

УДК 621.383

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КВАНТОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОТДЕЛЬНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ InGaN СВЕТОДИОДОВ

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

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

²Ульяновский государственный технический университет
432027, Ульяновск, ул. Северный венец, 32

Статья поступила в редакцию 3 сентября 2018 г.

Аннотация. Представлено описание автоматизированного аппаратно-программного комплекса для измерения граничной частоты модуляции и определения квантовой эффективности отдельных спектральных составляющих полного спектра электролюминесценции светодиодов. Принцип работы комплекса основан на накоплении результатов измерения спектра излучения светодиода с выхода спектрометра OceanOptics USB2000+ при пропускании через светодиод импульсов тока заданной амплитуды и частоты следования и последующем выделении отдельных спектральных составляющих из суммарного спектра. Работа комплекса апробирована на зеленых коммерческих InGaN светодиодах с квантовыми ямами. Приведены зависимости граничной частоты модуляции и уровня спектральных составляющих от амплитуды импульсов тока. Получены оценки времени жизни носителей заряда при излучательной и безызлучательной рекомбинации в диапазоне токов 10 мкА – 10 мА. Установлено, что время жизни носителей заряда при безызлучательной рекомбинации монотонно спадает во всем диапазоне токов, а время жизни носителей заряда при излучательной рекомбинации, формирующих длинноволновое крыло спектра излучения, достигает насыщения в области больших токов, что объясняется насыщением уровней излучательной рекомбинации в квантовых ямах с ростом тока инжекции. Разработанный аппаратно-программный комплекс и методика оценки рекомбинационных

параметров гетеропереходных светодиодов с квантовыми ямами могут быть использованы как для целей диагностики качества светодиодов, так и при отработке конструкционно-технологических решений при создании новых светоизлучающих структур.

Ключевые слова: светодиод, электролюминесценция, спектральная квантовая эффективность, граничная частота модуляции, излучательная рекомбинация, безызлучательная рекомбинация, время жизни носителей заряда.

Abstract. The description of the automated hardware and software complex for measuring the boundary frequency of modulation and determining the quantum efficiency of separate spectral components of the full electroluminescence spectrum of light-emitting diodes is presented. The principle of operation of the complex is based on the accumulation of the measuring results of the LED emission spectrum from the output of the OceanOptics USB2000+ spectrometer when passing through the LED current pulses of a given amplitude and frequency and subsequent allocation of individual spectral components from the total spectrum. The complex is tested on commercial green InGaN LEDs with quantum wells. Dependences of the boundary frequency of modulation and the level of the spectral components on the amplitude of the current pulses are given. Estimations of the lifetime of charge carriers for radiative and nonradiative recombination in the current range of 10 μA –10 mA are obtained. It is established that the lifetime of charge carriers in nonradiative recombination decreases monotonically over the entire range of currents, and the lifetime of charge carriers in radiative recombination forming the long-wavelength wing of the electroluminescence spectrum reaches saturation in the region of high currents, which is explained by saturation of the levels of radiative recombination in quantum wells with growth injection current. The developed hardware and software and technique of assessment of recombination parameters of heterojunction LEDs with quantum wells can be used as for the purposes of diagnostics of quality of LEDs, and in case of working off of constructional technology solutions during creation of new light-emitting structures.

Key words: LED, electroluminescence, spectral quantum efficiency, boundary frequency of modulation, radiative recombination, nonradiative recombination, lifetime of charge carriers.

1. Введение

Светоизлучающие диоды (светодиоды) находят все более широкое применение не только как источники освещения, но и как источники оптических сигналов в системах связи и телекоммуникаций, таких как «Li-Fi», Visible Light Communication и др. [1]. При этом критически важными параметрами светодиодов, ограничивающими скорость передачи информации, являются их граничные частоты переключения, значения которых определяются временами жизни носителей заряда в процессе излучательной и безызлучательной рекомбинации в гетероструктуре [2].

Еще одной ключевой проблемой, присущей светодиодам на основе твердого раствора InGaN, является спад внешней квантовой эффективности излучения при плотностях тока более 10 A/cm^2 (efficiency droop effect), что ограничивает эффективность преобразования электрического сигнала в оптический при амплитудной и амплитудно-импульсной модуляции излучения светодиодов. Значительный интерес мирового научного сообщества к решению этой проблемы подтверждается многочисленными теоретическими и экспериментальными работами [3–6]. В качестве основных причин называются влияние Оже-рекомбинации, наблюдаемой при высоких уровнях инжекции носителей заряда в активную область гетероструктуры [4], «утечка» носителей заряда из активной области (перетекание носителей над квантовой ямой [5], туннельные утечки через n -барьер области объемного заряда [6]), делокализация носителей заряда.

