

ELECTRONIC AND ELECTRICAL ENGINEERING

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.317.7

В.А. Сергеев, С.В. Васин, О.А. Радаев, И.В. Фролов

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ДИАГНОСТИКИ КАЧЕСТВА СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТКЛИКА¹

Сергеев Вячеслав Андреевич, доктор технических наук, доцент, окончил физический факультет Горьковского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, заведующий базовой кафедрой «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» Ульяновского государственного технического университета. Имеет монографии, статьи и изобретения в области исследования характеристик полупроводниковых приборов и интегральных схем, измерения их тепловых параметров. [e-mail: sva@ulstu.ru].

Васин Сергей Вячеславович, кандидат физико-математических наук, окончил физико-технический факультет Ульяновского филиала Московского государственного университета. Старший научный сотрудник УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Доцент кафедры «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» УлГТУ. Имеет статьи в области волоконной оптики, методов контроля параметров полупроводников и полупроводниковых приборов. [e-mail: s.vasin@outlook.com].

Радаев Олег Александрович, окончил радиотехнический факультет УлГТУ. Младший научный сотрудник УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, аспирант базовой кафедры «Радиотехника, опто- и наноэлектроника» УлГТУ. Имеет публикации в области разработки автоматизированных средств измерения параметров полупроводниковых приборов. [e-mail: oleg.radaev.91@mail.ru].

Фролов Илья Владимирович, кандидат технических наук, окончил радиотехнический факультет УлГТУ. Старший научный сотрудник УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Имеет публикации в области методов и средств неразрушающего контроля полупроводниковых приборов. [e-mail: ilya-frolov88@mail.ru].

Аннотация

Рассмотрены структурная схема и принцип действия автоматизированной установки для диагностики латеральной однородности светоизлучающих гетероструктур с квантовыми ямами (ГКЯ) путем измерения и анализа фотоэлектрического отклика (фотоэдс или фототока) при их локальном динамическом фотовозбуждении узкополосным оптическим излучением видимого диапазона. В установке предусмотрена возможность выбора гармонической или импульсной модуляции интенсивности излучения засветки с регулировкой параметров модуляции. Электронно-механическая и оптическая системы позиционирования, управляемые микроконтроллером, обеспечивают засветку локальной области ГКЯ с минимальным диаметром пятна 30 мкм и точностью позиционирования ± 10 мкм. Модуль сбора данных LA-n1USB преобразует сигнал фотоотклика в цифровой сигнал и передает его в компьютер для последующей обработки. Результаты апробации метода и установки на InGaN/GaN светодиодах в статическом режиме подтверждают наличие неоднород-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта №16-47-732159 p_офи_м.

ностей в распределении фототока по поверхности кристалла светодиода. Разработанный метод и установка могут быть использованы для диагностики качества как светоизлучающих ГКЯ, так и других классов полупроводниковых приборов с р-п-переходами: транзисторов, солнечных элементов, фотодиодов и т. д.

Ключевые слова: светоизлучающие гетероструктуры, диагностика качества, автоматизированная установка, латеральная неоднородность, локальное фотовозбуждение, фотоэлектрический отклик.

AUTOMATED INSTALLATION OF DIAGNOSTICS OF QUALITY OF LIGHT-EMITTING HETEROSTRUCTURES BY THE METHOD OF DYNAMIC PHOTOELECTRIC RESPONSE

Viacheslav Andreevich Sergeev, Doctor of Engineering, Associate Professor; graduated from the Faculty of Physics of Gorky State Technical University; Director of the Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; Head of the Basic Department of Radioengineering, Opto- and Nanoelectronics of Ulyanovsk State Technical University; an author of monographs, papers, and inventions in the field of modelling and researching semiconductor devices and integrated circuits parameters and measure of its thermal parameters. e-mail: sva@ulstu.ru.

Sergei Viacheslavovich Vasin, Candidate of Physics and Mathematics; graduated from Physics and Technology Faculty of the Ulyanovsk Branch of Moscow State University; Senior Scientist at the Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor at the Department of Radioengineering, Opto- and Nanoelectronics of Ulyanovsk State Technical University; an author of papers in the field of fibre optics, methods of inspection of semiconductors and semiconductor devices. e-mail: s.vasin@outlook.com.

Oleg Aleksandrovich Radaev, graduated from the Faculty of Radioengineering of the Ulyanovsk State Technical University; Junior Scientist at the Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; Postgraduate Student at Ulyanovsk State Technical University; an author of papers in the field of development of automated measurement tools for semiconductor devices parameters. e-mail: oleg.radaev.91@mail.ru.

