

ТРАНСФОРМАЦИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В ОБЛУЧЕННЫХ КРИСТАЛЛАХ ФТОРИДА ЛИТИЯ ПОСЛЕ ИХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ

А. П. Войтович*, В. С. Калинов, В. В. Машко,
А. Н. Новиков, Л. П. Рунец, А. П. Ступак

УДК 535.37+538.91

Институт физики НАН Беларуси,
220072, Минск, просп. Независимости, 68-2, Беларусь; e-mail: a.voitovich@ifanbel.bas-net.by

(Поступила 6 декабря 2018)

Показано, что в нанокристаллах, изготовленных механической фрагментацией облученных кристаллов LiF, происходят изменения концентраций обычных и формирование прикластерных радиационных дефектов (центров окраски). Концентрации прикластерных центров после фрагментации увеличиваются до стационарного значения и при комнатной температуре остаются постоянными в течение длительного времени. Установлено, что воздействие УФ излучения на изготовленные нанокристаллы после завершения в них процессов формирования центров значительно увеличивает концентрацию прикластерных дефектов, содержащих три анионные вакансии и два электрона. Продемонстрировано, что в необлученных нанокристаллах, изготовленных фрагментацией необлученных кристаллов, присутствуют одновакантные центры окраски, а также обычные и прикластерные агрегатные центры.

Ключевые слова: нанокристаллы фторида лития, нанокластеры, радиационные точечные дефекты, трансформация дефектов, фотолюминесценция.

It is shown that changes in the concentrations of usual radiation defects and formation of near-cluster radiation defects (color centers) occur in nanocrystals fabricated by mechanical fragmentation of irradiated LiF crystals. Concentrations of near-cluster color centers increase to a stationary value after fragmentation and remain constant at room temperature for a long time. It has been established that influence of UV radiation on fabricated nanocrystals after termination of center formation processes in them significantly increases the concentration of near-cluster defects containing three anion vacancies and two electrons. It is demonstrated that there are single-vacant color centers as well as usual and near-cluster aggregate color centers in unirradiated nanocrystals fabricated by fragmentation of unirradiated crystals.

Keywords: lithium fluoride nanocrystals, nanoclusters, radiation point defects, defects transformation, and photoluminescence.

Введение. Формирование и характеристики радиационно индуцируемых точечных дефектов (центров окраски (ЦО)) в кристаллах хорошо изучены [1—3]. Кристаллы, в которых создаются такие дефекты, широко используются, например, для детектирования и дозиметрии ионизирующей радиации, в электронике [3—6]. Представляется интересным изучение возможностей применения наноразмерных кристаллов с ЦО в качестве люминесцентных биологических сенсоров [7, 8]. Области и эффективность применений рассматриваемых материалов зависят от свойств и матрицы, и формируемых в ней дефектов.

TRANSFORMATION AND FORMATION OF RADIATION-INDUCED POINT DEFECTS IN IRRADIATED LITHIUM FLUORIDE CRYSTALS AFTER THEIR MECHANICAL FRAGMENTATION

A. P. Voitovich*, V. S. Kalinov, V. V. Mashko, A. N. Novikov, L. P. Runets, A. P. Stupak (B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 68-2 Nezavisimosti Prosp., Minsk, 220072, Belarus; e-mail: a.voitovich@ifanbel.bas-net.by)

В работах [9—11] продемонстрировано, что в кристаллах фторида лития (LiF) возможно создание собственных радиационных ЦО с оптическими свойствами и характеристиками электрон-фононного взаимодействия, существенно отличающимися от наблюдавшихся ранее для обычных, давно известных радиационных дефектов того же состава. Установлено, что дефекты с новыми свойствами формируются при наличии в кристаллах наноразмерных кластеров [12]. В областях, где присутствуют нанокластеры, изменяется кристаллическое поле, что приводит к трансформации характеристик расположенных там дефектов. Поэтому далее называем такие дефекты прикластерными радиационными дефектами, или прикластерными центрами окраски (КЦО). С использованием методики, развитой для кристаллов LiF, КЦО созданы и изучены также во фторидах натрия и магния [13]. Обсужденный в [13] механизм образования кластеров пригоден для ионных кристаллов, например, для галогенидов и оксидов. Таким образом, формирование КЦО возможно в большом количестве кристаллов. Это обстоятельство повышает вероятность использования и мотивацию исследования кристаллов с такими дефектами.

