

УДК 539.12.175

Разработка фотокатодов солнечно-слепого диапазона на основе ГЭС нитрида галлия алюминия, изготовленных методом молекулярно-пучковой эпитаксии

Ю. К. Грузевич, Ю. Н. Гордиенко, Л. М. Балясный, О. В. Чистов, П. С. Альков,
Д. А. Широков, В. Н. Жмерик, Д. В. Нечаев, С. В. Иванов

В статье показана возможность создания фотозлектронного прибора с микроканальным усилением и ОЭС-фотокатодом на основе гетероструктуры $AlGaIn:Mg/AlN/c-Al_2O_3$, выращенной на стандартной сапфировой подложке и полученной методом молекулярно-пучковой эпитаксии.

PACS 03.65.Ta

Ключевые слова: солнечно-слепой диапазон, молекулярно-пучковая эпитаксия, электронно-оптический преобразователь, ОЭС-фотокатод.

Введение

Ультрафиолетовые (УФ) фотоприемники широко используются в оптико-электронных приборах для астрономических наблюдений, контроля за состоянием озонового слоя, обнаружения высоковольтных электрических разрядов и пламени различного происхождения, а также для различных областей медицины и биологии. Такие приборы необходимы для применений в специальной технике: в мультиспектральных оптико-электронных системах обнаружения излучения факела ракет, в средствах обеспечения скрытой помехозащищенной УФ оптической связи, приборах радиационной, химической и биологической разведки [1—3]. Для увеличения чувствительности и поме-

хоустойчивости этих приборов активно разрабатываются УФ-фотоприемники различного типа, чувствительные в «солнечно-слепых» диапазонах длин волн (это спектральные диапазоны, в которых отсутствует солнечное излучение) $\lambda < 290$ нм и $\lambda < 250$ нм на уровне моря на Земле и в ближнем космосе соответственно.

Для создания быстродействующих вакуумных фотоприемников, работающих на внешнем фотоэффекте (с предельной чувствительностью, включающей возможность регистрации единичных монофотонных событий и усиления яркости при прямом формировании изображения) широко используются фотокатоды (ФК) с отрицательным электронным сродством (ОЭС), обеспечивающие эффективную фотоэмиссию в вакуум под действием подающего на ФК оптического излучения.

В настоящее время промышленностью выпускаются ФК, чувствительные в видимой и ИК-области спектра. В принципе, данные ФК могут использоваться и для регистрации УФ-излучения за счет соответствующего выбора входного окна, прозрачного в УФ-области спектра и поглощающего оптическое излучение в видимой и ИК-области спектра. Однако применение ФК, чувствительных в видимой и ИК-области спектра, неэффективно для регистрации УФ-излучения, т. к. при этом падает отношение сигнал/шум, обусловленное чувствительностью ФК к фоновым излучениям, и одновременно увеличиваются темновые токи [4]. Исходя из вышеизложенного, актуальной задачей является разработка ФК, чувствительных в «солнечно-слепой» УФ-области спектра, на основе различных широкозонных полупроводниковых материалов, включая CsI и CsTe [5], MgZnO [6], Ga₂O₃ [7], алмаз [8] и нитридные соединения

Грузевич Юрий Кириллович¹, зам. генерального директора по научной работе.

Гордиенко Юрий Николаевич¹, зам. технического директора.

Балясный Лев Михайлович¹, главный конструктор ЭОП и ФПМ.

Чистов Олег Валерьевич¹, начальник сектора.

Альков Павел Сергеевич¹, инженер.

Широков Дмитрий Алексеевич¹, инженер.

Жмерик Валентин Николаевич², старший научный сотрудник.

Нечаев Дмитрий Валерьевич², научный сотрудник.

Иванов Сергей Викторович², главный научный сотрудник.

¹ОАО «НПО Геофизика-НВ».

Россия, 107076, Москва, ул. Матросская Тишина, 23, стр. 2.

Тел.: 8 (499) 268-16-96, 8 (499) 268-53-07.

E-mail: yuikg@mail.ru

²Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН.

Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

Тел. 8 (812) 297-2245.

E-mail: Jmerik@pls.ioffe.ru

Статья поступила в редакцию 10 июля 2015 г.

