

# Релаксационные процессы в окрашенных кристаллах LiF после совместного воздействия УФ излучения и ударной волны

© М.Г. Абрамишвили\*, З.Г. Ахведиани, Т.Л. Калабегшвили, В.Г. Квачадзе\*, З.К. Саралидзе

Институт физики Академии наук Грузии,  
380077 Тбилиси, Грузия

\* Научно-исследовательский институт автоматических систем "Схиви",  
380082 Тбилиси, Грузия

E-mail: tlk@physics.iberiapac.ge

(Поступила в Редакцию 16 февраля 2000 г.)

Исследована релаксация  $F_2^+$ -центров в радиационно-окрашенных кристаллах фторида лития с момента совместного воздействия импульсного УФ излучения и ударной волны. Показано, что кривая отжига указанных центров при комнатной температуре имеет немонотонный характер и является результатом трех процессов — процессов разрушения неустойчивых (короткоживущих) и устойчивых  $F_2^+$ -центров и процесса образования устойчивых центров при случайной встрече соответствующих ингредиентов в процессе их диффузионного блуждания по решетке.

Выполнение данной работы субсидировано грантом 2.15 АН Грузии и дополнительным финансированием от Департамента науки и технологий Грузии.

В кристаллах фторида лития при околокомнатных температурах анионные вакансии, равно как и центры окраски и их комплексы, обладают достаточно высокими подвижностями. Поэтому при хранении радиационно-окрашенных кристаллов при комнатной температуре в темноте в течение длительного времени (месяцы, годы) происходит взаимное превращение центров окраски различного типа. Это в равной степени относится и к заряженным  $F_2^+$ -центрам [1,2]. Эти центры способны двигаться по кристаллу путем последовательных  $60^\circ$ -переориентаций [3], благодаря чему они могут эффективно взаимодействовать с другими центрами окраски и различными структурными дефектами и в итоге либо исчезать (разваливаться), либо входить в более сложные комплексы. Такие процессы с участием подвижных при комнатной температуре дефектов ( $V_a^+$ ,  $V_a^+ : O^{2-}$ ,  $F$ ,  $F_2^+$ ) наблюдались и в наших экспериментах, притом с некоторыми особенностями, которые не обнаруживались ранее. Это убедило нас в том, что исследование релаксационных процессов в длительном промежутке времени представляет определенный интерес. Такие исследования позволяют проверить правильность сложившихся представлений о процессах дефектообразования и генерации центров окраски, в частности, способствовать более четкому представлению механизмов стабилизации лазерных центров ( $F_2^+$ ) при совместном воздействии различных полей, которые были предложены нами в работах [4,5].

Спустя полгода после завершения исследования разрушения стабильных  $F_2^+$ -центров, образовавшихся в радиационно-окрашенных кристаллах после совместного воздействия УФ излучения и ударной волны [5], вновь был снят спектр оптического поглощения на исследуемом кристалле (18-й месяц после воздействия), который показал заметный прирост количества  $F_2^+$ -центров по сравнению с последним измерением (12-й месяц после

воздействия). Этот результат вначале несколько удивил нас, поскольку условия хранения ничем не отличались от предыдущего периода за исключением жаркого лета, которое могло поднять комнатную температуру на  $10\text{--}15^\circ\text{C}$ . Однако сопоставление этого результата с характером поведения других родственных центров окраски показало, что он является следствием происходящего в хранящемся кристалле общего процесса взаимопревращения центров.

