

Люминесцентные и нелинейно-оптические свойства боратов $\text{LnGa}_3(\text{BO}_3)_4$ ($\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Tb}, \text{Er}, \text{Dy}, \text{Ho}$)

© Н.Н. Кузьмин^{1,2}, К.Н. Болдырев^{1,3,¶}, Н.И. Леонюк², С.Ю. Стефанович⁴, М.Н. Попова¹

¹ Институт спектроскопии РАН,
108840 Троицк, Москва, Россия

² Московский государственный университет, геологический факультет,
119234 Москва, Россия

³ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“,
101000 Москва, Россия

⁴ Московский государственный университет, химический факультет,
119234 Москва, Россия

¶e-mail:kn.boldyrev@gmail.com

Поступила в редакцию 15.05.2019 г.

В окончательной редакции 15.05.2019 г.

Принята к публикации 17.05.2019 г.

Впервые представлены спектры люминесценции монокристаллов редкоземельно-галлиевых боратов $\text{LnGa}_3(\text{BO}_3)_4$ ($\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Tb}, \text{Er}, \text{Dy}, \text{Ho}$) при комнатной (300 К) и криогенной (10 К) температурах. Фотолюминесценция регистрировалась в диапазоне длин волн 470–5000 нм ($21300\text{--}2000\text{ cm}^{-1}$) с высоким спектральным разрешением (до 0.1 cm^{-1}) при возбуждении различными диодными лазерами. Полученные спектры не удастся однозначно интерпретировать в рамках одного люминесцирующего центра, что может быть связано с наличием дефектов и/или включений других кристаллических фаз. Проведена оценка оптической нелинейности редкоземельно-галлиевых боратов с помощью порошковой методики Курца-Перри. Типичные значения интенсивности генерации второй гармоники в порошках галлиевых боратов по отношению к кварцу — 30–40, а оптическая нелинейность не уступает нелинейности эффективного редкоземельно-алюминиевого бората $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$.

Ключевые слова: кристаллы редкоземельных галлиевых боратов, спектры люминесценции, генерация второй гармоники.

DOI: 10.21883/OS.2019.07.47937.101-19

Введение

Редкоземельные (РЗ) галлиевые бораты составляют подсемейство обширного семейства двойных боратов с общей формулой $\text{RM}_3(\text{BO}_3)_4$ (где $\text{R} = \text{Y}$ или $\text{Ln} = \text{La}\text{--}\text{Nd}, \text{Sm}\text{--}\text{Lu}$; $\text{M} = \text{Al}, \text{Ga}, \text{Sc}, \text{Fe}, \text{Cr}$), 12 первых представителей которого были отнесены к структурному типу минерала хантита $\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4$ с пространственной группой $R32(D_3^2)$ [1,2]. Соединения $\text{RM}_3(\text{BO}_3)_4$ в зависимости от размеров катионов R^{3+} и M^{3+} , а также условий роста могут иметь иную симметрию — $C2/c (D_{2h}^6)$, $Z = 4$ и $C2 (C_2^3)$, $Z = 4$ [3–7]. Во всех структурах присутствуют три сорта координационных полиэдров: октаэдры MO_6 , тригональные призмы RO_6 и два типа треугольников BO_3 . При этом соединенные ребрами октаэдры MO_6 образуют винтовые цепочки вдоль тройной кристаллографической оси c , а призмы RO_6 , расположенные между цепочками, изолированы друг от друга — в результате мало концентрационное тушение люминесценции. В структурах $R32$ и $C2/c$ имеется только одна кристаллографическая позиция для ионов R^{3+} , однако ее симметрия понижается от D_3 в группе $R32$ до C_2 в группе $C2/c$. В структуре $C2$ — две позиции для ионов R^{3+} , C_2 и C_1 . Группы $R32$

и $C2$ — нецентросимметричные, в них допускается генерация второй гармоники. Высокий квантовый выход люминесценции и большая оптическая нелинейность в сочетании с высокой механической прочностью, высокой теплопроводностью, химической стабильностью привели к созданию различных лазеров с самоудвоением и самосмешением частот на основе кристаллов алюминиевых и скандиевых боратов. На кристаллах $\text{Y}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4:\text{Nd}$ (YGAB:Nd) получена генерация света трех основных цветов ([8] и ссылки в этой работе). Высокоэффективный непрерывный перестраиваемый лазер с диодной накачкой и с самоудвоением частоты был создан на кристаллах $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4:\text{Yb}$ (YAB:Yb) [9]. На основе кристаллов $\text{RAl}_3(\text{BO}_3)_4:\text{Er}, \text{Yb}$ ($\text{R} = \text{Y}, \text{Lu}, \text{Gd}$) работают условно безопасные для глаз лазеры различных типов ([10] и ссылки в этой работе). Концентрированные кристаллы бората $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ были использованы для создания минилазеров ([11] и ссылки в этой работе). Недавно было показано, что нанокристаллы $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ — эффективная рабочая среда для порошкового лазера [12]. В работе [13] продемонстрирована генерация в порошках $\text{EuAl}_3(\text{BO}_3)_4$ и предложено использовать этот материал для разработки систем визуальной информации повышенной

