

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. НП-021-2000. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Обращение с газообразными радиоактивными отходами. Требования безопасности». — М.: Госатомнадзор России, 2000. — 10 с.
2. Панов Е.А. Практическая гамма-спектрометрия на атомных станциях. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 75 с.
3. Фертман Д.Е., Ризин А.И., Стась К.Н. Повышение достоверности измерений в радиометрии аэрозолей // Измерительная техника. — 1996. — № 12. — С. 23–30.
4. Гиллярович Э.Л., Грязнов А.Н., Инихов А.Г., Костылева Ю.Г., Мысев И.П., Николаев А.М. Современная практика обеспечения качества измерений ионизирующих излучений. Ядерные измерительно-информационные технологии. — М.: НИЦ «СНИИП», 1997. — 35 с.
5. Одноплатный спектрометр SBS. Руководство пользователя. — М.: Группа предприятий «Грин Стар», 2005. — 27 с.

Поступила 14.12.2006 г.

УДК 535.372

КИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ УРАНОВОГО СВЕЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ LiF

Л.А. Лисицына*, В.И. Олешко, В.М. Лисицын, С.Н. Путинцева

*Томский государственный архитектурно-строительный университет
Томский политехнический университет
E-mail: lisitsyn@tpu.ru

Представлены результаты исследований с наносекундным временным разрешением кинетических параметров разгорания и затухания свечения в кристаллах LiF(U)-О при 300 К при воздействии на них лазерным импульсом энергией 3,68 эВ и импульсом электронов энергией 300 кэВ. Установлено влияние способа возбуждения на кинетические характеристики процесса разгорания свечения урана и влияние урана на кинетические характеристики свечения кислорода в кристалле.

1. Введение

Благодаря тканеэквивалентности активированные кристаллы LiF широко используются для дозиметрии в радиобиологии и медицине. Несомненный интерес представляют кристаллы LiF, активированные ураном, имеющие высокий квантовый выход свечения.

Несмотря на то, что свечение урана исследуется более 150 лет, до сих пор не ясна ни природа урановых центров свечения (УЦС) в различных матрицах, ни механизм возбуждения свечения урана, ни роль кислорода в процессе его возбуждения. УЦС по [1–4] представляют собой комплекс $(\text{UO}_2\text{F})^0$, высокая эффективность создания которого обусловлена его зарядовой нейтральностью. Предполагается, что дискретная структура спектра свечения обусловлена излучательными переходами различной мультипольности на общую систему колебательных уровней основного состояния [1, 3–5].

Альтернативная точка зрения [6–8] заключается в предположении об одновременном присутствии в спектрах свечения излучательных переходов, осуществляемых в УЦС различного состава: $(\text{UO}_2\text{F}_4)^{3+}$, $(\text{UO}_2\text{F})^0$, $(\text{UO}_4\text{F}_2)^{1+}$, $(\text{UO}_6)^{1-}$, отличающихся количеством ионов кислорода, замесивших ионы F[–] в экваториальной плоскости линейного уранового комплекса $(\text{UO}_2)^{2+}$. (Величина и знак заряда УЦС определяются относительно заряда замещенной группы LiF₆).

При всем многообразии методов исследований ураносодержащих кристаллов использование спек-

троскопии с высоким временным разрешением дает возможность измерить и сопоставить возбуждаемые излучательные переходы по кинетическим параметрам как на этапе разгорания свечения, так и на этапе его затухания. Наличие такой информации позволит провести сравнительный анализ многочисленных излучательных переходов по кинетическим параметрам процессов свечения.

В настоящей работе с временным разрешением 30 нс исследовалась импульсная катодолюминесценция (ИКЛ) и импульсная фотолюминесценция (ИФЛ) кристаллов LiF-O и LiF(U)-O в спектральном диапазоне 4,0...2,0 эВ и временном интервале $3 \cdot 10^{-8}$... 10^{-1} с после окончания действия импульса возбуждения при 300 К. ИКЛ возбуждалась импульсом электронов (ИЭ) с энергией 300 кэВ и флюенсом в импульсе (P) в диапазоне 10^{11} ... 10^{13} см^{–2}. Длительность ИЭ – 20 нс. Толщина исследуемых кристаллов не превышала 0,3 мм, глубина проникновения электронов в кристалл LiF – 0,26 мм. Площадь кристаллов – около 10 мм².

