

02

Кристаллы $YAl_3(BO_3)_4 : Cr$ для люминесцентной криотермометрии© А.Д. Молчанова¹, М. Диаб^{1,2}, К.Н. Болдырев¹, М.Н. Попова¹¹ Институт спектроскопии РАН,
Троицк, Москва, Россия² 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 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 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 K . Низкотемпературная (от 4 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:Cr³⁺) 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:Cr³⁺ 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 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 ± 0.05 К. Для возбуждения люминесценции использовался диодный

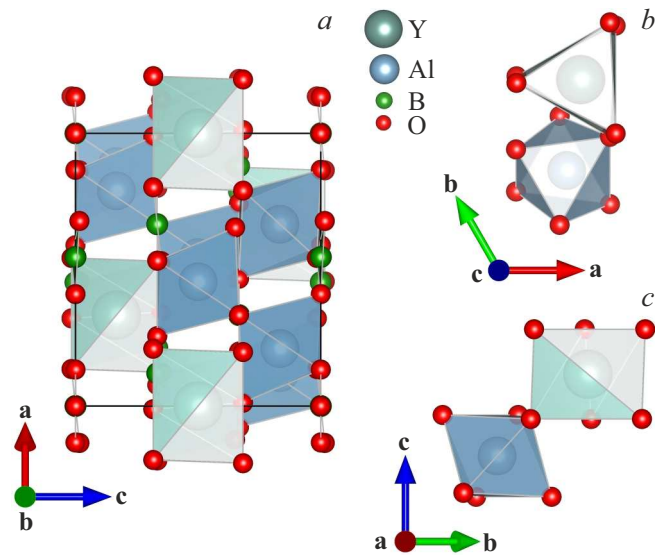


Рис. 1. Проекция элементарной ячейки $YAl_3(BO_3)_4$ вдоль оси b (a). Проекция тригональной призмы YO_6 и искаженного октаэдра AlO_6 в элементарной ячейке $YAl_3(BO_3)_4$ вдоль осей c (b) и a (c).

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+} .