Приводимые в литературе результаты экспериментального исследования квантовой эффективности светодиодов основываются на измерении мощности излучения в полном диапазоне спектра излучения. В [7 – 9] отмечается, что для понимания причин указанного явления необходимы исследование токовых

зависимостей спектральной квантовой эффективности, измеренной путем выделения узкой полосы излучения из общего спектра излучения светодиода. Однако в указанных выше работах измерения спектральной квантовой эффективности выполнены в статическом режиме. Измерения динамических параметров электролюминесценции в полном спектре излучения [10] и на отдельных спектральных составляющих полного спектра [11] позволяют получать информацию о дифференциальных временах жизни носителей заряда при излучательной и безызлучательной рекомбинации и дают дополнительные сведения о генерационно-рекомбинационных процессах в светоизлучающих гетероструктурах.

Цель работы заключается в разработке и апробации аппаратно-программного комплекса для измерения спектральных квантовых эффективностей, граничных частот модуляции и определения времени жизни носителей заряда при излучательной и безызлучательной рекомбинации на различных спектральных составляющих электролюминесценции светодиода.

2. Вывод расчетных формул

Согласно определению, приведенному в [2], внутренняя квантовая эффективность светодиода равна отношению числа рожденных в его активной области фотонов к числу инжектированных в нее электронов в единицу времени и может быть рассчитана по формуле

$$\eta_{int} = \frac{P_{int}}{I} \frac{e\lambda}{hc}, \quad (1)$$

где P_{int} – мощность оптического излучения из активной области светодиода; I – ток инжекции; e – элементарный заряд; λ – длина волны излучения; h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме.

Внешняя квантовая эффективность η светодиода связана с внутренней η_{int} выражением

$$\eta = \eta_{int} \cdot \eta_{extr}, \quad (2)$$

где η_{extr} – коэффициент вывода излучения из структуры, определяемый ее свойствами и не зависящий от тока инжекции. Так как значение коэффициента

η_{extr} для исследованного типа светодиодов не известно, примем $\eta_{extr} = 50\%$ в соответствии с оценками, представленными в [2]. Отметим, что изменение абсолютного значения η_{extr} приводит к количественным изменениям времен жизни носителей заряда, полученным при последующих расчетах, при этом их качественные зависимости от тока инжекции остаются неизменными.

Таким образом, выражение для расчета внешней квантовой эффективности светодиода принимает вид

$$\eta_{int} = \frac{1}{\eta_{extr}} \frac{P e \lambda}{I h c}, \quad (3)$$

где P – мощность оптического излучения, выходящего за пределы светодиода.

В большинстве экспериментальных работ при определении η_{int} мощность P измеряют в полном спектре излучения светодиода, а в качестве λ принимают значение центральной длины волны спектра излучения. Однако, если с помощью спектрометра или монохроматора выделить достаточно узкую полосу спектра излучения, то можно перейти к спектральной квантовой эффективности [7]. Под этим термином понимается отношение числа фотонов с энергией $E_i = hc/\lambda_i$ к числу инжектированных в активную область электронов:

$$\eta_i = \frac{1}{\eta_{extr}} \frac{P_i e \lambda_i}{I h c}. \quad (4)$$

С другой стороны, внутренняя квантовая эффективность определяется вероятностью излучательной и безызлучательной рекомбинации носителей заряда в единицу времени. Полная вероятность рекомбинации обоих видов определяется суммой этих вероятностей [2]:

$$\tau^{-1} = \tau_r^{-1} + \tau_{nr}^{-1}, \quad (5)$$

где τ_r – время жизни носителей заряда при излучательной рекомбинации, τ_{nr} – при безызлучательной рекомбинации.