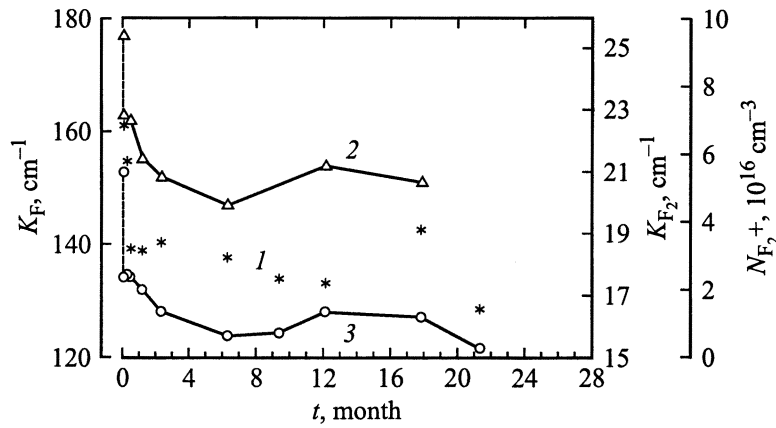
Наблюдение за этим процессом в исследуемом окрашенном кристалле начиная с момента начала совместного воздействия — цель настоящей работы.

## 1. Эксперимент

Исследуемые кристаллы фторида лития были выколоты из монокристаллического блока, который предварительно изотермически отжигался при температуре не менее  $700^\circ\text{C}$  в течение 3 h с последующим медленным охлаждением до комнатной температуры. Полученные образцы ( $10 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}$ ) вновь отжигались в тех же условиях, что и указанные выше, и затем облучались в свободном состоянии в канале реактора ИРТ-М Института физики АН Грузии. Дифференциальный поток тепловых нейтронов, падающих на кристалл, составлял  $(2.5 \pm 0.3) \cdot 10^{12} \text{ n/cm}^2\text{s}$ , интегральная доза —  $2.4 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ . В спектрах оптического поглощения наряду с  $F$ -полосой (250 nm) наблюдалась также интенсивная  $F_2$ -полоса (450 nm).  $F_2^+$ -центры отсутствовали.

В результате воздействия на эти кристаллы жесткого импульсного УФ излучения, сопровождаемого ударной волной,<sup>1</sup> наблюдалось образование  $F_2^+$ -центров

<sup>1</sup> Указанное воздействие проводилось на установке, в которой в качестве источника УФ излучения и ударных волн использовался скользящий разряд на поверхности диэлектрика (модификация "плазменного плато") [6].



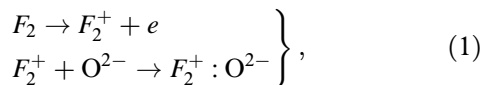
**Рис. 1.** Зависимости концентраций  $F_2^+$ -центров (1) и коэффициентов поглощения в максимумах  $F$ - (2) и  $F_2$ - (3) полос от времени хранения кристалла в темноте при комнатной температуре.

(640–650 nm), термическая устойчивость которых оказалась достаточно высокой. Несмотря на то что половина их количества разрушается за первые полторы недели, концентрация оставшихся центров медленно изменяется в течение двух с лишним лет (см. также [5]).

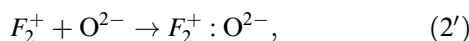
## 2. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены временные зависимости коэффициентов поглощения кристалла в максимумах  $F$ - и  $F_2$ -полос (кривые 2 и 3). Из этого рисунка видно, что вследствие совместного воздействия на радиационно окрашенный кристалл УФ излучения и ударной волны (наряду с созданием стабильных комплексов  $F_2^+ : O^{2-}$  [5]) заметно понижается (обозначено штриховыми линиями) не только интенсивность  $F_2$ -полосы (кривая 3), т.е.  $F_2$ -центров, которые являются основным материалом для образования устойчивых комплексов с  $F_2^+$ -центрами ( $F_2^+ : O^{2-}$ ), но и интенсивность  $F$ -полосы (кривая 2). Из этого же рисунка видно, что понижение коэффициентов поглощения кристалла в максимумах  $F$ - и  $F_2$ -полос продолжается достаточно долго после прекращения воздействия. Следует отметить, что, хотя количество исчезающих за единицу времени  $F$ -центров почти на порядок превосходит то же для  $F_2$ -центров, относительные скорости их исчезновения почти одинаковы и составляют примерно 1.2–1.4% в месяц.

