

## Люминесцентный криотермометр на основе кристалла $K_2YF_5:Er^{3+}$

© К.Н. Болдырев<sup>1</sup>, М. Диаб<sup>1,2</sup>, Н.М. Хайдуков<sup>3</sup>, М.Н. Попова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт спектроскопии РАН,  
108840 Троицк, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (Государственный университет),  
141700 Долгопрудный, Московская обл., Россия

<sup>3</sup> Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН,  
119991 Москва, Россия

e-mail: kn.boldyrev@gmail.com

Поступила в редакцию 17.10.2023 г.

В окончательной редакции 17.10.2023 г.

Принята к публикации 26.10.2023 г.

Зарегистрированы спектры люминесценции кристалла  $K_2YF_5:Er^{3+}$  (0.5 at.%) в спектральных областях межмультиплетных переходов  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  (область около  $1.5 \mu m$ , попадающая в окно прозрачности стандартного оптического волокна) и  $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  (область около  $0.98 \mu m$ ) с высоким спектральным разрешением при различных температурах. Предложены пары спектральных линий для реализации болдмановского люминесцентного ратиометрического криотермометра в диапазонах температур около 20, 40 и 60 К с относительной чувствительностью от 8 до  $3\% K^{-1}$ . Показано, что измерение полуширины линии люминесценции с длиной волны  $1.538 \mu m$  ( $6500 cm^{-1}$ ) дает простой и надежный способ регистрации температуры в диапазоне от 20 до 90 К с относительной чувствительностью от 3 до  $2\% K^{-1}$ .

**Ключевые слова:** люминесцентная криотермометрия, кристалл  $K_2YF_5:Er^{3+}$ , фурье-спектроскопия высокого разрешения.

DOI: 10.61011/OS.2023.10.56884.5735-23

### Введение

Люминесцентная термометрия обсуждается как интенсивно развивающийся инструмент для дистанционного измерения температур (см., например, недавние обзоры [1–3] и ссылки в них). Этот метод применяется в таких областях, как химические реакции, катализ, микрофлюидика, микро- и наноэлектроника, фотоника, биология и медицина. Используются зависимости различных характеристик люминесценции, а именно интенсивностей, положений и ширин полос, времен затухания, от температуры. Как источники люминесценции применяются алмазы с центрами окраски, квантовые точки в полупроводниках, органические и гибридные люминофоры, а также микро- и нанокристаллы неорганических соединений, содержащих оптически активные ионы переходных элементов. К настоящему времени хорошо освоен диапазон температур в пределах 100–800 К, в отдельных публикациях сообщалось о продвижении до 20 К [4]. В этом контексте надо отметить, что детектирование температур ниже 20 К является актуальным в аэрокосмических исследованиях, кристаллографических измерениях на синхротроне и для современных квантовых технологий.

В области низких температур мало меняются положения и ширины линий люминесценции, но могут существенно изменяться их относительные интенсивности за счет перераспределения населенностей близких по энергии уровней. Поэтому наиболее адекват-

ным методом для области низких температур является болдмановская ратиометрическая термометрия [5]. В этом случае выбираются уровни возбужденных состояний, разделенные по энергии интервалом  $E_2 - E_1 = \Delta E$ . Их равновесные населенности подчиняются распределению Больцмана  $n_2(T)/n_1(T) = \exp(-\Delta E/kT)$ . Измеряют относительные интенсивности линий люминесценции с выбранных уровней:

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

Здесь  $K = W_2/W_1$  — отношение вероятностей переходов, не зависящее от температуры (что, вообще говоря, не всегда выполняется, как и распределение Больцмана [5]). Соответственно абсолютная тепловая чувствительность

$$S_a(T) = \frac{dR(T)}{dT} \quad (2)$$

имеет максимум при  $T_m = \Delta E/2k$ . Для сравнения термометров, основанных на различных принципах, используется относительная тепловая чувствительность

$$S_r(T) = \frac{1}{R} \frac{dR(T)}{dT}. \quad (3)$$

В качестве болдмановских ратиометрических термометров наиболее привлекательны кристаллы, содержащие редкоземельные ионы, энергетический спектр которых состоит из множества узких штарковских уровней с

различными расстояниями между ними. Чем ниже измеряемые температуры ( $T_m$ ), тем более близкие уровни, с которых регистрируются линии люминесценции, следует выбирать:  $\Delta E \sim 2kT_m$  [5]. Очевидно, что чем меньше  $\Delta E$ , тем более высокое спектральное разрешение требуется для регистрации спектров.

В настоящей работе исследована применимость кристалла  $K_2YF_5:Er^{3+}$  в качестве люминесцентного ратиометрического криотермометра. Необходимо отметить, что кристаллы фторидов, легированные редкоземельными ионами, характеризуются узкими линиями поглощения и люминесценции, что позволяет разрешать переходы с близких уровней, а также значительной плотностью фонных состояний на низких частотах, что благоприятно для установления болъцмановского распределения населенностей при низких температурах. Кристаллы фторида  $K_2YF_5$ , содержащие редкоземельные ионы, известны как эффективные стоковсы и антистоксовы люминофоры, конверторы световых частот, материалы для лазеров и термолюминесцентных дозиметров [6–14]. Выбор иона  $Er^{3+}$  обусловлен тем, что этот ион интенсивно люминесцирует в области окна прозрачности волоконных линий связи ( $1.5 \mu m$ ).

