

УДК 621.383

## СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ФОТОТОКА СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ GaN ГЕТЕРОСТРУКТУР С ИЗМЕНЕНИЕМ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ТЕРМОТОКОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ

В. А. Сергеев<sup>1,2</sup>, И. В. Фролов<sup>1</sup>, О. А. Радаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, 432071, Ульяновск, ул. Гончарова д.48/2

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет  
432027, Ульяновск, ул. Северный венец, 32

Статья поступила в редакцию 22 февраля 2019 г.

**Аннотация.** Кратко описан аппаратно-программный комплекс для измерения распределения уровня фотоэлектрического отклика по поверхности светоизлучающих гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) при их локальном фотовозбуждении лазерным излучением в стационарном и динамическом режимах. Приведены результаты измерения распределения уровня фототока по площади светодиодных GaN-гетероструктур в статическом режиме и режиме гармонической модуляции интенсивности фотовозбуждения. Показано, что относительный разброс значений фототока на краях структуры выше, чем в центре, что подтверждается измерением предельных частот фотоотклика при гармоническом фотовозбуждении. Установлено, что уровень фототока при фотовозбуждении гетероструктур более длинноволновым излучением имеет больший разброс, что объясняется увеличением доли фототока, генерируемого с дефектных уровней. Представлены результаты изменения параметров фототока и оптических характеристик светодиодов в процессе термотокковых испытаний. Впервые показано, что спектр интегрального фототока светодиодов на основе GaN-гетероструктур в результате термотокковых испытаний смещается в длинноволновую область. При этом изменение среднего уровня фототока сильно коррелирует с измерением уровня электролюминесценции, то есть характеризует темп деградации гетероструктур. Отмечается, что разброс уровня интегрального фототока УФ-светодиодов заметно превышает разброс, наблюдаемый у светодиодов синего и зеленого свечения. Оценки показали, что

коэффициент спада фототока в процессе испытаний для всех типов исследуемых светодиодов заметно коррелирует с начальным уровнем фототока. Обсуждаются возможности разработки на основе полученных результатов промышленно-ориентированной методики диагностики качества светодиодов по параметрам фотоэлектрического отклика.

**Ключевые слова:** светоизлучающие гетероструктуры, фотовозбуждение, фототок, распределение, электролюминесценция, испытания, деградация.

**Abstract.** A hardware and software complex for measuring the distribution of the photoelectric response level over the surface of light-emitting heterostructures with quantum wells (QWs) during their local photoexcitation by laser radiation in stationary and dynamic modes is briefly described. The results of measuring the distribution of the photocurrent level over the area of LED GaN-heterostructures in the static mode and the mode of harmonic modulation of the photoexcitation intensity are presented. It is shown that the relative scatter of the photocurrent values at the edges of the structure is higher than in the center, which is confirmed by measuring the limiting frequencies of the photoresponse during harmonic photoexcitation. It has been established that the photocurrent level during photoexcitation of heterostructures with longer wavelength radiation has a larger scatter, which is explained by an increase in the fraction of the photocurrent generated from defect levels. The results of changes in the photocurrent parameters and optical characteristics of LEDs during the heat-current tests are presented. It is shown for the first time that the spectrum of the integrated photocurrent of LEDs based on GaN-heterostructures as a result of tests shifts to the long-wavelength region. In this case, the change in the average level of the photocurrent strongly correlates with the measurement of the level of electroluminescence, that is, it characterizes the rate of degradation of the heterostructures. It is noted that the variation in the level of the integral photocurrent of UV LEDs is markedly higher than the variation observed in blue and green light emitting diodes. Estimates showed that the coefficient of photocurrent decay in the process of testing for all types of LEDs under study correlates markedly with the initial level of the photocurrent. The possibilities of developing on the basis of the

obtained results of an industry-oriented methodology for diagnosing the quality of LEDs in terms of the photoelectric response parameters are discussed.

**Keywords:** light emitting heterostructures, photoexcitation, photocurrent, distribution, electroluminescence, testing, degradation.

## Введение

Для диагностики светоизлучающих гетероструктур широко применяются оптические и фотоэлектронные методы: спектроскопия поглощения света, фотоотражения, фотолюминесценции и др. [1,2]. Одним из методов диагностики светоизлучающих гетероструктур, отличающимся простотой реализации, является метод фотоэлектрической спектроскопии [3]. Этот метод позволяет получать значительную часть информации, которую дает метод спектроскопии фотолюминесценции, причем в более удобных и простых условиях: комнатная температура, невысокий уровень фотовозбуждения, простота регистрации фотоотклика. Метод основан на возбуждении гетероструктуры излучением с энергией фотона, превышающей ширину запрещенной зоны материала активной области светоизлучающей гетероструктуры, и регистрации возникающих фотоЭДС или фототока. Однако известные средства фотоэлектрической диагностики [3-6] основаны на регистрации интегрального фотоэлектрического отклика структуры на квазистационарное фотовозбуждение, по которому невозможно оценить структурное несовершенство и дефектность гетероструктур.

Под действием электрического тока и внешних факторов в гетероструктуре происходят необратимые микроскопические изменения: перераспределение примеси; изменение структуры интерфейса гетерограниц, движение вакансий и дислокаций и т. п. Указанные изменения проявляются в снижении квантовой эффективности светодиодов, изменении вольт-амперных и иных характеристик. Установление связи скорости этих процессов с исходными параметрами прибора позволит выявлять приборы, склонных к ускоренной деградации. В связи с этим представляет интерес исследование возможности

использования параметров фотоэлектрического отклика в качестве не только диагностического но и прогнозирующего параметра.

Целью работы является исследование связи уровня фотоэлектрического отклика и параметров его распределения по площади светодиодных GaN-гетероструктур с оптическими характеристиками светодиодов и их изменением при термотоковых испытаниях.

## **1. Измерительный комплекс для измерения распределения параметров фотоэлектрического отклика по площади светоизлучающих структур**

Аппаратно-программный комплекс [7] позволяет проводить диагностику качества светоизлучающих гетероструктур по фотоэлектрическому отклику при локальном фотовозбуждении в динамическом и статическом режимах. Комплекс позволяет получать информацию о параметрах фотоэлектрического отклика гетероструктуры с возможностью автоматического сканирования по поверхности и управления параметрами фотовозбуждения.

Структурная схема аппаратной части комплекса представлена на рис. 1. Исследуемый образец закрепляется на XYZ-позиционере, который позволяет перемещать светодиод в плоскости XY в диапазоне  $10 \times 10$  мм. Перемещение осуществляется с помощью управляемых микроконтроллером шаговых двигателей со встроенным редуктором, обеспечивающим минимальный угол поворота  $18/30$  градуса на шаг, что в сочетании с микрометрическими винтами позиционера позволяет добиться минимального шага перемещения в 10 мкм. В зависимости от исследуемого объекта для фотовозбуждения используются сменные лазерные диоды, излучающие на длинах волн 405, 445 или 515 нм.