Ilya Vladimirovich Frolov, Candidate of Engineering; graduated from the Faculty of Radioengineering of the Ulyanovsk State Technical University; Senior Scientist at the Ulyanovsk Branch of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences; an author of papers in the field of methods and means of nondestructive inspection for semiconductor devices. e-mail: ilya-frolov88@mail.ru.

Abstract

The block diagram and the principle of action of the automated installation for diagnostics of lateral uniformity of light-emitting heterostructures with quantum walls by measurement and the analysis of a photoelectric response (photovoltage or a photocurrent) are considered at their local dynamic photoexcitation the narrow-band optical radiation of a visible band. The possibility of the choice of harmonic or pulse modulation of counting rate of a flare with adjustment of parameters of modulation is provided in the installation. The electronic-mechanical and optical systems of positioning operated by the microcontroller provide a flare of the heterostructures with quantum walls local area with a minimum diameter of spot of 30 microns and accuracy of positioning ± 10 microns. The data acquisition module LA-N1USB transforms a photoresponse signal to a digital signal and transfers it to the computer for processing. Results of approbation of a method and installation on InGaN/GaN light-emitting diodes in the static mode confirm existence of inhomogeneities in distribution of a photoelectric on a light-emitting diode crystal surface. The developed method and installation can be used for diagnostics of quality of both light-emitting heterostructures with quantum walls, and other classes of semiconductor devices with p-n transitions: transistors, solar elements, photo diodes, etc.

Key words: light-emitting heterostructures, quality diagnostics, automated installation, lateral heterogeneity, local photoexcitement, photoelectric response.

ВВЕДЕНИЕ

Светоизлучающие и лазерные диоды на основе гетероструктур в настоящее время широко и активно используются в качестве надежных и энергоэффективных источников оптического излучения в различных системах освещения, в системах передачи информации, в приборостроении, в разнообразных технологических процессах и т. д. В последние годы ключевыми объектами исследований и разработок в физике, технике и технологии полупроводниковых светоизлучающих приборов остаются светоизлучающие и лазерные диоды на основе InGaN/GaN и AlGaIn/GaN гетероструктур с квантовыми ямами (ГКЯ). Совершенствование характеристик и технологии производства этих объектов в значительной мере определяется развитием методов диагностики качества ГКЯ. Задача диагностики светоизлучающих ГКЯ заключается в определении энергетического спектра квантовых ям (КЯ), толщины КЯ и барьерных слоев, времен жизни неравновесных носителей в КЯ и области пространственного заряда гетероперехода в отношении различных каналов рекомбинации и эмиссии носителей, профиля интерфейса гетерограниц, плотности и видов дефектов и т. д. Эти параметры определяют не только энергетическую эффективность светодиодов, но их ресурс и надежность в условиях эксплуатации.

Для диагностики ГКЯ широко применяются различные оптические, фотоэлектронные и электронные методы: спектроскопия оптического поглощения, фото- и катодолуминесценция, шумовая и импедансная спектроскопия, регистрация пороговых токов [1–3] и т. д. Информативными и легко реализуемыми являются методы и средства фотоэлектрической диагностики [4–7], основанные на регистрации интегрального фотоэлектрического отклика структуры на квазистационарное фотовозбуждение. Указанные методы, однако, не позволяют оценить локальные динамические параметры ГКЯ, их структурное несовершенство.

В настоящей работе рассмотрен метод динамической фотоэлектрической диагностики светоизлучающих ГКЯ при локальном фотовозбуждении. 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. Однако до настоящего времени не были разработаны экспериментальные установки, реализующие указанный метод с возможностью автоматического сканирования по поверхности, управления параметрами фотовозбуждения и регистрации сигнала фотоотклика.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Метод динамического фотоэлектрического отклика с локальным фотовозбуждением ГКЯ заключается в формировании лазерным диодом, оптической системой и схемой управления модулированного сфокусированного оптического излучения с энергией фотонов, превышающих ширину запрещенной зоны КЯ. Неравновесные носители за-

ряда, возникающие в КЯ в результате фотовозбуждения, рекомбинируют либо напрямую (зона-зона), либо через энергетические уровни дефектов (ловушки). Межзонная излучательная рекомбинация в КЯ наблюдается в явлении фотолюминесценции, на котором основаны известные оптические методы исследования энергетического спектра КЯ. Следует отметить, что методы фотолюминесценции довольно сложны при реализации и не дают хорошего разрешения при комнатных температурах.

