

02

**Кристаллы  $YAl_3(BO_3)_4 : Cr$  для люминесцентной криотермометрии**© А.Д. Молчанова<sup>1</sup>, М. Диаб<sup>1,2</sup>, К.Н. Болдырев<sup>1</sup>, М.Н. Попова<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт спектроскопии РАН,  
Троицк, Москва, Россия<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Долгопрудный, Московская обл., Россия

e-mail: nastyamolchanova@list.ru

Поступила в редакцию 19.04.2024 г.

В окончательной редакции 26.04.2024 г.

Принята к публикации 27.04.2024 г.

Зарегистрированы спектры люминесценции кристалла  $YAl_3(BO_3)_4 : Cr^{3+}$  в спектральном диапазоне запрещённых по спину электронных переходов  ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$  в ионах  $Cr^{3+}$  ( $14550\text{--}14700\text{ cm}^{-1}$ ) с высоким спектральным разрешением при температурах  $4\text{--}300\text{ K}$ . Температурные зависимости отношений интегральных интенсивностей линий  $R_2$  и  $R_1$ , а также  $N'$  и  $N$  (предположительно линий переходов  ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$  центра  $Cr^{3+}$  в искажённой вследствие близости некоторого дефекта позиции) хорошо соответствуют распределению Больцмана. На измерении этих отношений может быть реализован ратиометрический термометр с максимумами абсолютной чувствительности при температурах  $40.3$  и  $21.6\text{ K}$  и относительной чувствительностью до  $12\% K^{-1}$ . Измерение ширины самой интенсивной спектральной компоненты — линии  $R_1$  — может быть способом регистрации температуры в диапазоне от  $100\text{ K}$  и выше.

**Ключевые слова:** люминесцентная криотермометрия, кристалл  $YAl_3(BO_3)_4 : Cr^{3+}$ , фурье-спектроскопия высокого разрешения.

DOI: 10.61011/OS.2024.04.58219.6314-24

**Введение**

При большом разнообразии соединений, легированных  $d$ -ионами, большинство исследований в области люминесцентной термометрии выполнено по соединениям с ионами  $Cr^{3+}$ . Это обусловлено отличной светоизлучающей способностью ионов  $Cr^{3+}$ , широким спектром поглощения и высокой чувствительностью спектра люминесценции к температуре. В основном термометрия на соединениях с ионами  $Cr^{3+}$  осуществляется в диапазоне температур, актуальном для биологических применений ( $> 0^\circ C$ ), и основана на измерении отношения интенсивностей полос переходов  ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$  и  ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$  [1–8]. В ряде работ для термометрии предлагались кристаллы, легированные одновременно ионами  $Cr^{3+}$  и различными редкоземельными ионами, такими как  $Eu^{3+}$  [9,10] и  $Yb^{3+}$  [11], при этом температура регистрировалась по отношению интенсивностей люминесценции ионов хрома и редкоземельных ионов. Лишь в нескольких работах предлагалось создание ратиометрических люминесцентных термометров на отношении интенсивностей  $R_1$ - и  $R_2$ -линий (переходы из расщеплённого орбитального дублета  ${}^2E$  на основной синглет  ${}^4A_2$ ) [4,12–15]. Большинство исследований были выполнены для температур выше  $80\text{ K}$ . Низкотемпературная (от  $4\text{ K}$ ) термометрия исследовалась для легированных хромом соединений  $Al_2O_3$ ,  $Ga_2O_3$ ,  $Y_3Al_5O_{12}$  и  $YAlO_3$  [13]. Температура определялась тремя способами: по сдвигу линии  $R_1$ , по отношению интенсивностей линий  $R_1$  и  $R_2$  и по времени затухания этих

линий. Также проводились низкотемпературные термографические исследования покрытий  $Al_2O_3:Cr$ , полученных методом плазменно-электролитического оксидирования [12]. На кристаллах  $YAl_3(BO_3)_4:Cr^{3+}$  (YAB:Cr<sup>3+</sup>) ранее было реализовано сочетание люминесцентной термометрии и оптического нагрева. Регистрация температуры осуществлялась по измерению отношения интенсивностей полос  ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$  и  ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$  в диапазоне температур —  $150\text{--}300^\circ C$  [1]. Исследований термометрических свойств YAB:Cr<sup>3+</sup> при криогенных температурах с помощью измерений параметров компонент тонкой структуры перехода  ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$  в ионе  $Cr^{3+}$  ранее не проводилось.

Для измерения низких температур бесконтактным методом наилучшим образом зарекомендовал себя метод больцмановской ратиометрической термометрии [16]. Температурные зависимости отношения равновесных населённостей  $n_2(T)/n_1(T)$  и, следовательно, отношения интенсивностей люминесценции  $LIR$  (luminescence intensity ratio) с соответствующих двух выбранных уровней с энергиями  $E_2$  и  $E_1$  в этом случае подчиняются распределению Больцмана:

$$LIR(T) = \frac{I_2(T)}{I_1(T)} = \frac{W_2 n_2(T)}{W_1 n_1(T)} = C e^{(-\Delta E/kT)}, \quad (1)$$

где  $C = W_2/W_1$  — отношение вероятностей переходов, не зависящее от температуры,  $\Delta E = E_2 - E_1$ ,  $k$  — постоянная Больцмана.