яркости. В настоящее время многие исследовательские группы работают над созданием лазеров и люминофоров на основе YAl - и GdAl -боратов, легированных различными P^3 и d -ионами [14–17]. Нелегированные кристаллы YAl -боратов оказались эффективной средой для генерации четвертой гармоники неодимового лазера (266 нм) [18].

Гораздо менее изучены галлиевые бораты из семейства хантитов. Имеются единичные работы по изучению кристаллической структуры, условий роста [3,19–22] и спектроскопических свойств [22]. В частности, в работе [22] приведены спектры поглощения и люминесценции боратов $\text{EuGa}_3(\text{BO}_3)_4$ и $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$ при комнатной температуре.

В настоящей работе получены спектры люминесценции галлиевых боратов $\text{LnGa}_3(\text{BO}_3)_4$ ($\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Tb}, \text{Er}, \text{Dy}, \text{Ho}$) при комнатной (300 К) и криогенной (10 К) температурах при возбуждении коммерческими диодными лазерами. Кроме того, проведена оценка оптической нелинейности этих соединений с помощью порошковой методики Курца-Перри [23].

Эксперимент

Методика приготовления кристаллических образцов

LnGa -бораты размером около $1 \times 1 \times 1$ мм были получены в результате спонтанной кристаллизации из раствора в расплаве на основании данных о фазовых соотношениях в псевдотройной системе $\text{LnGa}_3(\text{BO}_3)_4$ – Bi_2O_3 – B_2O_3 при соотношении Bi_2O_3 : B_2O_3 от 1:1 до 3:1 [3,22]. Исходные компоненты Ln_2O_3 , Ga_2O_3 , Bi_2O_3 и B_2O_3 квалификации ХЧ перемешивались в агатовой ступке до однородной смеси и помещались в 10–15 мл платиновые тигли, которые нагревались в печи с резистивным нагревателем из Cr – Ni -сплава до 1000°C в течение 24–48 ч. Затем осуществлялось предельно быстрое охлаждение до 900°C с последующим понижением температуры до 700°C со скоростью 1–2 $^\circ\text{C}/\text{h}$. Контроль температуры осуществлялся Pt – Rh/Pt -термопарой (в комплекте с контроллером PROTHERM-100) с точностью $\pm 0.1^\circ\text{C}$. В конце процесса роста тигель быстро (20–30 $^\circ\text{C}/\text{h}$) охлаждался до 300°C и извлекался из печи.

Люминесцентная спектроскопия

Спектры фотолюминесценции неориентированных кристаллов редкоземельно-галлиевых боратов регистрировались на фурье-спектрометре Bruker IFS 125 HR с разрешением до 0.1 cm^{-1} в широком спектральном диапазоне (2000–21300 cm^{-1} , что соответствует длинам волн от 5 до $0.47 \mu\text{m}$) при низкой (10 К) и комнатной (300 К) температурах без поправки на спектральную чувствительность приемников. Низкотемпературные измерения осуществлялись с использованием

криостата замкнутого цикла Cryomech PT403. В качестве источников возбуждения использовался набор коммерческих непрерывных диодных лазеров синего и ультрафиолетового диапазонов (462 нм, 445 нм и 365 нм). Мощность лазерного излучения на образце не превышала $10 \text{ mW}/\text{mm}^2$, диаметр пятна фокусировки $\sim 0.5 \text{ mm}$.

Методика оценки нелинейно-оптических свойств

Нелинейно-оптическая активность галлиевых боратов оценивалась по относительной интенсивности генерации второй гармоники (ГВГ) в исследуемом материале в виде мелкодисперсного порошка (с размером кристаллитов $\sim 5 \mu\text{m}$) и в α -кварце [23] с использованием схемы на отражение [24].