Электроны и дырки, обладающие достаточной кинетической энергией, будут также выбрасываться из КЯ в область барьерных слоев. Эмиссия электронов и дырок из КЯ будет приводить к возникновению фотоэлектрических эффектов, если в матрице, в которую встроена КЯ, на расстоянии меньшем или порядка длины диффузии носителей заряда имеется р-п-переход, что и реализуется в светоизлучающих ГКЯ. Разделение электронно-дырочных пар, эмиттированных из КЯ и достигших р-п-перехода, в электрическом поле области пространственного заряда (ОПЗ) гетероперехода приводит к появлению вполне измеряемой фотоэдс (при разорванной цепи) или фототока даже при наличии всего одной КЯ.

Интенсивность эмиссии электронно-дырочных пар из КЯ определяется глубиной ямы и распределением носителей заряда в КЯ по энергии, что в свою очередь в InGaIn/GaN и AlGaIn/GaN ГКЯ определяется процентным содержанием In и Al в твердых растворах InGaIn и AlGaIn, соответственно. Во многих работах [8, 9] методами электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, «маппинга» фотолюминесценции показано, что In и Al в наноразмерных слоях КЯ распределяются неравномерно, причем характерные размеры неоднородности превышают диффузионную длину носителей заряда в КЯ. Указанные неоднородности должны проявляться в характеристиках фотоэлектрического эффекта при локальном фотовозбуждении.

Для локального фотовозбуждения образца модулированное оптическое излучение необходимо сфокусировать на поверхности структуры с помощью линз и объективов, а сканирование осуществлять путем перемещения образца прецизионной XYZ-подвижкой. Интенсивность излучения лазера легко модулируется электрическими методами. Для регистрации фотоэлектрического отклика можно использовать стандартные средства измерения, с последующей оцифровкой сигнала платой сбора данных и передачей в компьютер.

ОПИСАНИЕ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ УСТАНОВКИ

Структурная схема установки, реализующей описанный выше метод фотоэлектрической диагностики, представлена на рисунке 1. Управление аппаратной частью установки осуществляется компьютером через последовательный интерфейс RS232. При запуске измерительного цикла микроконтроллер формирует стробирующие импульсы синхронизации, которые поступают на вход блока формирования модуляции (импульсной и гармонической) интенсивности излучения лазерного диода Sony

