

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Гэ Гуанхуэй

ГЭ ГУАНХУЭЙ

**Люминесценция и деградация кристаллов
фторида лития с примесями металлов**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Томск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:

Корепанов Владимир Иванович

доктор физико-математических наук, доцент,
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор

Официальные оппоненты:

Михайлов Михаил Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор,
Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники, заведующий
лабораторией

Лосев Валерий Федорович

Доктор физико-математических наук, ученое
звание, ИСЭ СО РАН, главный научный
сотрудник

Защита состоится 27 декабря в 15:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.03 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 4, аудитория 245



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «___» ноября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.03
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник

 Гынгазов С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Интерес к исследованиям люминесценции LiF обусловлен спецификой его применения. Кристаллы фторида лития широко используются:

- в оптике – материал с прозрачностью в диапазоне: 0,12 – 6 μm ;
- для изготовления лазеров на центрах окраски и пассивных затворов;
- в качестве термолюминесцентных дозиметров;
- при создании субмикронных люминесцентных структур для нанолитографии, микроволноводов, элементов оптической памяти, точечных источников света;
- в качестве сцинтилляторов для визуализации излучения в томографии, микрофотографии, радиографии, в системах контроля изделий, медицине, мониторинге технологий и др., а также регистрации слабозаимодействующих с веществом частиц темной материи;
- в качестве модельных систем для изучения процессов направленного формирования дефектной структуры кристалла путем замены ионов решетки матрицы другими, например, для создания центров люминесценции, а также для изучения радиационно-стимулированные процессов в ионных соединениях.

Во многих случаях практическое использование фторида лития основано на его люминесцентных свойствах и преимущественно при возбуждении ионизирующими излучениями. В чистых кристаллах LiF слабая люминесценция возбуждается при низких температурах. Высоким выходом люминесценции в поле радиации обладают кристаллы фторида лития, содержащие примеси металлов. Перспективны для этих целей кристаллы LiF, содержащие примеси многовалентных металлов, например, W, Ti, Fe. Однако сведений о структуре центров свечения и процессах, вызывающих и сопровождающих люминесценцию этих систем явно недостаточно.

Для синтеза материалов с новыми физико-химическими и эксплуатационными свойствами часто используют легирование исходного чистого материала примесями. Чтобы сделать этот процесс направленным на достижение заданных свойств материала требуется знать каким образом тот или иной активатор может повлиять на конечных результат. То есть необходимо знать общие закономерности и принципы направленного изменения свойств при легировании.

Поэтому исследование структуры центров свечения, закономерностей влияния валентности примесей многовалентных металлов (W, Ti, Fe) на процессы возбуждения фото- или катодолюминесценции в кристаллах фторида лития, а также изучение сопутствующих радиационно-стимулированных явлений, которые определяют причины деградации в поле радиации сцинтилляторов на основе LiF, актуально для определения способов повышения их эксплуатационных параметров. На решение этих задач направлены исследования, представленные в настоящей работе.

Степень разработанности темы. Известно, что примеси многовалентных металлов вводят в кристаллы LiF в виде оксидов [1], так как кислород компенсирует избыточный заряд металла. Поэтому центры свечения - комплексы, состоящие из примесей металла, кислорода и собственных дефектов структуры, например, вида: O^{2-} , $\text{Me}^{2+} - \text{O}^{2-}$, $\text{O}^{2-} - \text{Va}^+$, O_2^- . Такие кислородные центры обнаружены в кристаллах LiF допированных кислородом, OH^- - группами или многовалентными металлами. Наиболее изученным

является центр ($O^{2-}-Va^+$), показана также возможность создание кислородных центров типа $O^{2-}-Me$ и обоснована его модель в $LiF-MgO$.

Люминесценция кислородных центров наиболее изучена в кристаллах $LiF-TiO_2$. Однако всестороннего и достоверного обоснования существования в кристаллах $LiF-WO_3$, $LiF-TiO_2$ и $LiF-Fe_2O_3$ ($O^{2-}-Me$)-центров нет. Нет также сведений и предположений о влиянии валентности внедряемого в решетку кристалла металла на структуру и эффективность создания кислородных центров люминесценции.

К настоящему времени подробно изучены радиационные эффекты в чистых кристаллах фторида лития. Много работ посвящено созданию различных видов лазерных центров окраски. Однако радиационно-стимулированные процессы в кристаллах фторида лития с примесями оксидов многовалентных металлов изучены слабо. Несмотря на то, что это сцинтилляторы - нет ясности в понимании роли этих примесей в процессах накопления центров окраски, а также во всей совокупности процессов, вызывающих и сопровождающих люминесценцию этих систем при облучении ионизирующими излучениями. Неизвестно также как изменяются параметры и характеристики люминесценции сцинтилляторов на основе $LiF-Me$ и оптимальных условия их эксплуатации в поле радиации.

На решение этих проблем направлены исследования, представленные в настоящей работе.

Цель работы – выяснить структуру центров люминесценции в кристаллах фторида лития с примесями оксидов металлов W , Ti , Fe , определить параметры и характеристики фото- и катодолюминесценции примесной центров свечения, установить закономерности накопления центров окраски в этих соединениях и эффективность радиационной деградации люминесценции при облучении электронами наносекундной длительности в температурном диапазоне $20...300$ К.

