

УДК 535.372

СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ УРАНОВЫХ КОМПЛЕКСОВ В КРИСТАЛЛАХ LiF

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

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

Представлены результаты исследований с наносекундным временным разрешением спектрально-кинетических параметров импульсной фотолюминесценции при 300 К кристаллов LiF, содержащих уран-гидроксильные комплексы. Показано, что облучение кристалла электронами приводит к разрушению этих комплексов, к изменению вероятности излучательных переходов и соотношения интенсивностей полос в спектре свечения урана в диапазоне 2,6...2,1 эВ.

1. Введение

Настоящая работа посвящена исследованию влияния величины дозы предварительного облучения на спектрально-кинетические параметры уранового зеленого свечения в диапазоне 2,6...2,1 эВ при 300 К в кристаллах LiF. Актуальность исследований определяется широким использованием активированных ураном кристаллов LiF в качестве детекторов ионизирующих излучений, оптических сред для записи и хранения информации, в качестве рабочих сред для термоэкоэмиссионных детекторов и т. д. [1].

Несмотря на то, что свечение урана исследуется уже более 150 лет, до сих пор не ясна ни природа урановых излучательных комплексов (УИК), ни механизм возбуждения свечения урана, ни роль кислорода в процессе его возбуждения.

УИК по [2–4] представляют собой молекулу $(\text{UO}_2\text{F})^0$, высокая эффективность создания которой обусловлена ее зарядовой нейтральностью, а дискретная структура спектра свечения обусловлена излучательными переходами различной спиновой мультипольности на общую систему колебательных уровней основного состояния УИК.

Альтернативная точка зрения, например [5–7], заключается в предположении о присутствии в спектрах свечения излучательных переходов на УИК, различающихся количеством ионов кислорода, замесивших ионы F^- в экваториальной плоскости линейного уранильного комплекса, представляющего собой молекулярный центр $(\text{UO}_2)^{2+}$.

В настоящей работе исследовалось влияние количества и типа примесных ионов на спектрально-кинетические характеристики уранового свечения в кристаллах LiF, в которых УИК формировались как в процессе выращивания при введении в шихту различного количества кислородной примеси, так и в процессе облучения выращенных кристаллов ионизирующей радиацией.

2. Объект и методы исследований

Урансодержащие кристаллы LiF были выращены в Институте физики НАН Киргизстана на воздухе методом Киропулоса. Примесь кислорода вво-

дилась в виде LiOH, а уран — в виде азотнокислого уранила. Во всех кристаллах содержание урана было одинаковым и по шихте равным 0,01 моль. %. Толщина кристаллов не превышала 0,3 мм.

Исследовалась импульсная фотолюминесценция (ИФЛ) кристаллов с временным разрешением 30 нс в спектральном диапазоне 2,6...2,1 эВ и временном интервале $3 \cdot 10^{-8} \dots 10^{-1}$ с после окончания действия импульса возбуждения при 300 К. ИФЛ возбуждалась азотным лазером, излучение которого (3,68 эВ) попадает в полосу активаторного поглощения на 4 эВ, присутствующую в спектре урансодержащих кристаллов [8, 9]. Энергетическая освещенность в плоскости образца была неизменна во всех экспериментах и составляла 0,3 МВт/см². Длительность импульса возбуждения 20 нс.

ИФЛ возбуждалась как в необлученных кристаллах, так и кристаллах, предварительно облученных серией импульсов электронов средней энергией 250...300 кэВ при 300 К в диапазоне поглощенных доз $10^2 \dots 10^6$ Гр.

Исходная дефектность кристаллов контролировалась по спектрам оптического поглощения в диапазоне 6,0...0,25 эВ, характерный вид которых приведен на рис. 1. (Для сравнения здесь же приведен спектр поглощения кристалла LiF–ОН).

Представленные спектры свидетельствуют о том, что в УФ области спектра исследованных кристаллов LiF(U) присутствуют (рис. 1) полосы на 5, 4 и 3 эВ, как и в [8, 9].

По характерным особенностям спектров поглощения в ИК области исследованные кристаллы LiF(U) были разделены на два типа.

