

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-09-37-44

УДК 535-3, 53.096, 538.935

Преобразование оптических и шумовых характеристик ультрафиолетовых светодиодов на установке с широким температурным диапазоном измерения от -196 до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Александр Михайлович Иванов^{1✉}, Александр Викторович Клочков²

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

¹alexandr.ivanov@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0003-4824-0364>

²alex.klo@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0002-2931-4607>

Аннотация

Предмет исследования. Температурные изменения основных оптических и шумовых характеристик ультрафиолетовых промышленных InGaN/GaN-светодиодов в широком температурном интервале от -196 до $84\text{ }^{\circ}\text{C}$. **Цель работы.** Проверка работоспособности ультрафиолетовых индикаторных светодиодов в температурных условиях, отличных от обычных — комнатных, определения относительных изменений основных оптических характеристик и характеристик надежности, а также обсуждение возможных физических механизмов, ответственных за наблюдаемые изменения. **Метод.** Сконструированная для температурных измерений от -196 до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ измерительная камера использует платиновый датчик температуры с полиномиальной аппроксимацией (от -200 до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Измерения шумовых характеристик проводились аналого-цифровым преобразователем STC-H246 Камертон, собственный уровень шума которого 1 мкВ . **Основные результаты.** Установлено, что нагрев улучшает оптические характеристики ультрафиолетовых InGaN/GaN-светодиодов: плотность низкочастотного шума практически не растет и только при номинальных токах (20 мА) увеличивается до 2 раз ($40, 84\text{ }^{\circ}\text{C}$). Этот результат расходится с традиционными представлениями о характеристиках полупроводниковых оптоэлектронных приборов при их нагреве. Предлагаемые объяснения строятся на рассмотрении особенностей транспорта носителей с привлечением механизма туннелирования носителей по дефектам и «хвостам» плотности состояний в барьерах к квантовым ямам (не используемого для этого другими авторами). При охлаждении ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) плотность низкочастотного токового шума растет, а внешняя квантовая эффективность при номинальном токе уменьшается в 1,6 раза, что также отличается от обычного видения. **Практическая значимость.** С прикладной точки зрения результаты работы представляют практический интерес для разработки и совершенствования технологии ультрафиолетовых светоизлучающих приборов на основе структур InGaN/GaN с квантовыми ямами, оценки их надежности и сроков службы, а также для разработчиков электронной аппаратуры (использующих эти элементы) при применениях в особых климатических условиях, так как возникает возможность использования в более широком диапазоне рабочих токов и температур.

Ключевые слова: ультрафиолетовые светодиоды, температурные измерения, оптическая мощность, квантовая эффективность, шум, туннелирование по дефектам

Ссылка для цитирования: Иванов А.М., Клочков А.В. Преобразование оптических и шумовых характеристик ультрафиолетовых светодиодов на установке с широким температурным диапазоном измерения от -196 до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 9. С. 37–44. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-09-37-44>

Коды OCIS: 230.3670, 230.5590, 230.0250

Conversion of the optical and noise characteristics of ultraviolet light-emitting diodes on a setup with a wide temperature measurement range from -196 to $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

ALEKSANDR M. IVANOV¹✉, ALEKSANDR V. KLOCHKOV²

Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

¹alexandr.ivanov@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0003-4824-0364>

²alex.klo@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0002-2931-4607>

Abstract

Subject of study. Temperature changes in the main optical and noise characteristics of ultraviolet InGaN/GaN industrial light-emitting diodes in a wide temperature range from -196 to $84\text{ }^{\circ}\text{C}$. **Aim of study.** Checking the operability of ultraviolet indicator light-emitting diodes under temperature conditions other than normal — room temperature, determination of relative changes in the main optical characteristics and reliability characteristics, discussion of possible physical mechanisms responsible for the observed changes. **Method.** Designed for temperature measurements from -196 to $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, the measuring chamber uses a platinum temperature sensor with a polynomial approximation (from -200 to $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Noise characteristics were carried out by an STC-H246 Tuning-fork analog-to-digital converter, intrinsic noise level $1\text{ }\mu\text{V}$. **Main results.** It has been found that heating improves the optical characteristics of ultraviolet InGaN/GaN light-emitting diodes; the density of low-frequency noise practically does not increase and only at nominal currents (20 mA) increase up to two times ($40, 84\text{ }^{\circ}\text{C}$). This result diverges with the traditional ideas about the characteristics of semiconductor optoelectronic devices when they are heated. The proposed explanations are based on consideration of the features of carrier transport, with the involvement of the mechanism of carrier tunneling through defects and “tails” of the density of states in barriers to quantum wells (not used for this by other authors). Upon cooling ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), the density of low-frequency current noise increases, and the external quantum efficiency at the nominal current decreases by a factor of 1,6, which also differs from ordinary vision. **Practical significance.** From the applied point of view, the results of the work are of practical interest for the development and improvement of the technology of ultraviolet light-emitting devices based on structures with InGaN/GaN quantum wells, estimation of their reliability and service life; as well as for electronic equipment designers (using these elements) for applications in special climatic conditions, as it becomes possible to use in a wider range of operating currents and temperatures.

