

Исследование методом ЭПР влияния ионизирующего облучения на центры хрома в лазерных кристаллах $Mg_2SiO_4 : Cr, Li$

© Д.А. Ахметзянов¹, В.Б. Дудникова², Е.В. Жариков², Е.Р. Житейцев¹, А.А. Коновалов¹, В.Ф. Тарасов¹

¹ Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН, Казань, Россия

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

E-mail: tarasov@kfti.knc.ru

(Поступила в Редакцию 6 февраля 2013 г.)

Методом многочастотной ЭПР-спектроскопии исследованы монокристаллы форстерита, легированные хромом и литием, подвергавшиеся воздействию ионизирующего излучения. Установлено, что облучение вплоть до дозы 10^8 rad не приводит к заметному изменению концентрации одиночных примесных центров хрома. Вместе с тем под действием облучения γ -квантами в кристалле уменьшается концентрация активных лазерных центров, представляющих собой ассоциат трехвалентного хрома и одновалентного лития в кристаллографических позициях $M2$ и $M1$ соответственно, и появляются новые центры двухвалентного хрома. Обсуждаются структура и магнитные свойства новых центров.

Работа поддержана грантом НШ-5602.2012.2.

1. Введение

Форстерит Mg_2SiO_4 , являющийся представителем семейства оливинов $Mg_{2-x}Fe_xSiO_4$, имеет орторомбическую структуру с пространственной группой $Pbnm$. Размеры элементарной ячейки следующие: $a = 0.4762$ nm, $b = 1.0225$ nm, $c = 0.5499$ nm, в элементарную ячейку входят четыре формульные единицы Mg_2SiO_4 [1]. В кристаллической структуре форстерита ионы Mg^{2+} находятся в двух структурно-неэквивалентных кислородных октаэдрах с инверсионной C_i и зеркальной C_s симметрией, обозначаемых $M1$ и $M2$ соответственно. Ионы Si^{4+} в структуре форстерита имеют тетраэдрическое окружение. Точечная группа симметрии — зеркальная C_s .

Большой интерес к форстериту, легированному хромом, возник около двадцати лет назад, когда на ионах Cr^{4+} была получена лазерная генерация в ближнем ИК-диапазоне [2]. За прошедшее время достигнут значительный прогресс в создании лазеров на основе форстерита с хромом, в том числе фемтосекундных лазеров с высокой эффективностью. Так, в работе [3] описан хром-форстеритовый лазер, работающий на длине волны $1.3 \mu m$ в импульсном режиме с длительностью импульса 14 fs и средней мощностью 80 mW при частоте модуляции 100 MHz. В работах [4,5] на хром-форстерите, дополнительно легированном литием, была получена импульсная и непрерывная лазерная генерация в новом для перестраиваемых твердотельных лазеров спектральном диапазоне (1.03 – $1.18 \mu m$). В этом случае в качестве активных центров выступают ассоциаты трехвалентного хрома и одновалентного лития.

Настоящая работа посвящена изучению структурных и валентных изменений центров хрома в лазерных кристаллах $Mg_2SiO_4 : Cr, Li$ методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Ранее методом ЭПР-спектроскопии было показано, что ионы Cr^{4+} замещают

ионы Si^{4+} [6], в то время как ионы Cr^{3+} могут замещать Mg^{2+} в обеих кристаллографических позициях $M1$ и $M2$ [7] в виде одиночных ионов с нелокальной компенсацией избыточного катионного заряда Cr_{M1}^\bullet и Cr_{M2}^\bullet (здесь и далее используются обозначения Крегера [8]: нижний индекс обозначает позицию в кристалле, верхний — заряд избыточный положительный (\bullet) или избыточный отрицательный ($'$) по отношению к заряду ненарушенной матрицы (\times), V — вакансия). В работе [9] помимо данных центров был обнаружен центр с локальной компенсацией избыточного катионного заряда хрома $(Cr_{M1}^\bullet - V_{M1}'' - Cr_{M1}^\bullet)^\times$. В этом центре три иона Mg^{2+} замещаются двумя ионами Cr^{3+} в позиции $M1$, а между ионами образуется магниевая вакансия V_{M1}' в позиции $M1$.

В работах [10,11] было обнаружено, что в форстерите, солегированном хромом и алюминием, образуются ассоциаты $(Cr_{M1}^\bullet - Al_{Si}')^\times$ с локальной компенсацией избыточного катионного заряда, где Al^{3+} , замещающий Si^{4+} , является зарядовым компенсатором для Cr^{3+} , замещающего Mg^{2+} .