Абсолютная тепловая чувствительность при этом определяется как

$$S_a(T) = \frac{dLIR(T)}{dT} = \frac{\Delta E}{kT^2} LIR(T) \quad (2)$$

и достигает максимума при температуре  $T_m = \Delta E/2k$ . Для сравнения термометров, основанных на различных принципах, используется относительная тепловая чувствительность

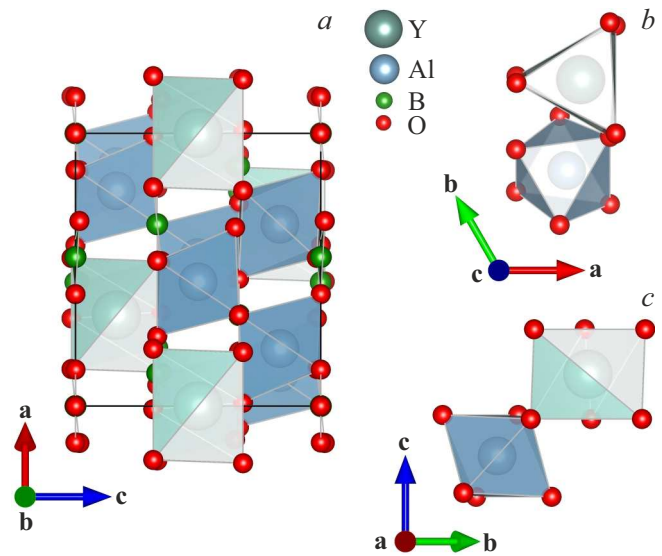
$$S_r(T) = \frac{1}{LIR} \times \frac{dLIR(T)}{dT} = \frac{\Delta E}{kT^2}. \quad (3)$$

В настоящей работе в качестве уровней  $E_1$  и  $E_2$  будут рассмотрены компоненты тонкой структуры спектров люминесценции кристалла иттрий-алюминиевого бората  $YAB:Cr^{3+}$  в области переходов  ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$  в ионе  $Cr^{3+}$ . Кроме того, будет обсуждаться возможность измерения температуры по ширине наиболее интенсивной спектральной компоненты  $R_1$ .

## Методика эксперимента

Кристаллы  $YAl_3(BO_3)_4:Cr$  были получены раствор-расплавным методом выращивания кристаллов в лаборатории Л.Н. Безматерных в Институте физики имени Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук в Красноярске. Специального легирования хромом не проводилось. Вхождение в структуру  $YAB$  ионов  $Cr^{3+}$  обусловлено их наличием в составе реагента  $Al_2O_3$  (отмеченная в сертификате концентрация составляет 0.001%). Спектры люминесценции были зарегистрированы со спектральным разрешением  $0.1 \text{ cm}^{-1}$  на фурье-спектрометре Bruker IFS 125 HR в спектральном диапазоне перехода  ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$  в ионах  $Cr^{3+}$  ( $14550 - 14700 \text{ cm}^{-1}$ ). Для регистрации спектров использовались светоделитель  $CaF_2$  и детектор  $InGaAs$  с высоким коэффициентом усиления. Охлаждение образца производилось в криостате замкнутого гелиевого цикла Sumitomo SRP096 до температуры 4 К.

Спектры люминесценции были зарегистрированы в температурных диапазонах 4 К  $\rightarrow$  10 К, 10 К  $\rightarrow$  40 К, 40 К  $\rightarrow$  70 К и 70 К  $\rightarrow$  300 К, при этом величина шага по температуре составляла 0.5, 2, 4 и 10 К, соответственно. Для снижения тепловой нагрузки на образец был установлен двойной полированный холодный экран с небольшими отверстиями для ввода и вывода излучения. Образец был приклеен серебряной пастой к медному пальцу криостата. Температура измерялась с использованием калиброванного диодного температурного датчика LakeShore DT-670, установленного в непосредственной близости от образца, контролировалась и регистрировалась ПИД-регулятором температуры модели LakeShore 335. Контроль температуры обеспечивался с точностью  $\pm 0.05$  К. Для возбуждения люминесценции использовался диодный

