

## Ультрафиолетовые светодиоды на основе гетероструктур GaN/AlGaIn выращенные методом хлоридно-гидридной эпитаксии: исследование рабочих характеристик

Е.А. Менькович<sup>1,\*</sup>, С.А. Тарасов<sup>1,†</sup>, С.Ю. Курин<sup>2‡</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), кафедра микро- и нанoeлектроники, Россия, 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5

<sup>2</sup> ООО «Группа компаний «Нитридные кристаллы», Россия, 194156, Санкт-Петербург, пр. Энгельса, д. 27

(Статья поступила 20.09.2013.; подписана в печать 02.06.2014)

Результаты проведенных исследований показали, что метод хлоридно-гидридной эпитаксии позволяет создать излучающие гетероструктуры высокого качества. Полученные значения оптической мощности излучения значительно превосходят данные [1] для УФСД с длиной волны 340–341 нм, созданных на основе AlGaIn-гетероструктур, выращенных методом ХГЭ. При рабочем токе 20 мА температура их активной области  $t_j$  составляла 43 °С, выходная оптическая мощность и КПД — 1.14 мВт и 1.46 %, соответственно. Ультрафиолетовые светодиоды работают в непрерывном режиме возбуждения вплоть до значения прямого тока 135 мА.

PACS: 85.60 Jb, 81.05 Ea

УДК:535.37

Ключевые слова: светодиоды, хлоридно-гидридная эпитаксия, эпитаксиальная гетероструктура, ультрафиолетовое излучение

### ВВЕДЕНИЕ

Альтернативной заменой используемых сегодня ртутных газоразрядных ламп могут стать полупроводниковые светоизлучающие диоды (СД) выполненные на основе гетероструктур GaN/AlGaIn. Их применение перспективно с экологической и экономической точек зрения. Но современные эпитаксиальные гетероструктуры ультрафиолетовых светодиодов (УФ СД) обладают высокой плотностью дефектов, что существенно сказывается на их рабочих характеристиках, и, в первую очередь, на оптических и электрических, при этом традиционная технология их изготовления остается довольно дорогой. Однако, применение иных методов роста и дизайна гетероструктур УФ СД вероятно позволит исправить сложившуюся ситуацию.

В работе предложена конструкция эпитаксиальной гетероструктуры для УФ СД, позволяющая обеспечить его стабильную работу при высоких плотностях тока. Для создания структуры использовался метод хлоридно-гидридной эпитаксии (ХГЭ), обладающий важными преимуществами по сравнению с традиционно применяемой газофазной эпитаксией из металлоорганических соединений (МОГФЭ). ХГЭ обеспечивает не только более высокую скорость роста эпитаксиальных слоев (1–150 мкм/ч), но и позволяет обойтись без низкотемпературного буферного слоя. Кроме того, примененный метод требует меньшего количества

потребления газовых реагентов. Таким образом, ХГЭ может существенно уменьшить себестоимость производства гетероструктур. Особым преимуществом метода является возможность потенциального увеличения оптической мощности излучения и эффективности УФ СД вследствие низкой концентрации фоновых примесей [2, 3].

Для определения рабочих характеристик СД в настоящее время чаще всего производится простой анализ их качества и эффективности работы в соответствии с традиционными методиками. При этом более детальные исследования изменения этих параметров и характеристик в различных режимах эксплуатации, как правило, не осуществляется. Применяемые при этом методики определения качества и эффективности, такие как принудительная деградация, имеют ряд существенных недостатков. Особенно существенным фактором является то, что для таких методов измерения часто необходим непосредственный контакт с тестируемым изделием, и, следовательно во многих случаях невозможно проводить исследования отдельные СД, входящие в состав источников освещения и других изделий на их основе. Вся тестируемая партия СД изделий при этом уходит в брак.