Излучение лазерного диода фокусируется на поверхность исследуемого образца линзой и объективом. Точная подстройка фокусного расстояния осуществляется перемещением XYZ-позиционера по оси Z. Контроль диаметра пучка лазерного излучения осуществляется с помощью фотоприемной линейки ILX511. Минимальный диаметр пучка составляет 14 мкм.

При измерении профиля распределения фототока по поверхности кристалла в стационарном режиме лазерный диод подключается к стабилизированному источнику тока. В качестве преобразователя фототок – напряжение и усилителя фото-ЭДС используется цифровой мультиметр Tektronix DMM4040, позволяющий проводить измерения фототока в диапазоне от 100 мкА до 100 мА, с разрешением до 100 пА. При измерении динамических параметров фотоотклика структуры (граничной частоты модуляции фототока в гармоническом режиме фотовозбуждения и длительности нарастания и спада фронта импульса фототока в импульсном режиме) модуляция интенсивности излучения лазера осуществляется программно-управляемым генератором АКИП 3410. Генератор обеспечивает режим непрерывной перестройки частоты модуляции в диапазоне от 1 кГц до 20 МГц с логарифмическим шагом в течение установленного времени свипирования. В режиме импульсной модуляции длительность импульса устанавливается в диапазоне 100 мкс...1 мс со скважностью 2...10 в зависимости от частотных свойств исследуемого объекта. Длительность фронта и спада импульса генератора составляет 8 нс.

Основные метрологические характеристики комплекса приведены в табл. 1.

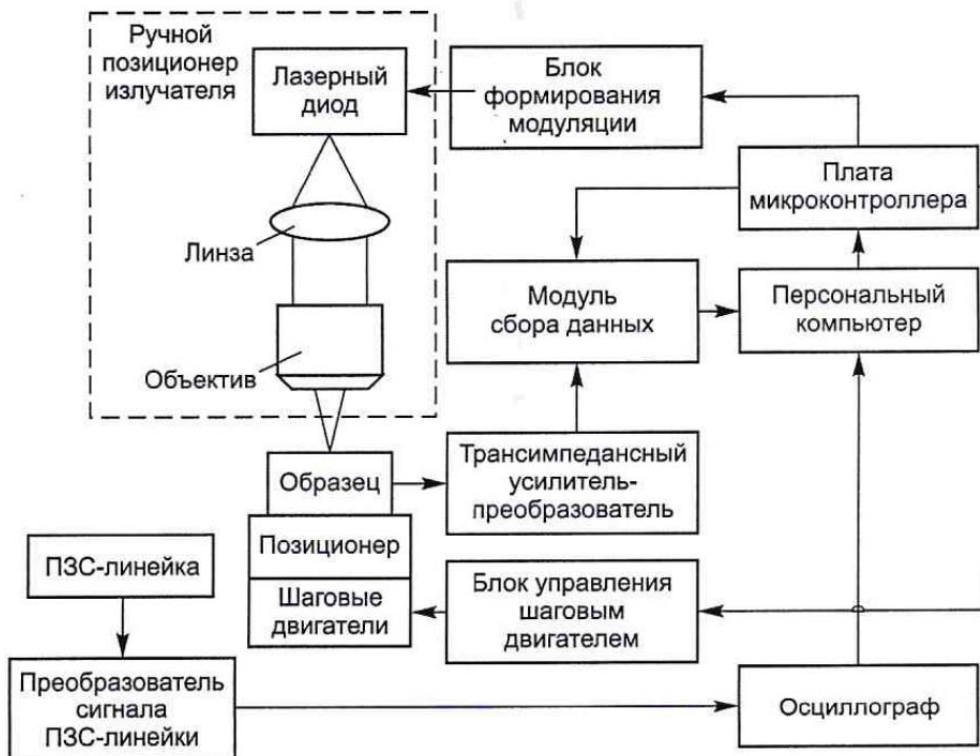


Рис. 1. Структурная схема измерительного комплекса

Таблица 1. Основные метрологические характеристики измерительного комплекса.

<b>Система позиционирования</b>	
Диапазон перемещения исследуемого объекта в плоскости ХУ	10 мм
Минимальный шаг перемещения объекта в плоскости ХУ	10 мкм
Максимальная абсолютная погрешность позиционирования объекта в плоскости ХУ	$\pm 1$ мкм
<b>Источник лазерного излучения</b>	
Длина волны (сменные лазерные модули)	405 $\pm$ 5 нм; 450 $\pm$ 10 нм; 515 $\pm$ 5 нм
Выходная мощность	20 мВт
Стабильность выходной мощности (RMS, после 4-х часов)	< 1%
Минимальный диаметр сфокусированного пучка	14 мкм $\pm$ 5%
<b>Стационарный режим</b>	
Диапазон измерения фототока	от 100 мкА до 100 мА
Минимальное значение измеряемого фототока	100 пА
Погрешность измерения фототока	0.075%
<b>Гармонический режим</b>	
Частота модуляции излучения лазера	от 1 кГц до 20 МГц
Диапазон измерения фототока (RMS)	от 100 мкА до 100 мА
Минимальное значение измеряемого фототока (RMS)	1 мкА
Погрешность измерения фототока (RMS)	< 1%
<b>Импульсный режим</b>	
Длительность импульсов модуляции излучения лазера	от 100 мкс до 1 мс
Скважность	от 2 до 10
Минимальная длительность фронта и спада импульса	> 8 нс
Диапазон измерения фототока	от 100 мкА до 100 мА
Минимальное значение измеряемого фототока	5 мкА
Погрешность измерения фототока	< 3%

Трансимпендансным усилителем-преобразователем на операционном усилителе фототок преобразуется в напряжение, которое модулем сбора данных ЛА-n1USB оцифровывается и передается в компьютер. По полученным данным компьютерная программа строит распределение динамических параметров фотоэлектрического отклика по поверхности кристалла исследуемого

образца. С учетом интегральной и дифференциальной нелинейности, а также из ошибки квантования АЦП (8 бит для модуля сбора данных ЛА-n1USB) относительная погрешность измерения динамических параметров составляет величину порядка 1%.

При замене лазера для фотовозбуждения гетероструктуры цифровым микроскопом и при пропускании через исследуемый светодиод прямого тока измерительный комплекс позволяет путем накопления и последующей попиксельной обработки изображений измерять распределение уровня ЭЛ (мэппинг) по площади исследуемого образца.

## 2. Результаты исследований параметров фототока светодиодов в различных режимах фотовозбуждения

**Стационарный режим.** Комплекс апробирован на кристаллах серийных мощных светодиодов фирмы Cree с InGaN/GaN гетероструктурой размерами 980×980 мкм на SiC подложке синего (XREBLU-L1-0000-00K01) и зеленого (XREGRN-L1-0000-00P01) свечения. Профиль распределения фототока по поверхности кристалла одного из образцов приведен на рис. 2.