ИФЛ возбуждалась импульсом азотного лазера, излучение которого (3,68 эВ) попадает в одну из полос активаторного поглощения ураносодержащих кристаллов. Длительность импульса возбуждения – 20 нс. Мощность – около 10 мкВт, сечение пучка около 1 см².

Исследовались кристаллы LiF-O и LiF(U)-O – кислородосодержащие кристаллы LiF, не активированные и активированные ураном. Концентрация урана по шихте – 0,01 вес. %. Свечение воз-

буждалось как в необлученных кристаллах, так и кристаллах, предварительно облученных серией импульсов электронов при 300 К ($\leq 10^5$ Гр).

Кислород в виде Li_2O вводился в шихту в процессе выращивания, уран — в виде азотнокислого уранила. Кристаллы выращены в Институте физики НАН Кыргызстана.

Исходная дефектность необлученных кристаллов контролировалась по спектрам оптического поглощения в диапазоне 12,0...0,35 эВ. В ИК области спектра кристаллы LiF-O и LiF(U)-O были прозрачны. В ВУФ и УФ областях спектров присутствует ряд полос (табл. 1), положения которых совпадают с данными других авторов. Предполагается, что полосы ВУФ спектра кристалла LiF-O обусловлены кислородом в виде O^{2-} и в виде OH^- [12, 13]. Полосы в области 250...410 нм в спектре кристаллов LiF(U)-O обусловлены урановыми центрами, т. к. такие полосы отсутствуют в спектре не активированных ураном кристаллов LiF-O . Присутствие полос в области 170 и 200 нм в спектрах кристаллов обоих типов, по-видимому, свидетельствует об их принадлежности кислородным дефектам, не связанным с ионами урана.

Таблица 1. Спектральное положение полос оптического поглощения необлученных активированных кристаллов LiF

Кристалл	Источник информации	Длина волны, λ , нм						
* LiF-O		117		137	170	200		
LiF-O	[9]	117		137	170	200		
* LiF(U)-O		—	—	—	—	250	305	410
LiF(U)-O	[10]		127		165	200	244	305
LiF(U)-O	[11]	—	—	—	—	—	250	310

* данные настоящей работы, — неизмеренная область спектра.

2. Результаты исследований

2.1. Свечение кристалла LiF(U)-O в области 2,63...2,1 эВ

Спектр ИФЛ кристалла LiF(U)-O , измеренный при 300 К через 50 нс после окончания действия лазерного импульса, представлен на рис. 1, кривая *a*. Общий вид спектра и положение наибольших полос в нем (2,28, 2,38 и 2,46 эВ) совпадает с данными [11].

Фронт нарастания свечения в каждой из полос спектра описывается функцией:

$$I(t) = I_{\max} (1 - \exp(-t/\tau_1)), \quad (1)$$

где $I_{\max}$ — амплитудное значение интенсивности, t — время с момента запуска импульса возбуждения, τ_1 — характеристическое время процесса, равное 40 нс и превышающее временное разрешение измерительного тракта (30 нс).

На рис. 2, кривая *a*, представлена, для примера, кинетика разгорания свечения (КРС) в полосе 2,38 эВ при оптическом возбуждении кристалла.

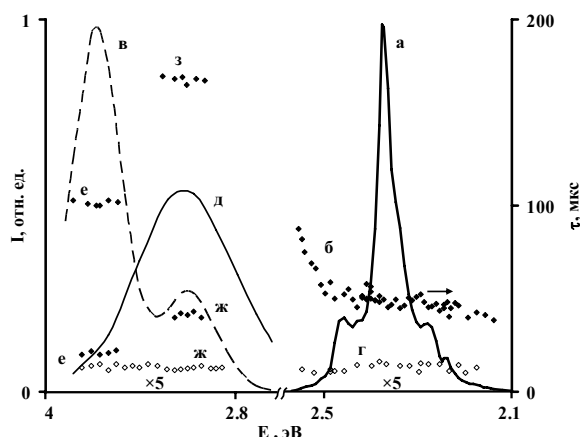


Рис. 1. Спектры свечения, измеренные через 50 нс (*a*, *в*), 300 мкс (*д*) после начала действия импульса возбуждения при 300 К, и дисперсии времени затухания (*б*, *е-з*) и инерционного компонента разгорания ИКЛ (*г*) в кристалле LiF(U)-O (*a-г*, *е*, *ж*) и LiF-O (*в*, *д-з*)

