

УДК 621.383

Солнечно-слепые $p-i-n$ -фотодиоды на основе гетероструктур AlGaIn/AlN

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

Представлены результаты работы по созданию гетероструктур AlGaIn/AlN 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 320x256 на их основе. Методом высокоразрешающей микроскопии исследованы дефекты поверхности гетероструктур AlGaIn и их влияние на дефектность элементов ультрафиолетовых матричных фотоприемников.

PACS: 07.07.Df, 07.57.—с, 81.05.Ea, 81.65.Rv

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

Введение

Разработка крупноформатных матриц фоточувствительных элементов ультрафиолетового диапазона спектра на основе гетероэпитаксиальных $p-i-n$ структур GaN/Al_xGa_{1-x}N является важным направлением развития современной микрофотоелектроники [1]. Многообразие задач, связанных с необходимостью детектировать излучение УФ-диапазона определило ряд направлений по созданию соответствующих фотопреобразователей, в том числе на основе полупроводниковых материалов [1–5]. Особенно привлекательным выглядит применение системы материалов AlN-GaN для создания фотоприемников ультрафиолетового диапазона, благодаря непрерывному ряду твердых растворов с широким диапазоном изменения ширины запрещенной зоны.

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК.
Таубкин Игорь Исаакович, гл. научн. сотрудник.
Седнев Михаил Васильевич, начальник участка.
Чинарева Инна Викторовна, вед. инженер.
Лопухин Алексей Алексеевич, начальник участка.
Смирнов Дмитрий Валентинович, инженер.
ОАО «НПО «Орион».
Россия, 111123, Москва, ш. Энтузиастов, 46/2.
E-mail: orion@orion-ir.ru
Мармалюк Александр Анатольевич, зам. гендиректора.
Мазалов Александр Владимирович, инженер.
Сабитов Дамир Равильевич, инженер-технолог.
Курешов Владимир Александрович, вед. инженер.
Падалица Анатолий Алексеевич, начальник отдела.
ОАО «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха»
Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, 3/1
E-mail: bereg@itnline.ru

Статья поступила в редакцию 18 октября 2013 г.

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

Известная проблема в технологии гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) на основе элементов III–V групп заключается в отсутствии коммерчески доступных собственных подложек. В настоящее время в качестве подложечного материала чаще других применяется сапфир, прозрачный в 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 эпитаксиальных слоев на основе твердых растворов элементов III–V групп, что затрудняет прямое получение ГЭС с высоким кристаллическим совершенством. В литературе описан ряд технологических приемов, направленных на повышение качества гетероэпитаксиальных слоев. Чаще это использование промежуточных буферных слоев (БС) [6–9]. 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 [10]. Кроме того, получение слоев AlGaIn n - и p -типа проводимости с низким удельным электрическим сопротивлением является непростой задачей [10, 11]. Большое количество параметров оптимизации в технологии получения ГЭС AlGaIn/AlN и формирования фоточувствительных элементов на их основе способствует постоянно растущему числу публикаций на эту тему [12, 13].

p-контакт	
Контактный слой p-GaN, 250 нм	
Фотодиодный слой p-Al _{0,45} Ga _{0,55} N, 170 нм	
Поглощающий слой i-Al _{0,45} Ga _{0,55} N, 200 нм	n-контакт
Фильтрующий слой n-Al _{0,6} Ga _{0,4} N, 400 нм	
Буферный слой, 1500 нм	
Сапфировая подложка с двухсторонней полпровкой	

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

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

Метод выращивания гетероструктур

Гетероструктуры AlGaN/AlN формировались на подложках α -Al₂O₃ (0001) методом МОС-гидридной эпитаксии. TMAI, TMGa и NH₃ использовались в качестве источников алюминия, галлия и азота, соответственно. Водород являлся газом-носителем. Источниками легирующей примеси *n*- и *p*-типа служили SiH₄ и Cr₂Mg. Схематическое изображение ГЭС AlGaN/AlN для солнечно-слепых *p-i-n*-фотоприемников представлено на рис. 1.

Для оценки кристаллического совершенства слоев ГЭС 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.

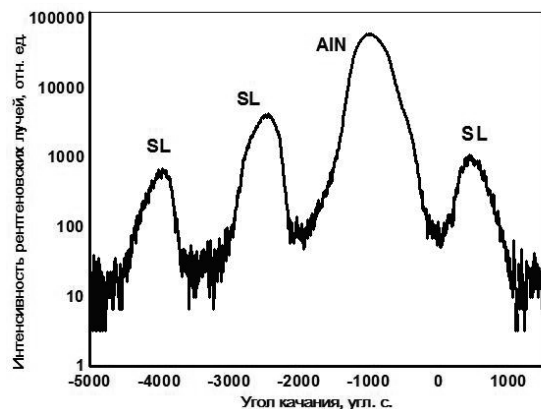


Рис. 2. Рентгеновская кривая качания сверхрешеточного БС.