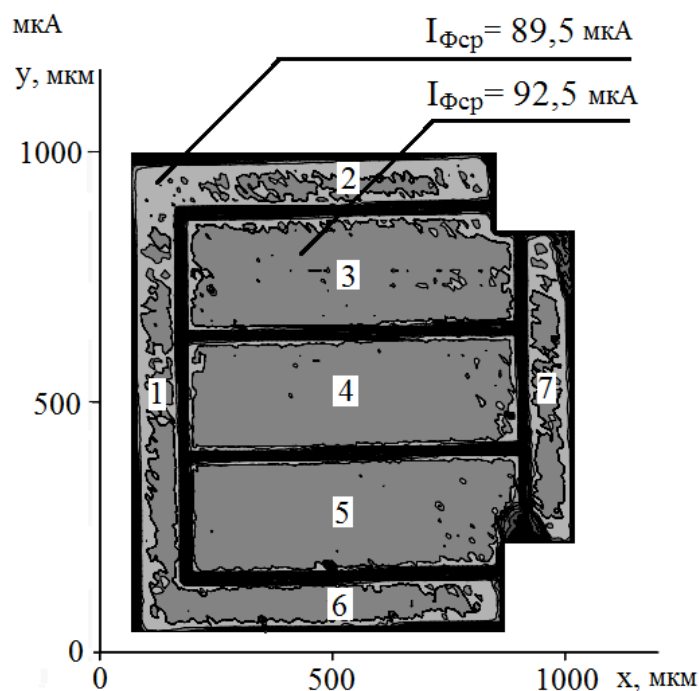


Рис. 2. Профиль распределения фототока по поверхности кристалла светодиода XREBLU-L1-0000-00K01 фирмы Cree

Для оценки характера распределения уровня фототока по площади гетероструктуры поверхность кристалла условно разделялась на семь сегментов. Неоднородность распределения фототока по поверхности кристалла оценивалась по отношению среднеквадратического отклонения  $\sigma$  уровня фототока в сегменте к его среднему  $I_{\Phi_{cp}}$  значению. Из рисунка 2 видно, что средний уровень фототока в центре кристалла выше, чем вблизи границ кристалла. При этом вблизи границ кристалла степень неоднородности распределения фототока выше, чем в центре.

При сравнении характера распределения фототока в структурах синих и зеленых светодиодов неоднородность распределения фототока по поверхности кристалла зеленых светодиодов в 1,5...1,7 раз выше, чем синих (табл. 2).

Таблица 2. Параметры распределения уровня фототока по поверхности кристаллов светодиодов

Номер сегмента кристалла	XREBLU-L1-0000-00K01			XREGRN-L1-0000-00P01		
	Синий			Зеленый		
	$I_{\Phi_{cp}}, \mu A$	$\sigma, \mu A$	$\sigma / I_{\Phi_{cp}}$	$I_{\Phi_{cp}}, \mu A$	$\sigma, \mu A$	$\sigma / I_{\Phi_{cp}}$
1	89.5	2.525	0.028	34.2	2.251	0.066
2	89.2	1.884	0.021	33.8	1.683	0.050
3	92.3	1.645	0.018	35.6	1.514	0.043
4	92.6	1.348	0.015	36.9	1.151	0.031
5	93.7	1.668	0.018	37.7	1.246	0.033
6	91.5	2.380	0.026	37.1	1.141	0.031
7	89.9	2.807	0.031	35.2	1.883	0.053

**Гармонический режим.** В режиме гармонического локального фотовозбуждения гетероструктуры с непрерывной перестройкой частоты проведены измерения граничной частоты  $f_{3dB}$  модуляции фототока в различных точках поверхности кристалла голубого светодиода (рис. 3). На рисунке показано, что вблизи границ кристалла среднее значение граничной частоты модуляции фототока ( $f_{3dB} = 1,320$  МГц) больше, чем в центре кристалла ( $f_{3dB} = 1,280$  МГц). Это означает, что среднее значение времени жизни носителей заряда в центре кристалла больше, чем вблизи границ, что указывает на большие рекомбинационные потери вблизи границ кристалла.



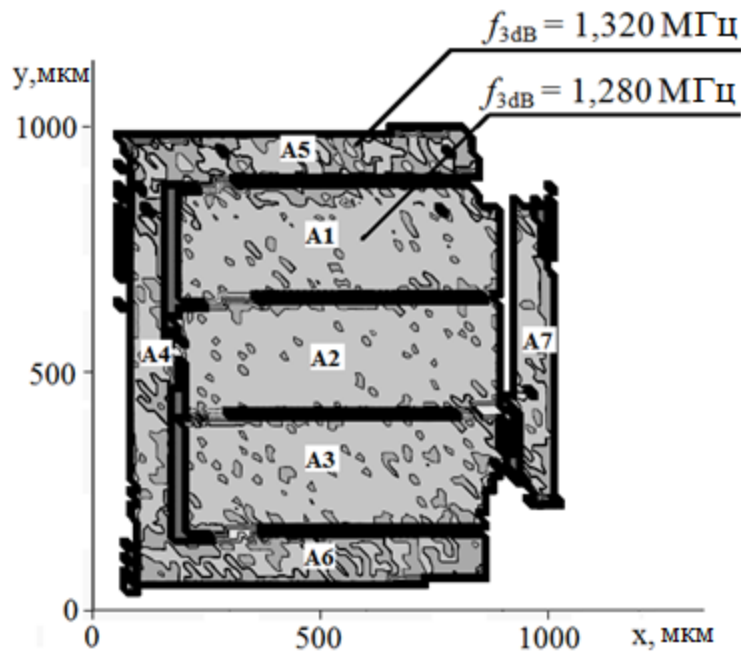


Рис. 3. Профиль распределения граничной частоты модуляции фототока по поверхности кристалла голубого светодиода

**Распределение фототока при фотовозбуждении гетероструктур лазерным излучением с различной длиной волны.** На рис. 4 представлены профили распределения значений фототока по поверхности кристалла светодиода зеленого свечения при локальном фотовозбуждении лазерным излучением с длиной волны  $\lambda_{\text{ФВ}}$  405 нм и 450 нм.