© Грузевич Ю. К., Гордиенко Ю. Н., Балясный Л. М., Чистов О. В., Альков П. С., Широков Д. А., Жмерик В. Н., Нечаев Д. В., Иванов С. В., 2015

третьей группы (Al,Ga)N [9—11]. Отметим, что наши лучшие результаты получены именно с помощью последних из перечисленных материалов. Основными достоинствами соединений (Al,Ga)N являются их прямозонная структура, высокая химическая, тепловая и радиационная стойкость в сочетании с высокой стабильностью электрофизических и оптических параметров. В результате их применения могут быть существенно уменьшены габариты УФ-фотоприемников, снижено их энергопотребление при высокой чувствительности в «солнечно-слепом» диапазоне длин волн.

Для эпитаксиального роста соединений (Al,Ga)N наибольшее распространение получили газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений (МОСГЭ) и молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ). Лучшие результаты, позволившие осуществить революционный прорыв в массовом выпуске светодиодов для источников света уличного освещения, были получены на основе гетероструктур InGaN, выращенных по технологии МОСГЭ [12]. В настоящее время японской фирмой Hamamatsu промышленно изготавливаются полупрозрачные ФК на основе гетероструктур GaN с квантовым выходом до 25 % (для просвечиваемого режима) в спектральном диапазоне длин волн $\lambda > 240$ нм, что соответствует уровню лучших вакуумных фотоэлектронных приборов [13]. В этой области в настоящее время интенсивно и плодотворно работают несколько научно-технологических групп [14—16].

В России работы по созданию ФК, чувствительных в УФ-области спектра, начаты сравнительно недавно, но уже продемонстрированы не только приборы на основе стандартных GaAs электронно-оптических преобразователей (ЭОП) с использованием входных окон, фильтрующих длинноволновую часть спектра [4], но и первые ЭОП на основе ФК с отрицательным электронным сродством слоев GaN:Mg [17] и $Al_xGa_{1-x}N:Mg$ ($x = 0 \div 0,3$) [11]. Для ФК, чувствительных в УФ-области спектра, выращенных по технологии МОСГЭ, максимальная квантовая эффективность достигала 30 % и длинноволновая граница чувствительности составила 360 нм, а для ФК, чувствительных в УФ-области спектра, выращенных по технологии плазменно-активированной МПЭ (ПА МПЭ), эти величины составляли 13 % и 300 нм соответственно.

Возможность непрерывного изменения состава соединений $Al_xGa_{1-x}N$ во всем диапазоне ($x = 0 \div 1$), в принципе, позволяет обеспечить любую заданную длинноволновую границу прозрачности слоев этого соединения в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 360 \div 210$ нм, (включая и «солнечно-слепой» диапазон спектра). Однако уровень эффективности

для ФК, чувствительных в УФ-области спектра, созданных на основе AlGaN соединений, до сих пор существенно ниже по сравнению с уровнем для ФК, чувствительных в видимом и ближнем УФ-диапазоне спектра.

Это объясняется ухудшением структурного качества гетероструктур на основе AlGaN соединений и возрастанием сложности *p*-легирования AlGaN слоев акцепторной примесью (как правило, Mg) при увеличении содержания Al в слоях AlGaN, приводящем к росту энергии ионизации основной акцепторной примеси Mg от 150 до 470 мэВ (в слоях GaN и AlN соответственно). Кроме того, при этом возрастает скорость образования дефектов, компенсирующих донорные уровни.

Каждая из развиваемых в настоящее время технологий имеет свои достоинства и недостатки. Для ГФЭ МО главным достоинством является возможность с ее помощью обеспечить массовый выпуск приборов при относительно высоком структурном качестве структур, а для технологии ПА МПЭ основными достоинствами являются уникальные возможности контроля роста и отсутствие необходимости постростовой высокотемпературной активации Mg.

В данной статье приведены результаты разработки технологии ПА МПЭ AlGaN:Mg/AlN/c-Al₂O₃ гетероструктур и постростовых технологий Cs—O-активировки ее поверхности с целью изготовления «солнечно-слепого» фотоэлектронного прибора для усиления яркости изображения с высокой однородностью и качеством отображения информации по всему рабочему полю фотокатода.