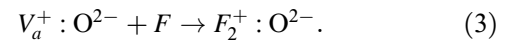
Для образования комплексов  $F_2^+ : O^{2-}$ , в которых  $F_2^+$ -центры стабилизированы  $O^{2-}$ -ионами, кроме реакций



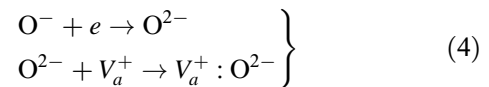
возможны реакции с участием как  $F$ -центров и  $O^{2-}$ -ионов



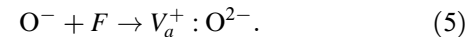
так и  $F$ -центров и комплексов  $V_a^+ : O^{2-}$



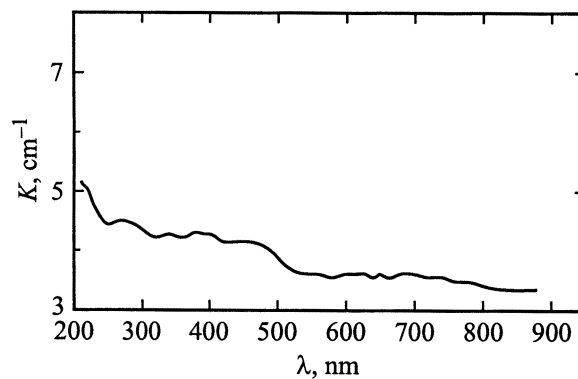
Для осуществления последней реакции необходимо наличие в кристалле дипольных  $V_a^+ : O^{2-}$ -центров, которые могут образоваться по реакциям с участием вакансий



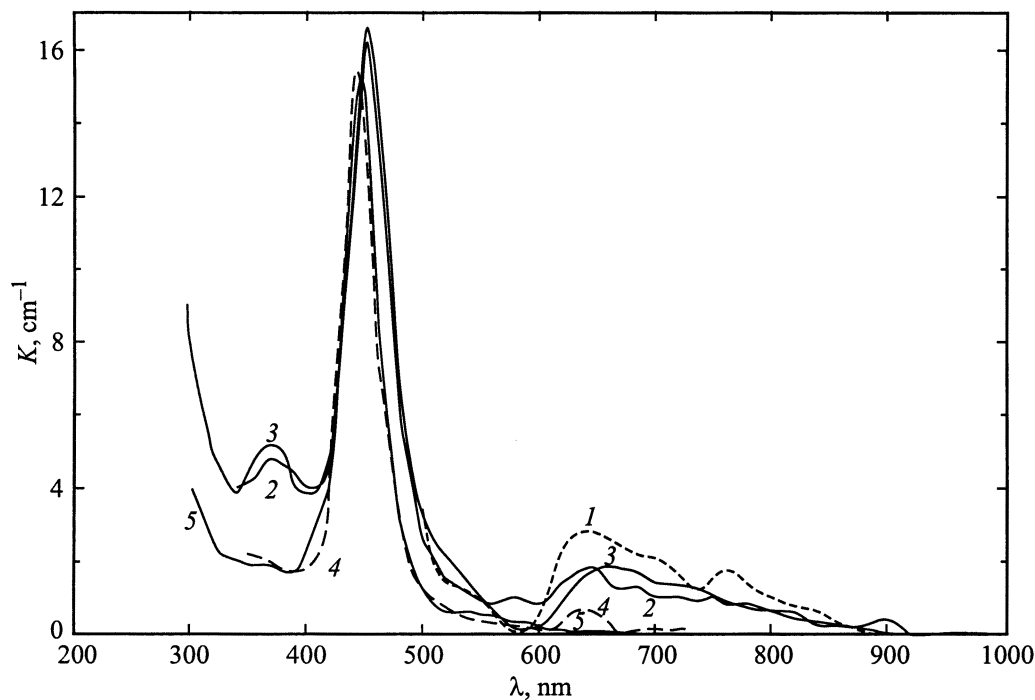
или с участием  $F$ -центров



В исходных кристаллах LiF (до предварительного облучения) в УФ области спектра оптического поглощения было выявлено сплошное поглощение (200–500 nm), свидетельствующее о наличии небольшого количества  $V_a^+ : O^{2-}$  диполей (рис. 2): ниже 250 nm заметно увеличивается поглощение, начинает выявляться полоса, максимум которой должен быть ниже 200 nm (известно, что максимумы полос поглощения, присущих этим дипольным центрам, должны находиться около



