

ИЗМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА ЗЕЛЕННЫХ InGaN СВЕТОДИОДОВ В ПРОЦЕССЕ ИСПЫТАНИЙ

© 2016 г. И.В. ФРОЛОВ¹, О.А. РАДАЕВ^{1,2}, В.А. СЕРГЕЕВ^{1,2}, А.А. ШИРОКОВ¹

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

²Ульяновский государственный технический университет
e-mail: ufire@mv.ru

При разработке новых типов светодиодов, а также в ходе освоения их промышленного производства возникает необходимость в получении оперативной информации о соответствии заложенных при разработке конструкционных и электрофизических параметров, полученным при их изготовлении. Эта задача во многих случаях решается путем ускоренных испытаний с использованием различных электрофизических методов диагностики, основные требования к которым сводятся к получению достоверных данных о том, какие дефекты и в каких областях структуры возникают в процессе изготовления и старения, какое влияние они оказывают на электрические и светотехнические параметры светодиодов. Среди множества различных методов диагностики особое место занимает низкочастотная (НЧ) шумовая спектроскопия, обладающая высокой чувствительностью к наличию структурных и технологических дефектов. При этом в большинстве случаев диагностика осуществляется в частотной области и в качестве информативных используются параметры и характеристики спектральной плотности мощности НЧ-шума [1], токовые зависимости уровня НЧ шума [2] при воздействии на светодиод различных внешних факторов. В меньшей степени в диагностических целях применяется анализ шумовых параметров и характеристик светодиодов во временной области, основанный на анализе реализаций НЧ-шума. При этом можно получить дополнительную информацию о механизме протекания тока через светодиод на разных стадиях его старения.

Целью работы является исследование возможности применения вероятностных параметров и характеристик реализаций НЧ шума для диагностики зеленых светодиодов InGaN/GaN и изучения закономерностей изменения их в процессе испытаний.

Исследованы маломощные коммерческие зеленые InGaN светодиоды ARL-5213 PGC в процессе их испытаний при комнатной температуре под действием прямого тока 25 мА в течение 2000 часов.

Измерение вероятностных характеристик НЧ шума светодиодов выполнялось на аппаратно-программном комплексе [3]. Реализация НЧ шума светодиода (рис. 1) записывалась в течение времени $T = 1$ мин с частотой дискретизации 200 кГц и сохранялась в памяти компьютера в виде массива дискретных отсчетов. Программа обработки по заданному алгоритму выполняла перебор дискретных отсчетов реализации и формировала массив длительностей положительных выбросов шума t_1, t_2, \dots, t_n , пересекающих нулевой уровень. Затем диапазон изменения длительности выбросов разбивался на 20 интервалов и подсчитывалось количество выбросов N_i в каждом интервале. Гистограмма распределения выбросов реализации НЧ шума светодиода по длительности на нулевом уровне, измеренной при токе 20 мА, представлена на рис. 2.

Видно, что в распределении выбросов по длительности на нулевом уровне преобладают короткие выбросы НЧ шума длительностью до 65 мкс, в то время как количество выбросов длительностью более 800 мкс крайне мало. Распределение выбросов по дли-

тельности на нулевом уровне хорошо описывается экспоненциальной зависимостью. При увеличении тока светодиода параметры распределения изменяются: в области малых токов происходит увеличение длительности выбросов, а в области больших токов – уменьшение.

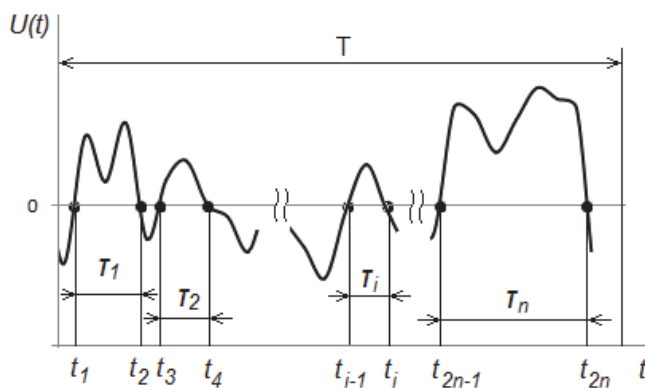


Рис. 1. Фрагмент реализации НЧ шума.

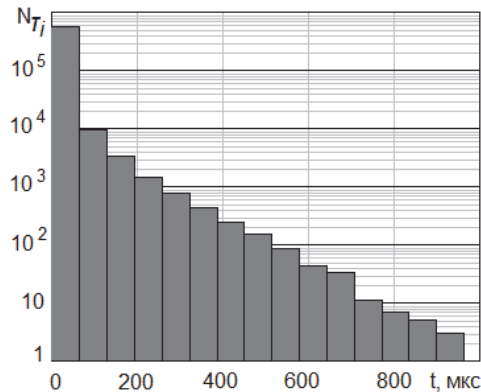


Рис. 2. Гистограмма распределения выбросов реализации НЧ шума светодиода по длительности на нулевом уровне при токе 20 мА.