Keywords: ultraviolet light-emitting diodes, temperature measurements, optical power, quantum efficiency, noise, defect tunneling

For citation: Ivanov A.M., Klochkov A.V. Conversion of the optical and noise characteristics of ultraviolet light-emitting diodes on a setup with a wide temperature measurement range from -196 to $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 9. P. 37–44. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-09-37-44>

OCIS codes: 230.3670, 230.5590, 230.0250

Исследования, направленные на изучение оптических характеристик оптоэлектронных приборов видимого [1, 2] и ультрафиолетового (УФ) [3–5] диапазонов излучений и физических механизмов, ответственных за их изменения, представляют научный интерес в связи с возможностями улучшения их характеристик, увеличения надежности и долговечности полупроводниковых светодиодов и лазеров, совершенствования технологии их изготовления.

Среди них несколько меньшее внимание уделяется вопросам работы этих приборов при температурах, отличных от комнатной [6–8]. Падение люминисценции и внешней квантовой эффективности при возрастании температуры наблюдалось ранее в температурных диапазонах $280\text{--}360\text{ K}$ [6, 9] для УФ и более широком $300\text{--}500\text{ K}$ [10] для синих светодиодов, а рост — с понижением температуры от 300 до 160 K [11].

Предполагается, что с понижением температуры происходит возрастание мощности излучения (в светодиодах из-за увеличения вероятности излучательной рекомбинации электронов и дырок [12]), снижение шума и замедление деградации светоизлучающих полупроводниковых приборов.

В настоящее время важными представляются конструкторские и технологические решения, направленные на совершенствование УФ светодиодов и лазеров на основе структур InGaN/GaN и AlGaIn/GaN. Светодиодные и лазерные структуры с квантовыми ямами (КЯ) на базе нитридных материалов в этом диапазоне излучений применяются в здравоохранении, промышленном производстве, сельском хозяйстве, санитарии, биологии, криминалистике, банковском деле, косметологии и др. Оптоэлектронные приборы этого диапазона излучений используются для стерилизации воздуха и воды [13], в системах связи, в твердотельных источниках освещения [6]. Так как УФ InGaN/GaN-светодиоды с КЯ обладают меньшими сроками службы по сравнению со светодиодами видимого диапазона излучений, проверка стабильности выходных характеристик и неизменности параметров излучения (в меняющихся условиях окружающей среды) важны, особенно при использовании в медицине и в технологических процессах промышленного производства.

Шумовые характеристики полупроводниковых оптоэлектронных приборов крайне существенны для оценки их надежности и сроков службы [14, 15], что немаловажно при их использовании в условиях, отличных от обычных — комнатных. Измерение характеристик плотности низкочастотного шума, определения механизмов транспорта носителей и возникновения избыточных шумов представляют необходимую информацию для совершенствования конструирования и производства оптоэлектронных приборов. Изменения мощности, спектральной плотности, состава исследуемых шумов связаны с процессами возникновения, перезарядки и трансформации спектра дефектов в светоизлучающих приборах при их эксплуатации.

Целью работы являются проверка работоспособности ультрафиолетовых промышленных светодиодов в температурных условиях, отличных от обычных — комнатных, опре-

деления относительных изменений основных оптических характеристик и характеристик надежности, а также обсуждение возможных физических механизмов, ответственных за наблюдаемые изменения.

Проведенные измерения внешней квантовой эффективности и низкочастотного шума в диапазоне частот до 7300 Гц показали возможность улучшения характеристик УФ светодиодов при повышенных температурах и токах, меньших 1 мА. При температуре жидкого азота характеристики приборов существенно ухудшаются.

В работе проанализированы возможные причины температурных изменений оптических параметров, механизмов транспорта носителей и формирования низкочастотного шума.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследования сравнительных характеристик УФ светодиодов выполнены на промышленных индикаторных светодиодах на основе структур InGaN/GaN с КЯ фирмы *Nichia* (NSPU510CS, пиковая энергия излучения активной области $h\nu_{QW} = 3,31$ эВ, длина волны $\lambda = 375$ нм, мощность излучения 8200 мкВт) и фирмы *G-NOR OPTOELECTRONICS* (GNL-3014VC, $h\nu_{QW} = 3,1$ эВ, $\lambda = 400$ нм, сила света 100 мкд) с номинальными токами 20 мА. Активная площадь светодиодов составляет примерно 10^{-3} см². В тексте статьи УФ светодиоды NSPU510CS и GNL-3014VC обозначены как светодиоды X и Y соответственно.

