

Измерение граничной частоты электролюминесценции светодиодов при малых токах

О.А. Радаев

Ульяновский филиал Института
радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова Российской
академии наук
Ульяновск, Россия
oleg.radaev.91@mail.ru

И.В. Фролов

Ульяновский филиал Института
радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова Российской
академии наук
Ульяновск, Россия
ilya-frolov88@mail.ru

В.А. Сергеев

Ульяновский филиал Института
радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова Российской
академии наук
Ульяновск, Россия
sva@ulstu.ru

Аннотация—Представлен анализ и оценка погрешностей измерения граничной частоты электролюминесценции светодиода при малых уровнях возбуждения. Отмечается, что при измерении переменной составляющей мощности излучения светодиода в диапазоне малых токов (до 100 мкА) преобладают погрешности, обусловленные нелинейностью ватт-амперной характеристики светодиода и влиянием аддитивных шумов измерительных цепей. Показано, что существует значение амплитуды переменного тока, при которой суммарная погрешность измерений оптического сигнала малого уровня светодиода принимает минимальное значение.

Ключевые слова—светодиод, электролюминесценция, переменный оптический сигнал, граничная частота электролюминесценции, измерение.

1. ВВЕДЕНИЕ

Задачи измерений граничных частот электролюминесценции $f_{зав}$ светодиодов (СИД) связаны с разработкой способов и средств неразрушающего контроля качества и оценкой динамических параметров СИД. Для современных систем передачи информации, таких как Visible light communication (VLC) и Li-Fi, частота $f_{зав}$ ограничивает скорость передачи данных.

В целях контроля качества СИД частота $f_{зав}$ используется для расчета рекомбинационных параметров, значения которых зависят, в том числе, от концентрации дефектов в активной области гетероструктуры светодиода. В работах [1,2] показано, что наиболее чувствительным к дефектам гетероструктуры является начальный участок ватт-амперной характеристики СИД (при рабочих токах, не превышающих 1 мА). В работе [3] представлена оригинальная методика измерения концентрации дефектов СИД, в основе которой лежит принцип измерения граничных частот модуляции в области микротоков. При регистрации слабых оптических сигналов существенное влияние на результат измерений оказывают аддитивные шумы фотоприемника. Однако при увеличении амплитуды тока СИД возникают нелинейные искажения оптического сигнала, связанные с нелинейностью ватт-амперной характеристики СИД. Таким образом, измерение $f_{зав}$ при малых уровнях рабочего тока связано с ограничением выбора значений амплитуды сигнала.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ

Для измерения частоты $f_{зав}$ использовалась общепринятая методика измерения, суть которой заключается в измерении частотной зависимости мощности оптического излучения СИД при модуляции тока светодиода гармоническим сигналом в диапазоне частот от нескольких кГц до десятков МГц. Согласно определению, граничная частота электролюминесценции $f_{зав}$ – это частота, при которой амплитуда переменной составляющей мощности оптического излучения СИД уменьшается в два раза (на 3 дБ) относительно значения, измеренного при низкой частоте (порядка 1 кГц).

3. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ

Рассмотрим погрешности, обусловленные нелинейностью ватт-амперной характеристики, при измерении $f_{зав}$ в случае регистрации переменного излучения фотодиодом и преобразовании переменного напряжения фотодиода детектором среднеквадратического значения (СКЗ).

Ватт-амперная характеристики $P(I)$ СИД в окрестности рабочей точки I_0 была представлена в виде ряда Тейлора $P(I) = P_0 + a\Delta I + b\Delta I^2 + \dots$, где P_0 – значение мощности в рабочей точке I_0 : $P(I_0) = P_0$; a и b соответственно равны:

$$a = \left. \frac{dP(I)}{dI} \right|_{I_0}, \quad b = \left. \frac{1}{2} \frac{d^2P(I)}{dI^2} \right|_{I_0}.$$

Ограничиваясь квадратичным членом в разложении $P(I)$, получено выражение для оценки относительной погрешности измерения $f_{зав}$ СИД без учета шума в измерительной цепи:

$$\varepsilon \approx \frac{b^2}{10a^2} I_m^2 100\%, \quad (1)$$

где I_m – амплитуда переменной составляющей электрического тока СИД.

На основании АВС-модели рекомбинации носителей заряда ватт-амперная характеристика СИД при малых токах может быть аппроксимирована функцией [4]

$$P(I) = m \left(1 - \sqrt{1 + 2qI} + qI \right) = \frac{m}{2} \left(\sqrt{1 + 2qI} - 1 \right)^2, \quad (2)$$

Исследование выполнено в рамках государственного задания
В настоящей работе представлен анализ погрешностей, возникающих при измерении частоты $f_{зав}$ в диапазоне микротоков.

где $m = \eta_{extr} V \frac{hc A^2}{\lambda 2B}$, $q = \frac{\eta_{inj} 2B}{eV A^2}$, A – коэффициент безызлучательной рекомбинации, B – коэффициент излучательной рекомбинации.

Параметр q имеет размерность $[A^{-1}]$. Этот параметр влияет на степень нелинейности ватт-амперной характеристики СИД.

Выражение (1) для погрешности с учетом (2) примет вид:

$$\varepsilon \approx \frac{0,7q^2}{(2qI_0 + 1)^2 (\sqrt{2qI_0 + 1} - 1)^2} I_m^2. \quad (3)$$

Значения параметра q для светодиодов разных типов составляют порядка $10^5 \dots 10^7 A^{-1}$. Чем больше q , тем меньше степень нелинейности ватт-амперной характеристики.