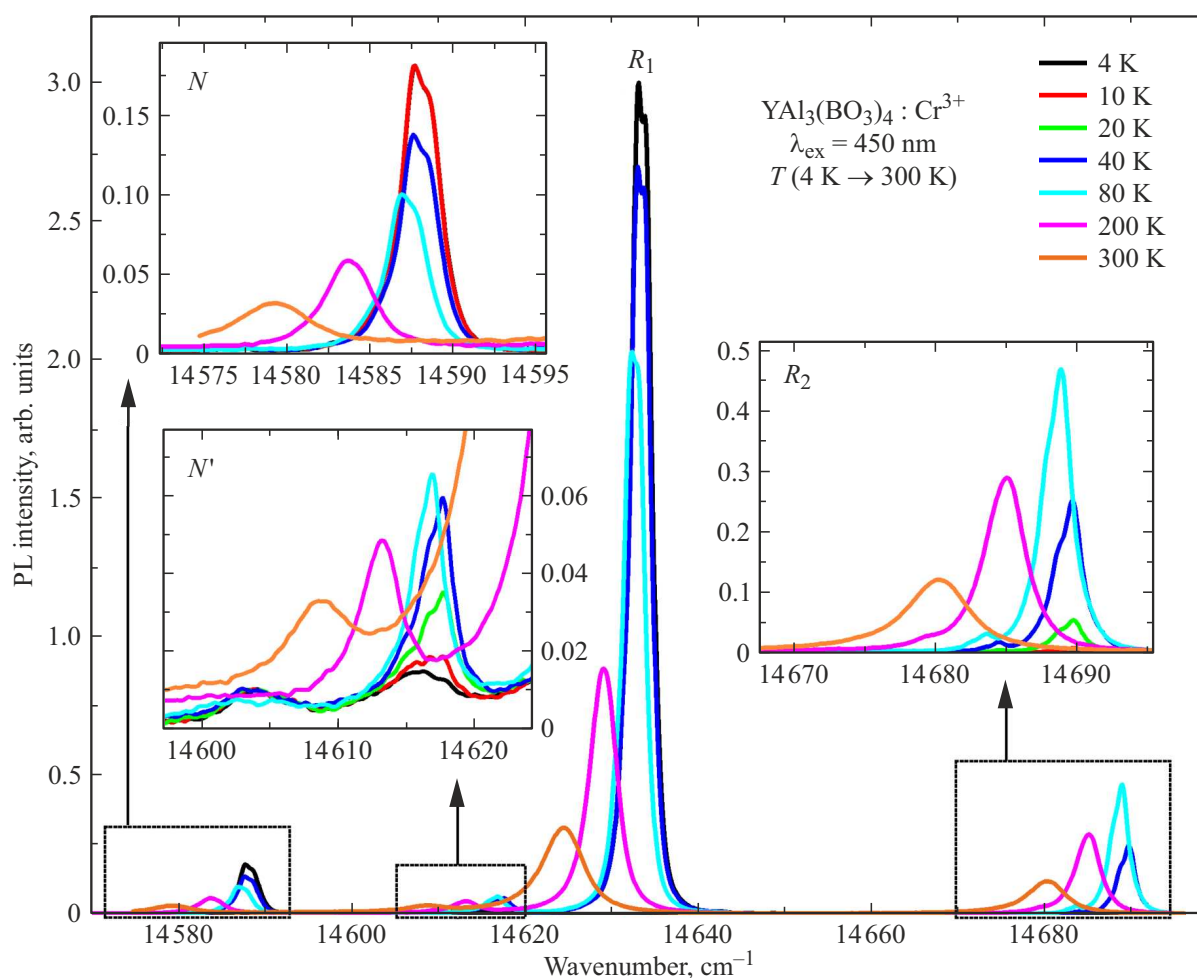


**Рис. 1.** Проекция элементарной ячейки  $YAl_3(BO_3)_4$  вдоль оси  $b$  (a). Проекция тригональной призмы  $YO_6$  и искаженного октаэдра  $AlO_6$  в элементарной ячейке  $YAl_3(BO_3)_4$  вдоль осей  $c$  (b) и  $a$  (c).

лазер мощностью 75 mW с длиной волны 450 nm и шириной спектра 15 nm, фокусное пятно имело диаметр 1 mm.

## Результаты и обсуждение

Кристаллы иттрий-алюминиевого бората  $YAl_3(BO_3)_4$  имеют структуру минерала хантита  $CaMg_3(CO_3)_4$  с нецентросимметричной пространственной группой тригональной системы  $R32$  [17]. На рис. 1, a показана элементарная ячейка кристалла  $YAB$ . Кристаллическая структура образована слоями, перпендикулярными кристаллографической оси  $c$  и состоящими из искаженных призм  $YO_6$ , октаэдров  $AlO_6$  и групп  $BO_3$  двух типов ( $B1O_3$  и  $B2O_3$ ). Ионы  $Y^{3+}$  в призмах  $YO_6$  окружены шестью ионами кислорода одного типа и занимают позиции с точечной группой симметрии  $D_3$  (рис. 1, b, c). Точечная группа позиции ионов  $Al^{3+}$  в октаэдрах  $AlO_6$  –  $C_2$  (рис. 1, b, c). Октаэдры  $AlO_6$ , соединенные между собой ребрами, образуют спиральные цепочки, идущие вдоль оси  $c$ . Ионы  $Y^{3+}$  располагаются между тремя такими цепочками и связывают их между собой. Призмы  $YO_6$  изолированы друг от друга и не имеют общих атомов кислорода. В существующих работах по спектроскопии  $YAB:Cr$  полагалось, что ионы  $Cr^{3+}$  занимают позиции  $Al^{3+}$ . Ионы  $Al^{3+}$  и  $Cr^{3+}$  имеют близкие ионные радиусы: 0.54 и 0.62 Å, соответственно, в то время как ионный радиус  $Y^{3+}$  составляет 0.9 Å [18]. Также по результатам исследования методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) было установлено, что ионы  $Cr^{3+}$  занимают октаэдрические позиции в структуре  $YAB$  [19], т.е. замещают ионы  $Al^{3+}$ .