## Детали эксперимента

### Методика приготовления кристаллических образцов

Монокристаллы орторомбического фторида  $K_2YF_5$ , содержащие ионы  $Er^{3+}$ , были получены в гидротермальных условиях. Для гидротермальных экспериментов использовали автоклавы, футерованные медными вкладышами, объемом около  $40 \text{ cm}^3$ , которые разделялись перфорированными диафрагмами на нижнюю зону растворения и верхнюю зону кристаллизации. Кристаллы были синтезированы методом прямого температурного градиента в результате реакции водных растворов, содержащих  $40 \text{ mol.}\% \text{ KF}$ , со смесью оксидов  $0.995Y_2O_3$  и  $0.005Er_2O_3$  при температуре около  $750 \text{ K}$ , градиенте температуры по корпусу реактора около  $3 \text{ K cm}^{-1}$  и давлении около  $100 \text{ MPa}$ . Чистота использованных оксидов была не хуже, чем  $99.99\%$ . В этих условиях в зоне кристаллизации автоклава в течение  $200 \text{ h}$  были синтезированы спонтанно зародившиеся кристаллы размером до  $0.5 \text{ cm}^3$ . Полученные кристаллы были прозрачными и имели бледно-розовый цвет [15].

Мелкие кристаллы измельчали в порошок для рентгенофазового анализа, а из объемных кристаллов изготавливали пластины для спектроскопических исследований. Структурно-фазовый состав полученных образцов изучали на порошковом рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance с монохроматическим  $CuK_\alpha$ -излучением. Анализ рентгенограмм синтезированных образцов проводили с помощью пакета программ EVA (Bruker) с использованием базы данных дифракционных

стандартов ICDD PDF-2. Все дифракционные рефлексы, выявленные от образцов, индицируются в ромбической системе с параметрами решетки  $a = 10.819 \text{ \AA}$ ,  $b = 6.612 \text{ \AA}$ ,  $c = 7.247 \text{ \AA}$ . Также рефлексы полностью соответствуют положениям пиков из стандартной карты для  $K_2YF_5$  (JCPDS 01-072-2387). Другими словами, рентгенодифракционный анализ подтвердил принадлежность решетки синтезированных кристаллов к ромбической пространственной группе  $Pnam$  структурного типа  $K_2YF_5$  [16]. Тот факт, что фториды  $K_2YF_5$  и  $K_2ErF_5$  являются изоструктурными соединениями, а ионные радиусы ионов  $Y^{3+}$  и  $Er^{3+}$  имеют близкие значения, а именно  $0.96 \text{ \AA}$  и  $0.945 \text{ \AA}$ , позволяет предположить, что концентрации ионов  $Er^{3+}$  в кристаллах  $K_2YF_5$  соответствуют мольному отношению  $Y_2O_3/Er_2O_3$  для исходной смеси, используемой для синтеза кристаллов  $K_2Y_{0.995}Er_{0.005}F_5$ , или, по крайней мере, эти величины близки по значению.

### Люминесцентная спектроскопия

Спектры фотолюминесценции кристалла  $K_2YF_5:Er^{3+}$  ( $0.5 \text{ at.}\%$ ) при различных температурах регистрировались на фурье-спектрометре Bruker IFS 125 HR с разрешением до  $0.01 \text{ cm}^{-1}$  в спектральных диапазонах переходов с уровней штарковских мультиплетов  $^4I_{11/2}$  и  $^4I_{13/2}$  на уровне основного мультиплета  $^4I_{15/2}$  (около  $10\,200$  и  $6\,500 \text{ cm}^{-1}$  соответственно или  $0.98$  и  $1.54 \mu m$  в длинах волн). Для этого использовались люминесцентная приставка авторской конструкции,  $CaF_2$  в качестве светоделителя интерферометра, приемник InGaAs с высоким коэффициентом усиления для регистрации спектра. Кристалл охлаждался в криостате замкнутого гелиевого цикла Sumitomo SRP096 ( $3.5 \rightarrow 90 \text{ K}$ ) с шагом  $1 \text{ K}$ . Для возбуждения люминесценции использовался многомодовый диодный лазер мощностью  $100 \text{ mW}$  с длиной волны  $809.4 \text{ nm}$  и шириной спектра  $3.2 \text{ nm}$ . При этом возбуждение осуществлялось в нижний штарковский уровень мультиплета  $^4I_{9/2}$  иона  $Er^{3+}$  [17]. Пятно фокусировки составляло  $1 \text{ mm}$  в диаметре. Для уменьшения тепловой нагрузки на образец были приняты дополнительные меры, такие как использование фильтров для ослабления возбуждающего излучения, установка двойного полированного холодного экрана с малыми отверстиями для входа и выхода излучения. Помимо приклейки образца серебряной пастой к медному пальцу криостата, образец дополнительно плотно оборачивался металлическим индием. Температура измерялась с помощью калиброванного диодного термодатчика LakeShore DT-670, установленного в непосредственной близости к образцу, управлялась и регистрировалась температурным PID контроллером LakeShore Model 335. Температурный контроль обеспечивался с точностью  $\pm 0.05 \text{ K}$ . Анализ спектров, зарегистрированных с разрешением  $0.01 \text{ cm}^{-1}$ , показал, что разрешения  $0.1 \text{ cm}^{-1}$  достаточно, чтобы спектр не искажался.