В форстерите, солегированном хромом и литием, обнаружены ассоциаты $(Cr_{M2}^\bullet - Li_{M2}')^\times$ с локальной компенсацией избыточного катионного заряда [12], где в качестве зарядового компенсатора выступает Li^+ , замещающий соседний с Cr^{3+} ион магния.

В работах [5,12] на основе люминесцентной и ЭПР спектроскопии был сделан вывод о том, что в хром-форстерите образуются ассоциаты трехвалентного хрома с магниевой вакансией $(Cr_{M2}^\bullet - V_{M2}'')'$ с нелокальной компенсацией избыточного катионного заряда. При легировании литием концентрация данных центров уменьшается с ростом концентрации лития. Эти хром-вакансионные ассоциаты наблюдались также в [13] и детально исследованы методом ЭПР в [14].

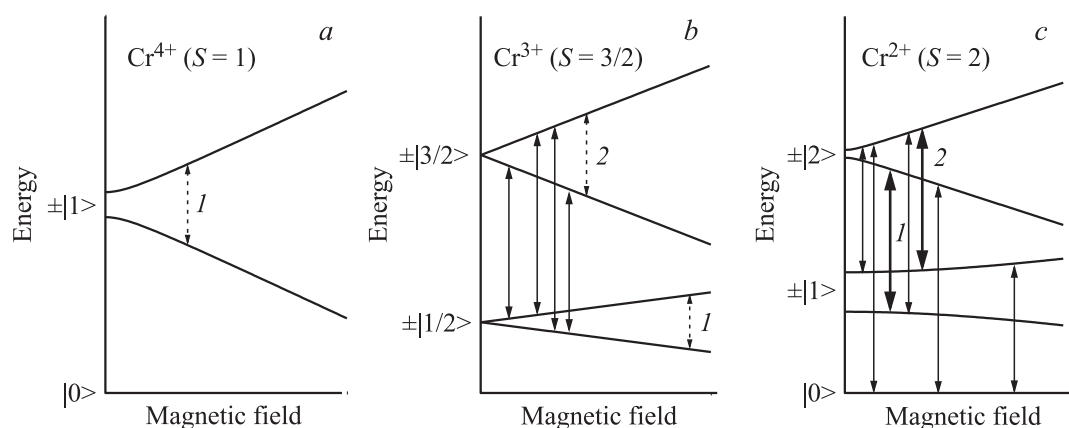


Рис. 1. Схема спиновых подуровней основного электронного синглета ионов хрома. Цифрами 1 и 2 обозначены резонансные переходы, которые использовались для измерения концентрации центров хрома.

Для ионов Cr^{2+} методом высокочастотной ЭПР-спектроскопии было установлено, что Cr^{2+} также замещает ионы магния Mg^{2+} в двух позициях $M1$ и $M2$: Cr_{M1}^{\times} и Cr_{M2}^{\times} [15]. В [13] было показано, что в кристаллах, выращенных в атмосфере аргона, около половины ионов хрома находится в двухвалентной форме, и данные ионы распределяются по позициям $M1$ и $M2$ в соотношении 2:1. Распределение двухвалентного хрома по позициям не претерпевает значительных изменений при изменении парциального давления кислорода, концентрации хрома, а также при дополнительном легировании литием.

Важным и до сих пор недостаточно изученным является вопрос о влиянии ионизирующего излучения на валентное состояние примесных центров хрома и образование в форстерите структурных дефектов, в частности центров окраски. Воздействие облучения на кристаллы форстерита исследовалось в ряде работ [16–21].

Единой точки зрения на перезарядку ионов хрома под действием облучения не существует. Так, в работе [17] наблюдалось увеличение интенсивности полосы люминесценции центров четырехвалентного хрома после облучения γ -квантами, что может быть связано с увеличением концентрации ионов Cr^{4+} . В работах [18,20] отмечается, что соотношение разновалентных ионов хрома не меняется при облучении. В то же время ранее в работе [16] было установлено, что облучение γ -квантами приводит к ослаблению в спектрах поглощения полос, связанных с ионами трех- и четырехвалентного хрома. Последние исследования, проведенные в работе [21], подтверждают результаты работы [16]. Неоднозначна и трактовка центров окраски, появляющихся в кристаллах форстерита в результате облучения. Их связывают как с F -центрами [17], так и с дырочными центрами O^- [18,19,22].

