

*На правах рукописи*

**Путинцева Светлана Николаевна**

**ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ  
КРИСТАЛЛОВ ФТОРИДА ЛИТИЯ,  
АКТИВИРОВАННЫХ УРАНОМ, ПРИ ИМПУЛЬСНОМ  
ВОЗБУЖДЕНИИ**

Специальность 01.04.07 - физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук**

**Томск – 2008**

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор, заслуженный деятель науки РФ

***Лисицын Виктор Михайлович***

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор

***Тюрин Юрий Иванович***

кандидат физико-математических наук,

***Шамирзаев Тимур Сезгирович***

Ведущая организация: ***Уральский государственный технический  
университет, г. Екатеринбург***

Защита состоится 3 декабря 2008 г. в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.269.02 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «30» октября 2008 г.

Ученый секретарь совета по защите  
докторских и кандидатских диссертаций  
доктор физико-математических наук

Коровкин М.В.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **АКТУАЛЬНОСТЬ И СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ**

Исследования стимулированных радиацией процессов в кристаллах LiF являются актуальными в связи с широким использованием активированных кристаллов LiF в качестве рабочих веществ для термолюминесцентных, сцинтилляционных, абсорбционных, электро-парамагнитных и термоэкзоэмиссионных детекторов корпускулярного и электромагнитного излучений. Благодаря тканеэквивалентности, активированные кристаллы LiF уже широко используются в радиобиологии и медицине в качестве дозиметров ионизирующих излучений.

Одной из перспективных систем являются кристаллы LiF, активированные ураном. Несмотря на большое количество публикаций по результатам исследований люминесценции кристаллов LiF(U) с использованием стационарных методов, эта система остается слабо изученной. Ни природа урановых излучательных комплексов (УИК), ни механизм возбуждения свечения урана, ни роль кислорода в процессе его возбуждения до сих пор не ясны. Информация о кинетических характеристиках свечения отсутствует, а процесс накопления центров окраски (ЦО) в легированных кристаллах слабо изучен. Предполагается, что для создания излучательного состояния урана в кристаллах LiF(U) необходимо присутствие кислорода. Предложен УИК типа  $(\text{UO}_5\text{F})^0$ , высокая эффективность создания которого обусловлена его зарядовой нейтральностью, а дискретная структура спектра свечения обусловлена излучательными переходами различной спиновой мультипольности на общую систему колебательных уровней основного состояния УИК.

Альтернативная точка зрения заключается в предположении о присутствии в спектрах свечения урана излучательных переходов, принадлежащих различным типам УИК, отличающихся числом и расположением атомов кислорода в ближайшей координационной сфере урана и типом дефектов, входящих в решетку в процессе выращивания для локальной компенсации зарядов комплексов.

Появление методов импульсной люминесцентной спектроскопии с наносекундным временным разрешением позволило достигнуть прогресса в

понимании природы люминесценции. Высокая информативность метода импульсной катодолюминесцентной спектрометрии с временным разрешением позволяет получать новые сведения о стимулированных радиацией процессах, которые невозможно получить стационарными методами.

Представляется, что исследования спектрально-кинетических характеристик свечения кристаллов LiF(U) и LiF, содержащих различное количество соактиваторов  $O^{2-}$  и  $OH^-$ , с использованием методов импульсной люминесцентной спектрометрии с наносекундным временным разрешением в широких спектральном, временном интервалах и поглощенной кристаллами дозе позволят получить важную информацию о влиянии дорадиационных и радиационных дефектов в кристаллах на характеристики свечения УИК, о природе УИК и механизмах возбуждения люминесценции урана.

#### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются выращенные в Государственном оптическом институте им. Вавилова методом Стокбаргера кристаллы LiF (с содержанием примеси кислорода от  $6.5 \cdot 10^{-5}$  до  $2 \cdot 10^{-3}$  вес.% по данным протон-активационного анализа) и выращенные в Институте физики национальной академии наук Кыргызстана методом Киропулоса на воздухе в платиновом тигле кристаллы LiF(U) двух партий с одинаковым содержанием азотнокислого уранила ( $UO_2(NO_3)_2$ ) по шихте, равным 0.01 мол.%. В одной из партий дополнительно в шихту при выращивании кристаллов вводился гидрат окиси лития (LiOH) в количестве от 0.5 до 4 мол.%.

#### ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Целью настоящей работы является исследование люминесценции кислородсодержащих кристаллов фторида лития, активированных и не активированных ураном, при возбуждении импульсами сильноточных электронных пучков (СЭП) и лазерного излучения.

Для достижения поставленной цели было необходимо:

- отработать методику исследования люминесцентных свойств кислородсодержащих кристаллов LiF и LiF(U), определить оптимальные режимы облучения образцов и регистрации люминесценции при различных методах ее возбуждения;

- изучить спектрально-кинетические характеристики импульсных фото- (ИФЛ) и катодолюминесценции (ИКЛ) кислородсодержащих кристаллов LiF и LiF(U);
- исследовать влияние предварительного облучения на спектрально-кинетические характеристики ИФЛ и ИКЛ кислородсодержащих кристаллов LiF и LiF(U);
- рассмотреть процессы возбуждения люминесценции урана в кислородсодержащих кристаллах LiF(U).

Указанные задачи решались в рамках выполнения следующих проектов: научных программ «Университеты России» (№ 01980005342, 1998-2000 г.; № УР. 06.01.023, 2002-2003 г.); гранта РФФИ (МАС 01-02-18035, 2001-2002 г.); г/бюджетной темы (НИР № 1.79.06, 2006-2010 г.); индивидуального гранта ТПУ для молодых ученых на проведение научных исследований (2008 г.).

#### НАУЧНАЯ НОВИЗНА

1. Впервые установлено, что в кислородсодержащих кристаллах LiF и LiF(U) при возбуждении электронами возникает люминесценция в области 2.7 - 4 эВ одинакового спектрального состава с максимумами на 3.1 и 3.7 эВ, обусловленная наличием в кристаллах примеси кислорода, кинетические параметры которой меняются при введении в кристаллы примеси урана.

Впервые изучены кинетические характеристики процессов разгорания и затухания свечения кислородсодержащей примеси в полосе на 3 эВ. Обнаружено влияние соактиваторов урана и гидроксильных ионов на интенсивность и величину характеристического времени затухания свечения.

Обнаружено, что характеристическое время разгорания люминесценции УИК не является его структурно-чувствительной характеристикой, в то время как характеристическое время затухания люминесценции урана зависит от количества присутствующих в кристалле уран-гидроксильных комплексов и величины поглощенной кристаллом LiF(U) дозы.

2. Установлено влияние предварительного облучения на спектрально-кинетические характеристики ИКЛ урана в кристаллах LiF(U) с заведомо введенной примесью LiOH в шихту. В кристаллах LiF(U), в которых отсутствуют уран-гидроксильные комплексы (не наблюдается полоса

поглощения на 0.41 эВ), УИК радиационно-стойки (спектрально-кинетические характеристики свечения комплексов не зависят от дозы в области  $10^2 - 10^6$  Гр).

Процесс радиационного преобразования спектрально-кинетических характеристик УИК, содержащих  $\text{OH}^-$  ионы, обратим. Отжиг кристаллов при 600 К восстанавливает первоначальные характеристики свечения.

