

02

Влияние ультрафиолетового света на люминесценцию (700–1000 nm) кристаллов LiF и LiF:OH, облученных в ядерном реакторе

© В.Г. Квачадзе, М.Г. Абрамишвили, Г.Г. Абрамишвили, З.Г. Ахвледiani, М.В. Галусташвили, Г.Г. Деканоизишвили, В.М. Тавхелидзе

Тбилисский государственный университет им. И. Джавахишвили, Институт физики им. Э. Андроникашвили, 0186 Тбилиси, Грузия

e-mail: kvatchadze@gmail.com

Поступила в редакцию 13.04.2021 г.

В окончательной редакции 05.07.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

Исследованы спектры испускания (700–1000 nm) и поглощения (200–800 nm) кристаллов LiF и LiF:OH, облученных в реакторе и подвергнутых воздействию ультрафиолетового света, в том числе и совмещенного с механической нагрузкой. Цель работы — изучение характера поведения лазерных центров окраски в указанных системах. В диапазоне 710–825 nm наблюдаются диаметрально противоположные результаты: высокая устойчивость F₄-подобных центров в „чистом“ LiF и резкое их разрушение в кристаллах LiF:OH. В то же время в обеих группах разрушаются центры F₃ и F₄ и интенсивно накапливаются лазерные центры F₂⁺ и F₃⁻ (825–925 nm). При последующей выдержке в условиях комнатной температуры и темноты наблюдается самопроизвольный распад лазерных центров, сопровождаемый ростом концентрации F₄-подобных центров и восстановлением микроструктуры облученных кристаллов.

Ключевые слова: фотолюминесценция, кристаллы, облучение, центры окраски.

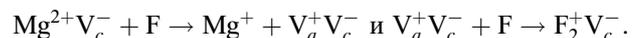
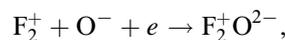
DOI: 10.21883/OS.2022.03.52162.2160-21

Введение

Спектральный диапазон люминесценции 700–1000 nm кристаллов LiF почти полностью перекрывает излучение трех центров окраски: F₄-подобных (670–860 nm), F₂⁺ (820–1080 nm) и F₃⁻ (880–950 nm) [1]. Два последних центра окраски достаточно хорошо изучены и их структуры давно известны. Первый из них представляет собой ионизированный вариант F₂-центра, агрегата из двух F-центров, находящихся в соседних анионных узлах в направлении [110]; второй — захвативший избыточный электрон F₃-центр, представляющий собой агрегат из трех F-центров, образующих равносторонний треугольник с осью в направлении [111] [2]. Соответствующие волновые диапазоны, указанные выше, определяют пределы перестройки частоты лазеров на этих центрах окраски (LiF:F₂⁺ и LiF:F₃⁻) [3].

F₂⁺-центры термически неустойчивы при комнатной температуре, в кристаллах LiF они распадаются с постоянной времени около 12 h [2]. На их основе были разработаны относительно устойчивые так называемые F₂⁺-подобные центры: F₂⁺O²⁻ и F₂⁺V_c⁻ [3], где возмущающие дефекты O²⁻ и V_c⁻ не только способствуют пространственной и термической стабильности F₂⁺-центров, но и расширяют спектральный диапазон работы лазеров. Механизмы образования F₂⁺-подобных центров

при комнатной температуре [3]:



В отличие от центров F₂⁺ и F₃⁻ F₄-подобный центр является сравнительно „новым“ и недостаточно изученным, структура которого все еще не установлена. Название центра (F₄-подобный) предложено в [1]. После довольно тщательного исследования и анализа обнаруженного нового пика люминесценции (735 nm) авторы [1] пришли к выводу, что он обусловлен агрегатным центром окраски, состоящим из четырех F-центров с пиком поглощения при 648 nm. Один агрегат с четырьмя F-центрами известен в специальной литературе как F₄-центр (структура — тетраэдр или параллелограмм с F-центрами в вершинах [3]). Он и стал прообразом центра, названного F₄-подобным, так как его оптические характеристики отличны от исходного.

Идентификация F₄-подобных центров, на наш взгляд, является актуальной проблемой как для физики дефектов в целом, так и для квантовой электроники, что стимулирует дальнейшие исследования в этом направлении.

Методология данного исследования — предварительное облучение образцов высоким потоком *n, γ*-излучения и последующее воздействие на них ультрафиолетовым (УФ) светом в различных условиях — даст возможность получить новую информацию относительно поведения этих неразгаданных до конца центров.