Результаты порошкового метода Курца-Перри [23] в его традиционном варианте для кристаллов с фазовым синхронизмом, к которым относятся хантитоподобные бораты, сильно зависят от длины волны зондирующего лазерного излучения (λ_ω) и его второй гармоники ($\lambda_{2\omega}$). Наиболее высокий выход ГВГ достигается в случае прозрачности кристаллов на обеих длинах волн и при оптимальных условиях фазового синхронизма. Именно в таких условиях получена рекордная интенсивность второй гармоники в кристаллах в работах [9,18]. Умеренное оптическое поглощение на λ_ω и $\lambda_{2\omega}$ может быть учтено путем введения коэффициентов в виде соответственно $\exp(-\alpha_\omega L)$ и $\exp(-\alpha_{2\omega} L)$, где α_ω и $\alpha_{2\omega}$ — поглощение в данной части спектра, а L — толщина кристалла. С учетом всех этих обстоятельств для коэффициента d_{11} тензора оптической нелинейности $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ было получено значение $1.7 \text{ pm}/\text{V}$ [18]. Для аналогичных галлатов нам не удалось найти количественных данных по их оптической нелинейности.

Чтобы минимизировать влияние оптического поглощения в использованной нами методике, использовались тщательно перетертые кристаллические порошки, для которых L составляет около $5 \mu\text{m}$. Это позволяет получить приемлемую ошибку в определении интенсивности (10–20%) даже при коэффициентах поглощения $\alpha \sim 10$ – 20 cm^{-1} . Одновременно малый размер кристаллита исключает эффекты, связанные с влиянием на ГВГ эффекта наличия или отсутствия фазового синхронизма [23]. Для измерений ГВГ был использован $\text{YAG}:\text{Nd}$ -лазер Minilite-I ($\lambda_\omega = 1.064 \mu\text{m}$), работавший в режиме модулированной добротности. Регистрация сигнала ГВГ от порошкового препарата проводилась с помощью фотоэлектрического умножителя по схеме на отражение [24].

Подобная кристаллу кварца симметрия хантитоподобных веществ ($R32$) делает α -кварц наиболее удобным для использования в качестве эталона сравнения с известным для него значением $d_{11}(\text{SiO}_2) = 0.364 \text{ pm}/\text{V}$.

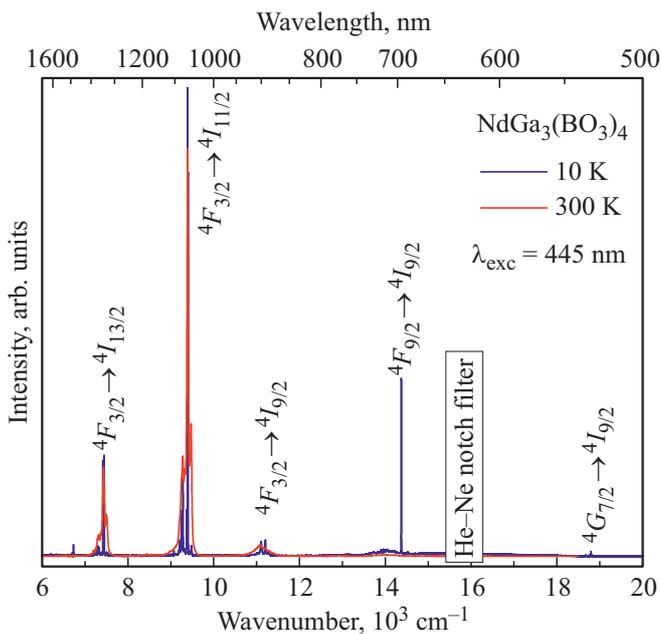


Рис. 1. Спектр люминесценции $\text{NdGa}_3(\text{BO}_3)_4$ при температуре 10 К (синяя линия) и комнатной (красная линия). Сверху указаны соответствующие переходы. Длина волны возбуждающего света $\lambda_{\text{exc}} = 445 \text{ nm}$.

Расчет проводился по формуле

$$d_{11}^{2\omega} = d_{11}(\text{SiO}_2) \frac{(n^{2\omega} + 1)^3}{(n_{\text{SiO}_2}^{2\omega})^3} \sqrt{\frac{I_{2\omega}}{I_{\omega}(\text{SiO}_2)}}. \quad (1)$$

Формула (1) получена из формулы, приведенной в [23], при условии $L \ll l_{\text{coh}}$, где l_{coh} — длина когерентности. Последнее условие при $L = 5 \mu\text{m}$ заведомо выполняется, так как $l_{\text{coh}} = 20 \mu\text{m}$ для кварца, и $l_{\text{coh}} \rightarrow \infty$ в случае хантитоподобных боратов [3,18].

Спектры люминесценции

На рис. 1–6 показаны обзорные спектры люминесценции галлиевых боратов $\text{LnGa}_3(\text{BO}_3)_4$ ($\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Tb}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Er}$) при двух значениях температуры.