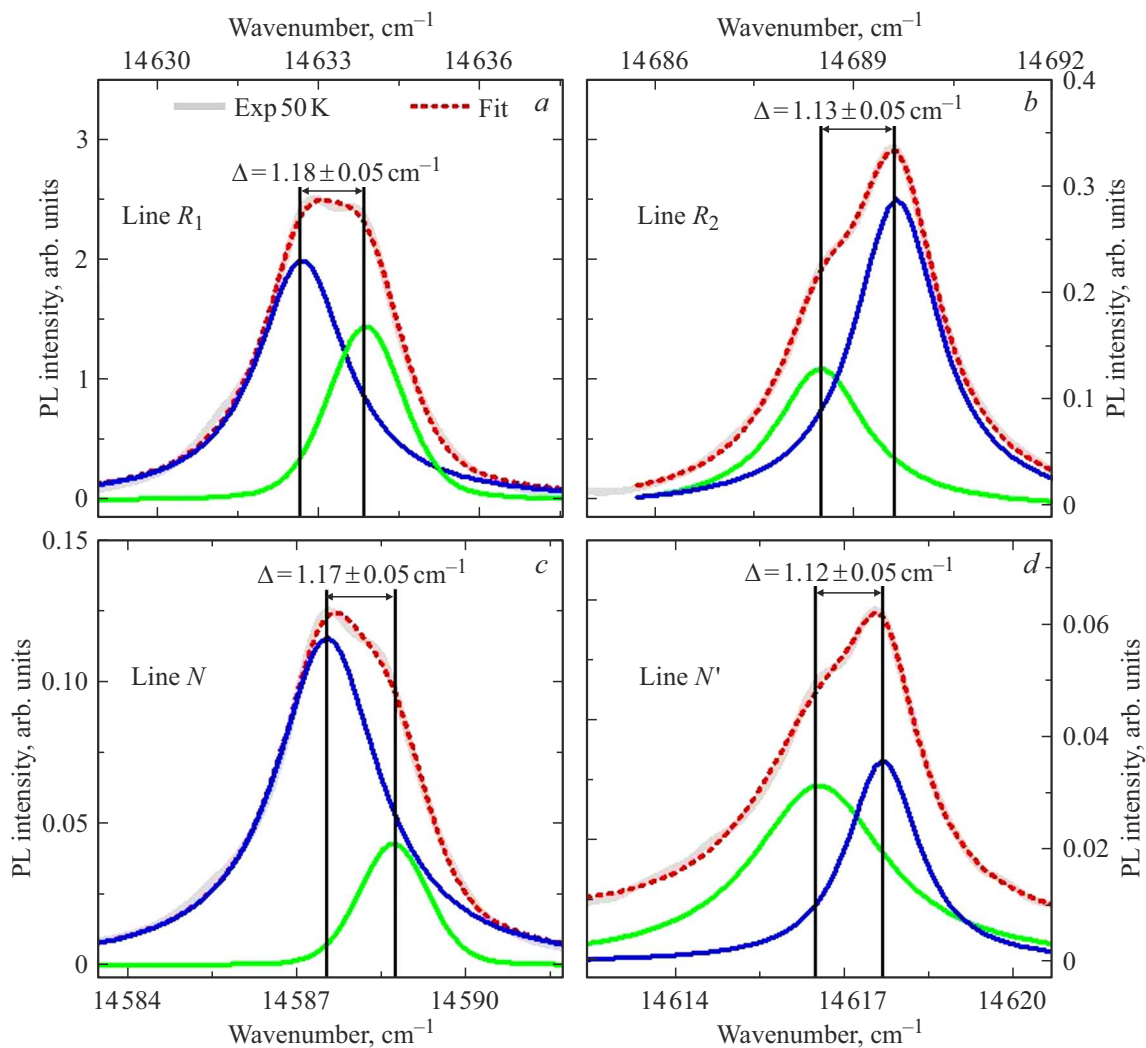


**Рис. 2.** Спектры фотолюминесценции кристалла  $\text{YAB:Cr}$  в частотном диапазоне  $14550\text{--}14700\text{ cm}^{-1}$  при температурах 4, 10, 20, 40, 80, 200 и 300 К. Длина волны возбуждающего света  $\lambda_{\text{ex}} = 450\text{ nm}$ . На вставках показаны слабые линии в увеличенном масштабе.

Описание спектров в области  $R$ -линий иона  $\text{Cr}^{3+}$  в  $\text{YAB:Cr}$  ранее приводилось в различных работах [20–22], однако не было подробного исследования температурной зависимости структуры этих спектров. Такая информация необходима для понимания возможности создания ратиометрических термометров на основе измерений параметров  $R$ -линий.

В красной области спектра люминесценции  $\text{YAB:Cr}$  при низких температурах наблюдается ряд узких линий и прилегающая широкая полоса. Такой спектр связан с бесфонными линиями переходов из возбуждённого орбитального дублета  ${}^2E$  на основной синглет  ${}^4A_2$  иона  $\text{Cr}^{3+}$  и соответствующими вибранными крыльями. В настоящей работе мы сосредоточимся на бесфонных линиях перехода  ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$ . Более подробный вид спектра, включающий вибранный полосу, приведён, например, в нашей недавней работе [23], посвящённой спектроскопии кристалла  $\text{YAB:Mn}$  с неконтролируемой примесью ионов  $\text{Cr}^{3+}$ . Спектр люминесценции кристалла  $\text{YAB:Cr}$ , исследуемого в настоящей работе, в диа-

пазоне бесфонных и вибранных переходов  ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$  имеет такой же вид. На рис. 2 приведены спектры люминесценции кристалла  $\text{YAB:Cr}$  в спектральном диапазоне  $14500\text{--}14700\text{ cm}^{-1}$ . Расщепление дублета  ${}^2E$  низкосимметричными компонентами кристаллического поля приводит к появлению в спектре линий, обозначаемых в литературе как  $R_1$  и  $R_2$ . Положения зарегистрированных линий при 4 К составляют  $14633$  и  $14689\text{ cm}^{-1}$ , соответственно, что согласуется с положениями линий  $R_1$  и  $R_2$ , определёнными в других работах [20–22]. В низкочастотной части спектра можно увидеть линию  $N$  с частотой максимума  $14588\text{ cm}^{-1}$  при 4 К. Подобные линии ранее наблюдались в ряде других кристаллов, легированных хромом, и идентифицировались авторами как линии парных центров  $\text{Cr}^{3+}$  ( $N$ -линии) [24–26], либо как линии одиночных центров  $\text{Cr}^{3+}$  в позициях, искажённых вследствие влияния близкого дефекта в кристаллической решётке [27]. Кроме того, с низкочастотной стороны линии  $R_1$  наблюдается слабая линия  $N'$  с частотой максимума  $14618\text{ cm}^{-1}$  при 4 К. Спектральные полосы



