

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАКАЧКИ АКТИВНОЙ СРЕДЫ ТИТАН-САПФИРОВОГО ЛАЗЕРА ИЗЛУЧЕНИЕМ AlInGaN-СВЕТОДИОДОВ

А. В. Аладов^{1*}, А. Л. Закгейм¹, А. Е. Иванов^{1,2}, А. Е. Черняков¹

УДК 621.373.8

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-3-336-340>

¹ Научно-технический центр микроэлектроники Российской АН,
Санкт-Петербург, Россия; e-mail: aaladov@mail.ioffe.ru

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

(Поступила 9 марта 2022)

Исследованы электролюминесцентные характеристики мощных AlInGaN-светодиодов в режиме больших импульсных токов. Установлены токовые зависимости мощности и спектров излучения светодиодов синие-зеленого диапазона в их взаимосвязи с эффективностью накачки титан-сапфировой активной среды. Оценены достижимые плотности мощности оптической накачки при использовании светодиодов.

Ключевые слова: светодиод, оптическая накачка, спектральные характеристики, титан-сапфировый лазер.

The electroluminescent characteristics of powerful AlInGaN LEDs in the regime of high-pulsed current are investigated. The current dependencies of power and emission spectra of blue-green LEDs are established in their relationship with the efficiency of active medium Ti:Sapphire pumping. The reached values of the optical pumping power density using LEDs are estimated.

Keywords: LED, optical pumping, spectral characteristics, Ti:Sapphire laser.

Введение. Кристаллы сапфира (или корунда), активированные ионами титана ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$, Ti:Sapphire), являются эффективной активной средой для перестраиваемых лазеров ближней ИК-области спектра (680—1100 нм), работающих как в непрерывном, так и в импульсном, включая ультракороткие (фемтосекундные) импульсы, режиме генерации [1—3]. В основном для накачки Ti:Sapphire-лазеров используются вторая гармоника излучения Nd:YAG- и Nd:YLF-лазеров (532, 527 нм), а также накачка излучением полупроводниковых инжекционных лазеров [4—7]. В последние годы наметился значительный прогресс в улучшении энергетических характеристик светодиодов (СД) на основе AlInGaN-наногетероструктур, излучающих в синие-зеленой области спектра (450—530 нм), соответствующей полосе поглощения Ti:Sapphire. В настоящее время AlInGaN-СД синие-зеленого диапазона излучения массово применяются в светотехнике. В связи с этим большинство исследований мощностных и спектральных характеристик, в том числе падения эффективности с изменением тока, проводилось либо в режиме постоянного тока, либо в близком к нему режиме широтно-импульсной модуляции [8, 9]. Использование СД для накачки Ti:Sapphire-лазера с малым временем жизни активатора ~3 нс требует от СД работы в режиме сравнительно коротких импульсов (единицы микросекунд) и достижения при этом максимальной мощности (энергии в импульсе) излучения.

SPECTRAL EFFICIENCY OF THE ACTIVE MEDIUM Ti:SAPPHIRE PUMPING BY AlInGaN LED EMISSION

A. V. Aladov^{1*}, A. L. Zakgeim¹, A. E. Ivanov^{1,2}, A. E. Chernyakov¹ (¹ Scientific and Technical Center for Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia; e-mail: aaladov@mail.ioffe.ru; ² V. I. Ulyanov (Lenin) St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI”, St. Petersburg, Russia)

Настоящая работа посвящена изучению работы сине-зеленых (450—530 нм) AlInGaN-СД в импульсных сильноточных режимах, необходимых для достижения пороговых значений генерации, и анализу взаимодействия излучения СД с активной Ti:Sapphire-средой.

Эксперимент. Исследования проводились на СД наиболее совершенной на сегодняшний день конструкции “UX:3” [10, 11], реализованной в коммерческих СД OSRAM OSTAR LE В Q8W [12]. Отличительная особенность СД “UX:3” — многоточечная геометрия отражающих *n*-контактов, которые благодаря технологии “изолированных колодцев” переносятся и равномерно распределяются по площади *p*-контакта на тыльной стороне кристалла. За счет равномерного распределения тока и вывода света без потерь из-за затенения достигаются рекордные значения выходной оптической мощности и КПД. Размер излучающей площадки кристалла 1.5×1.2 мм.