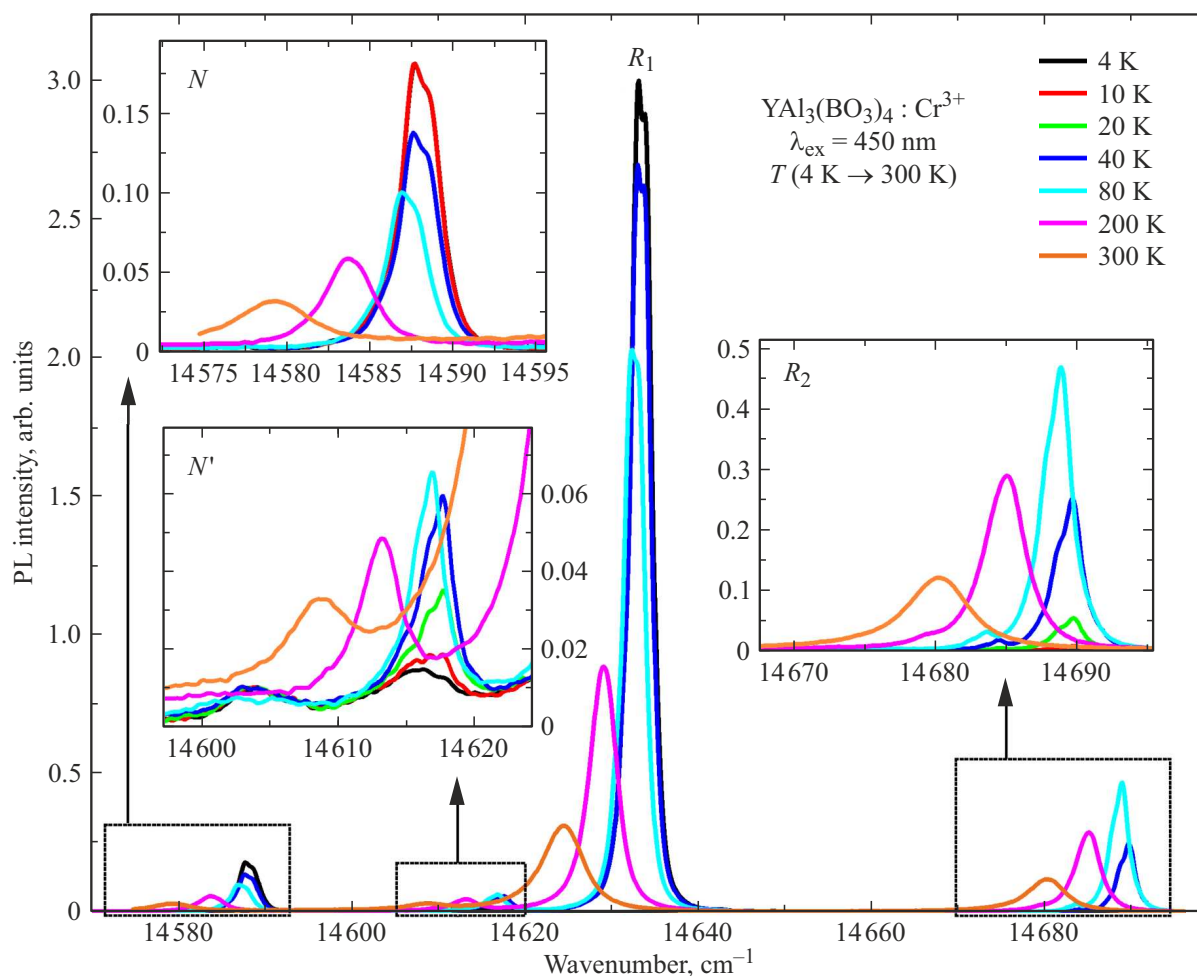


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции кристалла $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4:\text{Cr}^{3+}$ в частотном диапазоне $14550\text{--}14700\text{ cm}^{-1}$ при температурах 4, 10, 20, 40, 80, 200 и 300 К. Длина волны возбуждающего света $\lambda_{\text{ex}} = 450\text{ nm}$. На вставках показаны слабые линии в увеличенном масштабе.

Описание спектров в области R -линий иона Cr^{3+} в $\text{YAB}:\text{Cr}$ 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 $\text{YAB}:\text{Cr}$ 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 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 $\text{YAB}:\text{Mn}$ с неконтролируемой примесью ионов Cr^{3+} . Спектр люминесценции кристалла $\text{YAB}:\text{Cr}$, 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 $\text{YAB}:\text{Cr}$ 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 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 cm^{-1} при 4 К. Подобные линии ранее наблюдались в ряде других кристаллов, легированных хромом, и идентифицировались авторами как линии парных центров Cr^{3+} (N -линии) [24–26] либо как линии одиночных центров 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 cm^{-1} при 4 К. Спектральные полосы