Сконструированная для температурных измерений камера, позволяющая выполнять в едином цикле измерения от -196 до 100 °C, включает цельно выточенный столик с основанием для крепления светодиодов. Платиновый датчик температуры NB-PTCO-381 (применим от -200 до $+200$ °C) располагается в столике. Температурная зависимость сопротивления датчика аппроксимируется полиномами для отрицательных и положительных температур. Жестко фиксированный относительно светодиода кремниевый фотодиод ФД-7К применяется для измерения только относительных изменений оптической мощности (фототока) и внешней квантовой эффективности. Для нагрева светодиодов на обратной стороне основания установлен резистор с радиатором.

Цифровой амперметр ЦЗ300 фиксирует фототок в режиме короткого замыкания. Для подачи прямого смещения и питания нагрева-

тельного элемента используется лабораторный блок питания GPS-4303 с четырьмя выходными каналами. Чувствительность высокоточного мультиметра Keysight (Agilent) 34401A позволяет измерять токи в наноамперном диапазоне.

Для измерения шумовых характеристик при пропускании постоянного тока через светодиод зависимость флуктуаций напряжения в полосе частот 7,3 кГц на последовательном сопротивлении 100 Ом фиксируется аналого-цифровым преобразователем (STC-H246 Камер-

тон, разработан Центром речевых технологий, собственный уровень шума 1 мкВ). В эксперименте в компьютер записывались 2×10^6 выборок с частотой дискретизации 16 кГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1а представлены результаты измерения оптической мощности (фототока) I_{ph} УФ светодиода X в зависимости от тока I при прямом смещении в логарифмическом масштабе

