

08,09

Состав нанодфектов в активированных кристаллах фторида лития

© Л.А. Лисицына¹, В.М. Лисицын²

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Томск, Россия

²Томский политехнический университет,
Томск, Россия

E-mail: lisitsyna@mail.ru

(Поступила в Редакцию 15 апреля 2013 г.)

Представлены результаты исследования оптических свойств кристаллов LiF, активированных окислами различных металлов (Li, W, Ti, Fe). Приведены доказательства формирования в кристаллической матрице в процессе роста нанодфектов, в состав которых входят поливалентные ионы активатора и кислород в различных состояниях (O^{2-} , OH^- , O_2^-). Показано, что такие нанодфекты являются местом стока электронных возбуждений и определяют направленность и эффективность стимулированных радиацией процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП ГК-11.519.11.3030, Минобрнауки (госзадание „Наука“ № 2.330.2011).

1. Введение

В рамках существующих моделей предполагается, что дефекты решетки распределены по кристаллу равномерно. Дефект (активатор) представляется некоторой элементарной единицей, для которой характерны определенные свойства вне зависимости от того, в какой системе она находится. Это допущение подтверждается исследованиями стимулированных радиацией процессов в кристаллофосфорах с совершенной структурой и малой концентрацией активатора

В используемых на практике реальных кристаллофосфорах концентрации дорадиационных дефектов велики, нарушения кристаллической структуры многочисленны и разнообразны. Дефекты в таких кристаллах представляют собой сложные комплексы, состав, пространственная и энергетическая структура которых определяются окислительно-восстановительными условиями роста кристаллов, типом и концентрацией преднамеренно вводимого катиона-активатора. Такой комплекс в отличие от точечного имеет наноразмеры.

Наличие нанодфектов может приводить к существенному изменению процессов, стимулированных радиацией в твердых телах. Электронные возбуждения, оказавшиеся в области нанодфекта, должны распадаться по иным законам, чем в решетке. Вероятность захвата нанодфектом электронного возбуждения и процессы передачи энергии возбуждения центру свечения, очевидно, должны быть отличными от таковых для совершенных кристаллов с точечными дефектами.

В настоящей работе представлены результаты изучения активированных окислами различных металлов (Li, Ti, Fe, W) кристаллов LiF, направленные на установление состава нанодфектов. Исследовались процессы образования (радиационного преобразования) компонентов, входящих в состав нанодфектов, а также влияние

присутствия нанодфектов на процессы радиационного создания собственных дефектов решетки.

2. Результаты исследований и обсуждение

Для исследований были выбраны следующие кристаллы:

1) „чистые“ (неактивированные) кристаллы LiF и кристаллы LiF–MeO ($Me = Li, Fe$), выращенные методом Стокбаргера во фторирующей атмосфере в НИТИОМ ВНЦ „ГОИ им. С.И. Вавилова“ (Санкт-Петербург);

2) кристаллы LiF–MeO ($Me = Ti, W$), выращенные методом Киропулоса на воздухе в ИСМА НАН Украины (Харьков).

Исходная дефектность исследованных кристаллов оценивалась по спектрам поглощения в диапазоне 13–0.1 eV. Спектры в УФ-диапазоне (13–6 eV) измерялись в НИТИОМ ВНЦ „ГОИ им. С.И. Вавилова“ (Санкт-Петербург) с использованием спектрометра на базе вакуумного монохроматора; спектры в диапазоне 6–1 eV — на спектрофотометрах СФ-256 УВИ и СФ-256 БИК. ИК-спектры измерялись на ИК-Фурье-спектрометре Nicolet 5700 в диапазоне 0.5–0.1 eV со спектральным разрешением 2 см^{-1} .

Изучались спектрально-кинетические характеристики импульсной катодоллюминесценции (ИКЛ) и импульсной фотоллюминесценции (ИФЛ) в интервале температур 15–300 К в спектральном диапазоне 4.0–1.6 eV. Характеристики возбуждающего импульса потока электронов были следующими: длительность импульса 10 ns, средняя энергия электронов 250 keV. ИФЛ возбуждалась излучением четвертой гармоники неодимового лазера (энергия кванта 4.66 eV) с длительностью импульса 5 ns и энергией в импульсе 40 mJ. Кинетические кривые

ИКЛ и ИФЛ на выбранной длине волны записывались осциллографом LeGroy-WP-6030a во временном интервале $1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-3}$ с после окончания действия возбуждающего импульса. Предварительное облучение кристаллов осуществлялось потоками электронов в диапазоне интегральных поглощенных доз $\leq 10^5$ Gy.

Спектры люминесценции измерялись с помощью двух скрещенных монохроматоров типа МДР-204 с использованием в качестве приемника излучения ФЭУ „Hamamatsu“ R928. Интегральные характеристики люминесценции после импульсного радио- или фотовозбуждения измерялись с помощью высокоточного оптоволоконного спектрометра AvaSpec-2048 USB2.0.