Поскольку спектр зеленого свечения представляет собой набор перекрывающихся узких полос, кинетика затухания свечения (КЗС) исследовалась нами в диапазоне 2,63...2,1 эВ с шагом, равным 2 нм. Установлено, что КЗС во всем указанном диапазоне описывается моноэкспоненциальным законом. Дисперсия характеристического времени затухания представлена на рис. 1, кривая *б*, и свидетельствует о монотонном возрастании времени затухания с 50 мкс на 2,1 эВ до 90 мкс в области 2,6 эВ.

Спектр ИКЛ кристалла LiF(U)-O , возбужденный воздействием ИЭ (рис. 1), состоит из группы полос вышеописанного уранового зеленого свечения (кривая *a*) и свечения в синей области 4,0...2,65 эВ (кривая *в*). Описание синего свечения будет дано ниже в разделе 2.2.

Нами установлено, что спектральный состав зеленого свечения кристалла и характер дисперсии времени его затухания не зависят от способа возбуждения и одинаковы при электронном и оптическом возбуждении.

Однако, при одинаковой длительности оптического импульса и импульса электронов способ возбуждения свечения, как оказалось, влияет на кинетические характеристики процесса разгорания. Так, в отличие от (1), процесс разгорания ИКЛ в каждой из полос спектра зеленого свечения описывается совокупностью двух экспонент [14]:

$$I_j(t) = \sum I_{j\max} (1 - \exp(-t/\tau_j)), \quad (2)$$

где $\tau_1 = 40$ нс и совпадает с величиной характеристического времени разгорания ИФЛ (рис. 2, кривые *a*, *б*), а $\tau_2 = 2,5$ мкс. Величина τ_2 не зависит от длины волны и одинаковая во всей спектральной области зеленого свечения (рис. 1, кривая *д*).

На рис. 2 (кривые *a-в*) для сравнения приведены кинетики разгорания ИФЛ и ИКЛ в полосе 2,38 эВ.

Установлено совпадение спектрального состава ИФЛ и ИКЛ наносекундного и микросекундного

компонентов интенсивности, измеренные как зависимость $I_{1\max} = f(\lambda)$ и $I_{2\max} = f(\lambda)$, соответственно.

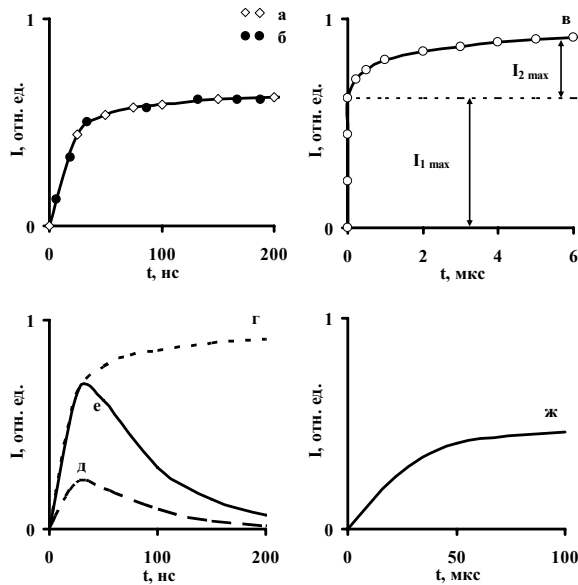


Рис. 2. Кинетические кривые свечения на 2,38 (а-в), 3,7 (г, е), 3,1 (д) и 3,0 эВ (ж) в спектре кристалла LiF(U)-O (а-г, д) и LiF-O (д-ж) при воздействии лазерного импульса (а) и импульса электронов (б-ж) при 300 К

Нами проведены исследования влияния параметров облучения: флюенса электронов за импульс (P) и величины D – интегральной поглощенной кристаллом дозы (при $P = \text{const}$) на эффективность возбуждения при 300 К зеленого свечения – на значения интенсивности наносекундного и микросекундного компонентов $I_{1\max}$ и $I_{2\max}$ в каждой из полос спектра.