В спектрах необлученных кристаллов типа I присутствуют группы узких полос в области 0,46...0,43 и 0,36...0,35 эВ. Такой же спектр наблюдается и в не активированных ураном кристаллах LiF–ОН (рис. 1), где по [10–12] группа полос в области 0,46 эВ обусловлена ионами OH^- и комплексами $\text{Me}-\text{OH}^-$, где Me — неконтролируемая катионная примесь. Природа поглощения в области 0,36...0,35 эВ не ясна. По совпадению спектров активированных ураном кристаллов и кристаллов, не содержащих уран, очевидно отсутствие в спектре LiF(U) типа I полос, обусловленных комплексами уран-гидроксил.

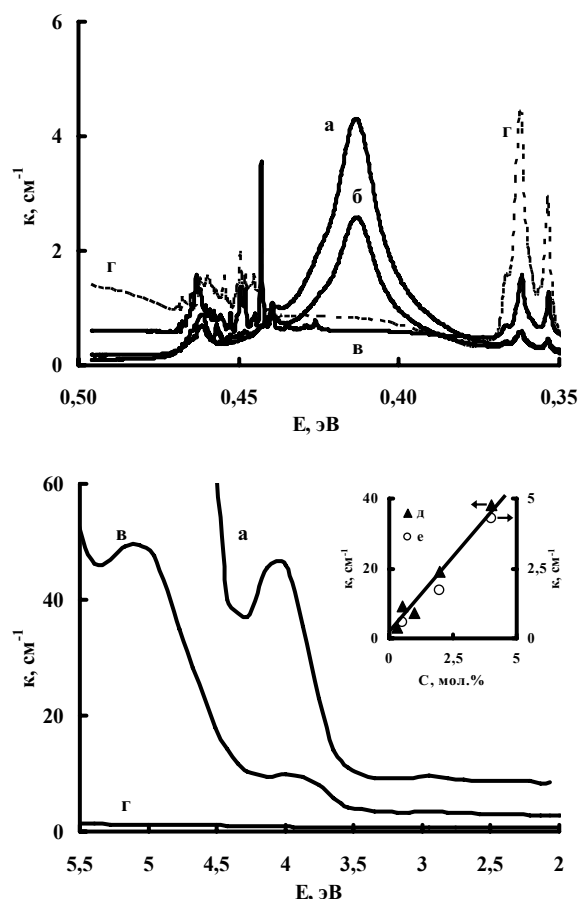


Рис. 1. Спектры поглощения при 300 К необлученных кристаллов LiF(U) (а-в) и LiF-OH (г) с различным содержанием примеси LiOH по шихте: 4 (а), 2 (б), 0,2 (в) и 0,5 мол. % (г). На вставке: зависимость коэффициента поглощения в полосах на 4,0 (д) и 0,41 эВ (е) в спектрах кристаллов LiF(U) от количества вводимой при выращивании примеси LiOH

В ИК спектре поглощения кристаллов LiF(U) типа II присутствует дополнительно широкая полоса на 0,41 эВ (рис. 1). Спектр поглощения кристаллов этого типа совпадает с приведенным в работе [7], где полоса на 0,41 эВ приписывается уран-гидроксильным комплексам.

Нами обнаружена линейная корреляция между количеством вводимой при выращивании кристалла примеси OH (рис. 1, вставка) и поглощением в полосах на 4,0 и 0,41 эВ в спектре необлученных кристаллов LiF(U) типа II. Интерполяция данной зависимости в область значений коэффициента поглощения на 4,0 эВ в спектрах кристаллов LiF(U) типа I позволила определить, что количество примеси OH в кристаллах этого типа не превышает 0,3 мол. % по шихте. Поскольку в ИК спектрах кристаллов типа I нет полосы на 0,41 эВ, обусловленной уран-гидроксильными комплексами, то образование этих комплексов начинается выше некоторого порогового значения концентрации примеси OH при данной концентрации урана в кристалле.

3. Результаты исследований

На партии кристаллов LiF(U), выращенных в одних условиях и отличающихся количеством вводимой в шихту примеси LiOH и, соответственно, величиной поглощения в максимуме полосы на 0,41 эВ, установлено следующее.

