

# МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ MICROELECTRONIC DEVICES AND SYSTEMS

УДК 621.391.822

## Двухсекционная низкочастотная эквивалентная схема зеленых InGaN-светодиодов для описания шумовых характеристик

*V.A. Sergeev<sup>1,2</sup>, I.V. Frolov<sup>1</sup>, A.A. Широков<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова Российской академии наук

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет

## Double Stage Low Frequency Noise Equivalent Circuit of Green InGaN LEDs for Description of Noise Characteristics

*V.A. Sergeev<sup>1,2</sup>, I.V. Frolov<sup>1</sup>, A.A. Широков<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Ulyanovsk Branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering  
and Electronics of the Russian Academy of Sciences

<sup>2</sup>Ulyanovsk State Technical University

Для объяснения токовых зависимостей среднего квадрата низкочастотного шумового тока зеленых InGaN-светодиодов предложена двухсекционная низкочастотная шумовая эквивалентная схема светодиода. Показано, что немонотонный характер зависимостей низкочастотного шума светодиодов от тока инжекции можно объяснить действием двух генераторов низкочастотного шума: генератора шумового тока, локализованного вблизи гетерограницы и определяемого туннельно-рекомбинационными процессами на интерфейсе, и генератора, определяемого рекомбинационными процессами в объеме активной области структуры.

*Ключевые слова:* гетеропереходный светодиод; низкочастотный шум; средний квадрат низкочастотного шумового тока; токовая зависимость; шумовая эквивалентная схема; генераторы шумового тока; туннельно-рекомбинационные процессы.

To explain the current dependencies of the mean square of the low-frequency noise of green InGaN light emitting diodes, the double stage low-frequency noise equivalent circuit of LED has been offered. It has been shown that the non-monotonic dependence of the low-frequency noise of the LED's injection current can be explained by two low-frequency noise generators: noise current generator, localized near the heterojunction and determined by tunnel-

recombination processes at the interface, and the generator being determined by the recombination processes in the active region of the structure.

*Keywords:* heterojunction LED; low-frequency noise; the mean square of the low-frequency noise current; the current dependence; the noise equivalent circuit; the noise current generators; tunnel-recombination processes.

**Введение.** Параметры и характеристики низкочастотного (НЧ) шума благодаря их высокой чувствительности к неоднородностям и дефектам структуры широко используются для диагностики качества и прогнозирования надежности полупроводниковых изделий: диодов, транзисторов, интегральных микросхем [1–4], в том числе изделий полупроводниковой оптоэлектроники [5–10]. В частности, шумовые характеристики активно используются для исследования механизмов деградации светоизлучающих приборов на основе нитрида галлия и причин снижения квантовой эффективности при высоком уровне инжекции [6, 7]. Так, в [7] на основе анализа зависимостей уровня НЧ-шума InGaN-светодиодов от тока инжекции показано, что НЧ-шум несет информацию о вкладе протяженных и точечных дефектов гетероструктуры светодиода в процессы безызлучательной рекомбинации. Однако в ряде случаев экспериментальные результаты не дают достоверных данных о месте локализации источников НЧ-шума в гетероструктуре, их относительной доле в шумовом сигнале, регистрируемом на электродах прибора, их зависимости от внешних воздействий (тока, температуры и др.). Известно [1], что эффективность и достоверность диагностики качества полупроводниковых изделий по характеристикам НЧ-шума могут быть повышены на основе анализа шумовых эквивалентных схем, содержащих источники шума и пассивные элементы структуры.

Цель настоящей работы – детальное исследование зависимостей среднего квадрата шумового тока (далее НЧ-шума) гетеропереходных InGaN/GaN-светодиодов и анализ этих зависимостей на основе предложенной двухсекционной низкочастотной шумовой эквивалентной схемы.

**Методика эксперимента.** В качестве объекта исследования выбраны маломощные коммерческие светодиоды зеленого свечения двух типов: TLCTG5800 Vishay InGaN/SiC и ARL-5213PGC Arlight InGaN/GaN. Площадь рабочей поверхности кристаллов гетероструктур исследованных светодиодов составляла  $1,25 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$  и  $0,89 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$  соответственно, максимальная плотность тока  $50 \text{ А/см}^2$ .