**Рис. 2.** Спектр оптического поглощения исходного (неокрашенного) кристалла LiF.



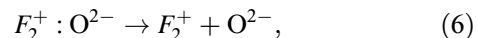
**Рис. 3.** Спектр оптического поглощения исследуемого окрашенного кристалла LiF после воздействия УФ излучением и ударной волной (1) и хранения в темноте при комнатной температуре в течение 12 (2), 18 (3), 21 (4), 27 (5) месяцев.

113 и 190 nm [1]). Основная часть этих кислородно-вакансионных дипольных центров и их скопления, очевидно, образуются в процессе выращивания кристалла на воздухе, хотя не исключено, что процесс продолжается при комнатной температуре и в обычных условиях, но слишком медленно.

В процессе облучения, а также совместного воздействия УФ излучением и ударной волной количество диполей увеличивается значительно. Однако определение количества этих дипольных центров с помощью измерения поглощения или эмиссии, к сожалению, затруднено, так как в УФ части спектра после радиационного окрашивания доминирует интенсивная  $F$ -полоса. Что касается подвижности этих комплексов, то они так же подвижны при комнатной температуре, как и анионные вакансии: согласно [1], энергии активации миграции диполей  $V_a^+ : O^{2-}$  и анионных вакансий соответственно равны  $1.3 \pm 0.2$  и  $1.0 \pm 0.2$  eV.

В работе [5] на основе результатов первого года наблюдения релаксационных процессов было предположено, что разрушение  $F_2^+$ -центров в хранящемся в темноте при комнатной температуре кристалле носит двухстадийный характер, что было объяснено наличием  $F_2^+$ -центров двух типов. Первый — это малостабильные  $F_2^+$ -центры (имелись в виду изолированные  $F_2^+$ -центры), которые разрушаются в основном в течение полутора–двух недель после совместного воздействия на кристалл УФ излучением и ударной волной; второй тип — это стабилизированные конфигурации комплексов с  $F_2^+$ -центрами (по всей вероятности, это — комплексы

$F_2^+ : O^{2-}$  [5]), которые сохраняются в кристалле в течение более чем одного года. Эти  $F_2^+$ -центры, стабилизированные в указанных комплексах, разрушаются в два этапа. Первый — медленное разрушение долгоживущих комплексов  $F_2^+ : O^{2-}$  согласно реакции



а второй этап — быстрое разрушение образовавшихся короткоживущих одиночных  $F_2^+$ -центров.  $F_2^+$ -центры могут разрушаться как за счет деионизации ( $F_2^+ + e \rightarrow F_2$ ), так и за счет реакции  $F_2^+ \rightarrow F + V_a^+$ . Эти реакции являются источниками  $F$ - и  $F_2$ -центров. Тем не менее в процессе выдержки кристаллов количество этих центров за первые восемь месяцев уменьшается (кривые 2 и 3 на рис. 1), что может быть объяснено тем, что эти центры расходятся на образование более сложных центров окраски (например,  $F_2^+ + F \rightarrow F_3^+$  и т.д.). Такая тенденция действительно прослеживается (например, рост поглощения при 500–550 nm на кривой 2 рис. 3), что должно быть обусловлено  $F_4$ -центрами окраски.

