23

Исследование предельных энергетических возможностей мощных ультрафиолетовых (370 nm) матричных излучателей: токовый и температурный факторы

© А.Е. Черняков[1], А.Л. Закгейм[1], А.Е. Иванов[1], Н.А. Тальнишних[1], Е.И. Шабунина[2]

[1] НТЦ микроэлектроники РАН,
Санкт-Петербург, Россия
[2] ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия

e-mail: chernyakov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 05.05.2025 г.
В окончательной редакции 28.08.2025 г.
Принята к публикации 24.10.2025 г.

Проведено экспериментальное исследование энергетических, спектральных и тепловых характеристик мощного ультрафиолетового ($\lambda = 370$ nm) матричного светодиодного излучателя CBM-120-UV на основе AlInGaN. В диапазоне токов 1–18 A выполнено картирование (mapping) распределений яркости, температуры, спектра излучения и тока как по площади матрицы, так и отдельных излучающих элементов. Установлено наличие температурных градиентов по площади матрицы при токах выше 9 A, но не приводящее к заметной неравномерности распределения тока между параллельно включенными элементами, несмотря на известную температурную зависимость прямого напряжения. Полученные результаты важны для оценки предельных энергетических возможностей УФ излучателей, оптимизации их конструкции и режимов работы.

Ключевые слова: AlInGaN, светодиод, УФ, матричный излучатель, температурные градиенты, электролюминесценция, ближнее поле излучения.

DOI: 10.61011/OS.2025.11.62166.8042-25

Ультрафиолетовые (УФ) излучатели диапазона UV-A (315–400 nm) находят широкое применение в различных областях науки и техники — от фотолитографии и полимеризации до медицинской диагностики, флуоресцентного анализа и биологических исследований [1–3]. По сравнению с традиционными ламповыми источниками УФ излучения светодиоды (СД) на основе гетероструктур AlInGaN обладают рядом преимуществ: компактностью, механической прочностью, отсутствием токсичных веществ и возможностью точной настройки спектра. Однако по мере увеличения мощности таких излучателей возрастает значимость тепловых и токовых ограничений, которые могут существенно снижать эффективность, стабильность и срок службы устройств [4–6].

Особый интерес представляют матричные СД-сборки высокой плотности, в которых отдельные СД соединены параллельно и работают в условиях высоких токов. В таких системах реализуются сложные процессы теплового взаимодействия и перераспределения тока между отдельными излучающими кристаллами (чипами), вызванные локальными температурными эффектами и различиями в электрических характеристиках. Одним из критических факторов становится температурная зависимость прямого напряжения на чипе, приводящая к положительной обратной связи между нагревом и током. Кроме того, эффекты внутри отдельного чипа, такие как неравномерное распределение тока в зоне контакта (current crowding), усиливают тепловые нагрузки и могут привести к локальному перегреву и деградации прибора [7–9].

Несмотря на имеющиеся теоретические модели и отдельные экспериментальные данные, подробное исследование взаимосвязи между токовым распределением, температурным профилем и оптическими характеристиками в мощных излучающих УФ матрицах остается актуальной задачей. Настоящая работа направлена на комплексный анализ тепловых и электролюминесцентных процессов на примере промышленного излучателя CBM-120-UV ($\lambda = 370$ nm) с целью выявления предельных рабочих режимов и ограничений, обусловленных конструкцией и условиями теплопередачи.

Эксперимент

Объектом исследования являлся коммерчески доступный мощный УФ матричный светодиодный излучатель CBM-120-UV (Luminus Devices, США) с длиной волны излучения $\lambda \sim 370$ nm; внешний вид представлен на рис. 1. Излучатель содержит 12 плотно размещенных чипов на основе AlInGaN/GaN, соединенных параллельно и смонтированных на общей медной подложке (размер 28×28 mm, толщина 3.5 mm), выполняющей функции теплоотвода. Чипы расположены в конфигурации 4×3 с зазором между ними 100 μm, площадь активной области каждого чипа составляет 1 mm^2. Конструкция корпуса



Рис. 1. Внешний вид матричного светодиодного излучателя CBM-120-UV. Заимствовано из [10].