1. Спектр ИФЛ кристалла с наибольшим содержанием LiOH, равным 4 мол. % по шихте, состоит из широкой полосы на 2,55 эВ и слабого бесструктурного свечения в области 2,4...2,1 эВ (рис. 2, кривая а). Спектр ИФЛ кристаллов с содержанием примеси LiOH ~0,2 мол. % (кристаллы LiF(U) тип I) состоит из хорошо разрешенных полос на 2,28, 2,38 и 2,46 эВ и слабого бесструктурного свечения в области 2,6 и 2,1 эВ (рис. 2, кривая е). В кристаллах с содержанием примеси LiOH в пределах 0,3...4 мол. %, как следует из рис. 2, спектры ИФЛ отличаются от двух вышеописанных иными соотношениями интенсивностей полос. С увеличением содержания примеси LiOH наблюдается следующая закономерность: относительный вклад длинноволновых полос в спектре свечения УИК падает. Изменения положения полос с введением примеси не наблюдается.

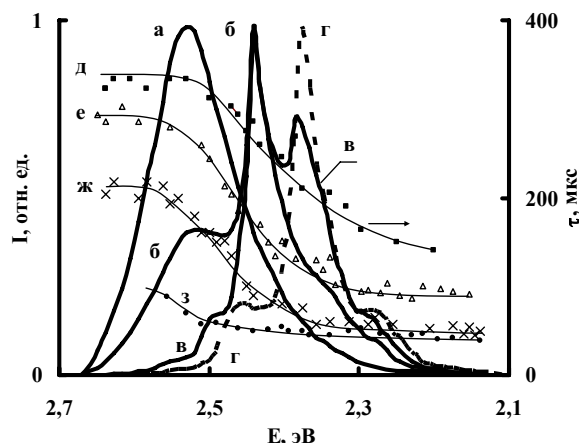


Рис. 2. Спектры ИФЛ (а-г) и дисперсия времени затухания (д-з) при 300 К в необлученных кристаллах LiF(U) с различным содержанием примеси LiOH по шихте: 4 (а, д), 2 (б, е), 0,5 (в, ж) и 0,2 мол. % (г, з). Спектры измерены через 1 мкс после окончания действия импульса возбуждения и нормированы по максимальной полосе в спектрах

Подобное перераспределение интенсивностей полос в спектре фотолюминесценции урана наблюдалось в [13] с увеличением концентрации урана в кристаллах LiF, выращенных методом Киропулоса на воздухе.

2. При исследовании кинетики затухания уранового свечения было установлено, что закон затухания в спектральном диапазоне 2,6...2,1 эВ носит моноэкспоненциальный характер независимо от содержания примеси OH.

Нами исследована зависимость времени затухания от длины волны излучаемой энергии в спектре ИФЛ в каждом из кристаллов (рис. 2, кривые д-з).

Из представленных результатов следует, что для каждого из наблюдаемых спектров уранового свечения время затухания зависит от энергии излучения и уменьшается с ее уменьшением. Следовательно, с увеличением временного интервала между окончанием импульса возбуждения и измерением спектра ИФЛ центр тяжести каждого из наблюдаемых спектров смещается в коротковолновую область. Для примера на рис. 3 приведены спектры ИФЛ кристалла $\text{LiF(U)}-3$ мол. % LiOH , измеренные с различной временной задержкой. Следовательно, многообразие приводимых в печати спектров свечения урановых комплексов может быть обусловлено различием временного разрешения измерительных трактов при стационарных измерениях спектров в работах различных авторов.

Приведенные на рис. 2 данные свидетельствуют также о том, что характер дисперсионной кривой времени затухания не зависит от содержания примеси ОН в кристалле. Однако, абсолютное значение характеристического времени затухания на любой длине волны излучения в диапазоне $2,6...2,1$ эВ уменьшается с уменьшением в кристалле примеси LiOH . Например, в области $2,55$ эВ время затухания свечения меняется в диапазоне $330...90$ мкс при изменении количества добавляемой примеси LiOH в диапазоне $4...0,2$ мол. % по шихте.