3. Впервые обнаружено влияние способа возбуждения кристаллов  $\text{LiF(U)}$  на кинетику процесса разгорания свечения УИК при 300 К. При оптическом возбуждении люминесценции урана характеристическое время разгорания равно 40 нс и одинаково во всем спектральном диапазоне 2.1 - 2.7 эВ. При электронном возбуждении дополнительно к наносекундному компоненту разгорания свечения, величина характеристического времени которого совпадает с величиной времени разгорания при оптическом возбуждении, возникает компонент в микросекундном временном интервале с величиной характеристического времени, равной 2.5 мкс.

Предварительное облучение кристаллов  $\text{LiF(U)}$  приводит к падению интенсивности ИФЛ урановых комплексов, а также к изменению соотношения интенсивности наносекундного и микросекундного компонентов разгорания ИКЛ УИК. В области доз  $\leq 10^4$  Гр в исследуемых кристаллах наблюдается рост интенсивности наносекундного компонента разгорания свечения и падение микросекундного компонента.

4. Показано, что образование ЦО не является конкурирующим захвату электронов на уране процессу, а сами ЦО не являются компонентами УИК даже в области доз более  $10^6$  Гр.

Определено, что эффективность создания и накопления ЦО  $\text{F}_2$  и  $\text{F}_3^+$  (в области доз  $\leq 10^5$  Гр) в кристаллах  $\text{LiF(U)}$  выше, чем в кристаллах  $\text{LiF}$ .

5. Предложен экситонный механизм возбуждения катодоллюминесценции урановых комплексов в кристаллах  $\text{LiF(U)}$ .

#### ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Экспериментальные результаты, полученные в работе, могут быть полезны для развития представлений о физических процессах, развивающихся в активированных ионных кристаллах. Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для разработки методов управления

радиационной стойкостью кристаллов и создания новых методов контроля дефектной структуры исследуемых объектов. Результаты составляют информационную базу для импульсных фото- и катодолюминесцентных анализов кристаллов LiF(U).

### ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Спектрально-кинетические характеристики кислородных центров (излучательные переходы на 3, 3.1 и 3.7 эВ, инициированные импульсами электронов) в кристаллах LiF и LiF(U) во временном интервале  $10^{-8}$  -  $10^{-1}$  с и интервале доз предварительного облучения 0 -  $10^6$  Гр.

2. Люминесценция урановых комплексов в области 2.1 - 2.7 эВ в кристаллах LiF(U) имеет спектр, количество и интенсивность полос которого, а также время затухания определяются соотношением соактиваторов  $O^{2-}$  и  $OH^-$  в кристалле. Способ возбуждения кристалла не влияет на тип спектра, но определяет кинетику процесса разгорания свечения урановых комплексов, которая при оптическом возбуждении (3.68 эВ) носит моноэкспоненциальный характер ( $\tau_1=40$  нс), а при электронном возбуждении – описывается в каждой из полос спектра совокупностью двух экспонент ( $\tau_1=40$  нс,  $\tau_2=2.5$  мкс) при 300 К.

3. Предварительное облучение урансодержащих кристаллов ( $\leq 10^6$  Гр) приводит к изменению соотношения интенсивности наносекундного и микросекундного компонентов разгорания катодолюминесценции урановых комплексов, росту ее интенсивности (в области доз  $\leq 10^4$  Гр в исследуемых кристаллах), падению интенсивности фотолюминесценции урановых комплексов и радиационному тушению кислородных центров (3.1 и 3.7 эВ) во всем исследованном интервале доз.

Действие ионизирующей радиации сопровождается изменением соотношения между урановыми излучательными комплексами, содержащими  $O^{2-}$  и / или  $OH^-$  ионы, в результате радиационного разрушения гидроксильных ионов, что приводит к изменению как соотношения полос в спектре люминесценции урановых комплексов, так и времени ее затухания. Поглощенные кристаллом дозы радиации, при которых спектр люминесценции в области 2.1 - 2.7 эВ обусловлен только излучательным комплексом

радиационно-устойчивого типа, не содержащим ионы гидроксила, определяются исходной концентрацией уран-гидроксильных комплексов.

4. Присутствие урана в кристаллах LiF увеличивает эффективность создания и накопления центров окраски  $F_2$  и  $F_3^+$  в области доз  $\leq 10^5$  Гр по сравнению с кристаллами, не содержащими уран. Присутствие центров окраски в кристалле не влияет на спектрально-кинетические характеристики катодоллюминесценции урановых излучательных комплексов.

#### **АПРОБАЦИЯ И ПУБЛИКАЦИИ**

Результаты настоящей работы докладывались 7 конференциях и семинарах. Основное содержание работы опубликовано в 10 печатных работах (5 статей в рецензируемых журналах, 4 статьи в сборниках трудов международных конференций, 1 тезисы доклада международной конференции).

#### **СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения. Диссертация изложена на 173 страницах машинописного текста, включая 83 рисунка, 11 таблиц, список литературы (155 наименований).

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении дана общая характеристика работы, анализ современного состояния проблемы, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, выносимые на защиту положения, научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава диссертации является обзорной. Описаны известные результаты исследований спектрально-кинетических характеристик кристаллов LiF(U). Проведен сравнительный анализ спектрально-кинетических характеристик урана в различных матрицах. Показано, что люминесценция урановых центров в различных матрицах наблюдается в области 2.1 - 2.7 эВ лишь в том случае, когда в образцах присутствует кислород. Описаны типы УИК, предполагаемые механизмы свечения в них. Обозначен круг нерешенных проблем, обоснованы цели и задачи исследования, пути их решения.

Во второй главе приведено описание использованной для исследований экспериментальной техники, методики импульсных фото- и катодоллюминесцентной спектрометрии с временным разрешением. Описана

дозиметрия потока излучения импульсного ускорителя. Приведено описание градуировки спектральной чувствительности оптического спектрометра и измерения временных интервалов. Описана методика обработки кинетических кривых и построения спектров люминесценции. Произведена оценка погрешности измерений.

Третья глава посвящена описанию выбранных для исследования кристаллов и их дефектности, проявляющейся в спектрах поглощения в области 0.05 - 12.5 эВ. Обсуждается природа полос поглощения в кислородсодержащих кристаллах LiF и LiF(U).

Особо чистые кристаллы LiF (с содержанием кислорода  $C \leq 6.5 \cdot 10^{-5}$  вес.%) имели границу прозрачности около 12 эВ. Кристаллы LiF-O с концентрацией кислорода  $6.5 \cdot 10^{-5} < C \leq 2 \cdot 10^{-4}$  вес.% имели ряд полос в УФ области спектра и были прозрачны в ИК области. Кристаллы LiF-O,OH с содержанием примеси кислорода  $4 \cdot 10^{-4} \leq C \leq 2 \cdot 10^{-3}$  вес.% имели тот же набор полос поглощения в УФ области, что и кристаллы LiF-O, и дополнительно поглощение в ИК области, обусловленное гидроксильными ионами (табл. 1).

