

02

Одиночные центры и димеры примесных ионов гольмия в кристаллах синтетического форстерита: спектроскопия высокого разрешения

© Е.П. Чукалина¹, И.О. Тюренков², Е.В. Жариков³, К.А. Субботин³

¹ Институт спектроскопии РАН,
108840 Троицк, Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
141700 Долгопрудный, Московская обл., Россия

³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
119991 Москва, Россия

e-mail: echukalina@isan.troitsk.ru

Поступила в редакцию 25.02.2019 г.

В окончательной редакции 25.02.2019 г.

Принята к публикации 15.03.2019 г.

Зарегистрированы низкотемпературные спектры поглощения с высоким спектральным разрешением в области переходов $^5I_8 \rightarrow ^5I_{7,6,5,4}$, 5F_5 в примесном ионе Ho^{3+} в кристалле синтетического форстерита Mg_2SiO_4 . Сравнение наблюдаемой формы спектральных линий и вычисленной по теории кристаллического поля сверхтонкой структуры позволило впервые идентифицировать спектральные линии по принадлежности к одиночным центрам и димерам.

Ключевые слова: кристалл форстерита, ионы гольмия, спектры поглощения

DOI: 10.21883/OS.2019.07.47927.83-19

Введение

В настоящее время существенный интерес исследователей в мире обращен к проблемам квантовой информатики, актуальными направлениями которой являются квантовые вычисления и квантовая память. Максимальная плотность записи информации достижима для твердотельных систем, среди которых значительное внимание уделяется диэлектрическим кристаллам с редкоземельными (РЗ) ионами [1–4]. В данное время наилучшие результаты по реализации оптической квантовой памяти достигнуты на кристаллах ортосиликата иттрия Y_2SiO_5 , содержащего различные РЗ ионы: Pr^{3+} [5], Eu^{3+} [6], Er^{3+} [7,8], Nd^{3+} [9]. Кристаллы другого силиката, синтетического форстерита Mg_2SiO_4 , легированного РЗ ионами, также рассматриваются в качестве материала для квантовой памяти [10]. Одним из важных преимуществ форстерита является то, что для основной части стабильных изотопов магния и кислорода ядерный спин равен нулю. Ненулевые ядерные спины имеют только изотопы ^{17}O , ^{29}Si и ^{25}Mg с естественной распространенностью 0.04, 4.6 и 10% соответственно. Флуктуация магнитного поля, создаваемого ядерными спинами кристаллической матрицы, является одним из основных факторов, укорачивающих время когерентности электронно-ядерных состояний. Еще одна особенность РЗ центров в форстерите может оказаться благоприятной для увеличения времени когерентности. А именно для кристаллов форстерита Mg_2SiO_4 , легированных ионами Ho^{3+} [11,12], Tb^{3+} [13], Yb^{3+} [10], Er^{3+} [14], методом электронного парамагнитного резо-

нанса (ЭПР) обнаружена высокая степень самоорганизации трехвалентных РЗ ионов в димеры. При этом известно, что реализовать большое время сохранения когерентности возможно с использованием димеров РЗ ионов в сложных молекулярных системах [4].

В связи с перспективой применений форстеритов с РЗ ионами в квантовых технологиях актуальной задачей становится изучение различных примесных РЗ центров и сверхтонкой структуры (СТС) штарковских уровней РЗ ионов в форстеритах. Недавно мы сообщили о первом наблюдении СТС в оптических спектрах синтетического форстерита, легированного гольмием [15]. Полученные экспериментальные данные были подтверждены расчетом по теории кристаллического поля [15]. Настоящая работа является продолжением начатого нами исследования спектров поглощения кристаллов $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 : \text{Ho}^{3+}$ с высоким спектральным разрешением. В ней мы покажем, как на основе информации о СТС возможно указать принадлежность линий поглощения к определенному типу примесного гольмиевого центра в синтетическом форстерите. Насколько известно авторам, подобное исследование проведено впервые.

Кристаллическая структура и примесные РЗ центры в форстерите

Кристаллическая решетка форстерита Mg_2SiO_4 , относящегося к семейству оливина, имеет ромбическую симметрию с пространственной группой D_{2h}^{16} ($Pbnm$). Структура форстерита состоит из гексагональной плот-