На рис. 3 (кривые а, б), в качестве примера, представлены зависимости $I_{1\max} = f(D)$ и $I_{2\max} = f(D)$ в максимальной полосе спектра 2,38 эВ. Как следует из представленных результатов, величина $I_{1\max}$, измеренная через 200 нс с момента импульсного воздействия, с ростом D увеличивается, достигает максимального значения при $D = 1,7 \cdot 10^4$ Гр и затем уменьшается при дальнейшем росте поглощенной дозы.

Дозная зависимость мкс-компонента интенсивности имеет иной характер: значение $I_{2\max}$, измеренное через 8 мкс с момента окончания действия ИЭ, максимально при действии первого ИЭ на кристалл, а затем в области $D \leq 10^5$ Гр медленно уменьшается с ростом дозы (рис. 3).

В диапазоне значения флюенса (P) электронов в импульсе возбуждения $10^{11} \dots 10^{13} \text{ см}^{-2}$ установлено существование линейной зависимости между величиной $I_{2\max}$ и P .

Значение характеристического времени разгорания зеленого свечения τ_2 не зависит от D .

Описанные выше закономерности изменения наносекундного и микросекундного компонентов интенсивности свечения в полосе на 2,38 эВ от величины P и D совершенно идентичны и для наносекундного и микросекундного компонентов ин-

тенсивности двух других хорошо разрешенных полос спектра на 2,28 и 2,46 эВ. Следовательно, представленный на рис. 1, кривая а, спектр уранового свечения принадлежит одному типу УЦС, об этом говорит и совпадение кинетических характеристик разгорания свечения во всем спектральном интервале 2,63... 2,1 эВ.

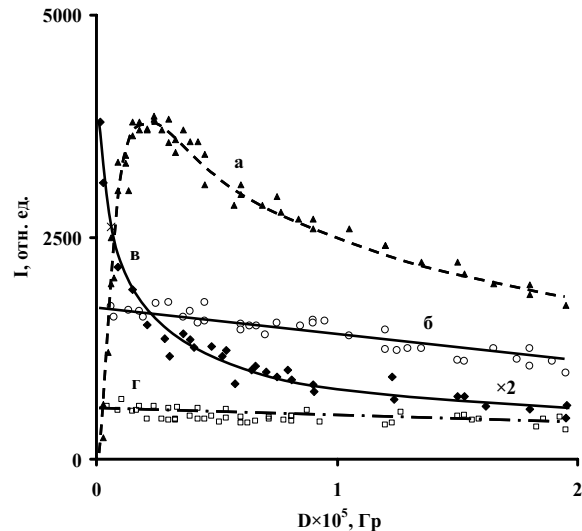


Рис. 3. Зависимость интенсивности ИКЛ в полосе 2,38 эВ (нс-компонента $I_{1\max}$ (а) и мкс-компонента $I_{2\max}$ (б)), 3,7 (в), 3,1 эВ (г) от дозы предварительного облучения кристалла LiF(U)-O электронами. Интенсивность измерена через 30 нс (г), 200 нс (а, в) и 8 мкс (б) с момента запуска импульса возбуждения при 300 К

2.2. Свечение кристалла LiF(U)-O в области 4,0...2,65 эВ

Как описано выше, спектр ИКЛ кристалла LiF(U)-O, возбуждаемый ИЭ, состоит из группы полос зеленого свечения в спектральной области (2,63...2,1 эВ) и группы полос синего свечения в спектральной области (4,0...2,65 эВ). Спектр синего свечения, измеренный через 50 нс после окончания воздействия ИЭ, состоит из двух широких полос на 3,1 и 3,7 эВ (рис. 1, кривая в) с одинаковым значением полуширины, равным 0,4 эВ.