Следует отметить, что в упомянутых выше работах в качестве метода исследования использовалась оптическая спектроскопия. Получение данных о содержании ионов хрома в форстерите в разном валентном

состоянии на основе измерения только оптических спектров представляет собой сложную задачу. Не для всех центров хрома достаточно надежно проведена идентификация полос поглощения и люминесценции, так как данные полосы для ионов двух-, трех- и четырехвалентного хрома частично перекрываются. Наблюдается также перекрытие полосы дополнительного поглощения, обусловленного центрами окраски, с полосой поглощения трехвалентного хрома.

Более эффективным с точки зрения идентификации различных ионов хрома в форстерите является метод ЭПР-спектроскопии. Этот метод дает информацию о величине спина примесного центра хрома, которая однозначно связана с его зарядовым состоянием, а также информацию о симметрии кристаллического поля, действующего на примесный ион, что позволяет судить о положении иона в кристаллической структуре.

2. Методика эксперимента и исследуемые образцы

Изучались два образца синтетического форстерита, легированного хромом и литием: образцы 529-2 и 529-4. Кристаллы были выращены в Центре лазерных материалов и технологий ИОФ РАН методом Чохральского с использованием иридиевых тиглей и монокристаллических затравок, вырезанных параллельно кристаллографической оси a (установка $Pbnm$). Скорость вытягивания кристалла составляла 3 mm/h, скорость вращения 12 rev/min. В качестве ростовой атмосферы использовался чистый аргон ($P_{\text{O}_2} \sim 0.01$ kPa). Исследуемые образцы были выращены из шихты, содержащей 0.26 wt.% хрома и 0.45 wt.% лития, и имели форму параллелепипедов, грани которых были вырезаны параллельно кристаллографическим осям кристаллов.

Образец 529-2 облучался источником ^{60}Co последовательно дозами 10^5 , 10^6 и 10^7 rad с измерением концентрации центров Cr_{M1}^{\times} и Cr_{M2}^{\times} каждый раз после

облучения. Образец 529-4 был облучен дозой 10^8 rad с измерением концентрации центров трех- и четырехвалентного хрома до и после облучения и концентрации центров двухвалентного хрома после облучения.

Ионы двух-, трех- и четырехвалентного хрома имеют электронный спин $S = 2, 3/2$ и 1 соответственно. Схема спиновых подуровней для этих ионов показана на рис. 1, *a-c*. Примесные центры Cr_{M1}^\bullet и Cr_{M2}^\bullet изучались при температуре 4.2 К в миллиметровом диапазоне длин волн электромагнитного излучения на высокочастотном ЭПР-спектрометре в интервале частот 195–255 GHz. Измерение относительной концентрации центров Cr_{M1}^\bullet , Cr_{M2}^\bullet , $(\text{Cr}_{M1}^\bullet - \text{Li}'_{M2})^\times$, $(\text{Cr}_{M2}^\bullet - \text{Li}'_{M1})^\times$ и центров Cr_{Si}^\times проводилось при комнатной температуре на спектрометре Varian E-12, работающем в X-диапазоне, на частоте 9.4 GHz. Стрелками на рис. 1 показаны переходы между спиновыми подуровнями, по которым измерялась относительная концентрация примесных центров. Сплошные и штриховые стрелки соответствуют переходам в миллиметровом и X-диапазонах соответственно.

Методика идентификации примесных центров хрома и измерения относительной интенсивности их резонансных переходов подробно описана в [23].

3. Экспериментальные результаты

В необлученных образцах нами наблюдались интенсивные резонансные переходы, соответствующие ионам двухвалентного хрома, замещающего магний в двух структурно неэквивалентных позициях (Cr_{M1}^\times и Cr_{M2}^\times). Характеристики этих центров были получены в работе [15]. В облученных образцах наблюдались дополнительные переходы, отмеченные на рис. 2 стрелками.

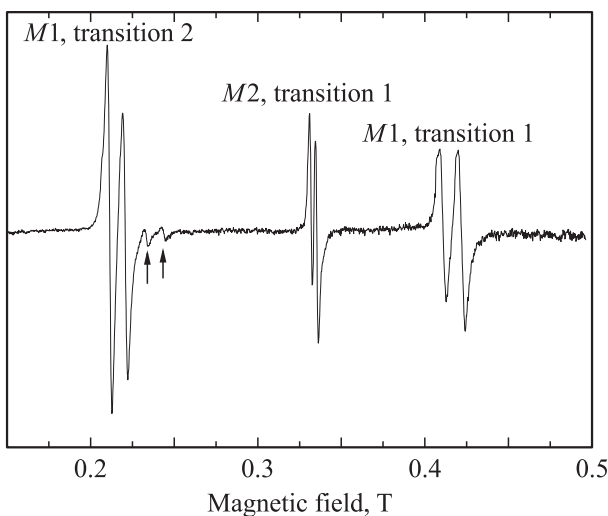


Рис. 2. Экспериментальный спектр ЭПР ионов двухвалентного хрома в образце 529-4 после облучения. Частота спектрометра 221 GHz. Цифрами обозначены переходы, соответствующие схеме на рис. 1, *c*.