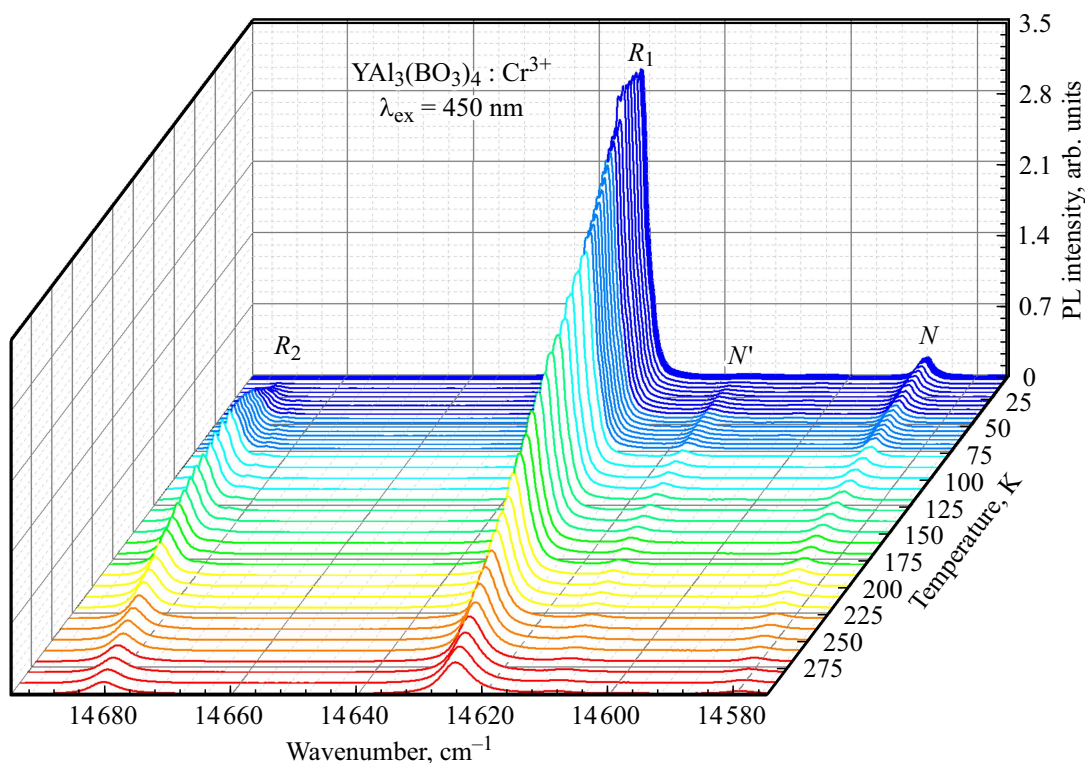
**Рис. 3.** Структура линий люминесценции иона  $Cr^{3+}$  в YAB:Cr:  $R_1$  (a),  $R_2$  (b),  $N$  (c),  $N'$  (d). Экспериментальные спектры (красные кривые) представлены в виде суммы (пунктир) двух контуров.

$R_1$ ,  $R_2$ ,  $N$  и  $N'$  имеют сложную форму. На рис. 3 показано их разложение на составляющие. Видно, что эти полосы состоят из отстоящих друг от друга на частотный промежуток около  $1\text{ cm}^{-1}$  двух линий, контуры которых перекрываются. По данным исследований методом ЭПР расщепление основного состояния  $Cr^{3+}$  в YAB составляет  $1.05 \pm 0.04\text{ cm}^{-1}$  при комнатной температуре [19]. Для парных центров ионов  $Cr^{3+}$  вследствие сильного обменного взаимодействия характерны значительно большие значения расщепления основного состояния. Например, для различных парных центров ионов хрома в рубине величина такого расщепления составляет от 43 до  $69\text{ cm}^{-1}$  [28].

Таким образом, линии  $N$  и  $N'$ , по всей видимости, соответствуют не парным центрам  $Cr^{3+}$ , а одиночным центрам  $Cr^{3+}$  в искажённой вследствие близости некоторого дефекта позиции, а наблюдаемые дублеты связаны со спин-орбитальным расщеплением основного

состояния  $^4A_2$ , на которое осуществляются переходы из состояний  $^2E$ .

Рисунок 4 отображает температурную динамику спектров люминесценции YAB:Cr в области  $R$ -линий  $Cr^{3+}$ . Все линии при понижении температуры сдвигаются в более высокочастотную область и сужаются. Ниже 75 K ширина и положение линий практически не меняются. Линия  $R_1$  — самая интенсивная линия в спектре — теряет в интенсивности при нагреве от 4 K до комнатной температуры. Это связано с термическим перераспределением заселённости компонент расщеплённого уровня  $^2E$ . При этом интенсивность линии  $R_2$  при нагреве возрастает вплоть до 75 K и затем убывает, что, по всей видимости, свидетельствует об уменьшении заселённости верхней компоненты  $^2E$  из-за перераспределения заселённости уровней  $^2E$  в пользу вибронных уровней. Температурная динамика у линий  $N$  и  $N'$  такая же, как у линий  $R_1$  и  $R_2$  соответственно.



**Рис. 4.** Спектры фотолюминесценции кристалла  $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4:\text{Cr}^{3+}$  в частотном диапазоне  $14550\text{--}14700\text{ cm}^{-1}$  при температурах  $4\text{--}300\text{ K}$  (шкала волновых чисел изменена по сравнению с рис. 2 и 3: от больших значений к меньшим).

Линии люминесценции  $R_1$  и  $R_2$  начинаются с уровней, разделенных энергетическим интервалом  $\Delta E = 56\text{ cm}^{-1}$ . На рис. 5, *a* показана температурная зависимость отношения  $LIR(T)$  интегральных интенсивностей линий  $R_2$  и  $R_1$ . Видно, что эта зависимость соответствует распределению Больцмана для интервала  $\Delta E = 56\text{ cm}^{-1}$ . На рис. 5, *b* приведены абсолютная и относительная чувствительности в зависимости от температуры. Максимальная абсолютная чувствительность достигается при  $T_m = \Delta E/2k = 40.3\text{ K}$ , а относительная чувствительность при этой температуре  $S_r(T_m)$  составляет  $5\% \text{ K}^{-1}$ . Таким образом, термометр, основанный на измерении соотношения интегральных интенсивностей линий  $R_2$  и  $R_1$ , будет наиболее эффективен для низких температур вблизи  $40\text{ K}$ .