Типичный вид вольт-амперных характеристик (ВАХ) светодиодов исследованной партии показан на рис.1. ВАХ подчиняется зависимости  $I(U) \sim \exp[(qU - Ir_s)/mkT]$ , где  $q$  – заряд электрона;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $m$  – коэффициент неидеальности ВАХ;  $r_s$  – активное сопротивление структуры. Коэффициент неидеальности  $m$  в общем случае зависит от тока (рис.2) и рассчитывается по формуле  $m = (dU/dI - r_s)IkT/q$ .

На ВАХ (см. рис.1) можно выделить три характерных участка: участок в диапазоне прямых напряжений от 0 до 1,9 В, при которых появляется излучение светодиода и

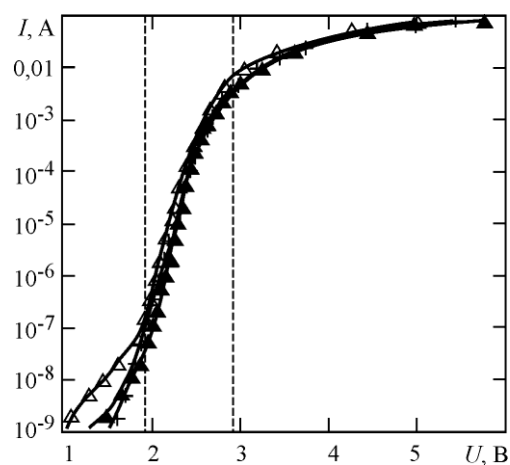


Рис.1. Типичные вольт-амперные характеристики светодиодов TLCTG5800 и ARL-5213PGC

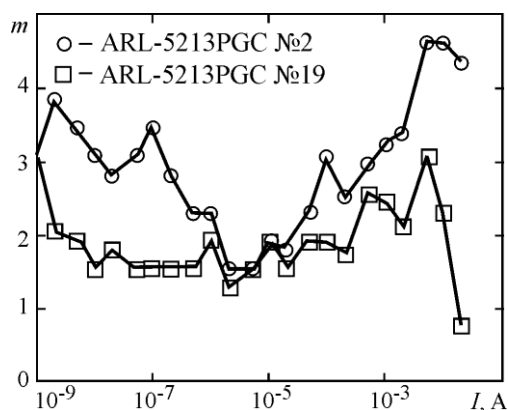


Рис.2. Зависимости коэффициента неидеальности  $m$  светодиодов ARL-5213PGC от тока  $I$

преобладает туннельно-рекомбинационная компонента тока инжекции; участок 1,9 – 2,9 В, на котором преобладает диффузионная компонента тока; участок более 3 В, на котором наблюдается насыщение, обусловленное падением напряжения на сопротивлении базы и омических контактов.

Исследование токовых зависимостей НЧ-шума светодиодов проводилось методом удвоения. Структурная схема измерительной установки представлена на рис.3.

Установка включает в себя регулируемый источник тока, согласующий трансформатор, генератор шума Г2-37 и нановольтметр Unipan-233. Исследуемый светодиод включается

в цепь регулируемого источника тока. Питание источника тока осуществляется от аккумуляторной батареи.

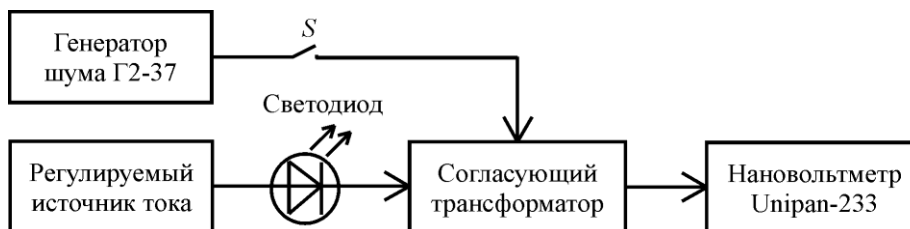


Рис.3. Структурная схема установки для измерения характеристик НЧ-шума светодиодов

Суть методики измерения состоит в том, что установившиеся за время интегрирования показания селективного нановольтметра, соответствующие среднему квадрату шумового тока исследуемого светодиода, увеличиваются в 2 раза с помощью эталонного генератора белого шума, включенного параллельно светодиоду (см. рис.3) при замкнутом положении ключа  $S$ . При этом показания эталонного генератора соответствуют значению среднего квадрата шумового тока светодиода при заданном токе инжекции. За счет увеличения времени интегрирования шумового тока в полосе пропускания, составляющей 4% от частоты настройки, погрешность измерения не более 7%.