До сих пор в большинстве экспериментов с КЦО исследовались образцы, состоящие из частиц субмикронных размеров (хотя бы в одном из измерений). Частицы получались при механической фрагментации кристаллических пластинок [9—13]. Далее называем их нанокристаллами (НК). В них в результате фрагментации создавались нанокластеры [12]. НК облучались γ -лучами, электронами или протонами. В облученных образцах изучались процессы формирования и характеристики КЦО.

В данной работе используется и изучается другой метод создания собственных точечных КЦО. Кристаллические пластинки LiF, облученные γ -лучами или электронами и содержащие радиационные дефекты и ЦО с обычными, давно известными характеристиками [1—3], размалываются, и в результате создаются НК. Исследуются изменения концентраций существовавших ЦО и возникающих КЦО, происходящие в НК после их изготовления, а также оптические характеристики НК после завершения процессов трансформации дефектов. Полученные результаты сравниваются с данными для НК, изготовленных при фрагментации необлученных кристаллических пластинок. Делаются выводы о процессах формирования КЦО.

Объекты и методы исследований. Из номинально чистого монокристалла LiF вырезались пластинки размерами $(0.7—1.5) \times (5—7) \times (7—10)$ мм. Пластины облучались γ -лучами от источника ^{60}Co или при комнатной температуре различными дозами, или при температуре жидкого азота дозой $\sim 5 \cdot 10^4$ Гр. При реализации второго варианта температура облучения $T_{\text{обл}} = 77 \text{ K} < T_v$, где T_v — температура подвижности анионных вакансий v_a (далее — вакансии), и во время облучения вакансии в отличие от первого варианта не диффундируют по кристаллу. Некоторые пластинки облучались электронами с энергией 4 МэВ флюенсом 10^{13} электрон/см² при комнатной температуре. Электронный пучок, получаемый от линейного ускорителя электронов “Электроника ЭЛУ-4”, воздействовал на образцы в течение нескольких секунд. При этом в период облучения создаваемые вакансии не имели возможности продиффундировать по образцу на расстояние, достаточное для встречи с партнерами по реакциям. Подвижность вакансий во время воздействия на образцы γ -лучами при комнатной температуре приводила к увеличенному отношению концентраций создаваемых ЦО типа F_2 и F_3^+ по сравнению с отношением, получаемым при двух других вариантах облучения: электронами при комнатной температуре или γ -квантами при температуре жидкого азота. (Здесь и ниже для ЦО используются обозначения F_n, F_n^+, F_n^- , где n — число вакансий v_a , входящих в дефект; верхний символ “+” или “-” (отсутствие символа) — недостаток или избыток (равенство) электронов в дефекте по сравнению с числом вакансий. КЦО обозначаются добавлением индекса K перед числом вакансий.)

Для облученных пластинок, в которых полностью завершились процессы агрегации дефектов, измеряли спектры поглощения, фотолюминесценции (ФЛ) и возбуждения фотолюминесценции (ВФЛ). Затем пластинки фрагментировались в шаровой мельнице (Vibrator GM 9458, Германия) в течение 30 с. В результате фрагментации создавались НК. Исследовалась кинетика концентраций ЦО и КЦО в НК после их изготовления. Для этого использовались люминесцентные методы. Они позволяют идентифицировать центры по их спектрам ФЛ и ВФЛ и обладают высокой чувствительностью. Отслеживались изменения во времени интенсивностей $I(t)$ люминесценции, которые в наших условиях пропорциональны концентрации центров свечения. Некоторые из образцов подвергались воздействию УФ излучения. После окончания процессов трансформации центров в созданных НК измерялись стационарные спектры ФЛ и ВФЛ.