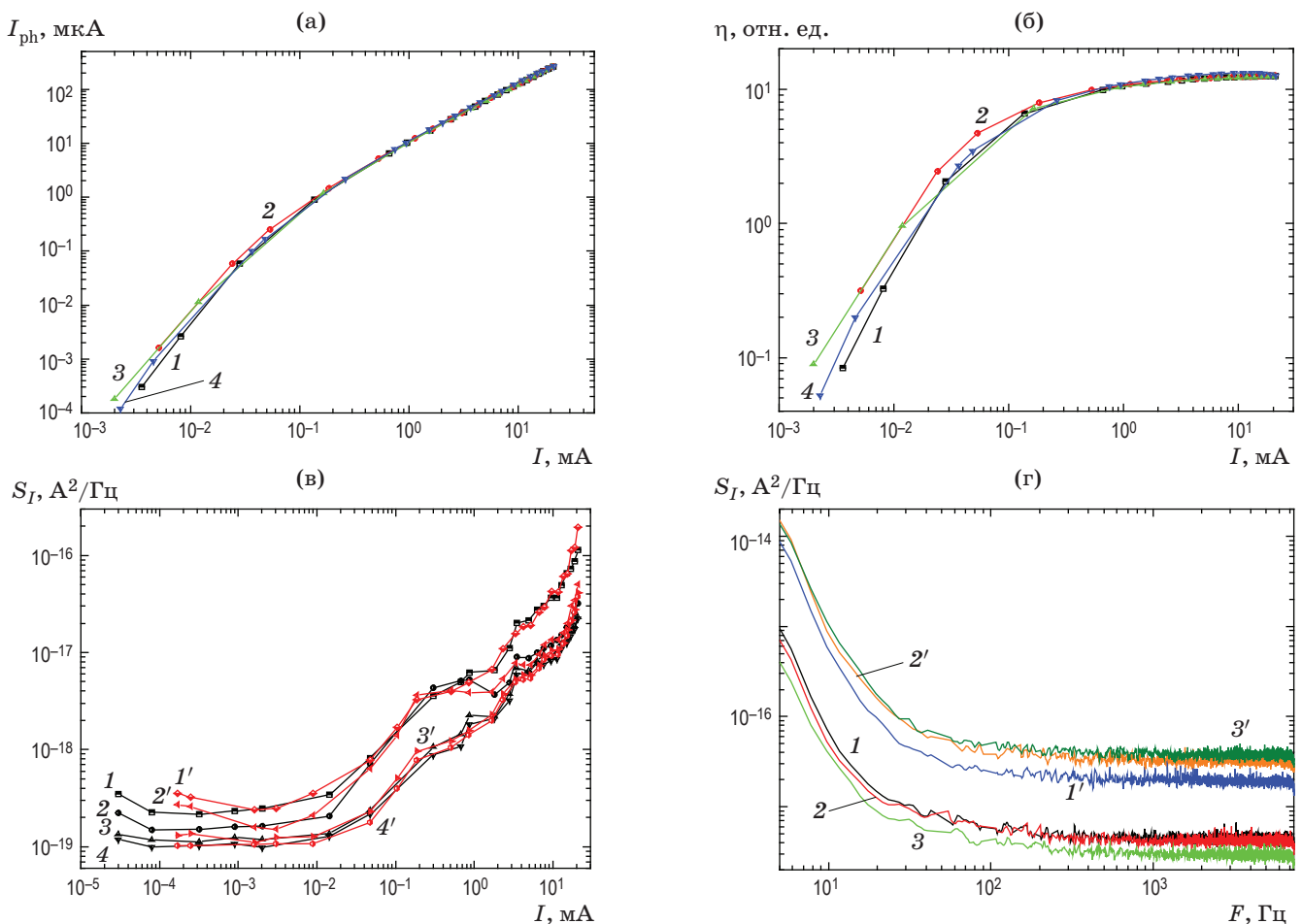


Рис. 1. Зависимости от тока при прямом смещении и частоты в логарифмическом масштабе УФ светодиодов X фототока (а), внешней квантовой эффективности (б) при температурах нагрева 23 (1), 40 (2), 50 (3), 84 (4) °С, плотности токового шума (в) при температурах 23 (1, 2, 3, 4), 40 (1', 2', 3', 4') °С и частотах анализа 20 (1, 1'), 70 (2, 2'), 270 (3, 3'), 1000 (4, 4') Гц и плотности токового шума от частоты (г) при токах 3 (1, 2, 3), 21 (1', 2', 3') мА и температурах 23 (1, 1'), 40 (2, 2') и 84 (3, 3') °С.

Fig. 1. Dependences on the forward bias current and frequency on the logarithmic scale for ultraviolet light emitting diodes X, measured at different heating temperatures. (a) represents photocurrent at temperatures (1) 23, (2) 40, (3) 50, (4) 84 °C; (б) represents external quantum efficiency at temperatures (1) 23, (2) 40, (3) 50, (4) 84 °C; (в) represents current noise density at temperatures (1, 2, 3, 4) 23, (1', 2', 3', 4') 40 °C and at analysis frequency (1, 1') 20, (2, 2') 70, (3, 3') 270, (4, 4') 1000 Hz; (г) represents current noise density versus frequency at current I (1, 2, 3) 3, (1', 2', 3') 21 mA at temperatures (1, 1') 23, (2, 2') 40, (3, 3') 84 °C

(позволяет оценивать степенную зависимость исследуемых величин) при температурах 23, 40, 50, 84 °С. Наклон зависимости на начальном участке $I_{ph} \propto I^{2,5}$ при $I < 100$ мкА, а при $I \geq 1$ мА — близок к $I_{ph} \propto I$. Важно, что на участке $I < 100$ мкА с повышением температуры наблюдается двукратное возрастание фототока, фиксируемое фотодиодом.

На рис. 1б приведены зависимости внешней квантовой эффективности от тока $\eta(I)$ при прямом смещении и температурах 23, 40, 50, 84 °С. На участке $I < 100$ мкА с увеличением температуры внешняя квантовая эффективность возрастает почти в два раза, при номинальных токах значения эффективности при этих температурах практически равные.

Рисунок 1в демонстрирует зависимости плотности низкочастотного шума S_I от тока I при прямом смещении. Компьютерная программа с использованием быстрого преобразования Фурье флуктуаций напряжения на последовательном сопротивлении 100 Ом представляет среднеквадратические значения (RMS) на частотах 20, 70, 270 и 1000 Гц, $RMS = [(v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2)/n]^{0,5}$. Плотность шума S_I рассчитывалась с учетом ширины полосы 17,6 Гц. С ростом температуры увеличение плотности шума наблюдается только при $I > 10$ мА, что предполагает изменения в механизме транспорта носителей с возрастанием тока.

Спектральные зависимости плотности низкочастотного шума при трех температурах

приведены на рис. 1г. Они также рассчитывались с использованием быстрого преобразования Фурье. Видно, что при $I \approx 3$ мА с повышением температуры плотность шума несколько уменьшается (при 23 °С в 1,5 раза выше, чем при 84 °С).

Рисунок 2 представляет сравнительные результаты исследования светодиода Y при комнатной температуре и температуре жидкого азота. На рис. 2а приведены зависимости в логарифмическом масштабе фототока от тока при прямом смещении и двух температурах. При температуре 23 °С фототок быстро растет ($I_{ph} \propto I^{2,0}$) с последующим замедлением роста. При -196 °С и $I \leq 0,1$ мА $I_{ph} \propto I$; в интервале $0,1 \leq I \leq 1$ мА происходит замедление увеличения фототока с последующим восстановлением роста, близким к $I_{ph} \propto I^{1,4}$ в случае обеих зависимостей. При этом фототок становится меньше (в 2 раза), чем при температуре 23 °С.

Зависимости внешней квантовой эффективности от тока при двух температурах представлены на рис. 2б. При 23 °С внешняя квантовая эффективность перестает расти при $I > 10$ мА. Подобное поведение УФ светодиодов при комнатной температуре наблюдалось нами ранее [16]. При температуре -196 °С и $I \leq 0,2$ мА квантовая эффективность выше η при комнатной температуре. Затем она спадает, становится меньше, чем при комнатной температуре и снова начинает возрастать. Этот рост соответствует участку $I_{ph} \propto I^{1,4}$ (рис. 2а).