**Результаты эксперимента и обсуждение.** Средний квадрат шумового тока НЧ-шума светодиодов измерялся при напряжениях смещения  $U \geq 1,9$  В, в диапазоне токов  $10^{-4} - 7 \cdot 10^{-2}$  А, на частоте 10 кГц при полосе пропускания 4% при комнатной температуре. Спектральная плотность мощности НЧ-шума всех исследованных светодиодов в диапазоне частот 1–100 кГц в целом подчинялась зависимости вида  $A/f^\gamma$ , где показатель степени  $\gamma$  принимал на различных участках спектра значения от 0,7 до 1,2 и в общем случае зависел от тока инжекции.

Токовые зависимости уровня НЧ-шума исследованных светодиодов характеризуются большим разнообразием. Типичные токовые зависимости НЧ-шума показаны на рис.4. У ряда светодиодов в диапазоне токов  $1 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$  А наблюдается монотонный рост НЧ-шума, а в диапазоне  $2 \cdot 10^{-2} - 7 \cdot 10^{-2}$  А – насыщение и спад; у других светодиодов в диапазоне токов  $10^{-4} - 10^{-3}$  А наблюдается слабый рост уровня НЧ-шума  $S_I$ ,

а в диапазоне  $1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2}$  А – слабая зависимость от тока или небольшой спад и далее в диапазоне  $1 \cdot 10^{-2} - 7 \cdot 10^{-2}$  А – снова рост. В диапазоне токов  $10^{-4} - 10^{-3}$  А показатель степени  $n$  токовой зависимости НЧ-шума  $I^n$  принимает для разных светодиодов значения от 0,3 до 1,2. Максимальное значение показателя степени в этом диапазоне достигало величины  $n = 2$ . При токах более 5 мА наблюдается как слабая зависимость шума от тока, так и сильный рост с показателем  $n \geq 2$ .

Анализ токовых зависимостей уровня НЧ-шума светодиодов проводился на основе низкочастотной шумовой эквивалентной схемы, представленной на рис.5.

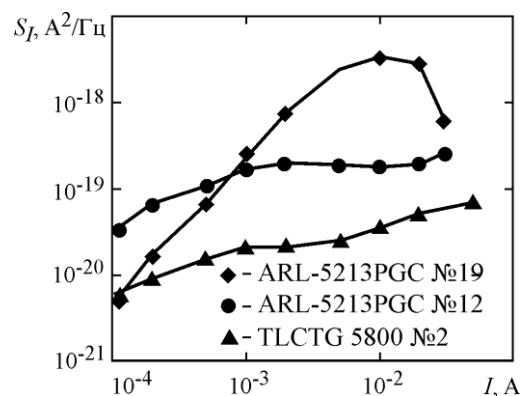


Рис.4. Токовые зависимости уровня НЧ-шума светодиодов ARL-5213PGC и TLCTG 5800, измеренные на частоте 10 кГц при  $T = 300$  К

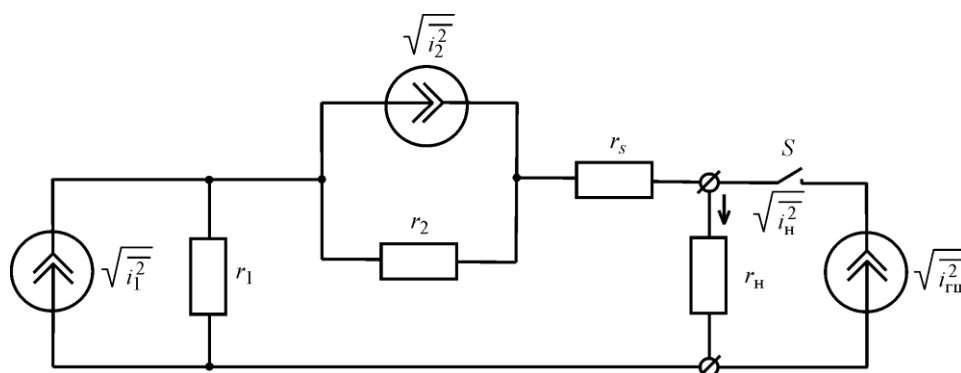


Рис.5. Низкочастотная шумовая эквивалентная схема светодиода с внешним генератором шумового тока, реализующим метод удвоения