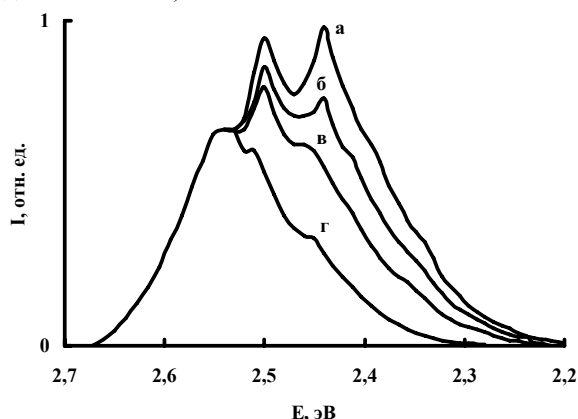


Рис. 3. Спектры ИФЛ при 300 К необлученного кристалла $\text{LiF(U)}-3$ мол. % LiOH , измеренные через 1 (а), 50 (б), 100 (в) и 1000 мкс (г) после окончания действия импульса возбуждения. Спектры нормированы по полюсу на 2,55 эВ

3. Нами обнаружено влияние предварительного облучения на спектр ИФЛ кристаллов LiF(U) , в спектре поглощения которых до облучения присутствует полоса на $0,41$ эВ (рис. 1).

Установлено, что увеличение дозы предварительного облучения кристалла, содержащего примесь ОН, приводит к перераспределению интенсивностей полос в спектре ИФЛ и смещению центра тяжести спектра в длинноволновую область (рис. 4). При этом наблюдается корреляция между спектральным положением максимальной полосы в спектре и дозой предварительного облучения кристалла. Так в спектре ИФЛ необлученного кристалла $\text{LiF(U)}-4$ мол. % LiOH наибольшую интен-

сивность имеют переходы в области $2,55$ эВ. Переход на $2,44$ эВ становится преобладающим в спектре ИФЛ этого же кристалла при дозе предварительного облучения, равной $2 \cdot 10^4$ Гр, а переход на $2,38$ эВ — при дозе $3 \cdot 10^5$ Гр. Дальнейшее облучение кристалла не сопровождается смещением положения максимума.

Таким образом, радиационное преобразование УИК в кристалле LiF(U) типа II заканчивается с появлением при лазерном возбуждении спектра ИФЛ, совпадающего со спектром, наблюдаемым в кристаллах, не содержащих уран-гидроксильные комплексы (кристаллы LiF(U) типа I). Ранее нами было установлено, что в диапазоне $10^2...10^6$ Гр воздействие радиации на кристаллы LiF(U) типа I не приводит ни к изменению соотношений между полосами в спектре ИФЛ [14], ни к изменению времени затухания уранового свечения, ни к изменению спектра поглощения в ИК области.

Значение дозы предварительного облучения, необходимой для полного преобразования спектра ИФЛ в кристаллах типа II, зависит от количества присутствующей в кристалле примеси ОН. Для кристалла $\text{LiF(U)}-2$ мол. % LiOH такое преобразование завершается при дозе $\sim 8 \cdot 10^3$ Гр, что значительно меньше значения дозы, необходимой для достижения того же самого эффекта в процессе облучения кристалла $\text{LiF(U)}-4$ мол. % LiOH .

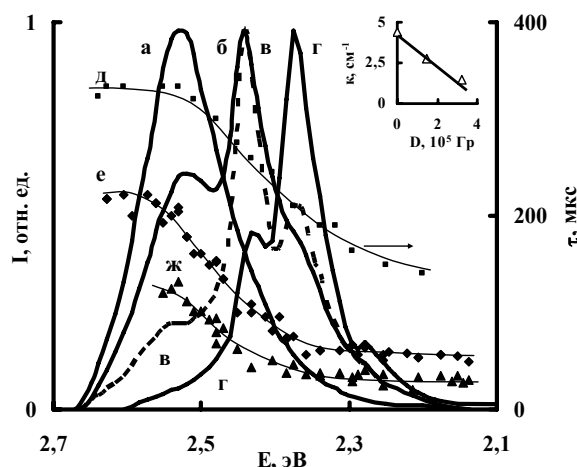


Рис. 4. Спектры ИФЛ (а-г) и дисперсия времени затухания (д-ж) при 300 К в кристалле $\text{LiF(U)}-4$ мол. % LiOH при различных значениях поглощенной кристаллом дозы электронного облучения: необлученный кристалл (а, д), $2 \cdot 10^4$ (б, е), $1 \cdot 10^5$ (в) и $3 \cdot 10^5$ Гр (г, ж). Спектры измерены через 10 мкс после окончания действия импульса возбуждения и нормированы по максимальной полосе в спектрах. На вставке: зависимость коэффициента поглощения в полосе на $0,41$ эВ в спектре этого же кристалла от дозы облучения