Таблица 1. Положение полос поглощения кислородсодержащих кристаллов LiF и LiF(U) в спектральном диапазоне 0.05 - 12.5 эВ при 300 К

Кристалл	E, эВ													
	10.51	9.05		7.3	6.2									
LiF-O	10.51	9.05		7.3	6.2									
LiF-O,OH	10.51	9.05		7.3	6.2							0.44 - 0.47		0.35 - 0.38
LiF [1]	10.6	9.05		7.3	6.2							0.44 - 0.46	---	---
LiF(U)-O	---	---	---	---	---	4.96	4.07	3.02				0.44 - 0.47		0.35 - 0.38
LiF(U)-O,OH	---	---	---	---	---		4.07	3.02				0.44 - 0.47	0.41	0.35 - 0.38
LiF(U) [2]	---		8.73	7.65	6.23	5.17	4.01	3.08	2.52	2.41	2.35	---	---	---
LiF(U) [3]	9.76			7.52	6.2	5.08	4.07	3.06	---	---	---	---	---	---
LiF(U) [4]	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.44 - 0.46	0.41	0.35 - 0.37

--- – неизмеренная область спектра.

Кристаллы LiF(U)-O и LiF(U)-O,OH (выращенные с преднамеренно введенным в шихту LiOH в количестве 0.5 - 4 мол.%) имели в ИК области полосы поглощения, обусловленные гидроксильными ионами. Отличием кристаллов является присутствие в спектрах поглощения кристаллов LiF(U)-O,OH в ИК области дополнительной полосы на 0.41 эВ, обусловленной уран-гидроксильными комплексами (табл. 1).

Нами обнаружена линейная зависимость между величиной вводимой в

шихту при выращивании кристаллов LiF(U) примеси LiOH и поглощением в полосах на 4.07 и 0.41 эВ.

Предполагается, что полосы поглощения в спектрах исследованных нами кристаллов обусловлены наличием следующих центров: в диапазоне 6.2 - 10.51 эВ и на 4.77 эВ – кислорода в виде  $O^{2-}$ ,  $OH^-$  и содержащих кислород комплексов; в области 3.02 - 4.96 эВ – урановых центров; в области 0.44 - 0.47 эВ – ионов  $OH^-$  и комплексов, содержащих  $OH^-$  ионы; на 0.41 эВ – уран-гидроксильных комплексов.

В четвертой главе изложены результаты исследования спектрально-кинетических характеристик ИКЛ кислородсодержащих кристаллов LiF, LiF(U) и ИФЛ кислородсодержащих кристаллов LiF(U). Обсуждается природа полос люминесценции кристаллов. Описаны выявленные закономерности влияния примеси кислорода и урана на характеристики этого свечения. Приведены результаты исследований влияния способа возбуждения на процесс разгорания люминесценции урановых комплексов в кристаллах LiF(U).

Спектр люминесценции урансодержащих кристаллов LiF состоит из двух групп полос, одна из которых (в области 2.7 - 4 эВ) принадлежит переходам на кислородсодержащей примеси, другая (в области 2.1 - 2.7 эВ) – обусловлена переходами на излучательных комплексах, содержащих в своем составе уран.

*Люминесценция в области 2.7 - 4 эВ.* Кислородная полоса на 3 эВ с полушириной 0.7 эВ (рис. 1, табл. 1) в спектрах ИКЛ кристаллов LiF с содержанием кислорода  $C \leq 6.5 \cdot 10^{-5}$  вес.% (на порядок меньшим, чем в кристаллах LiF-O и LiF-O,OH) и кислородсодержащих кристаллов LiF(U) не обнаружена. В кислородсодержащих кристаллах LiF(U) присутствие примеси урана подавляет свечение в полосе на 3 эВ.

В кислородсодержащих кристаллах LiF и LiF(U) при 300 К импульсом СЭП возбуждается ИКЛ, спектры которой, измеренные через 50 нс после начала действия импульса СЭП, одинаковы и состоят из полос на 3.1 и 3.7 эВ (рис. 1) со значением полуширины 0.4 эВ. Очевидно, что в обоих кристаллах описанные полосы принадлежат излучательным переходам на кислородных центрах, не содержащих уран.

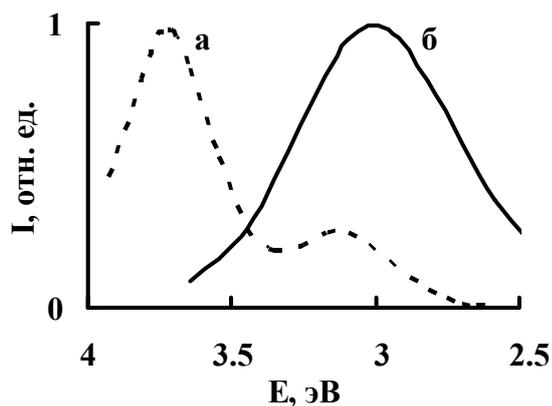


Рис. 1. Спектры ИКЛ, измеренные через 50 нс (а) и 300 мкс (б) после начала действия импульса СЭП при 300 К, кислородсодержащих кристаллов LiF (а, б) и LiF(U) (а). Спектры нормированы.

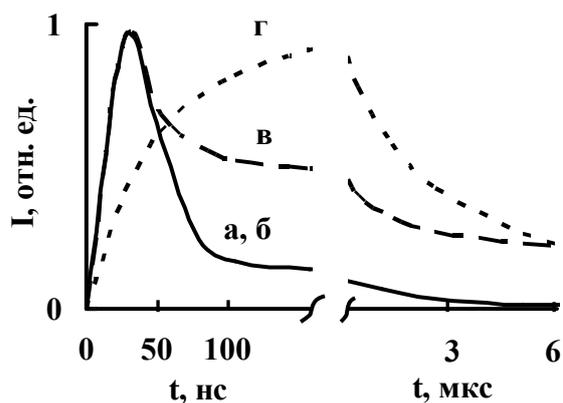


Рис. 2. Кинетические кривые ИКЛ на 3.1 (а, в) и 3.7 эВ (б, г) в спектре кислородсодержащих кристаллов LiF (а, б) и LiF(U) (в, г) при 300 К. Кривые нормированы.

Таблица 2. Кинетические характеристики процесса разгорания ( $\tau_p$ ) и затухания ( $\tau_3$ ) полос ИКЛ на 3.7, 3.1 и 3 эВ кислородсодержащих кристаллов LiF и LiF(U) при 300 К

E, эВ		Временные характеристики, мкс			
		LiF*	LiF-O, LiF-O,OH	LiF(U)-O	LiF(U)-O,OH
3.7	$\tau_p$	$\leq 3 \cdot 10^{-2}$	$\leq 3 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$
	$\tau_3$	$4 \cdot 10^{-2}$ (90 %; 8%), 2.5 (9.8 %; 51%), 100	$4 \cdot 10^{-2}$ (90 %; 8 %), 2.5 (9.8 %; 51%), 100	2.5 (90 %; 53 %), 20	2.5
3.1	$\tau_p$	$\leq 3 \cdot 10^{-2}$	$\leq 3 \cdot 10^{-2}$	$\leq 3 \cdot 10^{-2}$	$\leq 3 \cdot 10^{-2}$
	$\tau_3$	$4 \cdot 10^{-2}$ (90 %; 8%), 2.5 (9.8 %; 51%), 100	$4 \cdot 10^{-2}$ (90 %; ?), 2.5, ?	$4 \cdot 10^{-2}$ (50 %; 0.1 %), 2.5 (10 %; 1%), 50	$4 \cdot 10^{-2}$ (50 %; 2%), 2.5
3	$\tau_p$	полоса отсутствует	20	полоса отсутствует	
	$\tau_3$	полоса отсутствует	350 - 100**	полоса отсутствует	

Примечание: в скобках указаны вклады компонентов затухания свечения в амплитудное значение интенсивности и вклады их светосумм; \* – содержание кислорода  $\leq 6.5 \cdot 10^{-5}$  вес.%; \*\* –  $\tau_3$  падает при увеличении содержания кислорода в кристаллах от  $2 \cdot 10^{-4}$  до  $2 \cdot 10^{-3}$  вес.%.