ной упаковки атомов кислорода, в которой половина октаэдрических пустот занята ионами Mg^{2+} в двух кристаллографически неэквивалентных позициях ($M1$ и $M2$). Позиция $M1$ имеет триклинную симметрию с точечной группой C_i . Для позиции $M2$ характерно наличие зеркальной плоскости симметрии, перпендикулярной оси c (точечная группа симметрии C_s). Октаэдры MgO_6 не имеют общих граней, а соединены тетраэдрами, в каждом восьмом из которых находится ион Si^{4+} . Вследствие кулоновского отталкивания ионов Mg^{2+} в цепочке [16] все полиэдры в Mg_2SiO_4 искажены. При легировании форстерита редкими землями трехвалентные примесные РЗ ионы замещают двухвалентные ионы магния [10–14]. Подобное гетеровалентное замещение возможно при наличии компенсатора избыточного катионного заряда. В качестве такого компенсатора служат магниевые вакансии. РЗ ион может быть локализован в магниевой позиции (одиночный центр) или образовывать димерный центр из двух РЗ ионов и магниевой вакансии. Концентрация димеров превышает на несколько порядков уровень, определенный при условии статистического распределения примесных РЗ ионов по узлам кристаллической решетки [10–14]. Этот результат подтверждается компьютерным моделированием кластерных центров итербия в Mg_2SiO_4 методом межатомных потенциалов [10]. В работе [10] показано, что при образовании димеров имеет место минимально возможное увеличение внутренней энергии кристаллической решетки.

Структура примесных центров ионов гольмия в кристаллах $Mg_2SiO_4 : Ho^{3+}$ изучена методом высокочастотной и стандартной спектроскопии ЭПР [11,12], оптическими исследованиями и сравнением экспериментальных данных с расчетом по теории кристаллического поля [12]. Ионы Ho^{3+} замещают ионы Mg^{2+} в позициях $M2$, образуя одиночные центры и димеры. Димеры состоят из двух ионов Ho^{3+} с магниевой вакансией между ними [11,12]. Применение метода селективного лазерного возбуждения люминесценции кристаллов $Mg_2SiO_4 : Ho^{3+}$ не позволило однозначно приписать оптические переходы определенным примесным центрам ионов Ho^{3+} [17].

Образцы и экспериментальный метод

Исследуемый кристалл выращен методом Чохральского из иридиевого тигля в атмосфере технического азота на затравку, вырезанную из монокристалла номинально чистого форстерита вдоль кристаллографической оси a (установка $Pbnm$). Скорость вытягивания на номинальной стадии роста составляла 0.7 mm/h, скорость вращения — 6 rpm. Для уменьшения последствий концентрационного переохлаждения применялась конфигурация тепловых экранов, увеличивающая осевой температурный градиент в зоне кристаллизации. В качестве исходных реактивов использовались MgO , SiO_2 и Ho_2O_3

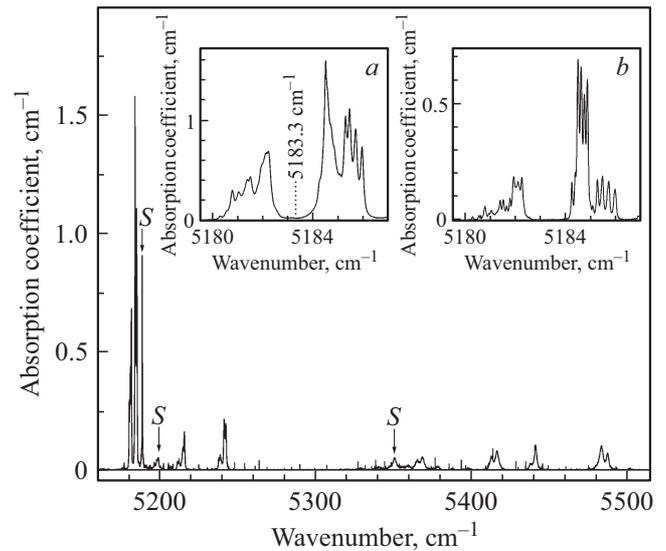


Рис. 1. Спектры поглощения в области перехода $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$ в ионах Ho^{3+} в кристалле $Mg_2SiO_4 : Ho^{3+}$ (0.13 at.%) при $T = 5$ К. Заглавной латинской буквой „S“ обозначены спектральные линии, относящиеся к иону Ho^{3+} в одиночном центре. На вставке *a* показана подробно линия с разрешенной СТС, соответствующая переходу из основного квазидублета на первый возбужденный квазидублет мультиплета 5I_7 иона Ho^{3+} в димере (отмечена средняя частота 5183.3 cm^{-1} этой линии). На вставке *b* эта же линия приведена для образца № 1 [15]. Очень узкие линии — поглощение парами воды.