Экспериментальная часть

Гетероструктура для изготовления ФК выращивалась методом ПА МПЭ с помощью установки COMPACT 21T (фирмы RIBER SA), схема которой приведена на рис. 1. Установка оборудована стандартными эффузионными источниками третьей группы и источником плазменно-активированного азота HD-25 (Oxford Appl. Res.). Морфология поверхности слоев и скорости роста эпитаксиальных слоев контролировались *in situ* с помощью дифракции отраженных быстрых электронов с энергией 30 кэВ и лазерной рефлектометрии с длиной волны 532 нм соответственно.

Структура, дизайн которой приведен на рис. 2, выращивалась на стандартной c-Al₂O₃ подложке, на которую с целью ее нагрева в вакуумных условиях с обратной (шлифованной) стороны наносился слой Ti толщиной 200 нм. Перед ростом поверхность подложки отжигалась при температуре $T_s = 800$ °С и нитридизовалась в N₂-плазменном потоке. Зародышевый слой AlN толщиной 130 нм выращивался с использованием эпитаксии с по-

вышенной миграцией при относительно высокой температуре $T_s = 780$ °С, что обеспечивало максимальный размер зародышевых зерен и снижение концентрации прорастающих дислокаций. Затем с помощью металл-модулированной эпитаксии выращивался буферный слой AlN толщиной 1,5 микрона в металл-обогащенных условиях с отношением потоков алюминия и активированного азота $F_{Al}/F_N = 1,3$, как описано в [17]. В слой AlN с целью ограничения распространения прорастающих дислокаций вводились две ультратонкие вставки GaN. В разработанной гетероструктуре последним слоем выращивался верхний активный слой $Al_{0,4}Ga_{0,6}N:Mg$ толщиной 120 нм. Для его роста использовались металл-обогащенные условия при соотношении потоков $F_{Al}/F_N = 0,4$ и температуре подложки $T_s = 700$ °С, а значение эквивалентного давления легирующего элемента (Mg) составляло $\sim 2 \cdot 10^{-10}$ Торр.

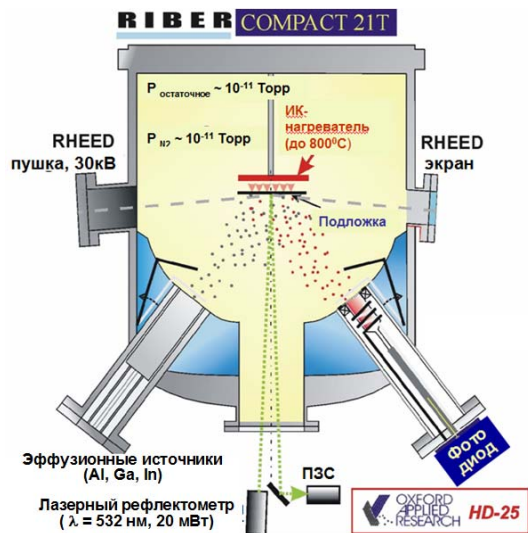


Рис. 1. Схема установки ПА МПЭ

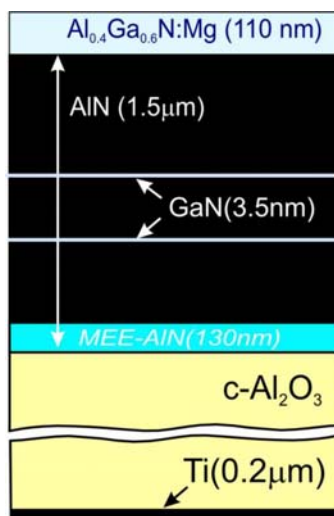


Рис. 2. Дизайн гетероструктуры, полученной методом МЛЭ в лаборатории наноструктур ФТИ им. А. Ф. Иоффе

Для оценки плотностей прорастающих дислокаций и содержания Al в активном слое использовался рентгено-дифракционный анализ, а концентрация легирующей примеси измерялась с помощью вторичной ионной масс-спектропии.

На рис. 3 изображена сверхвысоковакуумная установка разработки ОАО «НПО Геофизика-НВ» для сборки фотокатодного узла бипланарного ЭОП с ОЭС GaN фотокатодом. Конструкция ЭОП и технология его изготовления описана в работе [4].