Схема установки для измерения характеристик СД в импульсном режиме представлена на рис. 1, *а*. Для обеспечения заданного токового режима использован генератор Agilent 8114A 3 с внешним усилителем PicoLAS LDP-V 80-100 V3.3 2, максимальным током до 80 А и напряжением до 100 В. Амплитуда и длительность импульсов тока и излучения СД контролировались осциллографом Tektronix TDS3044B 4. Для измерения светового импульса применялся фотодетектор на основе кремниевого фотодиода THORLABS DET02AFC/M 5. Рабочий цикл выбран таким образом, чтобы избежать теплового воздействия предыдущих импульсов на текущий: $f = 50$ Гц, $\tau = 100$ нс. Спектры электролюминесценции зарегистрированы на спектрофотометре Avantes AvaSpec-2048 10 с разрешением 1 нм.

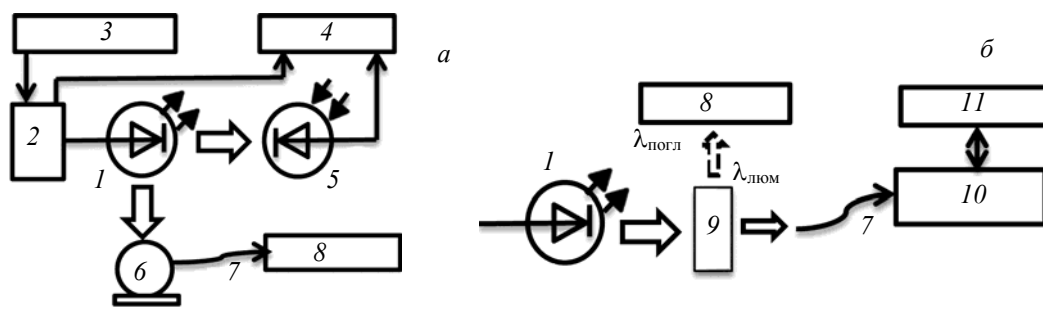


Рис. 1. Схемы установок для измерения параметров СД (*а*) и кристалла Ti:Sapphire (*б*): 1 — светодиод, 2 — усилитель импульсного питания PicoLAS LDP-V 80-100 V3.3, 3 — генератор импульсов Agilent 8114A, 4 — осциллограф Tektronix TDS3044B, 5 — фотодетектор THORLABS DET02AFC/M, 6 — интегрирующая сфера, 7 — волокно 100 мкм, 8 — спектрометрический комплекс OL 770-LED, 9 — кристалл Ti:Sapphire, 10 — спектрофотометр Avantes AvaSpec-2048, 11 — персональный компьютер

Для измерения оптической мощности на постоянном токе использован спектрофотометрический комплекс с интегрирующей сферой OL 770-LED 8 (High-speed LED Test and Measurement system) [13]. В импульсном режиме мощность излучения измерялась быстродействующим фотоприемником THORLABS DET02AFC/M 5, откалиброванным в значениях абсолютной мощности с помощью указанного комплекса. Эксперимент проведен на кристалле Ti:Sapphire 9 с концентрацией [Ti] = 0.055 ат.% размером 20×6×8 мм, для которого измерен коэффициент поглощения в диапазоне 400—650 нм с помощью комплекса OL 770-LED. Для регистрации спектров люминесценции кристалла Ti:Sapphire применялся спектрофотометр Avantes AvaSpec-2048 10 (рис. 1, *б*).

Результаты и их обсуждение. Вид и положение спектров излучения СД изменяются с увеличением тока питания. Для количественной оценки изменения спектра излучения обычно достаточно двух параметров — смещения длины волны максимума $\lambda_{\text{макс}}$ и изменения полуширины $\Delta\lambda_{0.5}$ (ширины спектра излучения на уровне половины максимума). На рис. 2, *а* показано изменение этих параметров в зависимости от тока для синего и зеленого СД. Можно выделить область токов до ~ 10 А с сильным изменением $\lambda_{\text{макс}}$ и $\Delta\lambda_{0.5}$ и область токов >10 А, где указанные параметры изменяются слабо, стремясь к насыщению.