В представленной работе исследование УФ СД проводилось при помощи автоматизированной тест-системы комплексной диагностики основных характеристик светодиодов и светодиодных изделий [4, 5], созданной в соответствии с новой запатентованной методикой определения их эффективности и качества [6]. Полученный при помощи тест-системы набор экспериментальных данных позволяет объективно судить о применимости той или иной технологии (дизайна) для создания СД.

\*E-mail: menkovichea@gmail.com

†E-mail: satarasov@mail.ru

‡E-mail: sergeykurin@nitride-crystals.com

## 1. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ УФ СД

Конструкция эпитаксиальной гетероструктуры была разработана с учетом требования достижения максимума внутренней квантовой эффективности (ВКЭ) при высоких плотностях тока. Для этого в качестве активной области (АО) был использован одиночный слой толщиной более 100 нм, а также инжекционные слои с линейным убыванием концентрации Al. Такой выбор был продиктован проведенным ранее моделированием, показавшим, что при этой толщине АО максимум внутренней квантовой эффективности достигается при высоких плотностях тока (более 100 А/см<sup>2</sup>). При таких токах использование структур с множественными квантовыми ямами (МКЯ) в качестве активных областей УФ СД нецелесообразно, поскольку в этом случае трудно обеспечить однородность инжекции электронов и дырок в различные ямы. При низких же плотностях тока (10–20 А/см<sup>2</sup>) использование АО с МКЯ приводит к падению ВКЭ, которое обусловлено самонагревом, утечкой носителей и Оже-рекомбинацией [7].

Активный слой рассматриваемого УФ СД были изготовлены без добавления индия. Это обеспечило сравнительно малое рассогласование периодов решеток материалов слоев, что позволило создать АО требуемой толщины без релаксации напряжений, которые вызывают образование дислокаций [8, 9].

На рис. 1 схематически представлена конструкция предложенной гетероструктуры УФСД. От поверхности сапфировой (0001) подложки, она включает в себя набор эпитаксиальных слоев:

- нуклеационный слой (NL, НС) AlN;
- переходную структуру (GS, ПС) AlGa<sub>0.5</sub>N/AlGa<sub>0.5</sub>N, обеспечивающую снижение плотности проникающих дислокаций в активной области, которые возникают из-за несоответствия периодов решеток подложки и эпитаксиальных слоев AlGa<sub>0.5</sub>N;
- дырочно-блокирующий слой (HBL, ДБС) *n*-AlGa<sub>0.5</sub>N, также являющийся *n*-контактным слоем, который препятствует утечке дырок из активной области и является инжектором электронов;
- нелегированную активную область (AL, АО) AlGa<sub>0.5</sub>N;
- электронно-блокирующий слой (EBL, ЭБС) *p*-AlGa<sub>0.5</sub>N, препятствующий утечке электронов из активной области и являющийся инжектором дырок;
- контактный слой (CL, КС) *p*-Ga<sub>0.5</sub>N.

Толщина вышеперечисленных слоев в сумме составляет около 5 мкм.