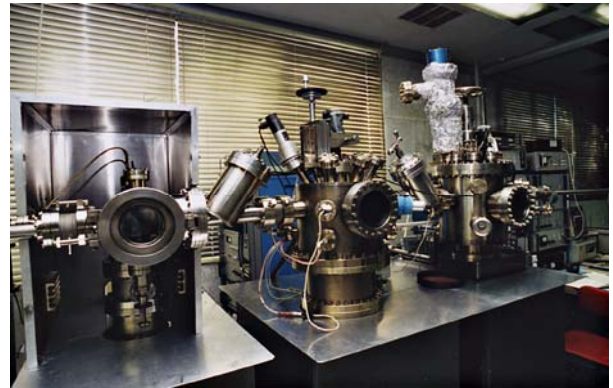


Рис. 3. Сверхвысоковакуумная установка финишной сборки фотокатодных приборов с фотокатодом, чувствительным в УФ-области спектра

На рис. 4 и 5 приведены фотокатодный узел и вакуумный блок всего изделия соответственно. Изготовление ОЭС фотокатода GaN/GaAlN на сапфире включает операции теххимической и финишной очистки поверхности фотокатодного узла, а также операции термической обработки и активировки цезием и кислородом. Проблема нагрева в вакууме фотокатодного узла с гетероструктурой на прозрачной сапфировой подложке с помощью резистивного нагревателя решалась за счет использования массивной титановой оправы для отвода тепла.

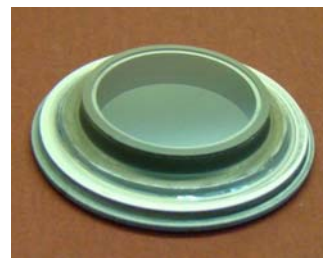


Рис. 4. Фотокатодный узел ЭОП на основе ОЭС фотокатода GaN/GaAlN на сапфире



Рис. 5. Вакуумный блок фотоэлектронного прибора с ОЭС фотокатодом GaN/GaAlN

Для контроля фототока в процессе активировки использовалась в качестве источника УФ-излучения дейтериевая лампа ДДС-30 с фильтром из стекла УФС-5, а для обеспечения прохождения УФ оптического излучения в камеру сборочной установки устанавливалось сапфировое окно. Измерения чувствительности изготовленных ФК проводились непосредственно после их активировки в вакуумной камере при остаточном давлении $8 \cdot 10^{-10}$ Торр. Измерение спектральных характеристик собранного вакуумного блока фотоэлектронного прибора проводилось с помощью монохроматора МДР-12, оснащенного специально разработанным интерфейсом и калиброванным фотодиодом ФДУК-2УТ.

Результаты и обсуждение

Во время роста всей гетероструктуры наблюдалась линейчатая картина дифракции отраженных быстрых электронов, что свидетельствует о двумерном механизме роста эпитаксиальных слоев AlN и $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{N}:\text{Mg}$. Это является характерным для использовавшихся для роста металлобогатых условий. Рентгено-дифракционный анализ структур позволил определить полуширины симметричного $\text{AlN}(0002)$ и асимметричного $\text{AlN}(10-15)$ рефлексов равными 120 и 1400 арксек, соответственно. Это позволило оценить плотности прорастающих винтовых и краевых дислокаций равными $3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ и 10^{10} см^{-2} соответственно.

Кроме того, измерения с помощью вторичной ионной масс-спектрометрии обнаружили концентрацию магния в верхнем $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{N}$ слое, равную $\sim 1,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 6 приводится спектр чувствительности ФК в составе ЭОП. На вставке к этому рисунку показано распределение интенсивности свечения в видимой области спектра по рабочей области экрана УФ ЭОП диаметром фотокатода 18 мм. Изображение, приведенное на рис. 6, сформировано ЭОП с ОЭС фотокатодом GaN/GaAlN , на чувствительную поверхность которого спроецировано изображение в УФ-области спектра. Фотокатод ЭОП преобразует данное УФ в электронное изображение на ФК, которое усиливается электронным микроканальным усилителем яркости и преобразуется люминофором, нанесенным на экран ЭОП, в выходное оптическое изображение в видимой области спектра. Наличие темных точек на изображении, приведенном на вставке рис. 6, не связано с качеством фотокатода.

Форма кривой спектральной чувствительности полученного фотокатода свидетельствует о

том, что он обладает отрицательным сродством к электрону, а максимум чувствительности (равный 16 мА/Вт) наблюдается на длине волны $\lambda = 280 \text{ нм}$, находящейся в «солнечно-слепом» спектральном диапазоне, что говорит о требуемом содержании Al в активном слое (40 мол. %).