предусматривает наличие термистора для измерения температуры и отверстий для крепления к внешнему радиатору [10,11].

Экспериментальные исследования проводились в диапазоне токов от 1 до 18 A. Измерения оптических характеристик (спектра и интегральной мощности излучения) осуществлялись с использованием спектрорадиометрической системы OL770 LED Test and Measurement System (Optronic Laboratories, США). Пространственное распределение спектральных и мощностных параметров по поверхности матрицы определялось с помощью спектрометра Avantes 2048 (Avantes BV, Нидерланды), снабженного волоконным оптическим вводом с микроподвижками, что позволяло за счет сканирования анализировать каждый чип [12].

Температурные распределения (мэппинг) оценивались с помощью инфракрасного (ИК) тепловизионного микроскопа УТК-1 (ИФП СО РАН). Полученные карты позволили проанализировать температурные градиенты как между чипами, так и внутри отдельных чипов, а также установить зависимости температуры от тока и конструктивных особенностей теплоотвода [13].

Особое внимание уделялось корреляции между распределением температуры, тока и оптической мощности, что имеет важное значение при разработке и эксплуатации мощных полупроводниковых УФ источников [14].

Для повышения точности измерений с помощью УТК-1 проводилась предварительная калибровка излучательной способности различных элементов конструкции матрицы и отдельных чипов, заключающаяся в нагреве в прецизионном термостате с шагом 5 °C и регистрации соответствующей интенсивности ИК сигнала (результат представлен на рис. 2, *b*), что позволило учесть различную излучательную способность материалов конструкции. Методика подробно описана в [15].

Результаты и обсуждение

При токах выше 9 A (что соответствует току порядка 0.75 A и плотности $\sim 75\,\mathrm{A/cm^2}$ на один чип) в излучающей матрице начинает формироваться выраженный температурный градиент. Тепловизионный мэппинг показал, что при токе 15 A (допускается по спецификации) температура центральных чипов в среднем на 5 K выше, чем у периферийных. Это связано с менее эффективным горизонтальным теплоотводом в центральной части подложки. На рис. 2, *a* представлено ближнее поле собственного ИК излучения матрицы; в силу симметрии изображена только четверть образца, включающая три периферийных и один центральный чип. Для наглядности интенсивность излучения показана цветовой шкалой: от синего (2100 bit) до красного (3000 bit).

Учитывая температурную чувствительность прямого напряжения $U_f = f(T)$ (температурный коэффициент при малых токах TCU $\approx -0.9\,\mathrm{mV/K}$), повышение температуры центральных чипов приводит к снижению их прямого напряжения. При параллельном соединении чипов это вызывает перераспределение тока в их пользу. В установившемся стационарном режиме это перераспределение компенсируется встречными эффектами, и в системе формируются устойчивые температурный и токовый градиенты: центральные чипы работают при повышенных токовых и тепловых нагрузках. Ожидалось, что увеличение тока через центральные чипы должно привести к росту их оптической мощности. Однако, несмотря на повышенную температуру, подавление квантового выхода излучательной рекомбинации нивелирует этот эффект, и заметного увеличения оптической мощности не наблюдается.

Для этого в первую очередь исследовался сравнительный вид спектральных характеристик излучения центральных и периферийных чипов.

Несмотря на наличие температурного градиента, анализ спектров показал, что как при токе 9 A, так и при токе 15 A пиковая длина волны и ширина спектра остаются равными для центра и периферии (рис. 3). Кроме того, формы спектров излучения оказываются идентичными, что подтверждает стабильность спектрального распределения при зарегистрированных неоднородностях температурного поля. Оценка излучаемой мощности проводилась в относительных единицах по интегралу под спектральной кривой, что позволило сравнивать вклад отдельных чипов в общую оптическую мощность при разных уровнях тока.