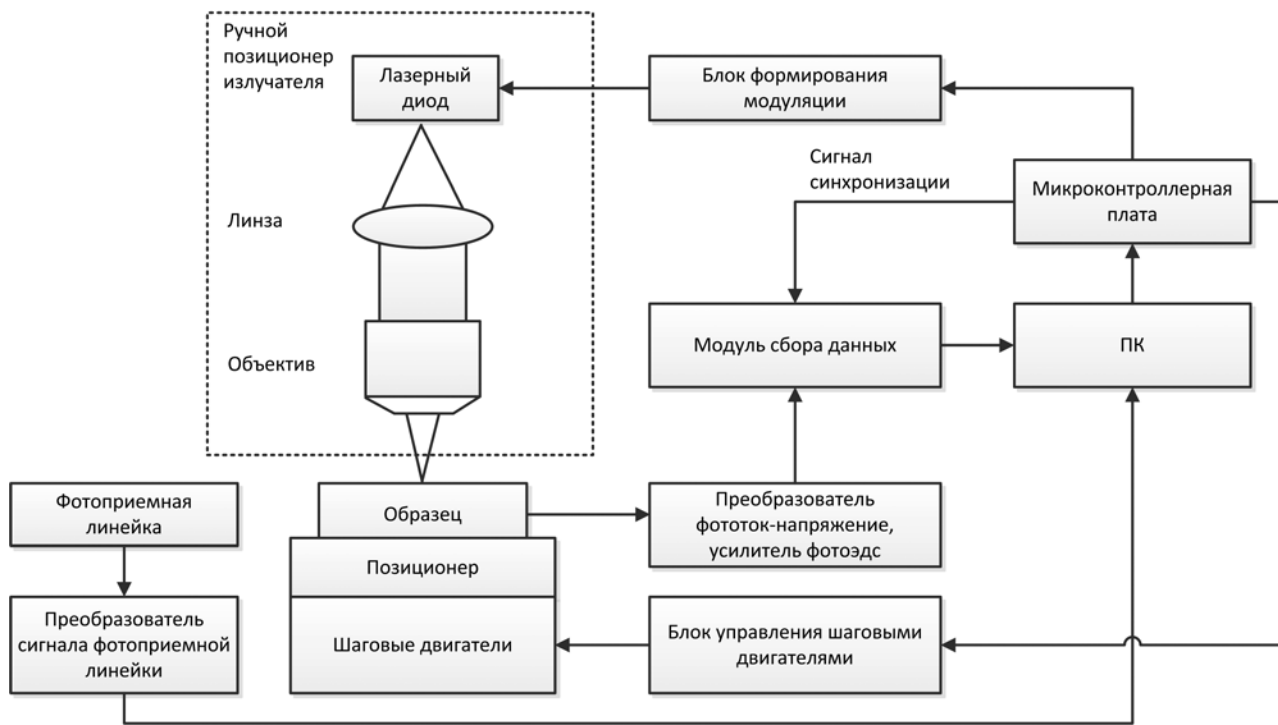


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной установки

SLD3232VF. Модуляция интенсивности излучения лазера может осуществляться как сигналом микроконтроллера, так и сигналом от внешнего генератора.

Сфокусированное линзой и объективом излучение лазерного диода попадает на поверхность исследуемого образца, который закреплен на XYZ-позиционере. Позиционер-подвижка позволяет перемещать исследуемый объект в плоскости XY в диапазоне 10×10 мм с шагом 10 мкм автоматически с помощью шаговых двигателей, управляемых микроконтроллером.

Для определения диаметра пучка излучатель с помощью ручного поворотного механизма отклоняется таким образом, чтобы оптический сигнал попал на центр ПЗС-матрицы CCD-камеры. Сигнал с выхода камеры по USB-интерфейсу передается в компьютер, где программно осуществляется измерение диаметра пучка.

Для преобразования фототока в напряжение используется трансимпедансный усилитель-преобразователь, построенный на операционном усилителе (ОУ) OPA656. Это «rail-to-rail» широкополосный ОУ фирмы Texas Instruments с полосой единичного усиления 230 МГц. Усилитель имеет переключаемый коэффициент усиления на микросхеме ADG408, позволяющий расширять динамический диапазон преобразования. Для измерения фотоздс реализован неинвертирующий усилитель напряжения на ОУ OPA656.

При поступлении синхронизирующего сигнала с выхода микроконтроллера модуль сбора данных ЛА-n1USB осуществляет аналого-цифровое преобразование напряжения, поступающего с выхода преобразователя фототок-напряжение или с выхода усилителя фотоздс в зависимости от выбора измеряемой величины, и передает данные в оперативную память компьютера. По полученным данным

компьютерная программа строит трехмерное распределение фотоэлектрического отклика по поверхности кристалла исследуемого образца.

В основном окне программы существует возможность изменения параметров наведения оптического луча и модуляции излучения лазерного диода.

Основные технические характеристики установки:

- минимальный диаметр пучка лазерного излучения – 30 мкм;
- точность позиционирования ± 10 мкм;
- диапазон частот модуляции мощности лазерного излучения – 10 МГц.

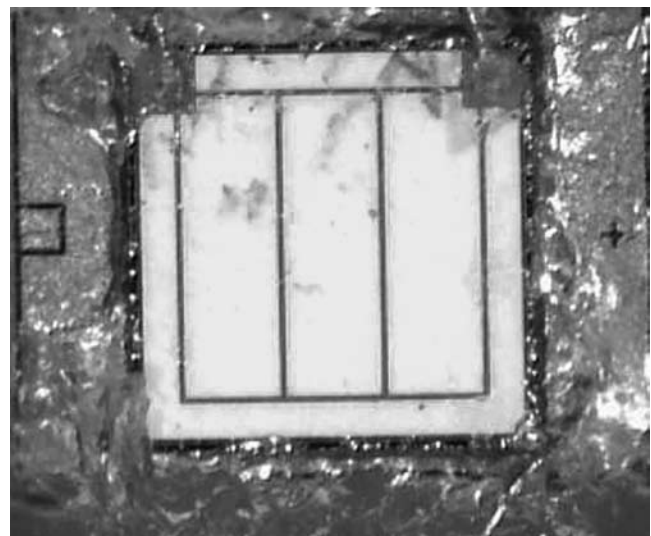


Рис. 2. Фотография поверхности кристалла светодиода Cree XREROY-L1-0000-00801

АПРОБАЦИЯ МЕТОДА

В качестве объектов исследования использовались кристаллы C450EZ1000 серийно выпускаемых мощных светодиодов Cree со светоизлучающими InGaN/GaN гетероструктурами.

