

Связь уровня фототока светоизлучающих InGaN/GaN-гетероструктур с уровнем НЧ-шума и порогового тока

В.А. Сергеев^{1,2}, И.В. Фролов¹, О.А. Радаев^{1,2}

¹Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Ульяновск, Россия

²Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

sva@ulstu.ru

Надежность технических устройств с использованием InGaN/GaN-светодиодов зависит от способов и средств неразрушающего контроля их качества. Для диагностики неоднородностей характеристик светоизлучающих гетероструктур по площади используются такие параметры, как уровень низкочастотного шума и значение порогового тока начала свечения. В работе представлены выборочные распределения коммерческих светодиодов зеленого свечения на основе InGaN/GaN-гетероструктур по параметрам фототока, порогового тока начала свечения и уровня низкочастотного шума. Установлено, что между средним значением фототока, возникающего при облучении кристалла светодиода лазерным излучением с длиной волны 405 нм, уровнем низкочастотного шума, измеренным в диапазоне малых плотностей тока, и пороговым током начала свечения существуют корреляционные взаимосвязи, указывающие на связь уровня фототока с плотностью дефектов в гетероструктуре. Показано, что в InGaN/GaN-гетероструктурах зеленого свечения уровень фототока преимущественно выше в дефектных структурах.

Ключевые слова: светоизлучающие диоды; InGaN/GaN-гетероструктуры; фототок; пороговый ток; НЧ-шум

Для цитирования: Сергеев В.А., Фролов И.В., Радаев О.А. Связь уровня фототока светоизлучающих InGaN/GaN-гетероструктур с уровнем НЧ-шума и порогового тока // Изв. вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24. – № 1. – С. 92–96. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-1-92-96

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-47-732159 р_офи_м).

Relationship between Photocurrent Level of Light-Emitting InGaN/GaN Heterostructures and Level of Low-Frequency Noise and Threshold Current

V.A. Sergeev^{1,2}, I.V. Frolov¹, O.A. Radaev^{1,2}

¹*Ulyanovsk Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk, Russia*

²*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia*

sva@ulstu.ru

Abstract: The reliability of technical devices using the InGaN/GaN- light emitting diodes depends on the methods and tools of their quality non-failure control. For diagnostics of non-homogeneities in the characteristics of light-emitting heterostructures by an area, such parameters as the low-frequency noise level and the threshold current value of luminescence start are used. The sampling distributions of commercial green LEDs based on InGaN/GaN heterostructures on the parameters of photocurrent, the threshold current and the level of low-frequency noise have been presented. It has been determined that between the average value of the photocurrent arising upon irradiation of the LED chip by laser radiation with a wavelength of 405 nm, the level of the low-frequency noise, measured in the range of the low current densities and the threshold current there are correlations, which indicate to a relationship between the photocurrent level and the density of defects in the heterostructure. It has been shown that in InGaN/GaN heterostructures of green luminescence the photocurrent level is predominantly higher in the defect structures.

Keywords: light emitting diodes; InGa/GaN heterostructures; photocurrent; threshold current; low-frequency noise

For citation: Sergeev V.A., Frolov I.V., Radaev O.A. Relationship between photocurrent level of light-emitting InGaN/GaN heterostructures and level of low-frequency noise and threshold current. *Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 1, pp. 92–96. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-1-92-96

Acknowledgements: this study has been supported by Russian Foundation for Basic Research (project № 16-47-732159 p_офи_м).

С целью повышения надежности технических устройств с использованием InGaN/GaN-светодиодов активно разрабатываются способы и средства неразрушающего контроля их качества [1–3]. Для диагностики неоднородностей характеристик светоизлучающих гетероструктур по площади используются методы сканирующей ближнепольной электролюминесценции, инфракрасной микроскопии [1], мэппинг фотолуминесценции [2].