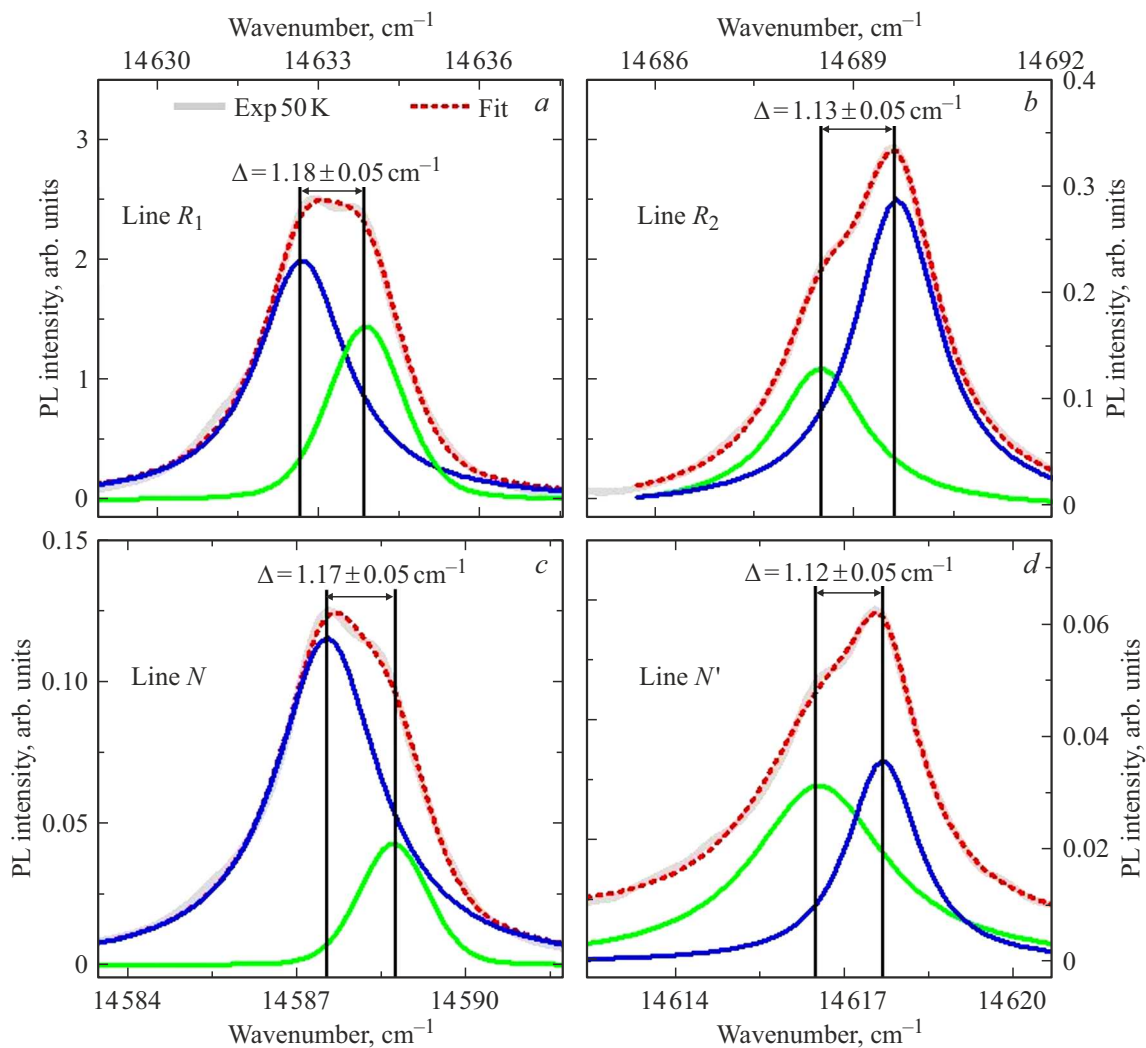


Рис. 3. Структура линий люминесценции иона Cr^{3+} в YAB:Cr: R_1 (a), R_2 (b), N (c), N' (d). Экспериментальные спектры (красные кривые) представлены в виде суммы (штрихи) двух контуров.

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 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 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.