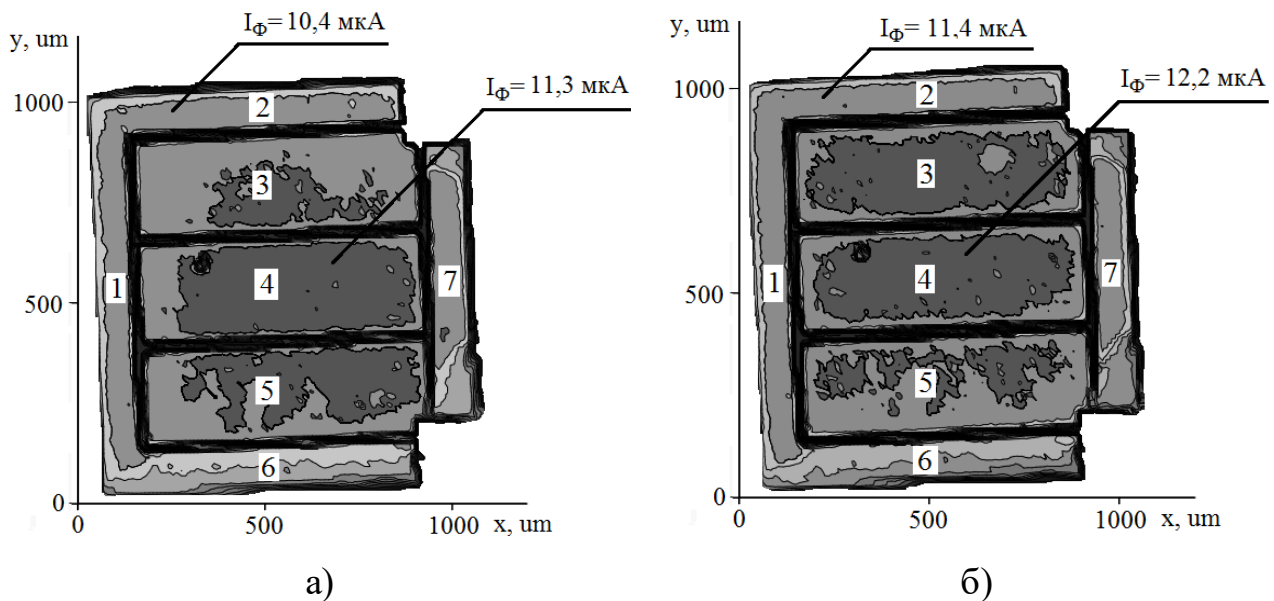


Рис. 4. Профиль распределения значения фототока по поверхности кристалла светодиода XREGRN-L1-0000-00P01 при локальном фотовозбуждении лазерным диодом с длиной волны излучения 405 нм (а) и 450 нм (б)

Согласно оценкам, представленным в таблице 3, неоднородность распределения фототока по поверхности кристалла светодиода при фотовозбуждении излучением с  $\lambda_{\text{ФВ}} = 450$  нм в 1,8...2,0 раз выше, чем при фотовозбуждении излучением с  $\lambda_{\text{ФВ}} = 405$  нм.

Таблица 3. Параметры распределения фототока по поверхности кристалла светодиода XREGRN-L1-0000-00P01 при локальном фотовозбуждении лазерным излучением с разными длинами волн

Номер сегмента кристалла	$\lambda_{\text{ФВ}} = 405$ нм			$\lambda_{\text{ФВ}} = 450$ нм		
	$I_{\text{Фср}}, \mu\text{A}$	$\sigma, \mu\text{A}$	$\sigma/I_{\text{Фср}}$	$I_{\text{Фср}}, \mu\text{A}$	$\sigma, \mu\text{A}$	$\sigma/I_{\text{Фср}}$
1	10.3	0.116	0.011	11.5	0.168	0.015
2	10.4	0.171	0.016	11.4	0.334	0.029
3	10.9	0.169	0.015	12.2	0.188	0.015
4	11.3	0.125	0.011	12.2	0.272	0.022
5	11.0	0.191	0.017	11.9	0.215	0.018
6	10.5	0.182	0.017	11.6	0.351	0.030
7	10.7	0.191	0.018	11.4	0.331	0.029

Такой характер изменения распределения фототока объясняется нами уменьшением относительной доли фототока  $\Delta I_{\text{ФД}}$ , генерируемого с дефектных или примесных уровней в КЯ в общем фототоке с увеличением энергии фотонов фотовозбуждающего излучения [8].

В [9] показано, что среднее по площади всего кристалла значение фототока InGaN/GaN светодиодов XREGRN-L1-0000-00P01 зеленого свечения при облучении гетероструктуры излучением с длиной волны 405 нм сильно коррелирует с уровнем порогового тока и НЧ-шума и может служить диагностическим параметром дефектности гетероструктуры. Следует, отметить, что для светодиодов синего и ультрафиолетового (УФ) свечения такой заметной корреляции не обнаружено.

**Связь распределения уровня фототока с распределением электролюминесценции по площади кристалла.** Известно, что неоднородность распределения ЭЛ по площади кристалла InGaN/GaN светодиодов определяется двумя факторами: неоднородностью распределения центров безызлучательной

рекомбинации, которые формируют локальные области с низкой интенсивностью излучения, и локальным скоплением атомов индия в твердом растворе InGaN. Совместное измерение распределений интенсивности ЭЛ и фотопоглощения по поверхности кристалла позволит выявить локальные области кристалла с повышенной концентрацией дефектов. Исследование корреляционных связей между параметрами распределения уровня фототока и интенсивности ЭЛ по поверхности кристалла выполнено на примере коммерческих светодиодов XREGRN-L1-0000-00P01 зеленого свечения на основе кристаллов EZ1000 с InGaN/GaN гетероструктурой. Распределение фотоэлектрического отклика гетероструктуры (рис. 5, а) измерялось при локальном фотовозбуждении структуры лазерным излучением длиной волны 405 нм. Измерение распределения интенсивности ЭЛ (рис. 5, б) выполнялось в диапазоне малых токов (до 10 мкА) цифровым микроскопом Levenhuk с последующей обработкой изображения в среде MathCAD.

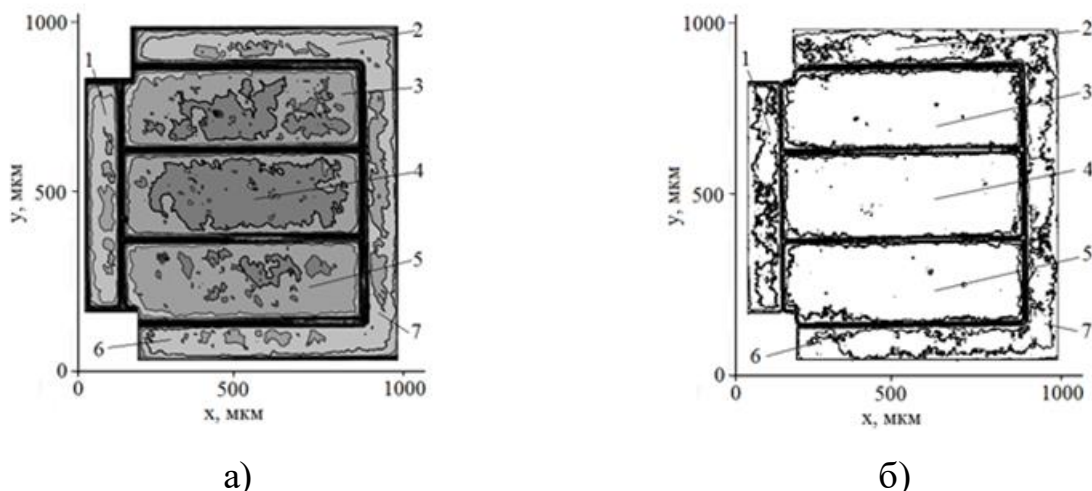


Рис. 5 Распределение уровня фототока (а) и уровня ЭЛ при токе 5 мкА (б) по площади кристалла светодиода XREGRN-L1-0000-00P01 зеленого свечения

Согласно полученным результатам, среднее значение степени неоднородности этих параметров вблизи границ кристалла (сегменты 1, 2, 6, 7) выше в 1,5–2 раза, чем в центре кристалла (сегменты 3, 4, 5). Среднее значение уровня фототока  $I_{\text{Фср}}$  и интенсивности электролюминесценции  $P_{\text{Ср}}$  в центре кристалла так же больше, чем вблизи границ. Коэффициент корреляции между значениями  $I_{\text{Фср}}$  и  $P_{\text{Ср}}$  составляет 0,98.