Активирование кристаллов LiF осуществлялось путем добавления в шихту окисла соответствующего металла (Li, Ti, W, Fe). Поэтому в легированных кристаллах следует ожидать присутствия для компенсации заряда и упругих напряжений в области активатора как кислородсодержащей примеси, так и собственных дефектов решетки (вакансии, междоузельные ионы).

Далее приводятся доказательства наличия пространственной корреляции в распределении кислородсодержащей примеси в кристаллах и существования кислорода в различных модификациях в области поливалентного катиона-активатора.

2.1. Создание в процессе роста кристаллов комплексов $Me - nOH^-$. Кристаллы LiF–Li₂O, так же как и неактивированные чистые кристаллы LiF, были прозрачны в ИК-области в диапазоне 4000–1000 cm^{-1} . Спектры кристаллов LiF, активированных окислами различных металлов (W, Ti, Fe), при 300 K содержали полосы, обусловленные свободными ионами OH^- (полоса 3730 cm^{-1} [1,2]) и комплексами $Me - nOH^-$, дающими набор узких полос в области 3700–3500 cm^{-1} (табл. 1), количество и спектральное положение которых определяются типом катиона-активатора. Установлено, что соотношение между числом свободных и связанных с катионом ионов гидроксила, т.е. отношение показателей поглощения $k(OH^-)/k(Me - OH^-)$, зависит от типа активатора и в исследованных нами кристаллах было равно 0.5 (LiF–Fe), ~ 1 (LiF–W) и ~ 2.2 (LiF–Ti). Следовательно, наиболее эффективными комплексообразователями из исследованных металлов в кристаллах LiF являются ионы железа, а наименее эффективными — ионы титана. Одной из причин низкой активности титана, по-видимому, является его способность входить в решетку LiF не в четырехвалентном, а в двухвалентном и даже нейтральном состоянии [3].

2.2. Создание в процессе роста кристаллов комплексов $Me - O^{2-} - OH^-$. В табл. 2 для примера приведены спектры поглощения в ВУФ-диапазоне кристаллов LiF, активированных окислами лития и железа. По сравнению с чистым кристаллом LiF, прозрачным в области ≤ 12 eV, спектры исследованных нами активированных кристаллов LiF состоят из ряда полос, положение которых не зависит от типа катиона-ак-

Таблица 1. Спектральное положение полос поглощения при 300 K в диапазоне 4000–3000 cm^{-1} в спектрах необлученных кристаллов LiF различной предистории

Кристалл	Тип дефекта, ответственного за поглощение						
	OH^-	$Me - nOH^-$					
	Положение полос поглощения, cm^{-1}						
LiF–Fe ₂ O ₃	3730	3662	3618	3612*	3573		
LiF–WO ₃	3730	3622*	3616	3610	3604	3588	3581
LiF–TiO ₂	3730	3675	3650	3630	3620	3586	3567

* Самая интенсивная полоса.

Таблица 2. Спектральное положение полос поглощения в диапазоне 12–3 eV в спектрах необлученных кристаллов LiF различной предистории

Кристалл	Положение полос поглощения, eV				
LiF	12				
LiF–Li ₂ O	11.2		9.0	7.5	6.2
LiF–Fe ₂ O ₃		10.3	9.0	7.5	6.2

тиватора и совпадают с известными спектрами для кислородсодержащих кристаллов LiF [4–7].

На рис. 1 приведены спектры ИФЛ кристаллов LiF, активированных окислами различных металлов, измеренные с задержкой 10 ns (1) и 10 μ s (2–5) при оптическом возбуждении с энергией фотона 4.66 eV. Кинетика затухания фотолюминесценции при 300 K характеризуется двумя компонентами: наносекундным и микросекундным. Спектр наносекундного компонента во всех кристаллах одинаковый и состоит из монополосы в области 3.1 eV, тогда как спектральное положение монополосы спектра микросекундного компонента затухания зависит от типа катиона-активатора: 2.7 (LiF–TiO₂), 2.8 (LiF–WO₃), 2.9 (LiF–Fe₂O₃) и 3.1 eV (LiF–Li₂O). Кинетические характеристики короткоживущего (наносекундного) компонента затухания люминесценции (рис. 1, кривая 1) не зависят от типа катиона активатора, состава атмосферы при выращивании кристалла (фтор или воздух), способа возбуждения люминесценции (оптический или под действием электронов), величины поглощенной дозы предварительного облучения. Это свидетельствует о принадлежности соответствующего излучательного перехода (3.1 eV) активаторному центру, общему для всех исследованных кристаллов. Таким центром со всей очевидностью является ион кислорода в свободном состоянии или в виде диполя $O^{2-} - V_a$ [8,9].

