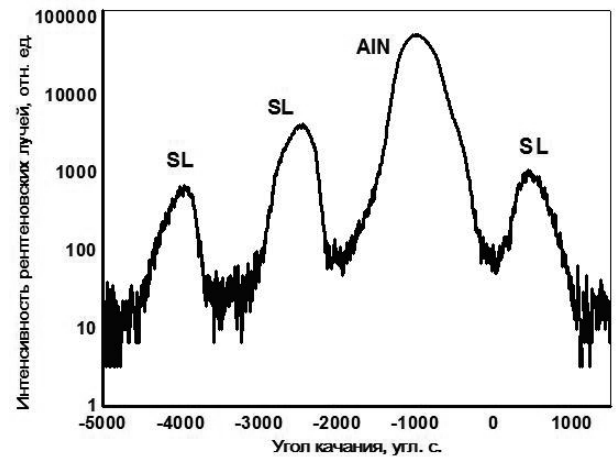


Рис. 2. Рентгеновская кривая качания сверхрешечного БС. (N676–1).

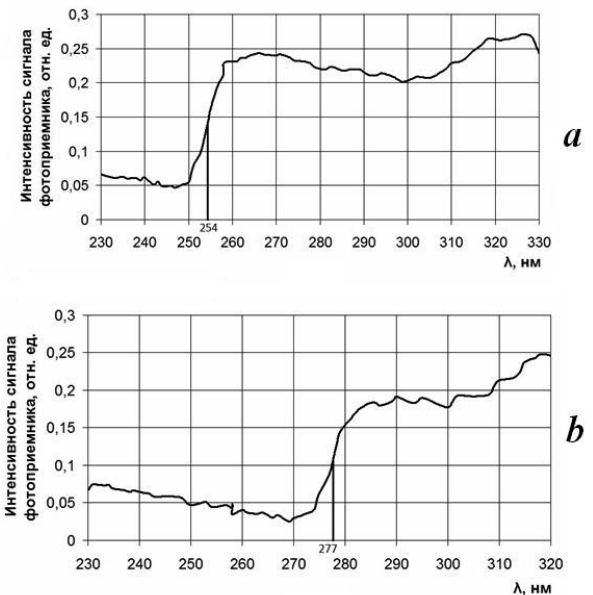


Рис. 3. Спектры пропускания слоев а) *n*-Al<sub>0,6</sub>Ga<sub>0,4</sub>N; б) *p*-Al<sub>0,45</sub>Ga<sub>0,55</sub>N (колебания интенсивности сигнала на длинах волн 280–330 нм связаны с неоднородностью спектральной характеристики ртутной лампы).

0,022 Ом·см, 33,5 см<sup>2</sup>/В·с и  $n = 8,5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Путем оптимизации условий роста, расхода легирующей примеси и быстрого термического отжига удалось получить слой  $p\text{-Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{N}$ , имеющий удельное электрическое сопротивление, подвижность и концентрацию носителей заряда на уровне 8 Ом·см, 1 см<sup>2</sup>/В·с и  $p = 8 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>.

Спектры пропускания рассматриваемых слоев представлены на рис. 3. Видно, что положение края пропускания обеспечивает возможность использования данных твердых растворов в качестве фильтрующего и фотодиодного слоев.

Опираясь на полученные результаты по формированию отдельных слоев, создана приборная ГС солнечно-слепого  $p\text{-}i\text{-}n$ -фотоприемника (см. рис. 1). Рентгеновская кривая качания рассматриваемой ГС представлена на рис. 4.

Видно, что все слои ГС различимы и обладают хорошим кристаллическим совершенством. В таблице представлены значения полуширины пиков кривой качания для различных слоев.

Таблица

Значения полуширины пиков рентгеновской кривой качания фотоприемной ГС AlGaN/AlN.