Спектры состоят из сравнительно узких линий, соответствующих оптическим переходам в незаполненной $4f^n$ -оболочке РЗ ионов. Минимальные ширины линий (по полувысоте) составляют $3\text{--}4 \text{ cm}^{-1}$ при низкой температуре и несколько десятков волновых чисел при комнатной температуре. Примечательно, что даже при комнатной температуре все РЗ галлиевые бораты интенсивно люминесцируют. Глазом видно яркое зеленое свечение $\text{TbGa}_3(\text{BO}_3)_4$ и яркое красное свечение $\text{EuGa}_3(\text{BO}_3)_4$ [22]. В спектре люминесценции $\text{NdGa}_3(\text{BO}_3)_4$ при комнатной температуре выделяется интенсивная линия $1.065 \mu\text{m}$, соответствующая лазерному переходу ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ в ионе Nd^{3+} . Интенсивная ИК люминесценция кристаллов $\text{ErGa}_3(\text{BO}_3)_4$ около $1.6 \mu\text{m}$

представляет особый интерес, так как попадает в область телекоммуникационных длин волн, для которых минимальны потери в оптических волокнах, используемых для линий связи.

Надо отметить, что для всех кристаллов число линий в низкотемпературных спектрах люминесценции превышает максимально возможное для одного люминесцирующего центра. На рис. 3, *b* показан участок спектра люминесценции $\text{TbGa}_3(\text{BO}_3)_4$, соответствующий переходу с нижнего штарковского уровня в мультиплет 5D_4 на синглет 7F_0 (следующий по энергии штарковский уровень в мультиплете 5D_4 расположен на $\sim 50 \text{ cm}^{-1}$ выше). Здесь должна быть одна спектральная линия в случае однофазного одноцентрового кристалла. Тем не менее видны две линии, разделенные интервалом $\sim 30 \text{ cm}^{-1}$, при этом высокочастотная имеет отчетливую тонкую структуру, состоящую, как минимум, из четырех компонент. Такая тонкая структура может быть связана с центрами, расположенными рядом с дефектами. Как было показано для RAl -боратов, примеси, входящие в кристалл из флюса в процессе раствор-расплавной кристаллизации, приводят к такому неоднородному расщеплению спектральных линий РЗ иона [25]. Наличие двух хорошо разделенных линий говорит, скорее всего, о неоднородности кристалла. Сосуществование двух политипов ($R32$ и $C2/c$) в одном кристалле РЗ галлиевых боратов неодима и европия было ранее обнаружено методом колебательной ИК спектроскопии [22].

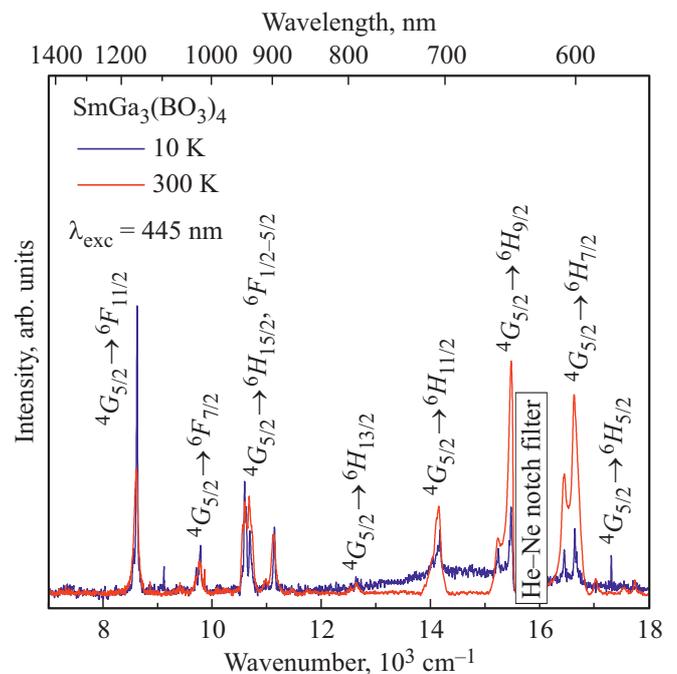


Рис. 2. Спектр люминесценции $\text{SmGa}_3(\text{BO}_3)_4$ при температуре 10 К (синяя линия) и комнатной (красная линия). Сверху указаны соответствующие переходы. Длина волны возбуждающего света $\lambda_{\text{exc}} = 445 \text{ nm}$.