Характеристики гетероструктур

Важным моментом при формировании ГЭС AlGaN/AlN на подложках Al₂O₃ 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 способствует релаксации упругих напряжений вызванных несоответствиями параметров решеток подложки и растущего слоя [14, 15]. Причем 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 сверхрешеточного БС. Видны отчетливые сателлитные пики, что свидетельствует о хорошем кристаллическом совершенстве и периодичности.

С использованием указанного БС выращены отдельные слои *n*-Al_{0,6}Ga_{0,4}N и *p*-Al_{0,45}Ga_{0,55}N и измерены их электрофизические характеристики. Для *n*-Al_{0,6}Ga_{0,4}N получены значения удельного электрического сопротивления, подвижности и концентрации носителей заряда на уровне 0,022 Ом·см, 33,5 см²/В·с и $n = 8,5 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Путем оптимизации условий роста, расхода легирующей примеси и быстрого термического отжига удалось получить слой *p*-Al_{0,45}Ga_{0,55}N, имеющий удель-

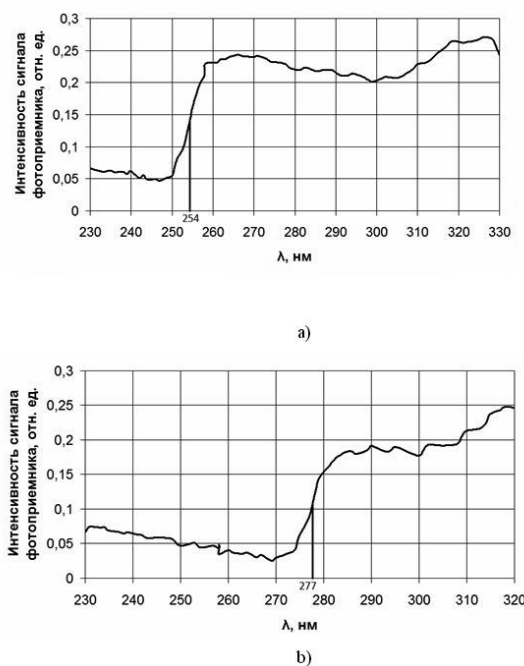


Рис. 3. Спектры пропускания слоев а) *n*-Al_{0,6}Ga_{0,4}N; б) *p*-Al_{0,45}Ga_{0,55}N (колебания интенсивности сигнала на длинах волн 280–330 нм связаны с неоднородностью спектральной характеристики ртутной лампы).

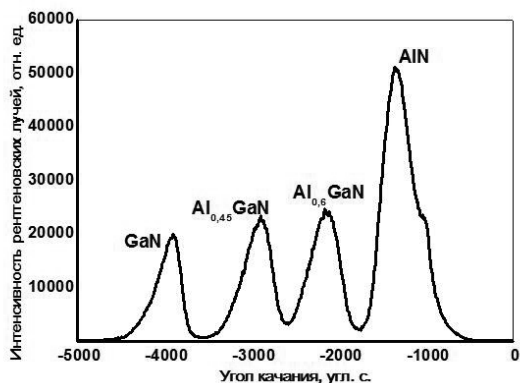


Рис. 4. Рентгеновская кривая качания фотоприемной ГЭС AlGaN/AlN.

ное электрическое сопротивление, подвижность и концентрацию носителей заряда на уровне 8 Ом·см, 1 см²/В·с и $p = 8 \cdot 10^{17}$ см⁻³.

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 ГЭС солнечно-слепого $p-i-n$ -фотоприемника (рис. 1). Рентгеновская кривая качания рассматриваемой ГЭС представлена на рис. 4. Видно, что все слои ГЭС различимы и обладают хорошим кристаллическим совершенством. В табл. 1 представлены значения полуширины пиков кривой качания для различных слоев.

Таблица

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

Материал	FWHM, угл. с
GaN	350
Al _{0.45} Ga _{0.55} N	411
Al _{0.6} Ga _{0.4} N	425
AlN	522

Из полученных ГЭС AlGaN/AlN изготовлены тестовые $p-i-n$ -фотодиоды с размером фоточувствительной площадки 24x24 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 ГЭС 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 -GaN. Так, в [14] 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 ГЭС и формирования фоточувствительного элемента.