С этой целью были выбраны кристаллы LiF, содержащие две различные концентрации молекулярных ионов гидроксила, продукты радиационного распада которых могут оказаться определенной „меткой“ для центров окраски, с которыми они взаимодействуют. Это, в свою очередь, даст возможность более тщательно проследить характер поведения указанных выше центров окраски.

Образцы и методы

Для исследования были подготовлены две группы кристаллов фтористого лития — с низкой и высокой концентрацией примеси OH^- , условно LiF и LiF:OH соответственно. По результатам инфракрасной (ИК) спектроскопии в образцах LiF общая концентрация молекулярных ионов OH^- („свободных“ и объединенных в комплексы с двухвалентными ионами магния) не превышала 20 ppm, а в образцах LiF:OH — составляла 160 ppm, причем примесь OH^- находилась преимущественно в „свободном“ состоянии. В обеих группах образцов присутствовала примесь магния ($2.6 \cdot 10^{-3}$ и $2.7 \cdot 10^{-3}$ wt.% соответственно), количество других примесей более чем на порядок меньше.

Подготовка исследуемых образцов ($10 \times 10 \times 0.6$ mm) включала создание в них значительного количества центров окраски, в том числе F_4 -подобных центров. С этой целью они предварительно облучались смешанным потоком ядерного излучения (по тепловым нейтронам — 10^{18} н/см²) в реакторе ВВР-М (Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев).

Облученные образцы обоих типов подвергались воздействию УФ света (кварцевая лампа DRT-220), а также комбинированному воздействию УФ света и механического напряжения (σ) в области предела текучести (деформационная машина Ду-22 (Франция)).

Спектры оптического поглощения измерялись спектрометром SF-29 в УФ и видимой областях и SPECORD-751R в ИК области. Фотолюминесценция возбуждалась светоизлучающим диодом (630 nm) и регистрировалась при комнатной температуре с помощью спектрометра AvaSpec-2048 с активнопиксельным КМОП-детектором (чувствительность — 375000 pulse/ μW за интеграционный период).

Результаты и обсуждение

Спектры поглощения и испускания кристаллов после облучения в реакторе

Анализ полученных спектров поглощения и люминесценции [4] показывает, что интенсивный поток ядерного излучения (10^{18} н/см²), вызывающий внутриканальный нагрев облучаемых образцов (дифференциальный поток тепловых нейтронов — $2.1 \cdot 10^{13}$ н/см² · s при мощности реактора 8.7 MW), кроме продуктов распада гидроксила и малого количества других примесей, не порождает более крупные агрегатные дефекты (коллоиды и др.). Это

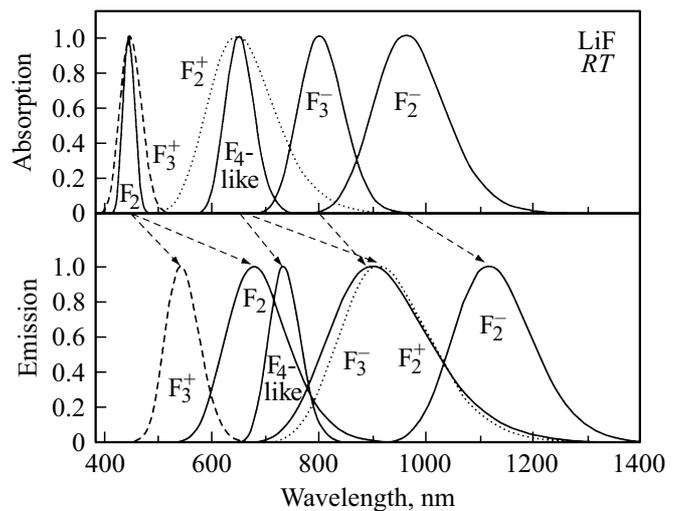


Рис. 1. Полосы поглощения и испускания известных центров окраски в окрашенном кристалле LiF при комнатной температуре, представленные в виде нормированных гауссовых кривых.

обеспечило накопление значительной концентрации центров окраски (концентрация F-центров $\sim 2 \cdot 10^{18}$ см⁻³) и почти полный комплект их различных видов в исследуемом спектральном диапазоне (F, F₂, F₂⁺, F₃, F₃⁺, F₄ и F₄-подобные, а также F₃⁻). Большинство из указанных здесь центров являются лазерными центрами, совместное излучение которых (с учетом F₂⁻-центров, которых мы не наблюдали) перекрывает диапазон от 400 до 1400 nm. Это ярко продемонстрировано с помощью известных полос эмиссии этих центров на рис. 1, заимствованном из [5].