В случае долгоживущего компонента затухания люминесценции (рис. 1, кривые 2–5) обладает следующими свойствами.

1) Спектральное положение излучательного перехода зависит от типа катиона активатора.

2) Долгоживущие полосы, присутствующие в спектре фотолюминесценции (рис. 1), наблюдаются также при

возбуждении кристаллов импульсом электронов. Однако в спектрах ИКЛ наблюдаемое свечение имеет одну особенность: при $T \geq 250$ К помимо безынерционного возникает пострадиационный термоактивированный компонент разгорания (впервые обнаруженный нами при исследовании кристаллов LiF-WO_3 [10]), величина характеристического времени разгорания которого зависит от типа катиона-активатора и равна $20 \mu\text{s}$ в кристаллах $\text{LiF-Li}_2\text{O}$ и $\text{LiF-Fe}_2\text{O}_3$ и $3 \mu\text{s}$ в кристаллах LiF-WO_3 и LiF-TiO_2 . Наличие разгорания в каждой из полос, приведенных на рис. 1 (кривые 2–5), свидетельствует о единой природе полос люминесценции в кристаллах с различным типом катиона-активатора. А зависимость спектрального положения излучательно-го перехода и времени разгорания от типа катиона-активатора свидетельствует о пространственной корреляции в расположении в решетке ионов O^{2-} относительно примесных катионов.

3) В кристаллах LiF , активированных окислами железа или титана, интенсивность излучательного перехода в области $2.7\text{--}2.9$ eV увеличивается с ростом температуры кристаллов при облучении. Однако световыход в полосах не зависит от температуры в интервале $15\text{--}250$ К. Ранее подобные закономерности мы наблюдали в кристалле LiF , активированном окисью вольфрама [11].

4) Ни спектрально-кинетические параметры, ни величина интенсивности ИФЛ полос, представленных на рис. 1, не зависят от величины поглощенной дозы в области $\leq 10^4$ Gy во всех исследованных нами активированных кристаллах, что позволяет использовать кристаллы LiF-MeO в качестве сцинтилляторов.

5) Нами установлено, что в каждом из исследованных кристаллов величина характеристического времени затухания люминесценции определяется двумя параметрами: концентрацией ионов гидроксильной группы в матри-

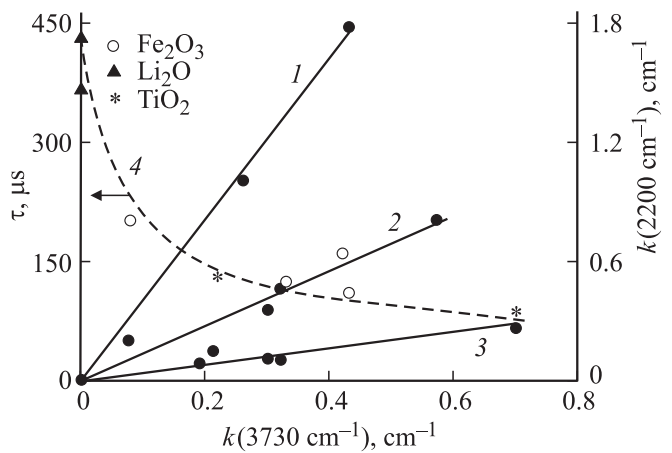


Рис. 2. Зависимости показателя поглощения в полосе 2200 cm^{-1} в кристаллах LiF , активированных окислами различных металлов: Fe_2O_3 (1), WO_3 (2), TiO_2 (3) и характеристического времени затухания активаторной люминесценции (τ) в активированных окислами Li, Fe или Ti кристаллах LiF (4) от величины показателя поглощения в полосе 3730 cm^{-1} , принадлежащей свободным ионам OH^- (4).

це и типом катиона-активатора (рис. 2). Результаты, представленные на рис. 2, свидетельствуют о том, что наибольшее время затухания свечения в области 3 eV наблюдается в кристалле LiF , активированном окисью лития и не содержащем гидроксильных ионов. В присутствии в кристалле катиона-активатора наблюдается тенденция к уменьшению времени затухания активаторной люминесценции с увеличением значения показателя поглощения в максимуме полосы свободных ионов OH^- в спектре соответствующего кристалла.

Таким образом, есть основания предполагать, что долговременная люминесценция, наблюдаемая в активированных окислами поливалентных металлов кристаллах LiF , обусловлена центрами свечения, в состав которых помимо поливалентных ионов металла входят ионы кислорода в виде O^{2-} и ионы гидроксильной группы. Создаются такие комплексы в процессе роста кристаллов. Число ионов OH^- , координированных с катионом, определяется типом катиона и окислительно-восстановительными условиями в процессе роста кристалла.