### 3. Связь параметров фототока светодиодов с изменением их характеристик в процессе испытаний

Изменение спектров фототока светоизлучающих структур с квантовыми ямами при испытаниях. Измерение спектра интегрального фототока светодиодов ARL-5213 PGC зеленого свечения и КИПД 40Т20-С1-П7 синего свечения проводилось по методике, представленной в [10], путем облучения их узкополосным излучением, близким к монохроматическому, формируемым на выходе спектрофотометра СФ-46 с шириной выходной щели 6,5 нм, в диапазоне длин волн 380...520 нм. В качестве источника излучения использовалась лампа накаливания мощностью 100 Вт. Фототок и фотоЭДС регистрировались универсальным вольтметром В7-21А. Измеренный спектр фототока светодиода нормировался на спектр источника излучения.

Испытания проводились при комнатной температуре в течение 10 000 ч под действием постоянного тока  $25 \text{ А/см}^2$ .

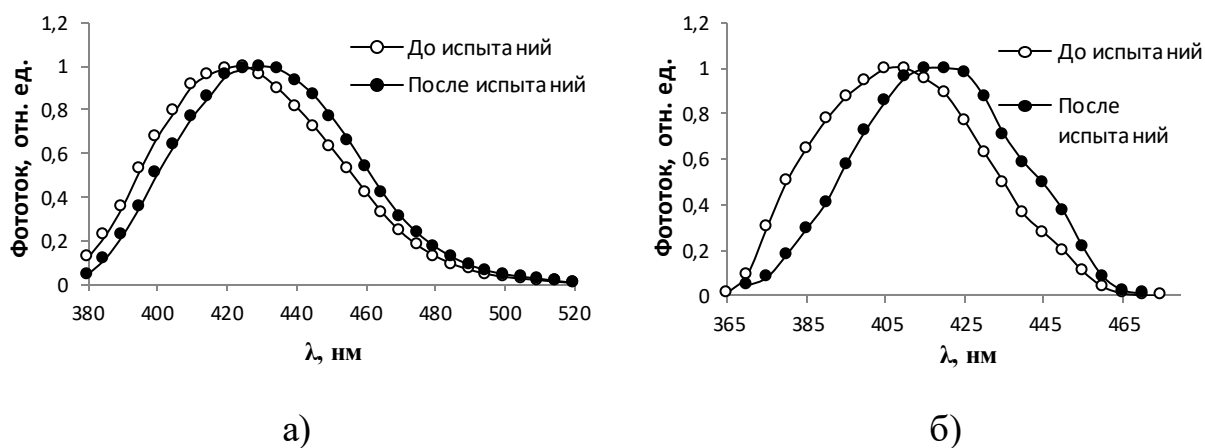


Рис. 6. Спектр фототока зеленого светодиода ARL-5213 PGC и синего светодиода КИПД 40Т20-С1-П7 до и после испытаний под действием постоянного тока  $25 \text{ А/см}^2$  в течение 10 000 ч

Как видно из рисунка 6, спектр фототока обоих исследованных светодиодов зеленого и синего свечения смещается в длинноволновую область, что вероятно связано с появлением новых дефектных уровней в активной области гетероструктуры и может быть связано с развитием протяженных дефектов (что должно проявиться на ВАХ в режиме микротоков), диффузией магния из барьерных слоев в слои КЯ или перераспределением кластеров

индия. При проведении этих измерений отмечалось, что общий уровень фототока в процессе испытаний заметно уменьшался.

**Связь уровня фототока с изменением уровня электролюминесценции светодиодов при испытаниях.** Общий уровень фототока исследованных светодиодов после испытаний уменьшился в несколько раз. В рамках рассматриваемой модели при постоянной скорости фотогенерации и термоактивации носителей заряда это объясняется увеличением скорости безызлучательной рекомбинации через примесные уровни и уровни дефектов. В результате роста скорости безызлучательной рекомбинации при практически неизменной скорости излучательных процессов спад уровня фототока должен коррелировать со спадом уровня ЭЛ.

Для проверки такой связи проведены ускоренные испытания светодиодов XREBLU- L1-0000-00K01 при постоянном токе 1 А при температуре корпуса 120 °С в течение 140 ч. Согласно результатам измерений на интегрирующей сфере, световой поток после испытаний уменьшился на 10 %, при этом уровень фототока при интегральной засветке упал в среднем на 1,5...2 %.

При длительных испытаниях 45 штук маломощных синих светодиодов КИПД 40Т20-С1-П7 под действием постоянного тока плотностью 25 А/см<sup>2</sup> в течение 10 000 ч при комнатной температуре контролировалось изменение «интегрального» фототока светодиодов при их облучении равномерным световым потоком от синего светодиода с центральной длиной волны спектра излучения 460 нм и плотностью потока мощности 50 мВт/см<sup>2</sup>. Световой поток светодиодов измерялся интегрирующей сферой ТКА-КК1 при токе 20 мА. Результаты измерений представлены в таблице 4.

Корреляционное поле между значением спада фототока и уменьшением светового потока при испытаниях показано на рис. 7. Коэффициент корреляции между снижением светового потока и спадом фототока составил 0,96, что указывает на сильную связь механизмов фотогенерации с механизмами излучательной рекомбинации.