Материал	FWHM, угл. с
GaN	350
$\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{N}$	411
$\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{N}$	425
AlN	522

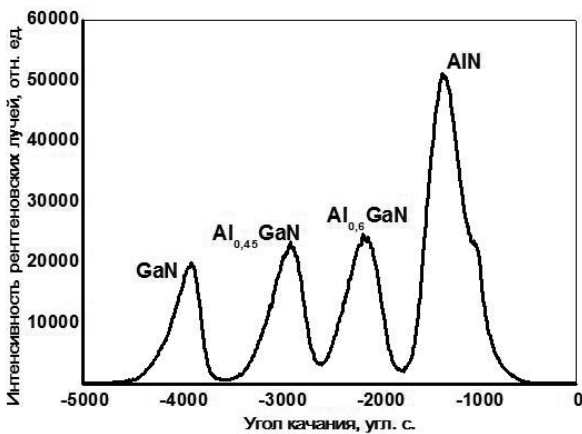


Рис. 4. Рентгеновская кривая качания фотоприемной ГС AlGaN/AlN.

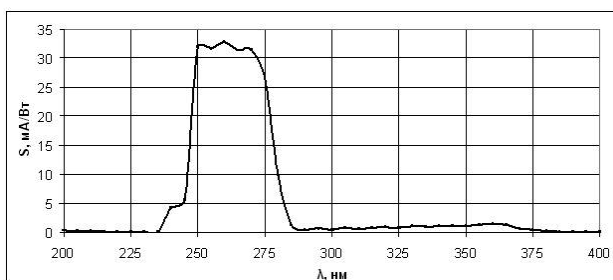


Рис. 5. Зависимость чувствительности  $p\text{-}i\text{-}n$  фотоприемника от длины волны падающего света.

Из полученных ГС AlGaN/AlN изготовлены тестовые  $p\text{-}i\text{-}n$ -фотодиоды с размером фоточувствительной площадки 24×24 мкм и исследованы их характеристики. Ввод излучения осуществлялся через подложку. Схематическое изображение фоточувствительного элемента приведено на рис. 1.

На рис. 5 показана зависимость чувствительности тестового фотодиода от длины волны падающего света. Положение коротковолновой и длинноволновой границ полученного спектра фоточувствительности определяется составами фильтрующего и поглощающего слоев ГС и соответствуют ожидаемым значениям.

Длинноволновое крыло спектра со слабо выраженным максимумом в районе 365 нм, по видимому, связано с недостаточно высоким качеством контакта к  $p\text{-GaN}$ . Так, в [11] указывается на подобный эффект, который авторы связывают с влиянием диода Шоттки, образовавшегося из-за недостаточной омичности  $p$ -контакта. Улучшение данной технологической операции позволит избежать указанной особенности спектра. Величина квантовой эффективности составила 15–17 % в спектральном диапазоне 250–270 нм. Дальнейшее повышение этого параметра возможно при совершенствовании технологии получения ГС и формирования фоточувствительного элемента.

### Характеристики матричного фотоприемника

Из полученной гетероструктуры изготовлены матрицы  $p\text{-}i\text{-}n$ -фотодиодов формата 320×256, шаг 30 мкм с размером фоточувствительной площадки 25×25 мкм по мезатехнологии ОАО «НПО «Орион» [13–14]. На рис. 6 представлено изобра-

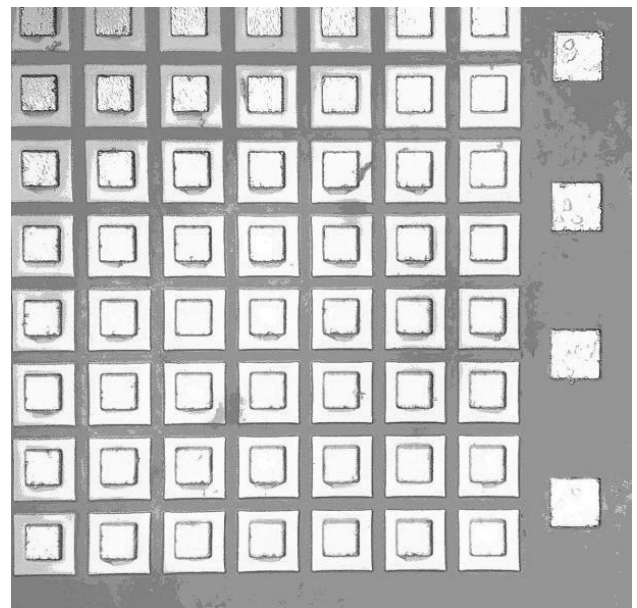


Рис. 6. Изображение фрагмента матрицы  $p\text{-}i\text{-}n$  фотодиодов с размером фоточувствительной площадки 25×25 мкм, формата 320×256, шаг 30 мкм с индиевыми микроконтактами.