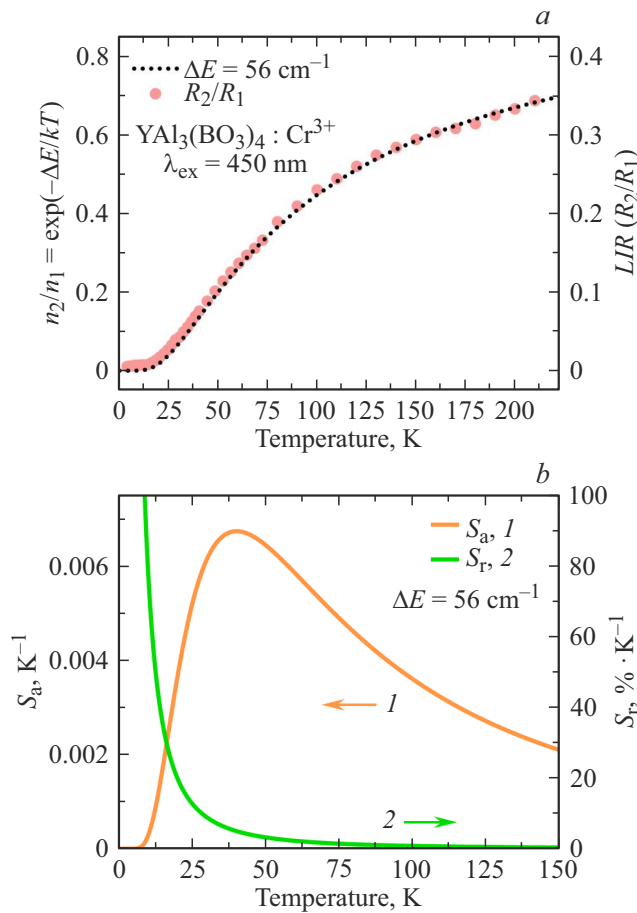
Измерение более высоких температур может осуществляться с помощью регистрации ширины линии  $R_1$ . Ширина всех линий практически не меняется в диапазоне температур  $4\text{--}75\text{ K}$ , затем начинает заметно расти из-за увеличения вклада фоновых процессов. Мы остановимся на самой интенсивной линии в спектре. На рис. 6, *a* показана температурная зависимость полуширины (полной ширины на уровне половины высоты) линии  $R_1$ . В диапазоне температур  $4\text{--}75\text{ K}$  ширина составляет  $2.3\text{ cm}^{-1}$  и практически не меняется, что обуславливает почти нулевую абсолютную чувствительность при этих температурах (рис. 6, *b*). В диапазоне температур  $75\text{--}300\text{ K}$  ширина плавно увеличивается от

**Таблица 1.** Характеристики люминесцентных термометров на основе  $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4:\text{Cr}^{3+}$

Оптический параметр	$\lambda, \text{nm}$	$\Delta E, \text{cm}^{-1}$	$T_m, \text{K}$	$S_r(T_m), \% \text{K}^{-1}$
$LIR [R_2/R_1]$	680–684	56	40.3	5
$LIR [N'/N]$	684–686	30	21.6	9.2
$\Delta\nu(R_1)$	683–684	–	300	2

2.3 до  $32\text{ cm}^{-1}$ . Максимальная относительная чувствительность в регистрируемом диапазоне температур не достигает пика и составляет  $2\% \text{ K}^{-1}$  при  $300\text{ K}$ .

Расширение измеряемого диапазона в область более низких температур возможно путём измерения относительной интенсивности линий люминесценции  $N'$  и  $N$ , спектральный интервал между которыми составляет  $\Delta E = 30\text{ cm}^{-1}$ . На рис. 7, *a* показана температурная зависимость отношения  $LIR(T)$  интегральных интенсивностей линий  $N'$  и  $N$ . Экспериментальная кривая также хорошо соответствует распределению Больцмана для интервала  $\Delta E = 30\text{ cm}^{-1}$ . Из этого можно сделать вывод, что линии  $N$  и  $N'$  принадлежат одному и тому же центру  $\text{Cr}^{3+}$ . Рисунок 7, *b* иллюстрирует абсолютную и относительную чувствительности в зависимости от температуры. Максимальная абсолютная чувствительность достигается при  $T_m = 21.6\text{ K}$ , относительная чув-



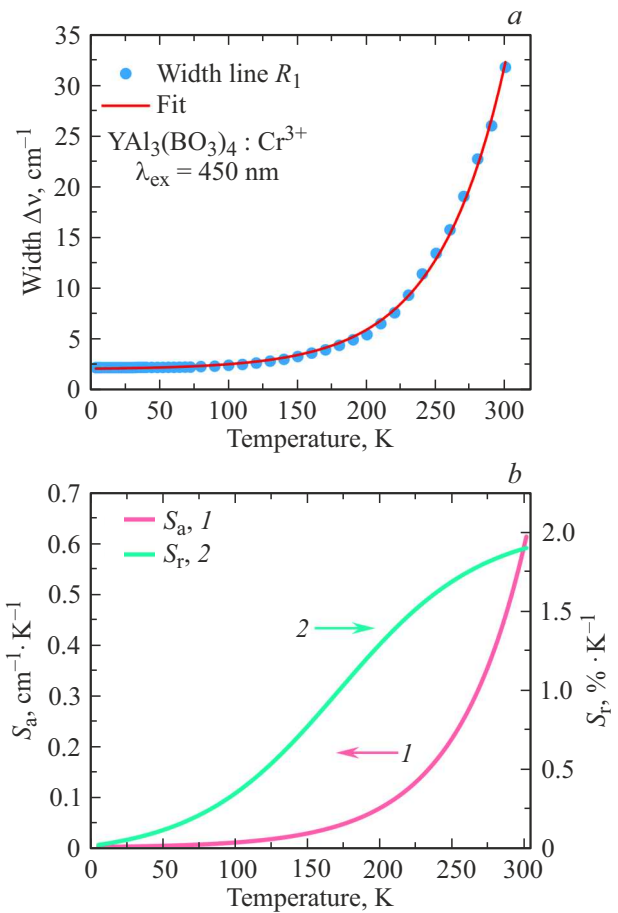
**Рис. 5.** Отношение интенсивностей линий люминесценции  $R_2$  и  $R_1$ . Экспериментальные данные приведены красными точками. Чёрная пунктирная кривая — распределение Больцмана для  $\Delta E = 56 \text{ cm}^{-1}$  (a). Абсолютная чувствительность  $S_a$  (оранжевая кривая 1) и относительная чувствительность  $S_r$  (зеленая кривая 2) для  $\Delta E = 56 \text{ cm}^{-1}$  (b).