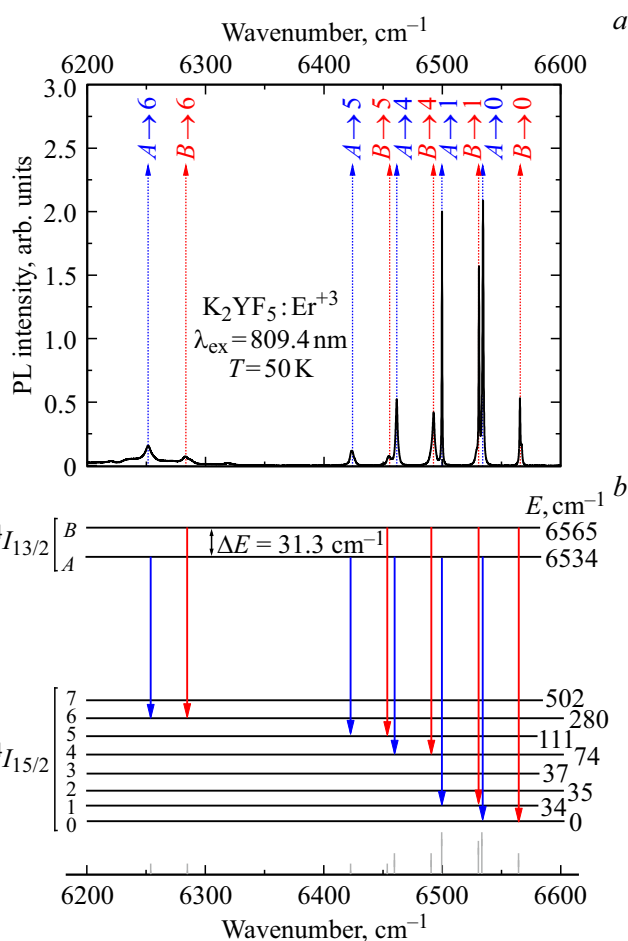
**Таблица 1.** Энергии  $E$  штарковских уровней иона  $Er^{3+}$  в кристалле  $K_2YF_5:Er^{3+}$  (0.5 at.%), полученные из анализа спектров люминесценции при температурах 4 и 80 К

$2s+1L_J$	$N_B$	$E, \text{cm}^{-1}$ [17]	$E, \text{cm}^{-1}$ $T = 4$ К Эта работа	$E, \text{cm}^{-1}$ $T = 80$ К Эта работа
$^4I_{15/2}$	0	0	0	0
	1	34	34.8	34.3
	2	35	—	—
	3	37	—	—
	4	74	73.0	72.6
	5	111	111.0	110.1
	6	280	283.0	283.7
	7	502	500.6	500.1
$^4I_{13/2}$	A	6534	6534.5	6534.2
	B	6565	6565.8	6565.5
	C	6601	6601.4	6601.3
	D	6696	6695.0	6696.2
	E	6730	6729.6	6729.2
	F	6762	6762.0	6762.3
	G	6872	6871.2	6872.0
$^4I_{11/2}$	A	10233	10232.9	10232.5
	B	10260	10260.3	10260.1
	C	10302	10302.3	10301.8
	D	10317	10317.3	10316.6
	E	10340	10340.3	10340.4
	F	10397	10396.2	10396.7

## Результаты и обсуждение

### Штарковские уровни иона $Er^{3+}$ в кристалле $K_2YF_5:Er^{3+}$ : Мультиплеты $^4I_{15/2}$ , $^4I_{13/2}$ , $^4I_{11/2}$

Информация о штарковской структуре уровней иона  $Er^{3+}$  в кристалле  $K_2YF_5$  приведена в работе [17] на основании исследования спектров поглощения и люминесценции серии твердых растворов  $K_2Y_{1-x}Er_xF_5$  ( $0 < x \leq 1.0$ ). Эти данные приведены в первом столбце табл. 1. Однако в [17] не было указано, к какой концентрации эрбия и какой температуре они относятся. На основании анализа спектров люминесценции высокого разрешения кристалла  $K_2YF_5:Er^{3+}$  (0.5 at.%) при различных температурах (они представлены на рисунках в нижеследующих разделах) мы идентифицировали спектральные линии и определили энергии штарковских уровней в мультиплетах  $^4I_{15/2}$ ,  $^4I_{13/2}$ ,  $^4I_{11/2}$  иона  $Er^{3+}$

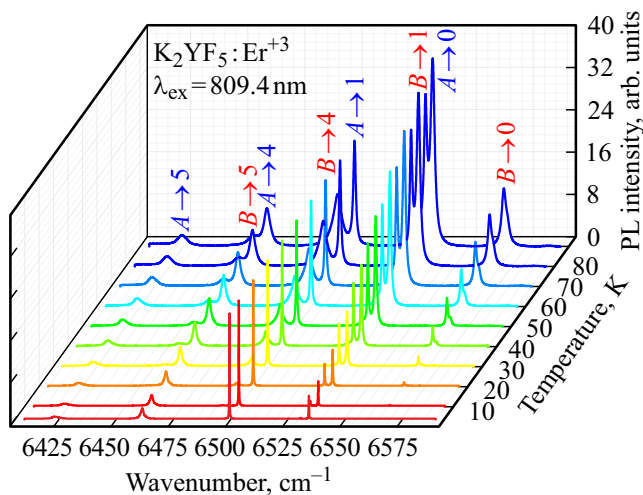


**Рис. 1.** (a) Спектр фотолюминесценции кристалла  $K_2YF_5:Er^{3+}$  (0.5 at.%) в области перехода  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  в ионе  $Er^{3+}$  при температуре 50 К,  $\lambda_{\text{ex}} = 809.4 \text{ nm}$ ; (b) схема уровней, поясняющая идентификацию линий люминесценции.