Диагностическими параметрами, связанными с однородностью светоизлучающих гетероструктур, являются также уровень низкочастотного (НЧ) шума и значение порогового тока начала свечения [4–7]. Пороговый ток характеризует потери на безызлучательную рекомбинацию в системе дефектов, пронизывающих активную область светодиода. Следовательно, значения порогового тока могут быть использованы для оценки качества светоизлучающей гетероструктуры. В работах [6, 7] показано, что значения порогового тока коррелируют со значениями тока, при котором отмечается максимум токовой зависимости внешней квантовой эффективности светодиода, а при испытаниях в режиме постоянного тока светодиоды с большими значениями порогового тока деградируют быстрее, чем светодиоды с малыми значениями порогового тока.

Информативным и легко реализуемым является метод фотоэлектрической диагностики, основанный на регистрации фотоэлектрического отклика структуры на фотовозбуждение. Для диагностики однородности светоизлучающих гетероструктур фотоэлектрическим методом при локальном фотовозбуждении в статическом и динамическом режимах разработан измерительный комплекс [8]. Он позволяет выполнять сканирование рабочей поверхности гетероструктуры с шагом до 10 мкм при облучении объекта оптическим пятном лазерного излучения с длиной волны 405 нм, диаметром 10 мкм в стационарном режиме и в режиме импульсной или гармонической модуляции интенсивности фотовозбуждения [9].

Для выявления связей указанных диагностических параметров рассмотрены выборочные распределения светодиодов XREGRN-L1-0000-00P01 зеленого свечения по этим параметрам. Светодиоды этого типа изготовлены на основе кристаллов EZ1000 размером 980×980 мкм с InGaN/GaN-гетероструктурой.

В табл.1 приведены средние значения фототока $I_{\text{ср.ф}}$ и его среднеквадратическое отклонение σ , измеренные в центре кристалла на участке размером 200×200 мкм при сканировании с шагом 10 мкм и плотности мощности засветки $5 \cdot 10^4$ Вт/см², а также значения спектральной плотности мощности НЧ-шума S_f , измеренные на частоте 1 кГц в полосе 36 дБ/окт. при токах 0,1; 1,0; 10 мА, и значения порогового тока $I_{\text{пор}}$. В табл.2 представлены значения коэффициентов корреляции между фототоком, пороговым током и уровнем НЧ-шума.

Таблица 1

Диагностические параметры InGaN/GaN-гетероструктур

Table 1

Diagnostic parameters of InGaN/GaN heterostructures

Параметр	Номер образца									
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
$I_{\text{ср.ф}}$, мкА	28,3	30,6	38,9	31,2	30,7	34,1	29,4	27,9	27,1	20,6
σ , мкА	0,426	0,546	0,682	0,45	0,583	0,7	0,423	0,492	0,512	0,868
$S_f(0,1 \text{ мА})$, А ² /Гц	0,670	0,735	0,802	0,649	1,129	0,922	0,229	0,229	0,373	0,342
$S_f(1,0 \text{ мА})$, А ² /Гц	12,5	11,6	14,4	16,4	12,5	21,9	2,3	2,3	2,3	4,1
$S_f(10 \text{ мА})$, А ² /Гц	138	61	95	50	58	116	22	17	23	28
$I_{\text{пор}}$, нА	1125	2520	4005	1485	3060	4410	1530	1620	2160	1035

Таблица 2

Коэффициенты корреляции диагностических параметров

Table 2

Correlation coefficients of diagnostic parameters

Параметр	Пороговый ток $I_{\text{пор}}$	НЧ-шум при 200 мкА	Фототок $I_{\text{ср.ф}}$
Пороговый ток $I_{\text{пор}}$	1	0,79	0,78
НЧ-шум S_f при 200 мкА	0,79	1	0,65
Фототок $I_{\text{ср.ф}}$	0,78	0,65	1

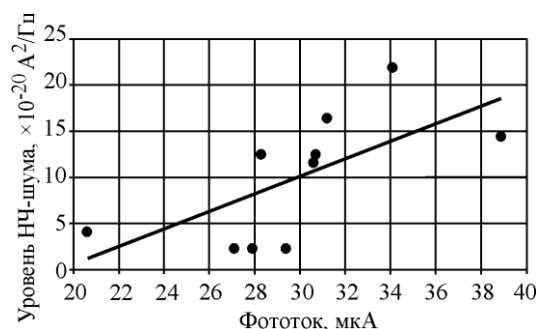


Рис.1. Корреляционное поле между средним значением фототока и уровнем НЧ-шума при токе 1 мА (коэффициент корреляции 0,65)