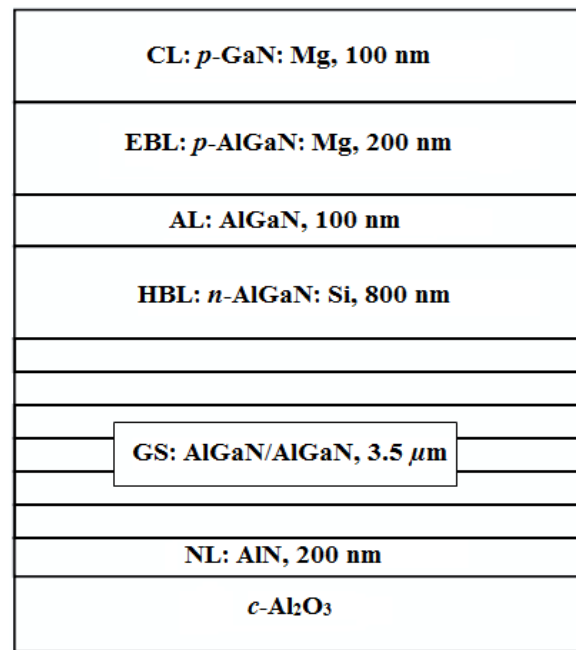


Рис. 1: Конструкция гетероструктуры УФ-светодиода

Состав ЭБС позволяет с одной стороны, подавить утечку электронов в *textitp*-область, а с другой стороны — поддерживать необходимую величину инжектированных дырок в АО. Это обеспечивается за счет убывания концентрации алюминия по толщине слоя с 15 % до 6 % при удалении от АО. Уменьшение концентрации алюминия (ниже 13–15 %) вблизи границы ЭБС и АО увеличивает ток утечки электронов, а возрастание концентрации алюминия в ЭБС (свыше 15–17 %) повышает ее сопротивление без дополнительного улучшения электронного ограничения.

Планарные чипы были изготовлены с размерами 0.31×0.31 мм<sup>2</sup> и становлены в корпуса, изготовленные привлеченной стороной. Для электродов *n*- и *p*-типа, вытравливалась меза до ДБС использовались металлические композиции Ti/Al и Ni/Au соответственно [10, 11].

## 2. АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ

Исследование УФ СД проводилось при помощи автоматизированной тест-системы диагностики качества СД, созданной в соответствии с новой запатентованной методикой определения их эффективности и качества. При помощи тест-системы были исследованы оптические, мощностные, характеристики УФ СД, а также эффективность их работы.

Упрощенная блок-схема разработанной тест-системы диагностики качества СД представлена на рис. 2. Основной частью тест-системы является

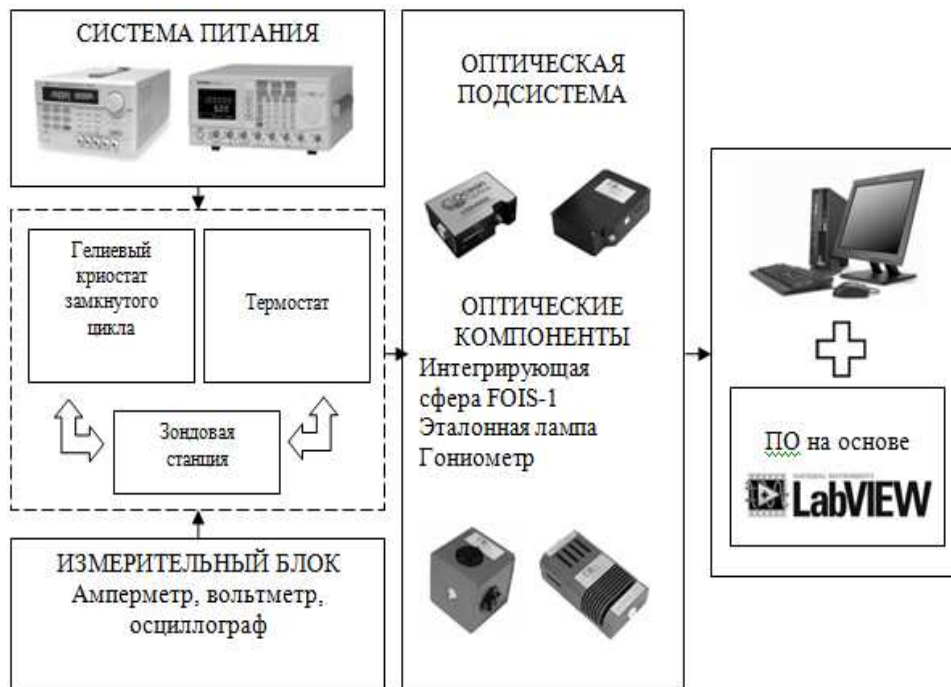


Рис. 2: Блок-схема стенда тест-системы диагностики качества СД

термостат, который может быть заменен на криостат с гелиевым охлаждением замкнутого цикла. Система питания тест-системы позволяет осуществлять подключение излучателей как в непрерывном, так и в импульсном режимах накачки. Регистрация электрических характеристик СД производится измерительным блоком, содержащим набор вольтметров, амперметров и осциллограф.