Схема содержит два генератора шумовых токов  $\sqrt{i_1^2}$  и  $\sqrt{i_2^2}$ , обусловленных флуктуациями туннельно-рекомбинационной и диффузионной компонент тока инжекции и характеризующих процессы на гетерогранице и в области пространственного заряда гетероперехода соответственно;  $r_1, r_2$  – эффективные дифференциальные сопротивления гетероперехода, соответствующие указанным компонентам тока;  $r_s$  – последовательное сопротивление базы и омических контактов;  $r_n$  – сопротивление нагрузки;  $\sqrt{i_{ш}^2}$  – шумовой ток в нагрузке. Источники теплового и дробового шумов, уровень которых более чем на порядок меньше уровня НЧ-шума в исследованном диапазоне частот, в эквивалентную схему не включались.

Расчет по эквивалентной схеме проводился при замкнутом положении ключа  $S$ .

Согласно расчету по эквивалентной схеме связь между уровнем шумового тока  $\sqrt{i_{ш}^2}$ , регистрируемого на внешних контактах светодиода, и внутренними генераторами шума  $\sqrt{i_1^2}$ ,  $\sqrt{i_2^2}$  имеет вид

$$\bar{i}_H^2 = \frac{\bar{i}_1^2}{\left(1 + \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_s}{r_1}\right)^2} + \frac{\bar{i}_2^2}{\left(1 + \frac{r_1}{r_2} + \frac{r_s}{r_2}\right)^2}. \quad (1)$$

Для учета неидеальности ВАХ светодиодов и, как следствие, сложной зависимости эффективных дифференциальных сопротивлений  $r_1 = m_1\phi_T/I$  и  $r_2 = m_2\phi_T/I$  и последовательного сопротивления  $r_s$  от тока отношения  $r_s/r_1$  и  $r_s/r_2$  представлялись в форме:  $r_s/r_1 = (r_s I/m_1\phi_T)^{k_1}$  и  $r_s/r_2 = (r_s I/m_2\phi_T)^{k_2}$ , где указанная неидеальность ВАХ учитывается показателями  $k_1$  и  $k_2$ .

После подстановки в (1) зависимостей генераторов шумовых токов от тока инжекции в виде  $\bar{i}_1^2 = A_1 I^{n_1}$ ,  $\bar{i}_2^2 = A_2 I^{n_2}$ , где  $A_1, A_2$  – коэффициенты, учитывающие физические параметры структуры;  $n_1, n_2$  – показатели степени токовой зависимости шумовых токов  $\bar{i}_1^2$  и  $\bar{i}_2^2$ ;  $I$  – ток инжекции, выражение (1) принимает вид

$$S_I(I) = S_1(I) + S_2(I) = \frac{A_1 \bar{I}_1^{n_1}}{\left(1 + \frac{m_2}{m_1} + \left(\frac{r_s I}{m_1 \phi_T}\right)^{k_1}\right)^2} + \frac{A_2 \bar{I}_2^{n_2}}{\left(1 + \frac{m_1}{m_2} + \left(\frac{r_s I}{m_2 \phi_T}\right)^{k_2}\right)^2}, \quad (2)$$

где  $S_I(I)$  – средний квадрат шумового тока светодиода в нагрузке;  $S_1(I)$  и  $S_2(I)$  – средние квадраты шумового тока первого  $\bar{i}_1^2$  и второго  $\bar{i}_2^2$  генераторов соответственно.