Вероятность излучательной рекомбинации, или внутренняя квантовая эффективность, определяется выражением:

$$\eta_{int} = \frac{\tau_r^{-1}}{\tau_r^{-1} + \tau_{nr}^{-1}} = \frac{1}{1 + \tau_r/\tau_{nr}}. \quad (6)$$

Спектральная квантовая эффективность определяется отношением времен жизни носителей заряда при излучательной и безызлучательной рекомбинации, находящихся на энергетическом уровне E_i :

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \tau_{r_i}/\tau_{nr_i}}. \quad (7)$$

Время жизни носителей заряда определяет динамические характеристики светодиодов и связано с граничной частотой модуляции оптической мощности $f_{3дБ}$ выражением:

$$f_{3дБ} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \frac{1}{\tau} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \left(\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}} \right). \quad (8)$$

Путем совместного решения уравнений (4), (7) и (8) получаем выражения для расчета времен жизни носителей заряда при излучательной и безызлучательной рекомбинации на различных участках спектра излучения:

$$\tau_{r_i} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \eta_{extr} \frac{hc}{e\lambda_i} \frac{I}{P_i f_{3дБ_i}}, \quad (9)$$

$$\tau_{nr_i} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{\eta_{extr}} \frac{P_i e\lambda_i}{I hc}\right) f_{3дБ_i}}. \quad (10)$$

3. Описание аппаратно-программного комплекса

Структурная схема аппаратной части аппаратно-программного комплекса для измерения спектральных квантовых эффективностей и граничных частот модуляции отдельных спектральных полос излучения светодиода представлена на рис. 1. Принцип работы комплекса заключается в измерении спектров электролюминесценции светодиода при увеличении частоты следования импульсов тока накачки от 1 кГц до частоты, на которой уровень оптического сигнала падает на 3 дБ относительно уровня на нижней частоте модуляции.

Питание светодиода осуществляется импульсами тока от генератора АКПП 3420/3. Длительность нарастания и спада фронта импульса тока составляет 8 нс. Диапазон изменения амплитуды импульсов тока – от 10 мкА до 50 мА. По USB интерфейсу выполняется программная перестройка частоты следования импульсов тока в диапазоне 1 кГц – 10 МГц с логарифмическим шагом.

Оптический сигнал светодиода подается на вход спектрометра OceanOptics USB2000+, который осуществляет накопление спектра излучения в течение времени интеграции от 1 мс до 1 с в зависимости от уровня оптического сигнала. Программа выделяет из общего спектра излучения установленные оператором составляющие спектра и сохраняет их амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) в текстовый файл. Разрешающая способность спектрометра составляет 1,5 нм. После каждого цикла измерений оператор имеет возможность изменять амплитуду импульсов, а также время интеграции и число усреднений результатов измерения спектра. Расчет граничных частот модуляции оптической мощности спектральных линий излучения $f_{зДБ_i}$ и времен жизни носителей заряда τ_{r_i} и τ_{nr_i} проводится в программной среде MathCAD.



Рис.1. Структурная схема аппаратно-программного комплекса

Для исследования температурных зависимостей измеряемых величин используется нагревательный элемент.

Программная часть комплекса разработана в среде графического программирования LabVIEW. Основным элементом программы является структура Событие, которая имеет несколько вариантов событий, из которых только один выполняется при обращении к структуре (рис. 2).

В программе реализован процесс инициализации всех подключенных к компьютеру приборов. Имеется возможность ручного управления параметрами импульсов тока генератора и измерения спектра излучения светодиода.