В результате реакторного облучения в ИК спектрах обеих групп исследуемых образцов почти полностью исчезли полосы при 3550–3700 и 3730 см⁻¹ (рис. 2, a, b), соответствующие гидроксильным ионам в кристаллах LiF и LiF:OH, и появились полосы при 1890 и 2130 см⁻¹ соответственно (рис. 2, c, d). Эти полосы обусловлены межузельным ионом водорода H_i⁻, который стабилизируется гидроксидом, H_i⁻(OH⁻) — так называемый U₁-центр [6–8]. Естественно, что количество этих центров значительно больше в кристаллах LiF:OH, обогащенных гидроксидом. Различие позиций указанных полос связано с различившимися до облучения состояниями примесных ионов [9]. В данном случае это ионы двухвалентного магния и молекулярного гидроксила. В кристаллах LiF:OH преимущественными являются их свободные состояния, т.е. свободные ионы гидроксила и магния в регулярных решеточных окружениях, что в ИК спектрах этих кристаллов обуславливает образование чистого пика OH⁻ при 3730 см⁻¹ (рис. 2, b). Для кристаллов LiF (рис. 2, a) кроме пика OH⁻ наблюдаются также сателлитные пики (3550–3700 см⁻¹), которые связаны с комплексными образованиями Mg²⁺OH. В таких случаях происходит частотный сдвиг полосы пострадиационного U₁-центра в область малых энергий [9],

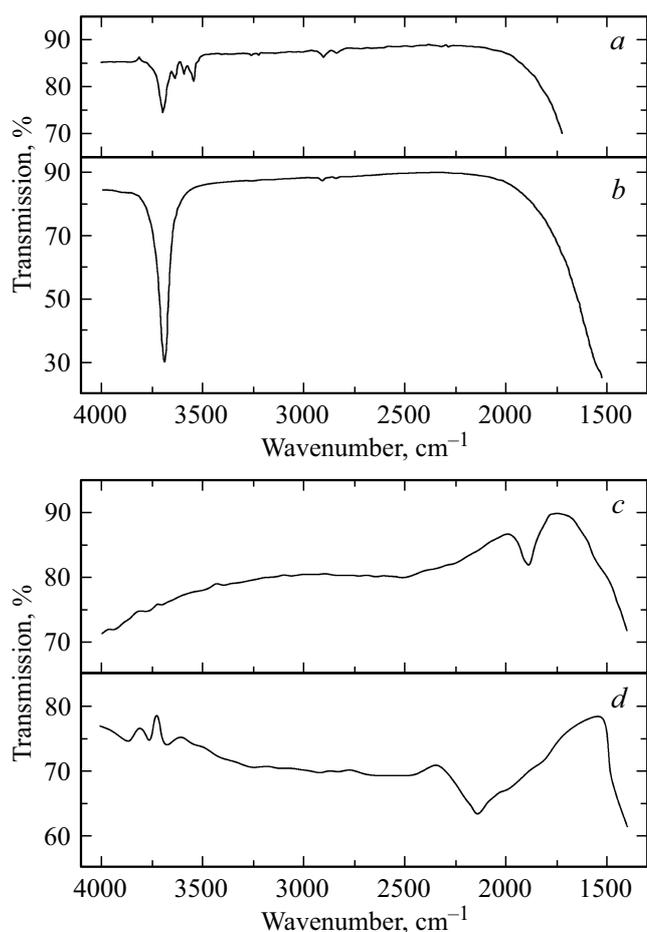


Рис. 2. Спектры пропускания ИК излучения кристаллов LiF (*a, c*) и LiF:OH⁻ (*b, d*) до (*a, b*) и после гамма- и нейтронного облучения (*c, d*).

что, вероятно, связано с ослаблением взаимодействия локального осциллятора с окружением.

Таким образом, две указанные группы кристаллов LiF после облучения в реакторе отличались по количеству продуктов распада гидроксила — водорода и кислорода, представленных в решетке как в „свободном“ состоянии (молекула, атом, ион), так и в различных комплексах (U_1 -центры и др.). Эти дефекты играют важную роль в стимулировании процессов радиационного дефектообразования [8] и в стабилизации термически неустойчивых лазерных центров окраски в щелочно-галогенидных соединениях [3].

