О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЮМИНОФОРОВ В КВАНТРОНАХ ЛАЗЕРОВ С СОЛНЕЧНОЙ НАКАЧКОЙ

С. А. Бахрамов [1*], А. А. Шерниёзов [1], Ш. Д. Пайзиев [1], Х. Ф. Зикриллаев [1], Г. А. Халиков [1], Х. М. Махмудов [1], М. З. Исмаилов [1], Д. Э. Пайзиева [1], Т. Г. Хотченкова [2]

УДК 535.37

[1] Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У. А. Арифова АН Республики Узбекистан, 100125, Ташкент, Узбекистан; e-mail: bahramov@mail.ru
[2] Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

(Поступила 2 декабря 2020)

Исследована интенсивность люминесценции лазерного кристалла $Nd^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$, возбуждаемого излучением синего светодиода с $\lambda \approx 454$ нм, имитирующего ультрафиолетовую часть солнечного спектра, до и после применения спектрального преобразователя на люминофоре $Ce^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$. Установлено, что при использовании такого люминофора интенсивность люминесценции $Nd^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$ при $\lambda \approx 1064$ нм в ~3 раза выше, чем без него. Показано, что кристаллы иттрий-алюминиевого граната, активированные ионами церия, — перспективные люминофоры для введения в квантроны неодимовых лазеров с солнечной накачкой с целью повышения ее эффективности.

Ключевые слова: *лазер с солнечной накачкой, иттрий-алюминиевый гранат, люминофор.*

We investigated the luminescence intensity of a $Nd^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$ laser crystal excited by the radiation of a blue LED with $\lambda \approx 454$ нм, simulating the ultraviolet part of the solar spectrum, before and after using of a spectral converter based on the $Ce^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$ phosphor. It was found that while we used such a phosphor, the luminescence intensity of $Nd^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$ at $\lambda \approx 1064$ nm was approximately three times higher than without it. Thus, yttrium-aluminum garnet crystals doped with cerium ions are promising luminophores for the introduction in quanthrons of solar-pumped neodymium lasers for increasing their efficiency.

Keywords: *solar laser, yttrium-aluminum garnet, luminophore.*

Введение. Одно из перспективных направлений использования солнечной энергии — создание лазеров с солнечной накачкой. Первый такой лазер создан в 1963 г. в США на кристалле $CaF_2:Dy^{2+}$ с охлаждением жидким неоном и выходной мощностью ~1 Вт [1]. С тех пор подобные лазерные системы постоянно совершенствуются. В частности, за счет повышения концентрации солнечного излучения на активном лазерном элементе удалось увеличить коэффициент сбора от 0.23 Вт/м^2 [2] до 30 Вт/м^2 [3]. Используемая в лазерах с солнечной накачкой активная среда $Nd^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$ (Nd:YAG) теоретически может поглощать лишь ~15 % солнечной радиации. В связи с этим актуально увеличение коэффициента сбора путем трансформации неиспользуемой части спектра солнечного излучения в "рабочие" полосы поглощения активной среды. Этой цели можно достигнуть путем введения в активную среду таких сенсибилизаторов люминесценции Nd^{3+}, как Cu^+ [4], Sn^{2+} [5], Cr^{3+} [6], либо использованием внешних люминофоров с подходящими полосами поглощения и люминесценции. Последний способ позволяет обойти сложности, связанные со стабилизацией зарядового состояния указанных сенсибилизаторов люминесценции при введении их в матрицу, снизить тепловыделение в ак-

---

USEFULNESS OF PHOSPHORES IN QUANTHRONS OF SOLAR-PUMPED LASERS

S. A. Bakhramov [1*], A. A. Sherniyozov [1], Sh. D. Payziyev [1], Kh. F. Zikrillayev [1], G. A. Khalikov [1], Kh. M. Makhmudov [1], M. Z. Ismailov [1], D. E. Payzieva [1], T. G. Khottchenkova [2] (*[1] Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, 100125, Uzbekistan; e-mail: bahramov@mail.ru; [2] B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 220072, Belarus*)

тивном лазерном элементе, обусловленное стоксовыми потерями в таких сенсибилизаторах, и представляется более простым. Тепловыделение в накачиваемых солнечным излучением соактивированных лазерных элементах не только ведет к повышению расходимости и снижению КПД генерируемого излучения, но и может сопровождаться их растрескиванием [3, 6, 7].