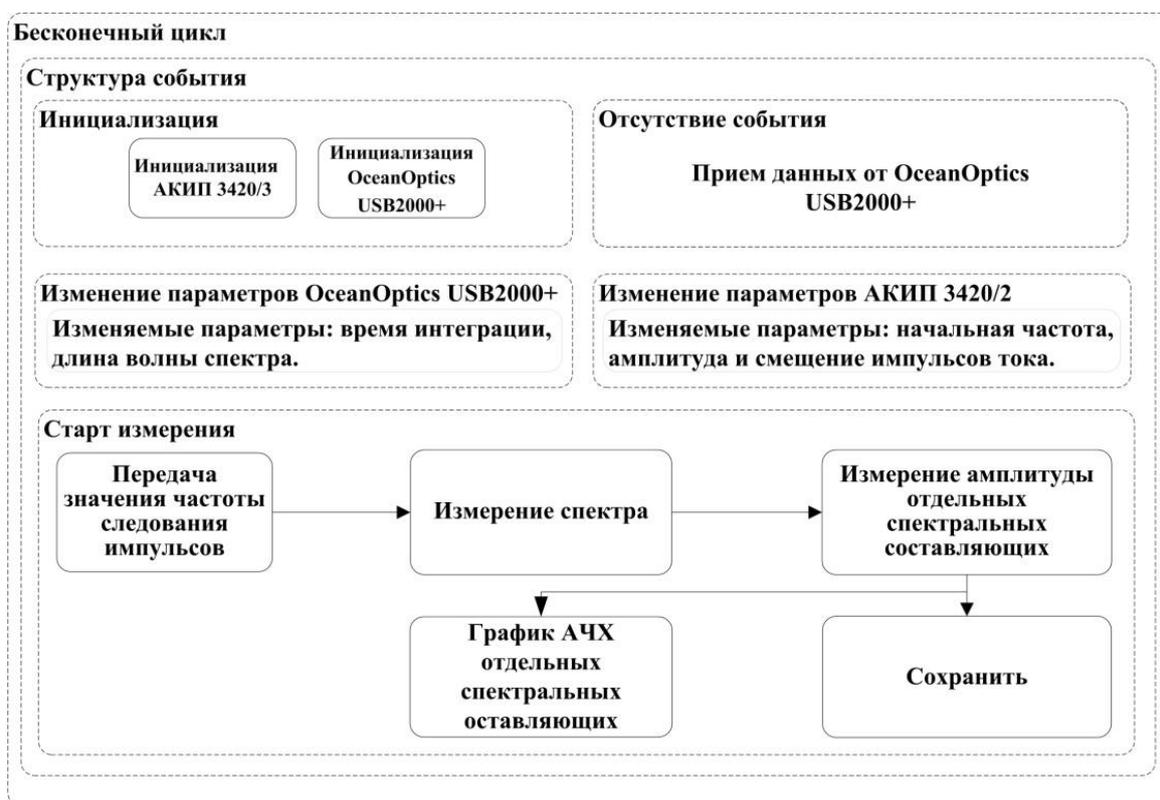


Рис.2. Структурная схема программной части измерительного комплекса

В процессе измерения программа передает параметры импульсов тока в импульсный генератор, накапливает и усредняет спектральную характеристику, сохраняет АЧХ отдельных составляющих спектра и обеспечивает отображение данных. По окончании измерения возможно сохранение данных в txt-файле.

При отсутствии события программа отображает принятые данные от модуля сбора данных.

4. Экспериментальные результаты

В качестве объекта исследования были выбраны коммерческие зеленые InGaN светодиоды с размерами кристалла 330×270 мкм и номинальным значением рабочего тока 20 мА. Измерение АЧХ спектральных составляющих электролюминесценции светодиода выполнено в диапазоне токов 10 мкА – 10 мА. На рис. 3 представлены спектры излучения, измеренные на границах указанного диапазона токов при частоте переключения 1 кГц. При увеличении тока спектр электролюминесценции светодиода смещается в коротковолновую область (blue shift effect). При токе 10 мкА максимум спектра излучения соответствует длине волны $\lambda_{\max} = 530$ нм, при токе 10 мА – 520 нм.

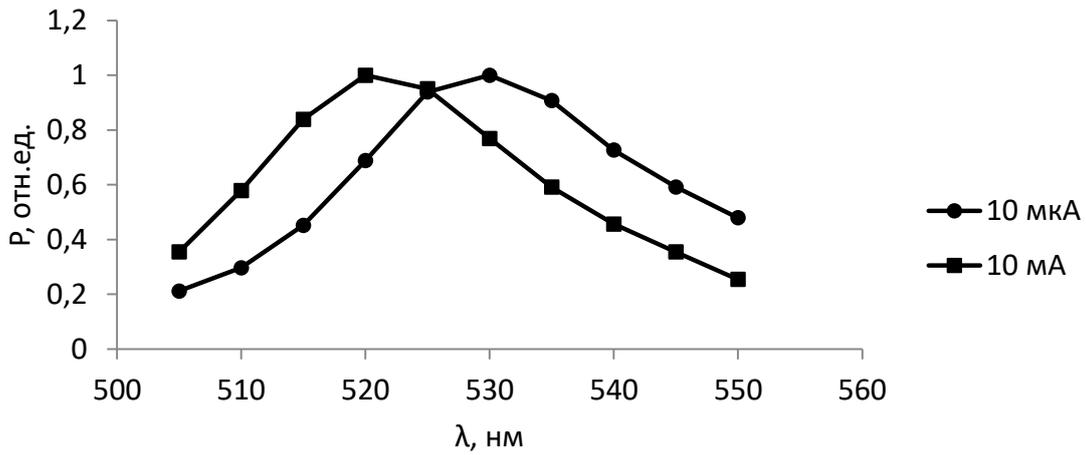


Рис.3. Спектры излучения светодиода, измеренные в импульсном режиме при частоте переключения 1 кГц

При увеличении частоты модуляции тока накачки происходит уменьшение уровня оптического сигнала (рис. 4, а) и изменение формы спектра электролюминесценции (рис. 4, б).