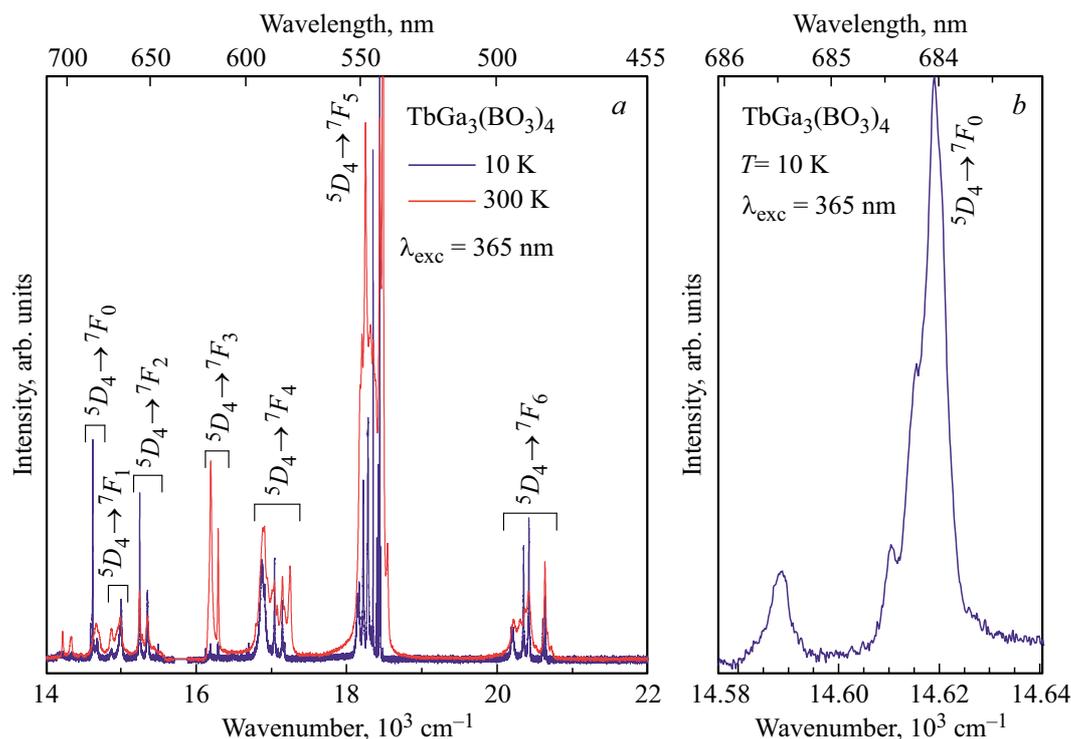


Рис. 3. (а) Обзорный спектр люминесценции $\text{TbGa}_3(\text{BO}_3)_4$ при температурах 10 К (синяя линия) и 300 К (красная линия). Сверху указаны соответствующие переходы; (б) участок спектра, соответствующий переходу с нижнего штарковского уровня в мультиплете 5D_4 на основной синглет (7F_0). Длина волны возбуждающего света $\lambda_{\text{exc}} = 365$ nm.

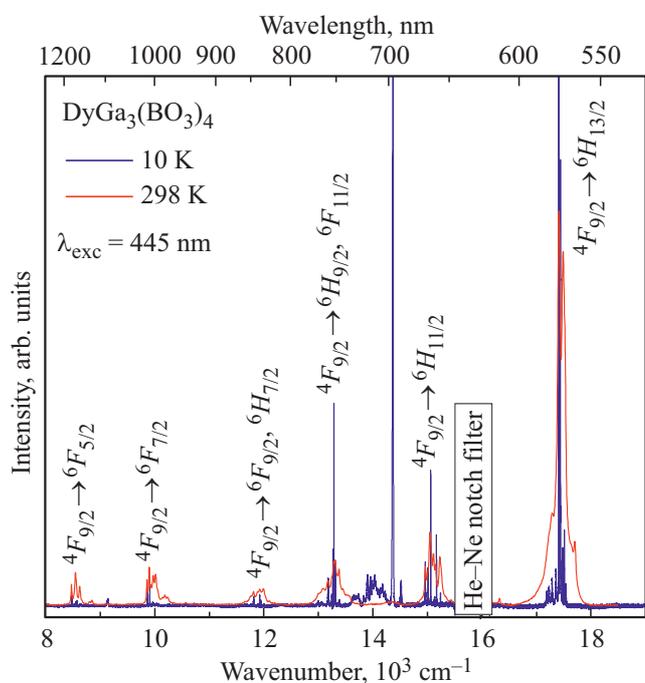


Рис. 4. Спектр люминесценции $\text{DyGa}_3(\text{BO}_3)_4$ при температуре 10 К (синяя линия) и комнатной (красная линия). Сверху указаны соответствующие переходы. Длина волны возбуждающего света $\lambda_{\text{exc}} = 445$ nm.