в кристалле  $K_2YF_5:Er^{3+}$  (0.5 at.%) при температурах 4 и 80 К (табл. 1). Наши данные хорошо согласуются с данными работы [17], за исключением того, что нам не удалось обнаружить уровни с энергиями 35 и 37  $\text{cm}^{-1}$ .

### Фотолюминесценция в области перехода $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$

На рис. 1, a показан спектр фотолюминесценции кристалла  $K_2YF_5:Er^{3+}$  (0.5 at.%) при температуре 50 К в области перехода  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  в ионе  $Er^{3+}$  при возбуждении диодным лазером с длиной волны 809.4 nm. Схема уровней на рис. 1, b поясняет идентификацию линий спектра. При температуре 50 К заселен уровень B, отделенный щелью  $\Delta E = 31.3 \text{ cm}^{-1}$  от нижайшего в мультиплете  $^4I_{13/2}$  уровня A, и в спектре люминесценции видны линии, соответствующие переходам с этого уровня (рис. 1, a). Следующий уровень C отстоит от уровня A уже на 67  $\text{cm}^{-1}$  (табл. 1) и заселен так слабо, что переходы с него не видны. Если измерять относительные интенсивности линий люминес-



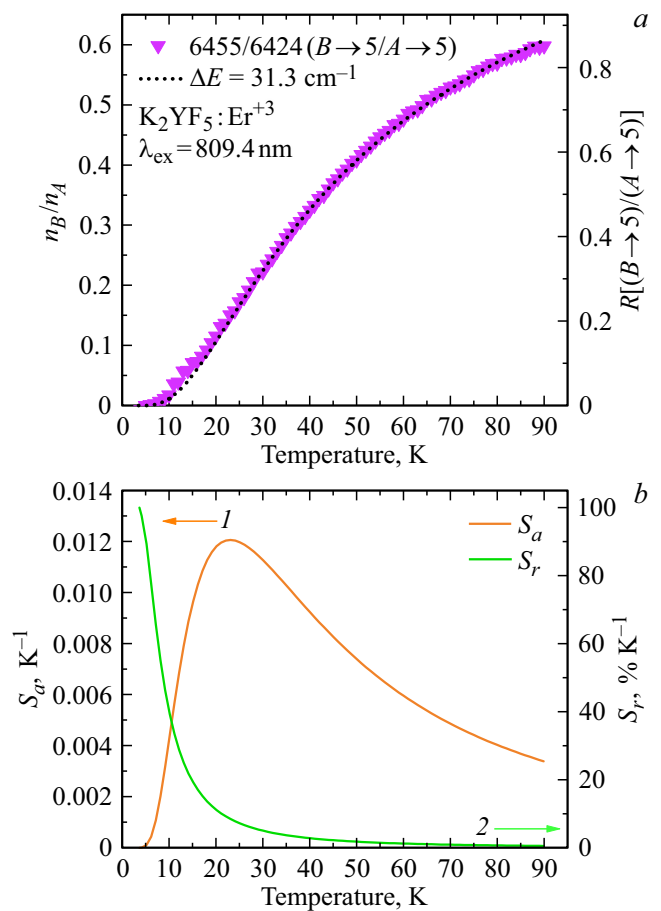
**Рис. 2.** Спектры фотолюминесценции кристалла  $\text{K}_2\text{YF}_5:\text{Er}^{3+}$  (0.5 at.%) в области перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  в ионе  $\text{Er}^{3+}$  в температурном диапазоне 3.5 → 90 К.  $\lambda_{\text{ex}} = 809.4$  нм.

ценции с уровнями  $B$  и  $A$  с расстоянием между ними  $\Delta E = 31.3 \text{ cm}^{-1}$ , можно получить термометр для температур около  $T_m = 22.5 \text{ K}$  (при  $T_m = \Delta E/2k$  абсолютная чувствительность максимальна).

Рисунок 2 наглядно показывает эволюцию высокочастотной части спектра с температурой. При понижении температуры линии люминесценции заметно сужаются; населенность уровня  $B$  падает, а уровня  $A$  — растет, и как результат уменьшается отношение интенсивностей линий, начинающихся с уровней  $B$  и  $A$ . Уменьшение общей интенсивности спектра люминесценции при понижении температуры связано с выходом из резонанса с лазерной модой из-за сужения и сдвига штарковского уровня иона  $\text{Er}^{3+}$ , в который осуществляется возбуждение.