Таблица 1. Отношение интегральных интенсивностей резонансных переходов в X-диапазоне для парамагнитных центров хрома в образце 529-4 до и после γ -облучения с дозой 10^8 rad (соответствующие переходы отмечены на рис. 1, *a* и *b*)

Парамагнитный центр	Отношение интегральных интенсивностей переходов
Cr_{M1}^\bullet	1.0 (переход 1)
Cr_{M2}^\bullet	1.0 (переход 2)
$(\text{Cr}_{M1}^\bullet - \text{Li}'_{M2})^\times$	1.3 (переход 1)
$(\text{Cr}_{M2}^\bullet - \text{Li}'_{M1})^\times$	1.8 (переход 2)
Cr_{Si}^\times	1.2 (переход 1)

Зависимость частот резонансных переходов от магнитного поля (рис. 3) и ориентационные зависимости резонансных переходов (рис. 4) нового центра оказались очень близки к соответствующим зависимостям известного центра Cr_{M1}^\times . Интегральные интенсивности переходов, соответствующих одиночным ионам Cr_{M1}^\times и Cr_{M2}^\times при облучении γ -квантами с дозами в диапазоне $10^5 - 10^8$ rad, в пределах погрешности наших измерений не изменяются, а интенсивность линий нового центра значительно меньше, чем интенсивность линий известных ранее центров двухвалентного хрома (рис. 5).

Центры трех- и четырехвалентного хрома исследовались в X-диапазоне. При этом измерялись интенсивности резонансных переходов, принадлежащих четырем структурно-неэквивалентным парамагнитным центрам трехвалентного хрома: Cr_{M1}^\bullet , Cr_{M2}^\bullet , $(\text{Cr}_{M1}^\bullet - \text{Li}'_{M2})^\times$, $(\text{Cr}_{M2}^\bullet - \text{Li}'_{M1})^\times$, а также центрам Cr_{Si}^\times .

Отношение интегральных интенсивностей переходов в X-диапазоне для центров трех- и четырехвалентного хрома в образце 529-4 до и после γ -облучения с дозой 10^8 rad представлено в табл. 1. Погрешность наших измерений интенсивности резонансных переходов составляет $\pm 30\%$. Видно, что интегральная интенсивность переходов, соответствующих одиночным ионам Cr_{M1}^\bullet и Cr_{M2}^\bullet , остается постоянной. Интегральная интенсивность перехода, отвечающего центру $(\text{Cr}_{M2}^\bullet - \text{Li}'_{M1})^\times$, существенно уменьшается. Следует подчеркнуть, что изменение интегральных интенсивностей переходов, соответствующих центрам Cr_{Si}^\times и $(\text{Cr}_{M1}^\bullet - \text{Li}'_{M2})^\times$, находится в пределах погрешности измерений, поэтому сделать однозначный вывод о том, что концентрация данных центров изменяется под действием γ -облучения, мы не можем.

4. Обсуждение

По результатам наших измерений можно заключить, что γ -облучение в диапазоне $10^5 - 10^8$ rad создает новые центры двухвалентного хрома, структурно отличные от центров, существовавших до облучения. Об этом свидетельствует разница в начальных расщеплениях электронных подуровней новых и существовавших до