Нелинейно-оптические свойства РЗ галлиевых боратов $\text{RGa}_3(\text{BO}_3)_4$

R	Цвет	$I_{2\omega}/I_{\omega}(\text{SiO}_2)$	d_{11} , pm/V
Nd	Сиреневый	10	1.0
Sm	Бледно-желтый	40	1.9
Eu	Бледно-желтый	36	1.8
Gd	Бесцветный	27	1.6
Tb	Бесцветный	35	1.8
Dy	Бледно-желтый	28	1.6
Ho	Слабо-желтый	30	1.7
Er	Бледно-розовый	23	1.5

Нелинейно-оптические свойства

В таблице приведены значения относительной интенсивности ГВГ и нелинейно-оптического коэффициента d_{11} для хантитоподобных боратов галлатного ряда. Значения интенсивности ГВГ в порошках галлиевых боратов по отношению к α -кварцу пересчитывались в абсолютные значения нелинейно-оптического коэффициента d_{11} по формуле (1) с использованием $n \approx 1.70$ для боратов [3], $n_{\text{SiO}_2} \approx 1.55$ и $d_{11}(\text{SiO}_2) = 0.364$ pm/V для кварца [26].

Исключая первое соединение в таблице, на расчете оптической нелинейности которого в наибольшей степени сказалось сильное поглощение излучения неоди-

мового лазера, исследованные бораты галлатного ряда демонстрируют один порядок оптической нелинейности, совпадающий с имеющимися данными для $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$, $d_{11} = 1.7$ [18]. Существенно меньшее значение для $\text{NdGa}_3(\text{BO}_3)_4$ может быть также обусловлено примесью centrosymmetric фазы $C2/c$ [22].

Обращает на себя внимание ослабление оптической нелинейности изученных хантитов по мере уменьшения размера катиона РЗЭ. Наблюдаемое явление имеет достаточно общий характер и, по-видимому, отражает уменьшение нелинейной поляризуемости в треугольниках BO_3 по мере сокращения связей В–О.

Заключение

Выполнено спектроскопическое исследование люминесцентных свойств серии кристаллов редкоземельно-галлиевых боратов $\text{LnGa}_3(\text{BO}_3)_4$ ($\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Tb}, \text{Er}, \text{Dy}, \text{Ho}$) со структурой минерала хантита. Все эти соединения интенсивно люминесцируют даже при комнатной температуре. Яркое зеленое свечение $\text{TbGa}_3(\text{BO}_3)_4$ и красное свечение $\text{EuGa}_3(\text{BO}_3)_4$ хорошо видны глазом. Эти кристаллические материалы могут быть перспективны в качестве люминофоров.

В ИК спектрах люминесценции $\text{NdGa}_3(\text{BO}_3)_4$ и $\text{ErGa}_3(\text{BO}_3)_4$ при комнатной температуре выделяются соответственно интенсивные линии 1.065 и $1.6 \mu\text{m}$, что представляет интерес для возможных лазерных приме-

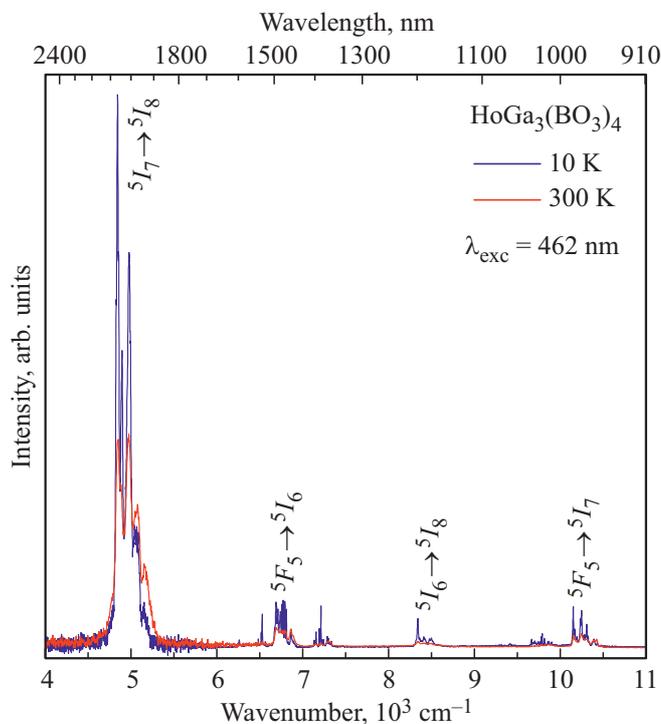


Рис. 5. Спектр люминесценции $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$ при температуре 10 К (синяя линия) и комнатной (красная линия). Сверху указаны соответствующие переходы. Длина волны возбуждающего света $\lambda_{\text{exc}} = 462 \text{ nm}$.