Для достижения цели требовалось решить следующие задачи:

1. Изучить спектры и кинетики затухания фотолюминесценции, а также спектры возбуждения фотолюминесценции кристаллов $LiF-W$, Ti , Fe , OH , O в температурном диапазоне $20...300$ К.
2. Изучить стационарные спектры люминесценции кристаллов $LiF-WO_3$, при возбуждении одиночными импульсами электронов в температурном диапазоне $20...300$ К.
3. Изучить процессы накопления центров окраски в кристаллах $LiF-WO_3$, $LiF-TiO_2$, в температурном диапазоне $20...300$ К.
4. Определить спектрально-кинетические параметры и характеристики импульсной катодолюминесценции кристаллов $LiF-WO_3$.
5. Сделать анализ структуры центров свечения и основных процессов после воздействия электронных импульсов, приводящих к деградации сцинтилляторов на основе фторида лития с примесями металлов.

Объект исследования. Люминесценция кислородных центров в кристаллах фторида лития

Предмет исследования. Влияние типа и валентности допирующего металла на структуру кислородных центров свечения, накопление центров окраски и радиационную

деградацию люминесценции в кристаллах фторида лития с примесями W, Ti, Fe в пределах 0,01 – 0,02 вес. %.

Научная новизна исследования.

Впервые подробно в температурном диапазоне 20..300 К изучены спектры ФЛ, КЛ кристаллов LiF-WO₃, LiF-Fe₂O₃, LiF-TiO₂, а также спектрально-кинетические характеристики ИКЛ кристаллов LiF-WO₃ и установлено, что спектры ИКЛ, ФЛ, КЛ состоят из двух полос с близкими параметрами (полуширины и максимумы в области 3,1 и 2,6 эВ) в кристаллах с примесями различной валентности.

Установлена атомная конфигурация центров активаторного свечения в кристаллах LiF с примесями W, Ti или Fe. Доказано, что во всех кристаллах существует 2 типа центров люминесценции: (O²⁻-Va⁺) и (O²⁻-Me). Количество конфигураций центров O²⁻-Me зависит от валентности металла, замещающего ион F⁻ в решетке кристалла.

Предложена схема электронных переходов в кислородных центрах при поглощении и излучении фотонов. Люминесценция возникает в результате переноса заряда из возбужденных состояний (O²⁻-Va⁺) и (O²⁻-Me)-центров на два излучательных состояния иона кислорода O²⁻ в составе этих центров.

Подробно в широком температурном диапазоне 20...300 К изучены закономерности накопления радиационных дефектов в кристаллах LiF с примесями оксидов металлов, показано, при всех температурах в кристаллах LiF-WO₃ кинетика накопления всех типов ЦО состоит из быстрой и медленной стадий. Увеличение эффективности накопления в кристаллах LiF с примесями металлов на первой стадии обусловлено процессами выживания первичных дефектов (F-, H-, Vk-центров) в результате их захвата дорадиационной дефектностью и лимитируется ее концентрацией, а также скоростью преобразования первичных дефектов в стабильные. Ловушками H-центров, электронов и дырок в примесных кристаллах могут быть различные виды кислородных центров и дефектов структуры кристалла.

Определены, параметры кинетики нарастание и затухания интенсивности ИКЛ и их температурные зависимости, установлены два вида возбуждения КЛ в температурном диапазоне 20...300 К.

Сделан анализ причин деградации люминесценции в поле радиации в сцинтилляторах LiF-WO₃ при разных температурах. Выявлено, что изменение интенсивности КЛ при облучении состоит из двух стадий: нарастания в пределах 10³-10⁴ Гр (эффект малых доз), обусловленной преобразованием дорадиационной дефектности и уменьшения интенсивности КЛ в LiF-WO₃ с дальнейшим ростом дозы электронного облучения (была обнаружена ранее), связанной с накоплением F₂-центров окраски (эффект больших доз).

Научная и практическая значимость работы.

1. Результаты исследований углубляют сведения о роли многовалентных металлов в создании активаторного свечения при выращивании кристаллов фторида лития с примесями. Роль примесей металлов, вводимых в виде WO₃, Fe₂O₃, TiO₂ сводится к созданию и стабилизации при выращивании кислородных центров.

2. Исследования расширяют представления о возможных атомных конфигурациях и электронном строении центров люминесценции в кристаллах фторида лития с примесями многовалентных металлов. Электронное строение поглощательного

состояние изученных кристаллов определяется валентностью металла, а излучательное - не зависит от валентности металла и представлено электронными переходами на уровни кислорода в центрах ($O^{2-}-V_a^+$) и ($O^{2-}-Me$), которые создают две полосы люминесценции с близкими для всех внедренных металлов параметрами.

3. Полученные результаты уточняют представления о процессах накопления центров окраски в ионных кристаллах и влиянии примесей многовалентных металлов на эти процессы. При всех температурах в кристаллах $LiF-WO_3$ кинетика накопления всех типов ЦО

состоит из быстрой и медленной стадий. Быстрая стадия связана с дорадиационной дефектностью, дает значительный вклад в поглощение центров окраски при малых дозах и заканчивается при дозах 10^4 Гр.

4. Результаты исследований позволили выяснить основные причины и закономерности изменения интенсивности люминесценции $LiF-Me$ с ростом дозы электронного облучения (деградация) и установить способы ее повышения предварительным облучением кристаллов и уменьшить последующую деградацию выбором оптимальной температуры эксплуатации (175...225 К). До значений поглощенных доз 10^3-10^4 Гр происходит нарастание интенсивности КЛ («эффект малых доз»), связанное с преобразованием дорадиационной дефектности, а дальнейшее уменьшение интенсивности КЛ в $LiF-WO_3$ с ростом дозы электронного облучения связано с F_2 -центрами окраски, эффективность накопления которых минимальна в области 175...225 К.