Необлученная кристаллическая пластинка также была размолота в мельнице. Прессование полученных НК при давлении $\sim 4 \cdot 10^9$ Па позволило изготовить таблетку, прозрачность которой обеспе-

чивала возможность записи спектра поглощения. Спектры поглощения и люминесценции измерялись спустя сутки после изготовления таблетки, что является достаточным временем для завершения формирования агрегатных дефектов.

Спектры люминесценции и поглощения регистрировались при комнатной температуре на спектрофлуориметре SM-2203 (SOLAR, Беларусь) и на спектрофотометре Cary 500 Scan (Varian, США).

Результаты и их обсуждение. Во всех облученных кристаллических пластинках после завершения процессов агрегации зарегистрировано наличие следующих типов радиационных дефектов: F_1 , F_2 , F_3^+ , F_3 (R_2). Все они обладают обычными, давно известными абсорбционными и люминесцентными характеристиками [2, 11]. КЦО в пластинках не обнаружены. В НК, полученных в результате фрагментации облученных пластинок, наблюдаются трансформации дефектов. Качественно процессы трансформации проходят подобным образом при использовании пластинок, облученных по каждому из трех описанных вариантов.

На рис. 1, *a* представлены спектры ВФЛ, измеренные при $\lambda_{\text{пер}} = 670$ нм для облученной пластинки и изготовленных из нее НК. В спектре 1 наблюдается только одна полоса с максимумом при 443 нм. Она принадлежит F_2 ЦО [11]. В спектрах 2—5 появляются еще три полосы с максимумами при 395, 495 и 565 нм, что указывает на формирование КЦО F_{K3}^+ в НК [10, 11]. Интенсивность ФЛ (концентрация N_2) центров F_{K3}^+ растет в последовательности 2—5 с увеличением времени, прошедшего с момента размола пластинки, а концентрация N_1 центров F_2 уменьшается в этой же последовательности. Как видно на рис. 1, *a* (вставка), спектры НК, измеренные при различных временах после размола, пересекаются на одной длине волны ($\lambda = 457$ нм), т. е. наблюдается изоэмиссионная точка.