Полосы, наблюдаемые в спектрах оптического поглощения этих образцов после облучения (кривые 1 и 2, рис. 3), соответствуют центрам окраски: F (245 nm), F_3 (R_1 — 320 nm и R_2 — 390 nm), F_3^+ и F_2 (410–500 nm), F_4 (N_1 — 520 nm и N_2 — 550 nm). Отметим более высокий уровень поглощения в случае кристаллов LiF:OH с большой концентрацией гидроксила.

Для наглядности часть рассматриваемого спектра (> 350 nm) приведена на рис. 3, *b* в увеличенном масштабе. Видно, что диапазон поглощения так называемого

F_4 -подобного центра 580–650 nm [10] полностью находится в наблюдаемом участке спектра. Это не исключает наличия F_2^+ -центров, диапазон поглощения которых также расположен в указанной спектральной области.

В связи с необходимостью раздельного представления откликов этих центров был использован высокочувствительный метод фотолюминесценции (ФЛ). В спектре ФЛ (рис. 4) выделим два диапазона: 710–825 и 825–925 nm. Первый из них вызван F_4 -подобными центрами [1], интенсивность полос испускания которых с максимумами при 745 nm значительно выше для „чистых“ образцов LiF (кривая 2). Во втором диапазоне наибольший вклад в люминесценцию вносят F_2^+ -центры [3,11]. В этом случае более интенсивное (по сравнению с LiF) испускание у кристаллов LiF:OH (кривая 1) обусловлено более высокой концентрацией F_2^+ -центров в кристаллах, обогащенных ионами OH⁻ [3]. Не исключено также участие центров F_3^- (880–950 nm) [1], хотя в представленных спектрах оптического поглощения их отклики, R_1' (700 nm) и R_2' (800 nm) [10] не проявились, по-видимому, из-за их недостаточного количества.

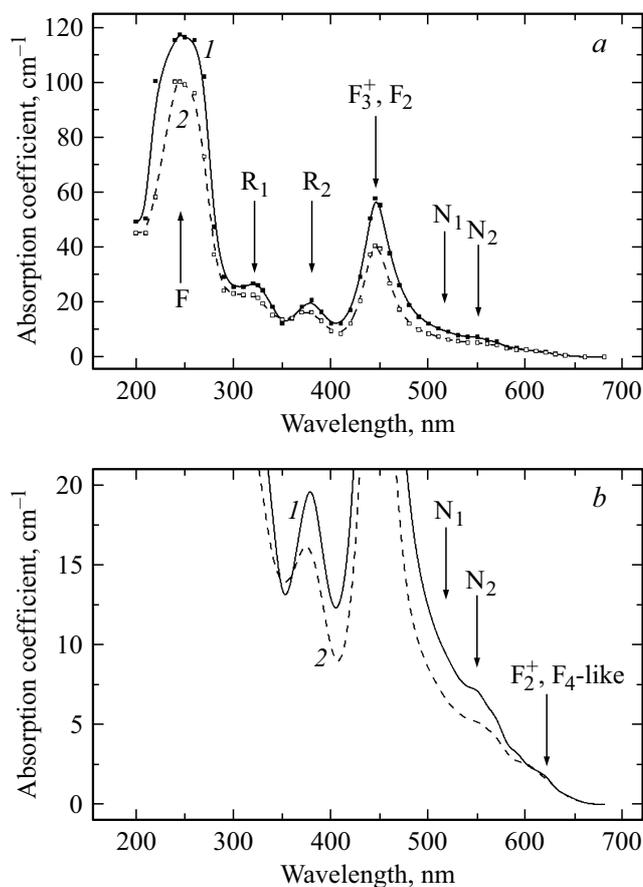


Рис. 3. (*a*) Спектры оптического поглощения облученных (10^{18} н/см²) кристаллов LiF:OH (1) и LiF (2); (*b*) часть спектра (300–700 nm) в увеличенном масштабе.

Воздействие на облученные образцы УФ светом и комбинацией $УФ + \sigma$

После воздействия УФ светом или $УФ + \sigma$ на исследуемые образцы в ИК спектрах (не приводятся) наблюдается разрушение полос поглощения, связанных с U_1 -центрами, образованными в условиях реакторного облучения: для образцов LiF они исчезают полностью, а в ИК спектрах LiF:OH еще оставалось небольшое углубление в интервале $1700\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$. По-видимому, действие УФ света вызывает ионизацию обычно довольно устойчивых U_1 -центров [8], что ведет к их дальнейшей дестабилизации.

Разрушение U_1 -центров влечет за собой разрушение стабилизирующих их ионов гидроксила и возрастание количества независимо существующих в решетке водорода и кислорода, которые даже в самых незначительных количествах существенно влияют на дефектную микроструктуру.

