

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЧНЫХ ЧАСТОТ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПО ПЛОЩАДИ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

© 2021 г. И. В. Фролов^{a,b}, В. А. Сергеев^{a,b,*}, О. А. Радаев^a

^a Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Россия, 432071, Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2

^b Ульяновский государственный технический университет
Россия, 432027, Ульяновск, ул. Северный венец, 32

*e-mail: sva@ulstu.ru

Поступила в редакцию 26.08.2020 г.

После доработки 16.09.2020 г.

Принята к публикации 17.09.2020 г.

Описан аппаратно-программный комплекс, не имеющий аналогов в России и за рубежом, предназначенный для измерения распределения граничной частоты электролюминесценции по площади светоизлучающей гетероструктуры (с.г.с.). Комплекс обеспечивает пространственное разрешение 0.65 мкм, верхний предел измерений 40 МГц и относительную погрешность 2%. Граничная частота электролюминесценции в локальных областях с.г.с. определяется по спаду в 1.19 раза яркости пикселей изображений с.г.с., полученных с помощью цифровой КМОП-камеры при пошаговом повышении частоты следования импульсов питающего с.г.с. тока со скважностью 2. Комплекс и способ измерения апробированы на коммерческих светодиодах зеленого свечения. Результаты измерения распределения граничной частоты могут быть использованы для оценки однородности с.г.с.

DOI: 10.31857/S0032816221010262

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что для InGaN/GaN светоизлучающих гетероструктур (с.г.с.) с квантовыми ямами характерна существенная пространственная неоднородность распределения параметров электролюминесценции по площади активной области. Эта неоднородность обусловлена двумя основными факторами: неоднородным распределением центров безызлучательной рекомбинации и локальными скоплениями атомов индия в твердом растворе InGaN [1–3]. Указанные факторы являются причиной неоднородного распределения плотности тока, температуры и интенсивности электролюминесценции. Локальное повышение плотности тока приводит к локальному разогреву структуры, что в свою очередь приводит к повышению темпа деградации с.г.с. [3].

Таким образом, задача измерения распределения параметров электролюминесценции по площади с.г.с. актуальна при разработке способов оценки качества и надежности полупроводниковых светоизлучающих приборов. Для экспериментального исследования распределения параметров электролюминесценции по площади активной области с.г.с. используются следующие

известные методы: сканирующей ближнепольной оптической микроскопии [4], конфокальной сканирующей микроскопии [5] и визуализации увеличенного изображения кристалла оптическим микроскопом с последующим захватом изображения цифровой камерой с высоким разрешением [6].

Недостатком известных методов и средств исследования распределения параметров электролюминесценции с.г.с. является статический режим работы, позволяющий измерять только профиль распределения яркости электролюминесценции. Важную информацию о рекомбинационных процессах в с.г.с. дают динамические параметры электролюминесценции, в частности граничная частота [7, 8]. Измерение распределения граничной частоты электролюминесценции по площади с.г.с. может стать важным инструментом исследования и диагностики однородности с.г.с. Однако до настоящего времени методик и установок для измерения граничной частоты электролюминесценции в локальных областях с.г.с. в литературе не предлагалось.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Граничная частота электролюминесценции с.г.с. определяется как частота переменной составляющей питающего тока малой амплитуды, при которой уровень переменной составляющей мощности излучения с.г.с. снижается на 3 дБ относительно уровня на низкой частоте [8]. Представленные в литературе результаты измерений граничной частоты электролюминесценции $f_{3дБ}$ получены при модуляции тока гармоническим сигналом малой амплитуды, причем ток инжекции задается постоянным [9] или импульсным смещением [10] для снижения эффекта разогрева структуры.

Амплитуда переменной составляющей тока выбирается из условия минимизации нелинейных искажений переменного оптического сигнала с.г.с. и не должна превышать 10% от значения постоянного тока [11]. Собственные шумы широкополосного фотоприемного устройства при регистрации малого переменного оптического сигнала на фоне постоянного сигнала вносят существенную погрешность в результат измерений граничной частоты электролюминесценции при малых уровнях возбуждения с.г.с. Поэтому использование гармонической модуляции питающего тока для измерения граничной частоты электролюминесценции в локальных областях с.г.с. крайне затруднительно.