Методология диссертационного исследования. Работа экспериментальная. Основные исследования производились на кристаллах LiF с примесями W и Ti . Для уточнения обнаруженных закономерностей применялись также образцы фторида лития с примесями кислорода и железа. Концентрация примесей в кристаллах была в пределах 0.02% в шихте. Для решения поставленных задач использовалось современное промышленное и уникальное оборудование. Измерение ФЛ производилось на спектрофлюориметре Agilent Cary Eclipse; для измерения спектров стационарной КЛ и спектров наведенного облучением поглощения при низких температурах применялся оптоволоконный спектрометр AvaSpec 3648-USB2; измерения спектрально-кинетических параметров ИКЛ осуществлялись на уникальном оптическом спектрометре с наносекундным временным разрешением с применением наносекундного высокоточного ускорителя электронов в качестве источника возбуждения; достижение низких температур в криостате в пределах 20...300 К осуществлялось с помощью микрокриогенной системы МСМР- 150Н-5/20. Это позволило с максимальной эффективностью достичь заявленные цели.

Защищаемые положения.

1. В кристаллах LiF примеси Fe , Ti , W создают два типа кислородных центров люминесценции в виде расположенных в соседних узлах пар ионов $O^{2-}-V_a^+$ и $O^{2-}-Me$, которым соответствуют две полосы люминесценции 3,1 эВ и 2,6 эВ.
2. В кристаллах LiF центры $O^{2-}-Me$ (Fe , Ti , W) создаются в области 4,0...6,2 эВ полосы поглощения с близкими параметрами, количество которых определяется валентностью металла, то есть количеством компенсирующих заряд ионов металла O^{2-} .

3. При электронном возбуждении кристаллов LiF-Me (Ti, W) кинетика ИКЛ O^{2-} - V_a^+ и O^{2-} -Me центров содержит две стадии затухания и две стадии разгорания, обусловленные двумя механизмами передачи энергии электронных возбуждений центрам люминесценции.

4. Быстрая стадия накопления всех типов электронных ЦО в изученных кристаллах LiF-Me при облучении электронами обусловлена увеличением вероятности выживания первичных пар френкелевских дефектов

Личный вклад автора. Постановка цели, задач исследования были сделаны совместно с научным руководителем Корепановым В.И. Модернизация установок и приспособление под конкретные измерения, измерения, обработка и анализ результатов исследований были выполнены лично соискателем при консультации научного руководителя.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийских и Международных конференциях. 1 доклад на XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14-18 апреля 2014 г., 2 доклада на VI Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 27–29 ноября 2017 г. (ВТСНТ-2017), 1 доклад на 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2022), Tomsk, 02-08 October 2022, 1 доклад на XV Международной научной конференции «Физика твердого тела», Астана, 8-10 декабря 2022 года. Основные результаты исследований опубликованы в 4 статьях, индексируемых в зарубежных базах данных, сборниках трудов научных конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения (общая характеристика работы), пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы из 118 наименований. Работа содержит 139 страниц текста, 108 рисунков, 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, положения, выносимые на защиту, представлены научная новизна и практическая значимость результатов исследований, апробация работы и личный вклад автора.

В первой главе дан аналитический литературный обзор исследований, связанных с темой диссертационной работы. Описаны современные представления о процессах, вызывающих и сопровождающих люминесценцию кристаллофосфоров при различных способах возбуждения. Даны сведения о сцинтилляционных материалах, их свойствах и процессах деградации. Сделан краткий обзор дефектной структуры и радиационных эффектов в кристаллах LiF:Me.

Во второй главе описаны использованные в исследованиях экспериментальные методики, образцы для исследований, методики обработки результатов измерений. Дано описание стационарных методов исследования спектров поглощения и люминесценции с использованием оптоволоконного спектрометра AvaSpec 3648-USB2 и спектрофлуориметра Agilent Cary Eclipse в температурном диапазоне 20...300 К. Описаны установка изучения импульсной катодолюминесценции с наносекундным временным разрешением при температурах 20...300 К.

В третьей главе приведены результаты исследования фотолюминесценции кристаллов $\text{LiF}:\text{WO}_3$, $\text{LiF}:\text{TiO}_2$ и предложена модель примесного центра свечения.

Фотолюминесценция кислородных центров в кристаллах LiF

Установлено, что в кристаллах, содержащих примеси многовалентных кристаллов фотовозбуждение в области 4,0...6,0 эВ приводит к появлению двух полос ФЛ. Параметры однотипных полос (значения максимумов и полуширин) близки, но индивидуальны в кристаллах с разными металлами. Соотношение интенсивностей полос зависит

от длины волны возбуждающего света, температуры, типа внедренного металла. Для примера на рисунке 1 показаны спектры ФЛ $\text{LiF}-\text{TiO}_2$ и параметры полос ФЛ при 300 К. Положения максимумов полос приходится на 2.6эВ и 3.1эВ, а полуширины равны 0.58 эВ и 0.62 эВ, соответственно.

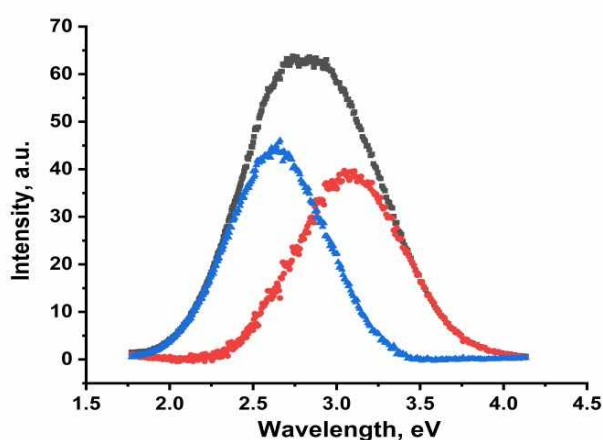


Рисунок 1 - Спектр ФЛ $\text{LiF}-\text{TiO}_2$ (1) и его составляющие (2, 3), возбуждение при 230нм (5,39 эВ), 300К