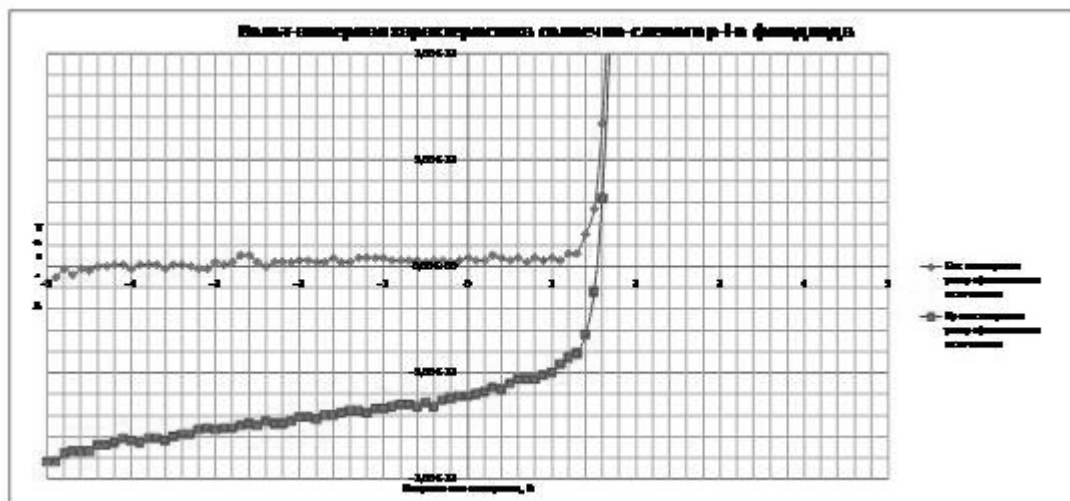


Рис. 7 Вольт-амперная характеристика пикселя матричного солнечно-слепого фотоприемника формата 320×256, шаг 30 мкм.

жение фрагмента фоточувствительного элемента с индиевыми микроконтактами.

Вольт-амперные характеристики  $p-i-n$ -фотодиода, измеренные без освещения ультрафиолетовым источником и при освещении светодиоидом с  $\lambda = 265$  нм, представлены на рис. 7.

На рис. 8. представлены результаты исследования методом высокоразрешающей микроскопии поверхности после ионного травления матричной мезаструктуры ультрафиолетовых фотодиодов в ГЭС-структуре на основе AlGaIn. По мере ион-

ного травления поверхности выявляются ростовые дефекты в виде мелких ямок травления.

Изображение осветителя из двух светодиодов ( $\lambda = 265$  нм) матричным фотоприемником (МФП) на основе ГЭС GaAlIn формата 320×256 с шагом 30 мкм и временем накопления  $T_n = 0,63$  мс иллюстрирует рис. 9. Плотность дефектов фоточувствительных элементов типа утечки фотодиодов (белые точки на рис. 9) существенно меньше плотности дефектов травленных участков поверхности ГЭС и сравнима с плотностью дефектов на поверхности ГЭС (см. рис. 8).

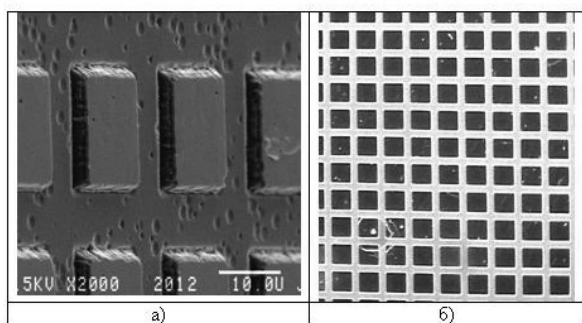


Рис. 8. Изображения поверхности МФП в ГЭС-AlGaIn/ а). Изображение в электронном микроскопе поверхности ГЭС структуры после травления ионами аргона через маску фоторезиста. б). Фотография фрагмента матрицы  $p-i-n$  фотодиодов. Шаг 30 мкм.