2.3. Радиационное создание комплексов Me-nO_2^- . Под действием облучения потоком электронов во всех кристаллах LiF , активированных окислами поливалентных металлов и содержащих ионы OH^- , создаются молекулярные ионы кислорода O_2^- [12]. Процесс создания ионов O_2^- является термоактивированным в кристаллах LiF-TiO_2 и $\text{LiF-Fe}_2\text{O}_3$ (энергия термоактивации E_a равна 0.03 eV) и безактивационным в кристалле LiF-WO_3 .

Установлено, что при отсутствии ионов OH^- (кристалл $\text{LiF-Li}_2\text{O}$) воздействие потоком электронов не приводит к созданию молекулярных ионов O_2^- [13].

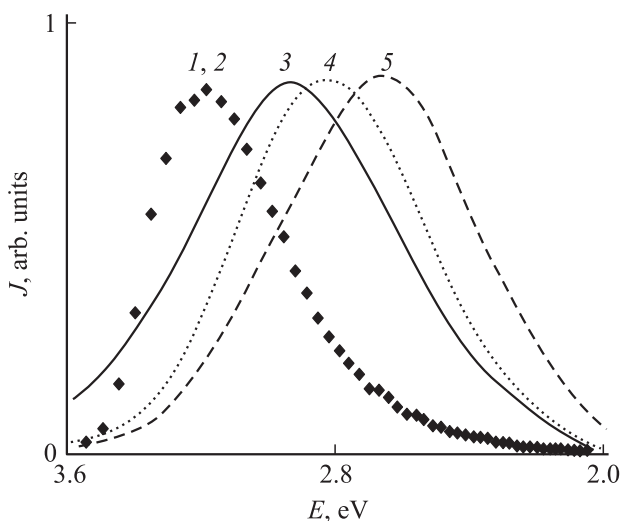


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции при 300 K , измеренные с задержкой 10 ns (1) и $10 \mu\text{s}$ (2–5) в кристаллах LiF , активированных Li_2O (1, 2), Fe_2O_3 (1, 3), WO_3 (1, 4), TiO_2 (1, 5). Спектры нормированы.

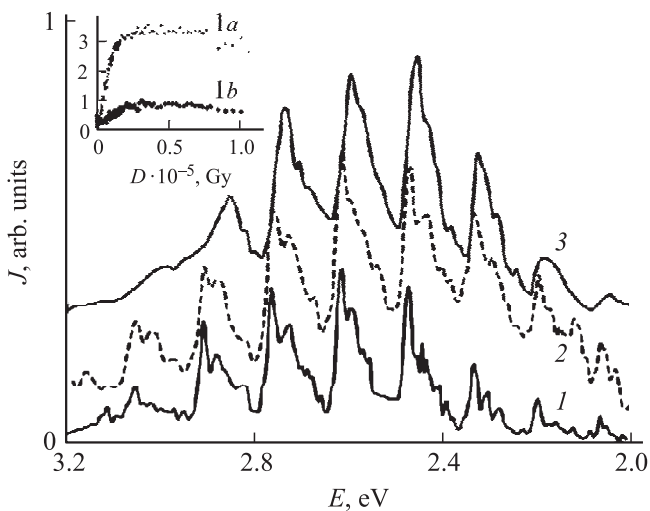


Рис. 3. Спектры катодолуминесценции, измеренные с задержкой 10 ns при 200 К, обусловленные молекулярными ионами O_2^- в облученных электронами при 200 К кристаллах LiF, активированных TiO_2 (1), Fe_2O_3 (2), WO_3 (3). На вставке — дозовая зависимость при 300 К интенсивности ИКЛ молекулярных ионов O_2^- в полосе при 2.69 eV при 300 К в кристаллах LiF– TiO_2 , выколотых со дна (1, а) и вершины (б) були.

Спектр ИКЛ кристаллов с радиационным дефектом в виде O_2^- имеет электронно-колебательную структуру (ЭКС), состоящую из десяти эквидистантных полос с расстоянием между полосами 0.15 eV (рис. 3) и положением максимума огибающей на 2.5–2.6 eV. Влияние типа катиона-активатора как на положения максимумов полос ЭКС (рис. 3), так и на величину энергии активации процесса создания O_2^- свидетельствует о присутствии поливалентного катиона в ближайших координационных сферах иона O_2^- .

Величина характеристического времени затухания ИКЛ ионов O_2^- в кристаллах LiF при 15 К равна 100 ns, а при 300 К — 50 ns и не зависит от типа катиона-активатора. Число создаваемых под действием ионизирующей радиации молекулярных ионов O_2^- зависит от величины поглощенной дозы и концентрации примеси OH^- в кристалле. На рис. 3 (вставка) приведены дозовые зависимости интенсивности одной из полос спектра ЭКС в кристаллах LiF– TiO_2 с различным содержанием OH^- и комплексов $Ti-OH^-$ по высоте були. На рис. 3 (вставка) и 4, б представлены дозовые зависимости в кристаллах LiF– TiO_2 и LiF– Fe_2O_3 при облучении потоком электронов при 300 К.