Наиболее сильно отличия параметров полос ФЛ в разных кристаллах наблюдается при низких температурах. В таблице 1 представлены эти параметры в исследованных кристаллах при 80 К. Видно, что максимумы полос 1 (высокоэнергетические) близки к таковым для полосы излучения ($\text{O}^{2-}-\text{Va}^+$)–центра. Однако значения полуширины этой полосы ФЛ в кристаллах $\text{LiF}-\text{TiO}_2$ и $\text{LiF}-\text{WO}_3$ сильно отличаются от полуширины полосы ФЛ ($\text{O}^{2-}-\text{Va}^+$)–центра. При одинаковых условия возбуждения и мониторинга люминесценции в $\text{LiF}-\text{Fe}_2\text{O}_3$ отношение интенсивностей полос ФЛ 1 и 2 максимально, в $\text{LiF}-\text{TiO}_2$ близко к единице, а в $\text{LiF}-\text{WO}_3$ доминирует низкоэнергетическая полоса ФЛ (полоса 2).

Таблица 1– Параметры полос ФЛ в кристаллах при 80 К

Кристалл	Максимум полосы 1	Максимум полосы 2	Полуширина полосы 1	Полуширина полосы 2
$\text{LiF}-\text{Fe}_2\text{O}_3$	$3.10 \pm 0,04$ эВ	$2.60 \pm 0,04$ эВ	$0.70 \pm 0,05$ эВ	$0.68 \pm 0,05$ эВ
$\text{LiF}-\text{TiO}_2$	$3.00 \pm 0,04$ эВ	$2.63 \pm 0,04$ эВ	$0.58 \pm 0,05$ эВ	$0.58 \pm 0,05$ эВ
$\text{FLi}-\text{WO}_3$	$2.93 \pm 0,04$ эВ	$2.55 \pm 0,04$ эВ	$0.54 \pm 0,05$ эВ	$0.48 \pm 0,05$ эВ

Спектры возбуждения фотолюминесценции кислородных центров в LiF

Изучены спектры возбуждения люминесценции (ВФЛ) при мониторинге в обеих полосах ФЛ. В исследованной спектральной области 4,0...6,2 эВ обнаружено несколько полос ВФЛ, количество которых зависит от типа примеси в кристалле: в $\text{LiF}-\text{Fe}_2\text{O}_3$ – 2; в $\text{LiF}-\text{TiO}_2$ – 3; в $\text{LiF}-\text{WO}_3$ – 4. Высокоэнергетическая полосы ВФЛ 1 присутствует во всех

кристаллах. Три полосы ВФЛ в LiF-TiO₂ обладают близкими значениями полуширин и максимумов трем первым полосам в LiF-WO₃. Пример спектра ВФЛ и результатов его разложения на элементарные составляющие в LiF-WO₃ и LiF-TiO₂ при 300К приведены на рисунке 2, а параметры полос ВФЛ для всех металлов при 80 К в таблице 2.

Таблица 2 - Полосы ВФЛ в кристаллах LiF-Li₂O, LiF-Fe₂O₃, LiF-TiO₂ и LiF-WO₃ при 80К

Кристалл	LiF-Li ₂ O	LiF-Fe ₂ O ₃	LiF-TiO ₂	LiF-WO ₃
Положение максимума полос поглощения при 80К	6.1 эВ	5.35эВ, 6.1эВ	4.96эВ, 5.45эВ, 6.1эВ	4.5эВ, 4.96эВ, 5.35эВ, 6.1эВ

Из спектров ВФЛ следует, что в каждом кристалле с примесями металлов разной валентности есть одинаковые (близкие по энергиям) электронные переходы, а увеличение валентности внедряемого в матрицу фторида лития металла приводит, помимо образования таких же центров как в кристаллах с примесями металлов меньшей валентности, к появлению новых полос ВФЛ. При 300 К в LiF-Fe₂O₃ соотношение интенсивностей полос 1 и 2 ВФЛ - в пользу первой (полоса 2 – очень слаба), в LiF-TiO₂ соотношение интенсивностей изменяется в пользу полос 2 и 3, а в LiF-WO₃ доминируют низкоэнергетические полосы ВФЛ. Соотношение полос ВФЛ зависит также от того в какой полосе ФЛ производится мониторинг излучения и при какой температуре кристалла.

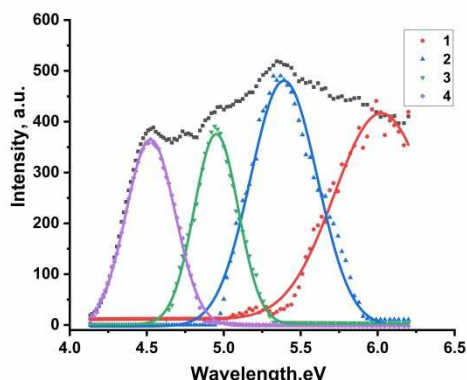


Рисунок 2 - Спектры ВФЛ LiF-WO₃ и результаты его разложения на гауссовы составляющие, мониторинг при 2,88 эВ, 300К.

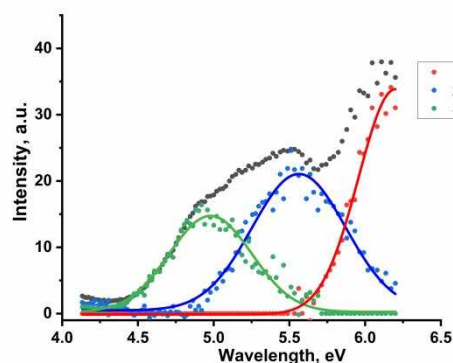


Рисунок 3 - Спектр ВФЛ LiF-TiO₂, мониторинг при 3,1 эВ и результаты его разложение на элементарные полосы, 300 К.