Второй частью тест-системы является оптическая подсистема. Основой этой подсистемы являются спектрометры быстрого сканирования производства компании OceanOptics, интегрирующие сферы разного диаметра в комплекте с соответствующими волноведущими и фокусирующими комплектующими.

В установке реализована система по исследованию оптических характеристик СД в соответствии с международным стандартом (рекомендацией) CIE 127:2007 и ГОСТ 17616-82. Тест-система автоматизирована благодаря использованию разработанной программы, написанной в среде программирования LabView [12]. Возможные диапазоны измерений:

- длина волны излучения: 200–1100 нм;
- сила прямого тока:  $10^{-8}$ –10 А;
- напряжение: 0–250 В;
- температура: 10–500 К.

Полученный при помощи тест-системы набор экспериментальных данных позволяет объективно судить о применимости предложенной технологии (дизайна) для создания СД.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе представлено исследование рабочих характеристик эпитаксиальных гетероструктур УФ СД, в том числе спектральных, ватт-амперных и вольт-амперных характеристик (ВАХ), мощности и эффективности излучения, а также изучению влияния на них величины пропускаемого прямого тока и температуры окружающей среды.

Исследования ВАХ показали, что при рабочем токе падение напряжения на диоде составляет около 3.9 В, что в целом соответствует величине, определяемой шириной запрещенной зоны полупроводника. Величина обратного тока составила 3.6 мкА при обратном напряжении 0.5 В. Длина волны максимума излучения в спектрах ЭЛ (рис. 3) для разных образцов при рабочем токе  $I_f = 20$  мА и комнатной температуре находилась в пределах 360–365 нм и также соответствовала ширине запрещенной зоне АО. Полуширина спектральных характеристик примерно составляла 10 нм при  $I_f$  и становилась в три раза выше при увеличении тока до 140 мА. Удлинение длинноволнового края спектра вероятно говорит об участии в формировании спектральной характеристики в этой энергетической области квазимезонных переходов с участием примесных подзон. Появление последних может быть обусловлено высоким легированием эмиттерных областей структуры. Гладкость спектра и отсутствие дополнительных максимумов излучения свидетельствуют о хорошем контроле состава твердого раствора AlGaN в структуре и его однородности в АО. Веро-