Таблица 4. Изменение светового потока и уровня фототока при интегральной засветке светодиодов КИПД 40Т20-С1-П7 при испытаниях под действием постоянного тока  $25 \text{ A/cm}^2$  в течение 10 000 ч

№ светодиода	Световой поток, Лм			Фототок, нА		
	До испытаний	После испытаний	Спад относительно исходных значений, %	До испытаний	После испытаний	Спад относительно исходных значений, %
КИПДГ21	0,47	0,07	85	77,7	14,5	81
КИПДГ23	0,47	0,1	79	72,6	24	67
КИПДГ24	0,45	0,08	82	70,3	18,6	74
КИПДГ25	0,45	0,09	80	70,2	20	72
КИПДГ26	0,45	0,05	89	79,1	12,2	85
КИПДГ27	0,46	0,1	78	72,2	23	68
КИПДГ28	0,47	0,1	79	76,1	24,2	68
КИПДГ29	0,48	0,1	79	74,3	23,5	68
КИПДГ30	0,46	0,1	78	68,4	21,3	69
КИПДГ31	0,44	0,09	80	69	20,8	70
КИПДГ32	0,47	0,1	79	69	21,8	68
КИПДГ34	0,47	0,09	81	79	21,6	73
КИПДГ35	0,45	0,06	87	78,4	13,2	83
КИПДГ36	0,37	0,1	73	65,4	26,6	59
КИПДГ37	0,47	0,08	83	75,2	19,2	74
КИПДГ38	0,45	0,06	87	73,7	13,7	81
КИПДГ39	0,45	0,06	87	69,1	13,7	80
КИПДГ40	0,46	0,07	85	71,7	17,4	76
КИПДГ41	0,46	0,09	80	72	19,8	73
КИПДГ42	0,47	0,1	79	81,1	24,3	70
КИПДГ43	0,45	0,07	84	72,1	18	75
КИПДГ44	0,46	0,05	89	78,8	10,5	87
КИПДГ45	0,46	0,08	83	72,8	19	74
КИПДГ46	0,45	0,05	89	72,7	12,3	83
КИПДГ47	0,46	0,08	83	74,1	17,7	76
КИПДГ48	0,47	0,08	83	79,7	17,8	78
КИПДГ50	0,45	0,06	87	71,3	14	80
КИПДГ51	0,44	0,07	84	75,7	15,4	80
КИПДГ52	0,47	0,09	81	75,2	19,5	74
КИПДГ54	0,46	0,05	89	79,5	12	85
КИПДГ55	0,44	0,07	84	71,1	16,5	77
КИПДГ56	0,43	0,09	79	72,9	21,1	71
КИПДГ57	0,44	0,08	82	72,8	17,8	76
КИПДГ58	0,45	0,04	91	66,9	7,2	89
КИПДГ59	0,44	0,08	82	77,5	18,6	76
КИПДГ60	0,43	0,07	84	69	16,1	77
КИПДГ61	0,43	0,07	84	75,7	18,3	76
КИПДГ62	0,46	0,12	74	78,2	26,6	66
КИПДГ63	0,46	0,07	85	77,3	16	79
КИПДГ64	0,4	0,04	90	57,2	6,5	89
КИПДГ65	0,45	0,06	87	71,1	15	79
КИПДГ66	0,46	0,09	80	78,9	22,1	72
КИПДГ67	0,45	0,09	80	76,9	20	74
КИПДГ68	0,47	0,05	89	78,5	10,1	87
КИПДГ69	0,45	0,08	82	72,5	18,3	75

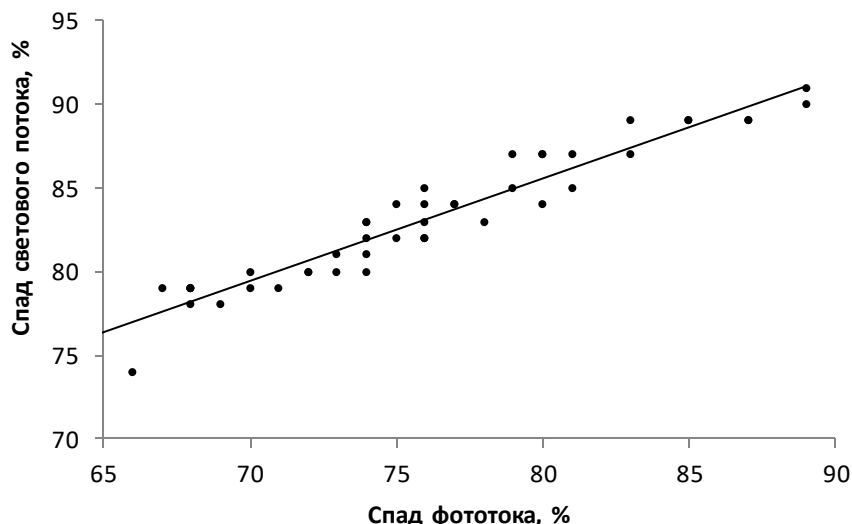


Рис. 7. Корреляционное поле между значением спада фототока и уменьшением светового потока светодиодов КИПД 40Т20-С1-П7 после испытаний

При этом коэффициент корреляции  $\rho$  между начальным уровнем фототока и коэффициентом его изменения ( $K=I_{\text{Фнач}}/I_{\text{Фисп}}$ ) в процессе испытаний составил 0,42. Статистические оценки показали, что для данной выборки этот коэффициент корреляции является значимым.

#### **Изменение фототока УФ светодиодов при ускоренных испытаниях.**

Известно, что качество и надежность УФ светодиодов заметно ниже, чем обычных синих СИД. Описанными выше методами были исследованы УФ светодиодов 3535 Everlight с номинальной длиной волны излучения 365 нм. Согласно данным фирмы изготовителя номинальный рабочий ток этих светодиодов 0,7 А, диапазон рабочих температур -40..+110 С, тепловое сопротивление 5 К/Вт. Для сравнения в таблице 5 приведены результаты измерения уровня фототока УФ-светодиодов при засветке УФ-лазером с длиной волны излучения 405 нм. В результате существенного различие энергии фотонов и ширины запрещенной зоны в КЯ, уровень фототока примерно на порядок величины меньше уровня фототока в синих и зеленых светодиодах сравнимой площади, поскольку генерация носителей происходит только с дефектных и примесный уровней.

Таблица 5. Результаты измерений «интегрального» фототока мощных (3 Вт) УФ светодиодов 3535 Everlight с длиной волны излучения 365 нм при засветке УФ лазером с длиной волны 405 нм до и после испытаний

Параметр	Номер светодиода										$I_{ФФр}$ , мкА	СКО, мкА
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Фототок до испытаний, мкА	1,06	0,84	0,62	0,64	0,52	0,66	0,88	0,91	1,07	0,63	0,78	0,20
Фототок после испытаний, мкА	0,10	0,12	0,07	0,08	0,06	0,09	0,07	0,10	0,10	0,11	0,09	0,02
Коэффициент снижения уровня фототока	10,6	7,0	8,7	8,0	8,6	7,3	12,7	9,1	10,7	5,7	8,7	10,0

При ускоренных испытаниях в режиме 0,7 А при температуре 100 С в течении 25 часов уровень фототока снизился в несколько раз. Коэффициент изменения фототока довольно сильно (с коэффициентом корреляции 0,62) коррелирует с его начальным значением.

**Связь распределения уровня фототока и электролюминесценции до и после испытаний.** Для исследования указанной связи измерялось распределение уровня фототока при локальном фотовозбуждении лазерным излучением с длиной волны 405 нм и ЭЛ по площади гетероструктуры светодиода Cree XREBLU-L1 синего свечения с размерами кристалла 980×980 мкм до и после испытаний. Испытания проводились при постоянном токе 1 А и повышенной температуре корпуса 120 °С в течение 140 ч. Согласно результатам измерений на интегрирующей сфере световой поток светодиода после испытаний уменьшился на 10 %; средний уровень фототока при этом уменьшился на 2%.