Для измерения профиля распределения граничной частоты электролюминесценции по площади с.г.с. нами предложено [12] использовать питание с.г.с. импульсным током со скважностью 2 и регистрировать увеличенное оптическим микроскопом изображение светящейся с.г.с. фотоприемной КМОП (комплементарная структура металл–оксид–полупроводник) камерой. При пошаговом повышении частоты следования импульсов питающего с.г.с. тока КМОП-камера регистрирует серию изображений с.г.с., соответствующих установленным значениям частоты.

Полученные изображения сохраняются в памяти компьютера. Для каждого изображения рассчитывается средняя яркость свечения активной области с.г.с. Поскольку значение граничной частоты в локальных областях с.г.с. может существенно превосходить среднее значение граничной частоты по кристаллу, повышение частоты следования импульсов тока прекращается, когда средняя яркость изображения с.г.с. снизится в 1.5 раза относительно значения, измеренного на начальной низкой частоте.

Спектральная плотность мощности переменного оптического излучения светодиода $P(\omega)$ пропорциональна среднеквадратическому значению тока светодиода $I(\omega)$ на заданной частоте $\omega = 2\pi f$:

$$P(\omega) = |K(j\omega)|I(\omega), \tag{1}$$

где $K(j\omega)$ – передаточная функция с.г.с. при преобразовании электрического тока в излучение, которая при малых значениях барьерной емкости с.г.с. определяется временем τ жизни носителей заряда в активной области с.г.с. [13]:

$$K(j\omega) \approx \frac{K_0}{1 + j\omega\tau}, \tag{2}$$

где K_0 – коэффициент преобразования тока в излучение на постоянном токе.

Выражение для спектра питающего с.г.с. импульсного тока с частотой следования $\omega = 2\pi f$ и скважностью 2 имеет вид:

$$\begin{aligned} I(t) &= I_0 \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega t - \right. \\ &\quad \left. - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega t + \frac{2}{5\pi} \cos 5\omega t - \dots \right) = \\ &= \frac{I_0}{2} \left[1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{(2n-1)} \cos(2n-1)\omega t \right], \end{aligned} \tag{3}$$

где I_0 – амплитуда импульсов тока, n – номер гармоники.

Соответственно спектр переменной оптической мощности излучения с.г.с. при ее питании импульсным током со скважностью 2 будет определяться выражением

$$\begin{aligned} \tilde{P}(\omega) &= \frac{K_0}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \times \\ &\times \frac{I_0}{2} \left[1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{1}{(2n-1)} \cos(2n-1)\omega t \right] = \\ &= \frac{I_0 K_0}{2} \left[1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \times \right. \\ &\quad \left. \times \frac{1}{(2n-1)\sqrt{1 + ((2n-1)\omega\tau)^2}} \cos(2n-1)\omega t \right]. \end{aligned} \tag{4}$$

Действующее значение мощности оптического сигнала, которое регистрируется КМОП-камерой, определяется среднеквадратическим значением постоянной и всех гармонических составляющих спектра:

$$\begin{aligned} P(\omega) &= |K(j\omega)|I_D(\omega) = \\ &= \frac{P_0}{2} \sqrt{1 + \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2 + (2n-1)^4 \omega^2 \tau^2}}, \end{aligned} \tag{5}$$

где $P_0 = I_0 K_0$ – амплитудное значение оптического сигнала светодиода.