Fig.1. Correlation field between the mean value of the photocurrent and the level of low-frequency noise at a current of 1 mA (correlation coefficient is 0.65)

Как следует из табл.2, между измеренными диагностическими параметрами исследуемых гетероструктур отмечается достаточно сильная корреляционная связь. Значительная корреляция уровня фототока с пороговым током (0,78) указывает на связь уровня фототока с плотностью дефектов в гетероструктуре. Коэффициент корреляции между средним значением фототока и уровнем НЧ-шума светодиодов составляет 0,65. График корреляционного поля между фототоком и уровнем НЧ-шума, измеренным при токе 1 мА, представлен на рис.1.

Между уровнем НЧ-шума и пороговым током также наблюдается корреляционная связь, которая в режиме малых плотностей тока значительно больше, чем в режиме больших токов,

поскольку в режиме малых токов генерационно-рекомбинационные процессы на дефектных уровнях сильнее влияют на флуктуации тока (рис.2).

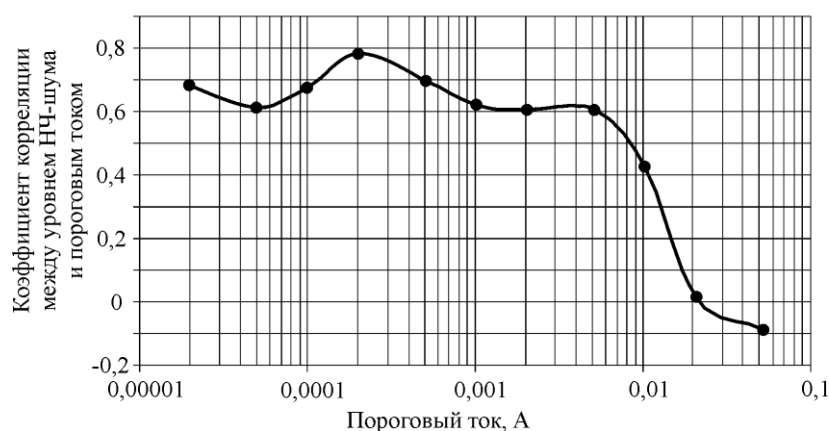


Рис.2. Токовая зависимость коэффициента корреляции между уровнем НЧ-шума и значением порогового тока

Fig.2. Current dependence of the correlation coefficient between the level of low-frequency noise and the value of the threshold current

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в InGaN/GaN-гетероструктурах зеленого свечения уровень фототока преимущественно выше в дефектных структурах, что может быть объяснено большим коэффициентом поглощения света в таких структурах и генерацией электронно-дырочных пар с дефектных уровней.

Литература

1. Spatially resolved imaging of the spectral emission characteristic of an InGaN/GaN-multi quantum well-light-emitting diode by scanning electroluminescence microscopy / **P. Fischer, J. Christen, M. Zacharias et al.** // Japanese J. of Applied Physics. – 2000. – Vol. 39. – No. 4 B. – P. 2414–2416.
2. High spatial uniformity of photoluminescence spectra in semipolar 2021 plane InGaN/GaN quantum wells / **K. Gelzinyte, R. Ivanov, S. Marcinkevičius et al.** // J. of Applied Physics. – 2015. – Vol. 117. – P. 023111-1–023111-9.
3. Characterization of the deep levels responsible for non-radiative recombination in InGaN/GaN light-emitting diodes / **M. Meneghini, M. la Grassa, S. Vaccari et al.** // Applied Physics Letters. – 2014. – Vol. 104. – P. 113505-1–113505-4.
4. **Шуберт Ф.** Светодиоды: пер. с англ. под ред. А. Э. Юновича. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
5. **Sergeev V.A., Frolov I.V., Shirokov A.A.** Double stage low-frequency noise equivalent circuit of green InGaN LEDs for description of noise characteristics // Russian Microelectronics. – 2016. – No. 7. – P. 498–503.
6. **Сергеев В.А., Фролов И.В., Радаев О.А.** Исследование связи степени дефектности светоизлучающих наногетероструктур зеленых InGaN/GaN светодиодов с величиной порогового тока // Письма в ЖТФ. – 2017. – №4. – С. 89–93.
7. **Сергеев В.А., Фролов И.В., Радаев О.А., Черторийский А.А.** Оценка качества гетеропереходных светодиодов по уровню порогового тока // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – №1. – С. 92–95.
8. **Сергеев В.А., Васин С.В., Радаев О.А., Фролов И.В.** Автоматизированная установка диагностики качества светоизлучающих гетероструктур методом динамического фотоэлектрического отклика // Автоматизация процессов управления. – 2017. – №2. – С. 92–97.
9. **Sergeev V.A., Vasin S.V., Radaev O.A., Frolov I.V.** Measuring complex for registering photoelectric response of LED heterostructures under local photoexcitation // 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT): Proceedings (Moscow, Russia, March 14–16, 2018). – 2018. DOI:10.1109/MWENT.2018.8337210