Введение примеси OH в кристаллы LiF(U) не влияет на время разгорания в полосах на 3.1 и 3.7 эВ, однако, приводит к изменению времени затухания этих полос (подавляет длинновременной компонент затухания свечения) (табл. 2).

*Люминесценция в области 2.1 - 2.7 эВ.* Введение урана в кислородсодержащие кристаллы LiF приводит к возникновению люминесценции УИК, которая возбуждается в кристаллах LiF(U)-O и LiF(U)-O,OH при 300 К как импульсом СЭП, так и импульсом лазерного излучения с энергией кванта 3.68 эВ. Следовательно, заселение одних и тех же

излучательных состояний осуществляется как без участия свободных носителей заряда, так и при создании электронно-дырочных пар в кристалле.

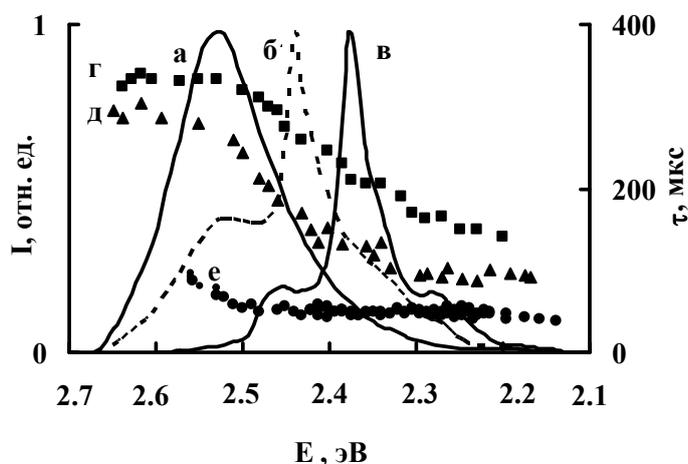


Рис 3 Спектры ИФЛ, измеренные через 50 нс после начала действия импульса возбуждения (а - в), и дисперсия времени затухания свечения (г - е) кристаллов  $\text{LiF(U)-O,OH}$  с содержанием  $\text{LiOH}$  по шихте: 4 (а, г), 2 мол.% (б, д) и кристалла  $\text{LiF(U)-O}$  (в, е) при 300 К. Спектры нормированы.

также дисперсия времени затухания определяются концентрацией примеси  $\text{LiOH}$ , вводимой в шихту при выращивании кристаллов (рис. 3).

Дисперсия времени затухания свечения УИК определяет характер зависимости вида спектра свечения от временной задержки между началом действия импульса возбуждения и моментом измерения спектра.

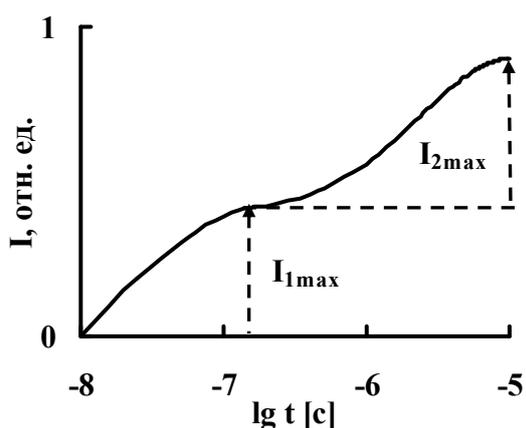


Рис 4. Кинетическая кривая разгорания ИКЛ урана в полосе на 2.38 эВ в спектре кислородсодержащих кристаллов  $\text{LiF(U)}$  при 300 К.

наносекундному компоненту

разгорания

свечения,

величина

Спектральный состав люминесценции и характер зависимости времени затухания свечения в области 2.1 - 2.7 эВ (с уменьшением энергии излучения в спектрах свечения кристаллов  $\text{LiF(U)}$  время затухания уменьшается) не зависят от способа возбуждения кристаллов.

В кристаллах  $\text{LiF(U)-O,OH}$  вид спектра ИФЛ, соотношение интенсивности полос в нем, а

Способ возбуждения свечения УИК определяет кинетику процесса разгорания. При оптическом возбуждении свечения в кислородсодержащих кристаллах  $\text{LiF(U)}$  характеристическое время разгорания в области 2.1 - 2.7 эВ равно 40 нс. При электронном возбуждении процесс разгорания носит двухстадийный характер (рис. 4): дополнительно к

характеристического времени которого совпадает со временем разгорания при оптическом возбуждении, появляется 2.5 мкс компонент разгорания. Разгорание ИКЛ в микросекундном временном интервале происходит одновременно с затуханием полос на 3.1 и 3.7 эВ в спектре свечения, принадлежащем кислородсодержащей примеси.

Спектральный состав наносекундного и микросекундного компонента разгорания ИКЛ УИК (измеренные как  $I_{1\max}=f(\lambda)$  и  $I_{2\max}=f(\lambda)$ , соответственно (рис. 4)) совпадают.

В пятой главе описаны результаты исследования влияния предварительного облучения ионизирующей радиации на спектрально-кинетические характеристики кислородсодержащих кристаллов LiF и LiF(U). Описаны выявленные закономерности влияния дозы предварительного облучения на эффективность возбуждения свечения кислородсодержащих кристаллов LiF и LiF(U). Обсуждаются процессы накопления центров окраски в исследуемых кристаллах, механизмы возбуждения свечения урановых комплексов при оптическом и электронном возбуждении.

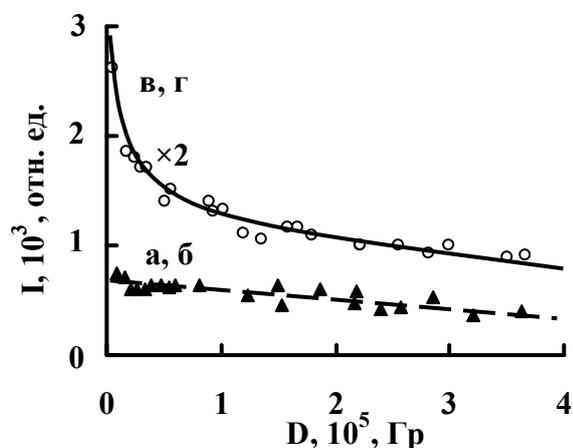


Рис. 5. Зависимости амплитудного значения интенсивности ИКЛ в полосах на 3.1 (а, б) и 3.7 эВ (в, г) от дозы предварительного облучения импульсами СЭП кислородсодержащих кристаллов LiF (а, в) и LiF(U) (б, г) при значении флюенса электронов за импульс  $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  при 300 К. Кривые нормированы.

*Люминесценция в области 2.7 - 4 эВ.* В кислородсодержащих кристаллах LiF и LiF(U) с ростом дозы предварительного облучения наблюдается радиационное тушение свечения в полосе на 3.7 эВ с одинаковой скоростью, при этом амплитудное значение интенсивности свечения в полосе на 3.1 эВ слабо зависит от величины поглощенной дозы в кристаллах обоих типов (рис. 5).