На рис. 3, *a* приведена температурная зависимость отношения  $R(T)$  интегральных интенсивностей линий  $6455 \text{ cm}^{-1}$  [переход  $B({}^4I_{13/2}) \rightarrow 5({}^4I_{15/2})$ ] и  $6424 \text{ cm}^{-1}$  [переход  $A({}^4I_{13/2}) \rightarrow 5({}^4I_{15/2})$ ]. Видно, что эта зависимость повторяет больцмановское распределение населенностей уровней  $B$  и  $A$ , разделенных интервалом  $31.3 \text{ cm}^{-1}$ . Рисунок 3, *b* иллюстрирует абсолютную и относительную чувствительности в зависимости от температуры. Максимальная абсолютная чувствительность достигается при  $T_m = 22.5 \text{ K}$ , относительная чувствительность при этой температуре  $8\% \text{ K}^{-1}$ . Если точность измерения  $R(T)$  около 1% (как в наших экспериментах), оценка разрешаемого температурного интервала дает  $\delta T \approx 0.12 \text{ K}$ .

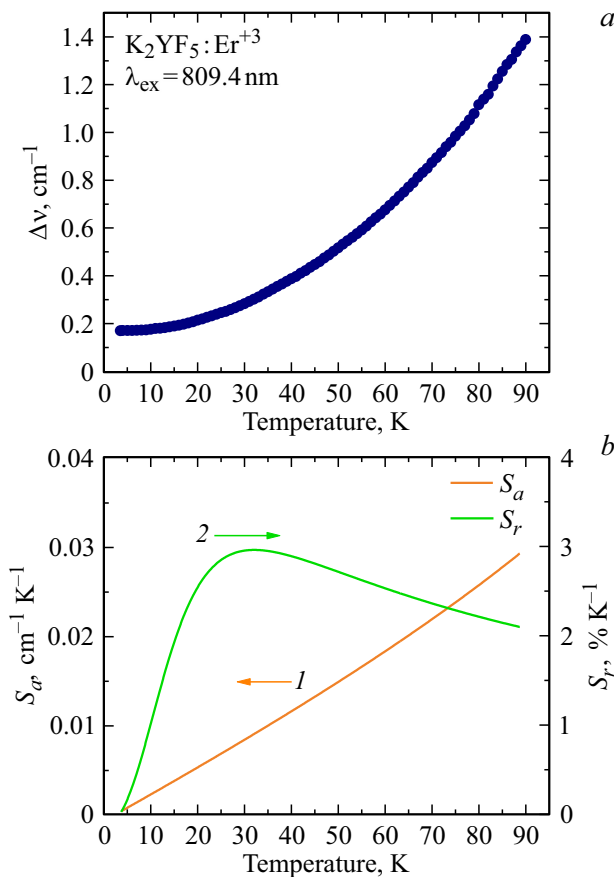
Следует отметить, что для пар линий люминесценции, начинающихся с уровней  $B$  и  $A$ , на уровнях 0, 1, 4, температурная зависимость отношения интенсивностей отклоняется от больцмановской зависимости, что, по видимому, связано с резонансным поглощением: населенность уровней 0, 1, 4 меняется с температурой,



**Рис. 3.** Температурные зависимости (а) отношения  $R[(B \rightarrow 5)/(A \rightarrow 5)]$  интегральных интенсивностей линий люминесценции  $6455 \text{ cm}^{-1}$  [переход  $B({}^4I_{13/2}) \rightarrow 5({}^4I_{15/2})$ ] и  $6424 \text{ cm}^{-1}$  [переход  $A({}^4I_{13/2}) \rightarrow 5({}^4I_{15/2})$ ] (символы), и отношения населенностей  $n_B/n_A$  уровней  $B$  и  $A$ , разделенных интервалом  $31.3 \text{ cm}^{-1}$ , в предположении больцмановского распределения (пунктирная линия); (б) абсолютной  $S_a$  (оранжевая кривая 1) и относительной  $S_r$  (зеленая кривая 2) чувствительностей.

в то время как уровень 5 практически не заселен вплоть до 90 К.

Рисунок 3 показывает, что относительная интенсивность люминесценции с уровней, разделенных интервалом около  $30 \text{ cm}^{-1}$ , создает перспективу для разработки термометра с подходящими характеристиками для области температур вблизи 20 К. Расширить температурный диапазон можно, измеряя полуширину линии люминесценции. На рис. 4 приведена температурная зависимость полуширины (полная ширина на уровне половины высоты) линии  $6500 \text{ cm}^{-1}$  [переход  $A({}^4I_{13/2}) \rightarrow 1({}^4I_{15/2})$ ]. Абсолютная чувствительность растет с ростом температуры, тогда как относительная чувствительность имеет максимум около  $3\% \text{ K}^{-1}$  при 30 К и падает до  $2\% \text{ K}^{-1}$  при 90 К.