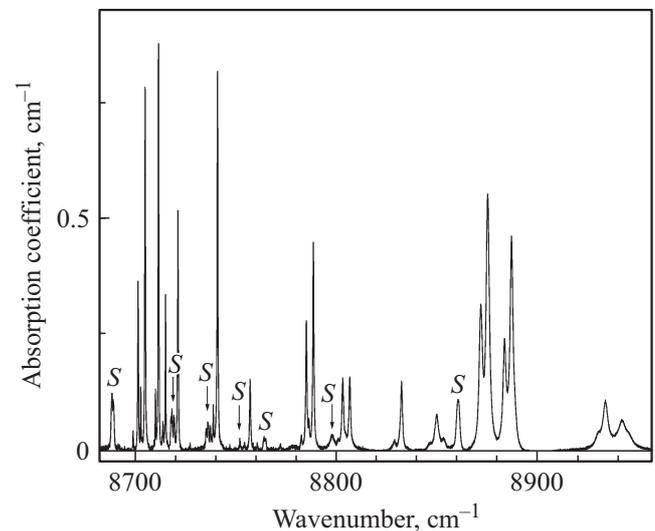


Рис. 2. Спектры поглощения в области перехода $^5I_8 \rightarrow ^5I_6$ в ионах Ho^{3+} в кристалле $Mg_2SiO_4 : Ho^{3+}$ (0.13 at.%) при $T = 5$ К. Заглавной латинской буквой „S“ обозначены спектральные линии, относящиеся к иону Ho^{3+} в одиночном центре.

квалификации „ОСЧ“. Активатор вводился в шихту в количестве 11.7 wt.% с эквивалентной компенсацией SiO_2 . Концентрация ионов Ho^{3+} в кристалле была измерена с помощью рентгено-спектрального микроанализа в ше-

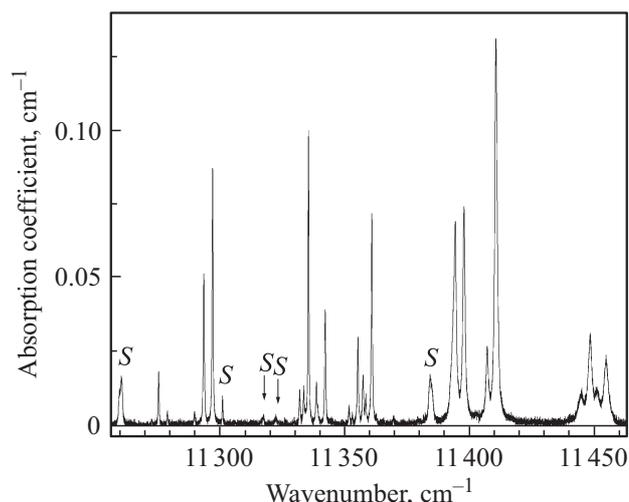


Рис. 3. Спектры поглощения в области перехода ${}^5I_8 \rightarrow {}^5I_5$ в ионах Ho^{3+} в кристалле $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 : \text{Ho}^{3+}$ (0.13 at.%) при $T = 5$ К. Заглавной латинской буквой „S“ обозначены спектральные линии, относящиеся к иону Ho^{3+} в одиночном центре.

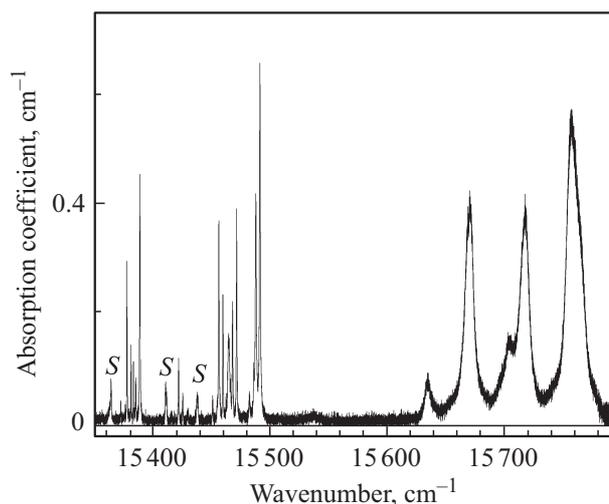


Рис. 4. Спектры поглощения в области перехода ${}^5I_8 \rightarrow {}^5F_5$ в ионах Ho^{3+} в кристалле $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 : \text{Ho}^{3+}$ (0.13 at.%) при $T = 5$ К. Заглавной латинской буквой „S“ обозначены спектральные линии, относящиеся к иону Ho^{3+} в одиночном центре.

сти разных точках шлифа образца и оказалась равной 0.13 ± 0.01 at.%.