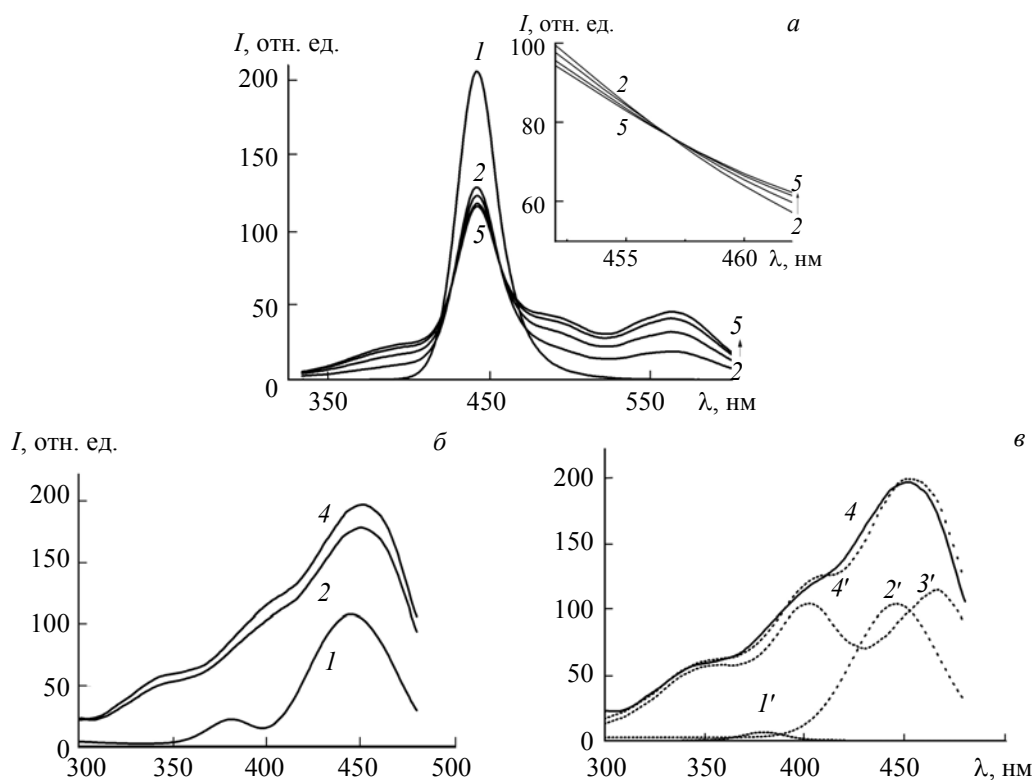


Рис. 1. Спектры ВФЛ при $\lambda_{\text{пер}} = 670$ (*a*) и 530 нм (*б*) для γ -облученной кристаллической пластинки (*1*) и для НК спустя 3 (*2*), 17 (*3*), 43 (*4*) и 63 мин (*5*) после их изготовления путем фрагментации пластинки; на вставке — спектры 2—5 вблизи изоэмиссионной точки; *v* — разложение спектра 4 на спектры ВФЛ для центров F_3 (R_2) (I'), F_3^+ ($2'$) и F_{K3} ($3'$), $4'$ — сумма спектров I' , $2'$ и $3'$

Наличие такой точки свидетельствует о том, что в любой момент времени в интервале 3—63 мин после изготовления НК соблюдается условие [13]:

$$m_1 N_1 + m_2 N_2 = \text{const}, \tag{1}$$

где m_1, m_2 — целые числа. Из равенства (1) также следует

$$m_1 \Delta N_1 = m_2 \Delta N_2, \quad (2)$$

где ΔN_1 (ΔN_2) — уменьшение (увеличение) концентрации центров F_2 (F_{K3}^+) в любой промежуток времени Δt из указанного диапазона. Следовательно, изменения ΔN_1 и ΔN_2 (а также N_1 и N_2) должны описываться одинаковыми временными зависимостями (например, экспонентами) с одной и той же временной константой.

Принимая во внимание наличие изоэмиссионной точки в спектрах рис. 1, а, можно с большой достоверностью утверждать, что после фрагментации кристалла часть центров F_2 трансформируется в F_{K3}^+ . Такая трансформация может реализовываться через протекание двух процессов: 1) создание кластеров после фрагментации кристалла и попадание центров F_2 в прикластерную область с превращением их в дефекты F_{K2} ; 2) присоединение вакансий к дефектам F_{K2} и их преобразование в центры F_{K3}^+ , что может быть записано в виде



Возникновение дефектов F_{K2} после фрагментации пластинки и их исчезновение с течением времени подтверждается проведенными измерениями их спектра ФЛ. Отметим, что не всегда в спектрах, подобных показанным на рис. 1, а, имеется изоэмиссионная точка. Отсутствие такой точки характерно для НК, полученных размолом образцов с небольшим содержанием центров F_2 .

В спектре ВФЛ при $\lambda_{\text{пер}} = 530$ нм в облученной пластинке наблюдаются две полосы с максимумами при 380 и 444 нм (рис. 1, б, спектр 1), принадлежащие центрам F_3 (R_2) и F_3^+ [11]. Появление в спектрах 2 и 4 (рис. 1, б) полос с максимумами при 350 и 400 нм и смещение наиболее интенсивной полосы в длинноволновую сторону по сравнению со спектром 1 свидетельствуют о том, что в НК, изготовленных фрагментацией пластинки, формируются КЦО F_{K3} [10, 11]. Спектр 4 разложен на спектры ВФЛ ЦО F_3 (R_2), F_3^+ и F_{K3} с использованием контуров спектров этих центров [11]. Результаты разложения представлены на рис. 1, в. Они позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, в НК, изготовленных фрагментацией облученной кристаллической пластинки, формируется значительная концентрация КЦО F_{K3} . По интенсивности люминесценции они сопоставимы с центрами F_3^+ (ср. спектры 3' и 2'). Следовательно, при небольших различиях в квантовых выходах люминесценции сравнимы и концентрации этих центров. Во-вторых, концентрация центров F_3 (R_2) после фрагментации кристалла незначительна (спектр 1'). В-третьих, результаты разложения и спектры 2 и 4 (рис. 1, б) свидетельствуют о наличии двух стадий увеличения концентрации центров F_{K3} — первой быстрой и второй медленной. Отметим, что некоторое отличие измеренного спектра 4 от суммы 4' составляющих компонент обусловлено ошибками определения спектра центров F_{K3} (спектр 3') из-за его перекрытия со спектрами ЦО F_3^+ и F_3 (R_2) [10, 11].