Очевидно, что для уменьшения погрешности нелинейности необходимо уменьшать амплитуду тестового сигнала, однако снизу величина I_m ограничена аддитивными шумами измерительных цепей. Путем добавления аддитивного шума $U_{ш}$ к сигналу фотодиода и выполнения аналогичных математических преобразований, было получено выражение для оценки относительной погрешности с его учетом шума измерительной цепи:

$$\varepsilon = \left(\frac{x}{3} - 1 \right) 100\%, \quad (4)$$

$$x = - \frac{\left[5 \left(\frac{1}{2} \frac{U_{ш}}{SaI_m} \right)^2 \frac{b^2 I_m^2}{4a^2} - 4 \right]}{8 \left(\frac{1}{2} \frac{U_{ш}}{SaI_m} \right)^2} + \frac{\sqrt{\left[5 \left(\frac{1}{2} \frac{U_{ш}}{SaI_m} \right)^2 \frac{b^2 I_m^2}{4a^2} - 4 \right]^2 - 16 \left(\frac{1}{2} \frac{U_{ш}}{SaI_m} \right)^2 \left[\left(\frac{1}{2} \frac{U_{ш}}{SaI_m} \right)^2 \frac{b^2 I_m^2}{4a^2} - 1 \right]}}{8 \left(\frac{1}{2} \frac{U_{ш}}{SaI_m} \right)^2},$$

где S – коэффициент преобразования мощности излучения СИД в выходное напряжение фотоприемника, который определяется чувствительностью фотодиода, коэффициентом усиления, диаграммами направленности СИД и фотодиода и имеет размерность $[В/Вт]$.

Для измерения частоты f_{3dB} была разработана измерительная установка, где для регистрации оптического излучения использовался фотодиод SFH203, ток с выхода которого преобразовывался в напряжение трансимпедансным услителем на основе операционного усилителя ОРА656. Для расчета напряжения шума $U_{ш}$ с выхода усилителя была составлена его шумовая эквивалентная схема. На основе данной схемы было выведено выражение для расчета уровня среднеквадратичного шума выходного напряжения для трансимпедансного усилителя в полосе частот Δf :

$$U_{ш} = \sqrt{e^2 + 4kTR_{oc}\Delta f + (iR_{oc})^2 + 2qIR_{oc}^2\Delta f}, \quad (5)$$

где I – среднее значение тока, протекающего через фотодиод; q – заряд электрона, e – напряжение шума на входе ОУ, i – шум входного тока ОУ, второе и третье слагаемое выражения – тепловой шум резистора обратной связи усилителя и дробовый шум фотодиода соответственно.

По формуле (4) были построены зависимости погрешности измерений частоты f_{3dB} СИД от амплитуды тока при токе 1 мкА (а) и 10 мкА (б), обусловленная нелинейностью ватт-амперной характеристики СИД и шумом фотоприемника $U_{ш} = 43$ мкВ, при $S = 20$ В/Вт (рис. 1).

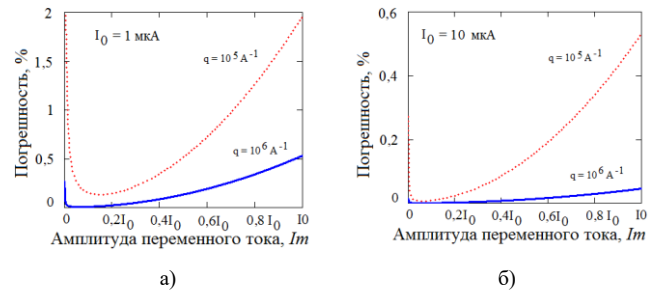


Рис. 1. Погрешность измерений частоты f_{3dB} СИД от амплитуды тока при токе 1 мкА (а) и 10 мкА (б), обусловленная нелинейностью ватт-амперной характеристики СИД и шумом фотоприемника

Из рис. 1 видно, что существует значение амплитуды переменного тока, при которой суммарная погрешность измерений оптического сигнала малого уровня светодиода принимает минимальное значение.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены зависимости относительных погрешностей измерения граничной частоты электролюминесценции f_{3dB} СИД от амплитуды тестового гармонического тока при регистрации переменного излучения фотодиодом и преобразовании переменного напряжения фотодиода детектором СКЗ. Установлено, что из-за нелинейности ватт-амперной характеристики СИД при наличии аддитивных шумов в измерительной цепи существует значение амплитуды тестового тока, при котором суммарная относительная погрешность измерения принимает минимальное значение.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Meneghini, M. Degradation of InGaN-based LEDs: Demonstration of a recombination-dependent defect-generation process / M. Meneghini, N. Renso, C. Santi, A. Caria, F. Dalla Torre; L. Zecchin; G. Meneghesso, E. Zanoni // Journal of Applied Physics – 2020. – Vol. 127(18).
- [2] Herrick, R. Reliability of Semiconductor Lasers and Optoelectronic Devices / R. Herrick, O. Ueda – Amsterdam: Elsevier Ltd., 2021. – 318 p.
- [3] Frolov, I. V. Change of the defects density distribution profile over the area of the InGaN/GaN light-emitting heterostructures during current tests / I. V. Frolov, O. A. Radaev, V. A. Sergeev // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1697. – P. 012165. DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012165
- [4] Фролов, И.В. Диагностический контроль качества светодиодов по локальным параметрам электролюминесценции и фототока / И.В. Фролов, В.А. Сергеев. – М.: СОЛОН-Пресс, 2023. – 160 с.