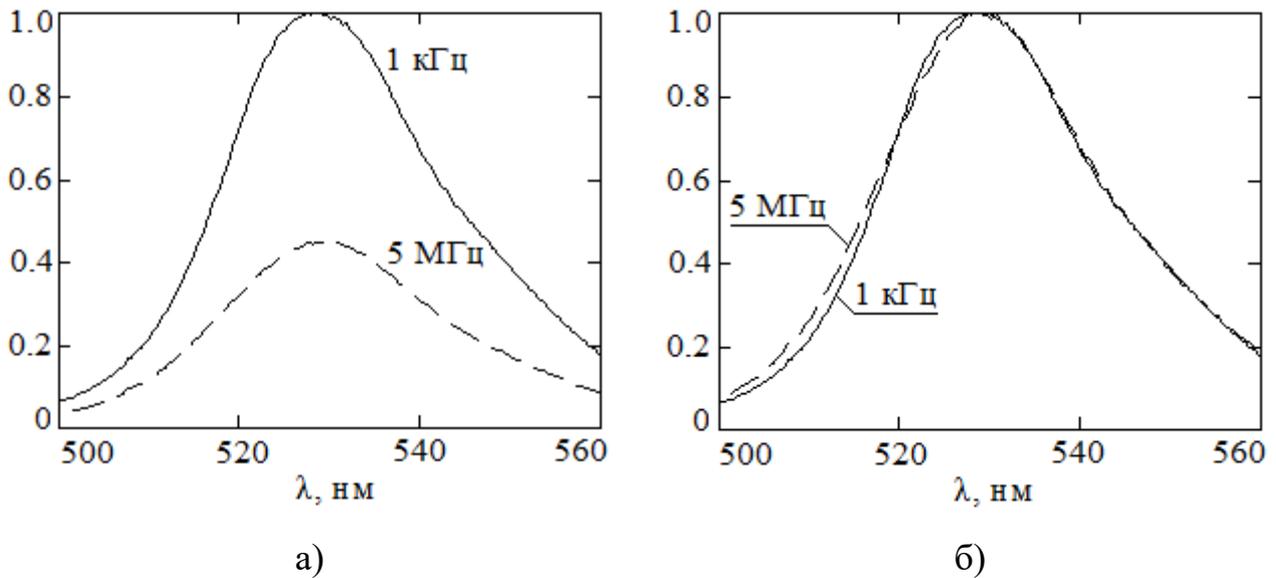


Рис.4. Спектры электролюминесценции зеленого светодиода, измеренные при токе накачки 200 мкА и частоте переключения 1 кГц (сплошная линия) и 5 МГц (пунктир): а) приведенные к максимальному значению сигнала на частоте 1 кГц; б) приведенные к максимальным значениям сигналов на частотах 1 кГц и 5 МГц соответственно.

Трансформация спектра при изменении частоты тока указывает на различие АЧХ спектральных составляющих излучения светодиода и, как следствие, граничных частот модуляции излучения $f_{зДБ_i}$ (рис. 5).