После фрагментации в изготовленных НК также образуются как КЦО F_{K2}^+ , так и обычные центры F_2^+ . Спектры ФЛ этих центров сильно перекрываются [11]. Поэтому их корректная раздельная регистрация невозможна. Проведенные эксперименты показывают, что после фрагментации концентрация центров F_2^+ сначала растет, затем уменьшается. После окончания процессов агрегации дефектов в образцах не обнаруживаются центры F_2^+ , но присутствуют КЦО F_{K2}^+ .

Таким образом, после фрагментации пластинки в полученных НК изменяются концентрации ЦО F_2 , F_3^+ и F_3 (R_2), образуются и затем разрушаются дефекты F_2^+ . Одновременно в них формируются КЦО типов F_{K2}^+ , F_{K3}^+ и F_{K3} . Их концентрации растут до некоторых стационарных значений и при комнатной температуре сохраняются длительное время. Наши эксперименты не зафиксировали их распада в течение двух лет. Центры типа F_{K2} также образуются после фрагментации. Затем они полностью расходятся на формирование КЦО F_{K3}^+ посредством реакции (3). Используемая нами аппаратура не позволяет регистрировать люминесценцию центров F_{K2}^- . Однако нет оснований предполагать, что эти центры отсутствуют в НК, изготавливаемых фрагментацией облученных кристаллических пластинок.

Для изучения кинетики концентраций различных дефектов после фрагментации кристалла измерены временные зависимости интенсивности $I(t)$ люминесценции (рис. 2). Спектры ФЛ и ВФЛ некоторых центров перекрываются, что сказывается на результатах измерений и должно приниматься во внимание при их интерпретации. Интенсивность ФЛ центров F_3^+ сразу после размола быстро уменьшается (кривая 1). Дальнейший ход кривой 1 искажается в результате перекрытия спектров люминесценции и поглощения для существовавших в облученной пластинке ЦО F_3^+ и формирующихся

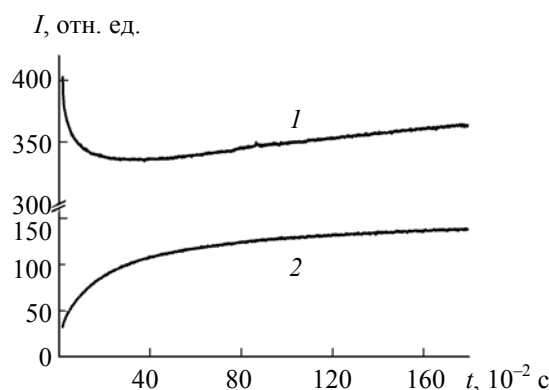


Рис. 2. Временные кинетики интенсивности ФЛ для НК после фрагментации облученного образца:
 1 — $\lambda_{\text{возб}} = 440$ и $\lambda_{\text{рег}} = 540$ нм, 2 — $\lambda_{\text{возб}} = 560$ и $\lambda_{\text{рег}} = 660$ нм

после фрагментации центров F_{K3} . Кинетика роста концентраций КЦО F_{K3}^+ измеряется без искажений (кривая 2). Наблюдаются две стадии роста — начальная быстрая и конечная медленная, и вся кинетика хорошо аппроксимируется двумя экспонентами. На конечной стадии кинетики КЦО F_{K3}^+ образуются в результате реакций (3) и



в которых участвуют мигрирующие по образцу вакансии [10]. Естественно, что до протекания реакций (3), (4) в НК должны сформироваться нанокластеры.