Нами установлено существование линейной зависимости амплитудного значения интенсивности в полосах на 3.1 и 3.7 эВ от флюенса электронов за импульс в диапазоне  $10^{11} - 10^{13} \text{ см}^{-2}$  в спектрах ИКЛ кислородсодержащих кристаллов LiF и LiF(U).

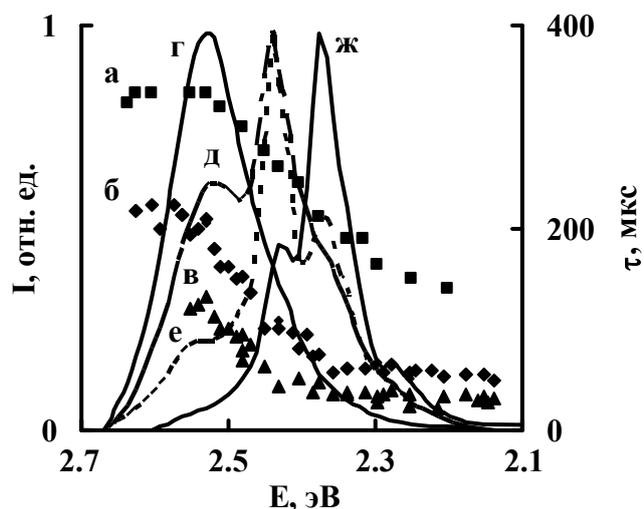


Рис. 6. Влияние дозы предварительного облучения на дисперсию времени затухания (а - в) и спектр ИФЛ (г - ж) кристалла LiF(U)-O,OH (4 мол.% LiOH по шихте) необлученного (а, г) и облученного электронами при 300 К. Значения поглощенной кристаллом дозы облучения:  $2 \cdot 10^4$  (б, д),  $1 \cdot 10^5$  (е) и  $3 \cdot 10^5$  Гр (в, ж). Спектры, измеренные через 10 мкс после начала действия импульса возбуждения, нормированы.

Действие ионизирующей радиации на кристаллы LiF(U)-O,OH приводит к разрушению уран-гидроксильных комплексов (падению полосы поглощения на 0.41 эВ) и к изменению соотношения полос в спектре люминесценции УИК в пользу длинноволновых, а также к уменьшению времени затухания люминесценции во всем спектральном диапазоне 2.1 - 2.7 эВ (рис. 6). Радиационное преобразование спектров люминесценции УИК в кристаллах LiF(U)-O,OH заканчивается с появлением спектра ИФЛ, совпадающего со спектром кристаллов LiF(U)-O с присущей ему дисперсией времени затухания. Значение дозы предварительного облучения, необходимой для полного преобразования спектра УИК в кристаллах LiF(U)-O,OH, уменьшается при уменьшении количества присутствующей в кристалле примеси OH.

Смещение центра тяжести спектра ИФЛ в длинноволновую область и падение времени затухания с ростом дозы облучения кристаллов LiF(U)-O,OH подобно изменениям спектров ИФЛ необлученных кристаллов этого типа с уменьшением содержания OH, описанных выше.

Обнаруженное влияние на спектры свечения УИК в кристаллах LiF(U)-O,OH свидетельствует о присутствии примеси ионов  $\text{OH}^-$  в составе УИК и о возможности ее радиационного разрушения под действием радиации. По-

Люминесценция в области 2.1 - 2.7 эВ. Воздействие предварительного облучения на кристаллы LiF(U)-O в диапазоне  $10^2 - 10^6$  Гр не приводит к изменению спектра ИФЛ в области 2.1 - 2.7 эВ и соотношения между наибольшими по интенсивности полосами в спектре в указанной области, а также не влияет на время затухания свечения УИК.

Действие ионизирующей радиации на кристаллы LiF(U)-O,OH приводит к разрушению уран-гидроксильных комплексов (падению полосы поглощения на 0.41 эВ) и к изменению соотношения полос в спектре люминесценции УИК в пользу длинноволновых, а также к уменьшению времени затухания люминесценции во всем спектральном диапазоне 2.1 - 2.7 эВ (рис. 6). Радиационное преобразование спектров люминесценции УИК в кристаллах LiF(U)-O,OH заканчивается с появлением спектра ИФЛ, совпадающего со спектром кристаллов LiF(U)-O с присущей ему дисперсией времени затухания. Значение дозы предварительного облучения, необходимой для полного преобразования спектра УИК в кристаллах LiF(U)-O,OH, уменьшается при уменьшении количества присутствующей в кристалле примеси OH.

видимому, существует несколько комплексов, отличающихся количеством ионов  $\text{OH}^-$  в своем составе.

Спектр свечения УИК в кристаллах  $\text{LiF(U)-O}$ , не содержащих в своем составе гидроксильные ионы, не претерпевает изменений в области доз  $\leq 10^6$  Гр, что свидетельствует об отсутствии радиационного преобразования его структуры.

Эффект радиации обратим: отжиг при 600 К кристаллов  $\text{LiF(U)-O,OH}$  приводит к восстановлению уран-гидроксильных комплексов (восстановление полосы поглощения на 0.41 эВ), а также спектра свечения и его времени затухания, измеренных в кристаллах этого типа до воздействия радиации.

Исследовано влияние параметров облучения: интегральной поглощенной кристаллом дозы ( $D$ ) и флюенса электронов за импульс ( $P$ ) на эффективность возбуждения ИКЛ и ИФЛ в кристаллах  $\text{LiF(U)-O}$  в каждой из полос спектра УИК.

Нами установлено, что амплитудное значение интенсивности наносекундного компонента ИКЛ ( $I_{1\text{max}}$  (рис. 4)) с ростом дозы предварительного облучения кристаллов  $\text{LiF(U)-O}$  при постоянном флюенсе электронов за импульс увеличивается, достигает максимума при  $D=1.7 \times 10^4$  Гр, затем уменьшается при дальнейшем росте поглощенной дозы (рис. 7). Положение максимума не зависит от флюенса электронов за импульс и при облучении кристалла серией импульсов наблюдается при одном и том же значении поглощенной дозы. На рис. 7 стрелками отмечено значение дозы ( $D=P_1 \times N_1 = P_2 \times N_2 = P_3 \times N_3$ ), при которой наблюдается максимальное значение интенсивности ( $N_1, N_2, N_3$  – количество импульсов электронов, соответствующих значениям флюенса). Таким образом, следует полагать, что рост интенсивности наносекундного компонента ИКЛ обусловлен накоплением УИК с ростом дозы облучения, при этом уменьшение интенсивности уранового свечения в области более высоких поглощенных доз обусловлено, по-видимому, радиационным преобразованием УИК в неизлучательный урановый комплекс. Однако, этот процесс не сопровождается восстановлением урана в шестивалентном состоянии, так как нами установлено, что интенсивность ИФЛ, характеризующая концентрацию шестивалентного урана в облученном

кристалле, монотонно уменьшается по мере возрастания дозы радиации (рис. 8). Необходимо отметить, что тип созданного в процессе и накопленного в кристалле УИК определяется поглощенной дозой, а интенсивность уранового ИКЛ при  $D=\text{const}$  определяется величиной флюенса электронов импульса возбуждения. На рис. 8 стрелкой показано изменение интенсивности урановой ИКЛ при увеличении флюенса электронов возбуждения в 10 раз при одном и том же значении дозы, равном  $1 \times 10^5$  Гр.