Так, двухвалентные ионы кислорода, растворяясь в решетке щелочно-галогидного кристалла, стимулируют образование избыточного количества анионных вакансий, что, в свою очередь, способствует увеличению концентрации как элементарных, так и агрегатных центров окраски [8]. Эти же ионы, а также известные водородные ловушки участвуют в стабилизации неустойчивых при комнатной температуре лазерных центров и т.д. Ожидается, что эти изменения найдут отражение в результатах ФЛ.

В диапазоне $825\text{--}925\text{ nm}$ для кристаллов LiF и LiF:OH наблюдаются (рис. 5) четко сформированные полосы испускания (с одной и той же позицией максимумов при 870 nm) и значительный рост их интенсивности по сравнению с наблюдавшимися ранее (рис. 4) (особенно для кристаллов LiF:OH).

Анализ (кривые 1–3 и 2–4, рис. 5) показывает одинаковую природу явлений. Изменение микроструктуры облученных в реакторе кристаллов, стимулированное действием УФ излучения (как в чистом, так и комбинированном виде $УФ + \sigma$), существенно отразилось

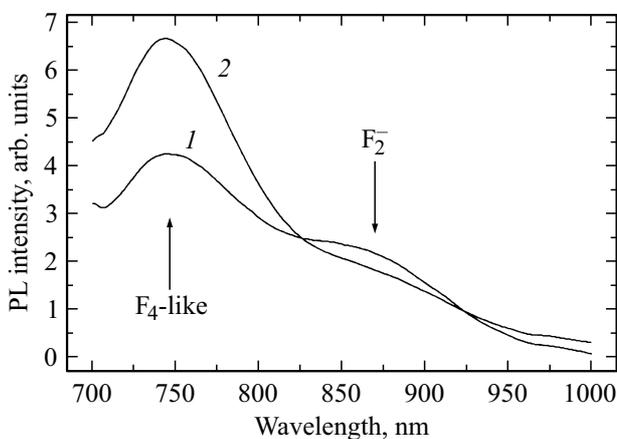


Рис. 4. Спектры ФЛ кристаллов LiF:OH (1) и LiF (2) после облучения в реакторе (10^{18} n/cm^2).

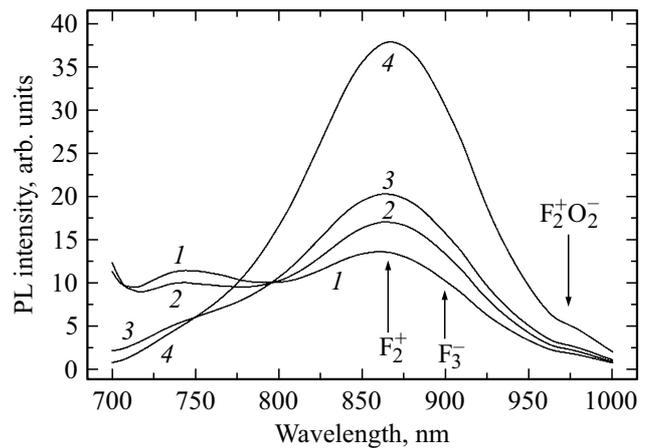


Рис. 5. Спектры ФЛ облученных кристаллов LiF (1, 2) и LiF:OH (3, 4) после воздействия УФ света (1, 3) и $УФ + \sigma$ (2, 4).

лишь на степени интенсивности их люминесценции. Например, у кристаллов LiF:OH интенсивность в максимуме полос почти в два раза выше, чем у „чистых“ кристаллов LiF (кривые 4 и 2 соответственно, рис. 5).

Кроме того, в этих же допированных кристаллах сильнее проявляется слабый пик около 970 nm , который, на наш взгляд, можно отнести к термически относительно стабильным F_2^+ -подобным центрам ($F_2^+O_2^-$) [9,13–15]. Отличие от аналогичных литературных данных (например, 950 nm [11–14] и 910 nm [15]) можно объяснить сильным реакторным облучением исследуемых кристаллов и соответственно более сильным ослаблением их межионных связей.

Такая сильная зависимость эффекта от концентрации ионов гидроксила, а также расположение полос испускания свидетельствуют о том, что и на этот раз основную роль в указанном диапазоне (при данных экспериментальных условиях) играют F_2^+ -центры [3,11–14]. Измерения проводились непосредственно после УФ воздействия и в исследуемых образцах должны были быть как неустойчивые при комнатной температуре F_2^+ -центры, так и относительно устойчивые $F_2^+O_2^-$ и $F_2^+V_c^-$ [3].