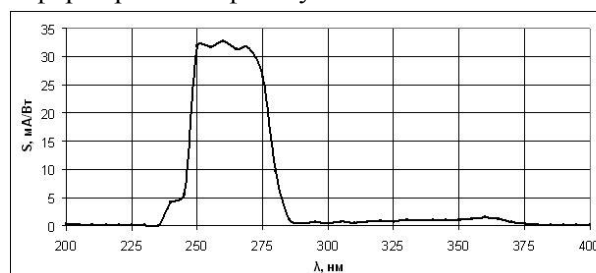


Рис. 5. Зависимость чувствительности $p-i-n$ -фотоприемника от длины волны падающего света.

Характеристики матричного фотоприемника

Из полученной ГЭС изготовлены матрицы $p-i-n$ -фотодиодов формата 320x256, шаг 30 мкм с размером фоточувствительной площадки 25x25 мкм по мезотехнологии ОАО «НПО «Орион» [16–17]. На рис. 6 представлено изображение фрагмента фоточувствительного элемента с индиевыми микроконтактами

Вольт-амперные характеристики $p-i-n$ -фотодиода, измеренные без освещения ультрафиолетовым источником и при освещении светодиодом 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

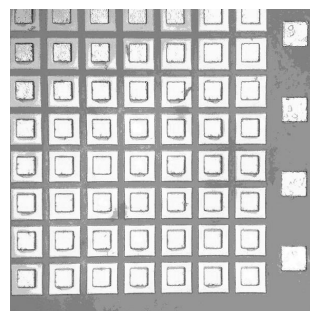


Рис. 6. Изображение фрагмента матрицы $p-i-n$ -фотодиодов с размером фоточувствительной площадки 25x25 мкм, формата 320x256, шаг 30 мкм. с индиевыми микроконтактами.

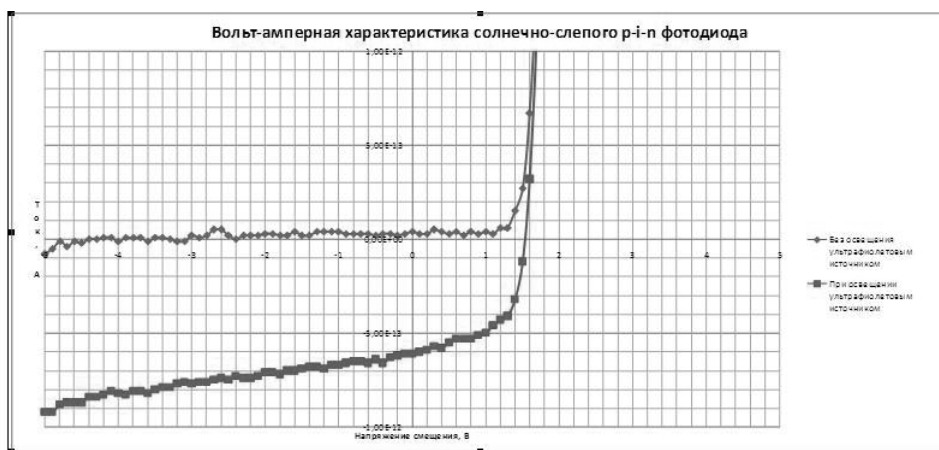


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика пикселя матричного солнечно-слепого фотоприемника формата 320x256, шаг 30 мкм.

в ГЭС-структуре на основе AlGaIn. По мере ионного травления поверхности выявляются ростовые дефекты в виде мелких ямок травления.

Изображение осветителя из двух светодиодов ($\lambda = 265\text{ нм}$) матричным фотоприемником (МФП) на основе ГЭС AlGaIn формата 320x256 с шагом 30 мкм и временем накопления $T_{\text{н}} = 0,63\text{ мс}$ показано на 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).

Заключение

Методом МОС-гидридной эпитаксии получены слои AlGaIn с высоким содержанием алюминия n - и p -типа проводимости. Использование сверхрешеточного буферного слоя позволяет уменьшить плотность дислокаций в слоях AlGaIn. Изготовлены ГЭС AlGaIn/AlN, пригодные для изготовления фоточувствительных элементов, на базе которых созданы первые отечественные матричные солнечно-слепые $p-i-n$ -фотоприемники.

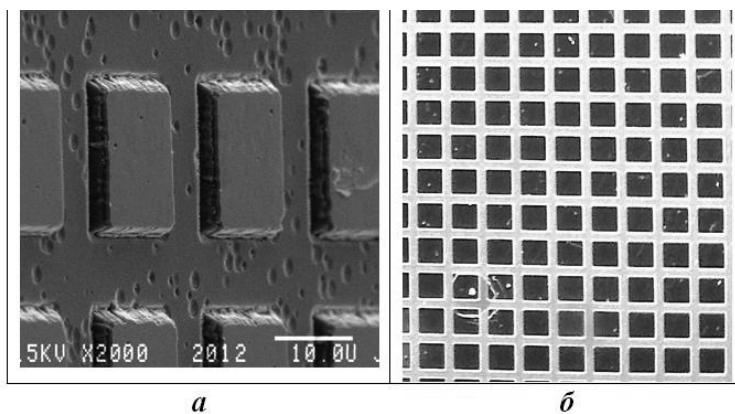


Рис. 8. Изображения поверхности МФЧЭ в ГЭС-AlGaIn. а) Изображение в электронном микроскопе поверхности ГЭС структуры после травления ионами аргона через маску фоторезиста. б) Фотография фрагмента матрицы $p-i-n$ фотодиодов. Шаг 30 мкм.