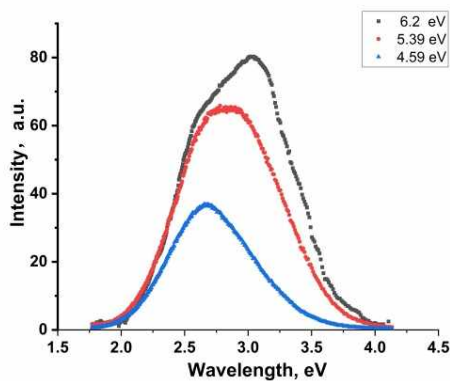


Рисунок 4 - Спектры ФЛ при возбуждении в разных областях спектра LiF-TiO₂ 1 -6,2 эВ, 2 - 5,39 эВ, 3 - 4,59 эВ, 300К.

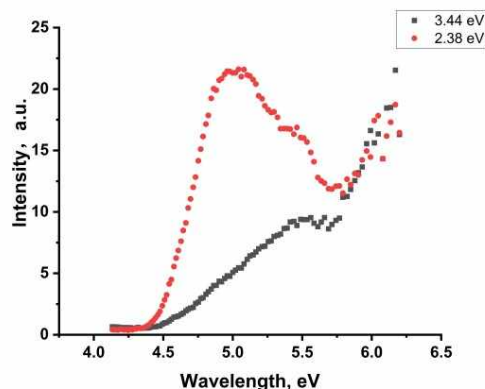


Рисунок 5 - Спектры ВФЛ LiF-TiO₂ при мониторинге в области разных длин волн, 300К.

Характерной особенностью для всех типов кристаллов является то, что воздействие света из спектральной области полос ВФЛ (4,0...6,2 эВ) приводит к возникновению обеих полос фотолюминесценции. Однако, соотношение их интенсивностей зависит от типа металла в кристалле, длины волны возбуждающего излучения (полосы ВФЛ), температуры кристалла и других факторов. Например, при 300 К в LiF-TiO₂ возбуждение во всех полосах при энергиях квантов, равных: 6,2 эВ (полоса 1), 5,64 (полоса 2) и 4,59 (полоса 3) приводит к появлению обеих полос ФЛ (рисунок 4). Однако соотношение интенсивностей сильно отличаются. В коротковолновой полосе ВФЛ возбуждается преимущественно полоса ФЛ 3,1 эВ, а в полосе 4,59 эВ (полоса 3 в спектре ВФЛ) возбуждается преимущественно полоса ФЛ 2,6 эВ. Это хорошо видно из приведенных на рисунке 5 спектров возбуждения фотолюминесценции при мониторинге в разных полосах ФЛ. Понижение температуры образца приводит к изменению соотношения полос, наиболее значительно изменяется соотношение высокоэнергетической и низкоэнергетических полос ВФЛ.

Затухание ФЛ

Кинетики затухания ФЛ LiF-TiO₂ и LiF-WO₃ описываются экспонентами и могут содержать несколько компонентов. Типичный вид кинетических кривых затухания ФЛ в кристаллах при 300К и возбуждении в разных полосах ВФЛ показан на рисунках 6 и 7. В таблице 3 и 4. приведены значения характеристических времен затухания ФЛ медленного компонента свечения τ при возбуждении в разных полосах ВФЛ в LiF-WO₃ и LiF-TiO₂ при 300 К и 80 К в полосах ФЛ 3,1 эВ и 2,6 эВ.

Таблица 3 - Параметры кинетики затухания τ (мкс) ФЛ в кристаллах LiF-WO₃

Т, К	300К				80К			
	370нм		500нм		370нм		500нм	
Полоса мониторинга	1	2	1	2	1	2	1	2
Вид стадии	1	2	1	2	1	2	1	2
Возбуждение - 200нм (6,1 эВ)	1,28	21,11	1,18	14,68	1,54	11,69	2,01	11,37
Возбуждение - 250нм (4,95 эВ)		19,08		21,57	5,09	46,35	5,57	58,15

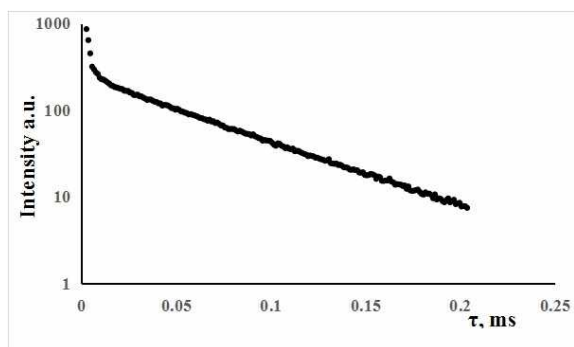


Рисунок 6 - Кинетика ФЛ при 430нм (2.88эВ) в LiF-TiO₂, возбуждение при 200 нм (6.1эВ), 300К

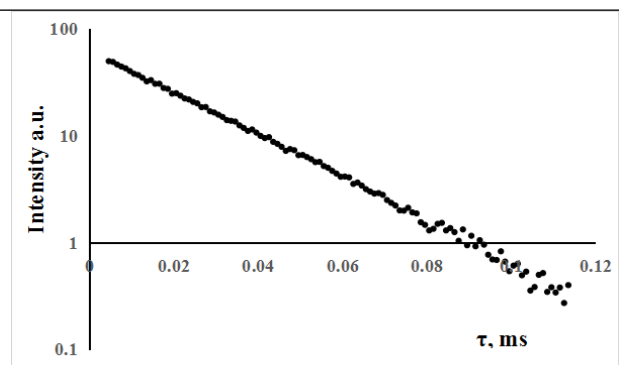


Рисунок 7 - Кинетика ФЛ при 470нм (2.6эВ) в LiF-WO₃, возбуждение при 230 нм (6.1эВ), 300К.