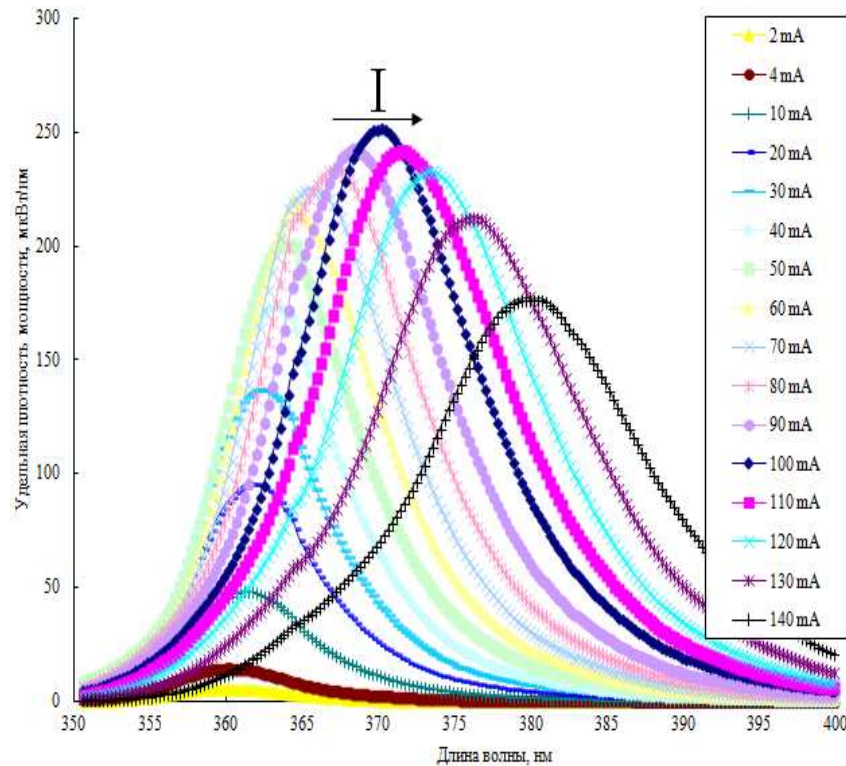


Рис. 3: Спектры электролюминесценции УФСД при различных значениях пропускаемого прямого тока

ятно, большая ширина активной области позволяет исключить влияния негативных эффектов, наблюдаемых в структурах с МКЯ. Отсутствие коротковолнового сдвига спектра при малых токах, обусловленного перераспределением носителей в хвостах плотностей состояний для уровней размерного квантования в КЯ, также подтверждает вышеуказанное предположение.

При  $I_f = 20$  мА выходная оптическая мощность составила 1.15 мВт и достигала максимального значения 4.2 мВт при токе 120 мА (рис. 4). Отклонение ватт-амперной характеристики от линейности наблюдалось при токах более 30 мА. Таким образом, разработанные структуры показали достаточно высокие значения выходной оптической мощности. Предложенные УФ СД оказались работоспособны в непрерывном режиме работы до значений прямого тока 140 мА.

При высоких плотностях прямого тока наблюдался существенный самонагрев структуры, определивший отклонение ватт-амперной характеристики от линейности и дальнейшее температурное гашение люминесценции. Из зависимости длины волны в максимуме спектра люминесценции от величины тока (рис. 5) видно, что сдвиг спектральных характеристик в длинноволновую область ускоряется при повышении тока. Такой эффект вызван резким увеличением температуры кристалла, который приводит к изменению ширины запрещенной зоны полупроводника в меньшую сторону. В результате, смещение длины волны в

максимуме излучения при изменении тока от 2 мА до 140 мА составило примерно 20 нм.

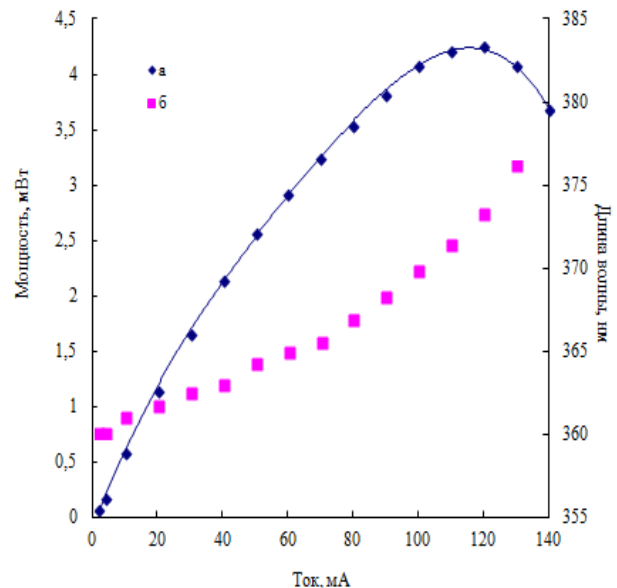


Рис. 4: Ватт-амперная характеристика (а) и зависимость длины волны в максимуме спектральной характеристики (б) от величины пропускаемого прямого тока

Температура АО  $t_j$  при рабочем токе (20 мА) со-

ставляла  $43^\circ\text{C}$  (рис. 5). Характерные значения  $t_j$  для синих излучателей на основе InGaN как правило ниже. Тепловые сопротивления образцов, при  $I_f$  достигают  $250^\circ\text{C}/\text{Вт}$ . Коэффициент полезного действия (КПД) достигал максимума при рабочем токе 20 мА и составлял примерно 1.5% (рис. 6). Снижение КПД в 2 раза наблюдалось при 100 мА.