Согласно приведенным представлениям, кривая разрушения  $F_2^+$ -центров должна быть суммой двух экспонент с соответствующими характерными временами. Однако на второй стадии кривая разрушения падает намного медленнее, чем это могло быть обусловлено экспонентой. Кроме того, как уже было отмечено в начале статьи, измерение спектра оптического поглощения исследуемого кристалла спустя полгода после окончания исследований [5] обнаружило заметный прирост количества  $F_2^+$ -центров по сравнению с последним измерением

(кривые 3 и 2 соответственно на рис. 3). Эти факты свидетельствуют о том, что в хранящемся кристалле происходят интенсивные диффузионные процессы, которые наряду с другими явлениями (увеличение количества  $F_3^-$  (682, 790 nm) и  $F_3^-$  (375 nm) центров, уменьшение поглощения при 500–550 nm и т.д.) приводят к восстановлению (образованию) стабилизирующих  $F_2^+$ -центры комплексов  $F_2^+ : O^{2-}$ .

Из сказанного выше следует, что кривая отжига  $F_2^+$ -центров при комнатной температуре должна быть результатом трех процессов — процессов разрушения неустойчивых (короткоживущих) и устойчивых (стабилизированных в комплексах  $F_2^+ : O^{2-}$ )  $F_2^+$ -центров и процесса образования устойчивых центров при случайной встрече соответствующих ингредиентов в процессе диффузионного блуждания, например, по реакции (3). Однако, чтобы объяснить немонотонный характер временной зависимости количества  $F_2^+$ -центров (увеличение количества центров в определенном временном интервале на фоне общего уменьшения), следует сделать несколько предположений.

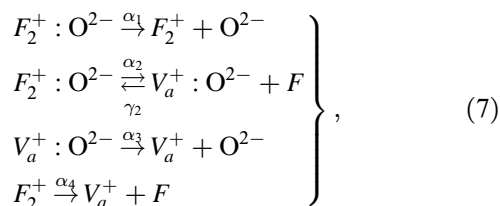
1) Образование анизотропных комплексов ( $F_2^+$ ,  $F_2^+ : O^{2-}$ ,  $V_a^+ : O^{2-}$ ) с участием кислородных ионов (реакции типа (1) и (4)) или из изотропных дефектов (реакции типа (2)) в обычных условиях выдержки кристаллов сильно затруднено (слишком велика энергия образования). Такие реакции могут протекать интенсивно только при наличии ориентированных полей [5]. В нашем случае указанные анизотропные комплексы могли образоваться исключительно в процессе воздействия на кристалл электрического поля или ударной волны одновременно с УФ излучением и накопиться в кристалле к моменту прекращения воздействия в достаточном количестве.

2) Образование анизотропных комплексов по реакциям с участием анизотропных же дефектов (например, реакции типа (3)) может протекать с достаточной вероятностью.

3) Центры (комплексы), участвующие в реакциях слияния, обладают достаточно высокой подвижностью.

4) Возможен также распад анизотропных комплексов на составные части со временем полураспада, зависящим от типа комплекса.

В рамках приведенных выше предположений можно считать, что в кристаллах, подверженных совместно воздействию УФ излучения и ударной волны или электрического поля, после прекращения воздействия протекают следующие реакции:



где  $\alpha$  и  $\gamma$  — скорости прямых (распад) и обратных (соединение) реакций. В соответствии с первым пред-

положением  $\gamma = \gamma_3 = \gamma_4 \equiv 0$ . Обозначив концентрацию стабилизированных  $F_2^+$ -центром ( $F_2^+ : O^{2-}$ -комплексов) через  $N$ , комплексов  $V_a^+ : O^{2-}$  — через  $n$ , нестабильных  $F_2^+$ -центров — через  $N'$ , а  $F$ -центров — через  $n_F$ , для описания процессов, задаваемых реакциями (7), можно написать следующую замкнутую систему уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{N} = -(\alpha_1 + \alpha_2)N + \gamma_2 n n_F \\ \dot{n} = -\alpha_3 n + \alpha_2 N - \gamma_2 n n_F \\ \dot{N}' = \alpha_1 N - \alpha_4 N' \\ \dot{n}_F = \alpha_2 N + \alpha_4 N' - \gamma_2 n n_F \end{array} \right\}, \quad (8)$$