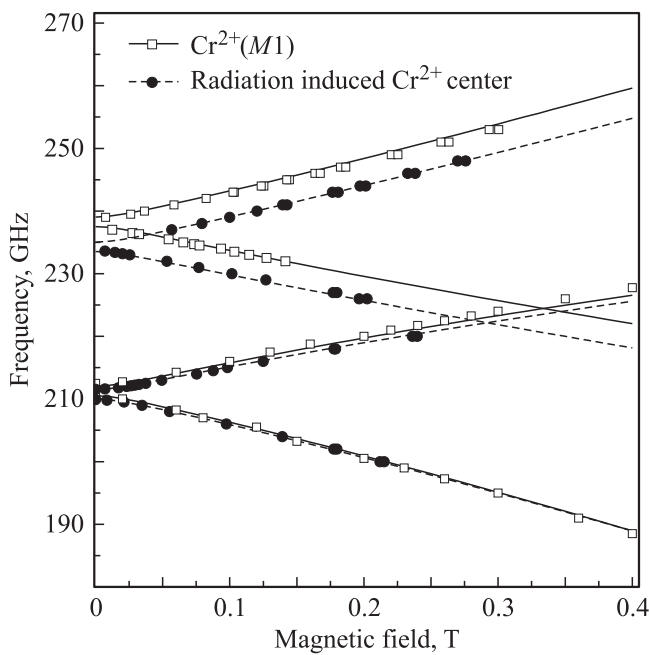


Рис. 3. Зависимости частот резонансных переходов от магнитного поля для центра Cr_{M1}^{\times} и центра $(\text{Cr}_{M1}^{\times}-\text{Li}'_{M2})'$, появляющегося после облучения. Образец 529-2. Ориентация магнитного поля $\mathbf{B}_0 \parallel \mathbf{b}$. Линии — теоретический расчет.

облучения центров. При этом концентрация существовавших до облучения одиночных центров Cr_{M1}^{\times} и Cr_{M2}^{\times} существенно не изменяется.

Зависимости частот резонансных переходов от магнитного поля (рис. 3) и ориентационные зависимости резонансных переходов (рис. 4) центра, появляющегося после облучения, можно описать эффективным спиновым гамильтонианом вида

$$H = B_2^0 O_2^0 + B_2^2 O_2^2 + B_4^4 O_4^4 + \beta(g_x S_x B_x + g_y S_y B_y + g_z S_z B_z), \quad (1)$$

где три первых слагаемых описывают начальное расщепление спиновых подуровней в нулевом магнитном поле, а последнее слагаемое — зеемановскую энергию. Здесь B_j^i — параметры спинового гамильтониана, O_j^i — операторы Стивенса, β — магнетон Бора, g_i — главные значения g -тензора, B_i — проекции вектора магнитного поля на главные магнитные оси парамагнитного центра.

Параметры спинового гамильтониана, полученные для этого центра методом наименьших квадратов, представлены в табл. 2. Направляющие углы главных осей парамагнитных центров приведены в табл. 3.

Параметры эффективного спинового гамильтониана подбирались в два этапа. Сначала по величине расщепления в нулевом поле рассчитывались параметры кристаллического поля B_j^i , затем с учетом этих значений определялись ориентации главных магнитных осей, задаваемые углами Эйлера θ, φ и ψ . Величины g -факторов при этом не варьировались, так как

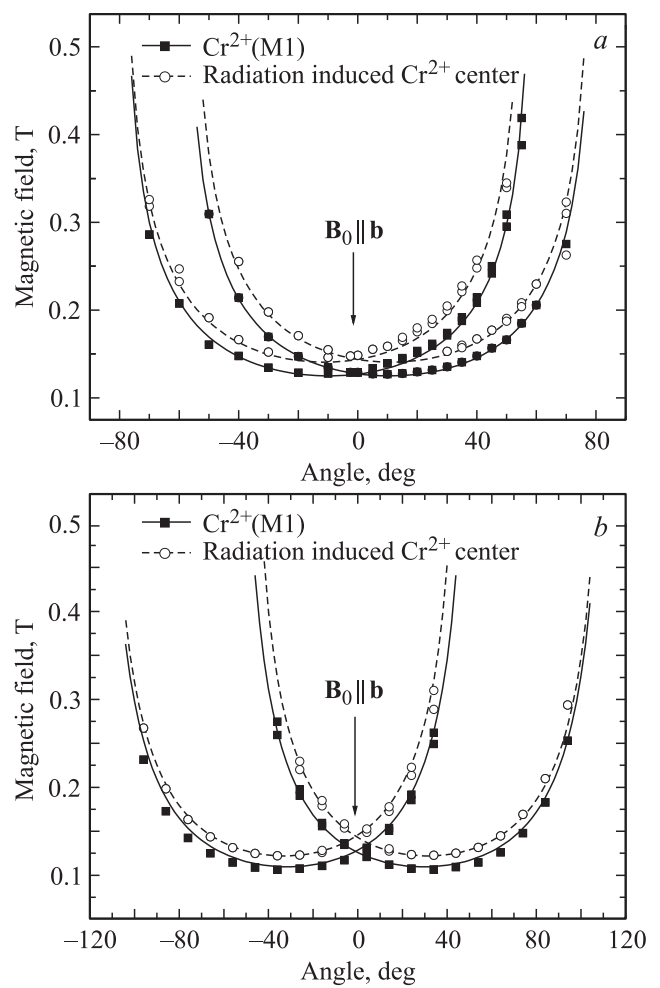


Рис. 4. Ориентационная зависимость резонансных переходов центра Cr_{M1}^{\times} и центра $(\text{Cr}_{M1}^{\times}-\text{Li}'_{M2})'$, появляющегося после облучения. Образец 529-2. Частота 217.5 GHz. a и b — плоскости bc и ab соответственно.