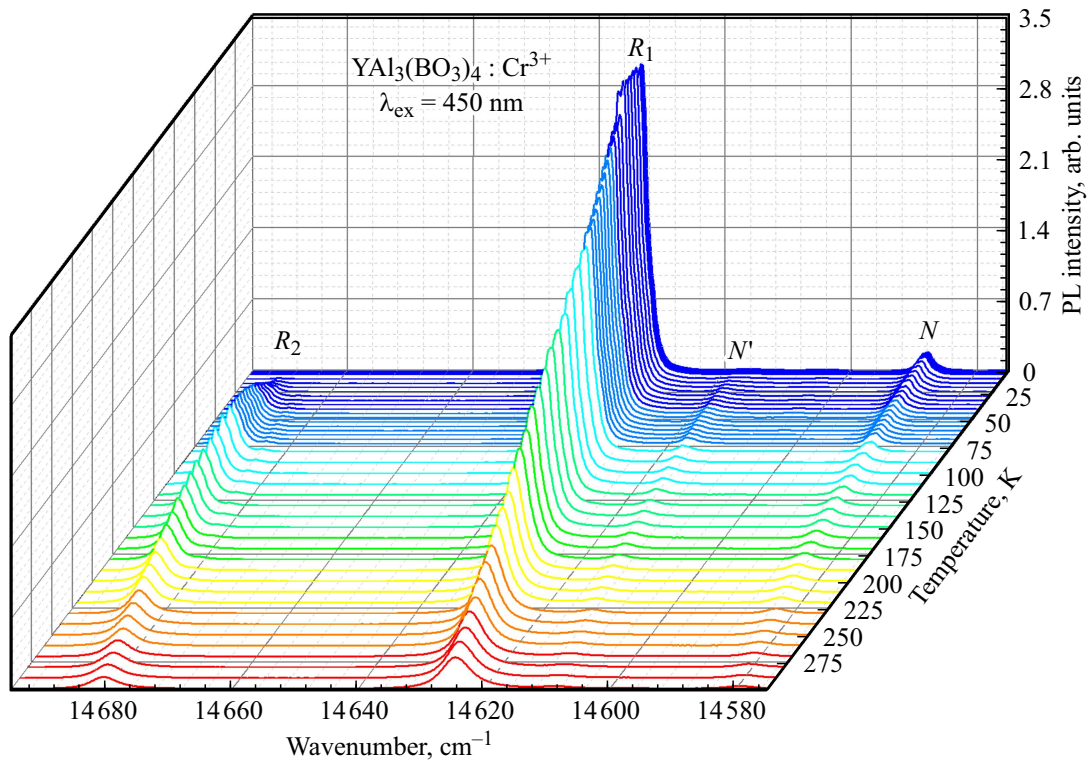


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции кристалла $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4:\text{Cr}^{3+}$ в частотном диапазоне $14550\text{--}14700\text{ cm}^{-1}$ при температурах $4\text{--}300\text{ K}$ (шкала волновых чисел изменена по сравнению с рис. 2 и 3: от больших значений к меньшим).

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 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 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

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

Оптический параметр	λ , nm	ΔE , cm^{-1}	T_m , 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 cm^{-1} . Максимальная относительная чувствительность в регистрируемом диапазоне температур не достигает пика и составляет $2\% \text{ K}^{-1}$ при 300 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 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-

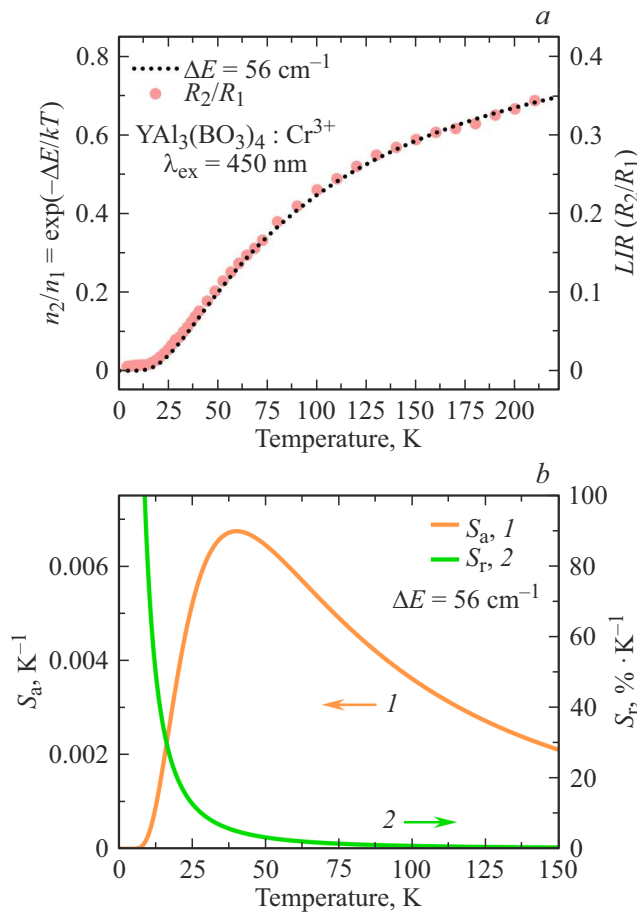


Рис. 5. Отношение интенсивностей линий люминесценции R_2 и R_1 . Экспериментальные данные приведены красными точками. Чёрная пунктирная кривая — распределение Больцмана для $\Delta E = 56 \text{ cm}^{-1}$ (a). Абсолютная чувствительность S_a (оранжевая кривая 1) и относительная чувствительность S_r (зеленая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