На низкой частоте следования импульсов тока ($\omega\tau \rightarrow 0$) уровень мощности равен $P(0) = P_0/\sqrt{2}$. Согласно определению граничной частоты электролюминесценции, на частоте следования импульсов тока, равной $f_{3дБ}$, должно выполняться

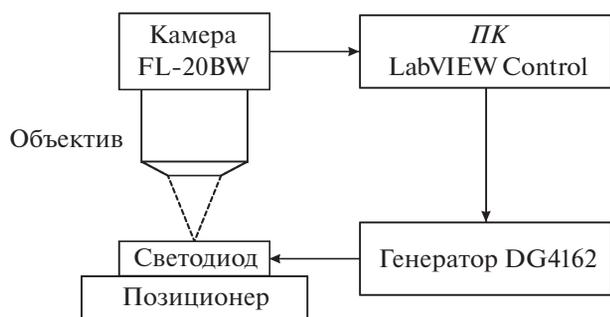


Рис. 1. Структурная схема аппаратно-программного комплекса. ПК – персональный компьютер.

условие $2\pi f_{3дБ}\tau = 1$. Учитывая быстрое уменьшение членов a_n суммы в подкоренном выражении с увеличением номера n гармоники >3 ($a_n \sim (1/4)n^4$) и ограничиваясь тремя членами суммы, для мощности оптического сигнала на граничной частоте получим

$$P(f_{3дБ}) = \frac{P_0}{2} \sqrt{1 + \frac{8}{\pi^2} 0.51265} = \quad (6)$$

$$= \frac{1.189764 P_0}{\sqrt{2}} = \frac{P(0)}{1.18865} \approx \frac{P(0)}{1.19}.$$

Таким образом, при использовании в качестве тестового сигнала импульсного тока со скважностью 2 частота $f_{3дБ}$ будет соответствовать частоте, на которой уровень сигнала КМОП-камеры спадает в 1.19 раза относительно значения, измеренного на низкой частоте.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС

Структурная схема аппаратной части комплекса представлена на рис. 1. Принцип работы аппаратно-программного комплекса (а.п.к.) заключается в регистрации цифровых изображений с.г.с. с помощью КМОП-камеры при пошаговом повышении частоты следования импульсов питающего тока скважностью 2 с последующей аппроксимацией функцией (5) зависимостей уровня сигнала от частоты для отдельных пикселей изображения. Значение граничной частоты для каждого пикселя изображения (т.е. для отдельной локальной области поверхности с.г.с.) определяется значением частоты следования импульсов питающего тока, при которой уровень сигнала спадает в 1.19 раза относительно уровня на начальной низкой частоте.

В составе а.п.к. используется микроскоп Levenhuk D320L с увеличением до $1600\times$, имеющий цифровую КМОП-камеру FL-20BW с разрешением 5472×3648 пикселей. Питание исследуемой с.г.с. осуществляется импульсами тока от генератора DG4162. Диапазон изменения амплитуды

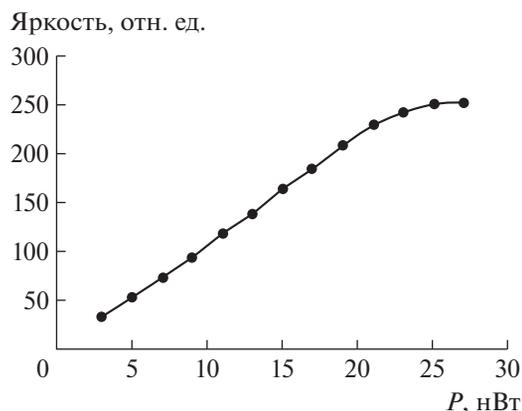


Рис. 2. Яркостная характеристика КМОП-камеры.

импульсов тока составляет от 20 мкА до 50 мА, изменение частоты следования импульсов тока в диапазоне 1 кГц–40 МГц осуществляется по USB-интерфейсу.

Время выдержки цифровой КМОП-камеры устанавливалось в диапазоне 2 мс–3600 с, так чтобы среднее значение яркости изображения находилось на линейном участке яркостной характеристики камеры (рис. 2).

Программная часть комплекса разработана в среде программирования LabVIEW. В программе реализован процесс инициализации всех подключенных к компьютеру приборов. Имеется возможность ручного управления параметрами импульсов тока генератора и измерения профиля распределения электролюминесценции с.г.с.