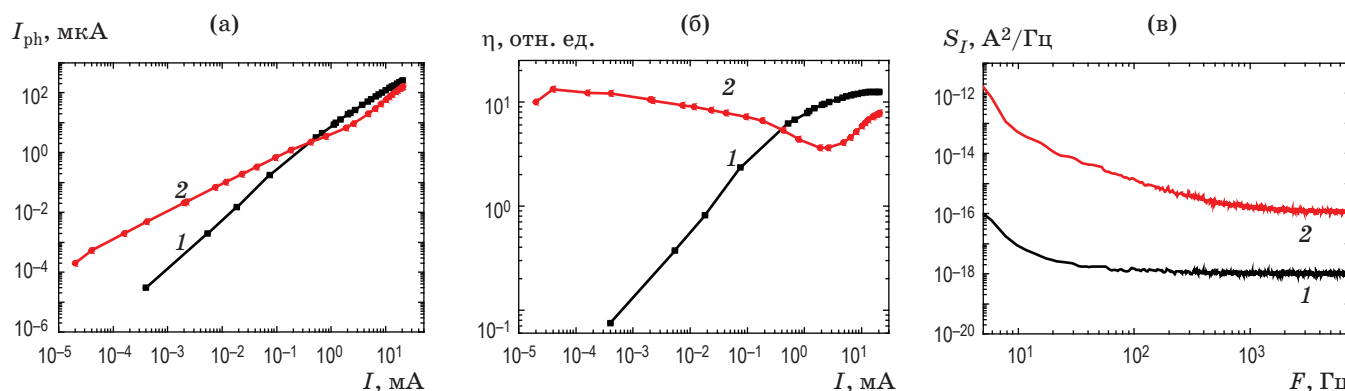


Рис. 2. Зависимости при прямом смещении в логарифмическом масштабе УФ светодиодов Y, измеренные при комнатной температуре 23 °С (1) и температуре жидкого азота -196 °С (2), фототока от тока (а), внешней квантовой эффективности от тока (б) и плотности токового шума от частоты при токе 2 мА (в)

Fig. 2. Logarithmic forward bias dependences for ultraviolet light emitting diodes Y measured at room temperature (1) 23 °С and liquid nitrogen temperature (2) -196 °С, (a) photocurrent versus current, (б) external quantum efficiency versus current, and (в) current noise density versus frequency at a current of 2 мА

Рисунок 2в представляет частотные зависимости плотности токового шума при двух температурах. При температуре жидкого азота уже при токах $I \leq 2$ мА шум резко возрастает и в частотном интервале $20 < F < 1000$ Гц имеет характер $1/F$. На более низких частотах характер зависимости более резкий: $S_I \propto 1/F^\beta$, где $\beta \leq 4$, что справедливо для результатов УФ светодиодов X (рис. 1г) при обеих температурах.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис 1, 2 наблюдается рост оптической мощности (фототока) и внешней квантовой эффективности при токах $I \leq 200$ мкА и температурах, отличных от комнатной, взаимосвязанный с особенностями протекания токов в структурах InGaN/GaN с КЯ.

При температуре $T = -196$ °С рост квантовой эффективности по сравнению с эффективностью при комнатной температуре вызывается несколькими факторами: возрастанием коэффициента излучательной рекомбинации (пропорционален $T^{-3/2}$) за счет лучшего перекрытия волновых функций дырки и электрона в фазовом пространстве [12]; сокращением вероятности туннельной утечки носителей в барьеры из КЯ с последующей безызлучательной рекомбинацией [17, 18]; при очень низкой температуре перенос носителей в КЯ осуществляется баллистически (квазibalлистически) [8].

Рост фототока и квантовой эффективности (рис. 1б) при повышении температуры выше комнатной связан с особенностями транспорта носителей в светоизлучающих InGaN/GaN-приборах: при малых токах помимо надбарьерной инжекции проявляется туннелирование по дефектам. А прыжковая проводимость увеличивается с ростом температуры [19], что увеличивает долю тока, обусловленного транспортом по дефектам [20], и излучательную рекомбинацию в области КЯ.

Соотношение излучательной и безызлучательной рекомбинаций анализируется с использованием модели ABC (представлена, например, в публикации [21]): $\eta \propto Bn^2/(An + Bn^2 + Cn^3)$, где A , B и C — коэффициенты безызлучательной, излучательной и безызлучательной оже-рекомбинации соответственно. Для учета утечки носителей из КЯ (говорилось выше) в знаменатель может быть

добавлено еще одно слагаемое [22]. В публикации [10] приведены температурные изменения квантовой эффективности светодиодов и рассмотренных коэффициентов. С понижением температуры B растет, что вносит вклад в увеличение оптической мощности при $I \leq 0,2$ мА (рис. 2а). Рост внешней квантовой эффективности при $T = -196$ °С и токах $I > 3$ мА (рис. 2б) объясняется скоростью излучательной рекомбинации, которая при таких токах превосходит скорость безызлучательной рекомбинации [23].