На рис. 2, кривые г, д, представлены КРС в полосах 3,7 и 3,1 эВ соответственно. Как следует из представленных результатов, фронт нарастания свечения в полосе 3,7 эВ совпадает с нс-компонентом разгорания зеленого свечения и описывается монотонноэкспоненциальной функцией (1) с значением τ_1 , равным 40 нс (ср. рис. 2, кривые б, е). Фронт нарастания свечения в полосе 3,1 эВ сравним с временным разрешением измерительного тракта (30 нс).

Затухание свечения в полосе 3,7 эВ описывается набором двух экспонент с значениями характеристических времен 2,5 и 20 мкс (рис. 1), а в полосе 3,1 эВ – набором трех экспонент с значениями характеристических времен 40 нс (рис. 2, кривая д), 2,5 и 50 мкс (рис. 1).

При исследовании влияния дозы предварительного облучения на спектрально-кинетические ха-

рактеристики синего свечения установлено следующее. С ростом величины интегральной дозы (при $P = \text{const}$) наблюдается радиационное тушение свечения в полосе на 3,7 эВ (рис. 3, кривая *б*), тогда как интенсивность свечения в полосе 3,1 эВ практически не зависит от D в области $\leq 10^5$ Гр (рис. 3, кривая *з*). При этом не зависит от D и вклад нс-компонента затухания свечения в полосе 3,1 эВ (~50 % от амплитудного значения).

Обнаружено, что дозные зависимости амплитудного значения мкс-компонента разгорания зеленого свечения ($I_{2\text{max}}$) и интенсивности свечения в полосе 3,1 эВ подобны (рис. 3, кривые *б*, *з*).

Обнаружена линейная зависимость амплитудного значения интенсивности полос 3,7 и 3,1 эВ от величины флюенса электронов в импульсе в диапазоне $10^{11} \dots 10^{13} \text{ см}^{-2}$, соблюдающаяся при любом значении интегральной поглощенной кристаллом дозы в области $\leq 10^5$ Гр.

2.3. Свечение кристалла LiF-O в области 4,0...2,65 эВ

Спектр ИКЛ кристалла LiF-O зависит от времени его измерения по отношению к моменту окончания действия ИЭ. Спектр, измеренный через 50 нс, состоит из полос на 3,7 и 3,1 эВ с одинаковым значением полуширины, равным 0,4 эВ, и совпадает со спектром синего свечения кристалла LiF(U)-O, изображенным на рис. 1, кривая *в*.

Спектр, измеренный через 300 мкс после окончания воздействия ИЭ, состоит из широкой (полуширина 0,7 эВ) полосы с максимумом на 3,0 эВ (рис. 1, кривая *д*).

Фронт нарастания свечения в полосе 3,1 эВ в спектре кристалла LiF-O, описывается параметром, соизмеримым с временным разрешением измерительного тракта, а КРС имеет такой же вид, как и в полосе 3,1 эВ в спектре кристалла LiF(U)-O (рис. 2, кривая *д*).

В отсутствие урана КРС в полосе 3,7 эВ в кристалле LiF-O имеет вид, представленный на рис. 2, кривая *е*, и отличается от КРС в полосе 3,7 эВ в спектре кристалла LiF(U)-O, наличием нс-компонента затухания (ср. рис. 2, кривые *з*, *е*).

Таким образом, в спектре кристалла LiF-O обе полосы синего свечения описываются одинаковым, соизмеримым с временным разрешением тракта, параметром разгорания.

Кинетики затухания свечения в каждой из полос описывается двумя экспонентами с одинаковым набором значений характеристических времен: 40 нс и 2,5 мкс. Вклад нс-компонента затухания в каждой из полос зависит от величины интегральной поглощенной дозы и составляет 90 % от амплитудного значения интенсивности в области $D \leq 10^2$ Гр и 50 % – в области $\geq 1 \cdot 10^4$ Гр.

Характер длинновременной релаксации свечения в области 3,7 и 3,0 эВ различный. В полосе 3,7 эВ наблюдается затухание свечения, которое описывается значением характеристического вре-

мени, равным 100 мкс. В области 3,0 эВ имеет место наложение двух процессов: затухания свечения в полосе 3,1 эВ и разгорания в полосе на 3,0 эВ, что не позволяет выделить длинновременной компонент затухания в полосе 3,1 эВ.