Необходимо отметить, что в облученных кристаллах LiF(U) азотным лазером возбуждается ИФЛ не только урановых комплексов, но и центров окраски. Свечение, в частности, F_3^+ -центров окраски (полоса на $2,33$ эВ с полушириной $0,3$ эВ) приводит к искажению как ширины линий излучения урановых комплексов, так и кинетических

кривых затухания (появление наносекундного компонента затухания). Разница значений временных параметров затухания свечения УИК (мкс) и F_3^{+} -центров (нс) позволила разделить спектры ИФЛ активатора и F_3^{+} -центров во времени. Представленные на рис. 4 спектры измерены через 10 мкс после окончания действия лазерного импульса и не искажены наложением полосы свечения F_3^{+} -центров.

4. Облучение кристаллов ионизирующей радиацией приводит не только к перераспределению интенсивностей полос в спектре ИФЛ кристаллов $LiF(U)-OH$, но и одновременно к изменению времени затухания такого свечения (рис. 4). Как следует из представленных результатов, с ростом дозы предварительного облучения наблюдаются два процесса. Во-первых, происходит смещение центра тяжести спектра уранового свечения в длинноволновую область за счет увеличения интенсивности длинноволновых переходов и, во-вторых, имеет место увеличение вероятности всех излучательных переходов в спектральном диапазоне 2,6...2,1 эВ.

Наименьшее время затухания уранового свечения наблюдается при тех значениях поглощенной дозы, при которых закончилось радиационное преобразование УИК в кристалле типа II и спектры ИФЛ кристаллов типа II и I начинают совпадать. Как было показано выше, величина этой дозы зависит от исходной концентрации примеси OH в кристалле.

Таким образом, время затухания уранового свечения зависит в необлученных кристаллах LiF от концентрации присутствующей примеси OH, а в облученных кристаллах, содержащих примесь OH — от величины поглощенной дозы.

Независимо от способа получения спектра ИФЛ (вариацией концентрации OH или дозы предварительного облучения) обнаружено существование корреляции между типом спектра ИФЛ урана (т. е. положением его центра тяжести) и временем затухания свечения. Возможна и обратная процедура: восстановление типа спектра, т. е. соотношения полос в спектре ИФЛ, по величине времени затухания любого из переходов в диапазоне 2,6...2,1 эВ.

5. Описанные выше закономерности изменения в результате облучения заселенности излучательных состояний и вероятности излучательных переходов в спектре свечения урановых комплексов, очевидно, есть результат радиационного преобразования примеси OH, входящей в состав уранового излучательного комплекса. Действительно, одновременно, с ростом дозы облучения падает поглощение в полосе на 0,41 эВ (рис. 4, вставка), свидетельствующее об уменьшении числа присутствующих в кристалле комплексов уран-гидроксил (или UO_2-OH).

Наводимые радиацией изменения в спектре ИФЛ обратимы: отжиг при 600 К восстанавливает и прежнее соотношение интенсивностей полос в спектре ИФЛ, и время затухания свечения, и спектр поглощения в ИК области.

В соответствии с приведенной на рис. 1 (вставка) закономерностью, наблюдаемой в необлученных кристаллах, корреляция между коэффициентами поглощения в максимумах полос на 4,0 и 0,41 эВ и количеством присутствующей в кристалле примеси OH должна соблюдаться и в облученных кристаллах. Тогда следует полагать, что облучением разрушаются не только центры, ответственные за полосу на 0,41 эВ (рис. 4, вставка), но и центры, ответственные за поглощение на 4,0 эВ. Однако проверить предположение не представляется возможным из-за наложения в спектрах облученных кристаллов двух полос — на 4,0 и 3,5 эВ. Последняя, по-видимому, обусловлена центрами типа V_k , концентрация которых растет с ростом поглощенной дозы.

