

ласти СД, что сводит к минимуму тепловыделение из-за безызлучательной рекомбинации и, как следствие, увеличивает стабильность и срок службы СД источника.

Представленная конструкция ЭСДИ с голографическим фильтром (FWHM 0,5°) и дополнительной линзой обеспечивает равномерное ( $\pm 1,5\%$ ) освещение рабочей области 30×30 мм на расстоянии 550 мм и более от источника, что обеспечивает удобство при калибровке. Рабочие расстояния 600–700 мм оптимальны для рутинных калибровок на калибровочной установке УФ-радиометров.

Показано, что тепловое равновесие ЭСДИ при рабочем токе 500 мА достигается через 600 секунд после включения (небольшое падение интенсивности на 1,5%). После этого интенсивность излучения медленно падает со скоростью 0,17% в час. Этот хороший результат получен благодаря как стабильности тока и температуры, обеспечиваемым источником питания Agrovo Instruments ComboSource 6310 (источник тока – стабильность < 10 ppm, 1 час, регулятор температуры – стабильность 0,002 °С, 1 час), так и в следствие очень медленной деградации УФ СД, что возможно только при малых температурах перегрева СД кристалла. Дополнительные измерения температуры СД кристалла с помощью

тепловизора показали, что, перегрев составил всего лишь 25 °С при токе 500 мА. Такие низкие температуры перегрева обеспечиваются особенностями конструкции СД.

Таким образом создан компактный эталонный светодиодный источник излучения УФ С для калибровки и поверки УФ-радиометров, что обеспечивает высокую точность измерения начинающих широко внедряться новых типов СД излучателей УФ С.

#### Литература

1. CIE Position Statement on the Use of Ultraviolet (UV) Radiation to Manage the Risk of COVID-19 Transmission, May 2020.
2. Broadband Radiometric LED Measurements / G. P. Eppeldauer [et al.] // Proc. of SPIE, 2016. – Vol. 9954. – P. 99540J-01–99540J-15.
3. Nikanenko, S. V. Compact reference UVC LED source / S. V. Nikanenko, A. V. Danilchuk, E. V. Lutsenko // Ukrainian Metrological Journal. – 2020. – № 3A. – P. 140–144.
4. Nikanenko, S. V. Reference UVC LED Source / S. V. Nikanenko, A. V. Danilchuk, E. V. Lutsenko // New Developments and Applications in Optical Radiometry (NEWRAD 2021): Proc. 14<sup>th</sup> Internat. Conf., NIST, Boulder, USA, 21–24 June 2021. – Boulder: Local Organizing Committee, 2021. – P. 134–135.

УДК 621.3.038.825.2

#### СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛА Tb<sup>3+</sup>:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>

Демеш М.П.<sup>1</sup>, Горбаченя К.Н.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>1</sup>, Волкова Е.А.<sup>2</sup>, Мальцев В.В.<sup>2</sup>, Копорулина Е.В.<sup>2</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий БНТУ  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** Детально исследованы лазерно-спектроскопические свойства кристалла Tb<sup>3+</sup>:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>. Зарегистрированы спектры поглощения и люминесценции в поляризованном свете. Определено время жизни возбужденного состояния <sup>5</sup>D<sub>4</sub>. Рассчитаны коэффициенты ветвления люминесценции и спектры сечения стимулированного испускания.

**Ключевые слова:** тербий, ортоборат, поглощение, люминесценция.

#### SPECTROSCOPIC PROPERTIES OF Tb<sup>3+</sup>:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> CRYSTAL

Demesh M.<sup>1</sup>, Gorbachenya K.<sup>1</sup>, Kisel V.<sup>1</sup>, Volkova E.<sup>2</sup>, Maltsev V.<sup>2</sup>, Koporulina E.<sup>2</sup>, Kuleshov N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Center for Optical Materials and Technologies of BNTU  
Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University  
Moscow, Russia

**Abstract.** Spectroscopic properties of Tb<sup>3+</sup>:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> crystal were investigated in detail. The polarized absorption and luminescence spectra were recorded, as well as a lifetime of the <sup>5</sup>D<sub>4</sub> excited state is determined. Stimulated emission cross sections and luminescence branching ratios were found.

**Key words:** terbium, orthoborate, absorption, luminescence.

Адрес для переписки: Демеш М.П., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: maxim.demesh@bntu.by

Развитие лазерных диодов как источников накачки, излучающих в синей области спектра, привело к увеличению интереса к исследованию лазеров, генерирующих в видимом спектральном диапазоне [1]. Неоспоримым преимуществом таких лазеров является отсутствие нелинейных преобразований: удвоения основной частоты излучения, а также параметрической генерации.

В текущем десятилетии была получена эффективная генерация на семействе кристаллов фторидов с ионами тербия [2] на переходах, указанных на рис. 1 (помечены кружком).