В качестве параметра, характеризующего распределение выбросов НЧ шума по длительности на нулевом уровне, использовалась средняя длительность выбросов, которая определялась по формуле:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n}, \quad (1)$$

где n – количество выбросов в реализации случайного НЧ процесса длительностью T .

Исследовалась связь между величиной средней длительности выбросов НЧ шума и временами жизни носителей заряда при излучательной τ_r и безызлучательной τ_{nr} рекомбинации. Определение значений τ_r и τ_{nr} выполнялось путем измерения внешней квантовой эффективности η и граничной частоты электролюминесценции светодиода $f_{3дБ}$. При измерении зависимости $f_{3дБ}$ от тока через светодиод пропускался постоянный ток, на который накладывался переменный ток малой амплитуды в диапазоне частот 0,1 – 10 МГц. Регистрация оптического сигнала производилась широкополосным фотоприемником с равномерной АЧХ в полосе частот до 10 МГц. По результатам измерения частотной зависимости выходного сигнала фотоприемника определялась граничная частота $f_{3дБ}$, при которой мощность оптического излучения светодиода равна половине значения, измеренного на низких частотах. Согласно результатам измерения прямых вольт-фарядных и вольт-амперных характеристик светодиодов данных типов постоянная времени RC , обусловленная зарядом диффузионной емкости светодиода, составляет 5 нс и ее влиянием можно пренебречь. Поэтому согласно [4] для времени жизни носителей заряда можно записать следующее выражение

$$\tau_r = \frac{\sqrt{3}}{2\pi \eta f_{3дБ}} I, \quad (2)$$

$$\tau_{nr} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi (1 - \eta) f_{3дБ}} I. \quad (3)$$

Корреляция между средней длительностью выбросов НЧ шума $\bar{\tau}$ и временами жизни носителей заряда при излучательной и безызлучательной рекомбинации определялась на выборке светодиодов из 100 штук. Установлено, что коэффициент корреляции между $\bar{\tau}$ и τ_r принимает значения 0,9 в диапазоне токов $10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ А, соответствующем участку роста токовой зависимости внешней квантовой эффективности свето-

диода. При токах более $5 \cdot 10^{-4}$ А, где происходит спад внешней квантовой эффективности, корреляция между $\bar{\tau}$ и τ_r отсутствует. Корреляция между средней длительностью выбросов НЧ шума $\bar{\tau}$ и временами жизни носителей заряда при безызлучательной рекомбинации слабо проявляется во всем диапазоне рабочих токов светодиода (коэффициент корреляции не превышает 0,5).

На рис. 3 приведен пример поля корреляции между временем жизни носителей заряда τ_r и средней длительностью выбросов НЧ шума τ , измеренных при токе 200 мкА.

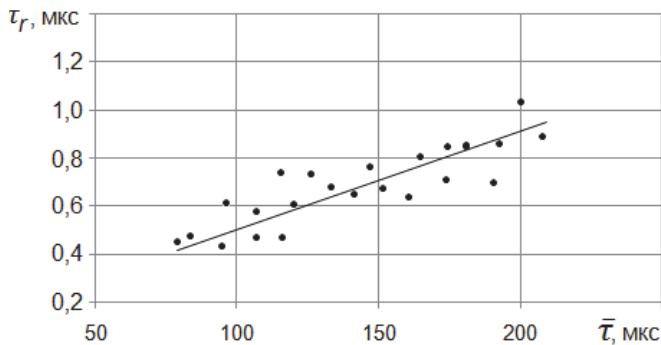


Рис. 3. Поле корреляции между временем жизни носителей заряда при излучательной рекомбинации τ_r и средней длительностью выбросов НЧ шума τ , измеренными при токе 200 мкА.

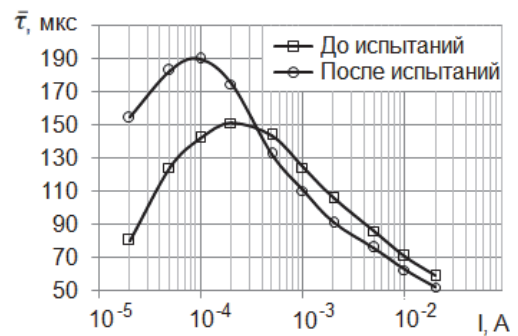


Рис. 4. Зависимости средней длительности выбросов НЧ шума светодиода от тока до испытаний и после 2000 часов испытаний.

Установленная корреляция в диапазоне малых токов свидетельствует о том, что выбросы НЧ шума в этом диапазоне токов порождаются процессами излучательной рекомбинации в активной области светодиода.