4. Обсуждение результатов

Ранее нами было показано, что процесс разгорания ИФЛ в каждой из полос спектра зеленого свечения урана носит моноэкспоненциальный характер [14]:

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

где $\tau=40$ нс и одинаково во всей спектральной области 2,6...2,1 эВ.

Величина характеристического времени разгорания свечения урановых комплексов не является структурно-чувствительной характеристикой УИК, т. к. не зависит ни от количества примеси OH в кристалле, ни от величины дозы предварительного облучения кристалла.

По результатам настоящей работы структурно-чувствительными характеристиками УИК являются соотношение интенсивностей полос в спектре ИФЛ в диапазоне 2,6...2,1 эВ и вероятность излучательных переходов (время затухания свечения урановых комплексов). Присутствие в необлученных кристаллах примеси OH приводит к полному или частичному изменению ближайшего окружения линейного уранильного комплекса и, как следствие — к изменению времени затухания и соотношения интенсивности полос в спектрах свечения (рис. 2). Величина стоксового сдвига, определяемого как разница между энергией возбуждения (3,68 эВ) и положением излучательного перехода максимальной интенсивности, зависит от количества гидроксильных ионов, вводимых в кристалл. Увеличение присутствующей в кристалле примеси приводит к уменьшению величины стоксового сдвига с 1,30 эВ в спектре кристалла $LiF(U)$ типа I, не содержащего уран-гидроксильных комплексов, до 1,13 эВ — в спектре кристалла $LiF(U)-4$ мол. % $LiOH$.

Результат воздействия радиации на кристалл, заключающийся в смещении центра тяжести спектра ИФЛ в длинноволновую область с ростом дозы радиации (рис. 3), подобен изменениям, наблюдаемым в спектре ИФЛ в необлученном кристалле с уменьшением содержания OH (рис. 2 и 4). Обнаруженный эффект является не только прямым доказательством присутствия примеси OH в окружении линейного уранильного комплекса, но и свиде-

тствует о радиационном методе выведения примеси ОН из состава УИК.

О разрушении под действием радиации уран-гидроксильных комплексов говорит также уменьшение поглощения в полосе на 0,41 эВ с ростом дозы предварительного облучения кристаллов LiF(U) типа II (рис. 4, вставка).

Отсутствие влияния радиации в широком интервале доз $10^2 \dots 10^6$ Гр [14] на вид спектра ИФЛ кристаллов LiF(U) типа I свидетельствует о высокой радиационной стойкости УИК, не содержащих в качестве ближайшего окружения ионы OH^- .

Как свидетельствуют результаты настоящей работы, величина характеристического времени затухания свечения УИК зависит от следующих параметров: величины поглощенной кристаллом дозы, количества присутствующей в кристалле примеси ОН и от энергии излучательного перехода. Увеличение энергии излучательного перехода сопровождается увеличением времени жизни центра в соответствующем излучательном состоянии для УИК с различным количеством примеси в составе УИК.

Присутствие примеси ОН в кристалле приводит к формированию некоторых промежуточных структур, отличающихся количеством ионов OH^- в составе УИК. Увеличение числа ионов OH^- в составе излучательного уранового комплекса сопровождается увеличением характеристического времени затухания во всем спектральном интервале 2,6...2,1 эВ.

Облучение кристалла, содержащего в составе УИК ионы OH^- , вызывает радиационную модификацию урановых комплексов, видимо, включающую разрушение ионов OH^- и, как следствие, уменьшение их числа в составе УИК. Это в свою очередь приводит к уменьшению числа уран-гидроксильных комплексов, проявляющихся в спектрах поглощения в ИК области. (Радиационное разрушение ионов OH^- в кристаллах LiF—ОН доказано в [11, 12]).

Наименьшее значение времени затухания свечения (90 мкс в области 2,55 эВ) есть характеристика уранового излучательного комплекса, не содержащего в своем составе ионы OH^- . Спектр свечения такого комплекса не меняется с ростом дозы облучения, что говорит в пользу отсутствия в составе УИК радиационно-нестойких ионов OH^- .