Методом компьютерного моделирования показана возможность двукратного увеличения эффективности накачки Nd:YAG-лазерных стержней (Ø = 10 мм, *l* = 50 мм) при использовании в качестве внешних люминесцентных конверторов солнечного излучения кристаллических пластин Cr:GSGG [8], Cr:LiCAF [9] и Ti:сапфира [10]. Однако экспериментальные исследования с такими конверторами не проводились. В настоящей работе в качестве внешнего люминесцентного конвертора использован люминофор Ce^{3+}:$Y_3Al_5O_{12}$ (Ce:YAG). Выбор последнего обусловлен его доступностью — данный материал широко используется в качестве преобразователя цвета в белых светодиодах. Сравнительный анализ спектров поглощения и люминесценции Ce:YAG с солнечным спектром и спектром поглощения кристалла Nd:YAG показывает, что для изучения целесообразности применения такого люминофора в квантронах Nd:YAG-лазеров с солнечной накачкой достаточно использовать в качестве модели УФ-области солнечного излучения коммерческие синие светодиоды, излучающие в полосе полушириной ~25 нм при $\lambda \approx 450$ нм.

Методика эксперимента. На рис. 1 представлена экспериментальная установка, которая включает в себя синий светодиод Ce:YAG *2* с источником питания *1*, кристалл Nd:YAG *4*, помещенный в осветительную камеру *3*, оптический спектрометр высокого разрешения марки HR4000 *7* и персональный компьютер *8*. Стенки осветительной камеры имеют отражательную способность ~90 %. Размеры стержня оптимизированы с целью его равномерного освещения [11, 12]. Рабочая длина стержня Nd:YAG 40 мм, диаметр 5 мм, поверхность шероховатая. Люминесцентное излучение Nd:YAG *5* вводилось в оптическое волокно *6*, которое подключалось к спектрометру. Спектрометр подключен к ПК, на котором проводился анализ и обработка спектров.

На рис. 2 показаны спектры излучения и конструкция используемых светодиодных чипов. В качестве источника освещения выбраны коммерчески доступные 10-Вт синие светодиодные чипы с желтым люминофором и без него.

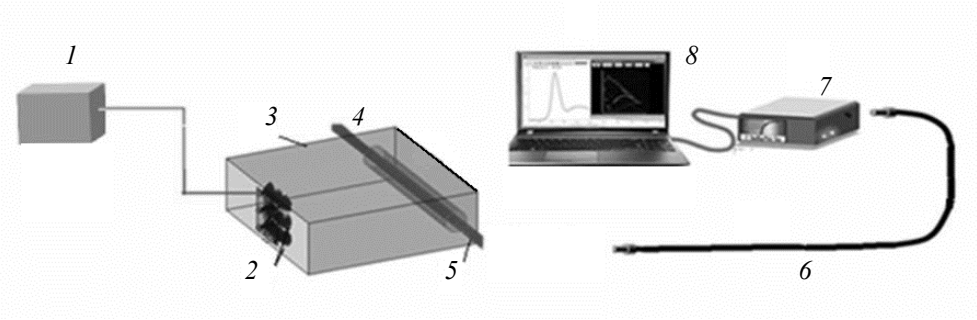


Рис. 1. Экспериментальная установка: *1* — источник питания, *2* — светодиоды, *3* — осветительная камера, *4* — кристалл Nd:YAG, *5* — люминесцентное излучение, *6* — оптическое волокно, *7* — спектрометр, *8* — ПК