Таблица 4 – Параметры кинетики затухания τ (мкс) ФЛ в LiF-TiO₂

Т, К	300К						80К					
Полоса мониторинга	400нм			500нм			400нм			500нм		
Стадия затухания	1 ($\tau_{\text{нано}}$)	2 (τ_2)	3 (τ_1)	1 ($\tau_{\text{нано}}$)	2 (τ_2)	3 (τ_1)	1 ($\tau_{\text{нано}}$)	2 (τ_2)	3 (τ_1)	1 ($\tau_{\text{нано}}$)	2 (τ_2)	3 (τ_1)
Возбуждение - 200нм (6,1 эВ)	< 1,83		57,17	< 0,95	16,68		< 1,06			< 1,22		
Возбуждение - 250нм (4,96 В)	< 2,70	20,38	85,69	< 0,53	12,89	34,62	< 2,07	13,19	345,78	<3,4	39,39	478,93

Из исследований выявлены следующие основные закономерности процессов, вызывающих фотолюминесценцию кристаллов LiF-Fe₂O₃, LiF-WO₃ и LiF-TiO₂:

- после введения примесей оксидов металлов в кристаллах LiF создаются комплексы (центры), которые обладают дополнительным поглощением в виде отдельных полос в области 4,0...6,2 эВ;
- полоса ВФЛ 6,1 эВ присутствует во всех кристаллах, а количество низкоэнергетических полос зависит от валентности металла;
- существуют однотипные полосы ВФЛ (с близкими параметрами поглощения) в кристаллах с разными металлами;
- возбуждение во всех полосах вызывает люминесценцию, спектр которой, по крайней мере при 300 К, состоит из двух полос;
- параметры полос ВФЛ и ФЛ близки, но индивидуальны для каждого типа кристалла.
- при понижении температуры образца до 80 К эффективность возбуждения люминесценции во всех низкоэнергетических полосах снижается в сравнении с полосой 6,1 эВ .
- каждой полосе (группе полос) ВФЛ соответствует своя преимущественная полоса ФЛ. Полосе 6,1 эВ соответствует полоса ФЛ 3,1 эВ. Группе длинноволновых полос ВФЛ соответствует полоса ФЛ 2,6 эВ. Однако возбуждению в каждой из полос (всех) приводит к ФЛ обеих полос 3,1 и 2,6 эВ, но с индивидуальным соотношением их интенсивностей;
- параметры кинетики затухания люминесценции в микросекундном временном диапазоне для разных типов кристаллов (с разными примесями) сильно отличаются;
- параметры кинетики затухания люминесценции в микросекундном временном диапазоне для одного типа кристалла (одна примесь) близки для всех полос ВФЛ и ФЛ, но также индивидуальны,
- возбуждение ФЛ в полосе 6,1 эВ во всех кристаллах создает дополнительный «быстрый» (по-видимому наносекундный) компонент затухания при мониторинге в полосе ФЛ 3,1 эВ;

Таким образом, можно выделить 2 вида полос ВФЛ (поглощения) в исследованных кристаллах, которым соответствуют 2 полосы люминесценции. Первый - полоса 6,1 эВ, - только в этой полосе возбуждается полоса ФЛ 3,1 эВ с быстрым компонентом затухания свечения. Второй - все низкоэнергетические полосы ВФЛ, так как для них характерно одинаковое поведение при понижении температуры, близкие значения времени затухания свечения при возбуждении в

этих полосах в одном типе кристалла, наличие полос ВФЛ с одинаковыми параметрами в кристаллах с различными примесями металлов.

Для объяснения можно предположить, что при поглощении квантов света из области 4,0...6,2 эВ возбуждается один и тот же фрагмент примесного комплекса и таким общим фрагментом может быть только ион O^{2-} . Ионы металлов Fe^{3+} , Ti^{4+} , Ti^{3+} и W^{6+} , W^{4+} могут легко замещать ионы Li^+ , а ионы кислорода O^{2-} F^- ионы в узлах решетки из-за равенства ионных радиусов ионов замещения и ионов замещаемых. При этом могут также создаваться и анионные вакансии. Из этих фрагментов формируется примесные комплексы.

Высокоэнергетические полосы ФЛ и ВФЛ по положению максимумов этих полос, значению τ (< 2 мкс) и другим признакам можно приписать полосам поглощения и люминесценции $(O^{2-}-V_a^+)$ -центров, обнаруженных ранее в $LiF-Li_2O$. Однако полуширина полос в $LiF-WO_3$ и $LiF-TiO_2$ меньше, чем у $(O^{2-}-V_a^+)$ -центра. Это можно объяснить наличием рядом с ним возмущающего дефекта (примеси металла, или другого фрагмента примесного комплекса). Отметим, что поглощение и люми-

несценция такого центра происходит в результате переноса заряда между O^{2-} и V_a^+ [1, 2]. По-видимому, в $LiF-Fe_2O_3$ образуются преимущественно такие $(O^{2-}-V_a^+)$ -центры, которые слабо возмущены примесями и поэтому в таком кристалле наблюдается полоса ФЛ 3,1 эВ с полушириной соответствующей полосе этого центра в $LiF-Li_2O$ и слабыми низкоэнергетическими полосами ФЛ и ВФЛ.