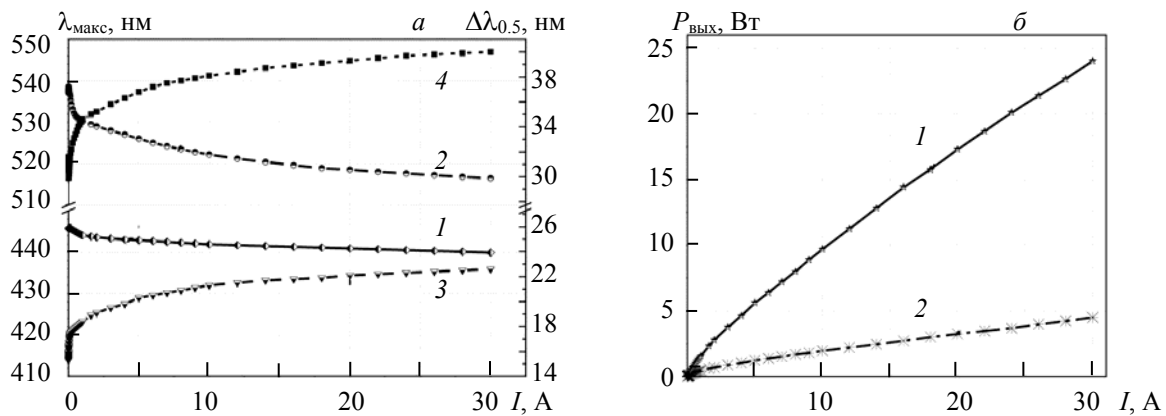


Рис. 2. Зависимости параметров спектра излучения λ_{max} (1, 2) и $\Delta\lambda_{0.5}$ (3, 4) (а) и оптической мощности $P_{\text{вых}}$ (б) от тока для синих (1, 3) и зеленых светодиодов (2, 4)

При возрастании тока происходит “синее” смещение λ_{max} в область более коротких длин волн и увеличение $\Delta\lambda_{0.5}$. Для зеленых СД смещение λ_{max} при максимальном токе 30 А составляет 27 нм, для синих — 6 нм. Для зеленого СД $\Delta\lambda_{0.5}$ увеличивается с 30 до 40 нм, для синих — с 15 до 22 нм, т. е. синие СД обладают большей токовой стабильностью спектра излучения.

На рис. 2, б показана зависимость оптической мощности от тока. Для токов >10 А имеет место отклонение от линейности, физической причиной которого является снижение квантового выхода из-за возрастания безызлучательной оже-рекомбинации [14]. При этом абсолютные значения $P_{\text{вых}}$ при всех токах для синих СД значительно выше, чем для зеленых: для первых 25 Вт, а для вторых 5 Вт при токе 30 А, т. е. оптическая выходная мощность синего СД почти в пять раз выше аналогичной для зеленого. Характер зависимостей $P_{\text{вых}}$ от тока показывает, что рабочий диапазон токов СД не ограничен 30 А, возможно его дальнейшее увеличение при оценке влияния на ресурс работы.

Работа лазера во многом определяется эффективностью поглощения накачки в активной среде при возбуждении ионов активатора, в нашем случае Ti^{3+} . На рис. 3 представлены спектры излучения синего и зеленого СД с исходными (на малом токе) значениями $\lambda_{\text{max}} = 446$ и 540 нм на фоне спектра поглощения Ti:Sapphire (кривая 5), усредненного по двум поляризациям. Как видно, спектр СД зеленой области свечения с исходной $\lambda_{\text{max}} = 540$ нм (кривые 3 и 4) при увеличении тока смещается к максимуму полосы поглощения Ti:Sapphire , в то время как спектр СД синей области свечения с исходной $\lambda_{\text{max}} = 446$ нм (кривые 1 и 2) смещается в противоположную сторону уменьшения коэффициента поглощения. Для оценки эффективности поглощения излучения СД рассчитаны интегральные коэффициенты поглощения $k_{\text{инт}}$, учитывающие спектральное распределение СД-излучения:

$$k_{\text{инт}} = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} I(\lambda)k(\lambda) / \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} I(\lambda),$$