Кинетика разгорания свечения, спектр которого представляет собой полосу с максимумом на 3,0 эВ (рис. 1, кривая *д*), представлена на рис. 2, кривая *ж*. Характеристическое время разгорания равно 20 мкс и не зависит от концентрации кислорода в кристалле. Затухание свечения носит моноэкспоненциальный характер. Как установлено нами, величина характеристического времени затухания зависит от концентрации кислорода в кристалле и равна 400 и 100 мкс в кристаллах LiF, содержащих по данным нейтронно-активационного анализа кислород в количестве $2 \cdot 10^{-4}$ и $3 \cdot 10^{-3}$ вес. %, соответственно. В кристаллах LiF, содержащих примесь кислорода менее 10^{-5} вес. %, разгорание свечения в полосе 3,0 эВ не наблюдается.

Нами проведены исследования зависимости эффективности возбуждения при 300 К синего свечения в кристаллах LiF-O от параметров облучения P и D . Амплитудное значение интенсивности обеих полос 3,7 и 3,1 эВ измерялось через 30 нс с момента действия ИЭ. Установлено, что в кристалле LiF-O, как и в кристалле LiF(U)-O, с ростом интегральной дозы наблюдается радиационное тушение свечения в полосе 3,7 эВ и линейная зависимость значения интенсивности от P , причем, как оказалось, присутствие урана в кристалле не влияет на скорость радиационного тушения.

Интенсивность свечения в полосе 3,1 эВ в кристалле LiF-O практически не зависит от величины интегральной дозы, как и интенсивность полосы 3,1 эВ в спектре кристалла LiF(U)-O. Интенсивность свечения в полосе 3,1 эВ линейно зависит от P , как и в кристалле LiF(U)-O.

3. Обсуждение результатов и выводы

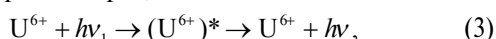
С целью выяснения взаимосвязи между центрами, обуславливающими синее и зеленое свечение, нами исследовались спектрально-кинетические параметры свечения необлученных и подвергнутых предварительному облучению ИЭ в интервале поглощенных доз $\leq 10^5$ Гр кристаллов LiF-O, как содержащих, так и не содержащих уран.

Всю совокупность полученных результатов можно изложить в виде следующих утверждений.

1. В кристалле LiF(U)-O зеленое урановое свечение одинакового спектрального состава возникает как при оптическом возбуждении с энергией кванта 3,68 эВ, так и при возбуждении электронами с энергией $3 \cdot 10^5$ эВ. Следовательно, заселение излучательных состояний осуществляется как без участия свободных носителей заряда, так и при создании электронно-дырочных пар в кристалле.
2. При неизменном спектральном составе уранового свечения способ его возбуждения опреде-

ляет кинетику процесса разгорания. При электронном возбуждении дополнительно к нс-компоненту разгорания, величина характеристического времени которого (40 нс) одинаковая как при оптическом, так и электронном возбуждении, появляется мкс-компонент, величина характеристического времени которого (2,5 мкс) одинакова для всех длин волн в области зеленого свечения.

3. Нс-компонент ИФЛ шестивалентного урана, инициированный лазерным излучением с энергией кванта 3,68 эВ, по-видимому, есть результат прямого процесса:



где $h\nu_1$ — энергия кванта возбуждения.

Однако, реакция (3) не описывает механизм возбуждения нс-компонента интенсивности ИКЛ, не смотря на совпадение значений характеристического времени обоих процессов разгорания (рис. 2) и не смотря на возможность реабсорбции кислородного свечения на 3,7 эВ, присутствующего в спектре ИКЛ урансодержащих кристаллов.