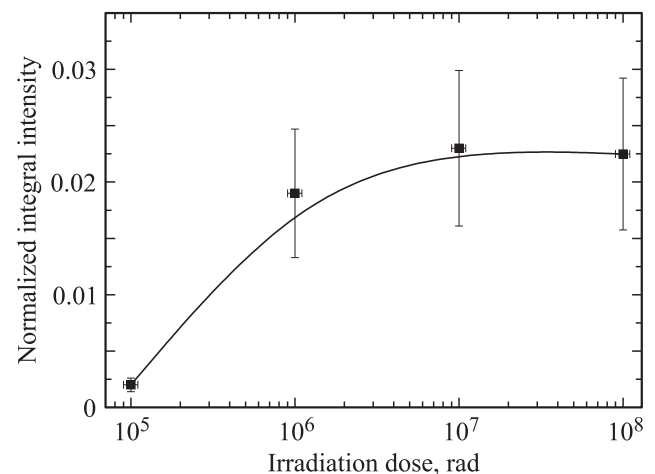


Рис. 5. Зависимость интегральной интенсивности перехода 2 (рис. 1, c) центра $(\text{Cr}_{M1}^{\times}-\text{Li}'_{M2})'$, возникающего после γ -облучения, нормированной на интенсивность линии того же перехода одиночного иона Cr_{M1}^{\times} от дозы γ -облучения в образцах 529-2 (точки $10^5, 10^6$ и 10^7 rad) и 529-4 (точка 10^8 rad). Линия — аппроксимация экспериментальных данных кривой Безье третьего порядка.

Таблица 2. Параметры эффективного спинного гамильтониана (1) для центров Cr_{M1}^{\times} , Cr_{M2}^{\times} и центра $(\text{Cr}_{M1}^{\times}-\text{Li}'_{M2})'$, появляющегося после облучения

Центр	B_2^0 , GHz	B_2^2 , GHz	B_4^4 , GHz
Cr_{M1}^{\times}	24.93	4.50	0.03
$(\text{Cr}_{M1}^{\times}-\text{Li}'_{M2})'$	24.69	3.92	0.04
Cr_{M2}^{\times}	22.28	-11.86	0.03

Таблица 3. Направляющие углы (в deg) главных осей (x, y, z) относительно осей кристаллической решетки форстерита (a, b, c) для парамагнитных центров Cr_{M1}^{\times} , Cr_{M2}^{\times} и $(\text{Cr}_{M1}^{\times}-\text{Li}'_{M2})'$

Центр	Ось	a	b	c
Cr_{M1}^{\times}	x	50.0	105.1	136.0
	y	125.6	63.5	132.9
	z	60.1	31.1	82.2
$(\text{Cr}_{M1}^{\times}-\text{Li}'_{M2})'$	x	60.0	99.6	148.1
	y	133.7	59.2	120.6
	z	58.6	32.6	81.9
Cr_{M2}^{\times}	x	35.1	120.3	74.0
	y	76.4	98.3	164.0
	z	58.3	31.7	90.0

при их варьировании программа подбирает физически нереальные значения. При расчетах использовались характерные для иона двухвалентного хрома значения $g_x = g_y = g_z = 1.98$ [15].

В табл. 2 и 3 для сравнения с параметрами новых центров приведены соответствующие данные для центров Cr_{M1}^{\times} и Cr_{M2}^{\times} . Видно, что параметры спинного гамильтониана и ориентации осей нового центра, появляющегося после облучения, и Cr_{M1}^{\times} достаточно близки. В то же время наблюдается заметное отличие в параметрах спинного гамильтониана, особенно B_2^2 , нового центра и центра Cr_{M2}^{\times} . Из этого следует, что новый центр двухвалентного хрома занимает кристаллографическую позицию $M1$.

Мы полагаем, что новый парамагнитный центр имеет структуру $(\text{Cr}_{M1}^{\times}-\text{Li}'_{M2})'$ и возник в результате изменения зарядового состояния ассоциата $(\text{Cr}_{M1}^{\bullet}-\text{Li}'_{M2})^{\times}$ под действием облучения γ -квантами. По-видимому, под действием ионизирующего γ -облучения в кристалле образуются быстрые свободные электроны. Источником свободных электронов могут служить частично ионизованные ионы кислорода, центры O^- , возможность образования которых из ионов O^{2-} в структуре форстерита обсуждалась в работах [17,22,24]. Мы полагаем, что свободные электроны могут локализоваться на ионах трехвалентного хрома, входящих в состав ассоциатов $(\text{Cr}_{M1}^{\bullet}-\text{Li}'_{M2})^{\times}$, и перевести часть трехвалентных ионов хрома в двухвалентные. Магнитные свойства центра $(\text{Cr}_{M1}^{\times}-\text{Li}'_{M2})'$ качественно не отличаются от магнитных