в которых начальные значения концентраций  $N(0) = N_0$ ,  $n(0) = n_0$ ,  $N'(0) = N'_0$  и  $n_F(0) = n_F^0$  определяются комбинированным воздействием и предполагаются известными,

Полагая, что нестабильные  $F_2^+$ -центры ( $F_2^+$ -центры, не захваченные в комплексы) являются "короткоживущими" по сравнению со стабилизированными комплексами  $F_2^+ : O^{2-}$  и  $V_a^+ : O^{2-}$ , можно считать, что для  $F_2^+$ -центров квазистационарное состояние устанавливается быстро ( $\alpha_4 \gg \alpha_{1,2,3}, \gamma_2 n_F^0$ ) и квазистационарная концентрация  $N'$  может быть определена из условия  $\dot{N}' = 0$ , т.е.  $\alpha_4 N' \equiv \alpha_1 N$ . Используя это условие, можно убедиться, что  $\dot{N} = -\dot{n}_F$ . Такая корреляция между временными зависимостями концентрации  $F_2^+ : O^{2-}$ -комплексов и  $F$ -центров качественно действительно наблюдается на рис. 1. Последнее условие позволяет выразить  $n_F$  через  $N$ ,  $n_F(t) = N_0 + n_F^0 - N(t)$  и для концентраций  $N(t)$  и  $n(t)$  получить следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{N} = -(\alpha_1 + \alpha_2)N + \gamma_2 n(N_0 + n_F^0 - N) \\ \dot{n} = -\alpha_3 n + \alpha_2 N - \gamma_2 n(N_0 + n_F^0 - N) \end{array} \right\}. \quad (9)$$

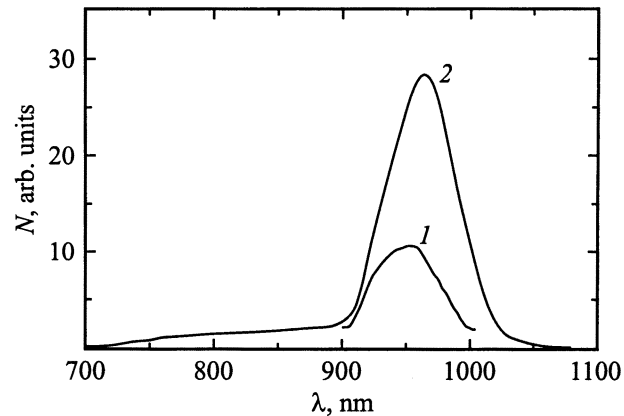
К сожалению, из-за нелинейности решить эту систему уравнений аналитически не удастся. Численное решение этой системы с использованием компьютерных математических программ на составляет труда. Однако такое решение не представляет практического интереса, поскольку неизвестны точные значения параметров уравнений (коэффициентов  $\alpha$  и  $\gamma$ ) и начальных концентраций центров. Поэтому ограничимся только качественным анализом.

Нетрудно убедиться, что у системы (9) есть решение, которое асимптотически стремится к нулю, в то время как начальное значение  $\dot{N}(t=0)$  в зависимости от значений параметров, входящих в уравнение, может быть как отрицательным, так и положительным ( $\gamma_2 n_0 n_F^0 \geq (\alpha_1 + \alpha_2)N_0$ ). Следовательно, для концентрации стабилизированных  $F_2^+$ -центров, т.е. комплексов  $F_2^+ : O^{2-}$ , можно получить немонотонную зависимость  $N(t)$  с начальным ростом, выходом на максимальное значение и с асимптотическим уменьшением с выходом на нулевое значение. При этом характерное время таких процессов несравненно больше, чем время жизни нестабильных  $F_2^+$ -центров.