Рисунки 1в, г и 2в иллюстрируют зависимости плотности низкочастотного шума в УФ светодиодах от тока при прямом смещении и от частоты измерения. Резкий рост плотности шума при $F \leq 20$ Гц ($3 \leq \beta \leq 4$) свидетельствует о сложении нескольких возможных механизмов формирования шума в полупроводниковых приборах: генерационно-рекомбинационного, телеграфного, фликкер-шума и шума, связанного с туннельным сопротивлением. При $T = -196$ °С плотность шума резко возрастает по сравнению с шумом при комнатной температуре уже при токах $I \leq 2$ мА. Увеличение плотности шума при $F > 2$ кГц связано с дробовым шумом из-за случайного фотонного излучения [15] структур InGaN/GaN с КЯ.

В структурах InGaN/GaN с КЯ при малых токах в транспорте носителей в светоизлучающих приборах помимо надбарьерной инжекции присутствует прыжковая проводимость по хвостам плотности состояний у краев разрешенных зон и по дефектам (глубоким центрам) в барьерах к КЯ. Плотность дефектов в наноструктурах на основе GaN велика и обеспечивает туннельный транспорт носителей заряда. Согласно формуле Хоуге [24] спектральная плотность токового шума $(1/F)S_I = (\alpha I^2)/(FN)$, где α — постоянная Хоуге, N — среднее число электронов, осуществляющих проводимость. Уменьшение шума с ростом температуры (рис. 1г; 40 и 84 °С) при $I \approx 3$ мА можно объяснить увеличением прыжковой проводимости и ростом N . При номинальных токах определяющим механизмом является надбарьерная инжекция, и с ростом температуры растет плотность низкочастотного токового шума. Это подтверждается и данными рис. 1в, где при 40 °С плотность шума на 4-х частотах анализа возрастает до двух раз. В целом резкий рост $S_I \propto I^{2,5}$ при обеих температурах объясняется

возможным изменением спектра дефектов током высокой плотности, происходящим вследствие неравномерного распределения носителей заряда, движущихся по сечению светодиода [25]. За счет энергии, высвобождающейся при безызлучательной рекомбинации, возможно новое дефектообразование [23, 26], в том числе с увеличением доли уровней, обеспечивающих рост туннельной проводимости в барьерах [27].

С понижением температуры при малых токах роль туннельного транспорта носителей возрастает [28, 29] и растет шум туннельного сопротивления (рис. 2в). Он связан с неравномерностями распределения сопротивления по области пространственного заряда барьеров, плотности состояний, заполнения центров, по которым осуществляется туннелирование [30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные сравнительные исследования показали, что нагрев (до 84 °С) практически не изменяет оптические характеристики УФ промышленных светодиодов на основе InGaN/GaN, внешняя квантовая эффектив-

ность при $I > 10$ мА фактически не меняется. При малых токах ($I < 1$ мА) возможно улучшение характеристик. Возрастание плотности низкочастотного шума при нагреве до 84 °С примерно двукратное. Это обеспечивает возможность использования УФ индикаторных светодиодов при токах выше номинальных с соответствующим увеличением их температуры и мощности оптического излучения.