свойств одиночного иона двухвалентного хрома, так как ион лития является немагнитным. Поэтому структура резонансных переходов одиночного Cr_{M1}^{\times} и данного ассоциата одинакова. Двухвалентные ионы хрома, образуемые в результате взаимодействия трехвалентного хрома со свободными электронами, уже не имеют избыточного положительного заряда по отношению к замещаемым матричным ионам магния. В связи с этим электростатическое взаимодействие с ионом лития, способствующее образованию ассоциата, перестает действовать. Однако кроме электростатических сил в таком взаимодействии принимают участие упругие, а также другие силы. При образовании ассоциатов трехвалентного хрома с литием выигрыш в энергии растворения, отражающий вклад всех этих сил, как показывает компьютерное моделирование, может достигать 0.7 eV по сравнению с изолированными ионами [25]. В случае же двухвалентного хрома, согласно нашим оценкам, такого выигрыша нет. Вместе с тем эти ионы продолжают существовать рядом, и ион лития, отличающийся по размеру и заряду от матричных ионов магния, продолжает оказывать возмущающее действие на соседний двухвалентный ион хрома, что приводит к появлению дополнительных линий в спектрах ЭПР, отвечающих за новые центры двухвалентного хрома.

Образование под действием облучения новых центров $(\text{Cr}_{M1}^{\times}-\text{Li}'_{M2})'$ должно было бы сопровождаться уменьшением концентрации исходных центров $(\text{Cr}_{M1}^{\bullet}-\text{Li}'_{M2})^{\times}$. Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что концентрация этих центров уменьшилась в 1.3 раза, что, вообще говоря, сопоставимо с ошибкой эксперимента. Вместе с тем, поскольку концентрация возникающих под действием облучения новых центров двухвалентного хрома $(\text{Cr}_{M1}^{\times}-\text{Li}'_{M2})'$ мала, уменьшение концентрации „исходных“ центров $(\text{Cr}_{M1}^{\bullet}-\text{Li}'_{M2})^{\times}$, из которых они, вероятнее всего, образуются, может не превышать ошибки измерения. В связи с этим данный механизм образования новых центров имеет право на существование.

Более существенно (в 1.8 раза) уменьшается под действием облучения концентрация ассоциатов $(\text{Cr}_{M2}^{\bullet}-\text{Li}'_{M1})^{\times}$, являющихся активными лазерными центрами. Несмотря на это, появления новых центров Cr^{2+} в позиции $M2$, т.е. центров $(\text{Cr}_{M2}^{\times}-\text{Li}'_{M1})'$, нами не обнаружено. Что же касается образования центров $(\text{Cr}_{M1}^{\times}-\text{Li}'_{M2})'$ в результате изменения валентного состояния ионов хрома в ассоциатах $(\text{Cr}_{M2}^{\bullet}-\text{Li}'_{M1})^{\times}$, то этот процесс представляется нам менее вероятным, чем описанный выше механизм, так как в этом случае перезарядка должна была бы сопровождаться изменением структурного положения ионов.

Отсутствие в спектрах ЭПР линий, отвечающих за новые центры Cr^{2+} в позиции $M2$, можно было бы объяснить тем, что примесный ион лития меньше влияет на кристаллическое поле соседнего полиэдра в случае, если ион хрома находится в более искаженной, чем в $M1$, позиции $M2$. Вследствие этого параметры спинного гамильтониана центров Cr_{M2}^{\times} и $(\text{Cr}_{M2}^{\times}-\text{Li}'_{M1})'$

будут близкими и резонансные переходы двух указанных центров в спектрах ЭПР становятся неразличимыми.

5. Выводы

1. Исследовано влияние ионизирующего излучения вплоть до дозы 10^8 rad на валентное состояние и структурную локализацию ионов хрома и их ассоциатов в форстерите.

2. Установлено, что ионизирующее излучение не приводит к заметному изменению концентрации одиночных примесных центров хрома.

3. Под действием γ -облучения в образцах появляются парамагнитные центры, обусловленные изменением валентного состояния иона трехвалентного хрома в ассоциате $(Cr_{M1}^{\bullet}-Li'_{M2})^{\times}$. Ионы трехвалентного хрома частично переходят в двухвалентные, в результате чего образуются центры $(Cr_{M1}^{\times}-Li'_{M2})'$. Концентрация этих новых центров $(Cr_{M1}^{\times}-Li'_{M2})'$ почти на два порядка величины меньше концентрации одиночных центров Cr_{M1}^{\times} и Cr_{M2}^{\times} .