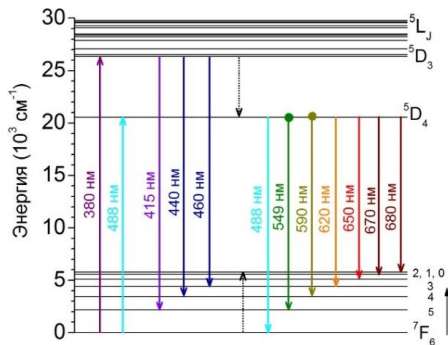


Рисунок 1 – Энергетическая схема уровней Tb<sup>3+</sup>

Кристаллы фторидов обеспечивают малую силу кристаллического поля [3], что особенно важно для получения генерации на ионах тербия. Среди всего многообразия оксидных кристаллов можно выделить группы тех, которые также обладают малым значением силы кристаллического поля. К таким материалам относятся кристаллы ортоборатов, в частности YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> (YAB).

В данной работе представлены оптические свойства кристалла Tb(35 ат. %):YAB, выращенного методом раствор-расплавной кристаллизации. Относительно высокое содержание ионов-активаторов обусловлено требованием к обеспечению эффективного поглощения в видимой области спектра ввиду запрещенных правилами отбора по спину переходов.

Спектры сечения поглощения исследуемого материала в видимой области спектра показаны на рис. 2. Кристаллы обладают выраженной анизотропией поглощения, причем более интенсивными являются полосы, соответствующие σ-поляризации

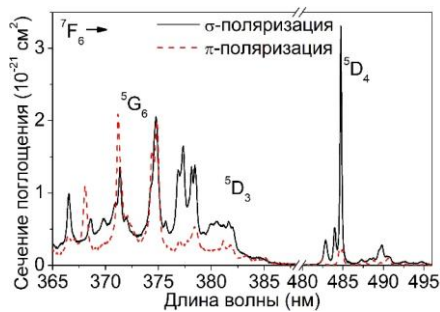


Рисунок 2 – Спектр поглощения кристалла Tb:YAB

На переходе  ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$  пиковое значение сечения поглощения составляет  $3,2 \times 10^{-21} \text{ см}^2$  (σ-поляризация) и приходится на длину волны 484,7 нм. Данное значение на порядок превышает аналогичное для тербийсодержащих кристаллов фторидов. Это делает кристаллы Tb:YAB привлекательными лазерными средами при накачке InGaN лазерными диодами голубой области спектра.

Также накачка данных сред возможна в диапазоне 370–380 нм более доступными лазерными диодами ультрафиолетовой области спектра. Эффективное заселение верхнего лазерного уровня  ${}^5D_4$  происходит благодаря процессу кросс-релаксации  ${}^5D_3 \rightarrow {}^5D_4 : {}^7F_6 \rightarrow {}^7F_0$ . Значения сечения поглощения в данном интервале длин волн не превышают  $2 \times 10^{-21} \text{ см}^2$ , однако в данном случае нет необходимости температурной стабилизации длины волны излучения источника накачки.

Спектры люминесценции кристалла Tb:YAB были зарегистрированы в поляризованном свете в диапазоне 470–700 нм при накачке ЛД на длине волны 488 нм. Полученные спектры были использованы для нахождения коэффициентов ветвления люминесценции β и расчета спектров сечений стимулированного испускания (СИ). Результаты расчетов для показаны на рис. 3.

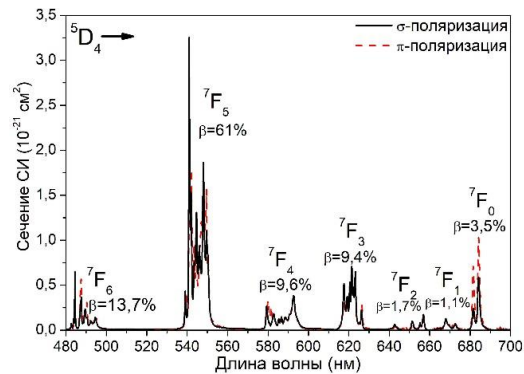


Рисунок 3 – Спектры сечения стимулированного испускания кристалла Tb:YAB

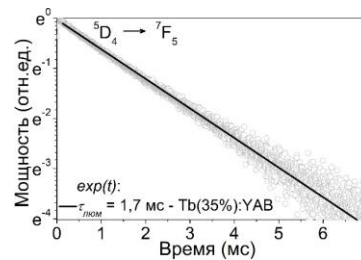


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки

Из представленного рисунка видно, что основная часть энергии, испускаемой с уровня  ${}^5D_4$ , (около 60 %) приходится на зеленую область спектра ( $\lambda \sim 545 \text{ нм}$ ). Наиболее интенсивный переход  ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$  характеризуется пиковым значением сечения СИ  $3,4 \times 10^{-21} \text{ см}^2$  на длине волны 541 нм для σ состояния поляризации. Генерация возможна и на переходе  ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_4$ , однако она

полностью подавляется поглощение из возбужденного состояния для длин волн более 600 нм [2].