На рисунке 2 представлено изображение поверхности кристалла мощного светодиода Cree XREROY-L1-0000-00801 InGaN/GaN на SiC подложке с размерами 980×980 мкм и длиной волны излучения 460 нм. Изображение получено при помощи цифрового USB-микроскопа Dino-Lite.

Результат измерения и обработки данных представлен на рисунке 3 в виде профиля распределения значений фототока по поверхности кристалла при его облучении в статическом режиме. Сканирование кристалла выполнено с шагом 50 мкм.

Следует отметить, что на профиле распределения фототока хорошо видны провалы, соответствующие дорожкам металлизации, и наблюдается неравномерное распределение фототока по площади кристалла. В качестве количественной меры оценки латеральной однородности ГКЯ светодиода может быть использована неравномерность распределения (дисперсия или среднеквадратическое отклонение) уровня сигнала фототока по площади структуры. Чем меньше разброс сигнала фототока, тем однороднее светодиодная структура.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отличие от известных установок фотоэлектрической диагностики гетероструктур, регистрирующих интегральный фотоэлектрический сигнал при фотовозбуждении всей поверхности структуры, представленная в данной статье установка позволяет оценивать структурное несовершенство и локальные параметры светоизлучающих

ГКЯ по фотоэлектрическому отклику при локальном фотовозбуждении. Результаты апробации метода и установки на InGaN/GaN светодиодах подтверждают наличие неоднородностей в распределении фотоэлектрического отклика по поверхности кристалла светодиода. Разработанный метод и установка могут быть использованы для диагностики качества не только светоизлучающих гетероструктур, но также других классов полупроводниковых приборов с p-n-переходами: транзисторов, фотодиодов, солнечных элементов и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sergeev V.A., Frolov I.V., Radaev O.A. The Relationship between the Defectness of Emitting Nanoheterostructures of Green InGaN/GaN LEDs and Their Threshold Current Values // *Technical Physics Letters*. – 2017. – Vol. 43, No. 2. – pp. 224–226.
2. Сергеев В.А., Фролов И.В., Широков А.А. Связь снижения квантовой эффективности InGaN/GaN светодиодов при испытаниях с особенностями вольт-фарадных характеристик // *Нелинейный мир*. – 2013. – № 2. – С. 90–91.
3. Оценка качества гетеропереходных светодиодов по уровню порогового тока / В.А. Сергеев, О.А. Радаев, И.В. Фролов, А.А. Черторийский // *Известия вузов. Электроника*. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 92–95.
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. 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.
6. Барановский М.В., Глинский Г.Ф., Миронова М.С. Фотоэлектрический метод диагностики гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами // *Физика и техника полупроводников*. – 2013. – № 1. – С. 60–64.
7. Исследование гетероструктур с комбинированным слоем квантовых точек/квантовой ямы In(Ga)As/GaAs и delta-слоем Mn / Е.Д. Павлова, А.П. Горшков, А.И. Бобров [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. – 2013. – Т. 47, вып. 12. – С. 1617–1620.
8. Wu Y.-R., Shivaraman R., Wang K.-C., Spek J.S. Analyzing the physical properties of InGaN multiple quantum well light emitting diodes from nano scale structure // *Applied Physics Letters*. – 2012. – V. 101. – P. 083505.
9. Gelzinyte K., Ivanov R., Marcinkevičius S. et al. High spatial uniformity of photoluminescence spectra