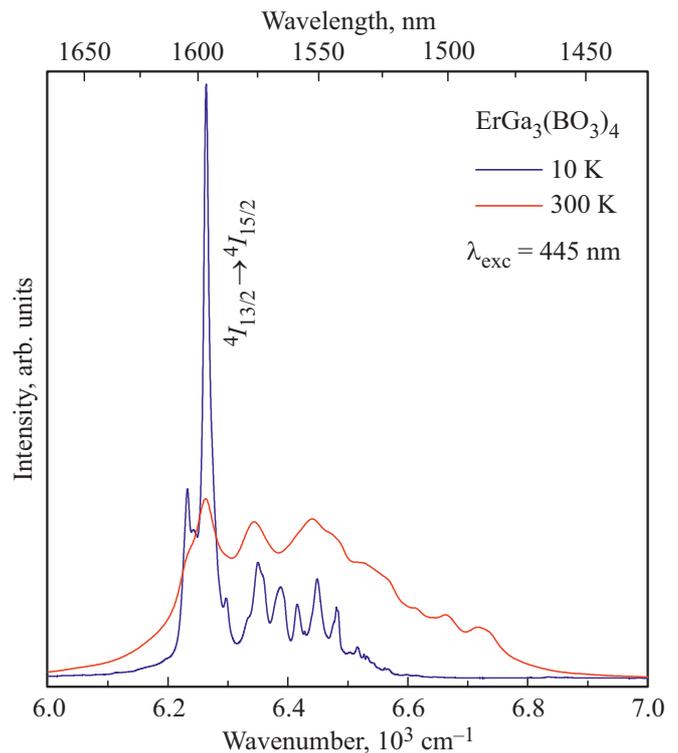


Рис. 6. Спектр люминесценции $\text{ErGa}_3(\text{BO}_3)_4$ при температуре 10 К (синяя линия) и комнатной (красная линия) на переходе ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$. Длина волны возбуждающего света $\lambda_{\text{exc}} = 445 \text{ nm}$.

нений. Отсутствие концентрационного тушения люминесценции обусловлено особенностями кристаллической структуры хантитов, в которой LnO_6 -полиэдры изолированы друг от друга и не имеют общих ионов кислорода.

Анализ спектров высокого разрешения показал наличие нескольких типов РЗ центров в боратах $\text{LnGa}_3(\text{BO}_3)_4$. Это может быть связано с присутствием политипных модификаций в одном кристалле и с искажением кристаллического поля центра расположенной рядом примесью, вошедшей в кристалл в процессе его выращивания раствор-расплавным методом. Установлено, что порошки $\text{LnGa}_3(\text{BO}_3)_4$, за исключением $\text{NdGa}_3(\text{BO}_3)_4$, под действием $\text{YAG}:\text{Nd}$ -лазера дают эффект ГВГ в 30–40 раз интенсивнее кварца. Соответствующий этому коэффициент оптической нелинейности d_{11} составляет $1.5\text{--}1.9 \text{ pm/V}$ с тенденцией к уменьшению к концу лантаноидного ряда $\text{LnGa}_3(\text{BO}_3)_4$. Меньшее значение ГВГ для $\text{NdGa}_3(\text{BO}_3)_4$ связано прежде всего с невозможностью корректного учета в этом веществе сильного поглощения излучения неодимового лазера, а также с вероятной примесью centrosymmetric фазы.

Благодарности

Спектроскопическое исследование выполнено на Уникальной Научной Установке ИСАН „Мультифункциона-

ональная широкодиапазонная спектроскопия высокого разрешения“ [27].

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-12-00413.