Физический смысл коэффициентов  $A_1$  и  $A_2$  в уравнении (2) следует из анализа механизма токопротекания в InGaN/GaN-гетероструктурах. Известно [11, 12], что в гетероструктурах, в том числе с квантовыми ямами, токопротекание осуществляется двумя механизмами. В диапазоне малых токов преобладающим является туннельно-рекомбинационный механизм, в диапазоне больших токов – диффузионный. Туннельно-рекомбинационный механизм токопрохождения сопровождается рекомбинационными процессами как в области пространственного заряда гетероперехода, так и в прилегающей к ней области на глубоких примесных центрах, образующих хвосты плотности состояний в запрещенной зоне полупроводника. Эти процессы ответственны за возникновение туннельно-рекомбинационного шума, спектральная плотность мощности которого соответствует первой компоненте шумового тока  $\bar{i}_1^2$  и на частоте  $\omega = 1/\tau_t$  в соответствии с [13] и с учетом (2) описывается выражением

$$S_1(I) = \frac{2qIN_t \exp\left(\frac{2E_t}{kT}\right)}{\tau_0 \sigma V_T N_c^2} \left[1 + \frac{m_2}{m_1} + \left(\frac{r_s I}{m_1 \phi_t}\right)^{k_1}\right]^{-2}, \quad (3)$$

где  $N_t$  – концентрация глубоких центров;  $E_t$  – энергия глубокого центра;  $\tau_0$  – эффективное время жизни носителей заряда в полупроводниковой структуре;  $\sigma$  – сечение захвата носителей заряда;  $V_T$  – тепловая скорость;  $N_c$  – плотность состояний в зоне проводимости.

С ростом прямого напряжения преобладающей становится диффузионная компонента тока. В этом случае при односторонней инжекции носителей заряда ток пропорционален квадрату их концентрации:

$$I_{\text{диф}} \approx \frac{qD_n n^2}{L_n N_a}, \quad (4)$$

где  $D_n$  – коэффициент диффузии;  $n$  – концентрация носителей заряда;  $L_n$  – диффузионная длина;  $N_a$  – концентрация акцепторов.

Спектр флуктуаций концентрации носителей заряда  $\Delta \bar{n}^2$  при этом имеет вид [11]

$$S_{\Delta \bar{n}}(\omega) = \frac{4N_t F(1-F)\tau_t}{1+(\omega\tau_t)^2}, \quad (5)$$

где  $F$  – функция Ферми–Дирака;  $\tau_t = F/\sigma n V_T$  – время жизни носителей заряда на глубоком центре;  $\omega$  – круговая частота;  $F = \left(1 + \frac{N_c}{n} \exp \frac{-E_t}{kT}\right)^{-1}$  [13]. При выполнении условия  $F \ll 1$  для спектральной плотности флуктуаций концентрации носителей заряда получим

$$S_{\Delta \bar{n}}(\omega) = \left(\frac{qD_n}{L_n N_a}\right)^2 \frac{4N_t n^3 \exp\left(\frac{2E_t}{kT}\right)}{N_c^2 \sigma V_T} \frac{1}{1+(\omega\tau_t)^2}. \quad (6)$$

Спектральная плотность флуктуаций тока инжекции, соответствующая второму генератору шумового тока  $\bar{i}_2^{-2}$  на частоте  $\omega = 1/\tau_t$ :

$$S_2(I) = \frac{2 I^{5/2} (L_n N_a)^{1/2} N_t \exp\left(\frac{2E_t}{kT}\right)}{(qD_n)^{1/2} N_c^2 \sigma V_T} \left[1 + \frac{m_1}{m_2} + \left(\frac{r_s I}{m_2}\right)^{k_2}\right]^{-2}. \quad (7)$$

Выражения (3), (6), (7) объясняют экспериментальные зависимости шумового тока от тока накачки. При токах светодиода менее  $10^{-3}$  А уровень шума определяется рекомбинационными процессами на интерфейсе гетероструктуры и прилегающей к ней области. При этом среднеквадратичное значение шумового тока пропорционально току инжекции  $I$  в соответствии с (3). С ростом диффузионной компоненты тока инжекции большая часть инжектированных носителей заряда достигает активной области структуры и за счет излучательных и безызлучательных процессов флуктуация концентрации носителей заряда пропорциональна  $n^3$ . При этом флуктуации тока накачки пропорциональны  $\approx I^{5/2}$ . Таким образом, совместное действие источников шумового тока  $\bar{i}_1^{-2}$  и  $\bar{i}_2^{-2}$  формирует экспериментально наблюдаемую немонотонную зависимость уровня шума от тока накачки у различных светодиодов.