Отметим, что в работе [14] сообщалось об изменении интенсивности ФЛ (концентраций) центров F_2 , F_3^+ и F_3 в приповерхностном слое, возникшем после раскола облученного кристалла LiF, а также наблюдалась полоса ФЛ с максимумом 665 нм при $\lambda_{\text{возб}} = 385$ нм, что свидетельствует о создании центров F_{K3}^+ в таком слое. Приведенные в [14] результаты согласуются с данными, излагаемыми в этой статье.

Как следует из представленных данных, концентрация прикластерных дефектов, в том числе центров F_{K3}^+ , возникающих после фрагментации облученного кристалла, увеличивается с течением времени в результате протекания процессов агрегации и затем достигает стационарного значения. С целью выяснения возможности повышения этого стационарного значения изучено воздействие УФ излучения на НК после завершения в них процессов агрегации дефектов. Для воздействия использовано излучение стандартного источника спектрофлуориметра SM-2203, на котором измерена ФЛ образцов. Такая схема эксперимента обеспечивает точное совпадение в образцах областей воздействия и последующего исследования. На рис. 4 представлены результаты одной из серий измерений. Из сравнения интенсивностей полосы с максимумом при 565 нм в спектрах 5 и 1 на рис. 3 следует, что УФ воздействие увеличивает концентрацию центров F_{K3}^+ в 2.2 раза. Используемое для воздействия излучение имеет длину волны 250 нм, которая находится в полосе поглощения ЦО F_1 . Оно уменьшает концентрацию этих центров посредством реакции



где n — число квантов с частотой ν , поглощаемых из потока УФ радиации центром F_1 ; h — постоянная Планка; e — электрон. Возникшие в результате реакции (6) вакансии и электроны участвуют затем в формировании центров F_{K3}^+ . Это свидетельствует также о наличии резерва нанокластеров, образовавшихся после фрагментации. Они не полностью были использованы ранее в процессах, приводящих к росту концентраций КЦО, показанному на рис. 1 и 2.

Для обеспечения наблюдаемого роста концентраций необходимо присутствие в НК исходных компонентов для процессов агрегации типа, например, (3) и (4). Известно, что при раскалывании кристалла испускаются электроны [15—17]. Их средняя энергия в щелочно-галогидных кристаллах обычно 10^2 — 10^3 эВ, а энергетический спектр для LiF простирается до 75 кэВ. Начальная плотность потока $\approx 10^3$ — 10^4 электрон \cdot см $^{-2}$ \cdot с $^{-1}$. Следовательно, НК в процессе изготовления подвергаются воздействию электронов и в них создаются первичные радиационные дефекты, включая вакансии. Эти дефекты затем принимают участие в формировании агрегатных центров. Для получения более полного

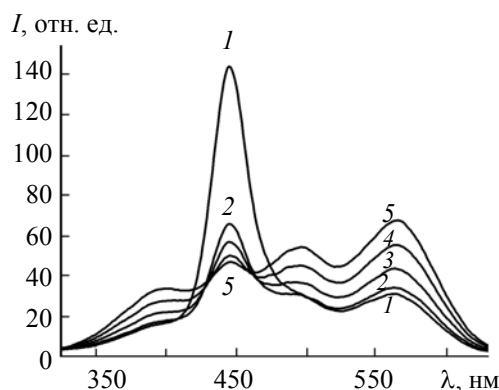


Рис. 3. Измеренные при $\lambda_{\text{рег}} = 670$ нм спектры ВФЛ для НК через два дня после их изготовления путем фрагментации облученной пластинки (1) и затем после воздействия на них УФ излучением с $\lambda = 250$ нм (2—5); время УФ воздействия увеличивается на 5 мин в последовательности 2→5