ствительность при этой температуре составляет  $S_r(T_m)$   $9.2\% \text{ K}^{-1}$ .

Обобщение всех данных и исследованных характеристик потенциальных термометров на основе  $YAB:Cr$  приведены в таблице 1.

### Заключение

Было проведено исследование кристалла  $YAB:Cr$  как материала для люминесцентной термометрии в области низких температур. В качестве способа регистрации температуры было предложено измерение параметров  $R$ -линий иона  $Cr^{3+}$  (переход  ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$ ). Была проведена идентификация линий люминесценции  $YAB:Cr$  в области  $R$ -линий. Дополнительные зарегистрированные линии  $N$  и  $N'$  были приписаны переходам  ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$  в центре  $Cr^{3+}$  в искажённой вследствие близости некоторого дефекта позиции. Температурные зависимости отношений интегральных интенсивностей  $LIR(T)$  линий  $R_2$  и  $R_1$  и линий

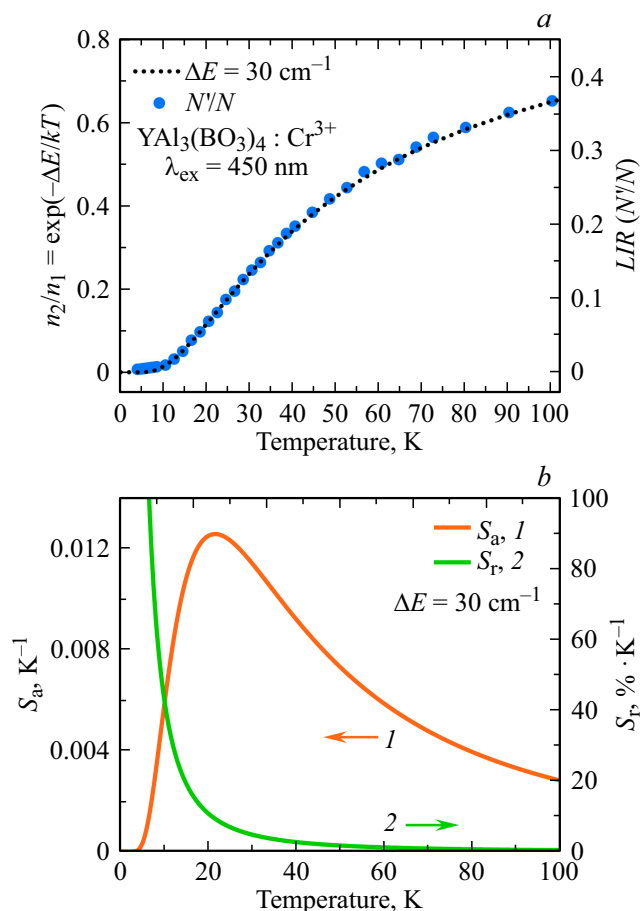


**Рис. 6.** Температурные зависимости полуширины  $\Delta\nu$  люминесцентной линии  $R_1$  ( $14633 \text{ cm}^{-1}$ ) (a), абсолютной  $S_a$  (розовая кривая 1) и относительной  $S_r$  (зеленая кривая 2) чувствительностей при измерении  $\Delta\nu(R_1)$  (b).

$N'$  и  $N$  хорошо соответствуют распределению Больцмана  $LIR(T) = Ce^{(-\Delta E/kT)}$  для  $\Delta E = 56 \text{ cm}^{-1}$  и  $\Delta E = 30 \text{ cm}^{-1}$ , соответственно. На измерении этих отношений могут быть реализованы ратиометрические люминесцентные криотермометры с максимумами абсолютной чувствительности при температурах 40.3 и 21.6 K, соответственно. Относительные чувствительности при этих температурах составляют 5 и  $9.2\% \text{ K}^{-1}$  соответственно. Измерение ширины самой интенсивной спектральной компоненты — линии  $R_1$  — может быть способом регистрации температуры в диапазоне от 100 K и выше.

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-10132П). М.Н.П. благодарит Министерство науки и высшего образования РФ за поддержку (проект FFUU-2022-0003 Госзадания ИСАН).