Прямое доказательство принадлежности данного спектра молекулярному иону O_2^- в кристаллах NaF дано в [14] на основании оптических и ЭПР-исследований.

2.4. Радиационное создание комплексов с водородной связью $Me-O-H \dots nF_i^0$. Облучение жесткой радиацией кристаллов LiF, содержащих поливалентные катионы-активаторы и гидроксильные ионы, приводит к созданию еще одного радиационного дефекта, о чем свидетельствует появление в обла-

сти 2200 cm^{-1} широкой полосы, интенсивность и полуширина которой увеличиваются с ростом поглощенной дозы. На рис. 4, а в качестве примера приведен фрагмент спектра ИК-поглощения в области 2200 cm^{-1} в кристалле LiF– WO_3 до облучения (кривая 1) и для двух значений поглощенной дозы (кривые 2, 3). Подобный радиационный эффект наблюдался нами в спектре кристалла LiF, активированного окисью железа [15] и LiF– TiO_2 . При одинаковом исходном содержании в кристаллах ионов OH^- в свободном состоянии наибольший радиационный прирост интенсивности полосы в области 2200 cm^{-1} при $D = \text{const}$ наблюдается в кристаллах LiF– Fe_2O_3 и наименьший в кристаллах LiF, активированных окисью титана (рис. 2).

Одновременно с накоплением под действием радиации центров, ответственных за поглощение в области 2200 cm^{-1} (рис. 4, б, кривая 3), наблюдается протекание следующих процессов:

1) уменьшение интенсивности полос, принадлежащих как свободным, так и связанным с катионом-активатором гидроксильным ионам (рис. 4, б, кривые 1 и 2);

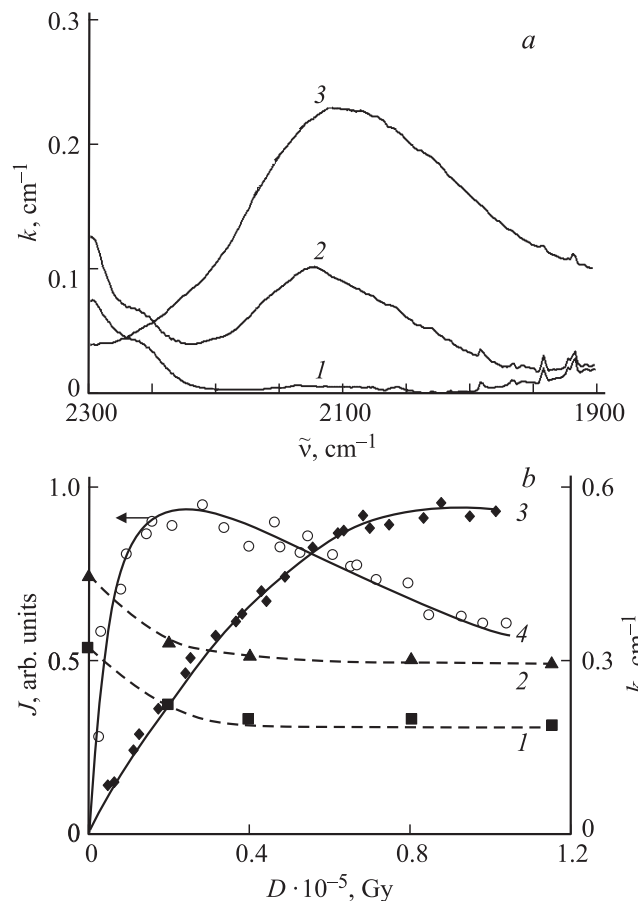


Рис. 4. а) Фрагмент спектра поглощения облученного потоком электронов при 300 К кристалла LiF– WO_3 при различных значениях поглощенной дозы: 0 (1), $1 \cdot 10^4$ (2), $3 \cdot 10^4$ Gy (3). б) Дозовая зависимость при 300 К показателя поглощения в максимуме полос 3730 (1), 3612 (2), 2200 cm^{-1} (3) и интенсивности ИКЛ в одной из полос спектра ЭКС (2.91 eV), принадлежащей иону O_2^- , в кристалле LiF– Fe_2O_3 (4).