представления о результатах формирования одновакантных и агрегатных центров измерены оптические спектры необлученной кристаллической пластинки LiF и необлученной прозрачной керамики, состоящей из НК, полученных фрагментацией части этой пластинки. После изготовления керамика выдерживалась при комнатной температуре в течение 2 сут до начала измерений. Разность спектров поглощения керамики и пластинки демонстрирует F -полосу, указывающую на наличие центров F_1 в керамике (рис. 4, а). В спектре ВФЛ керамики, измеренном при $\lambda_{\text{рег}} = 670$ нм, наблюдаются хорошо сформировавшиеся полосы с максимумами при 443 и 565 нм и размытые полосы с максимумами при ~390 и 490 нм (рис. 4, б). Наблюдаемые полосы в спектре ВФЛ позволяют сделать заключение: в необлученных НК, изготовленных фрагментацией необлученной пластинки, присутствуют центры F_2 и F_{K3}^+ . Отметим, что люминесценция необлученной пластинки не регистрируется. Таким образом, исходя из рис. 4 можно сформулировать следующие выводы. Во-первых, в НК, изготовленных механической фрагментацией необлученного кристалла, формируются и одновакантные, и агрегатные радиационные дефекты. Во-вторых, в них создаются также нанокластеры, что согласуется с прямыми измерениями структуры НК на просвечивающем электронном микроскопе [12].

При раскалывании (размол) облученного кристалла электроны испускаются с большей плотностью потока и в большем количестве по сравнению с необлученным кристаллом [17]. Доза облучения влияет на характеристики испускания электронов [17]. Следовательно, размол облученного кристалла должен приводить также к большему изменению в концентрациях дефектов в получаемых НК, чем размол необлученного кристалла. Данные проведенных экспериментов подтверждают этот вывод и показывают, что изменения концентраций различных типов дефектов после фрагментации облученного кристалла зависят от дозы и температуры его облучения.

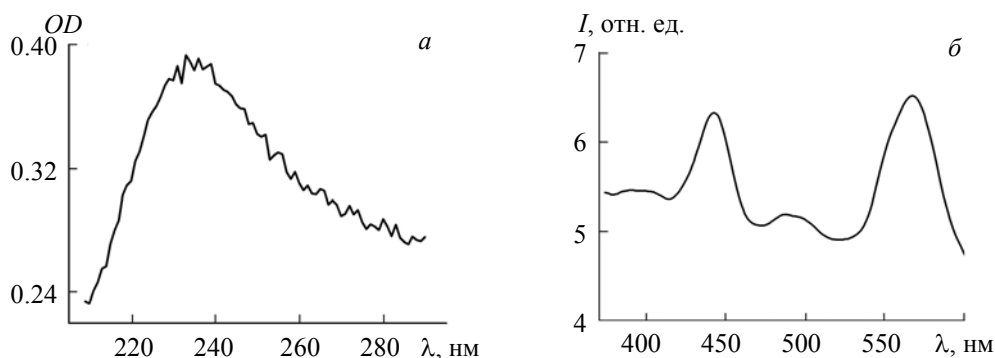


Рис. 4. Разность спектров поглощения прозрачной необлученной керамики из НК, изготовленных фрагментацией необлученной кристаллической пластинки, и части этой пластинки (а); спектр ВФЛ той же керамики, измеренный при $\lambda_{\text{рег}} = 670$ нм (б)

Заключение. В нанокристаллах, изготовленных путем механической фрагментации облученных кристаллических пластинок из LiF, наблюдаются трансформации существующих в пластинках и формирование новых радиационных дефектов. Изменяются концентрации центров F_2 , F_3^+ и F_3 (R_2), имевшихся в пластинках до фрагментации, возникают и затем разрушаются центры F_2^+ . Формируются прикластерные центры окраски F_{K2}^+ , F_{K2} , F_{K3}^+ и F_{K3} и, следовательно, нанокластеры, которые отсутствуют в исходных облученных пластинках. Кинетика концентраций дефектов дает основания заключить, что часть центров F_2 и F_3^+ после фрагментации оказывается вблизи нанокластеров и трансформируется в прикластерные центры окраски соответствующего состава. Для роста концентраций прикластерных центров окраски F_{K3}^+ и F_{K3} характерны две стадии — начальная быстрая и конечная медленная. Рост концентрации центров F_{K3}^+ хорошо описывается двумя экспонентами. Концентрации центров F_{K2}^+ , F_{K3}^+ и F_{K3} после окончания процессов трансформации достигают стационарных значений и при комнатной температуре остаются постоянными в течение длительного времени. Центры F_{K2} расходятся в процессе агрегации.