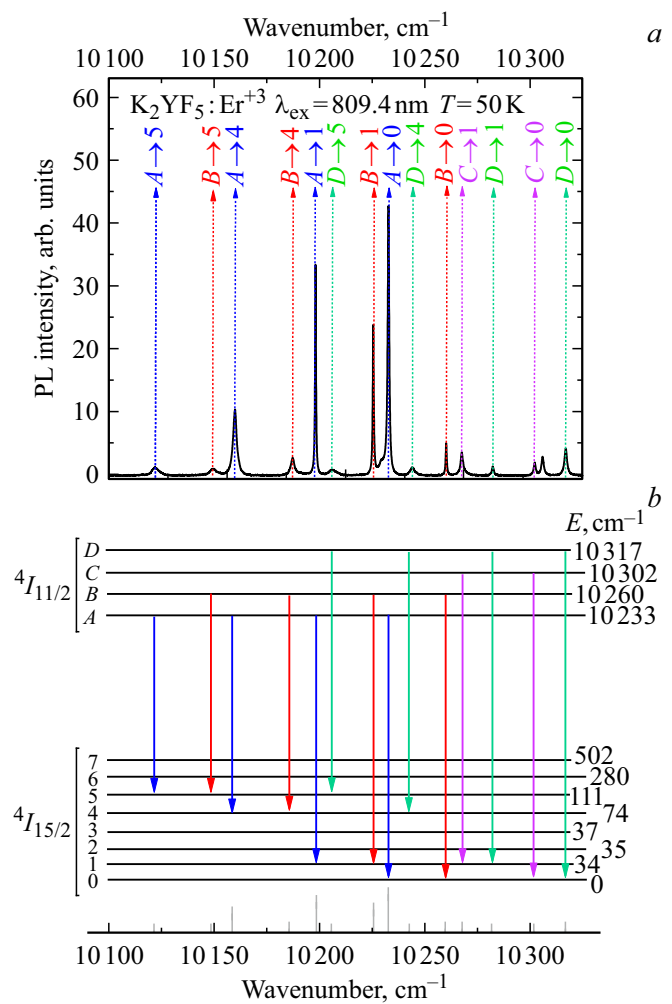
**Рис. 4.** Температурные зависимости (а) полуширины  $\Delta\nu$  линии люминесценции  $6500\text{ cm}^{-1}$  [переход  $A(^4I_{13/2}) \rightarrow 1(^4I_{15/2})$ ]; (б) абсолютной  $S_a$  (оранжевая кривая 1) и относительной  $S_r$  (зеленая кривая 2) чувствительностей.

**Фотолюминесценция в области перехода**

$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$

Спектры фотолюминесценции в области перехода  $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  показаны на рис. 5 и 6 вместе с соответствующей схемой уровней (рис. 5, б). Люминесценция в этой области более слабая, чем на переходе  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ . Расстояние по энергии между двумя нижайшими уровнями А и В мультиплета  $^4I_{11/2}$   $\Delta E = 27\text{ cm}^{-1}$ , что близко к рассмотренному выше случаю  $\Delta E = 31.3\text{ cm}^{-1}$ . Уровень D отстоит от нижайшего уровня А на  $84\text{ cm}^{-1}$ : пара линий  $10\,206\text{ cm}^{-1}$  [переход  $D(^4I_{11/2}) \rightarrow 5(^4I_{15/2})$ ] и  $10\,122\text{ cm}^{-1}$  [переход  $A(^4I_{11/2}) \rightarrow 5(^4I_{15/2})$ ] может быть выбрана для люминесцентной термометрии в области около 60 К. На рис. 7, а приведены температурные зависимости отношений интегральных интенсивностей этих линий в сравнении с отношением бoльцмановских населенностей уровней D и А. Для области температур около 40 К подходят уровни D и В с расстоянием между ними  $57\text{ cm}^{-1}$  (рис. 7, б).

Характеристики люминесцентных термометров на основе  $K_2YF_5:Er^{3+}$  сведены в табл. 2.



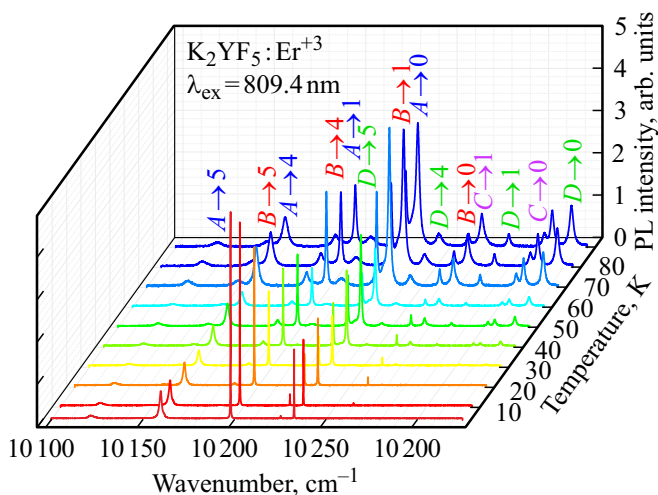
**Рис. 5.** (а) Спектр фотолюминесценции кристалла  $K_2YF_5:Er^{3+}$  (0.5%) в области перехода  $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  в ионе  $Er^{3+}$  при температуре 50 К,  $\lambda_{ex} = 809.4\text{ nm}$ ; (б) схема уровней, поясняющая идентификацию линий.