Из сказанного выше следует, что временная зависимость полной концентрации  $F_2^+$ -центров (стабилизированных и нестабильных) может иметь быстроспадающую область, описывающую в основном исчезновение нестабильных центров, затем область слабой зависимости, подобную плато с постепенным увеличением при больших временах, а затем вновь область уменьшения концентрации, с постепенным спадом до нуля. Эта зависимость качественно совпадает с той, которая наблюдалась нами и полностью изображена на рис. 1 (кривая, приведенная на рис. 6 в [5], включающая результаты наблюдения первых 12 месяцев, является частью этой полной кривой).

Немонотонный характер релаксации, очевидно, не является исключительным свойством стабилизированных  $F_2^+$ -центров окраски в кристаллах, подвергшихся совместному воздействию жесткого УФ излучения и ударной волны. Немонотонность, безусловно, должна была проявиться и в релаксационных процессах по крайней мере тех центров окраски, которые участвуют в создании указанных заряженных центров или же являются продуктами их распада. Действительно, коэффициенты поглощения в максимумах  $F$ - и  $F_2$ -полос также проявляют сложную, немонотонную зависимость от времени хранения кристалла при комнатной температуре. Медленное и постепенное разрушение  $F_2^+$ -центров окраски (кривая 1 на рис. 1) привело к началу второго года хранения к накоплению (частичному восстановлению) как  $F$ -, так и  $F_2$ -центров окраски (кривые 2 и 3 соответственно). При этом наряду с  $F_2^+$ -центрами к этому моменту понижаются количества  $F_3^-$  и  $F_3^+$ -центров. Кривые 2 и 3 проходят через максимумы и в дальнейшем начинают понижаться как раз в том интервале времени, где наблюдается рост количества  $F_2^+$ -центров. Корреляция кривой 1 с кривыми 2 и 3 убедительно свидетельствует о реализации тех реакций в исследуемых кристаллах, которые легли в основу теоретического анализа.

Процессы накопления  $F_2^+ : O^{2-}$ -комплексов при долгом хранении окрашенных кристаллов LiF при комнатной температуре наблюдались также в работах [1,2]. В [1] за восемь месяцев количество указанных комплексов увеличилось в 1.5 раза. Процесс создания  $F_2^+ : O^{2-}$ -комплексов в [2] также не заканчивается за несколько часов — медленное нарастание их полосы поглощения наблюдается еще в течение ряда месяцев. Так, за восемь месяцев хранения окрашенного кристалла при комнатной температуре величина поглощения  $F_2^+ : O^{2-}$ -комплексов увеличивается почти в 2 раза. Однако особо следует подчеркнуть, что в этих кристаллах концентрации кислородосодержащих примесей и, следовательно, ионов  $O^{2-}$  были более чем на порядок больше, нежели в тех, которые исследовались нами при совместном воздействии УФ излучения и ударной волны после окрашивания. Поэтому, возможно, в случаях [1,2] обратные реакции с образованием кислородосодержащих комплексов идут с заметной скоростью за счет больших значений концентраций  $O^{2-}$ -ионов. В нашем же случае, согласно работам [4,5], эти реакции при наличии одноосного внешнего поля могут эффективно идти даже



**Рис. 4.** Спектры люминесценции устойчивых (1) и неустойчивых (2)  $F_2^+$ -центров. Последнее было измерено спустя час после воздействия УФ излучения на окрашенный кристалл.

при малых концентрациях  $O^{2-}$ -ионов (в определенных направлениях энергетический барьер понижается, что приводит к эффективному увеличению коэффициентов  $\gamma_1$  и  $\gamma_3$ ). В работах [1,2] также наблюдается одновременная релаксация и других центров окраски: снижается величина поглощения  $F$ - и  $F_2$ -центров, растет поглощение с  $\lambda_m = 390$  nm и т.д. Полосы поглощения  $F_2^+ : O^{2-}$ -центров в [2] по отношению к термически неустойчивым  $F_2^+$ -центрам (640 nm) сдвинуты в коротковолновую сторону и имеют  $\lambda_m = 620$  nm. В отличие от этого в спектре оптического поглощения исследуемых нами кристаллов наблюдается небольшое ( $\sim 15$  nm), но четко выраженное смещение  $F_2^+ : O^{2-}$ -полосы в сторону длинных волн (ср. кривые 2 и 3 на рис. 3).