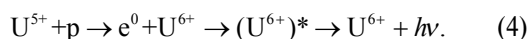
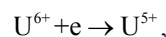
В пользу высказанного предположения говорят следующие факты. Во-первых, присутствие урана не влияет на скорость радиационного тушения свечения в полосе 3,7 эВ. Полученные нами результаты свидетельствуют о том, что в кристаллах LiF-O, содержащих и не содержащих уран, эта скорость одинаковая. Во-вторых, характер изменения с ростом дозы интенсивности полосы 3,7 эВ и нс-компонента интенсивности уранового свечения не совпадает. Результаты, представленные на рис. 3, свидетельствуют о том, что величина $I_{1\max}$ увеличивается на несколько порядков с ростом дозы, достигая максимального значения в области $1,7 \cdot 10^4$ Гр (рис. 3, кривая *a*), а затем медленно уменьшается при дальнейшем увеличении дозы. В том же интервале поглощенных доз интенсивности свечения на 3,7 эВ монотонно уменьшается в пределах одного порядка.

4. Характер полученной нами дозой зависимости нс-компонента интенсивности свечения шестивалентного урана (рис. 3, кривая *a*) совпадает с характером дозой зависимости создаваемых и накапливаемых в кристалле в процессе рентгеновского облучения урановых центров, содержащих U^{5+} , оцениваемых по интенсивности сигнала ЭПР [4]. Такой же специфический характер дозой зависимости (по кривой с максимумом) наблюдается для пика термостимулированной люминесценции на 400 К облученных урансодержащих кристаллах LiF по данным [3]. Одного порядка и диапазон доз, определяющий положение максимума на дозных зависимостях. Совокупность имеющихся результатов позволяет выдвинуть предположение о том, что нс-компонент интенсивности свечения шестивалентного урана в спектре ИКЛ возникает в результа-

те двух последовательных этапов. *Первый этап* — этап создания и накопления в процессе облучения кристалла электронами урановых центров, содержащих U^{5+} . Число таких центров определяется дозой облучения; характер дозой зависимости описывается кривой с максимумом. *Второй этап* — этап возбуждения ИКЛ U^{6+} под действием импульса электронов, который включает в себя следующие процессы:

- а) захват дырки (р) на накопленных в кристалле центрах, содержащих U^{5+} ,
- б) переход электрона с U^{5+} на дырку с созданием околодефектного экситона (e^0) и восстановлением зарядового состояния урана,
- в) передачу энергии от экситона шестивалентному урану с последующим ее излучением.

Выход уранового свечения будет определяться флюенсом электронов в импульсе возбуждения при любом значении интегральной поглощенной кристаллом дозы, что и наблюдается на опыте. Т. е. процесс возбуждения нс-компонента разгорания свечения шестивалентного урана можно записать в виде:

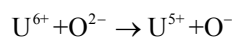


Мы предполагаем, что ионы O^{2-} в окружении урана являются местом стока горячих дырок.

5. Механизмы разгорания уранового свечения в наносекундном и микросекундном временных интервалах разные. Об этом прямо свидетельствует разный характер дозных зависимостей амплитудных значений наносекундного и микросекундного компонентов интенсивности уранового свечения — $I_{1\max}$ и $I_{2\max}$ соответственно (рис. 3). Величина $I_{2\max}$ максимальна при действии первого ИЭ на кристалл, когда величина нс-компонента интенсивности уранового свечения $I_{1\max}$ минимальна (рис. 3).

Совпадение спектров микросекундного и наносекундного компонентов интенсивности свидетельствует о том, что оба компонента интенсивности обусловлены излучательными переходами на шестивалентном уране. Отсутствие мкс-компонента разгорания при оптическом возбуждении свидетельствует о реализации второго канала заполнения того же самого излучательного состояния только в процессе возбуждения жесткой радиацией.