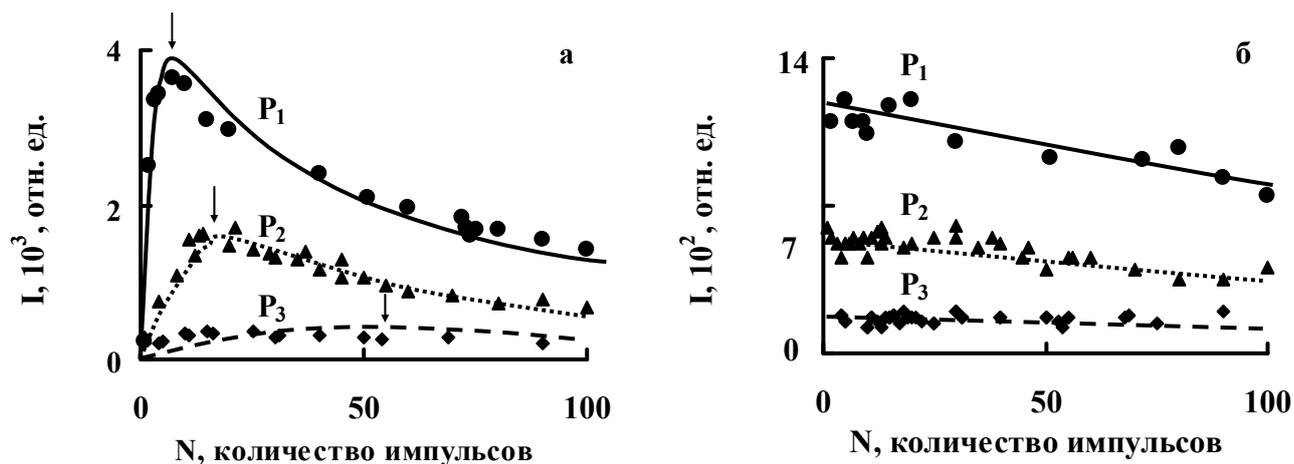


Рис. 7. Зависимость амплитудного значения наносекундного (а) и микросекундного (б) компонентов интенсивности ИКЛ в полосе на 2.38 эВ от количества импульсов облучения кристаллов LiF(U)-О электронами при 300 К при значениях флюенса:  $P_1 = 4 \times 10^{12}$ ,  $P_2 = 2 \times 10^{12}$  и  $P_3 = 4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ .

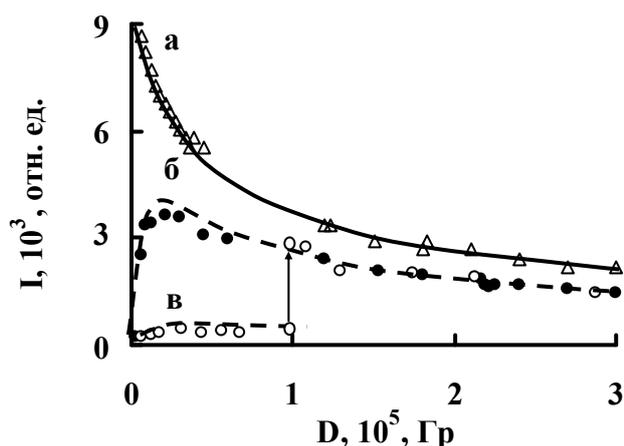


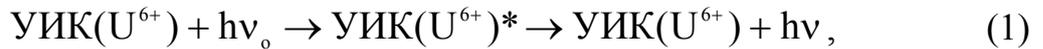
Рис. 8. Зависимости амплитудного значения интенсивности ИФЛ (а) и наносекундного компонента интенсивности ИКЛ (б, в), в полосе на 2.38 эВ от дозы предварительного облучения импульсами СЭП кристаллов LiF(U)-О при значениях флюенса:  $4 \times 10^{12}$  (а, б) и  $4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$  (в).

В отличие от представленных дозных зависимостей наносекундного компонента уранового свечения, амплитудное значение микросекундного компонента интенсивности ИКЛ ( $I_{2\text{max}}$  (рис. 4)) максимально при действии первого импульса СЭП на кристалл, затем медленно уменьшается с ростом дозы (рис. 7). Величина амплитудного значения микросекундного компонента интенсивности ИКЛ линейно зависит от флюенса электронов в импульсе в интервале

$10^{11}$  -  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Скорости радиационного тушения интенсивности микросекундного компонента уранового свечения и интенсивности полосы на 3.1 эВ, обусловленной кислородсодержащими центрами, одинаковы. Значения характеристического времени разгорания свечения УИК и затухания свечения на 3.1 эВ совпадают.

Различные зависимости интенсивности свечения при разных способах возбуждения и на разных стадиях при возбуждении кристаллов LiF(U)-О импульсами СЭП от их дозы предварительного облучения, а также отсутствие 2.5 мкс компонента разгорания ИФЛ этих кристаллов в области 2.1 - 2.7 эВ говорят о различных процессах, приводящих к возбуждению этого свечения.

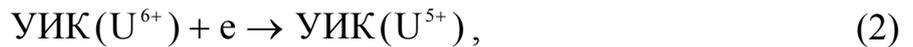
Инициированная лазерным излучением ИФЛ УИК является результатом прямого процесса:



где  $h\nu_0$  – энергия кванта возбуждения,  $\text{УИК}(\text{U}^{6+})$  – УИК, содержащий шестивалентный ион урана.

Интенсивность ИФЛ пропорциональна концентрации присутствующих в кристалле УИК, содержащих шестивалентный уран.

Мы предполагаем, что механизм возбуждения наносекундного компонента ИКЛ УИК возникает в результате двух последовательных этапов:



где  $\text{УИК}(\text{U}^{5+})$  – УИК, содержащий пятивалентный ион урана,  $p$  – зонная дырка,  $e^0$  – околодефектный экситон.

Выход реакций (2) определяется исходной концентрацией  $\text{U}^{6+}$  в кристалле и числом накопленных в процессе облучения  $\text{УИК}(\text{U}^{5+})$ , т.е. дозой предварительного облучения. Выход реакции (3) при данном значении поглощенной дозы определяется флюенсом электронов в импульсе возбуждения.

Рост числа  $\text{УИК}(\text{U}^{5+})$  приводит к уменьшению числа  $\text{УИК}(\text{U}^{6+})$ , о чем свидетельствует рост интенсивности ИКЛ и падение интенсивности ИФЛ в том же интервале поглощенных доз ( $D \leq 1.7 \times 10^4$  Гр) (рис. 8).

Высокая скорость накопления УИК( $U^{5+}$ ) под действием радиации по (2), видимо, обусловлена положительным зарядом УИК( $U^{6+}$ ), на котором происходит захват электрона (например, центры типа  $UO_2^{2-}$  или  $(UO_2^{2-})O_2^{2-}$ ).

В пользу описанного выше механизма возбуждения наносекундного компонента ИКЛ урана говорит обнаруженный в [5] в облученных кристаллах  $LiF(U)$  сигнал ЭПРа, обусловленный ионами  $U^{5+}$ , интенсивность которого с ростом дозы облучения имеет максимум в области  $10^4 - 10^5$  Гр.