На фоне снижения общего уровня интенсивности ЭЛ наблюдается некоторое выравнивание ее распределения по площади гетероструктуры (рис. 8). При этом относительный разброс распределения значений фототока в большинстве сегментов несколько увеличился (см. таблицу 6 и рис. 9).



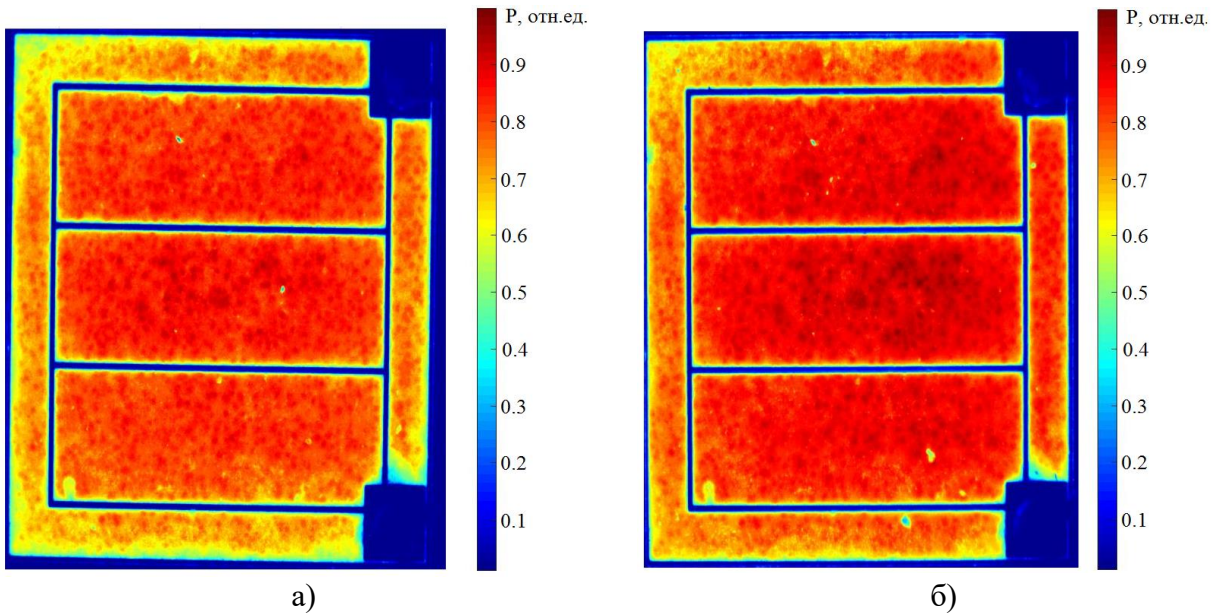


Рис.8. Распределение относительной интенсивности электролюминесценции до (а) и после 140 ч испытаний (б). Измерения выполнены при токе 10 мкА

Качественный анализ приведенных распределений показывает, что относительная интенсивность ЭЛ возросла в областях, где произошло выравнивания распределения уровня фототока. Количественные оценки будут проведены после накопления статистической информации.

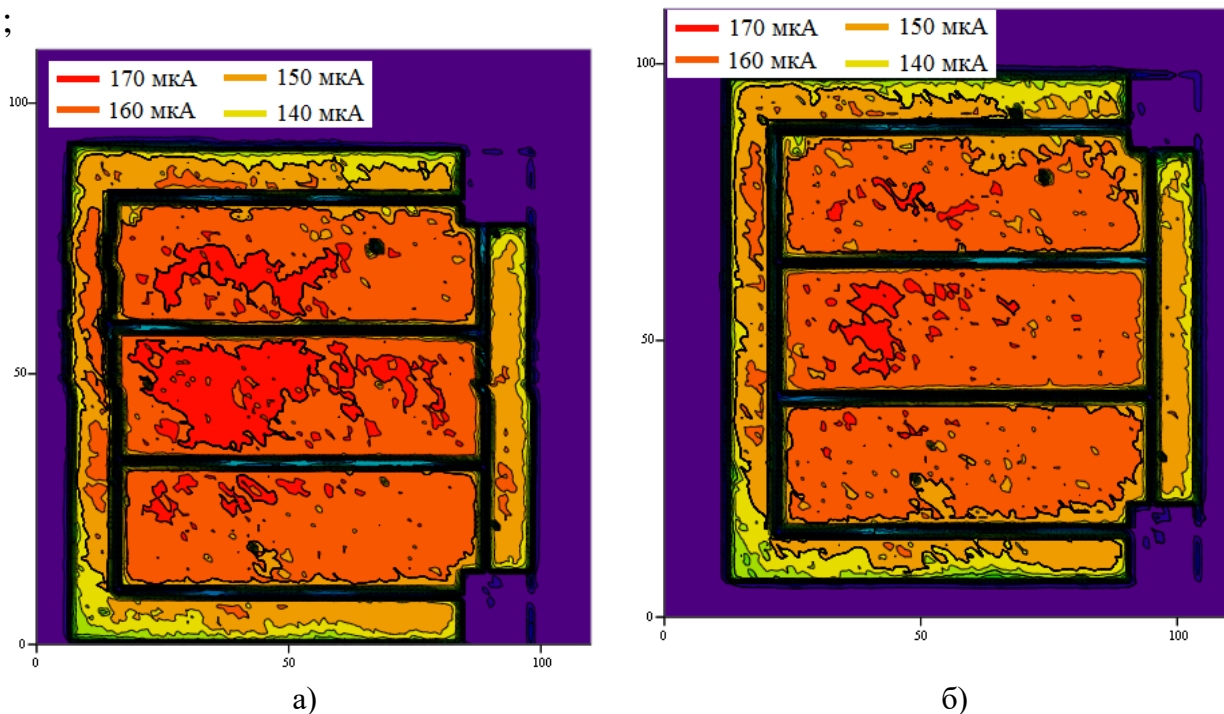


Рис. 9. Профиль распределения значения фототока по поверхности кристалла светодиода Cree XREBLU- L1-0000-00K01 до испытаний (а) и после 140 ч испытаний (б). Измерения выполнены при локальном фотовозбуждении лазерным излучением с длиной волны 405 нм

Таблица 6. Параметры фототока в различных сегментах кристалла светодиода Cree XREBLU- L1-0000-00K01 до испытаний (а) и после 140 ч испытаний (б)