Совпадение характера дозой зависимости интенсивности кислородного свечения в полосе 3,1 эВ и мкс-компонента уранового свечения (рис. 3, б), а также совпадение значений характеристического времени тушения свечения на 3,1 эВ (2,5 мкс) и времени разгорания уранового свечения (рис. 1), все эти факты свидетельствуют об участии кислорода в заполнении излучательного состояния U^{6+} . Возможно, имеет место перенос электрона от O^{2-} на рядом расположенный ион U^{6+} [15]:



и последующий захват дырки на U^{5+} по (4). Эффективность этого процесса с ростом интегральной дозы будет падать в связи с уменьшением исходной

концентрации урана в шестивалентном состоянии. Экспериментальные результаты свидетельствуют об уменьшении интенсивности мкс-компонента уранового свечения и кислородного свечения на 3,1 эВ с одинаковой скоростью в одном и том же интервале поглощенных доз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parrot R., Gendron F., Naud C., Porte C. Dye laser site selection spectroscopy on U^{6+} luminescent molecular centers in $\text{LiF-U}_3\text{O}_8$ crystals // *Physics. Letters.* – 1981. – V. 86 A. – № 5. – P. 315–317.
2. Феофилов П.П. О природе элементарных осцилляторов иона урана // *Оптика и спектроскопия.* – 1960. – Т. 8. – Вып. 6. – С. 824–827.
3. Dalvi A., Sastry M., Joshi B. Trap level spectroscopy of actinide-doped phosphors: 1. LiF:UO_2^{2+} and $\text{LiF:}^{241}\text{Am}$ // *J. Phys. C: Solid State Phys.* – 1984. – V. 17. – P. 5851–5863.
4. Parrot R., Naud C., Delbecq C., Yuster P. Optical and ESR studies of U^{5+} luminescent molecular centers in X- and γ -irradiated $\text{LiF-U}_3\text{O}_8$ crystals // *Phys. Rev. B.* – 1977. – V. 15. – № 1. – P. 137–145.
5. Каплянский А.А., Москвин Н.А. Комбинированные магнито-электрические дипольные переходы в спектрах кристаллов щелочных фторидов с шестивалентным ураном // *Доклады АН СССР.* – 1963. – Т. 148. – № 3. – С. 558–561.
6. Lupei A., Lupei V., Ursu L. Impurities effects on U^{6+} luminescence in LiF // *J. Phys. C: Solid State Phys.* – 1985. – V. 18. – P. 6099–6107.
7. Алешкевич Н.И., Красилов Ю.И., Сытько В.В. Спектрально-люминесцентные свойства и природа центров свечения в кристаллах LiF-U(VI) // *Журнал прикладной спектроскопии.* – 1982. – Т. 37. – № 4. – С. 585–591.
8. Lupei A., Lupei V. On the nature of U^{5+} centers in LiF // *Phys. Stat. Sol. (b).* – 1979. – V. 94. – № 301. – P. 301–307.
9. Архангельская В.А., Гусева Е.В., Зингер Г.М., Королев Н.Е., Рейтеров В.М. Термостойкость F_2^- центров в радиационно-окрашенных кристаллах LiF с кислородосодержащими примесями // *Оптика и спектроскопия.* – 1986. – Т. 61. – Вып. 3. – С. 542–549.
10. Bagai R.K., Warrier A.V. Optical absorption spectrum of UO_2^{2+} doped LiF // *J. Phys. C: Solid State Phys.* – 1977. – V. 10. – P. L437–L439.
11. Беляев Л.М., Перекалина З.Б., Варфоломеева В.Н., Панова В.П., Добржанский Г.Ф. Люминесцентные свойства фтористого лития, активированные ураном // *Кристаллография.* – 1960. – Т. 5. – Вып. 5. – С. 758–760.
12. Люминесценция и дефекты ионных кристаллов / Под ред. А.Ф. Люшиной. – Рига: Зинатне, 1967. – 295 с.
13. Егранов А.В., Раджабов Е.А. Спектроскопия кислородных и водородных примесных центров в щелочно-галогидных кристаллах. – Новосибирск: Наука, 1992. – 160 с.
14. Lisitsyna L.A., Oleshko V.I., Lisitsyn V.M., Putintseva S.N., Denisov G.S. The activator luminescence of LiF crystals // *Известия вузов. Физика.* – 2006. – Т. 49. – № 10. – Приложение. – С. 17–20.
15. Lupei A., Lupei V., Georgescu S., Ursu L. The hyperfine structure of U^{5+} in NaF and LiF single crystals // *J. Phys. C: Solid State Phys.* – 1976. – V. 9. – P. 2619–2626.

Поступила 22.12.2006 г.