4. Отмечено уменьшение примерно в 1.8 раза концентрации ассоциатов $(Cr_{M2}^{\bullet}-Li'_{M1})^{\times}$, являющихся активными лазерными центрами.

Список литературы

- [1] J.D. Birlle, G.V. Gibbs, P.B. Moor, J.V. Smith. *Am. Mineral.* **53**, 807 (1968).
- [2] V. Petricevic, S.K. Gayen, R.R. Alfano. *Appl. Phys. Lett.* **53**, 26, 2590 (1988).
- [3] C. Chudoba, J.G. Fujimoto, E.P. Ippen, H.A. Haus. *Opt. Lett.* **26**, 5, 292 (2001).
- [4] А.В. Гайстер, Е.В. Жариков, В.Ф. Лебедев, А.С. Подставкин, С.Ю. Теняков, А.В. Шестаков, И.А. Щербаков. *Квантовая электроника* **34**, 693 (2004).
- [5] В.Ф. Лебедев, И.Д. Рябов, А.В. Гайстер, А.С. Подставкин, Е.В. Жариков, А.В. Шестаков. *ФТТ* **47**, 1447 (2005).
- [6] K.R. Hoffman, J. Gasas-Gonzalez, S.M. Jacobsen, W.M. Yen. *Phys. Rev. B* **44**, 12 589 (1991).
- [7] H. Rager. *Phys. Chem. Minerals* **1**, 371 (1977).
- [8] Ф. Крегер. *Химия несовершенных кристаллов*. Мир, М. (1969). 654 с.
- [9] G.S. Shakurov, V.F. Tarasov. *Appl. Magn. Res.* **21**, 597 (2001).
- [10] Л.В. Бершов, Р.М. Минеева, А.В. Сперанский, С. Хафнер. *ДАН* **260**, 191 (1981).
- [11] L.V. Bershov, J.M. Gaite, S.S. Hafner, H. Rager. *Phys. Chem. Minerals* **9**, 95 (1983).
- [12] И.Д. Рябов, А.В. Гайстер, Е.В. Жариков. *ФТТ* **45**, 51 (2003).
- [13] А.А. Коновалов, В.Ф. Тарасов, В.Б. Дудникова, Е.В. Жариков. *ФТТ* **51**, 1533 (2009).
- [14] I.D. Ryabov. *Phys. Chem. Minerals* **38**, 177 (2010).
- [15] В.Ф. Тарасов, Г.С. Шакуров, А.Н. Гавриленко. *ФТТ* **37**, 499 (1995).
- [16] M. Kosmala, E. Mugenski, W. Streck. *J. Appl. Spectr.* **62**, 164 (1995).
- [17] S. Kaczmarek, W. Chen, G. Boulon. *Cryst. Res. Technol.* **41**, 41 (2006).
- [18] V.F. Lebedev, S.Yu. Tenyakov, E.A. Vanina, I.V. Gopienko, S.V. Simakov, K.A. Subbotin, E.V. Zharikov. *Proc. SPIE* **6054**, 605 406 (2006).
- [19] В.Б. Дудникова, Е.В. Жариков, В.С. Урусов. *ФТТ* **52**, 1738 (2010).
- [20] В.Ф. Лебедев, С.Ю. Теняков, А.В. Гайстер. *Опт. журн.* **79**, 698 (2012).
- [21] К.А. Субботин, В.Б. Дудникова, О.Н. Зайцева, В.М. Лазаренко, В.Н. Колокольцев, В.И. Товтин, Е.В. Жариков. *Опт. и спектр.* **112**, 588 (2012).
- [22] А.Н. Таращан. *Люминесценция минералов*. Наук. думка, Киев (1978). 296 с.
- [23] Д.А. Ахметзянов, В.Б. Дудникова, Е.В. Жариков, Е.Р. Жигейцев, О.Н. Зайцева, А.А. Коновалов, В.Ф. Тарасов. *ФТТ* **55**, 471 (2013).
- [24] В.Б. Дудникова, Е.В. Жариков, В.С. Урусов. *ФТТ* **54**, 1515 (2012).
- [25] В.Б. Дудникова, А.В. Гайстер, Е.В. Жариков, Н.И. Гулько, В.Г. Сенин, В.С. Урусов. *Неорган. материалы* **39**, 985 (2003).