**Анализ токовых зависимостей НЧ-шума светодиодов.** Экспериментально полученные зависимости шумового тока светодиодов от тока инжекции проанализированы на основе предложенной низкочастотной шумовой эквивалентной схемы (см. рис.5) и аппроксимирующей функции (2).

На рис. 6 показаны различные по форме токовые зависимости НЧ-шума двух светодиодов ARL-5213PGC №2 и №19 и аппроксимирующие их функции. Точки соответствуют значениям среднего квадрата шумового тока, измеренным в нагрузке, сплошные линии – аппроксимирующим функциям, штриховыми линиями обозначены первое  $S_1(I)$  и второе  $S_2(I)$  слагаемые аппроксимирующей функции (2).

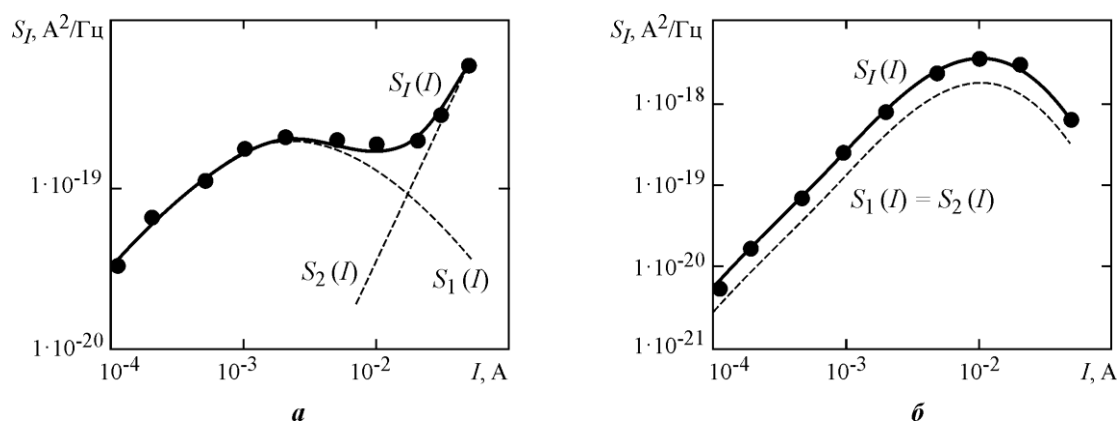


Рис. 6. Токовые зависимости уровня НЧ-шума светодиодов ARL-5213PGC №2 (а) и №19 (б) на частоте 10 кГц и аппроксимирующие их кривые

При построении аппроксимирующих функций подгоночными параметрами являлись коэффициенты  $A_1, A_2$ ; показатели степени в токовых зависимостях генераторов шумового тока  $n_1, n_2$ ; показатели степени токовой зависимости эффективных дифференциальных сопротивлений  $k_1, k_2$ . Активное сопротивление  $r_s$  оценивалось по ВАХ путем экстраполяции зависимости  $I \partial U / \partial I$  от  $I$  и составляло от 2 до 10 Ом для различных экземпляров исследованных типов светодиодов. Значения параметров аппроксимирующих функций для токовой зависимости НЧ-шума светодиодов при токе  $10^{-4}$  А представлены в таблице.

#### Параметры аппроксимирующих функций

Номер светодиода	Параметр					
	$S_1, A^2/Гц$	$S_2, A^2/Гц$	$n_1$	$n_2$	$k_1$	$k_2$
№2	$3,6 \cdot 10^{-20}$	$8,5 \cdot 10^{-25}$	0,91	2,88	0,94	0,77
№19	$2,7 \cdot 10^{-21}$	$2,7 \cdot 10^{-21}$	1,7	1,7	1,8	1,8

Из таблицы следует, что показатели степени в токовых зависимостях шума внутренних генераторов  $\bar{I}_1^{n_1}$  и  $\bar{I}_2^{n_2}$  для различных экземпляров светодиодов существенно отличаются от показателей степени экспериментальных кривых. Так, в диапазоне токов  $10^{-4} - 10^{-3}$  А шумовой ток в нагрузке светодиода №2 пропорционален  $I^{0,6}$ , тогда как расчетные кривые показывают зависимость  $I^{0,91}$ , у второй компоненты шумовой ток пропорционален  $I^{2,88}$ , тогда как из экспериментальных кривых при токах более 20 мА следует зависимость шума от тока  $I^{1,05}$ . У светодиода №19 в диапазоне токов  $1 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$  А эти показатели совпадают, а при больших токах уровень шума испытывает насыщение и спад.