Поступило в редакцию 27.04.2018 г.; после доработки 27.04.2018 г.; принято к публикации 27.11.2018 г.

Сергеев Вячеслав Андреевич – доктор технических наук, профессор, директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 48/2), заведующий базовой кафедрой радиотехники, опто- и нанoeлектроники Ульяновского государственного технического университета (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д.32), sva@ulstu.ru

Фролов Илья Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д.48/2), ilya-frolov88@mail.ru

Радаев Олег Александрович – младший научный сотрудник Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д.48/2), аспирант кафедры радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульяновского государственного технического университета (Россия, 4320027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д.32), oleg.radaev.91@mail.ru

References

1. Fischer P., Christen J., Zacharias M. et al. Spatially resolved imaging of the spectral emission characteristic of an InGaN/GaN-multi quantum well-light-emitting diode by scanning electroluminescence microscopy. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2000, vol. 39, no. 4 B, pp. 2414–2416.
2. 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. 117, p. 023111-1–023111-9.
3. Meneghini M., La Grassa M., Vaccari S. et al. Characterization of the deep levels responsible for non-radiative recombination in InGaN/GaN light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*, 2014, vol. 104, pp. 113505-1–113505-4.
4. Schubert E.F. *Light Emitting Diodes*. Cambridge University Press. 2006, 496 p.
5. Sergeev V.A., Frolov I.V., Shirokov A.A. Double Stage Low-Frequency Noise Equivalent Circuit of Green InGaN LEDs for Description of Noise Characteristics. *Russian Microelectronics*, 2016, vol. 45, no. 7, pp. 498–503.
6. 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.
7. Sergeev V.A., Frolov I.V., Radaev O.A., Chertoriysky A.A. Estimation of the quality of heterojunction light-emitting diodes by threshold current level. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2017, vol. 22, no. 1, pp. 92–95. (in Russian).
8. Sergeev V.A., Vasin S.V., Radaev O.A., Frolov I.V. Automated installation of diagnostics of quality of light-emitting heterostructures by dynamic photoelectric response. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya = Automation of control processes*, 2017, no. 2, pp. 92–97. (in Russian).
9. Sergeev V.A., Vasin S.V., Radaev O.A., Frolov I.V. Measuring complex for registering photoelectric response of LED heterostructures under local photoexcitation. *2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. *Proceedings*. Moscow, 2018. IEEE Xplore Digital Library. DOI:10.1109/MWENT.2018.8337210

Received 27.04.2018; Revised 27.04.2018; Accepted 27.11.2018.

Information about the authors:

Vyacheslav A. Sergeev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharov str., 48/2), Head of the Radioengineering, Opto- and Nanoelectronics Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venetz str., 32), sva@ulstu.ru

Ilya V. Frolov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher, Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharov str., 48/2), ilya-frolov 88@mail.ru

Oleg A. Radaev – Junior Scientific Researcher, Ulyanovsk Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharov str., 48/2), PhD student of the Radioengineering, Opto- and Nanoelectronics Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432027, Ulyanovsk, Severny Venetz str., 32), oleg.radaev.91@mail.ru