Сказанное никак не умаляет роль F_3^- -центров [1] в образовании анализируемых полос ($880\text{--}950\text{ nm}$, рис. 5). Их вклад представляется весьма весомым. Лишь значительный эффект F_2^+ -центров помешал яркому проявлению пика F_3^- -центров, тем более что после комбинированного воздействия ($УФ + \sigma$) эти центры проявились также в спектрах оптического поглощения облученных в реакторе кристаллов LiF (рис. 6, б).

Наблюдается значительный рост поглощения в длинноволновой области ($> 600\text{ nm}$) как после УФ (кривая 2), так и $УФ + \sigma$ воздействий (кривая 3). Вместе с тем наблюдается сдвиг края поглощения от 650 до 700 nm , а затем почти до 800 nm , обусловленный образованием новых F_3^- -центров и ростом их общей концентрации таким, что они уже могут быть обнаружены в спектре оптического поглощения кристаллов LiF [10].

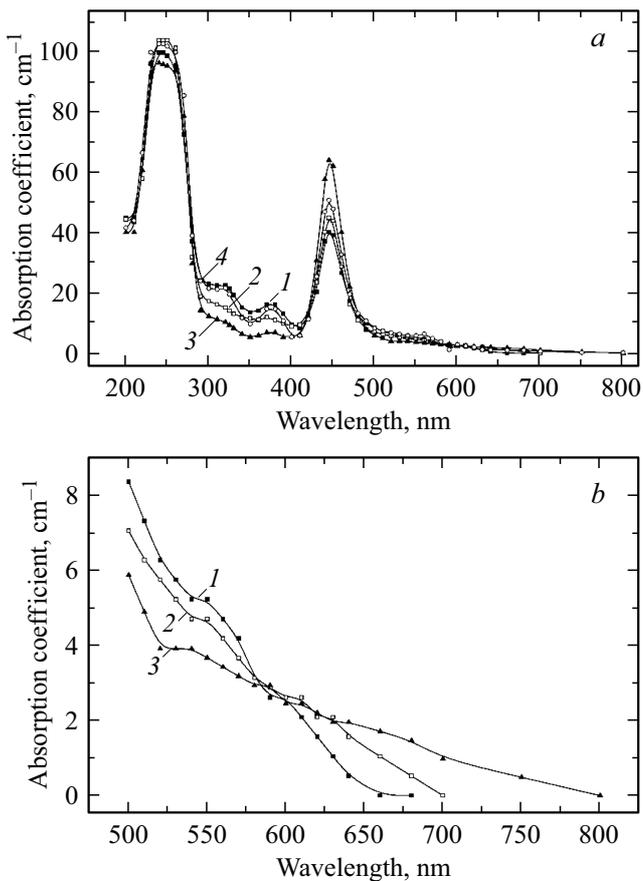


Рис. 6. Спектры оптического поглощения кристаллов LiF в диапазонах 200–800 (a) и 500–800 nm (b) после облучения в реакторе (1) и воздействия УФ светом (2) и УФ + σ (3), а также после хранения в темноте при комнатной температуре (4).

Интенсивное образование центров F_2^+ и F_3^- сопровождается разрушением центров F_3 и F_4 — наблюдается уменьшение поглощения (кривые 2 и 3, рис. 6, b) в области активности центров F_4 (< 600 nm) и почти полное разрушение пиков F_3 -центров (кривые 2 и 3, рис. 6, a), в то время как подобные радикальные изменения для полос F и F_2 не наблюдаются. В спектрах оптического поглощения кристаллов LiF:OH, которые мы не приводим, происходит то же, что и для LiF (рис. 6), но в большем масштабе.

В диапазоне (710–825 nm) после воздействия УФ светом или комбинацией УФ + σ для двух типов исследуемых кристаллов (LiF и LiF:OH) наблюдаются диаметрально противоположные результаты: высокая устойчивость F_4 -подобных центров в „чистых“ кристаллах LiF и последующий рост их концентрации за счет накопления и превращения структурных дефектов (кривые 1 и 2, рис. 5), и полная дестабилизация F_4 -подобных центров в кристаллах LiF:OH, приводящая к резкому разрушению полосы испускания (кривые 3 и 4, рис. 5). Можно сказать, что на всех этапах данного исследования была очевидной „несовместимость“ F_4 -подобных центров с ионами OH^- и продуктами их радиолитического разложения — чем выше

в образце концентрация OH, тем меньше количество F_4 -подобных центров.