где $I(\lambda)$ — спектральное распределение излучения СД; $k(\lambda)$ — спектральное распределение коэффициента поглощения Ti:Sapphire . Интегрирование проводилось в диапазоне длин волн $\lambda_1 = 400$ нм и $\lambda_2 = 650$ нм, для излучений синего и зеленого СД $k_{\text{инт}} = 0.45$ и 0.9 см^{-1} . Отметим, что за счет смещения λ_{max} к максимуму поглощения Ti:Sapphire и увеличения $\Delta\lambda_{0.5}$ при изменении тока от 100 мА до 30 А коэффициент поглощения увеличивается на 25 % для зеленых СД. Для синих СД, несмотря на смещение λ_{max} от пика поглощения Ti:Sapphire , коэффициент поглощения увеличивается на 15 % только за счет увеличения $\Delta\lambda_{0.5}$. Стоксовы потери для зеленых СД на 15 % меньше, чем для синих. Однако достигнутая оптическая мощность синих СД пятикратно превышает соответствующую мощность зеленых СД. Таким образом, отмеченные выше преимущества спектрального согласования излучения СД в диапазоне 520—540 нм с Ti:Sapphire не компенсируют преимуществ оптической мощности накачки синих СД.

На рис. 3 (кривая б) показана зависимость интенсивности люминесценции Ti:Sapphire от оптической мощности СД синего диапазона. Спектры излучения СД практически не зависят от длительности импульса накачки даже при большом токе ($I = 30$ А) в диапазоне длительностей $\tau = 0.1$ —6.0 мкс, сравнимых со временем жизни возбужденного состояния Ti^{3+} (~ 3 мкс). Как видно, зависимость ин-

тенсивности люминесценции Ti:Sapphire от оптической мощности СД накачки практически линейная. Лишь при больших токах наблюдается небольшое отклонение от линейности в пределах 5 % из-за незначительного рассогласования спектров накачки и поглощения Ti:Sapphire.

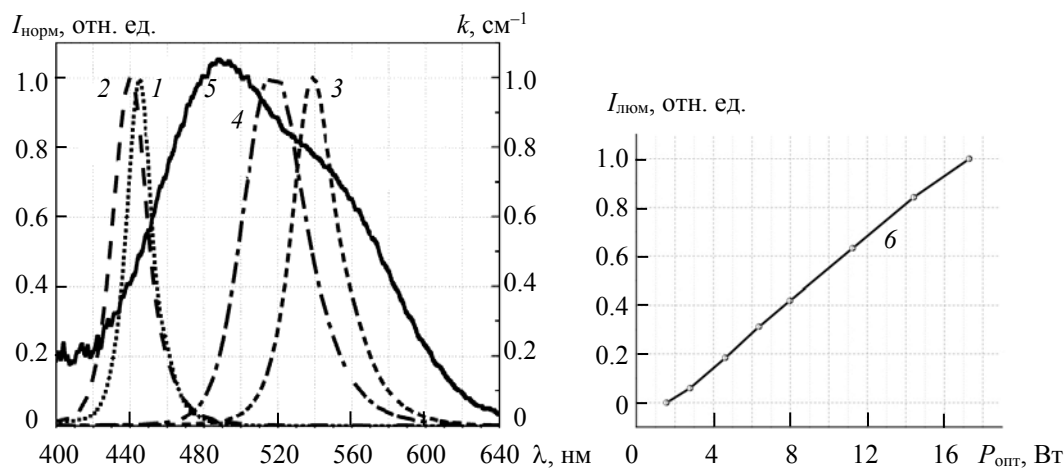


Рис. 3. Нормированные спектры излучения синего СД $\lambda_{\text{макс}} = 446$ нм (1 — 100 мА, 2 — 30 А) и зеленого СД с исходным спектром $\lambda_{\text{макс}} = 540$ нм (3 — 100 мА, 4 — 30 А) на фоне спектра поглощения Ti:Sapphire (5) и зависимость интенсивности люминесценции Ti:Sapphire от мощности накачки синим СД (6)

Таким образом, для разработок систем СД-накачки перспективно использование высокоомощных синих СД с кристаллами UX:3, конструкция которых благодаря высокой эффективности и работоспособности при больших токах обеспечивает достижение максимальных для СД оптических мощностей, а их спектр излучения отвечает условиям достаточного поглощения в Ti:Sapphire.