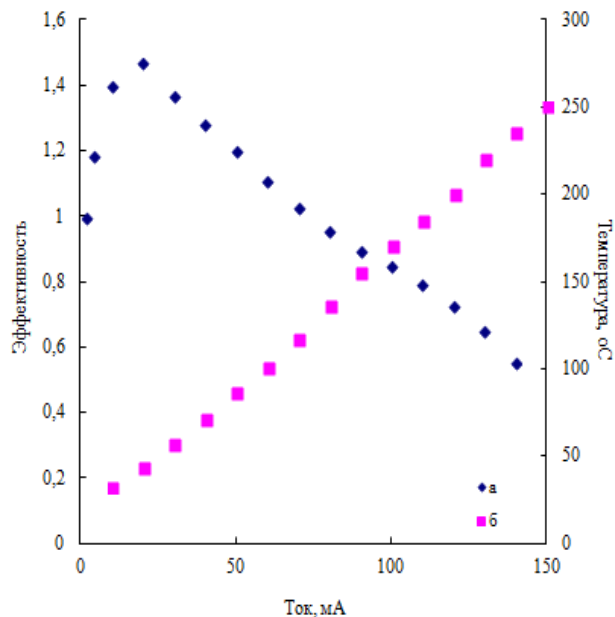


Рис. 5: Зависимость КПД (а) и температуры активной области УФ-СД (б) от пропускаемого прямого тока

Было установлено, что именно самонагрев является основным процессом, снижающим мощность излучения созданных структур. Это удалось показать сравнительным анализом ватт-амперных характеристик и зависимостей длины волны и температуры от тока. Утечки носителей и безызлучательная рекомбинация также вероятно ответственны за снижение выходной оптической мощности, но в меньшей степени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было проведено исследование оптических и электрических характеристик созданных УФ СД созданных методом ХГЭ. Исследование экспериментальных образцов проводилось при помощи разработанной авторами автоматизированной тест-системы комплексной диагностики основных характеристик светодиодов и светодиодных изделий. Система позволяла дать оценку применимости предложенной конструкции и технологии роста для создания УФ СД.

Исследованные структуры продемонстрировали достаточно высокие значения выходной оптической мощности. При  $I_f$  она составила 1,15 мВт и достигала максимального значения 4,2 мВт при токе 120 мА. Отклонение ВТАХ от линейности наблюдалось при токах более 30 мА. Основное внимание было уделено влиянию протекания прямого тока через структуру на величину температуры ее активной области. Показано, что температура р-п перехода  $T_j$  при рабочем токе составляет  $43^\circ\text{C}$ , что уже превышает значения, характерные для излучателей на основе InGaN. При пропускании тока более 60 мА  $T_j$  превышает  $100^\circ\text{C}$ . И далее температура нелинейно возрастает. Сравнение ВТАХ показало, что именно самонагрев является основным процессом, снижающим мощность излучения созданных структур. УФ светодиоды работоспособны в непрерывном режиме возбуждения вплоть до значений прямого тока 135 мА. Исследования ВАХ показало, что при рабочем токе значения напряжения находились в районе 3,9 В. Это соответствует величине, определяемой шириной запрещенной зоны полупроводника. Величина обратного тока составила 3,6 мкА при обратном напряжении 0,5 В. максимальный КПД соответствовал рабочему току 20 мА и составил примерно 1,5%. При 100 мА КПД снижался примерно в 2 раза.

Проведенное исследование показало перспективность использования технологии ХГЭ для изготовления УФ СД на основе GaN/AlGaIn.