Результаты и их обсуждение. На рис. 3 представлены стандартный спектр излучения, спектры поглощения кристалла Nd:YAG, возбуждения и люминесценции люминофора Ce:YAG. Как видно, последний имеет две полосы возбуждения люминесценции в УФ-области, а его полоса люминесценции перекрывается с достаточно интенсивными полосами поглощения Nd:YAG. Согласно оценкам, коэффициент перекрытия полос возбуждения люминесценции Ce:YAG со спектром солнечного излучения ~10 %. Поскольку полосы возбуждения люминофора, а значит, и его поглощения практически не экранируют абсорбционные полосы ионов Nd^{3+} в YAG при использовании люминофора Ce:YAG в качестве внешнего спектрального преобразователя, часть этой доли солнечного спектра может вносить дополнительный вклад в эффективность накачки Nd:YAG-лазера. Чтобы оценить влияние такого люминофора на эффективность люминесценции Nd:YAG, не требуется моделирование остальной части спектра солнечного излучения.

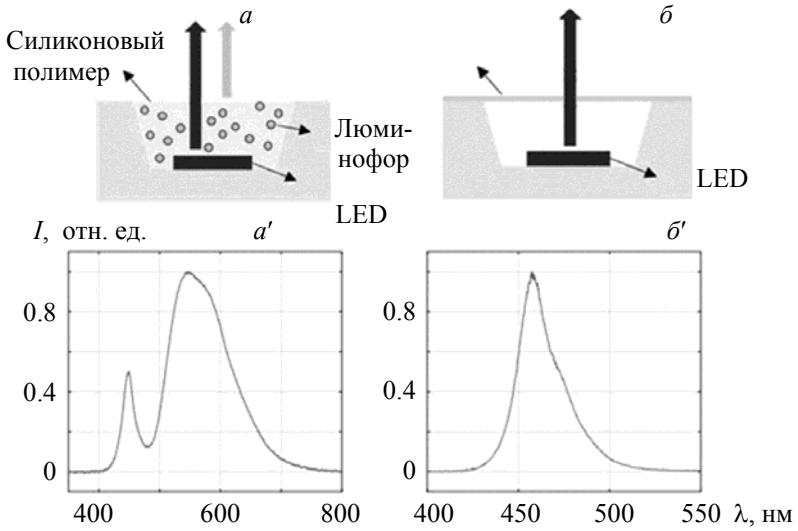


Рис. 2. Светодиодные чипы с преобразователем цвета (*а*) и без него (*б*) и их спектры излучения (*а′* и *б′*)

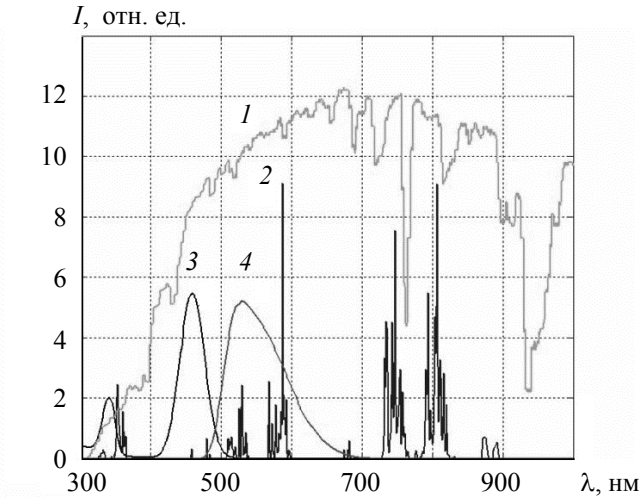


Рис. 3. Стандартный спектр солнечного излучения (*1*), спектры поглощения Nd:YAG (*2*), возбуждения люминесценции (*3*) и люминесценции Ce:YAG (*4*)