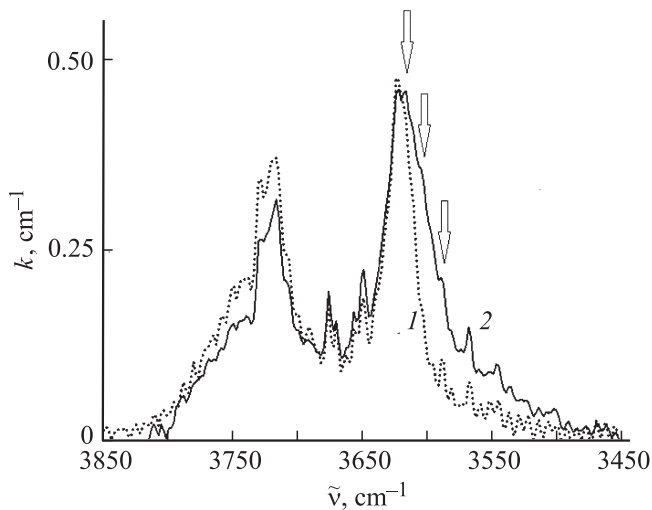


Рис. 5. Фрагмент ИК-спектра поглощения кристалла LiF-WO_3 до (1) и после облучения электронами при 300 К ($D = 1 \cdot 10^5 \text{ Gy}$) (2). Стрелками указано положение максимумов, созданных радиацией полос поглощения.

2) изменение структуры комплексов Me-nOH^- , приводящее к модификации спектра поглощения, принадлежащего комплексу, проявляющемуся в изменении соотношения между полосами (в кристалле $\text{LiF-Fe}_2\text{O}_3$) и в появлении дополнительных узких полос (в кристаллах LiF-TiO_2 и LiF-WO_3). На рис. 5 в качестве примера представлен фрагмент ИК-спектра поглощения комплекса W-nOH^- в кристалле LiF до и после облучения электронами при 300 К.

Полученные нами экспериментальные результаты могут быть интерпретированы в рамках модели, предложенной в [16,17], в соответствии с которой радиационное преобразование присутствующих в решетке ионов OH^- в составе комплексов Me-nOH^- сопровождается созданием молекулярного кластера с водородной связью типа Me-O-H...nF_i^0 (где $n = 1, 2, 3 \dots$; F_i^0 — междоузельный атом галоида, комплементарный F -центру окраски). По отношению к решетке кластер имеет эффективный положительный заряд и может рассматриваться как дырка, локализованная на активаторном комплексе Me-nOH^- .

Таким образом, результаты проведенных нами исследований позволяют полагать, что присутствие в кристалле комплексов Me-nOH^- способствует образованию стабильных радиационных дефектов дырочной природы, ответственных за поглощение в области 2200 cm^{-1} . Создание таких радиационных дефектов в непосредственной близости от катиона-активатора приводит к радиационному преобразованию комплекса Me-nOH^- с ростом поглощенной дозы и, как следствие, к изменению вида спектра поглощения такого комплекса (см., например, рис. 5).

2.5. Радиационное создание электронных центров окраски. Одновременно с созданием дырочного центра с водородной связью под действием радиации происходит создание и накопление электронных

центров окраски (ЦО): $F, F_2, F_3, F_2^+, F_3^+$ и др. На рис. 6, *a* приведен спектр поглощения кристалла $\text{LiF-Fe}_2\text{O}_3$, облученного при 300 К электронами. Спектр подобен наведенному радиацией в чистых кристаллах LiF . Однако, как установлено, закономерности накопления электронных ЦО с ростом дозы зависят от предыстории кристалла. В неактивированных кристаллах LiF (чистых, прозрачных в области $\leq 12 \text{ eV}$), в которых ионы OH^- отсутствуют, дозовая зависимость числа накопленных F_2 -центров имеет сложный характер: квадратичный в области $\leq 10^3 \text{ Gy}$ и линейный в интервале $10^3 - 10^5 \text{ Gy}$ (математическое описание этого процесса дано нами в [18]). В активированных окислами поливалентных металлов (Ti, W, Fe) кристаллах LiF дозовая зависимость числа накопленных ЦО F_2 имеет вид кривой с насыщением. На рис. 6, *b* для сравнения приведены дозовые зависимости при 300 К величины показателя поглощения в максимуме F_2 -полосы в неактивированном кристалле LiF и в кристаллах LiF-TiO_2 и $\text{LiF-Fe}_2\text{O}_3$. Уровень насыщения дозовой зависимости определяется концентрацией присутствующих до облучения в кри-