По аналогии можно объяснить происхождение низкоэнергетических полос ФЛ и ВФЛ в $LiF-WO_3$ и $LiF-TiO_2$. Перенос заряда с O^{2-} иона на примесь металла, находящегося в соседнем узле решетки, приводит к появлению этих полос поглощения, а обратный переход к люминесценции представленной полосой 2,64 эВ. Такой тип центра был обоснован в [2] для $LiF-MgO$.

Количество низкоэнергетических полос ВФЛ определяется валентностью внедренного металла. Это легко объясняется следующим образом. В случае $LiF-TiO_2$ для компенсации заряда Ti^{4+} необходимо разместить в соседних анионных узлах два иона O^{2-} . Это приводит к появлению двух низкоэнергетических полос ВФЛ. В кристалле $LiF-WO_3$ для компенсации заряда W^{6+} требуется три иона кислорода O^{2-} и это приводит к появлению трех низкоэнергетических полос ВФЛ.

Результаты исследований показывают, что все полосы поглощения и люминесценции в исследованных кристаллах создаются в пределах поглощения и излучения единого комплекса из двух центров или разнесенных в пространстве центров $O^{2-}-V_a^+$ и $O^{2-}-Me$, в которых возбуждение люминесценции происходит при поглощении энергии квантов ионом кислорода O^{2-} . То есть во всем спектральном диапазоне 4...6,2 эВ возбуждение приводит к переносу заряда с иона O^{2-} на другие фрагменты комплекса (металл или анионная вакансия). Перенос заряда с O^{2-} иона на анионную вакансию создает высокоэнергетическую полосу ВФЛ (полоса1). При поглощении происходит переход электронов с р-орбиталей халькогена на ls-

орбиталь F-центра [1, 2]. Обратные переходы приводят к возникновению полосы ФЛ 3,1 эВ. Возмущение изменяет параметры полосы ФЛ. Перенос заряда с O^{2-} иона на металл создает низкоэнергетические полосы поглощения, количество которых определяется валентность последнего. Обратные переходы приводят к люминесценции, представленной полосой 2,6 эВ.

При возбуждении O^{2-} в любой из полос ВФЛ могут возникать обе полосы ФЛ, то есть существует возможность переноса заряда из возбужденных состояний центров $O^{2-}-V_a^+$ и $O^{2-}-Me$ на оба излучательных состояния иона кислорода O^{2-} в составе этих центров. Этот процесс требует энергии активации.

Все эти процессы можно представить в виде следующей энергетической диаграммы (рисунок 8).

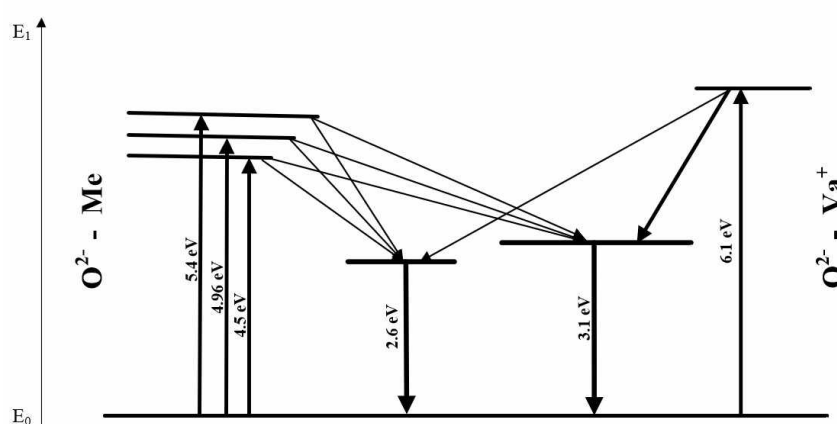


Рисунок 8 - Энергетическая диаграмма переходов в центрах люминесценции кристалла $LiF-WO_3$

В четвертой главе представлены результаты исследования катодолюминесценции (КЛ) и импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) кристаллов $LiF-WO_3$, $LiF-TiO_2$ при возбуждении наносекундными импульсами ускоренных электронов. Спектры КЛ – стационарные спектры, измеренные после воздействия одиночного электронного импульса. ИКЛ – спектры, измеренные с временным разрешением. Эти спектры в $LiF-WO_3$, $LiF-TiO_2$ подобны спектрам ФЛ и могут быть представлены суммой двух полос с максимумами при 3,1 и 2,6 эВ с близкими значениями параметров полос в разных кристаллах, а также параметрам полос ФЛ. Соотношение полос в спектрах КЛ и ИКЛ зависит от типа примеси и температуры кристалла.

Спектры КЛ всех кристаллов при температурах выше 250 К искажаются с ростом дозы электронного облучения (деградация) - появляется характерный «провал» в области энергий $E = 2,77$ eV, связанный с поглощением КЛ накопленными центрами окраски, преимущественно F_2 -центрами. Кинетики (дозовые зависимости) изменения интенсивности КЛ кристаллов $LiF-WO_3$ с энергией квантов $E = 2,8$ eV приведены на рисунке 10 и состоят из двух стадий (нарастания и уменьшения). Причины – преобразование дорадиационной дефектности (эффект малых доз) и накопление центров окраски (эффект больших доз). Эта зависимость характеризует закономерности деградации люминесценции кристалла $LiF-WO_3$ в поле радиации.