В процессе измерения программа передает параметры импульсов тока в импульсный генератор, накапливает и усредняет изображения светодиода, сохраняет полученные результаты измерений, осуществляет аппроксимацию амплитудно-частотных характеристик для каждого пикселя изображения и определяет граничную частоту модуляции $f_{3дБ}$.

Ниже представлены основные метрологические характеристики а.п.к.:

– Диапазон измеряемых частот	1 кГц–40 МГц
– Пространственное разрешение	0.65 мкм
– Время интеграции	2 мс–3600 с
– Шум считывания	$<0.6 e^-$
– Уровень темного тока	$<0.001 e^-/\text{пикселей}/\text{с}$
– Диапазон амплитуды импульсов тока	20 мкА–50 мА
– Погрешность измерения частоты $f_{3дБ}$	2%

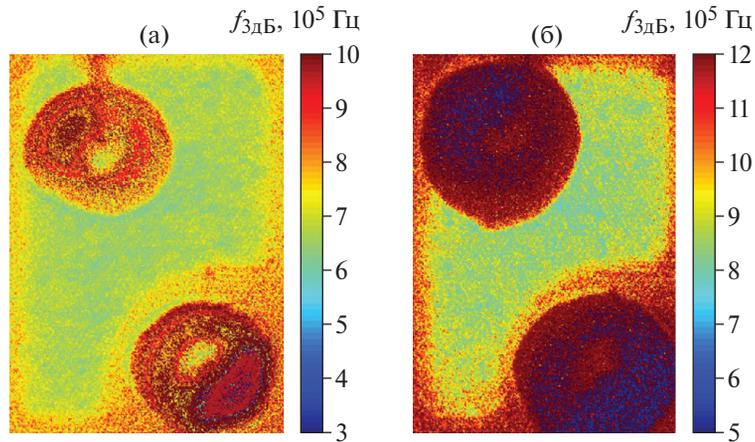


Рис. 3. Профиль распределения граничной частоты электролюминесценции по площади кристалла светодиодов № 1 (а) и № 2 (б).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальная проверка работы а.п.к. выполнена с использованием коммерческих InGaN светодиодов TO-3216BC-PG зеленого свечения с размерами кристалла 130 × 200 мкм. На рис. 3 представлены профили распределения граничной частоты электролюминесценции для двух образцов исследованной выборки.

В качестве количественной оценки неоднородности профиля распределения граничной частоты электролюминесценции светодиода может быть использована относительная неравномерность распределения граничной частоты электролюминесценции по площади структуры, определяемая отношением $\sigma/f_{3дБ_ср}$, где σ – среднее квадратическое отклонение, а $f_{3дБ_ср}$ – среднее значение граничной частоты электролюминесценции по площади с.г.с. Для светодиода № 1 от-

носительная неравномерность составила 5.4%, а для светодиода № 2 – 7.1%.

Для подтверждения правильности представленного способа измерения граничной частоты электролюминесценции было проведено сравнение частотных зависимостей интегральной мощности $P_{гарм}(f)$ электролюминесценции светодиода, измеренной фотоприемным модулем FPD510-FS-VIS при гармонической модуляции питающего тока, и усредненной по площади кристалла мощности $P_{имп}(f)$ электролюминесценции светодиода, измеренной при импульсной модуляции питающего тока разработанным а.п.к. На рис. 4 представлены нормированные частотные зависимости $P_{гарм}(f)$ и $P_{имп}(f)$, измеренные при токе 100 мкА.

Согласно рисунку, значения граничной частоты, определенной по уровню $0.84P(0)$ при импульсной модуляции тока светодиода, и граничной частоты, определенной по уровню $0.707P(0)$ при гармонической модуляции тока с постоянным смещением, совпадают.