Подобные зависимости НЧ-шума от тока в светодиодах InGaN с квантовыми ямами получены в работах [4, 13]. В [13] экспериментально наблюдаемые зависимости в области малых токов объясняются на основе предположения о мономолекулярном механизме рекомбинации и низком уровне занятости глубоких уровней носителями заряда в квантовой яме. По мнению авторов настоящей работы, указанные процессы при низком уровне инжекции протекают не в квантовой яме, а на гетерогранице и прилегающей к ней области. С дальнейшим увеличением тока инжекции преобладающей становится диффузионная компонента в активной области гетероструктуры.

Таким образом, для объяснения сложных немонотонных токовых зависимостей уровня НЧ-шума InGaN-светодиодов предложена двухсекционная низкочастотная шумовая эквивалентная схема. Показано, что средний квадрат шумового тока, регистрируемого в нагрузке светодиода  $S_I(I)$ , является суммой шумовых токов  $S_1(I)$  и  $S_2(I)$  двух внутренних генераторов шума, один из которых локализован на границе гетероперехода, а второй – в активной области структуры. В диапазоне изменения тока от  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  А преобладающими являются шумы, обусловленные флуктуациями концентрации носителей заряда на границе гетероперехода и прилегающей к нему области с зависимостью  $S_I \sim I$ . С дальнейшим ростом тока до  $10^{-1}$  А преобладающими становятся шумы активной области структуры с зависимостью  $S_I \sim I^{5/2}$ . В общем случае характер токовой зависимости НЧ-шума светодиода определяется параметрами генераторов  $S_1(I)$  и  $S_2(I)$ . Качество различных областей гетероструктуры характеризуют показатели токовой зависимости НЧ-шума  $n_1$  и  $n_2$  и коэффициенты  $A_1$ ,  $A_2$ , имеющие прямую зависимость от концентрации рекомбинационных центров  $N_t$  и определяющие интенсивность НЧ-шума.

Подтверждением полученных результатов служит установленная связь между характером токовой зависимости НЧ-шума, профилем распределения примеси в гетероструктуре и изменением оптической мощности исследованных типов светодиодов в процессе ускоренных испытаний [10, 14]. Установлено, что у светодиодов с явно выраженным максимумом концентрации примеси вблизи границы области пространственного заряда токовая зависимость НЧ-шума имеет вид, подобный кривой на рис.б,б. Интенсивность НЧ-шума таких светодиодов выше. У светодиодов без явно выраженного максимума концентрации примеси вблизи границы области пространственного заряда токовая зависимость НЧ-шума имеет вид, подобный кривой на рис.б,а. Интенсивность НЧ-шума таких светодиодов ниже. Светодиоды с более высокой концентрацией примеси в гетероструктуре характеризуются более высокой мощностью эквивалентных генераторов НЧ-шума и подвержены быстрой деградации.

**Заключение.** Применение эквивалентной схемы для анализа токовых зависимостей НЧ-шума в зеленых InGaN-светодиодах позволяет определить интенсивность источников НЧ-шума в различных областях гетероструктуры, их относительный вклад в общий шумовой ток светодиода и на этой основе оценить качество изготовления гетеропереходной структуры.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Разработка методов и аппаратуры для исследования и контроля тепловых процессов в мощных полупроводниковых излучающих приборах на основе гетероструктур» ФЦП «Исследования и разработки по перспективным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0010 от 05.06.2014, уникальный идентификатор RFMEFI60714X0010).*

### Литература

1. **Пряников В. С.** Прогнозирование отказов полупроводниковых приборов. – М. : Энергия, 1978. – 112 с.
2. **Жигальский Г.П.** Флуктуации и шумы в электронных твердотельных приборах. – М. : Физматлит, 2012. – 512 с.
3. **Vandamme L.K.J.** Noise as a diagnostic tool for quality and reliability of electronic devices // IEEE Trans. Electron Devices. – 1994. – Vol. 41. – N. 11. – P. 2176–2187.