Оптически прозрачный образец монокристалла $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 : \text{Ho}^{3+}$ (0.13 at.%) имел форму, близкую к цилиндрической, с диаметром около 5 mm и длиной 18 mm. Спектры пропускания образца зарегистрированы при температурах 5–20 К в спектральной области 4000–16 000 cm^{-1} с разрешением вплоть до 0.01 cm^{-1} с помощью вакуумного фурье-спектрометра высокого разрешения Bruker IFS 125HR. При регистрации спектров с высоким разрешением в области 5150–5550 cm^{-1}

наблюдаются слабые линии поглощения остаточных паров воды. Низкотемпературные измерения проведены с использованием оптического криостата замкнутого цикла Стюмех ST430. Излучение источника не было поляризовано. Образец устанавливался в криостате таким образом, что свет проходил вдоль оси a .

Результаты и обсуждение

На рис. 1–4 изображены спектры поглощения при температуре $T = 5$ К в области перехода из основного состояния 5I_8 иона Ho^{3+} на возбужденные мультиплеты: 5I_7 (рис. 1), 5I_6 (рис. 2), 5I_5 (рис. 3) и 5F_5 (рис. 4). Следует заметить, что в ближней инфракрасной области спектра переходы ${}^5I_8 \rightarrow {}^5I_{5,4}$ в ионе Ho^{3+} являются наименее интенсивными. Зарегистрировать их, используя образец, исследованный нами в предыдущей работе [15], не удалось. Для этого кристалла, обозначенного как образец № 1, концентрация легирующей примеси Ho_2O_3 в расплаве была 2.3 wt.%. Концентрация ионов Ho^{3+} в выращенном кристалле, согласно оценке, приведенной в работе [11], не превышала 0.1 wt.%. Сравнивая спектры поглощения двух кристаллов с разными концентрациями гольмия, мы провели оценку концентрации ионов Ho^{3+} в образце № 1. Эта величина составила 0.02 at.%. Увеличение концентрации примесных ионов Ho^{3+} в кристалле Mg_2SiO_4 приводит к уширению спектральных линий. Новых линий при этом в спектре не появляется. На вставках к рис. 1 приведена линия с разрешенной СТС для двух образцов: (а) $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 : \text{Ho}^{3+}$ (0.13 at.%) и (б) образец № 1. Полуширина отдельной компоненты СТС линии в спектре поглощения образца № 1 равна 0.1 cm^{-1} , а кристалла $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 : \text{Ho}^{3+}$ (0.13 at.%) — 0.15 cm^{-1} . Каждый из спектров, представленных на рис. 1–4, включает линии поглощения, соответствующие переходам в ионах Ho^{3+} как в одиночных центрах, так и в димерах. Провести отнесение оптических линий к определенным примесным центрам гольмия исключительно на основе полученных нами экспериментальных данных не представляется возможным. Поэтому мы прибегли к помощи расчета по теории кристаллического поля, проведенного ранее в работах [12,15]. Симметрия кристаллографической позиции $M2$ описывается точечной группой C_s . Кристаллическое поле такой симметрии расщепляет $(2J + 1)$ -кратно вырожденные уровни ${}^{2S+1}L_J$ свободного иона Ho^{3+} на синглеты Γ_1 и Γ_2 , не имеющие СТС в первом приближении. По данным ЭПР [12] основное состояние иона Ho^{3+} как для одиночного центра, так и для димера является квазидублетом. В случае одиночного центра расстояние между двумя синглетными уровнями основного состояния иона Ho^{3+} равно 0.23 cm^{-1} (7 GHz) [12] и для димера — 3.43 cm^{-1} (103 GHz) [12]. Третий уровень основного мультиплета 5I_8 иона Ho^{3+} по расчету, согласующемуся с данными ЭПР [11,12], имеет энергию для одиночных центров 78.5 cm^{-1} и для димеров 44.7 cm^{-1} . Теоретический