Что касается механического напряжения σ в комбинированном воздействии, то по отношению к F_4 -подобным центрам оно, как и продукты распада ионов гидроксила (но с гораздо меньшей эффективностью), играет деструктивную роль. Поэтому кривая 2 на рис. 5, соответствующая чистому LiF после комбинированного воздействия УФ + σ , несколько ниже, чем пик, наблюдаемый после воздействия только УФ излучения (кривая 1, рис. 5). Также можно заметить, что для LiF:OH эффективность разрушения исследуемых центров под влиянием комбинированного воздействия больше, чем при чистом УФ облучении (сравним кривые 3 и 4, рис. 5).

Выдержка исследуемых кристаллов при комнатной температуре в темноте

После двухнедельного хранения исследуемых кристаллов в темноте при комнатной температуре были проведены контрольные измерения ФЛ (рис. 7). Для обеих групп образцов во втором диапазоне (825–925 nm) наблюдается восстановление первичной пострадиационной картины (рис. 4) как результат полного разрушения избыточных центров F_2^+ и F_3^- , которые были образованы УФ или УФ + σ воздействием. Восстановление первичной картины для LiF:OH наблюдается также в первом диапазоне (710–825 nm), т.е. выдержка при комнатной температуре в темноте способствует восстановлению F_4 -подобных центров в этих кристаллах (кривые 1 и 2, рис. 7) и их концентрация достигает исходных значений (кривая 1, рис. 4).

Для „чистых“ кристаллов LiF, в которых F_4 -подобные центры не разрушались, после выдержки наблюдается дальнейший рост интенсивности их люминесценции (710–825 nm) (кривые 3 и 4, рис. 7). При этом прирост интенсивности был больше для тех образцов (кривая 4,

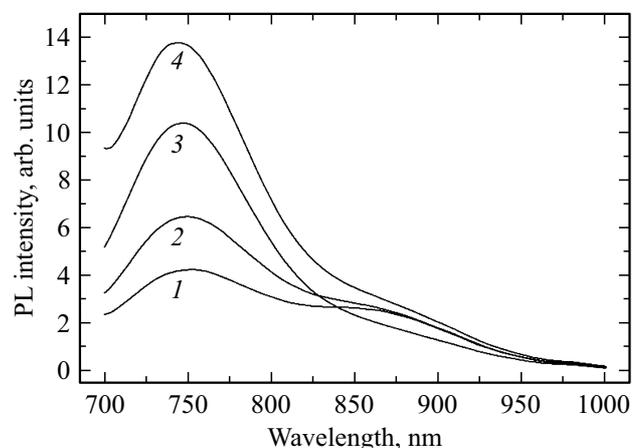


Рис. 7. Спектры ФЛ кристаллов LiF:OH (1, 2) и LiF (3, 4), подвергнутых воздействию УФ светом (1, 3) и УФ + σ (2, 4) и последующему двухнедельному хранению при комнатной температуре в темноте.

рис. 7), в которых комбинированное воздействие УФ + σ создало больше структурных дефектов, чем только УФ в диапазоне 825–925 nm (кривая 2, рис. 5) [11,12]. Таким образом, в результате проведенных воздействий и последующей выдержки в темноте при комнатной температуре в облученных „чистых“ кристаллах LiF количество F₄-подобных центров увеличилось почти в два раза, тогда как в легированных ионами гидроксила кристаллах LiF:OH суммарные изменения за тот же период незначительны.

Восстановительный процесс при выдержке в темноте при комнатной температуре касается всей микроструктуры облученных кристаллов, а не только отдельных центров (восстанавливаются также центры F₃ и F₄, разрушенные при воздействиях). Так, кривая 4 (рис. 6, а) почти полностью совпадает с первоначальным спектром оптического поглощения (кривая 1, рис. 6, а) для кристаллов LiF.

Таким образом, после выдержки в темноте при комнатной температуре на фоне восстановления исходной микроструктуры облученных в реакторе кристаллов обеих групп выделяется значительный рост F₄-подобных центров в „чистых“ кристаллах LiF, тогда как для кристаллов LiF:OH общий исходный баланс между различными центрами сохраняется. Очевидно, в кристаллах LiF:OH при воздействии УФ светом и комбинацией УФ + σ образуется большое количество продуктов радиолиза, которые, с одной стороны, дестабилизируют F₄-подобные центры, приводя к их резкому разрушению, и в то же время способствуют сильному росту F₂⁺-центров. При выдержке в темноте при комнатной температуре из-за интенсивных диффузионных процессов в примесных кристаллах LiF:OH почти полностью восстанавливается исходная микроструктура, т.е. тот набор радиационных структурных дефектов, который был создан в процессе реакторного облучения.