При охлаждении (до –196 °С) уменьшается внешняя квантовая эффективность (при номинальных токах) и возрастает плотность низкочастотного шума. Рост плотности токового шума означает падение надежности в работе полупроводникового прибора и вероятное сокращение срока безотказной работы. При такой температуре важную роль в транспорте носителей играет туннелирование по дефектам. За счет неравномерной плотности протекающего тока и энергии, выделяющейся при безызлучательной рекомбинации, возможны изменения спектра дефектов в области пространственного заряда барьеров, влияющие на характеристики светоизлучающих полупроводниковых приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Titkov I.E., Karpov S.Yu., Yadav A., et al. Efficiency of true-green light emitting diodes: Non-uniformity and temperature effects // *Materials*. 2017. V. 10. № 11. P. 1323. <https://doi.org/10.3390/ma10111323>
2. Шмидт Н.М., Шабунина Е.И., Черняков А.Е. и др. Температурное падение эффективности мощных синих InGaN/GaN-светодиодов // *Письма в ЖТФ*. 2020. Т. 46. № 24. С. 45–48. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.24.50429.18512>
Shmidt N.M., Shabunina E.I., Chernyakov A.E., et al. Temperature-dependent decrease in efficiency in power blue InGaN/GaN LEDs // *Tech. Phys. Lett.* 2020. V. 46. № 12. P. 1253–1256. <https://doi.org/10.1134/S1063785020120275>
3. Wang Q., He L., Wang L., et al. Remarkably improved photoelectric performance of AlGaN-based deep ultraviolet luminescence by using dual-triangle quantum barriers // *Opt. Commun.* 2021. V. 478. P. 126380. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126380>
4. Mondal R.K., Chatterjee V., Pal S. AlInGaN-based superlattice p-region for improvement of performance of deep UV LEDs // *Opt. Mater.* 2020. V. 104. P. 109846. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109846>
5. Yang X., Sun H., Fan X., et al. Optimization on the luminous efficiency in AlGaN-based ultraviolet light-emitting diodes by amendment of a superlattice hole reservoir layer // *Superlattices Microstruct.* 2017. V. 101. P. 293–298. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2016.09.048>
6. Peng Z., Guo W., Wu T., et al. Temperature-dependent carrier recombination and efficiency droop of AlGaN deep ultraviolet light-emitting diodes // *IEEE Photon. J.* 2020. V. 12. № 1. P. 8200108. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2019.2958311>
7. Marcinkevicius S., Yapparov R., Kuritzky L.Y., et al. Low-temperature carrier transport across InGaN multiple quantum wells: Evidence of ballistic hole transport // *Phys. Rev. B*. 2020. V. 101. P. 075305. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.101.075305>
8. Arteev D.S., Sakharov A.V., Nikolaev A.E., et al. Temperature-dependent luminescent properties of dual-wavelength InGaN // *J. Lumin.* 2021. V. 234. P. 117957. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.117957>
9. Monti D., Meneghini M., De Santi C., et al. Degradation of UV-A LEDs: Physical origin dependence on stress conditions // *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* 2016. V. 16. № 2. P. 213–219. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2016.2558473>
10. Tian P., McKendry J.J.D., Herrnsdorf J., et al. Temperature-dependent efficiency droop of blue InGaN micro-light emitting diodes // *Appl. Phys. Lett.* 2014. V. 105. P. 171107. <https://doi.org/10.1063/1.4900865>
11. Павлюченко А.С., Рожанский И.В., Закгейм Д.А. Проявление инжекционного механизма падения эффективности светодиодов на основе AlInGaN в температурной зависимости внешнего квантового выхода // *Физика и техника полупроводников*. 2009. Т. 43. № 10. С. 1391–1395.
Pavluhenko A.S., Rozhansky I.V., Zakheim D.A. Manifestation of the injection mechanism of efficiency droop in the temperature dependence of the external quantum efficiency of AlInGaN-based light-emitting diodes // *Semicond.* 2009. V. 43 № 10. P. 1351–1356. <https://doi.org/10.1134/S1063782609100170>
12. Шуберт Ф. Светодиоды / 2-е изд. Перевод с англ. под ред. Юновича А.Э. / М.: Физматлит, 2008. 496 с.