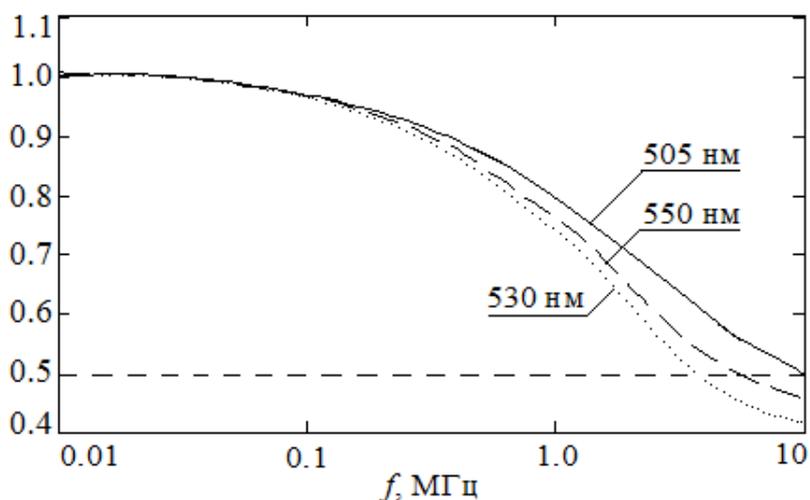


Рис.5. АЧХ спектральных составляющих излучения светодиода

На рис. 6 изображены графики токовых зависимостей внешней квантовой эффективности светодиода, измеренной в полном спектре излучения (интегральной эффективности), и графики спектральных квантовых эффективностей, измеренных на разных участках спектра излучения в импульсном режиме при частоте переключения 1 кГц.

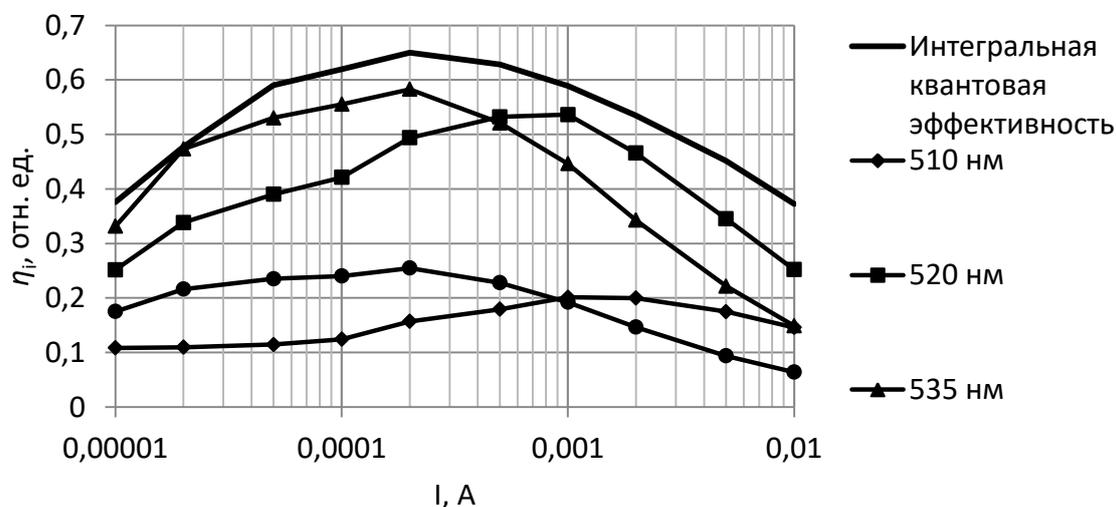


Рис.6. Токовые зависимости спектральных квантовых эффективностей светодиода, измеренные на разных участках спектра излучения

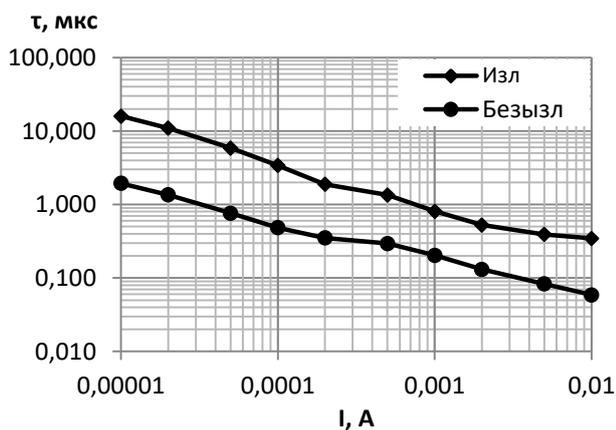
Максимум интегральной внешней квантовой эффективности светодиода, рассчитанной по формуле (3) при измерении мощности излучения в полном спектре излучения, достигается при токе 200 мкА. В диапазоне длин волн, соответствующих коротковолновому крылу спектра излучения, максимум

токовой зависимости спектральной квантовой эффективности достигается при токах, близких к номинальному (рис. 6, $\lambda=510$ нм). По мере приближения длины волны к максимуму спектра излучения максимум токовой зависимости квантовой эффективности смещается в диапазон малых токов и стремится к значению тока 200 мкА, при котором достигается максимум интегральной квантовой эффективности. В диапазоне длин волн, соответствующих длинноволновому «крылу» спектра излучения (535 нм, 550 нм) максимум квантовой эффективности практически не смещается и сохраняет значения, близкие к 200 мкА.