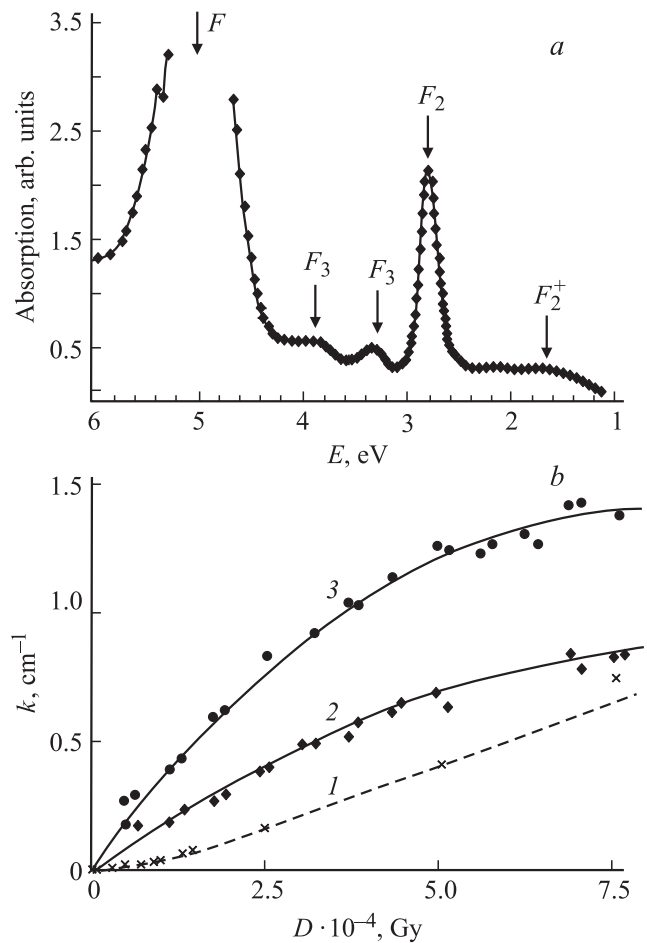
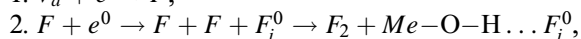
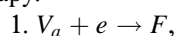


Рис. 6. Спектр поглощения облученного электронами ($D = 1 \cdot 10^5 \text{ Gy}$) кристалла $\text{LiF-Fe}_2\text{O}_3$ (*a*) и дозовая зависимость при 300 К величины показателя поглощения в максимуме F_2 -полосы в кристаллах LiF (1), LiF-TiO_2 (2), $\text{LiF-Fe}_2\text{O}_3$ (3) (*b*).

сталле ионов OH^- и типом катиона-активатора. Ранее подобный характер зависимости накопления F_2 -центров наблюдался в кристалле $\text{LiF}-\text{UO}_3$ [19].

Нами установлено, что скорость накопления собственных радиационных электронных центров (F_2) и дырочных центров $\text{Me}-\text{O}-\text{H} \dots nF_i^0$, ответственных за поглощение в области 2200 cm^{-1} при 300 К одинакова, а отношение между этими центрами не зависит от поглощенной дозы при $D \leq 10^5 \text{ Gy}$ в кристаллах LiF , активированных окисью вольфрама [15], окисью железа [20], а также в кристаллах $\text{LiF}-\text{TiO}_2$. Существование корреляции между числом накопленных в кристалле F_2 -центров и числом дырочных центров в виде $\text{Me}-\text{O}-\text{H} \dots nF_i^0$ в активированных кристаллах LiF , видимо, свидетельствует о том, что такие два центра, как F_2 и F_i^0 , являются продуктами одной реакции.

Таким образом, характер дозовой зависимости процесса образования F_2 -центров в виде кривой с насыщением может иметь следующее объяснение. В легированных кристаллах LiF большая часть электронных возбуждений распадается на френкелевские пары не в объеме решетки, а в области нанодфекта. Процесс создания F_2 -центров в области нанодфекта включает два этапа: создание F -центров на дорадиационных присутствующих в нанодфекте анионных вакансиях и распад экситона (e^0) в области созданного F -центра на френкелевскую пару:



где F_i^0 — дырочный компонент френкелевской пары, $\text{Me}-\text{O}-\text{H} \dots F_i^0$ — дырочный центр.

Следовательно, накопление F_2 -центров в кристаллах LiF , содержащих поливалентные примесные катионы, будет происходить эффективно с вероятностью, пропорциональной концентрации вводимой примеси, но не с вероятностью случайного образования в объеме кристалла двух расположенных рядом F -центров, что наблюдается при накоплении F_2 -центров в чистых неактивированных кристаллах LiF .

3. Заключение

Представленные результаты исследований позволяют считать, что при выращивании кристаллов LiF , активированных окислами поливалентных металлов, происходит самоорганизация дефектности с созданием наноразмерных областей, в составе которых помимо поливалентного катиона комплексообразователя содержатся гидроксильные ионы OH^- , ионы кислорода в виде O^{2-} , молекулы кислорода O_2 , а также собственные дефекты решетки в виде анионных вакансий и ионов фтора в междоузлиях с собственной системой упорядочения. Такой нанодфект имеет протяженность не менее пяти межионных расстояний. Это означает, что сечение захвата электронных возбуждений нанодфектами может в 100–1000 раз превышать сечение захвата точечным дефектом.

При минимальной концентрации точечных дефектов в кристаллах 10^{17} cm^{-3} электронные возбуждения создаются преимущественно в объеме кристалла. В легированных кристаллах электронные возбуждения с высокой вероятностью оказываются в объеме нанодфекта. Наличие у нанодфекта собственной пространственной и энергетической структуры должно сказываться на протекании стимулированных радиацией процессов передачи энергии центрам свечения, эффективности люминесценции, образования и преобразования дефектов, эффективности накопления новых дефектов.