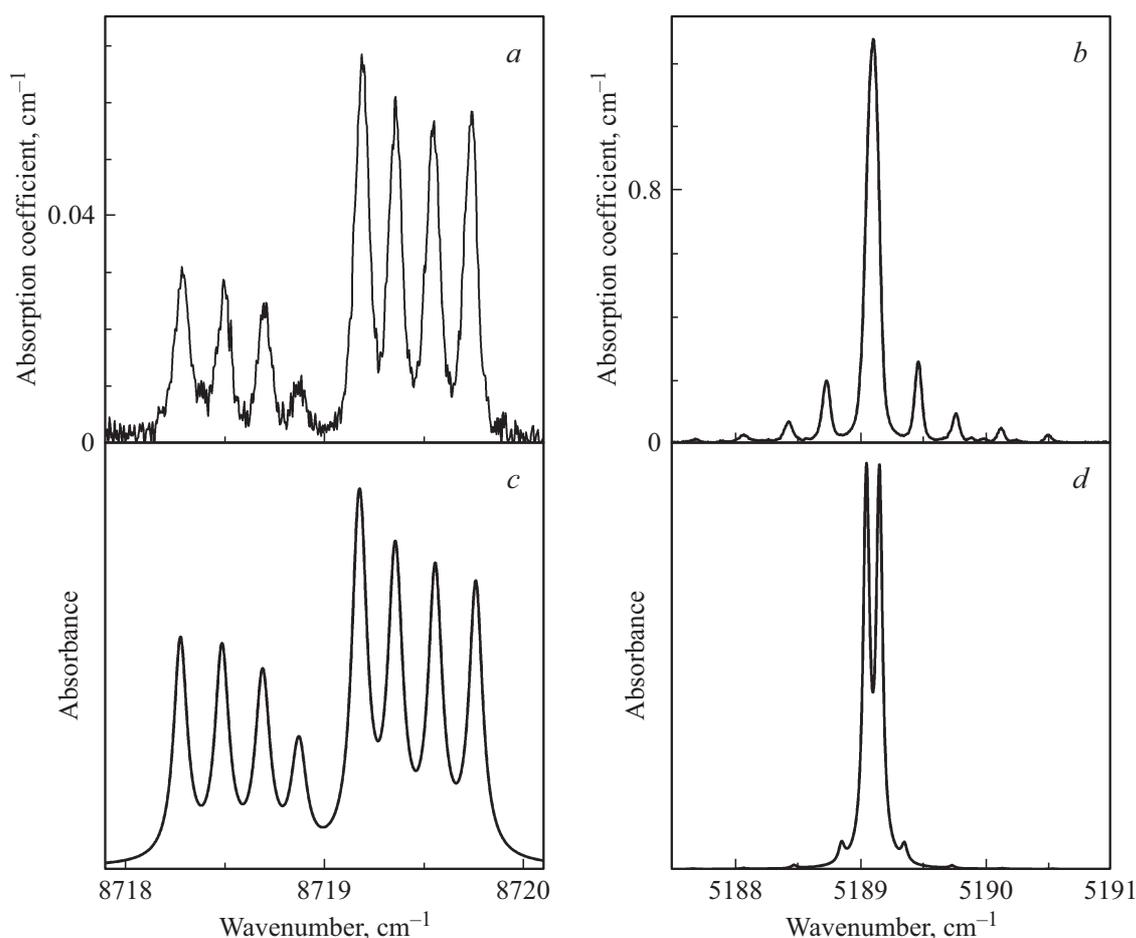


Рис. 5. Экспериментальная (*a, b*) и вычисленная (*c, d*) СТС спектральных линий, относящихся к иону Ho^{3+} в одиночном центре. Линия поглощения, соответствующая переходу из основного квазидублета на синглетный уровень возбужденного мультиплета 5I_6 (*a, c*); линия поглощения, соответствующая переходу из основного квазидублета на первый квазидублет возбужденного мультиплета 5I_7 (*b, d*). Экспериментальные спектры (*a, b*) зарегистрированы для образца № 1 [15].

Таблица 1. Теоретически вычисленные значения энергий сверхтонких подуровней (cm^{-1}) основного квазидублета иона Ho^{3+} в одиночном центре (E_s) и димере (E_d)

Номер уровня	1	2	3	4	5	6	7	8
E_s	0	0.21	0.41	0.59	0.90	1.08	1.29	1.49
E_d	0	0.07	0.11	0.13	3.68	3.71	3.75	3.82

расчет СТС квазидублетов иона Ho^{3+} проводился в приближении магнитодипольного сверхтонкого взаимодействия [15]. Вычисленная СТС квазидублета состоит из восьми сверхтонких подуровней, каждый из которых остается дважды вырожденным в отсутствие магнитного поля. Восемь сверхтонких подуровней разделены на две группы, состоящие из четырех неэквидистантных подуровней, разделенных щелью. Величина этой щели зависит от начального расщепления квазидублета и силы сверхтонкого взаимодействия. В табл. 1 приведены

вычисленные значения энергий сверхтонких подуровней основного квазидублета иона Ho^{3+} в одиночном центре и димере.

Рассмотрим СТС линий, соответствующих переходам в ионе Ho^{3+} в одиночных центрах. На рис. 5 представлены экспериментальный (*a*) и вычисленный спектр (*c*) в случае перехода из основного квазидублета на синглетный уровень возбужденного мультиплета 5I_6 в ионе Ho^{3+} . СТС такой линии по сути отражает структуру сверхтонких подуровней основного квазидублета. В случае, когда возбужденное состояние является квазидублетом, СТС линий будет иметь более сложную форму. В качестве примера на рис. 5, *b, d* изображена линия с СТС, также относящаяся к иону Ho^{3+} в одиночном центре: (*b*) экспериментальный, (*d*) вычисленный спектр. Необычная форма СТС линии обусловлена спектрально разделенными электро- и магнитодипольными вкладками. Как правило, магнитодипольные переходы существенно слабее. Тот факт, что они наблюдаются в области перехода $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$, объясняется тем, что этот

переход в свободном ионе Ho^{3+} разрешен как магнитодипольный. Спектральная линия с подобной СТС наблюдалась ранее в спектрах пропускания кристаллов $\text{LiYF}_4\text{-Ho}$ [18].