- Schubert F.E. Light-emitting diodes. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 422 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511790546>
13. Zhao F., Jia W., Dong H., et al. Simulation and theoretical study of AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes with a stepped electron barrier layer // *AIP Adv.* 2022. V. 12. P. 125003. <https://doi.org/10.1063/5.0127070>
 14. Якубович Б.И. Фундаментальные электрические шумы и неразрушающий контроль электронных приборов // *Надежность.* 2017. Т. 17. № 2. С. 31–35. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2017-17-2-31-35>
Yakubovich B.I. Fundamental electrical noise and non-destructive testing of electronic devices [in Russian] // *Nadezhnost'.* 2017. V. 17. № 2. P. 31–35.
 15. Šaulys B., Matukas J., Palenskis V., et al. Light-emitting diode degradation and low-frequency noise characteristics // *Acta Phys. Pol. A.* 2011. V. 119. № 4. P. 514–520. <http://dx.doi.org/10.12693/APhysPolA.119.514>
 16. Ivanov A.M., Klochkov A.V. Study of characteristics of LEDs based on InGaIn/GaN quantum wells under short electric impacts accompanied by joule heating // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. V. 2103. P. 012189. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2103/1/012189>
 17. Бочкарева Н.И., Вороненков В.В., Горбунов Р.И. и др. Туннельная инжекция и энергетическая эффективность светодиодов на основе InGaIn/GaN // *Физика и техника полупроводников.* 2013. Т. 47. № 1. С. 129–136.
Bochkareva N.I., Voronenkov V.V., Gorbunov R.I., et al. Tunnel injection and power efficiency of InGaIn/GaN light-emitting diodes // *Semicond.* 2013. V. 47. № 1. P. 127–134. <https://doi.org/10.1134/S1063782613010089>
 18. Бочкарева Н.И., Вороненков В.В., Горбунов Р.И. и др. Механизм падения эффективности GaN-светодиодов с ростом тока // *Физика и техника полупроводников.* 2010. Т. 44. № 6. С. 822–828.
Bochkareva N.I., Voronenkov V.V., Gorbunov R.I., et al. Mechanism of efficiency droop in GaN light-emitting diodes // *Semicond.* 2010. V. 44. № 6. P. 794–800. <https://doi.org/10.1134/S1063782610060175>
 19. Солин Н.И., Наумов С.В. Проводимость в неупорядоченной среде и локализация носителей заряда в слаболегированных манганитах лантана // *ФТТ.* 2003. Т. 45. № 3. С. 460–467.
Solon N.I., Naumov S.V. Conductivity in a disordered medium and carrier localization in weakly doped lanthanum manganites // *Phys. Solid State.* 2003. V. 45. № 3. P. 486–493. <https://doi.org/10.1134/1.1562235>
 20. Maur M., Galler B., Pietzonka I., et al. Trap-assisted tunneling in InGaIn/GaN single-quantum-well light-emitting diodes // *Appl. Phys. Lett.* 2014. V. 105. P. 133504. <https://doi.org/10.1063/1.4896970>
 21. Karpov S.Yu. ABC-model for interpretation of internal quantum efficiency and its droop in III-nitride LEDs: A review // *Opt. Quant. Electron.* 2015. V. 47. № 6. P. 1293–1303. <https://doi.org/10.1007/s11082-014-0042-9>
 22. Lv Q., Gao J., Tao X., et al. Analysis of dominant non-radiative recombination mechanisms in InGaIn green LEDs grown on silicon substrates // *J. Lumin.* 2020. V. 222. P. 117186. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117186>
 23. Renso N., De Santi C., Caria A., et al. Degradation of InGaIn-based LEDs: Demonstration of a recombination-dependent defect-generation process // *J. Appl. Phys.* 2020. V. 127. P. 185701. <https://doi.org/10.1063/1.5135633>
 24. Hooge F.N. Discussion of recent experiments on $1/f$ noise // *Physica.* 1972. V. 60 № 1. P. 130–144. [https://doi.org/10.1016/0031-8914\(72\)90226-1](https://doi.org/10.1016/0031-8914(72)90226-1)
 25. Chernyakov A.E., Levinshtein M.E., Talnashnikov N.A., et al. Low-frequency noise in diagnostics of power blue InGaIn/GaN LEDs // *J. Cryst. Growth.* 2014. V. 401. P. 302–304. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2013.11.097>
 26. Yassievich I.N. Recombination-induced defect heating and related phenomena // *Semicond. Sci. Technol.* 1994. V. 9. № 8. P. 1433–1453.
 27. Иванов А.М., Клочков А.В. Дegradaция ультрафиолетовых светодиодов с квантовыми ямами InGaIn/GaN, вызванная кратковременными воздействиями током // *ЖТФ.* 2022. Т. 92. № 2. С. 283–290. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.02.52019.229-21>
Ivanov A.M., Klochkov A.V. Degradation of InGaIn/GaN quantum well UV LEDs caused by short-term exposure to current // *Tech. Phys.* 2022. V. 92. № 2. P. 225–231. <https://doi.org/10.21883/TP.2022.02.52953.229-21>
 28. Molnar R.J., Lei T., Moustakas T.D. Electron transport mechanism in gallium nitride // *Appl. Phys. Lett.* 1993. V. 62. № 1. P. 72–76. <https://doi.org/10.1063/1.108823>
 29. Бочкарева Н.И., Шретер Ю.Г. Локализация носителей заряда в квантовых ямах InGaIn/GaN, ограниченная объемным зарядом // *ФТТ.* 2022. Т. 64. № 3. С. 371–378. <https://doi.org/10.21883/FIT.2022.03.52099.241>
Bochkareva N.I., Shreter Y.G. Space-charge-limited carrier localization in InGaIn/GaN quantum wells // *Phys. Solid State.* 2022. V. 64. № 3. P. 371–378. <https://doi.org/10.21883/PSS.2022.03.53193.241>
 30. Bochkareva N.I., Ivanov A.M., Klochkov A.V., et al. Gaussian impurity bands in GaN and weakening of carrier confinement in InGaIn/GaN quantum wells // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1697. P. 012203. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1697/1/012203>

АВТОРЫ

Александр Михайлович Иванов — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 55346296400; <https://orcid.org/0000-0003-4824-0364>; alexandr.ivanov@mail.ioffe.ru

Александр Викторович Клочков — старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, 194021, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-2931-4607>; alex.klo@mail.ioffe.ru

AUTHORS

Aleksandr M. Ivanov — PhD (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Ioffe Institute of the RAS, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID: 55346296400; <https://orcid.org/0000-0003-4824-0364>; alexandr.ivanov@mail.ioffe.ru

Aleksandr V. Klochkov — Senior Researcher, Ioffe Institute of the RAS, St. Petersburg, 194021, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-2931-4607>; alex.klo@mail.ioffe.ru

Статья поступила в редакцию 25.02.2023
Одобрена после рецензирования 03.04.2023
Принята к печати 27.04.2023

The article was submitted to the editorial office 25.02.2023
Approved after review 03.04.2023
Accepted for publication 27.04.2023