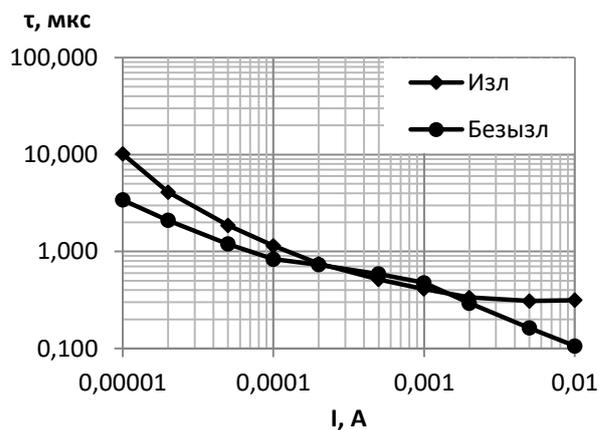
Путем совместного измерения граничной частоты модуляции спектральных составляющих электролюминесценции и спектральной квантовой эффективности по формулам (9) и (10) выполнен расчет токовых зависимостей времен жизни носителей заряда при излучательной τ_r и безызлучательной τ_{nr} рекомбинации (рис. 7).

Из результатов измерений следует, что времена жизни τ_r и τ_{nr} носителей заряда, занимающих высокое энергетическое положение (коротковолновое крыло спектра электролюминесценции), монотонно спадают при увеличении тока накачки во всем диапазоне рабочих токов (рис. 7, а). При уменьшении энергии носителей заряда (увеличении длины волны спектра) на графиках $\tau_r(I)$ появляется участок слабой токовой зависимости излучательного времени жизни в области больших токов (рис. 7, б, в, г), причем значение тока, при котором наступает насыщение, стремится к 200 мкА – току, соответствующему максимуму интегральной квантовой эффективности. При этом безызлучательное время жизни носителей заряда монотонно уменьшается с ростом тока на всех спектральных составляющих спектра электролюминесценции.

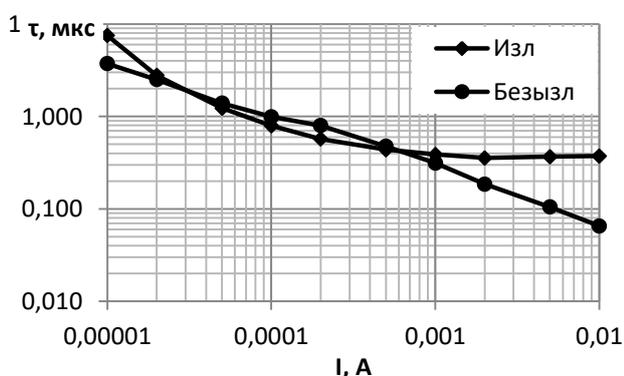
На наш взгляд, полученные зависимости свидетельствуют о том, что при увеличении тока накачки светодиода происходит насыщение центров излучательной рекомбинации, которое проявляется в насыщении времени жизни носителей заряда и скорости излучательной рекомбинации.



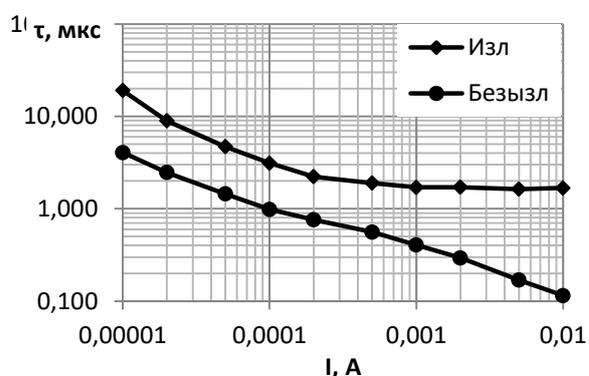
а)



б)



в)



г)

Рис.7. Токовые зависимости времени жизни носителей заряда при излучательной и безызлучательной рекомбинации, измеренные на различных участках спектра излучения: а) 510 нм; б) 520 нм; в) 535 нм; г) 550 нм

Насыщение скорости излучательной рекомбинации и уменьшение скорости безызлучательной рекомбинации носителей заряда при больших токах накачки приводит к спаду внешней квантовой эффективности в области больших токов. Полученные результаты качественно согласуются с моделью спада квантовой эффективности излучения InGaN/GaN светодиодов, представленной в [8].