На рис. 6, *a, b* представлены линии поглощения димера: (*a*) линия поглощения, соответствующая переходу из основного квазидублета на синглетный уровень возбужденного мультиплета 5I_6 при температурах 5 и 15 К, (*b*) линия поглощения, соответствующая переходу из основного квазидублета на квазидублет возбужденного мультиплета 5I_7 при температурах 5 и 15 К. На рис. 6, *c, d* приведены вычисленные спектры: (*c*) в случае перехода из основного квазидублета на возбужденный синглет, (*d*) в случае перехода из основного квазидублета на возбужденный квазидублет. Форма линий, изображенных на рис. 6, *a, b*, обусловлена неразрешенной СТС. В отличие, например, от линии с хорошо разрешенной СТС, приведенной на вставке (*b*) к рис. 1, которая так же как и линия, изображенная на рис. 6, *b*, соответствует переходу из основного квазидублета на возбужденный квазидублет иона Ho^{3+} в димере. Сделать вывод о принадлежности линий, показанных на рис. 6, *a, b*, к димеру возможно из анализа температурной зависимости спектров. Сравнение спектров, зарегистрированных при двух температурах, 5 и 15 К (рис. 6, *a, b*), показывает наличие компоненты спектральной линии, интенсивность которой уменьшается при понижении температуры в соответствии с законом Больцмана. Эта компонента отстоит от основной линии на 3.5 cm^{-1} , что соответствует расстоянию между центрами двух групп из четырех неэквидистантных сверхтонких подуровней основного квазидублета иона Ho^{3+} , находящегося в позиции *M2* димера. Согласно расчету, эта величина составляет 3.7 cm^{-1} (табл. 1). Соответствие формы линий поглощения, экспериментально наблюдаемых (рис. 6, *a, b*) и теоретически вычисленных (рис. 6, *c, d*), подтверждает отнесение этих линий к димерам. Проведя аналогичную процедуру сравнения формы линий поглощения в экспериментальном спектре с теоретическим расчетом СТС линий для примесных ионов гольмия в форстерите, мы разделили практически все спектральные линии по принадлежности к одиночному гольмиевому центру и димеру. Исключение составляют линии в высокочастотной части оптических переходов $^5I_8 \rightarrow ^5I_5$, 5F_5 , уширенные вследствие электрон-фононного взаимодействия. Результат представлен в табл. 2. Используя полученные спектроскопические данные, мы оценили отношение интегральных интенсивностей оптических переходов в ионах Ho^{3+} для одиночных позиций и димеров. Из этой оценки следует, что число димеров превосходит на порядок число одиночных центров примесных ионов Ho^{3+} в форстерите $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-Ho}$. Это подтверждают выводы, сделанные из проведенных ранее исследований [11,12].

Кроме того, мы обнаружили в спектрах слабые линии, которые почти всегда сопровождали линии, отнесенные к димеру, но имели расстояние между компонентами

Таблица 2. Средние частоты линий с СТС в спектрах ионов Ho^{3+} в одиночных центрах E_S и димерах E_D при $T = 5 \text{ K}$. Звездочками * обозначены линии, соответствующие переходам из основного состояния на квазидублеты возбужденных мультиплетов

$^{2S+1}L_J$	$E_S, \text{ cm}^{-1}$	$E_D, \text{ cm}^{-1}$
5I_7	5189.1*	5183.3*
	5199.1	5213.8*
	5350.8	5240.4
		5367.2
		5415.4*
		5439.7
		5485.6
5I_6	8688.9	8703.2
	8719	8713.3
	8735.9	8719.6
	8751.9	8739.2
	8764.2	8757.1
	8798	8786.8
	8860.4	8805.6
		8830.4
		8851.6
		8873.3
		8885.5
5I_5	11260.8	11277.7
	11299.6	11295.6
	11317.1	11333.9
	11322.6	11340.5
	11384.3	11353.4
		11358.9
		11395.8
	11408.3	
	11445.5	
	11452.1	
5I_4		13285.1
		13321.4
		13335.1
		13367.4
5F_5	15364.1	15379.9
	15411.4	15387.1
	15416.1	15423.8
	15429.8	15457.8
	15438.1	15469.6
	15464.7	15484.1
	15489.4	

не 3.5 cm^{-1} , а 3.8 cm^{-1} . Возможно, они относятся к другому типу димера. Выяснение структуры этого центра — вопрос будущих исследований.