Дополнительно было установлено из анализа ближнего поля излучения наличие его неоднородностей,

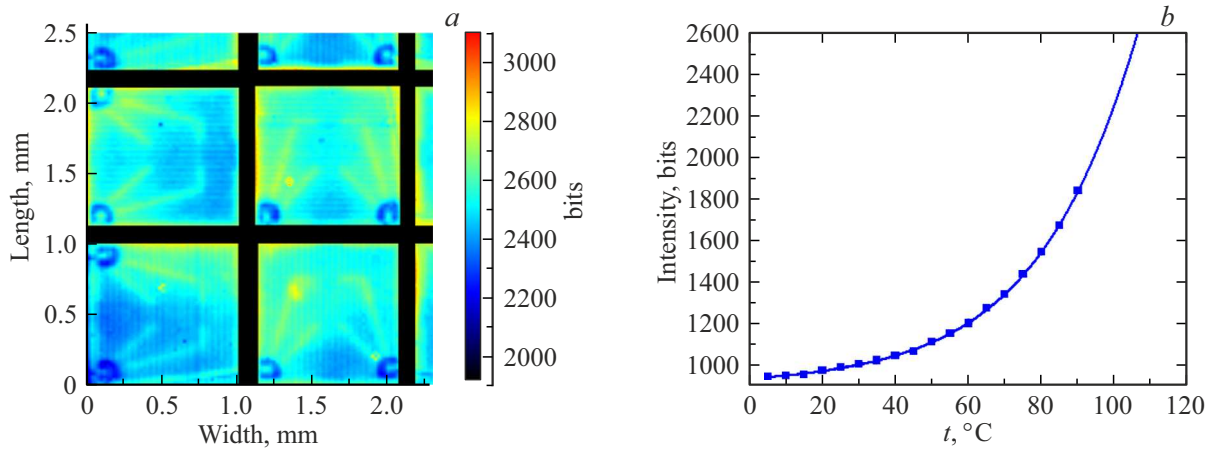


Рис. 2. Карта распределение ИК излучения по УФ матрице (*a*), калибровочная кривая — зависимость ИК излучения центра чипа от температуры (*b*).

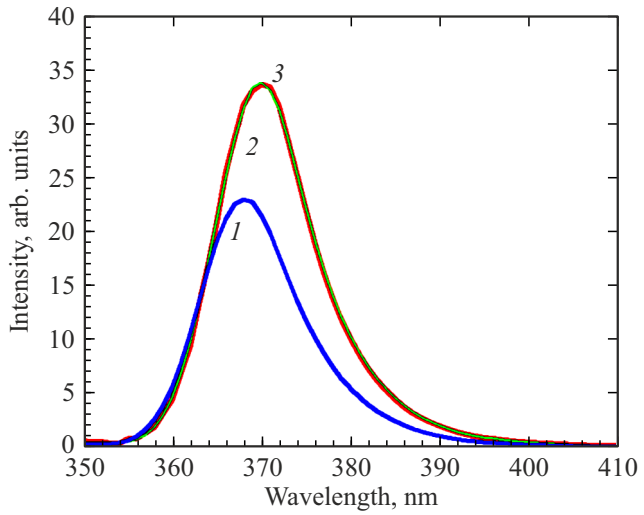


Рис. 3. Спектр излучения от отдельных чипов: *1* — от центрального и периферийного, $I = 9$ A; *2* — центральный, $I = 15$ A; *3* — периферийный, $I = 15$ A.

обусловленных эффектом шнурования тока („current crowding“), проявляющемся в области контактной металлизации и под ней. Этот эффект зависит от конструкции чипа и топологии контактов, приводя к локальному увеличению плотности тока, что может усиливать падение квантового выхода с током („efficiency droop“) и способствовать деградации отдельных участков структуры [16,17]. В нашем случае в диапазоне рабочих плотностей токов через отдельный чип до ~ 150 A/cm^2 наблюдалось заметное шнурование тока.