По результатам проведенных в настоящей работе исследований в непосредственной близости от катиона-активатора в объеме нанодфекта происходят такие процессы, как передача энергии центру свечения ($\text{Me}-n\text{O}^{2-}-\text{OH}^-$); стабилизация дырочного компонента пары в виде дырочного центра $\text{Me}-\text{O}-\text{H} \dots nF_i^0$; образование сложных электронных центров окраски (F_2 -центров).

Таким образом, нанодфект является местом стока электронных возбуждений, создаваемых в кристалле. Если центр свечения присутствует в составе такого нанодфекта, очевидно, что вероятность передачи ему энергии возбуждения будет определяться размером, количеством и структурой нанодфектов.

Представляется возможным использование рассмотренного подхода и для объяснения высокого светового выхода таких кристаллических сцинтилляторов, как вольфраматы и молибдаты ABO_4 (где $A = \text{Ca}, \text{Cd}, \text{Zn}, \text{Pb}$, а $B = \text{Mo}, \text{W}$), высокий уровень исходной дефектности которых не вызывает сомнения из-за трудностей в поддержании стехиометрии расплава в процессе роста.

Список литературы

- [1] G. Stoebe. J. Phys. Chem. Solids **31**, 1291 (1970).
- [2] B. Wedding, M. Klein. Phys. Rev. **177**, 1274 (1969).
- [3] T.G. Stoebe, S. Watanabe. Phys. Status. Solidi A **29**, 11 (1975).
- [4] E. Freytag. Z. Phys. **177**, 206 (1964).
- [5] К.К. Шварц, Я.Ж. Кристаксон, Д.Ю. Лусис, А.В. Подинов. В сб.: Радиационная физика. Т. V. / Под ред. К.К. Шварца, А.Ф. Люшиной. Зинатне, Рига (1967). С. 179.
- [6] М.В. Коржик. Физика сцинтилляторов на основе кислородных монокристаллов. БГУ, Минск (2003). 263 с.
- [7] В.А. Архангельская, Е.В. Гусева, Г.М. Зингер, Н.Е. Королев, В.М. Рейтеров. Опт. и спектр. **61**, 542 (1986).
- [8] А.И. Непомнящих, Е.А. Раджабов, А.В. Егранов. Центры окраски и люминесценция кристаллов LiF . Наука, Новосибирск (1984). 112 с.
- [9] А.В. Егранов, Е.А. Раджабов. Спектроскопия кислородных и водородных центров в щелочно-галогидных кристаллах. Наука, Новосибирск (1992). 161 с.
- [10] Л.А. Лисицына, В.И. Корепанов, Л.Н. Трефилова, В.М. Лисицын, А.А. Абдрахметова, А.Т. Акылбеков, А.К. Даулетбекова. Изв. вузов, Физика **54**, 11/3, 120. (2011).
- [11] Л.А. Лисицына, В.И. Корепанов, А.А. Абдрахметова, Н.Н. Тимошенко, А.К. Даулетбекова. Опт. и спектр. **112**, 200 (2012).

- [12] Л.А. Лисицына, Л.Н. Трефилова, Р.Н. Касымканова, А.К. Даулетбекова. Изв. вузов. Физика **55**, 6/2, 122 (2012).
- [13] Л.А. Лисицына, В.И. Корепанов, В.М. Лисицын, А.Е. Елисеев, Н.Н. Тимошенко, А.К. Даулетбекова. Опт. и спектр. **110**, 568 (2011).
- [14] M.L. Meistrich. J. Phys. Chem. Solids **29**, 1119 (1968).
- [15] A. Dautletbekova, L. Lisitsyna, V. Korepanov, V. Lisitsyn, L. Trefilova, R. Kassymkanova. Phys. Status. Solidi C **10**, 263 (2013).
- [16] П.Д. Алексеев. Опт. и спектр. **59**, 567 (1985).
- [17] П.Д. Алексеев. Опт. и спектр. **60**, 528 (1986).
- [18] Л.А. Лисицына. В сб.: Твердотельные детекторы ионизирующих излучений / Под ред. В.С. Кортова, Б.В. Шульгина, А.Ю. Кузнецова. УГТУ, Екатеринбург (1998). С. 3.
- [19] Л.А. Лисицына, В.И. Корепанов, А.Е. Елисеев, Е.В. Бихерт, М.В. Здоровец, Г.С. Денисов. Изв. вузов. Физика **52**, 8/2, 38 (2009).
- [20] Л.А. Лисицына, Р.Н. Касымканова, Д.Б. Есильбаев, А.К. Даулетбекова. ФТТ **55**, 953 (2013).