Исследованы зависимости средней длительности выбросов НЧ шума светодиода $\bar{\tau}$ от тока I (рис. 4). Из зависимости $\bar{\tau}(I)$, измеренной до испытаний, следует, что с ростом тока светодиода в диапазоне от 20 мкА до 200 мкА значение $\bar{\tau}$ увеличивается, достигает максимум при токе 200 мкА и уменьшается при дальнейшем увеличении тока. Зависимость $\bar{\tau}(I)$ изменяется в процессе испытаний, однако характер изменений не одинаков для всех светодиодов. Для большинства светодиодов исследованной выборки после испытаний в течение 2000 часов при малых токах происходит увеличение средней длительности выбросов НЧ шума, а при больших токах – уменьшение, максимум смещается в диапазон меньших токов.

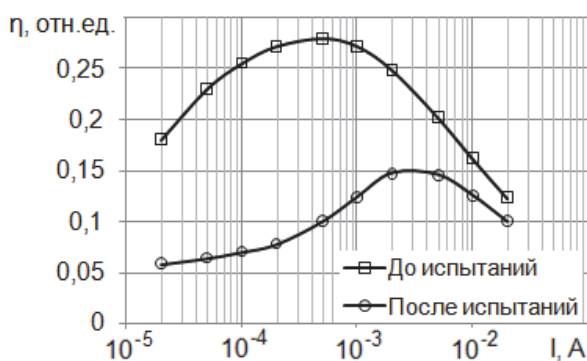


Рис. 5. Зависимости внешней квантовой эффективности светодиода от тока до и после 2000 часов испытаний.

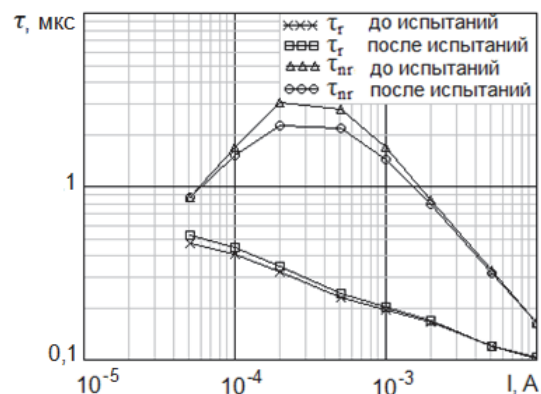


Рис. 6. Токвые зависимости времени жизни носителей заряда при излучательной τ_r и безызлучательной τ_{nr} рекомбинации.

После 2000 часов испытаний происходит уменьшение внешней квантовой эффективности светодиодов, причем в диапазоне малых токов величина спада значительно

больше, чем в диапазоне больших токов, при этом максимум квантовой эффективности достигается при большем токе (рис. 5). При этом происходит уменьшение времени жизни носителей заряда при безызлучательной рекомбинации τ_{nr} и увеличение времени жизни носителей заряда при излучательной рекомбинации τ_r (рис. 6). Увеличение времени жизни τ_r после испытаний согласуется с увеличением средней длительности выбросов НЧ шума в диапазоне малых токов.

Проведенные исследования показали, что анализ реализаций НЧ шумового процесса светодиодов во временной области в дополнение к наиболее часто используемому анализу в частотной области [5, 6] позволяет получить дополнительную информацию о параметрах светоизлучающей структуры и их изменениях в процессе испытаний. В частности, установлена качественная связь между средней длительностью выбросов реализации НЧ шума зеленых InGaN светодиодов, измеренных на нулевом уровне, и временами жизни носителей заряда в гетероструктуре. Анализ реализации НЧ шумового процесса зеленых InGaN светодиодов во временной области показал, что в диапазоне малых токов, соответствующих участку роста токовой зависимости внешней квантовой эффективности, НЧ шум возникает в результате излучательных рекомбинационных процессов и может быть использован для выявления дефектов в активной области светодиодов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pralgauskaite S., Palenskis V., Matukas J. et al.* Reliability investigation of light-emitting diodes via low frequency noise characteristics // *Microelectronics Reliability*. – 2015. – V. 55(1). – P. 52–61.
2. *Chernyakov A.E., Levinshstein M.E., Talnishnikh N.A. et al.* Low-frequency noise in diagnostics of power blue InGaN/GaN LEDs // *Journal of Crystal Growth*. – 2014. – V. 401. – P. 302–304.
3. *Сергеев В. А., Широков А. А., Фролов И. В.* Аппаратно-программный комплекс для измерения вероятностных характеристик электрических и оптических шумов светоизлучающих диодов // *Промышленные АСУ и контроллеры*. – 2012. – № 11. – С. 43–45.
4. *Шуберт Ф.* Светодиоды. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
5. *Сергеев В.А., Фролов И.В., Широков А.А., Низаметдинов А.М.* Связь характеристик низкочастотного шума светодиодов с распределением концентрации примесей и плотности тока в гетероструктурах // *Нелинейный мир*. – 2013. – № 7. – С. 493–498.
6. *Сергеев В.А., Фролов И.В., Широков А.А.* Двухсекционная низкочастотная эквивалентная схема зеленых InGaN светодиодов для описания шумовых характеристик // *Известия вузов. Электроника*. – 2015. – Т. 20, № 6. – С. 598–606.