Закключение. Современные мощные AlInGaN-светодиоды синего (440—470 нм) и зеленого (510—530 нм) диапазонов спектра при работе в импульсном режиме позволяют достичь оптической выходной мощности 25 и 5 Вт/мм². Спектры излучения исследуемых светодиодов хорошо согласуются со спектром поглощения Ti:Sapphire, что делает перспективным использование таких светодиодов для накачки твердотельных лазеров Ti:Sapphire. С точки зрения энергетических и спектральных характеристик лучшими на сегодняшний день являются мощные синие светодиоды компании Osram Semiconductors. Эффективность накачки, определяемая согласованием спектров излучения светодиодов и поглощения Ti:Sapphire, остается практически постоянной во всем диапазоне рабочих токов. Плотность мощности накачки в импульсном режиме ~ 2500 Вт/см² при токе 30 А согласуется с пороговой мощностью в работах [15, 16]. Оптическая мощность, получаемая от светодиодов, не уступает аналогичным параметрам полупроводниковых AlInGaN-лазеров данного спектрального диапазона [17], которые применялись для прямой накачки Ti:Sapphire. Мощность таких лазеров ~ 10 Вт для синего и 1.5 Вт для зеленого диапазонов.

Исследования параметров светодиодов выполнены в Центре коллективного пользования “Элементная база радиофотоники и нанoeлектроники: технология, диагностика, метрология”.

- [1] P. F. Moulton. J. Opt. Soc. Am. B, **3**, N 1 (1986) 125—133
- [2] P. Albers, E. Stark, G. Huber. J. Opt. Soc. Am. B, **3**, N 1 (1986) 134—139
- [3] K. F. Wall, A. Sanchez. The Lincoln Lab. J., **2**, N 3 (1990) 447—462
- [4] A. Hoffstädt. IEEE J. Quantum Electron., **33**, N 10 (1997) 1850—1863
- [5] J. Seres, A. Müller, E. Seres, K. O’keeffe, M. Lenner, Richard F. Herzog, D. Kaplan, C. Spielmann, F. Krausz. Opt Lett., **28**, N 19 (2003) 1832—1834
- [6] S. Sawai, A. Hosaka, H. Kawachi, K. Hirosawa, F. Kannari. Appl. Phys. Express, **7**, N 2 (2014) 022702
- [7] K. Gürel, V. J. Wittwer, M. Hoffmann, C. J. Saraceno, S. Hakobyan, B. Resan, A. Rohrbacher, K. Weingarten, S. Schilt, T. Südmeyer. Opt. Exp., **23**, N 23 (2015) 30043—30048

-
- [8] **S. Yu. Karpov.** Opt. Quantum Electron., **47**, N 6 (2015) 1293—1303
- [9] **Н. М. Шмидт, Е. И. Шабунина, А. Е. Черняков, А. Е. Иванов, Н. А. Тальнишних, А. Л. Закгейм.** Письма в ЖТФ, **46**, № 24 (2020) 45—48
- [10] **O. V. Shchekin, J. E. Epler, T. A. Trottier, T. Margalith, D. A. Steigerwald, M. O. Holcomb, P. S. Martin, M. R. Krames.** Appl. Phys. Lett., **89**, N 7 (2006) 071109
- [11] **A. Laubsch, M. Sabathil, J. Baur, M. Peter, B. Hahn.** IEEE Trans. Electron. Devices, **57**, N 1 (2010) 79—87
- [12] https://www.osram.com/ecat/OSRAM%20OSTAR%C2%AE%20Projection%20Compact%20LE%20B%20Q8WP/com/en/class_pim_web_catalog_103489/prd_pim_device_2191200/
- [13] **А. Л. Закгейм, А. Е. Черняков.** Светотехника, **4** (2013) 51—56
- [14] **J. Piprek.** Phys. Status Solidi (a), **207**, N 10 (2010) 2217—2225
- [15] **J. Eggleston, L. Deshazer, K. Kangas.** IEEE J. Quantum Electron., **24**, N 6 (1988) 1009—1015
- [16] **P. Pichon, A. Barbet, J.-P. Blanchot, F. Druon, F. Balembois, P. Georges.** Opt. Lett., **5**, N 10 (2018) 1236—1239
- [17] **Han Liu, Sijia Sun, Li Zheng, Geyang Wang, Wenlong Tian, Dacheng Zhang, Hainian Han, Jiangfeng Zhu, Zhiyi Wei.** Microwave Opt. Technol. Lett., **63**, N 8 (2021) 2135—2143