На рис. 4 показана кинетика затухания люминесценции кристалла Tb:YAF на переходе  $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ . Возбуждение кристалла осуществлялось световыми импульсами наносекундной длительности на длине волны 488 нм, люминесценция регистрировалась на длине волны 545 нм. Кинетика затухания люминесценции хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией с постоянной времени затухания 1,7 мс. Учитывая излучательное время жизни метастабильного уровня  $^5D_4$ , равное 1,83 мс [4], квантовый выход люминесценции составил около 93%. Достаточно высокое значение квантового выхода для кристалла с содержанием ионов тербия 35 ат.% обусловлено в первую очередь большим энергетическим зазором (около  $14500 \text{ см}^{-1}$ ) между уровнем  $^5D_4$  и верхним

уровнем мультиплета  $^7F_1$ , а также отсутствием кросс-релаксационных процессов. Это указывает на то, что для лазерных применений можно использовать высококонцентрированные образцы (вплоть до 100 ат.%) без существенного сокращения жизни верхнего лазерного уровня.

#### Литература

1. Out of blue: semiconductor laser pumped visible rare-earth doped lasers / C. Kraenkel [et al.] // *Las. Photon. Rev.* – 2016. – Vol. 10, № 2. – P. 548–564.
2. Efficient continuous wave laser operation of Tb<sup>3+</sup>-doped fluoride crystals in the green and yellow spectral regions / P. W. Metz [et al.] // *Las. Photon. Rev.* – 2016. – Vol. 10, № 2. – P. 335–344.
3. Dorenbos, P. The 5d level positions of the trivalent lanthanides in inorganic compounds / P. Dorenbos // *J. Lumin.* – 2000. – Vol. 91. – P. 155–176.
4. Transitions intensities and cross-sections of Tb<sup>3+</sup> ions in YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> crystal / M. Demesh [et al.] // *OSA Continuum.* – 2018. – Vol. 57, № 21. – P. 5923–5928.

УДК 621.3.038.825.2

### ЛАЗЕР НА КРИСТАЛЛЕ Pr:YLF ПРИ НАКАЧКЕ InGaN ЛАЗЕРНЫМ ДИОДОМ

Демеш М.П.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>1</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>,  
Низамутдинов А.С.<sup>2</sup>, Морозов О.С.<sup>2</sup>, Кораблева С.Л.<sup>2</sup>, Семашко В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий БНТУ  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт физики, Казанский федеральный университет  
Казань, Российская Федерация

**Аннотация.** На основе абсорбционно-люминесцентных свойств кристалла литий-иттриевого фторида, активированного ионами празеодима, определены требования к InGaN лазерным диодам, рассчитаны система фокусировки и резонатор Pr:YLF лазера, генерирующего на переходе  $^3P_1 \rightarrow ^3H_5$ . Выходная мощность лазерного излучения составила 0,5 Вт.

**Ключевые слова:** празеодим, фторид, InGaN лазерный диод, лазер видимого диапазона.

### Pr:YLF LASER PUMPED BY InGaN LASER DIODE

Demesh M.<sup>1</sup>, Kisel V.<sup>1</sup>, Kuleshov N.<sup>1</sup>  
Nizamutdinov A.<sup>2</sup>, Morozov O.<sup>2</sup>, Korableva S.<sup>2</sup>, Semashko V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Center for Optical Materials and Technologies of BNTU  
Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Institute of Physics, Kazan Federal University  
Kazan, Russia

**Abstract.** Based on the absorption-luminescence properties of praseodymium doped lithium-yttrium fluoride crystal the requirements for InGaN laser diodes are determined. The focusing system and resonator of a Pr:YLF laser generating at the  $^3P_1 \rightarrow ^3H_5$  transition are designed. An output power of 0.5 W was achieved.

**Key words:** praseodymium, fluoride, InGaN laser diode, visible laser.

Адрес для переписки: Демеш М.П., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: maxim.demesh@bntu.by

В последнее время наблюдается значительный интерес к лазерам, генерирующим в видимом спектральном диапазоне при непосредственной накачке источниками в видимой области спектра. Это стало возможным благодаря развитию InGaN лазерных диодов, а также оптически накачиваемых полупроводниковых лазеров, излучение которых лежит в фиолетово-

синей области спектра. В данной области лежат полосы поглощения ионов редкоземельных элементов ( $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ), используемых для получения видимой генерации [1]. Наиболее перспективным из перечисленных ионов представляется ион празеодима ( $\text{Pr}^{3+}$ ) в кристаллах фторидов (в частности  $\text{LiYF}_4$  (далее YLF)), как обладающих малой силой кристалли-