Механизм возбуждения ИКЛ свечения в области 2.1 - 2.7 эВ в кристаллах  $LiF(U)-O$  в микросекундном временном интервале не ясен. Уменьшение интенсивности микросекундного компонента свечения УИК и свечения на 3.1 эВ с одинаковой скоростью в одном интервале поглощенных доз и совпадение значений характеристического времени тушения свечения на 3.1 эВ и времени разгорания свечения УИК свидетельствуют об участии кислорода в заполнении излучательного состояния  $U^{6+}$ . Предполагается, что механизм возбуждения микросекундного компонента свечения в области 2.1 - 2.7 эВ в кристаллах  $LiF(U)-O$  включает образование  $U^{5+}$  в результате переноса заряда с возбужденного атома кислорода по реакции (4):



где  $\tau$  – время жизни кислородного центра в возбужденном состоянии, равное 2.5 мкс.

Затем, в соответствии с реакцией (3), происходит создание возбужденного уранового комплекса.

Эффективность этого процесса с ростом интегральной дозы падает в связи с уменьшением исходной концентрации  $U^{6+}$ .

*Полосы свечения на 1.88 и 2.33 эВ.* В облученных кислородсодержащих кристаллах  $LiF$  и  $LiF(U)$  как импульсом СЭП, так и импульсом азотного лазера при 300 К дополнительно возбуждается свечение  $F_2$  и  $F_3^+$  ЦО (полосы на 1.88 и 2.33 эВ с полуширинами около 0.34 и 0.3 эВ, соответственно). Спектральное положение полосы свечения  $F_3^+$  центров в спектрах люминесценции кристаллов  $LiF(U)$  совпадает с положением основной полосы спектра УИК (2.38 эВ), что приводит к изменению вида кинетики в результате наложения на кинетическую кривую свечения, обусловленную урановыми комплексами, короткоживущего компонента (отмеченного на рис. 9 пунктиром). Несовпадение временных

характеристик кинетических кривых разгорания ИКЛ этих центров позволило нам разделить свечение УИК и  $F_3^+$  ЦО.

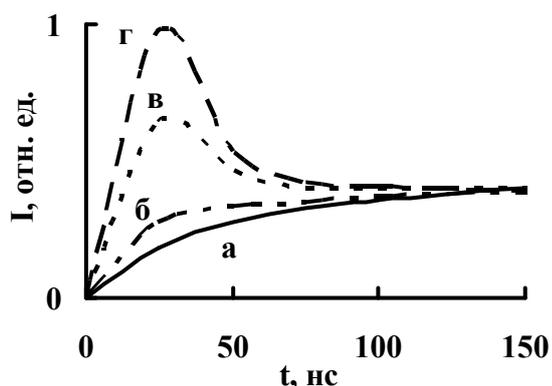


Рис. 9. Кинетические кривые ИКЛ в полосе на 2.38 эВ (а - г) при 300 К в спектре кислородсодержащего кристалла LiF(U): необлученного (а) и при различных значениях дозы предварительного облучения:  $2 \cdot 10^4$  (б),  $5 \cdot 10^5$  (в) и  $9 \cdot 10^5$  Гр (г).

кривой с насыщением. Следовательно, введение урана в кислородсодержащие кристаллы фторида лития приводит к изменению характера дозной зависимости возникающих при облучении кристаллов полос свечения ЦО  $F_2$  и  $F_3^+$ .

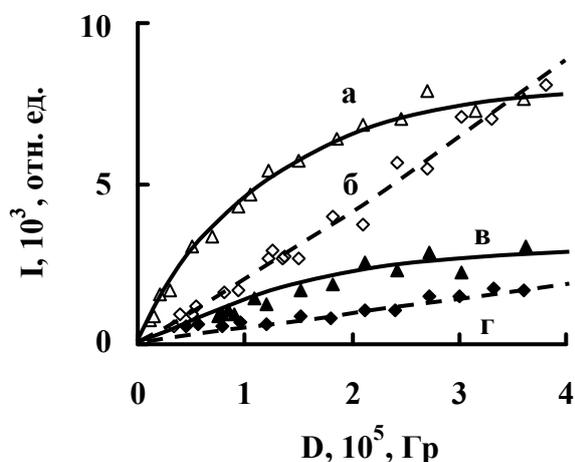


Рис. 10. Зависимость амплитудного значения интенсивности центров окраски в полосах на 1.88 (а, б) и 2.33 эВ (в, г) от дозы предварительного облучения импульсами СЭП кристаллов LiF(U)-O (а, в) и LiF-O (б, г).

конкурирует с процессом захвата электронов на УИК.

В заключении обобщены и кратко сформулированы основные результаты исследований, полученные автором.

Характер дозной зависимости интенсивности ИКЛ как в полосе на 1.88 эВ, так и в полосе на 2.33 эВ в кислородсодержащих кристаллах LiF и LiF(U) различен. По сравнению с дозной зависимостью амплитудного значения интенсивности ИКЛ в полосах на 1.88 и 2.33 эВ в кристаллах LiF-O (рис. 10), зависимость амплитудного значения интенсивности ИКЛ в этих же полосах в спектре кристалла LiF(U)-O имеет вид

Дозная зависимость интенсивности ИКЛ  $F_2$  ЦО окраски в виде кривой с насыщением свидетельствует о высоком уровне дорадиационной дефектности кристаллов LiF(U)-O и о высокой эффективности радиационного создания заряженных электронных ЦО в них.

Установлено, что ЦО в кристаллах LiF(U) не входят в состав УИК, а образование ЦО не

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

Впервые детально в широком временном ( $10^{-8}$  -  $10^{-1}$  с) и спектральном (200 - 1000 нм) диапазонах, а также в диапазоне поглощенной кристаллами дозы ( $10^2$  -  $10^6$  Гр) проведен сравнительный анализ спектрально-кинетических характеристик люминесценции кислородсодержащих кристаллов LiF и LiF(U), возбуждаемых двумя способами: импульсом СЭП со средней энергией электронов 300 кэВ и импульсом азотного лазера с энергией возбуждения 3.68 эВ. Определено влияние таких параметров облучения как флюенса электронов в импульсе и величины интегральной поглощенной дозы на спектрально-кинетические параметры люминесценции исследуемых кристаллов. Выделены индивидуальные особенности и общие характеристики кристаллов LiF и LiF(U) с различным соотношением кислородной примеси в виде  $O^{2-}$  и  $OH^-$ , которая варьировалась двумя способами: облучением кристаллов, содержащих гидроксильные ионы и преднамеренным введением гидроксильных ионов в шихту в процессе выращивания кристаллов. Предложены механизмы возбуждения люминесценции урановых комплексов. Основные результаты исследований заключаются в следующем.

1. Установлено, что спектр кристаллов LiF(U)-O состоит из хорошо разрешенных полос на 2.28, 2.38 и 2.46 эВ. В диапазоне исследованных доз предварительного облучения  $\leq 10^6$  Гр соотношение полос в спектре, характер зависимости времени затухания от длины волны, а также значение характеристического времени затухания не зависят от дозы облучения, что свидетельствует о радиационной стойкости урановых комплексов, содержащих в своем составе линейную уранильную группу  $UO_2^{2-}$ , обуславливающих свечение данного типа.