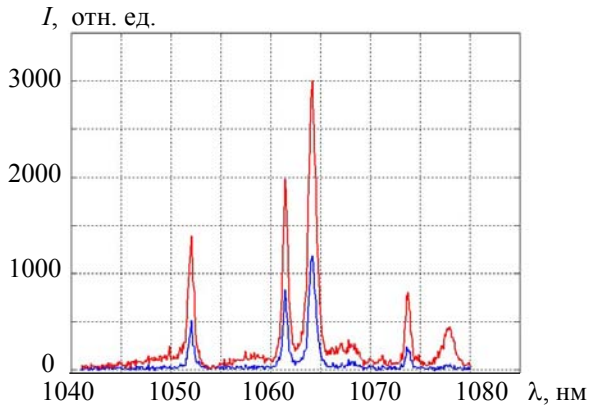


Рис. 4. Спектр люминесценции Nd:YAG-стержня при возбуждении светодиодом с преобразователем цвета (верхняя кривая) и без него (нижняя)

На рис. 4 приведены спектры люминесценции кристалла при возбуждении светодиодом с люминофором и без него. Как видно, в первом случае интенсивность люминесценции Nd:YAG увеличивается в ~3 раза. Это объясняется тем, что полоса излучения синего светодиода перекрывается лишь с тремя слабоинтенсивными полосами поглощения Nd:YAG (ср. рис. 2, *б*′ и рис. 3, кривая *2*), а полоса люминесценции Ce:YAG — с серией многократно более интенсивных полос поглощения (ср. рис. 3, кривые *4* и *2*).

Заключение. Применение спектральных преобразователей на основе Ce^{3+}:YAG увеличивает эффективность неодимовых лазеров с солнечной накачкой. Использование внешних люминофоров потенциально приводит к повышению эффективности подобных лазеров и на других активных средах.

Работа выполнена в рамках проектов MRB-AN-2019-21 и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований №Ф19УЗБГ-005 (совместный Узбекско-Белорусский исследовательский проект) “Разработка и исследование элементной базы твердотельных лазеров с солнечной накачкой” и ОТ-Ф3-10 “Исследования и развитие физических основ процессов преобразования солнечной энергии в энергию лазерного излучения”.

[1] **Z. J. Kiss, H. R. Lewis, R. C. Duncan.** Appl. Phys. Lett., **2** (1963) 93—94
[2] **H. Arashi, Y. Oka, N. Sasahara, A. Kaimai, M. Ishigame.** Jpn. J. Appl. Phys., **23** (1984) 1051—1053
[3] **Y. Yabe, T. Ohkubo, S. Uchida, M. Nakatsuka, T. Funatsu, A. Mabuti, A. Oyama, Y. Nakagawa, T. Oishi, K. Daito, B. Behgol, Y. Nakayama, M. Yoshida, S. Motokoshi, Y. Sato, C. Baasandash.** Appl. Phys. Lett., **90** (2007) 261120—261123
[4] **Г. Е. Малашкевич, А. Г. Базылев, А. Л. Блинов, М. А. Борик.** Журн. прикл. спектр., **54**, № 2 (1991) 319—321
[5] **Г. Е. Малашкевич, А. Г. Базылев, А. Л. Блинов, М. А. Борик, А. П. Войтович, В. С. Калинов, В. Н. Тадэуш.** Квант. электрон., **18**, № 6 (1991) 661—666
[6] **D. Liang, C. R. Vistas, B. D. Tiburcio, J. Almeida.** Solar Energy Mater. Solar Cells, **185** (2018) 75—79
[7] **T. H. Dinh, T. Ohkubo, T. Yabe, H. Kuboyama.** Opt. Lett., **37** (2012) 2670—2672
[8] **Sh. Payziyev, Kh. Makhmudov.** J. Renewable and Sustainable Energy, **8** (2016) 015902 (1—10)
[9] **Sh. Payziyev, Kh. Makhmudov.** Opt. Commun., **380** (2016) 57—60
[10] **Sh. Payziyev, Kh. Makhmudov, Yasser A. Abdel-Hadi.** Proc. Int. Conf. “Fundamental and Applied Problems of Physics”, June 13—14, 2017, Tashkent, 200—203 (2017)
[11] **A. Sherniyozov, Sh. Payziyev.** Uzbek J. Phys., **21**, N 4 (2019) 245—249
[12] **A. A. Sherniyozov, M. Z. Ismailov, G. A. Khalikov, Sh. D. Payziyev.** Uzbek J. Phys., **21**, N 6 (2019) 370—374