Заключение

Проведенное экспериментальное исследование электролюминесцентных, электрических и тепловых характеристик мощного УФ матричного излучателя CBM-120-UV ($\lambda \approx 370$ nm) в широком диапазоне рабочих токов позволило установить влияние режимов работы на оптические и тепловые характеристики как матрицы в целом, так и отдельных образующих ее чипов в зависимости от геометрического расположения и оценить факторы, ограничивающие его предельные энергетические возможности. Показано, что при токах выше 9 A (0.75 A через отдельный чип) в матрице формируются температурные градиенты в пределах 5 °C (максимальный абсолютный разогрев при 15 A — 110 °C), которые могут приводить к неравномерному токораспределению между центральными и периферийными чипами вследствие температурной зависимости прямого напряжения. Возникающая положительная обратная связь между температурой и током приводит к стабилизации некоторого неравномерного распределения тока в пользу центральных чипов по мере повышения рабочего тока. Теоретически это может приводить к изменению спектральных и мощностных характеристик отдельных чипов при рассмотрении ближнего поля излучения и, как следствие, к сложному характеру интегральных токовых электролюминесцентных зависимостей.

Однако детальный анализ ближнего поля излучения показал, что до предельных токов порядка 15 A пиковая длина волны и ширина спектра излучения остаются одинаковыми для центральных и периферийных чипов, так же как и мощность излучения с них. Этот результат — парадоксальный на первый взгляд с учетом температурных градиентов, выявленных тепловизионным методом, может быть объяснен совокупностью нескольких причин: 1) сравнительно невысоким значением развиваемых температурных градиентов, 2) частичной компенсацией перераспределения тока в центральные чипы снижением их эффективности за счет разогрева, 3) особенностями токовой спектральной стабильности УФ гетероструктур AlInGaN с малым содержанием In.

Проведенные исследования свидетельствуют о возможности комбинированного детального исследования

с высоким пространственным разрешением температурных и излучательных полей мощных матричных УФ СД-источников с оценкой номинальных и предельных режимов их работы. Последние представляют особый интерес, поскольку многие применения упираются в необходимость больших удельных потоков облученности. По этому показателю УФ излучатели пока уступают видимым и ИК.

Исследования выполнены в ЦКП „Элементная база радиофотоники и наноэлектроники: технология, диагностика, метрология“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] M. Shur, A. Zukauskas. Proc. IEEE, **93** (10), 1691 (2005).
[2] S. Pimputkar, J.S. Speck, S.P. DenBaars, S. Nakamura. Nature Photonics, **3**, 180 (2009).
[3] A. Khan, K. Balakrishnan, T. Katona. Nature Photonics, **2**, 77 (2008).
[4] A.E. Chernyakov et al. Microelectronics Reliability, **79**, 457 (2017).
[5] M. Bogdanov et al. Phys. Status Solidi C, **5** (6), 2070 (2008).
[6] M. Meneghini et al. Phys. Status Solidi A, **207** (5), 1084 (2010).
[7] E.F. Schubert. *Light-Emitting Diodes*, 2nd ed. (Cambridge University Press, 2006).
[8] J.J. Wierer, J.Y. Tsao, D.S. Sizov. Laser & Photonics Reviews, **7** (6), 963 (2013).
[9] N. Narendran et al. J. Crystal Growth, **268** (3–4), 449 (2004).
[10] CBM-120-UV Product Datasheet. Luminus Devices Inc.
[11] S. Pimputkar et al. Nature Photonics, **3**, 180 (2009).
[12] A.E. Chernyakov et al. Microelectronics Reliability, **79**, 457 (2017).
[13] M. Bogdanov et al. Phys. Status Solidi C, **5** (6), 2070 (2008).
[14] A. Khan, K. Balakrishnan, T. Katona. Nature Photonics, **2**, 77 (2008).
[15] А.Е. Черняков, Е.С. Половинкин, А.А. Новиков, С.В. Капустин, А.С. Кузнецов. ФТП, **44** (3), 390 (2010).
[16] A.E. Chernyakov et al. Microelectronics Reliability, **79**, 457 (2017).
[17] M. Bogdanov et al. Phys. Status Solidi C, **5** (6), 2070 (2008).