Список литературы

- [1] Ballman A.A. // American Mineralogist: J. Earth and Planetary Materials. 1962. V. 47. N 11–12. P. 1380.
- [2] Mills A.D. // Inorganic Chemistry. 1962. V. 1. N 4. P. 960. doi 10.1021/ic50004a063
- [3] Leonyuk N.I., Leonyuk L.I. // Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. 1995. V. 31. N 3–4. P. 179. doi 10.1016/0960-8974(96)83730-2
- [4] Белоконева Е.Л., Тимченко Т.И. // Кристаллография. 1983. Т. 28. № 6. С. 1118.
- [5] Белоконева Е.Л., Леонюк Н.И., Пашкова А.В., Тимченко Т.И. // Кристаллография. 1988. Т. 33. № 5. С. 1287.
- [6] Белоконева Е.Л., Симонов М.А., Пашкова А.В., Тимченко Т.И., Белов Н.В. // ДАН СССР. 1980. Т. 255. № 4. С. 854.
- [7] Plachinda P.A., Belokoneva E.L. // Cryst. Res. Technol. 2008. V. 43. N 2. P. 157. doi 10.1002/crat.200711071
- [8] Burns P.A., Dawes J.M., Dekker P., Piper J.A., Li J., Wang J. // Opt. Commun. 2002. V. 207. N 1–6. P. 315. doi 10.1016/S0030-4018(02)01500-6
- [9] Dekker P., Dawes J.M., Piper J.A., Liu Y., Wang J. // Opt. Commun. 2001. V. 195. N 5–6. P. 431. doi 10.1016/S0030-4018(01)01347-5
- [10] Gorbachenya K.N., Kisel V.T., Yasukevich A.S., Maltsev V.V., Leonyuk N.I., Kuleshov N.V. // Opt. Lett. 2016. V. 41. N 5. P. 918. doi 10.1364/OL.41.000918
- [11] Bovero E., Luo Z.D., Huang Y.D., Benayas A., Jaque D. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 87. N 21. P. 211108. doi 10.1063/1.2133893
- [12] Moura A.L., Maia L.J., Gomes A.S., De Araujo C.B. // Opt. Mater. 2016. V. 62. P. 593. doi 10.1016/j.optmat.2016.11.010
- [13] Малашкевич Г.Е., Сигаев В.Н., Голубев Н.В., Мамаджанова Е.Х., Данильчик А.В., Луценко Е.В. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 92. № 8. С. 547.
- [14] Malysa B., Meijerink A., Jüstel T. // J. Luminesc. 2016. V. 171. P. 246. doi 10.1016/j.jlumin.2015.10.042
- [15] Ryba-Romanowski W., Lisiecki R., Beregi E., Martin I.R. // J. Luminesc. 2015. V. 167. P. 163. doi 10.1016/j.jlumin.2015.06.010
- [16] Reddy G.L., Moorthy L.R., Packiyaraj P., Jamalaiah B.C. // Opt. Mater. 2013. V. 35. N 12. P. 2138. doi 10.1016/j.optmat.2013.05.038
- [17] Açıkgöz M., Gnutek P. // Opt. Mater. 2014. V. 36. N 8. P. 1311. doi 10.1016/j.optmat.2014.03.021
- [18] Ias S., Loiseau P., Aka G., Taira T. // Optics Express. 2014. V. 22. N 24. P. 30325. doi 10.1364/OE.22.030325
- [19] Belokoneva E.L., Al'shinskaya L.I., Simonov M.A., Leonyuk N.I., Timchenko T.I., Belov N.V. // J. Structural Chemistry. 1978. V. 19. N 2. P. 332. doi 10.1007/BF00746983
- [20] Al'Shinskaya L.I., Leonyuk N.I., Timchenko T.I. // Kristall und Technik. 1979. V. 14. N 8. P. 897. doi 10.1002/crat.19790140802
- [21] Beregi E., Watterich A., Madarász, J., Tóth M., Polgár K. // J. Crystal Growth. 2002. V. 237. P. 874. doi 10.1016/S0022-0248(01)02042-5
- [22] Borovikova E.Y., Boldyrev K.N., Aksenov S.M., Dobretsova E.A., Kurazhkovskaya V.S., Leonyuk N.I., Savon A.E., Deyneko D.V., Ksenofontov D.A. // Opt. Mater. 2015. V. 49. P. 304. doi 10.1016/j.optmat.2015.09.021
- [23] Kurts C.K., Perry T.T. // J. Appl. Phys. 1968. V. 39. N 8. P. 3798. doi 10.1063/1.1656857
- [24] Beskorovaynaya D.A., Deyneko D.V., Baryshnikova O.V., Stefanovich S.Y., Lazoryak B.I. // J. Alloys and Compounds. 2016. V. 674. P. 323. doi 10.1016/j.jallcom.2016.02.218
- [25] Boldyrev K.N., Popova M.N., Bettinelli M., Temerov V.L., Gudim I.A., Bezmaternykh L.N., Loiseau P., Aka G., Leonyuk N.I. // Opt. Mater. 2012. V. 34. N 11. P. 1885. doi 10.1016/j.optmat.2012.05.021
- [26] Прохоров А.М. Справочник по лазерам. М.: Сов. Радио, 1978. Т. 1, 2.
- [27] Уникальные научные установки. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.ckr-rf.ru/usu/508571>