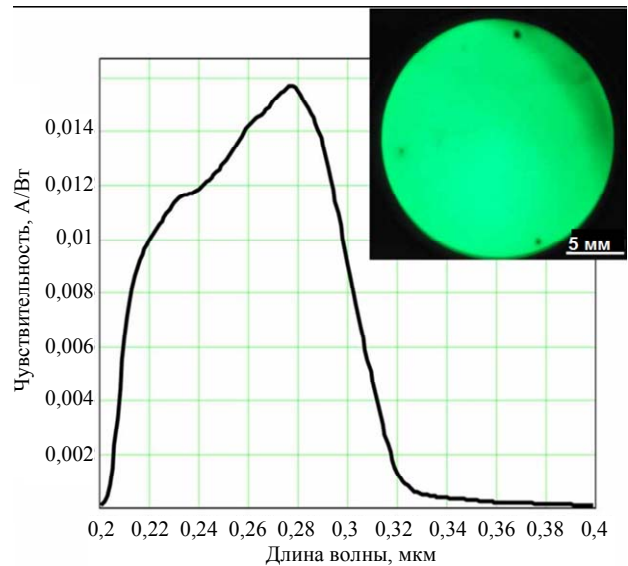


Рис. 6. Спектральная характеристика фоточувствительности ОЭС $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{N}:\text{Mg}/\text{AlN}/\text{c-Al}_2\text{O}_3$ фотокатода

Относительно однородное распределение интенсивности свечения выходного экрана свидетельствует об однородном распределении чувствительности по поверхности фотокатода.

Стабильность параметров УФ-фотокатода в составе прибора была подтверждена испытаниями на наработку, в ходе которых поверхность прибора однородно засвечивалась УФ-излучением в диапазоне длин волн $\lambda = 200 \div 300 \text{ нм}$ и плотностью потока излучения $5 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$. В течение 5000 ч падение чувствительности ФК не превысило 10 %.

Заключение

В статье показана возможность создания фотоэлектронного прибора с микроканальным усилением и ОЭС-фотокатодом на основе гетероструктуры $\text{AlGaIn}:\text{Mg}/\text{AlN}/\text{c-Al}_2\text{O}_3$, выращенной на стандартной с-сапфировой подложке и полученной методом ПА МПЭ. За счет изменения состава и дизайна активного слоя удалось получить ОЭС-фотокатод в составе отпаянного прибора с квантовой эффективностью выше 5 %.

Основными проблемами, обнаруженными при изготовлении первого макетного образца (и которые будут решаться в дальнейшем), являются сравнительно невысокий квантовый выход ФК (порядка 5 %), а также наличие «хвоста» чув-

ствительности в диапазоне длин волн $\lambda > 290$ нм, что потребует дальнейшего увеличения содержания AlN в активном слое до ~ 50 мол. %. Необходимо также дополнительно исследовать эффективность Mg-легирования AlGaIn-слоев и другие факторы, определяющие эффективность формирования ОЭС-фотокатодов, чувствительных в УФ-области спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sang L., Liao M., Sumiya M. // Sensors. 2013. V. 13. P. 10482.
2. Артюков И. // Фотоника. 2008. № 5. С. 26.
3. Бланк Т. В., Гольдберг Ю. А. // Физика и техника полупроводников. 2003. V. 37. № 9. С. 1025.
4. Мазалов А. В., Сабитов Д. Р., Курешов В. А. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Том 1. № 5. С. 617.
5. Stock J., Hilton G., Norton T., et al. // Proc. SPIE. 2005. V. 5898. P. 58980F.