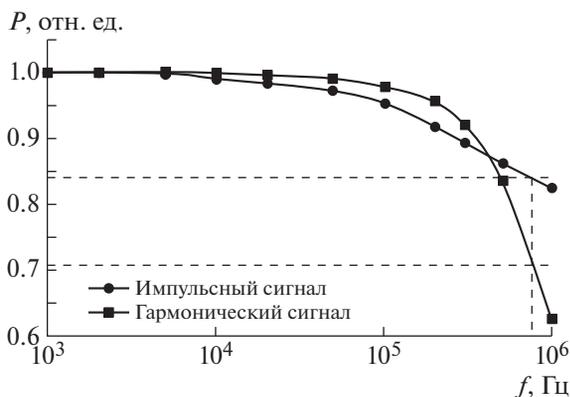


Рис. 4. Частотная зависимость мощности излучения светодиода при импульсной $P_{имп}(f)$ и гармонической $P_{гарм}(f)$ модуляции питающего тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен способ определения граничной частоты электролюминесценции с.г.с. с применением импульсной модуляции питающего с.г.с. тока. Разработан а.п.к. для измерения профиля распределения граничной частоты электролюминесценции по площади с.г.с. и оценки степени его однородности. Комплекс позволяет измерять граничные частоты электролюминесценции локальных областей с.г.с. в диапазоне от 1 кГц до 40 МГц с погрешностью 2% и пространственным разрешением 0.65 мкм. На примере измерения профиля распределения граничной частоты электролюминесценции коммерческих зеленых светодиодов с использованием а.п.к. показано, что

исследованные образцы светодиодов имеют существенные различия в степени неоднородности профиля. Достоверность предложенного способа измерения граничной частоты подтверждена путем прямого сравнения результатов измерения граничной частоты полного потока электролюминесценции светодиода предложенным и традиционными способами.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00562 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tian P., Edwards P.R., Wallace M.J., Martin R.W., McKendry J.J.D., Gu E., Dawson M.D., Qiu Z.-J., Jia C., Chen Z., Zhang G., Zheng L., Liu R. // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2017. V. 50. P. 075101. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/50/7/075101>
2. Gelžinytė K., Ivanov R., Marcinkevičius S., Zhao Y., Becerra D.L., Nakamura S., DenBaars S.P., Speck J.S. // *Journal of Applied Physics*. 2015. V. 117. P. 023111. <https://doi.org/10.1063/1.4905854>
3. Peng Z., Lu Y., Gao Y., Chen G., Zheng J., Guo Z., Lin Y., Chen Z. // *IEEE Photonics Journal*. 2018. V. 10. P. 8201908. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2880319>
4. Li Y., Tang W., Zhang Y., Guo M., Li Q., Su X., Li A., Yun F. // *Nanomaterials*. 2019. V. 9. P. 633. <https://doi.org/10.3390/nano9040633>
5. Jeong H., Jeong M.S. // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. V. 660. P. 480. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.11.151>
6. Lin Y., Tu Y., Wu T., Xiao Y., Peng Z., Lu Y., Chen Z. // *Proc. SPIE 10554. Light-Emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XXII*. P. 1055416 (14 February 2018). <https://doi.org/10.1117/12.2281120>
7. Meng X., Wang L., Hao Z., Luo Y., Sun C., Han Y., Xiong B., Wang J., Li H. // *Appl. Phys. Letters*. 2016. V. 108. P. 013501. <https://doi.org/10.1063/1.4939593>
8. Шуберт Ф. Светодиоды / Под ред. А.Э. Юновича, М.: Физматлит, 2008.
9. Monavarian M., Rashidi A., Aragon A.A., Nami M., Oh S.H., DenBaars S.P., Fezzell D. // *Appl. Phys. Lett.* 2018. V. 112. P. 191102. <https://doi.org/10.1063/1.5032115>
10. David A., Grundmann M.J. // *Appl. Phys. Letters*. 2010. V. 96. P. 103504. <https://doi.org/10.1063/1.3330870>
11. ГОСТ 18986.14–85. Диоды полупроводниковые. Методы измерения дифференциального и динамического сопротивлений. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004
12. Сергеев В.А., Фролов И.В. Патент на изобретение № 2725613 РФ. // Бюл. № 19. Оpubл. 03.07.2020.
13. Zhao L.X., Zhu S.C., Wu C.H., Yang C., Yu Z.G., Yang H., Liu L. // *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* 2016. V. 59. P. 107301. <https://doi.org/10.1063/1.4993230>