4. **Jones B. K.** Electrical noise as a measure of quality and reliability in electronic devices // *Advances in Electronics and Electron Physics*. – 1994. – Vol. 87. – P. 201–257.
5. Low-frequency noise sources in as-prepared and aged GaN-based light-emitting diodes / **S. Bychikhin, D. Poganya, L. K. J. Vandamme et al.** // *J. of Appl. Phys.* – 2005. – Vol. 97. – P. 123714.
6. **Palenskis V., Matukas J., Pralgauskaitė S.** Light-emitting diode quality investigation via low-frequency noise characteristics // *Solid-State Electronics*. – 2010. – Vol. 54. – P. 781–786.
7. Низкочастотный шум в исходных и деградировавших синих InGaAs/GaN-светодиодах / **А.Л. Закагейм, М.Е. Левинштейн, В.П. Петров и др.** // *ФТП*. – 2012. – Т.46. – №2. – С. 219–223.
8. **Sergeev V.A., Frolov I. V., Shirokov A.A., Shcherbatyuk A. N.** Probability characteristics of electrical noise in heterojunction-based light emitting diodes // *Semiconductors*. – 2011. – N. 13. – P. 50–55.
9. **Фролов И. В., Широков А. А.** Низкочастотные шумы светодиодов InGaN/SiC // *Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы: тез. докл. 9-й Всероссийской конференции (13 – 15 июня 2013 г., Москва)*. – СПб., 2013. – С. 139–140.
10. **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.
11. **Rolando S. Duran, Grover L. Larkins, Carlyne M. Van Vliet, Hadis Morkoc.** Generation-recombination noise in gallium nitride-based quantum well structures // *J. of Applied Physics*. – 2003. – Vol. 93. – N. 9. – P. 5337–5345.
12. **Бочкарева Н. И., Ребане Ю. Т., Шретер Ю. Г.** Падение эффективности GaN-светодиодов при высоких плотностях тока: туннельные токи утечки и неполная латеральная локализация носителей в квантовых ямах InGaN/GaN // *ФТП*. – 2014. – Т.48. – №8. – С.1107–1116.
13. Current and optical noise of GaN/AlGaIn light emitting diodes / **S. Sawyer, S.L. Rumyantsev, M.S. Shur et al.** // *J. Appl. Phys.* – 2006. – Vol. 100. – P. 034504.
14. **Сергеев В. А., Фролов И. В., Широков А. А.** Связь распределения примеси в гетероструктурах светодиодов с изменением мощности излучения в начале ускоренных испытаний: материалы Международной научно-технической конференции, 1 – 5 декабря 2014 г. INTERMATIC-2014. Ч.4. – М.: МИРЭА, 2014. – С. 167–169.

Статья поступила  
16 апреля 2015 г.

**Сергеев Вячеслав Андреевич** – доктор технических наук, доцент, директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (УФирЭ им. В.А. Котельникова РАН), заведующий базовой кафедрой радиотехники, опто- и нанoeлектроники Ульяновского государственного технического университета при УФирЭ им. В.А. Котельникова РАН. *Область научных интересов:* токораспределение и теплофизические процессы в твердотельных структурах, полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах; методы и средства измерения параметров теплофизических параметров изделий электронной техники. **E-mail:** [sva@ulstu.ru](mailto:sva@ulstu.ru)

**Фролов Илья Владимирович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник УФирЭ им. В.А. Котельникова РАН. *Область научных интересов:* шумовые и деградационные процессы в гетеропереходных светодиодах, автоматизация методов и средств измерения параметров изделий электронной техники.

**Широков Алексей Анатольевич** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник УФирЭ им. В.А. Котельникова РАН. *Область научных интересов:* электрофлуктуационные процессы в полупроводниковых изделиях, методы неразрушающего контроля качества и оценки надежности изделий электронной техники.