**Таблица 2.** Термометрические характеристики люминесцентных термометров на основе  $K_2YF_5:Er^{3+}$

Оптический параметр	$\lambda, \mu\text{m}$	$T_m, \text{K}$	$S_r(T_m), \% \text{K}^{-1}$	$\delta T, \text{K}$
$R [6454\text{ cm}^{-1}/6422\text{ cm}^{-1}]$	1.557	22.4	8.0	0.12
$\Delta\nu$ линии $6500\text{ cm}^{-1}$		35	3.0	0.5
		90	2.0	0.17
$R [10206\text{ cm}^{-1}/10149\text{ cm}^{-1}]$	0.985	41.0	5.0	0.8
$R [10206\text{ cm}^{-1}/10122\text{ cm}^{-1}]$	0.985	60.4	3.2	0.6

**Заключение**

Выполнено исследование применимости спектров люминесценции кристалла  $K_2YF_5:Er^{3+}$  для дистанционного измерения низких температур. Регистрировались спектры люминесценции кристалла



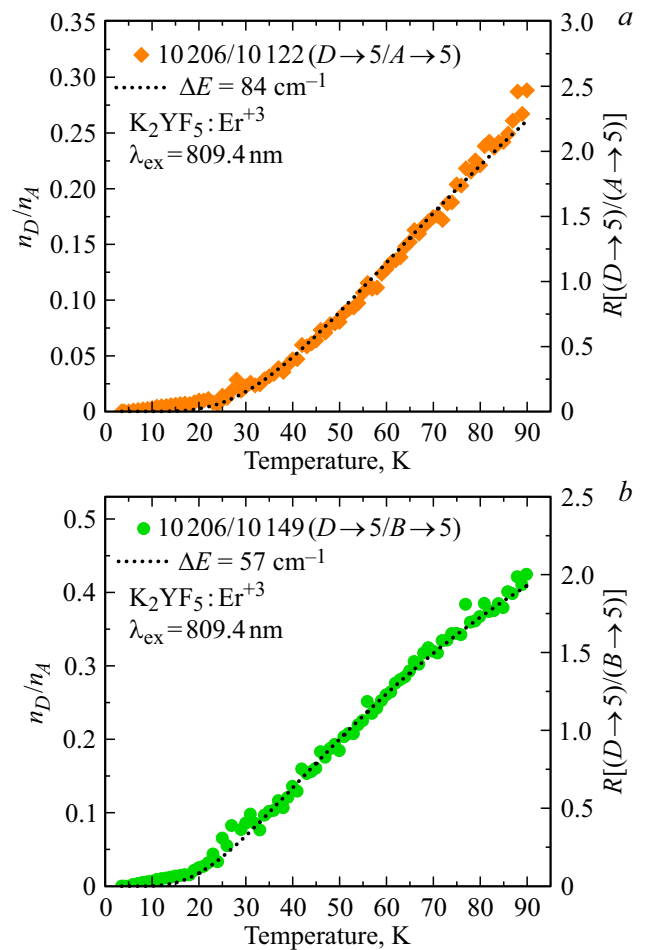
**Рис. 6.** Спектры фотолюминесценции кристалла  $\text{K}_2\text{YF}_5:\text{Er}^{3+}$  (0.5%) в области перехода  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  в ионе  $\text{Er}^{3+}$  в температурном диапазоне 3.5 → 90 К.  $\lambda_{\text{ex}} = 809.4$  nm.

$\text{K}_2\text{YF}_5:\text{Er}^{3+}$  (0.5 at.%) при различных температурах и возбуждении излучением диодного лазера с длиной волны 809.4 nm и шириной спектра 3.2 nm. Температура кристалла контролируемо изменялась от 3.5 до 90 К. Исследовались инфракрасные спектры в области межмультиплетных переходов  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  (длины волн около 1.5  $\mu\text{m}$ ) и  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  (0.98  $\mu\text{m}$ ) с высоким спектральным разрешением. Излучение с длинами волн около 1.5  $\mu\text{m}$  попадает в окно прозрачности оптических волокон, что особенно ценно для целей дистанционного зондирования.

Уточнена схема штарковских уровней иона  $\text{Er}^{3+}$  в мультиплетах  ${}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4I_{13/2}$  и  ${}^4I_{11/2}$ . Наши данные в основном согласуются с данными работы [16], однако из уровней основного мультиплета с энергиями 34, 35 и 37  $\text{cm}^{-1}$  мы зарегистрировали только уровень 34  $\text{cm}^{-1}$ .

Мы показали, что для реализации болцмановского люминесцентного радиометрического криотермометра подходят пары спектральных линий 6454–6422  $\text{cm}^{-1}$ , 10 206–10 149  $\text{cm}^{-1}$  и 10 206–10 122  $\text{cm}^{-1}$ , соответствующих переходам с пар уровней, разделенных энергетическими интервалами соответственно 31.3, 57 и 84  $\text{cm}^{-1}$ . Соответствующие температуры, при которых максимальна абсолютная чувствительность, составляют 22.4, 41 и 60 К, а относительные чувствительности при этих температурах — 8, 5 и 3.2%  $\text{K}^{-1}$ .