Воздействие УФ излучения на нанокристаллы, в которых завершены процессы агрегации после фрагментации, может увеличивать стационарные значения концентраций прикластерных центров окраски. Для центров F_{K3}^+ в результате такого воздействия получено увеличение концентрации в ~ 2 раза. Это свидетельствует о том, что нанокластеры, образованные при фрагментации кристалла, не полностью используются при формировании прикластерных центров окраски.

Трансформации и формирование радиационных дефектов после фрагментации облученных пластинок обеспечиваются созданием в результате фрагментации электронов и наноразмерных кластеров. Эксперименты показывают, что в необлученных нанокристаллах, изготовленных фрагментацией необлученных кристаллов, присутствуют одновакантные F_1 и агрегатные F_2 и F_{K3}^+ центры.

Работа выполнена при частичной поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф17-068).

- [1] **W. B. Fowler.** Physics of Color Centers, Academic Press, New York (1968)
- [2] **J. Nahum.** Phys. Rev., **158** (1967) 814—825
- [3] **F. Agullo-Lopez, C. R. A. Catlow, P. D. Townsend.** Point Defects in Materials, Academic Press, London (1988)
- [4] **V. Kozlovski, V. Abrosimova.** Radiation Defect Engineering (Selected Topics in Electronics and Systems), World Scientific, Singapore (2005)
- [5] **P. Lecoq, A. Gektin, M. Korzhik.** Inorganic Scintillators for Detector Systems: Physical Principles and Crystal Engineering, Springer, Berlin (2017)
- [6] **C. Furetta.** Handbook of Thermoluminescence, World Scientific, Singapore (2003)
- [7] **H. Mattoussi, G. Palui, H. B. Na.** Adv. Drug Deliv. Rev., **64**, N 2 (2012) 138—166
- [8] **W. R. Algar, D. Wegner, A. L. Huston, J. B. Blanco-Canosa, M. H. Stewart, A. Armstrong, P. E. Dawson, N. Hildebrandt, I. L. Medintz.** J. Am. Chem. Soc., **134** (2012) 1876—1891
- [9] **A. P. Voitovich, V. S. Kalinov, M. V. Korzhik, E. F. Martynovich, L. P. Runets, A. P. Stupak.** Radiat. Eff. Def. Solids, **168**, N 2 (2013) 130—136
- [10] **A. P. Voitovich, V. S. Kalinov, A. P. Stupak, A. N. Novikov, L. P. Runets.** J. Lumin., **157** (2015) 28—34
- [11] **R. M. Montoreali, A. P. Voitovich.** In “Nano-Optics: Principles Enabling Basic Research and Applications”, Eds. B. Di Bartolo, J. Collins, L. Silvestri, Springer, Dordrecht (2017) 149—171
- [12] **A. P. Voitovich, P. A. Loiko, X. Mateos, L. P. Runets, J. M. Serres, A. P. Stupak.** J. Lumin., **188** (2017) 75—80
- [13] **A. P. Voitovich, V. S. Kalinov, P. A. Loiko, E. F. Martynovich, X. Mateos, A. N. Novikov, P. P. Pershukevich, L. P. Runets, J. M. Serres, A. P. Stupak.** J. Lumin., **201** (2018) 57—64
- [14] **А. П. Войтович, В. С. Калинов, Н. Н. Науменко, А. П. Ступак.** Журн. прикл. спектр., **73** (2006) 775—781 [A. P. Voitovich, V. S. Kalinov, N. N. Naumenko, A. P. Stupak. J. Appl. Spectr., **73** (2006) 866—874]
- [15] **В. В. Карасев, Н. А. Крогова, Б. В. Дерягин.** Докл. АН СССР, **88** (1953) 777—780
- [16] **J. Wollbrandt, E. Linke, K. Mayer.** Phys. Status Solidi (a), **27** (1975) K53—K55
- [17] **B. P. Chandra, N. L. Patel, S. S. Rahangdale, R. P. Patel, V. K. Patle.** Pramana — J. Phys., **60**, N 1 (2003) 109—122