- [1] Smith G., Dang T., Nelson T., Brown J., Tsvetkov D., Usikov A., Dmitriev V. J. Appl. Phys. **95**. P.8247. (2004).
- [2] Menkovich E. A., Tarasov S. A., Lamkin I. A., Kurin S. Yu., Antipov A. A., Roenkov A. D., Barash I. S., Helava H. I., Makarov Yu. N. J. of Phys.: Conf. Ser. (c). **406**. P.012027. (2013).
- [3] Kurin S. Yu., Antipov A. A., Roenkov A. D., Barash I. S., Helava H. I., Menkovich E. A., Tarasov S. A., Lamkin I. A., Shmidt N. M., Makarov Yu. N. J. of Phys.: Conf. Ser. **461**. P.012028 (2013).
- [4] Менькович Е. А., Тарасов С.А., Ламкин И.А. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». № 10. С. 18. (2012).
- [5] Menkovich E.A., Tarasov S.A., Lamkin I.A. Functional Materials. **19**, № 2. P. 233. (2012).
- [6] Пухтин А.Н., Тарасов С.А., Менькович Е.А. Патент на изобретение № 2473149. Способ определения температуры активной области светодиода. Заявка № 2011147653. Приоритет изобретения 23 ноября 2011 г.
- [7] Kurin S. Yu., Antipov A.A., Barash I.S., Roenkov A.D., Helava H.I., Tarasov S.A., Menkovich E.A., Lamkin I.A., Makarov Yu. N. Phys. Stat. Solidi (C). **10**, № 3. P. 289. (2013).
- [8] Mymrin V.F., Bulashevich K.A., Podolskaya N.I., Karpov S.Yu. J. Cryst. Growth. **281**, № 1. P. 115. (2005).
- [9] Bulashevich K., Ramm M., Karpov S. Phys. Stat. Solidi (C), **6**(S2), S804 (2009).
- [10] Ламкин И.А., Тарасов С.А., Феоктистов А.О. Известия Санкт-Петербургского государственного элект-

- ротехнического университета ЛЭТИ. №5. С.14. (2011).
- [11] Калинин Б.В., Ламкин И.А., Менькович Е.А., Тарасов С.А. Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. № 5. С. 24. (2012).
- [12] Цвелев Е.О., Менькович Е.А., Тарасов С.А., Ламкин И.А. Программа ЭВМ: «Программа автоматизации диагностики цветовых характеристик полупроводниковых светоизлучающих диодов» Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013610849 от 09.01.2013 г.

## Light emitting diodes ultraviolet light based on GaN/AlGaIn heterostructures grown by chloride-hydride vapour phase epitaxy: performance study

E. A. Menkovich<sup>1, a</sup>, S. A. Tarasov<sup>1, b</sup>, S. Yu. Kurin<sup>2, c</sup>

<sup>1</sup>*Department of micro- and nanoelectronics Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI»,  
197376 St. Petersburg, Russia*

<sup>2</sup>*Nitride Crystals Ltd., 194156 St. Petersburg, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>menkovichea@gmail.com, <sup>b</sup>satarasov@mail.ru, <sup>c</sup>sergeykurin@nitride-crystals.com*

The paper presents the results of the development of ultraviolet light-emitting diodes (UV LEDs) based on GaN/AlGaIn heterostructures grown on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001) substrates by hydride vapor phase epitaxy (CHVPE). The peak wavelengths were in the range of 360-365 nm. At operating current (20 mA) the UV LED dies revealed an output power and WPE of 1,14 mW and 1,46 %, respectively. The degradation tests of the samples showed the lifetime exceeding several thousand hours at operating current.

PACS: 85.60 Jb, 81.05 Ea.

Keywords: LEDs, hydride vapour phase epitaxy, epitaxial heterostructure, ultraviolet radiation.

Received 20.09.2013.

### Сведения об авторах

1. Менькович Екатерина Андреевна — аспирантка; тел.: 8(921)657-59-95; e-mail: menkovichea@gmail.com.
2. Тарасов Сергей Анатольевич — канд. физ.-мат. наук; тел.: 8(911) 260-12-90; e-mail: satarasov@mail.ru.
3. Курин Сергей Юрьевич — аспирант; тел.: 8(952) 392-48-91; e-mail: uergeykurin@nitride-crystals.com.