**Рис. 7.** Отношение интенсивностей линий люминесценции  $N'$  и  $N$ . Экспериментальные данные приведены синими точками. Чёрная пунктирная кривая — распределение Больцмана для  $\Delta E = 30 \text{ cm}^{-1}$  (a). Абсолютная чувствительность  $S_a$  (оранжевая кривая 1) и относительная чувствительность  $S_r$  (зеленая кривая 2) при интервале  $\Delta E = 30 \text{ cm}^{-1}$  (b).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] K. Elzbiaciak-Piecka, L. Marciniak. *Sci. Rep.*, **12**, 16364 (2022). DOI:10.1038/s41598-022-20821-4
- [2] M. Back, J. Ueda, M.G. Brik, S. Tanabe. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 38325 (2020). DOI: 10.1021/acsami.0c08965
- [3] M. Back, J. Ueda, M.G. Brik, T. Lesniewski, M. Grinberg, S. Tanabe. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10**, 41512 (2018). DOI: 10.1021/acsami.8b15607
- [4] M. Back, E. Trave, J. Ueda, S. Tanabe. *Chem. Mater.*, **28**, 8347 (2016). DOI: 10.1021/acs.chemmater.6b03625
- [5] A. Mondal, J. Manam. *Ceram. Int.*, **46**, 23972 (2020). DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.06.174
- [6] M. Back, J. Ueda, H. Nambu, M. Fujita, A. Yamamoto, H. Yoshida, H. Tanaka, M.G. Brik, S. Tanabe. *Adv. Opt. Mater.*, **9**, 2100033 (2021). DOI: 10.1002/adom.202100033
- [7] X. Zhang, X. Chen, C. Zhou, J. Fan, W. Zhou, J. Luo, L. Liu, Q. Pang, P. Chen, L. Zhou. *Ceram. Int.*, **48**, 19484 (2022). DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.03.252
- [8] J. Ueda, M. Back, M.G. Brik, Y. Zhuang, M. Grinberg, S. Tanabe. *Opt. Mater.*, **85**, 510 (2018). DOI: 10.1016/j.optmat.2018.09.013
- [9] D. Chen, S. Liu, Z. Wan, Z. Ji. *J. Phys. Chem. C*, **120**, 21858 (2016). DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b08271
- [10] Y. Zhu, C. Li, D. Deng, H. Yu, H. Li, L. Wang, C. Shen, X. Jing, S. Xu. *J. Lumin.*, **237**, 118142 (2021). DOI: 10.1016/j.jlumin.2021.118142
- [11] L. Marciniak, A. Bednarkiewicz. *Sens. Actuators B Chem.*, **243**, 388 (2017). DOI: 10.1016/j.snb.2016.12.006
- [12] A. Ćirić, S. Stojadinović, Z. Ristić, Ž. Antić, M.D. Dramićanin. *Sens. Actuators Phys.*, **331**, 112987 (2021). DOI: 10.1016/j.sna.2021.112987
- [13] V. Mykhaulyk, H. Kraus, Y. Zhydashchuk, V. Tsiunra, A. Luchechko, A. Wagner, A. Suchocki. *Sensors*, **20**, 5259 (2020). DOI: 10.3390/s20185259
- [14] B. Zhu, N. Li, S. Ren, Y. Liu, D. Zhang, Q. Wang, Q. Shi, Q. Wang, S. Li, B. Zhang, W. Wang, C. Liu. *Spectrochim. Acta. A: Mol. Biomol. Spectrosc.*, **264**, 120321 (2022). DOI: 10.1016/j.saa.2021.120321
- [15] M. Back, J. Ueda, J. Xu, K. Asami, M. G. Brik, S. Tanabe. *Adv. Opt. Mater.*, **8**, 2000124 (2020). DOI: 10.1002/adom.202000124
- [16] M. Suta, A. Meijerink. *Adv. Theory Simul.*, **3**, 2000176 (2020). DOI: 10.1002/adts.202000176
- [17] N.I. Leonyuk, L.I. Leonyuk. *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.*, **31**, 179 (1995). DOI: 10.1016/0960-8974(96)83730-2
- [18] R.D. Shannon. *Acta Crystallogr. Sect. A*, **32**, 751 (1976). DOI:10.1107/S0567739476001551
- [19] J.-P.R. Wells, M. Yamaga, T.P.J. Han, M. Honda. *J. Phys. Condens. Matter.*, **15**, 539 (2003). DOI: 10.1088/0953-8984/15/3/318
- [20] G. Wang, H.G. Gallagher, T.P.J. Han, B. Henderson. *J. Cryst. Growth*, **153**, 169 (1995). DOI: 10.1016/0022-0248(95)00157-3
- [21] G. Wang, H.G. Gallagher, T.P.J. Han, B. Henderson. *Radiat. Eff. Defects Solids*, **136**, 43 (1995). DOI: 10.1080/10420159508218789
- [22] G. Dominiak-Dzik, W. Ryba-Romanowski, M. Grinberg, E. Beregi, L. Kovacs. *J. Phys. Condens. Matter.*, **14**, 5229 (2002). DOI: 10.1088/0953-8984/14/20/318
- [23] A. Molchanova, K. Boldyrev, N. Kuzmin, A. Veligzhanin, K. Khaydukov, E. Khaydukov, O. Kondratev, I. Gudim, E. Miklaieva, M. Popova. *Materials*, **16**, 537 (2023). DOI: 10.3390/ma16020537
- [24] G.F. Imbusch. *Phys. Rev.*, **153**, 326 (1967). DOI: 10.1103/PhysRev.153.326
- [25] S.P. Jamison, G.F. Imbusch. *J. Lumin.*, **75**, 143 (1997). DOI: 10.1016/S0022-2313(97)00117-8
- [26] B. Malysa, A. Meijerink, T. Jüstel. *J. Lumin.*, **171**, 246 (2016). DOI: 10.1016/j.jlumin.2015.10.042
- [27] W. Mikenda, A. Preisinger. *J. Lumin.*, **26**, 53 (1981). DOI: 10.1016/0022-2313(81)90169-1
- [28] P. Kisliuk, W.F. Krupke. *J. Appl. Phys.*, **36**, 1025 (1965). DOI: 10.1063/1.1714084