6. Fan M. M., Liu K. W., Zhang Z. Z., et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. P. 011117.
7. Oshima T., Okuno T., Arai N., et al. // Jpn. J. Appl. Phys. 2009. V. 48. P. 07020.
8. Pérez Quintero K. J., Antipov S., Sumant A. V., et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. P. 123103.
9. Wu C. L., Kahn A. // J. Appl. Phys., 1999. V. 86. P. 3209.
10. Sumiya M., Kamo Y., Ohashi N., et al. // Appl. Surf. Sci. 2010. V. 256. P. 4442.
11. Айнбунд М. Р., Алексеев А. Н., Алымов О. В. и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 9. С. 88.
12. DenBaars S. P., Feezell D., Kelchner K., et al. // Acta Materialia. 2013. V. 61. P. 945.
13. Ishigami Y., Akiyama K., Nagata T., et al. // Proc. SPIE. 2012. V. 8359. P. 83590U.
14. Glesener J. W., Dabiran A. M., Estrera J. P. // Proc. SPIE. 2009. V. 7339. P. 73390S.
15. Hao G., Chen X., Chang B., et al. // Optik. 2014. V. 125. P. 1377.
16. Fu J., Zheng G., Zhou L. et al. // Optik. 2013. V. 124. P. 3804.
17. Баясный Л. М., Гордиенко Ю. Н., Чистов О. В. и др. / Тезисы докладов конференции «Фотоника-2011». — Новосибирск. 22—26 августа 2011. С. 129.

Development of the solar-blind range photocathodes based on aluminum gallium nitride heterostructure fabricated by molecular beam epitaxial

Y. K. Gruzevich¹, Y. N. Gordienko¹, L. M. Balyasnyi¹, O. V. Chistov¹, P. S. Alkov¹,
D. A. Shirokov², V. N. Zhmerik², D. V. Nechayev², and S. V. Ivanov²

¹Scientific Production Unity “GEOPHIZIKA-NV”
bld.2, 23 Matrosskaya Tishina str., Moscow, 107076, Russia
E-mail: yukg@mail.ru

²Ioffe Physical and Technical Institute of the RAS
26 Politekhnicheskaya str., S.-Petersburg, 194021, Russia
E-mail: Jmerik@pls.ioffe.ru

Received July 10, 2015

The article shows the possibility of creating the photoelectronic device with microchannel amplification and a negative electron affinity photocathode on the basis of the AlGaIn:Mg/AlN/c-Al₂O₃ heterostructures. This photocathode was grown on the standard sapphire substrate by the molecular-beam epitaxy.

PACS 03.65.Ta

Keywords: solar-blind range, molecular-beam epitaxy, negative electron affinity photocathode, image intensifier tube.

REFERENCES

1. L. Sang, M. Liao, and M. Sumiya, Sensors **13**, 10482 (2013).
2. I. Artyukov, Fotonika, No. 5, 26 (2008).
3. T. V. Blank and Yu. A. Goldberg, Semiconductors **37**, 1025 (2003).
4. A. V. Mazalov, D. R. Sabitov, V. A. Kureshov, et al., Uspekhi Prikladnoi Fiziki **1**, 617 (2013).

5. J. Stock, G. Hilton, T. Norton, et al., Proc. SPIE **5898**, 58980F (2005).
6. M. M. Fan, K. W. Liu, Z. Z. Zhang, et al., Appl. Phys. Lett. **105**, 011117 (2014).
7. T. Oshima, T. Okuno, N. Arai, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **48**, 07020 (2009).
8. K. J. Pérez Quintero, S. Antipov, A. V. Sumant, et al., Appl. Phys. Lett. **105**, 123103 (2014).
9. C. I. Wu and A. J. Kahn, Appl. Phys., **86**, 3209 (1999).
10. M. Sumiya, Y. Kamo, N. Ohashi, et al., Appl. Surf. Sci. **256**, 4442 (2010).
11. M. R. Ainbund, A. N. Alekseev, O. V. Alymov, et al., Tech. Phys. Lett. **38** (9), 88 (2012).
12. S. P. DenBaars, D. Feezell, K. Kelchner, et al., Acta Materialia **61**, 945 (2013).
13. Y. Ishigami, K. Akiyama, T. Nagata, et al., Proc. SPIE **8359**, 83590U (2012).
14. J. W. Glesener, A. M. Dabiran, and J. P. Estrera, Proc. SPIE **7339**, 73390S (2009).
15. G. Hao, X. Chen, B. Chang, et al., Optik **125**, 1377 (2014).
16. J. Fu, G. Zheng, L. Zhou, et al., Optik **124**, 3804 (2013).
17. L. M. Balyasnyi, Yu. N. Gordienko, O. V. Chistov, et al., in Proc. Conf. «Photonika-2011». (Novosibirsk, August 22—26, 2011). P. 129.