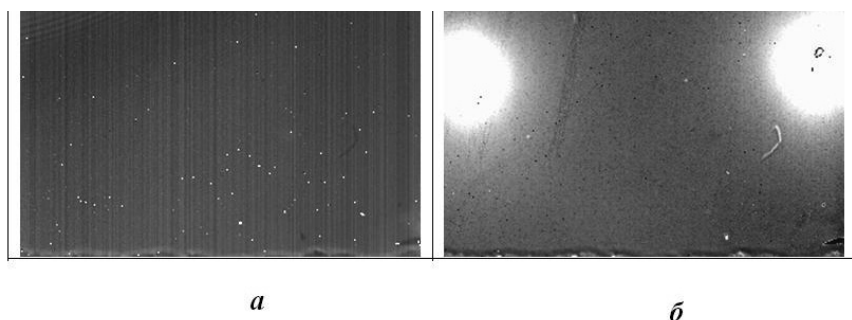


Рис. 9. Характеристики матричного фотоприемника на основе ГЭС AlGaIn формата 320x256 с шагом 30 мкм. а) Без освещения, 230 точечных дефектов. б). Изображение осветителя из двух светодиодов ($\lambda = 265\text{ нм}$). Время накопления $T_{\text{н}} = 0,63\text{ мс}$.

Литература

1. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. — М.: Физматкнига, 2011.
2. Курбатов Л.Н., Козина Г.С., Костинская Т.А. и др. // Квантовая электроника. 1979. Т. 6. № 9. С. 2045
3. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А. // ФТП. 2003. Т. 37. № 9. С. 1025
4. Рудневский В.С., Кеткович А.А., Портативный импульсный радиометр для измерения ультрафиолетовой облученности. / Тезисы докладов 15 Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика» 28 июня-2 июля 1999 г.,
5. Рудневский В.С., Стафеев В.И. Свойства фотодиодов Шоттки Au GaP при высоких температурах. / Тезисы докладов XX Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 27–30 мая 2008.
6. Amano H., Sawaki N., Akasaki I., Toyoda Y. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 48. P. 353
7. Kuznia J.N., Asif Khan M., Olson D.T. et al. // J. Appl. Phys. 1993. V. 73 (9). P. 4700
8. Lorenz K., Gonsalves M., Kim W., et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. V.77. No.21. P. 3391
9. Lee I.—H., T.G., Park Y. // J. Cryst. Growth. 2002. V. 234. P. 305
10. Jiang H.X., Lin J.Y. // Opto-Electronics Review. 2002. V. 10 (4). P. 271
11. Kamiyama S., Iwaya M., Hayashi N., et al. // J. Cryst. Growth. 2001. V. 223. P. 83
12. Han J., Waldrip K. E., Lee S. R., et al. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. No. 1. P. 67
13. McClintock R., Yasan A., Mayes K. et al. // Applied Physics Letters. 2004. V. 84. P. 1248
14. Bourret-Courchense E.D., Kellermann S., Yu K.M., et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77, No. 22. P. 3562
15. Sakai S., Wang T., Morishima Y., Naoi Y. // J. Cryst. Growth. 2000. V. 221. P. 334
16. Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Яковлева Н.И. и др. // Успехи прикладной физики, 2013, Т 1. № 3. С. 344
17. Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Седнев М.В., Яковлева Н.И. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 200

The solar-blind *p-i-n*-photodiode array on the bases of the AlGaN/AlN heterostructures

K.O. Boltar¹, I.V. Chinareva¹, I.I. Taubkin¹, M.V. Sednev¹, A.A. Lopukhin¹, D.V. Smirnov¹,
A.A. Marmalyuk², A.V. Mazalov², D.R. Sabitov², V.A. Kureshov², and A.A. Padalitsa²

¹Orion Research-and-Production Association
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

²M.F. Stelmakh Research Institute «Polyus»
3 Vvedenskogo str., Moscow, 117342, Russia
E-mail: bereg@itnline.ru

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 320x256 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: 07.07.Df, 07.57.—с, 81.05.Ea, 81.65.Rv

Keywords: AlGaN, solar-blind photodiodes, *p-i-n* photodiodes, ultra-violet photodiodes, MOVPE.