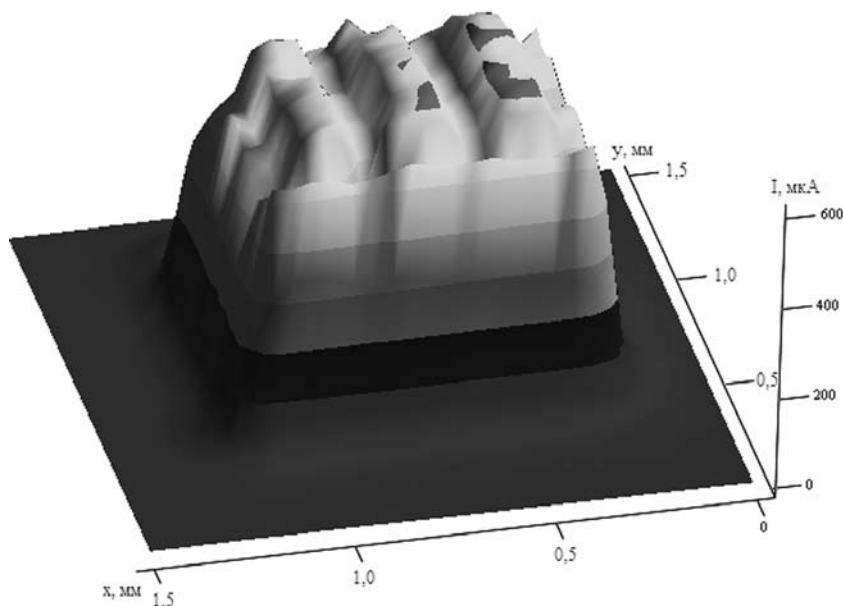


Рис. 3. Профиль распределения значения фототока по поверхности кристалла светодиода Cree XREROY-L1-0000-00801

in semipolar (2021) plane InGaN/GaN quantum wells // Journal of Applied Physics. – 2015. – V. 2. – P. 023111.

REFERENCES

1. Sergeev V.A., Frolov I.V., Radaev O.A. The Relationship between the Defectness of Emitting Nanoheterostructures of Green InGaN/GaN LEDs and Their Threshold Current Values. *Technical Physics Letters*, 2017, vol. 43, no. 2, pp. 224–226.
2. Sergeev V.A., Frolov I.V., Shirokov A.A. Sviaz snizheniia kvantovoi effektivnosti InGaN/GaN svetodiodov pri ispytaniakh s osobennostiami volt-faradnykh kharakteristik [The Dependence of InGaN/GaN LEDs Quantum Efficiency Reduce with the Features of the Volt-Farad Characteristics During Operation]. *Nelineinyi mir* [Nonlinear World Journal], 2013, no. 2, pp. 90–91.
3. Sergeev V.A., Radaev O.A., Frolov I.V., Chertoriiskii A.A. Otsenka kachestva geteroperekhodnykh svetodiodov po urovniu porogovogo toka [Estimation of Quality of Heterojunction LEDs by Threshold Current Level]. *Izvestiia vuzov. Elektronika* [Proc. of Higher Educational Institutions. Electronics Series], 2017, vol. 22, no. 1, pp. 92–95.
4. Karpovich I.A. Fotoelektricheskaiia spektroskopiiia kvantovorazmernykh geteronanostruktur In(Ga)As/GaAs, vyrashchennykh gazo-faznoi epitaksiei [Photoelectric Spectroscopy of the Quantum-Size In(Ga)As/GaAs Heteronanostructures Grown by Vapor Phase Epitaxy]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod], 2010, no. 5 (2), pp. 233–242.
5. Baranovskii M.V., Glinskii G.F. Ekspres-diagnostika svetodiodov na osnove geterostruktur InGaN/GaN fotoelektricheskim metodom [Rapid Diagnosis of Light Emitting Diodes based on InGaN/GaN Heterostructures by the Photoelectric Method]. *Pisma v ZhTF* [Applied Physics Letters], 2013, vol. 39, iss. 10, pp. 22–28.
6. Baranovskii M.V., Glinskii G.F., Mironova M.S. Fotoelektricheskii metod diagnostiki geterostruktur InGaN/GaN s mnozhestvennymi kvantovymi amami [Photoelectric Diagnostics Method for Ingan/Gan Multiple-Quantum-Well Heterostructures]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductors], 2013, no. 1, pp. 60–64.
7. Pavlova E.D., Gorshkov A.P., Bobrov A.I. et al. Issledovanie geterostruktur s kombinirovannym sloem kvantovykh toчек/kvantovoi iamy In(Ga)As/GaAs i delta-sloem Mn [Study of Heterostructures with a Combined In(Ga)As/GaAs Quantum Dot/Quantum Well Layer and a Mn δ Layer]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductors], 2013, vol. 47, iss. 12, pp. 1617–1620.
8. Wu Y.-R., Shivaraman R., Wang K.-C., Spek J.S. Analyzing the Physical Properties of InGaN Multiple Quantum Well Light Emitting Diodes from Nano Scale Structure. *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 101, pp. 083505.
9. Gelzinyte K., Ivanov R., Marcinkevičius S. et al. High Spatial Uniformity of Photoluminescence Spectra in Semipolar (2021) Plane InGaN/GaN Quantum Wells. *Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 2, pp. 023111.