Недавно методом стандартной ЭПР-спектроскопии в *X*- и *Q*-диапазонах установлено, что ионы Yb^{3+} [10] и Er^{3+} [14] в синтетическом форстерите замещают ионы магния в кристаллографической позиции *M1* в виде

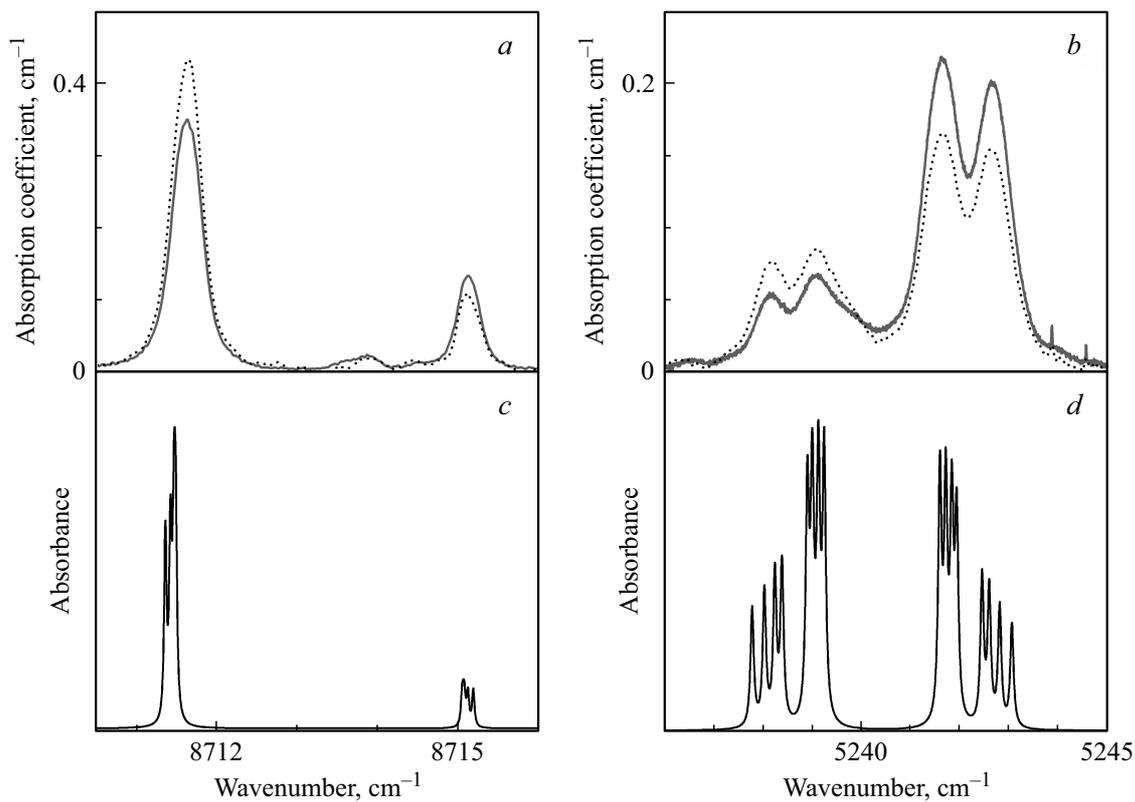


Рис. 6. Линии поглощения при температуре $T = 5$ К (серая линия) и $T = 15$ К (пунктирная линия) и вычисленная СТС спектральных линий, относящихся к иону Ho^{3+} в димере: (a, c) для перехода из основного квазидублета на синглетный уровень возбужденного мультиплета 5I_6 ; (b, d) для перехода из основного квазидублета на квазидублет возбужденного мультиплета 5I_7 . Экспериментальные спектры (a, b) зарегистрированы для кристалла $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 : \text{Ho}^{3+}$ (0.13 at.%).

одиночных ионов и димеров. В проведенном спектроскопическом исследовании кристаллов $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 : \text{Ho}^{3+}$ не зарегистрировано проявление одиночных центров ионов Ho^{3+} в позиции $M1$. Наличие центра инверсии для этой позиции приводит к запрету электродипольных $f-f$ -переходов в РЗ ионе. Следовательно, линии одиночных центров иона Ho^{3+} в позиции $M1$ могут наблюдаться только в области перехода ${}^5I_8 \rightarrow {}^5I_7$, который магнитодипольно разрешен правилами отбора в свободном ионе Ho^{3+} . Мы, напротив, наблюдали линии ионов Ho^{3+} в одиночных центрах во всей исследованной области спектра.