Самые узкие линии люминесценции наблюдаются для переходов между нижайшими штарковскими уровнями мультиплетов, наименее подверженными фоновой релаксации. Для исследуемого кристалла  $\text{K}_2\text{YF}_5:\text{Er}^{3+}$  полуширина этих линий заметно меняется при изменении температуры в области температур выше ~ 20 К. В частности, для линии люминесценции с длиной волны 1.538  $\mu\text{m}$  (6500  $\text{cm}^{-1}$ ) полуширина плавно увеличивается от 0.2 до 1.4  $\text{cm}^{-1}$  в интервале температур от 20 до 90 К. Получаем люминесцентный криотермометр на



**Рис. 7.** Температурные зависимости отношений интегральных интенсивностей линий (a) 10 206  $\text{cm}^{-1}$  [переход  $D({}^4I_{11/2}) \rightarrow 5({}^4I_{15/2})$ ] и 10 122  $\text{cm}^{-1}$  [переход  $A({}^4I_{11/2}) \rightarrow 5({}^4I_{15/2})$ ]; (b) 10 206  $\text{cm}^{-1}$  [переход  $D({}^4I_{11/2}) \rightarrow 5({}^4I_{15/2})$ ] и 10 149  $\text{cm}^{-1}$  [переход  $B({}^4I_{11/2}) \rightarrow 5({}^4I_{15/2})$ ] (символы), и населенности уровней (a)  $D$  и  $A$ , разделенных интервалом 84  $\text{cm}^{-1}$ ; (b)  $B$  и  $A$ , разделенных интервалом 57  $\text{cm}^{-1}$  в предположении болцмановского распределения (пунктирные линии).

эту область температур с мало меняющейся относительной чувствительностью (от 2 до 3%  $\text{K}^{-1}$ ).

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-12-00047). Измерения проводились на уникальной научной установке „Мультифункциональная широкодиапазонная спектроскопия высокого разрешения“ (УНУ МШСВР ИСАН [18]). Синтез кристаллов и их идентификация были выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственных заданий Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова. Исследования про-

водились с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] L. Marciniak, K. Kniec, K. Elzbieciak-Piecka, K. Trejgis, J. Stefanska, M. Dramićanin. *Coordination Chem. Rev.*, **469**, 21467 (2022). DOI: 10.1016/j.ccr.2022.214671
- [2] M.D. Dramićanin. *J. Appl. Phys.*, **128**, 040902 (2020). DOI: 10.1063/5.0014825
- [3] C.D.S. Brites, S. Balabhadra, L.D. Carlos. *Adv. Optical Mater.*, **2019**, 7, 1801239 (2019). DOI: 10.1002/adom.201801239
- [4] C.D.S. Brites, K. Fiaczyk, J.F.C.B. Ramalho, M. Sójka, L.D. Carlos, E. Zych. *Adv. Optical Mater.*, **2018**, 1701318 (2018). DOI: 10.1002/adom.201701318
- [5] M. Suta, A. Meijerink. *Adv. Theory Simul.*, **2020**, 3, 2000176 (2020). DOI: 10.1002/adts.202000176
- [6] V.N. Makhov, N.M. Khaidukov. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, **308**, 205–207 (1991). DOI: 10.1016/0168-9002(91)90627-3
- [7] Z. Kollia, E. Sarantopoulou, A.C. Cefalas, A.K. Naumov, V.V. Semashko, R.Y. Abdulsabirov, S.L. Korableva. *Opt. Commun.*, **149**, 386–392 (1998). DOI: 10.1016/S0030-4018(97)00725-6
- [8] P.V. Do, V.P. Tuyen, V.X. Quang, N.T. Thanh, V.T.T. Ha, N.M. Khaidukov, Y.I. Lee, B.T. Huy. *J. Alloys Compd.*, **520**, 262–265 (2012). DOI: 10.1016/j.jallcom.2012.01.037
- [9] T.J. Lee, L.Y. Luo, E.W.G. Diau, T.M. Chen, B.M. Cheng, C.Y. Tung. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 131121 (2006). DOI: 10.1063/1.2358193
- [10] J. Azorín-Nieto, M.N. Khaidukov, A. Sánchez-Rodríguez, J.C. Azorín-Vega. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, **263**, 36–40 (2007). DOI: 10.1016/j.nimb.2007.04.082
- [11] D. Wang, M. Yin, S. Xia, V.N. Makhov, N.M. Khaidukov, J.C. Krupa. *J. Alloys Compd.*, **368**, 337–341 (2004). DOI: 10.1016/j.jallcom.2003.08.061
- [12] H.K. Hanh, N.M. Khaidukov, V.N. Makhov, V.X. Quang, N.T. Thanh, V.P. Tuyen. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, **268**, 3344–3350 (2010). DOI: 10.1016/j.nimb.2010.06.041
- [13] J. Azorín, A. Gallegos, T. Rivera, J.C. Azorín, N.M. Khaidukov. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **580**, 177–179 (2007). DOI: 10.1016/j.nima.2007.05.077
- [14] A. Kadari, R. Mostefa, J. Marcazzo, D. Kadri. *Radiat. Protect. Dosim.*, **167** (2015) 437–442. DOI: 10.1093/rpd/ncu364
- [15] J. Méndez-Ramos, P. Acosta-Mora, J.C. Ruiz-Morales, N.M. Khaidukov. *J. Alloys Compd.*, **575**, 263–267 (2013). DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.04.014
- [16] F. Loncke, D. Zverev, H. Vrielinck, N.M. Khaidukov, P. Matthys, F. Callens. *Phys. Rev. B*, **75**, 144427 (2007). DOI: 10.1103/PhysRevB.75.144427
- [17] R.E. Peale, H. Weidner, F.G. Anderson, N.M. Khaidukov. *OSA Trends in Optics and Photonics Series Vol. 10 Advanced Solid State Lasers*. C.R. Pollock and W.R. Bosenberg (eds) (Optica Publishing Group, 1997). p. 462–466. DOI: 10.1364/ASSL.1997.SC14
- [18] <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/508571/>