№ сегмента кристалла	Параметр	До испытаний	После 140 ч испытаний
1	$I_{\text{Фср}}$ , мкА	156.7	157.0
	$\sigma$ , мкА	6.527	4.555
	$\sigma / I_{\text{Фср}}$	0.042	0.029
2	$I_{\text{Фср}}$ , мкА	152.8	143.9
	$\sigma$ , мкА	5.747	7.093
	$\sigma / I_{\text{Фср}}$	0.038	0.049
3	$I_{\text{Фср}}$ , мкА	168.3	165.7
	$\sigma$ , мкА	3.504	3.836
	$\sigma / I_{\text{Фср}}$	0.021	0.023
4	$I_{\text{Фср}}$ , мкА	170.1	167.0
	$\sigma$ , мкА	3.119	3.061
	$\sigma / I_{\text{Фср}}$	0.018	0.018
5	$I_{\text{Фср}}$ , мкА	167.7	165.3
	$\sigma$ , мкА	2.97	3.224
	$\sigma / I_{\text{Фср}}$	0.018	0.02
6	$I_{\text{Фср}}$ , мкА	153.2	151.4
	$\sigma$ , мкА	4.484	5.212
	$\sigma / I_{\text{Фср}}$	0.029	0.034
7	$I_{\text{Фср}}$ , мкА	156.4	153.8
	$\sigma$ , мкА	3.073	3.416
	$\sigma / I_{\text{Фср}}$	0.02	0.022

#### 4. Диагностика качества светодиодов по параметрам фотоэлектрического отклика

Представленные результаты позволяют предложить несколько подходов для диагностики качества светодиодов и светоизлучающих гетероструктур по параметрам фотоэлектрического отклика.

Для InGaN/GaN светодиодов зеленого свечения в качестве диагностического параметра можно рекомендовать среднее по площади гетероструктуры значение уровня фототока при облучении контролируемого

образца монохроматическим излучением с энергией фотонов меньше ширины запрещенной зоны GaN и больше ширины запрещенной зоны КЯ. Для определения отбраковочного уровня необходимо провести измерения указанного параметра на представительной выборке однотипных образцов светодиодов и по стандартной методике найти выборочные оценки среднего значения  $I_{\text{Фср}}$  интегрального фототока и среднего квадратичного отклонения  $\sigma$  среднего значения; отбраковочный уровень определяется задачами отбраковки и в системе выходного (или входного) контроля качества обычно принимается на уровне  $3\sigma$ .

Для оперативной диагностики качества светодиодов с излучением на других длинах волн (включая ультрафиолетовые AlGaIn/GaN светодиоды) в качестве диагностического параметра может быть использовано отношение уровней интегрального (или среднего по структуре) фототока  $D=I_{\text{Ф}\lambda_1}/I_{\text{Ф}\lambda_2}$  при фотовозбуждении гетероструктуры узкополосным оптическим излучением на двух длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  ( $\lambda_1 < \lambda_2$ ) с энергией фотонов меньше ширины запрещенной зоны GaN. Чем меньше отношение  $D$ , тем более неоднородной является гетероструктура.

Для детальной диагностики качества светодиодов и выявления необходимо проводить измерение распределения уровня фототока по поверхности гетероструктуры и оценивать статистические параметры распределения уровня фототока в различных сегментах структуры.

## **Заключение**

Метод фотоэлектрической динамической спектроскопии гетероструктур является эффективным исследовательским инструментом, позволяющим оценивать параметры активной области гетероструктур, включая определение локальных динамических характеристик.

Впервые получены распределения параметров фототока при локальном фотовозбуждении светоизлучающих GaN-гетероструктур и показано, что параметры распределения фототока по площади различных сегментов

светоизлучающих гетероструктур связаны с плотностью дефектов в соответствующих сегментах. установлена связь параметров фототока с измерением оптических характеристик светодиодов при испытаниях. В частности, установлено, что в результате термотоковых испытаний спектр фототока смещается в длинноволновую область. При этом снижение уровня среднего фототока при испытаниях сильно коррелирует с уменьшением интенсивности электролюминесценции.

Полученные результаты может служить основой для разработки промышленно ориентированной методики контроля латеральной неоднородности гетероструктур.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 16-47-732159.

### Литература

1. Li Q., Wang S., Gong Z.-N. et al. Time-resolved photoluminescence studies of InGaN/GaN multi-quantum-wells blue and green light-emitting diodes at room temperature // *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*. 2016. Vol. 127, Issue 4, P. 1809–1813.
2. Liu L., Wang W., Huang J.-L. et al. Time-Resolved and Temperature-Varied Photoluminescence Studies of InGaN/GaN Multiple Quantum Well Structures. // *Twelfth International Conference on Solid State Lighting and Fourth International Conference on White LEDs and Solid State Lighting. Proc. of SPIE*. 2012. Vol. 8484. P. 848412.
3. Барановский М. В., Глинский Г. Ф. Экспресс - диагностика светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN фотоэлектрическим методом // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 39, вып. 10. С. 22–28.
4. Карпович И. А. Фотоэлектрическая спектроскопия квантоворазмерных гетеронаноструктур In(Ga)As/GaAs, выращенных газо-фазной эпитаксией //

Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2010. №5(2). С. 233-242.

5. Перлин Е.Ю., Бондарев М.А., Иванов А.В., Попов А.А. Нелинейное фотовозбуждение гетероструктур с глубокими квантовыми ямами. I. Вероятность элементарных процессов // Оптика и спектроскопия, 2018, Том 125, № 12, с. 812-817

6. Vladimir Svrcek, Marek Kolenda, Arunas Kadys et. Al. Significant Carrier Extraction Enhancement at the Interface of an InN/p-GaN Heterojunction under Reverse Bias Voltage // Nanomaterials, 2018, 8, 1039.

7. Сергеев В.А., Васин С.В., Фролов И.В., Радаев О.А. Измерительный комплекс для диагностики качества светоизлучающих гетероструктур по фотоэлектрическому и оптическому отклику при локальном фотовозбуждении // Измерительная техника. 2018. №9. С. 49-53.

8. Радаев О.А., Фролов И.В., Сергеев В.А. Диагностика светоизлучающих гетероструктур методом фотоэлектрической сканирующей спектроскопии // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения : Материалы Международной научно-технической конференции (Москва, 19 – 23 ноября 2018 г.) ИНТЕРМАТИК-2018. Ч. 5. М.: МИРЭА, 2018. С. 1163-1166.

9. Сергеев В.А., Фролов И.В., Радаев О. А. О связи уровня фототока светоизлучающих InGaN/GaN гетероструктур с уровнем НЧ-шума и порогового тока // Известия вузов. Электроника. 2019. №1. С. 49-53.

10. Сергеев В.А., Фролов И.В., Широков А.А., Радаев О.А. Диагностика зеленых InGaN светодиодов по параметрам фототока и фотоэдс // Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы: тезисы докладов 11-й Всероссийской конференции (1-3 февраля 2017 год, Москва). М. : МГУ, 2017. С. 92–93.

**Для цитирования:**

В. А. Сергеев, И. В. Фролов, О. А. Радаев. Связь параметров фототока светодиодов на основе GaN гетероструктур с изменением их характеристик при термотоковых испытаниях. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar19/2/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.3.2