Таким образом, применение метода фурье-спектроскопии высокого разрешения совместно с расчетом по теории кристаллического поля продемонстрировало возможность по форме сверхтонкой структуры линий проводить идентификацию спектральных линий на предмет их отнесения к разным типам примесных центров в кристаллах.

Заключение

Используя данные о форме линий, полученные методом спектроскопии высокого разрешения, мы раз-

делили спектры одиночных центров и димеров примесных ионов Ho^{3+} в синтетическом форстерите. Эти результаты, а также вычисленная СТС линий, хорошо согласующиеся с экспериментом, важны для возможных применений форстерита $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 : \text{Ho}^{3+}$, в частности, для реализации оптической квантовой памяти.

Благодарности

Работа выполнена на Уникальной Научной Установке (УНУ) ИСАН „Мультифункциональная широкодиапазонная спектроскопия высокого разрешения“ (УНУ МШСВР ИСАН), <http://www.ckp-rf.ru/usu/508571>.

Авторы благодарны Б.З. Малкину за предоставленные программы расчета по теории кристаллического поля для примесного иона Ho^{3+} в форстерите и полезные обсуждения полученных результатов. Выражаем благодарность В.Ф. Тарасову за постоянный интерес к работе и ценные замечания, а также М.Н. Поповой и С.А. Климину за замечания по рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Rippe L., Nilsson M., Kröll S., Klieber R., Suter D. // *Phys. Rev.* 2005. V. 71. N 12. P 062328.
- [2] Moiseev S.A., Tarasov V.F., Ham B.S. // *J. Opt. B: Quantum Semiclass Opt.* 2003. V. 5. P. 497.
- [3] Bertaina S., Gambarelli S., Tkachuk A., Kurkin I.N., Malkin B., Stepanov A., Barbara B. // *Nature Nanotechnology.* 2007. V. 2. P. 39.
- [4] Luis F., Repolles A., Martinez-Perez M.J., Aguila D., Roubeau O., Zueco D., Alonso P.J., Evangelisti M., Camon A., Sese J., Barrios L.A., Aromi G. // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V. 107. P. 117203.
- [5] Heinze G., Hubrich C., Halfmann T. // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 111. P. 033601.
- [6] Zhong M., Hedges M.P., Ahlefeldt R.L., Bartholomew J.G., Beavan S.E., Wittig S.M., Longdell J.J., Sellars M.J. // *Nature.* 2015. V. 517. P. 177.
- [7] Probst S., Rotzinger H., Ustinov A.V., Bushev P.A. // *Phys. Rev.* 2015. V. 92. P. 014421.
- [8] O'Brien C., Lauk N., Blum S., Morigi G., Fleischhauer M. // *Phys. Rev. Lett.* 2014. V. 113. P. 063603.
- [9] Clausen C., Usmani I., Bussieres F., Sangouard N., Afzelius M., de Riedmatten H., Gisin N. // *Nature.* 2011. V. 469. P. 208.
- [10] Тарасов В.Ф., Суханов А.А., Дудникова В.Б., Жариков Е.В., Лис Д.А., Субботин К.А. // *Письма в ЖЭТФ.* 2017. Т. 106. № 2. С. 78.
- [11] Гайстер А.В., Жариков Е.В., Коновалов А.А., Субботин К.А., Тарасов В.Ф. // *Письма в ЖЭТФ.* 2003. Т. 77. № 11. С. 753.
- [12] Konovalov A.A., Lis D.A., Malkin B.Z., Nikitin S.I., Subbotin K.A., Tarasov V.F., Vorobieva E.N., Zharikov E.V., Zverev D.G. // *Appl. Magn. Reson.* 2005. V. 28. P. 267.
- [13] Konovalov A.A., Lis D.A., Subbotin K.A., Tarasov V.F., Zharikov E.V. // *Appl. Magn. Res.* 2014. V. 45. P. 193.
- [14] Зарипов Р.Б., Мингалиева Л.В., Тарасов В.Ф., Жариков Е.В., Субботин К.А., Лис Д.А. // *ФТТ.* 2019. Т. 61. № 2. С. 313.
- [15] Чукалина Е.П., Тюренков И.О., Жариков Е.В., Субботин К.А., Попова М.Н. // *Письма в ЖЭТФ.* 2019. Т. 109. № 6. С. 360.
- [16] Birle J.D., Gibbs G.V., Moore P.B., Smith J.V. // *Amer. Mineralogist.* 1968. V. 53. P. 807.
- [17] Воробьева Е.Н., Лис Д.А., Малкин Б.З. // Тезисы Межд. науч. молодежной школы „Когерентная оптика и оптическая спектроскопия“. Казань, 2004. С. 397.
- [18] Agladze N.I., Popova M.N. // *Solid State Commun.* 1985. V. 55. P. 1097.