Выводы

1. Спектры ФЛ (700–1000 nm) облученных в ядерном реакторе (10^{18} n/cm²) кристаллов LiF и LiF:OH существенно различаются по интенсивности в различных спектральных диапазонах. В диапазоне 710–825 nm, обусловленном F₄-подобными центрами, преобладает интенсивность испускания „чистых“ образцов, в то время как в диапазоне 825–925 nm интенсивность испускания выше у кристаллов, обогащенных ионами гидроксила, что должно быть результатом люминесценции F₂⁺-центров, как изолированных, так и в комплексах F₂⁺O₂⁻ и F₂⁺V_c⁻, а также F₃⁻-центров.

2. Показан значительный рост концентрации F₄-подобных центров в облученных в реакторе „чистых“ кристаллах LiF после воздействия на них УФ или УФ + σ и последующей выдержке в темноте при комнатной температуре. На основе этого результата можно разработать метод для накопления F₄-подобных центров в предварительно облученных в реакторе кристаллах без сильного изменения их микроструктуры.

3. В кристаллах LiF:OH⁻, обработанных в аналогичных условиях, после интенсивного образования и накопления относительно небольших агрегатных центров окраски (F₂⁺ и F₃⁻) и разрушения относительно крупных агрегатных центров (F₃, F₄ и F₄-подобных) почти полностью восстанавливается при выдержке и сохраняется исходный (пострадиационный) баланс между различными структурными дефектами, чему способствуют продукты распада ионов гидроксила.

4. Продукты распада ионов OH⁻ способствуют дестабилизации и интенсивному разрушению F₄-подобных центров. Деструктивную роль в отношении этих центров играет также приложенное к кристаллу при комбинированном воздействии УФ + σ одноосное механическое напряжение.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V.V. Ter-Mikirtychev, T. Tsuboi. *Can. J. Phys.*, **75**, 813 (1997).
- [2] А.И. Непомнящих, Е.А. Раджабов, А.В. Егранов. *Центры окраски и люминесценция кристаллов LiF*. (Наука, Новосибирск, 1984).
- [3] S.B. Mirov. Lectures 4–5, Color Center Lasers. In: *Laser Physics II PH482/582-TS* (2012).
- [4] Л.И. Брюквина. *ФТТ*, **61** (10), 1852 (2019).
- [5] Giuseppe Baldacchini, Francesca Menchini, Rosa Maria Montecali, Giovanni Messina, Angelo Pace. *Concentration quenching of the emission of F₃⁺ and F₂ color centers in LiF*. (ENEA, Roma, 2000), p. 8.
- [6] З.Г. Ахвледзани, Н.Г. Политов, Б.М. Трахброт. *Письма в ЖЭТФ*, **11** (12) 576 (1970).
- [7] N. Gellerman, F. Lüty, K.P. Koch, G. Litfin. *Phys. Status Sol. (a)*, **57** (1), 411 (1980).
- [8] L.I. Bryukvina, N.A. Ivanov, D.S. Glazunov. In: *AIP Conf. Proc.* (2019). p. 2069.
- [9] З. Ахвледзани, И. Ахвледзани. В сб.: *II Международная конференция „Современные технологии и методы неорганического материаловедения“* (Тбилиси, 2015), с. 267.
- [10] A. Penzkofer, C. Birkmann, T. Tsuboi. *Applied Physics B*, **77** (5), 521 (2003).
- [11] G. Abramishvili, M. Abramishvili, M. Galustashvili, T. Kalabegishvili, V. Kvatchadze, V. Tavkheldze. *J. Luminescence*, **140**, 126 (2013).
- [12] М.Г. Абрамишвили, З.Г. Ахвледзани, Т.Л. Калабегшвили, В.Г. Квачадзе, З.К. Саралидзе. *ФТТ*, **42** (10), 1794 (2000).
- [13] A.Yu. Dergachev, S.B. Mirov. *Opt. Commun.*, **147**, 107 (1998).
- [14] A.G. Vanengen Spivey, V.V. Fedorov, M.M. McKerns, C.M. Lawson, S.B. Mirov. *Opt. Commun.*, **254**, 290 (2005).
- [15] T.T. Basiev, S.B. Mirov, V.V. Osiko. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **24**, 1052 (1988).