Данная работа заканчивает один этап наших исследований механизмов стабилизации лазерных  $F_2^+$ -центров в кристаллах фторида лития, подвергшихся совместному воздействию различных полей. Следующим этапом представляется изучение их генерационных свойств, первый результат которого приведен на рис. 4. Это — спектр люминесценции окрашенного кристалла LiF, измеренный на 21 месяце после совместного воздействия УФ излучения и ударной волны с целью определения основных характеристик активного центра, а именно определения положения полосы излучения (эмиссии), ее полуширины и т.д. На рисунке видна полоса эмиссии стабильных (устойчивых)  $F_2^+$ -центров с максимумом при 950 nm и спектральной шириной 65 nm. Для сравнения на том же рисунке приводится спектр люминесценции (с максимумом при 965 nm и той же полушириной) нестабилизированных  $F_2^+$ -центров (кривая 2), наблюдавшийся на контрольном образце спустя один час после воздействия на него только УФ излучением в течение 15 минут (ДРШ-250). После измерения люминесценции имеет место заметное уменьшение  $F_2^+$ -полосы и исчезновение пиков  $F_3^-$ -центров, а также сужение  $F_2$ -полосы и смещение ее максимума в коротковолновую область спектра (кривая 4 на рис. 3). Последнее, по-видимому, является

результатом разрушения  $F_3^+$ -центров, полоса которых сильно перекрывается с  $F_2$ -полосой. Установлено также разрушение незаряженных  $F_3$ -центров (370 nm). Обнаруженное в спектре оптического поглощения исследуемого кристалла заметное уменьшение  $F_2^+$ -полосы и исчезновение пиков  $F_3^-$ -центров окраски после измерения спектров люминесценции может быть вызвано [7] передачей энергии от возбужденного  $F_2^+$ -центра к  $F_3^-$ -центру в процессе возбуждения. Возбужденные  $F_3^-$ -центры могут ионизоваться, а образованные свободные электроны — нейтрализовать  $F_2^+$ -центры.

Авторы признательны С.В. Соболевской за помощь в оформлении статьи.

## Список литературы

- [1] L.C. Courrol, L. Gomes, I.M. Ranieri. Phys. Rev. **B42**, 7, 4741 (1990).
- [2] Б.Д. Лобанов, Н.Т. Максимова, Е.Д. Исянова, В.Н. Ломасов, А.М. Проворов, П.Н. Цирульник. Оптика и спектроскопия **63**, 1, 816 (19987).
- [3] В.И. Барышников, В.А. Григоров, Б.Д. Лобанов, Е.Ф. Мартынович, Э.Э. Пензина, В.М. Хулугуров, И.А. Чепурной. Изв. АН СССР. Сер. физ. **54**, 8, 1467 (1990).
- [4] М.Г. Абрамишвили, В.Г. Квачадзе, З.К. Саралидзе. ФТТ **29**, 1, 39 (1987).
- [5] М.Г. Абрамишвили, З.Г. Ахвледиани, Т.Л. Калабегшвили, В.Г. Квачадзе, З.К. Саралидзе. ФТТ **40**, 11, 2044 (1998).
- [6] М.Г. Абрамишвили, З.Г. Ахвледиани, Э.М. Бархударов, Т.Л. Калабегшвили, В.Г. Квачадзе, М.И. Тактакишвили. ФТТ **37**, 8, 2526 (1995).
- [7] Ю.Л. Гусев, С.П. Маренников, В.П. Чеботарев. Изв. АН СССР. Сер. физ. **44**, 10, 2018 (1980).