2. Показано, что отличительной особенностью необлученных кристаллов LiF(U)-O,OH по сравнению со спектрами кристаллов LiF(U)-O является присутствие дополнительной полосы на 0.41 эВ, величина поглощения в максимуме которой пропорциональна концентрации вводимой при выращивании кристаллов примеси LiOH в шихту. Установлено, что спектр ИКЛ и ИФЛ исследуемых кристаллов LiF(U)-O,OH одинаковый и состоит в области 2.1 - 2.7 эВ из ряда узких полос (рис. 3), число которых, соотношение

между ними, а также время затухания определяются присутствием в кристалле преднамеренно вводимых гидроксильных ионов (концентрация которых пропорциональна поглощению в полосе уран-гидроксильных комплексов).

3. Воздействие радиации на кристаллы LiF(U)-O,OH сопровождается падением в полосе, как обусловленной свободными гидроксильными ионами (0.46 эВ), так и в полосе, обусловленной уран-гидроксильными комплексами (0.41 эВ). Одновременно имеет место изменение спектрально-кинетических характеристик люминесценции урана, свидетельствующее о радиационном преобразовании УИК.

Обнаружено, что при определенной величине поглощенной дозы, зависящей от исходной концентрации гидроксильных ионов в выращенном кристалле, импульс возбуждения инициирует спектр свечения, присущий УИК в кристалле LiF(U)-O, что свидетельствует о полном разрушении (преобразовании) ионов OH<sup>-</sup> в составе УИК.

4. Показано, что энергия возбуждения определяет кинетические параметры урановой люминесценции.

Фронт нарастания свечения в диапазоне 2.1 - 2.7 эВ при оптическом возбуждении описывается функцией:

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

где  $I_{\max}$  – амплитудное значение интенсивности,  $t$  – время с момента запуска импульса возбуждения,  $\tau$  – характеристическое время процесса, равное 40 нс.

Процесс разгорания ИКЛ в спектре урановой люминесценции описывается совокупностью двух экспонент:

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

где  $\tau_1=40$  нс и совпадает с величиной времени разгорания ИФЛ, а  $\tau_2=2.5$  мкс.

5. Показано, что предварительное облучение кристаллов LiF(U)-O по-разному влияет на эффективность возбуждения наносекундного и микросекундного компонентов интенсивности ИКЛ, а также ИФЛ в области 2.1 - 2.7 эВ при 300 К, что предполагает существование различных механизмов возбуждения свечения УИК. ИФЛ УИК, инициированная лазерным излучением, является результатом прямого процесса передачи энергии возбуждения урановым комплексам, содержащим U<sup>6+</sup>, с последующим ее излучением.

Наносекундный компонент ИКЛ УИК возникает при наличии в кристалле свободного заряда в результате следующих процессов: создание и накопление в процессе облучения кристалла содержащих  $U^{5+}$  урановых комплексов и захват на этих центрах дырки; переход электрона с  $U^{5+}$  на дырку с созданием околodefектного экситона и с восстановлением зарядового состояния урана; передачу энергии от экситона шестивалентному урану с последующим ее излучением.

Предполагается, что механизм возбуждения микросекундного компонента ИКЛ урана состоит из той же последовательности этапов, описанной для наносекундного компонента ИКЛ. Отличие заключается в способе создания ионов  $U^{5+}$ : по-видимому, имеет место инициированный действием радиации перенос заряда с иона  $O^{2-}$  на ион  $U^{6+}$ , входящий в состав УИК.

6. Установлено, что ЦО  $F_2^-$  и  $F_3^+$  не являются компонентами УИК. Образование ЦО в кислородсодержащих кристаллах  $LiF(U)$  не является конкурирующим захвату электронов на уране процессу.

#### ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Архангельская В.А., Гусева Е.В., Зингер Г.М. и др. Термостойкость  $F_2^-$  центров в радиационно-окрашенных кристаллах  $LiF$  с кислородсодержащими примесями // Опт. и спектр. – 1986. – Т. 61. – № 3. – С. 542 - 549.
2. Алешкевич Н.И., Титков Е.Ф., Комяк А.И., Шолох В.Г. Спектры поглощения монокристалла  $LiF$ , активированного шестивалентным ураном // ЖПС. – 1980. – Т. 33. – В. 6. – С. 1060 - 1064.
3. Bagai. R.K., Warriar A.V.R. Optical absorption spectrum of  $UO_2^{2+}$  doped  $LiF$  // J. Phys. C: Solid State Phys. – 1977 – V. 10. – P. L437 - L439.
4. Lupey A., Lupei V., Ursu I. Impurities effects on the  $U^{6+}$  in  $LiF$  // J. Phys. C: Solid State Phys. – 1985. – V. 18. – P. 6099 - 6107.
5. Parrot R., Naud C., Delbecq C., Yuster P. Optical and ESR studies of  $U^{5+}$  luminescent molecular centers in  $\alpha$ - and  $\gamma$ -irradiated  $LiF-U_3O_8$  crystals // Phys. Rev. B. – 1977. – V. 15. – N. 1. – P. 137 - 145.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

#### **ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:**

1. Путинцева С.Н. Католюминесценция урансодержащих кристаллов фторида лития // Материалы 12 Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых. – Новосибирск: изд-во НГУ, 2006. – С. 159.
2. Олешко В.И., Лисицына Л.А., Путинцева С.Н. Люминесценция кислородсодержащих кристаллов  $LiF$  // Труды V Международной практической

конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах». – Томск: изд-во ТПУ, 2006. – С. 412 - 415.

3. 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.

4. Лисицына Л.А., Олешко В.И., Лисицын В.М., Путинцева С.Н. Свечение урана в кристаллах LiF // Материалы X Международной школы-семинара «Люминесценция и лазерная физика». – Иркутск: изд-во ИГУ, 2006. – С. 188 - 197.

5. 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.

6. Денисов Г.С., Олешко В.И., Лисицына Л.А., Путинцева С.Н. Кинетические параметры свечения кислорода в кристаллах LiF-O и LiF(U)-O // Доклады десятой Международной конференции «Физико-химические процессы в неорганических материалах». – Кемерово: Кузбассиздат, 2007. – Т. 1. – С. 40 - 42.

7. Лисицына Л.А., Путинцева С.Н., Лисицын В.М., Олешко В.И. Спектрально-кинетические характеристики люминесценции кристаллов LiF(U)-O // Неорганические материалы. – 2008. – Т. 44. – № 6. – С. 754 - 759.

8. Лисицына Л.А., Путинцева С.Н., Олешко В.И., Лисицын В.М. Спектрально-кинетические параметры фотолюминесценции урановых комплексов в кристаллах LiF // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 2. – С. 66 - 70.

9. Лисицына Л.А., Олешко В.И., Путинцева С.Н., Лисицын В.М. Импульсная катодолюминесценция облученных кристаллов LiF-O и LiF(U)-O // Оптика и спектроскопия. – 2008. – Т. 105. – № 4. – С. 598 - 604.

10. Dauletbekova A., Lisitsyna L., Lisitsyn V., Putintseva S., Korepanov V., Akilbecov A., Zdorovets M. Pulse cathodoluminescence of LiF and LiYF<sub>4</sub> crystals // Abstract of the 8-th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter. – Kyoto, Japan, 2008. – P. 174.