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

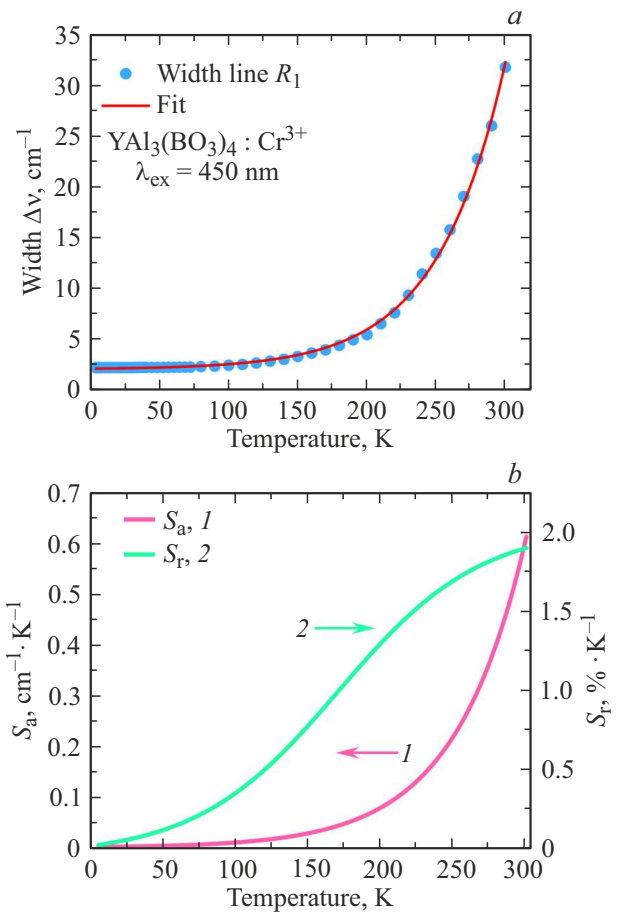


Рис. 6. Температурные зависимости полуширины $\Delta\nu$ люминесцентной линии R_1 (14633 cm^{-1}) (a), абсолютной S_a (розовая кривая 1) и относительной S_r (зеленая кривая 2) чувствительностей при измерении $\Delta\nu(R_1)$ (b).

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 К соответственно. Относительные чувствительности при этих температурах составляют 5 и 9.2% K^{-1} соответственно. Измерение ширины самой интенсивной спектральной компоненты — линии R_1 — может быть способом регистрации температуры в диапазоне от 100 К 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).

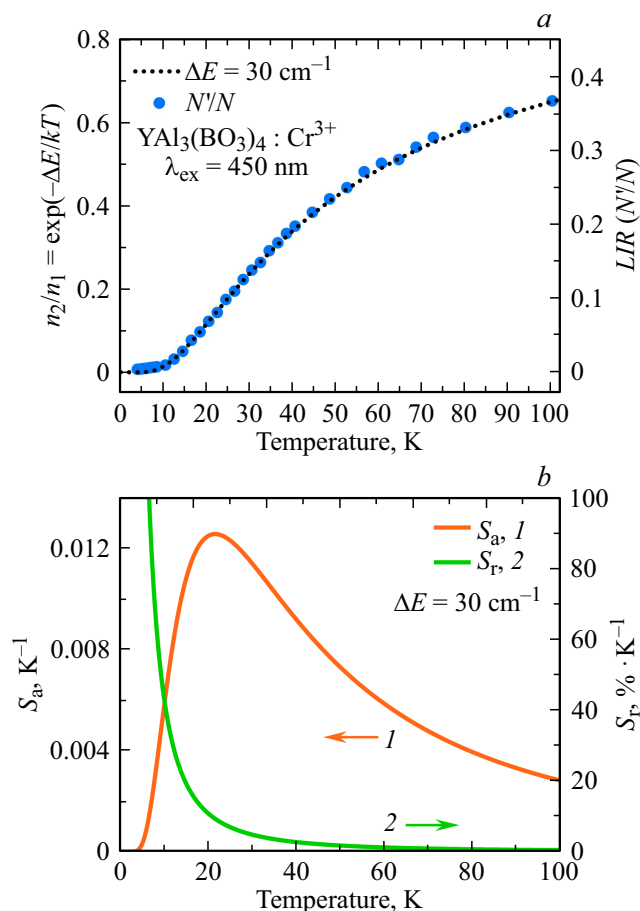


Рис. 7. Отношение интенсивностей линий люминесценции N' и N . Экспериментальные данные приведены синими точками. Чёрная пунктирная кривая — распределение Больцмана для $\Delta E = 30 \text{ cm}^{-1}$ (a). Абсолютная чувствительность S_a (оранжевая кривая 1) и относительная чувствительность S_r (зеленая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