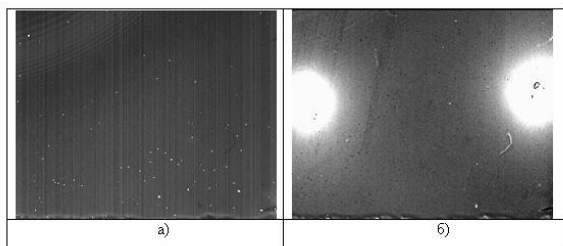


Рис. 9 Характеристики матричного фотоприемника (МФП) на основе ГЭС GaAlIn формата 320×256 с шагом 30 мкм. а). Без освещения, 230 точечных дефектов. б). Изображение осветителя из двух светодиодов ( $\lambda = 265$  нм). Время накопления  $T_n = 0,63$  мс.

## Заключение

Для уменьшения плотности дислокаций в слоях AlGaIn использован сверхрешеточный БС. Методом МОС-гидридной эпитаксии получены слои AlGaIn с высоким содержанием алюминия  $n$ - и  $p$ -типа проводимости. Изготовлены гетероструктуры AlGaIn/AlIn и матрицы фоточувствительных элементов, на базе которых созданы первые отечественные матричные солнечно-слепые  $p-i-n$  фотоприемники.

## Литература

1. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотозлектроника.— М.: Физматкнига, 2011.
2. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А. // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 9. С. 1025
3. Amano H., Sawaki N., Akasaki I., Toyoda Y. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 48. P. 353
4. Kuznia J.N., Asif Khan M., Olson D.T., et al. // J. Appl. Phys. 1993. V. 73 (9). P. 4700
5. Lorenz K., Gonsalves M., Kim W., et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. No. 21. P. 3391
6. Lee I.— H., T.G., Park Y. // J. Cryst. Growth. 2002. V. 234. P. 305
7. Jiang H.X., Lin J.Y. // Opto-Electronics Review. 2002. V.10 (4). P. 271

8. Kamiyama S., Iwaya M., Hayashi N., et al. // J. Cryst. Growth. 2001. V. 223. P. 83
9. Han J., Waldrip K. E., Lee S. R., et al. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. No. 1. P. 67
10. McClintock R., Yasan A., Mayes K., et al. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. P. 1248
11. Bourret-Courchense E.D., Kellermann S., Yu K.M., Benamara M., et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. No. 22. P. 3562

12. Sakai S., Wang T., Morishima Y., Naoi Y. // J. Cryst. Growth. 2000. V. 221. P. 334
13. Бурлаков И.Д., Болтарь К.О., Яковлева Н.И. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3, С. 344.
14. Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Седнев М.В., Яковлева Н.И. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 200

## AlGaN/AlN heterostructures and the solar-blind $p-i-n$ -photodetectors array

*K.O. Boltar<sup>1,2</sup>, I.V. Chinareva<sup>1</sup>, M.V. Sednev<sup>1</sup>, A.A. Lopukhin<sup>1</sup>, A.A. Marmayuk<sup>3,4</sup>,  
A.V. Mazalov<sup>3</sup>, D.R. Sabitov<sup>3</sup>, V.A. Kureshov<sup>3</sup>, A.A. Padalitsa<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>ORION R&P Association,  
46/2 Shosse Entusiastov, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology,  
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

<sup>3</sup>M.F. Stelmakh RDI «Polyus»,  
3 Vvedensky str., Moscow, 117342, Russia  
E-mail: aleksandrmzl@yandex.ru

<sup>4</sup>Moscow State University of Fine Chemical Technologies,  
86 Vernadsky ave., Moscow, 119571, Russia

***Results of work on growth of AlGaN/AlN heterostructures on sapphire substrates by MOVPE, suitable for manufacturing of solar-blind  $p-i-n$ -photodiodes, and results of researches of ultra-violet photodetectors arrays of a format 320×256 on their basis are presented. The surface defects of AlGaN heterostructures are investigated by high-resolution microscopy and their influence on deficiency of elements of ultra-violet photodetectors array are presented.***

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

*Keywords:* noise, fluctuations, random field, correlator,  $p-n$ -transition.

Bibliography — 14 references

*Received July 30, 2013*