5. Заключение

Разработан аппаратно-программный комплекс для измерения спектральной квантовой эффективности и времени жизни носителей заряда в светоизлучающей гетероструктуре на различных спектральных составляющих полного спектра электролюминесценции светодиода. Комплекс позволяет

измерять отдельные спектральные составляющие излучения светодиода с разрешением 1,5 нм и с минимальной плотностью мощности излучения 10^{-10} Вт/см². Время измерения (накопления информации) спектральных составляющих на «хвостах» спектра излучения зависит от величины шага перестройки частоты переключения импульсов тока накачки светодиода и составляет порядка 5 – 10 мин. Работа комплекса апробирована на зеленых коммерческих InGaN светодиодах. Установлено, что время жизни носителей заряда при безызлучательной рекомбинации монотонно спадает во всем диапазоне рабочих токов, а время жизни носителей заряда при излучательной рекомбинации, формирующей длинноволновое крыло спектра излучения, достигает насыщения в области больших токов и составляет ~350 нс на коротковолновом крыле и ~1650 нс на длинноволновом крыле спектра электролюминесценции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-32-60051 мол_а_дк.

Литература

1. Мынбаев, К.Д. Технические применения светодиодных устройств: Учебное пособие / К.Д. Мынбаев. – СПб: НИУ ИТМО, 2016. – 54 с.
2. Шуберт, Ф. Светодиоды / Пер. с англ. под ред. А. Э. Юновича. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
3. G. Verzellesi, D. Saguatti, M. Meneghini et al. Efficiency droop in InGaN/GaN blue light-emitting diodes: Physical mechanisms and remedies // Journal of Applied Physics. – 2013. –V. 114. – P. 071101.
4. Emmanouil Kioupakis, Patrick Rinke, Kris T. Delaney, and Chris G. Van de Walle. Indirect Auger recombination as a cause of efficiency droop in nitride light-emitting diodes // Appl. Phys. Lett. – 2011. – V. 98. – P. 161107.
5. A. Hori, D. Yasunaga, A. Satake and K. Fujiwara. Temperature dependence of electroluminescence intensity of green and blue InGaN single-quantum-well light-emitting diodes // Applied Physics Letters. – 2001. –V. 79. – P. 3723.

6. Бочкарева Н.И., Иванов А.И., Клочков А.В. и др. Прыжковый транспорт в области объемного заряда р-п структур с квантовыми ямами InGaN/GaN как источник избыточного 1/f шума и потеря эффективности светодиодов // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т. 49, №6. – С. 847 – 855.
7. Механизмы падения эффективности GaN-светодиодов с ростом тока / Н.И. Бочкарева [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, №6. – С. 822 – 828.
8. Сергеев В.А., Фролов И.В., Широков А.А. Влияние «хвостов» плотности состояний на спектр излучения и спад внешней квантовой эффективности голубых светодиодов на основе GaN/InGaN // Радиоэлектронная техника: межвузов. сб. науч. тр. – Ульяновск: УлГТУ, 2017. – С. 57–63.
9. Сергеев, В. А. Исследование спада квантовой эффективности зеленых InGaN светодиодов на фиксированных длинах волн излучения / В. А. Сергеев, И. В. Фролов, А. А. Широков // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. Тезисы докладов 10-й Всероссийской конференции (23 – 25 марта 2015 года, Санкт-Петербург). – Санкт-Петербург. – 2015. – С.27–28.
10. Xiao Meng, Lai Wang, Zhibiao Hao, Yi Luo, Changzheng Sun, Yanjun Han, Bing Xiong, Jian Wang, and Hongtao Li. Study on efficiency droop in InGaN/GaN light-emitting diodes based on differential carrier lifetime analysis. // Applied Physics Letters. – 2016. –V. 108. – P. 013501.
11. Yu-Feng Yin, Wen-Yi Lan, Yen-Hsiang Hsu, Yuan-Fu Hsu, Chao-Hsin Wu, and JianJang Huang. High-speed modulation from the fast mode extraction of a photonic crystal lightemitting diode // Journal of Applied Physics. – 2016. –V. 119. – P. 013103.

Для цитирования:

И.В.Фролов, О.А.Радаев, В.А.Сергеев. Динамические характеристики и квантовая эффективность отдельных спектральных составляющих спектра излучения InGaN светодиодов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/7/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.9.7