По-видимому, уранильной линейной группой $(\text{UO}_2)^{2+}$, в экваториальной плоскости которой находятся ионы F^- , принадлежит спектр ИФЛ, обладающий следующим набором характеристик: максимальная интенсивность излучения в области 2,38 эВ; соотношение интенсивностей полос на 2,28, 2,38 и 2,46 эВ, как 1:5:1; диапазон значений времени затухания 90...50 мкс в зависимости от энергии перехода в области 2,6...2,1 эВ (рис. 2, кривые з, э). Теоретические оценки [15–17] говорят в пользу возможности такой интерпретации зеленой люминесценции УИК в ЩГК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слесарев А.И., Жамангулов А.А., Кидибаев М.М., Кортон В.С., Шульгин Б.В. Термостимулированная экзоелектронная эмиссия кристаллов фторидов лития и натрия, активированных ураном // Письма в ЖТФ. — 2000. — Т. 26. — № 9. — С. 60–64.
2. Феофилов П.П. О природе элементарных осцилляторов иона урана // Оптика и спектроскопия. — 1960. — Т. 8. — Вып. 6. — С. 824–827.
3. Parrot R., Naud C., Delbecq C.J., Yuster P.H. Optical and ESR studies of U^{3+} luminescent molecular centers in x- and γ -irradiated LiF- U_2O_8 crystals // Physical Review B. — 1977. — V. 15. — № 1. — P. 137–145.
4. Dalvi A.G.I., Sastry M.D., Joshi B.D. Trap level spectroscopy of actinide-doped phosphors: I. LiF: UO_2^{2+} and LiF: ^{241}Am // J. Phys. C: Solid State Phys. — 1984. — V. 17. — P. 5851–5863.
5. Lupei A., Lupei V., Ursu L. Impurities effects on the U^{6+} luminescence in LiF // J. Phys. C: Solid State Phys. — 1985. — V. 18. — P. 6099–6107.
6. 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.
7. Lupei A., Lupei V. On the nature of U^{3+} centers in LiF // Phys. Stat. Sol. (b). — 1979. — V. 94. — № 301. — P. 301–307.
8. Алешкевич Н.И., Титков У.Ф., Комяк А.И., Шолох В.Г. Спектры поглощения монокристалла LiF, активированного шестивалентным ураном // Журнал прикладной спектроскопии. — 1980. — Т. 33. — Вып. 6. — С. 1060–1064.
9. 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. L 437–L 439.
10. 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 кислородсодержащими примесями // Оптика и спектроскопия. — 1986. — Т. 61. — № 3. — С. 542–549.
11. Akhvediani Z.G., Berg K.Y., Berg G. Formation and annealing of hydrogen centers in OH^- containing X-irradiated LiF crystals // Crystal Lattice Defects. — 1980. — V. 8. — № 4. — P. 167–175.
12. Ахведиани З.Г. U-центры в гамма-облученных кристаллах LiF:OH // Журнал прикладной спектроскопии. — 1989. — Т. 50. — Вып. 3. — С. 498–500.
13. Беляев Л.М., Перекалина З.Б., Варфоломеева В.Н., Панова В.П., Добржанский Г.Ф. Люминесцентные свойства фторида лития, активированного ураном // Кристаллография. — 1960. — Т. 5. — № 5. — С. 757–760.
14. Лисицына Л.А., Олешко В.И., Лисицын В.М., Путинцева С.Н. Кинетические параметры уранового свечения в кристаллах LiF // Известия Томского политехнического университета. — 2007. — Т. 311. — № 2. — С. 69–74.
15. McGlynn S.P., Smith L.K. The electronic structure, spectra and magnetic properties of actinyl ions. Part I. The uranyl ion // Journal of molecular spectroscopy. — 1961. — V. 6. — P. 164–187.
16. Дяткина М.Е., Марков В.П., Цапкина И.В., Михайлов Ю.Н. Электронное строение группы UO_2 в соединениях уранила // Журнал неорганической химии. — 1961. — Т. 6. — Вып. 3. — С. 575–580.
17. Онопо Д.Е., Пашнина Е.П., Старостин Н.В. О природе люминесценции ионов шестивалентного урана в различных кристаллических основах // Оптика и спектроскопия. — 1977. — Т. 43. — Вып. 5. — С. 901–905.

Поступила 25.01.2008 г.