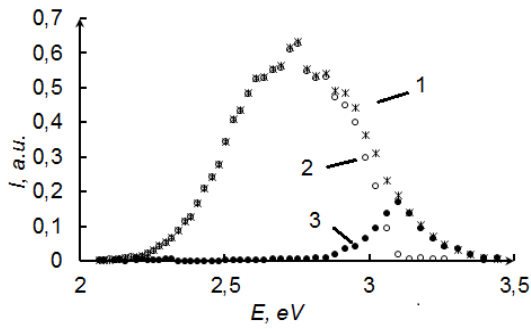


Рисунок 9 - Спектр ИКЛ LiF-WO₃ при 20 К и его гауссовы составляющие.

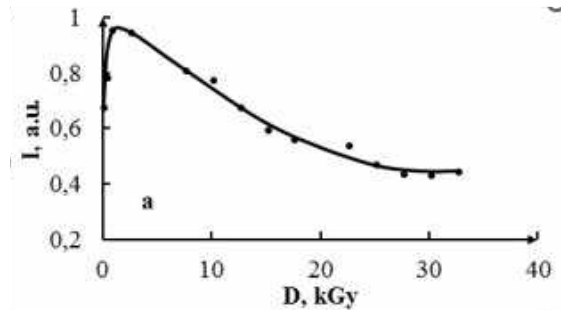


Рисунок 10 - Изменение интенсивности КЛ LiF:WO₃ при E = 2,8 eV в зависимости от дозы облучения, 300К

Из исследований температурных зависимостей ИКЛ следует, что кинетика затухания ИКЛ в LiF-WO₃, LiF-TiO₂ содержит три компонента: два затухания (быстрый с характеристическим временем τ_2 и медленный с характеристическим временем τ_1) и один разгорания с τ_3 . Все компоненты описываются экспоненциальными законами. Примеры кинетических кривых разгорания и затухания ИКЛ LiF-TiO₂ при разных температурах образца и результаты их разложения на стадии в полосах мониторинга 400 нм и 500 нм приведены на рисунках 11, 12. Черная – суммарная, красная – без разгорания (быстрое возбуждение), синяя – с разгоранием (медленное возбуждение). Стадия разгорания при изменении температуры ведет себя по-разному в полосах 3,1 эВ и 2,6 эВ.

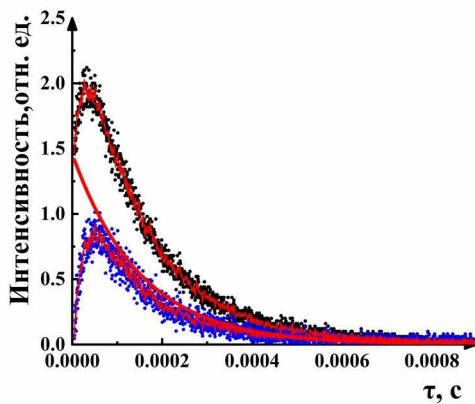


Рисунок 11 - Кинетика ИКЛ кристалла LiF-TiO₂ при 400 нм (3,1эВ), 300 К

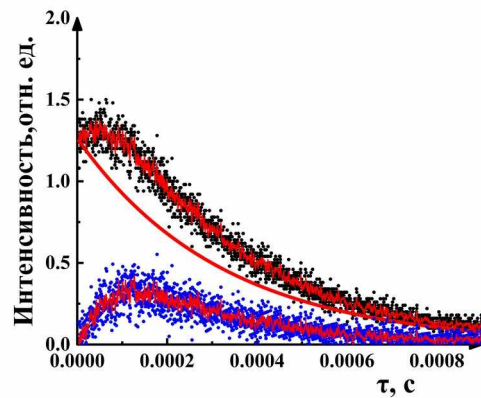
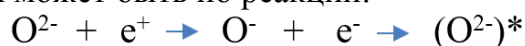


Рисунок 12 - Кинетика ИКЛ кристалла LiF-TiO₂ при 400 нм (3,1эВ), 255 К

Ясно, что при электронном возбуждении стадия разгорания связана с процессами передачи энергии центрам свечения от матрицы (кристалла LiF) кислородным центрам. Из результатов исследований следует, что существует 2 механизма передачи энергии центрам свечения – быстрый и медленный как O₂⁻-V_a-центрам так и O₂⁻-Me-центрам. Предполагается, что быстрый стадия обусловлена последовательным захватом рекомбинации электронов после их локализации на возбужденных уровнях вакансии (для O₂⁻-V_a-центра) или металла (для O₂⁻-Me -центра) с локализованными на p-орбиталях O₂⁻ иона дырках. Захват дырок может быть по реакции:



O^{2-} ион находится в составе центров $O^{2-}-V_a-$ или $O^{2-}-Me$ -центров. Тот факт, что захват ЭВ происходит именно ионами кислорода подтверждается тем, что стадия разгорания есть во всех кристаллах, легированных как металлами, так и кислородом или ОН-группами. При этом быстрый механизм, по-видимому, обусловлен зонным движением электронов и дырок, а медленный - либо диффузией термализованных дырок, либо процессами взаимодействия дырки с O^{2-} -центром.

Характер температурных зависимостей параметров ИКЛ: τ , I (интенсивность) и $S = \tau \cdot I$ (высвеченная светосумма) приведены на рисунках 13-18.

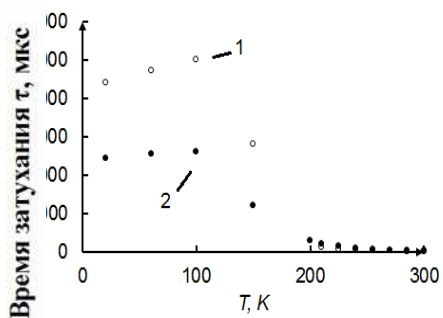


Рисунок 13 - Температурная зависимость τ_1 при $E = 3,1$ эВ (1) и при $E = 2,48$ эВ (2) в LiF-TiO₂.

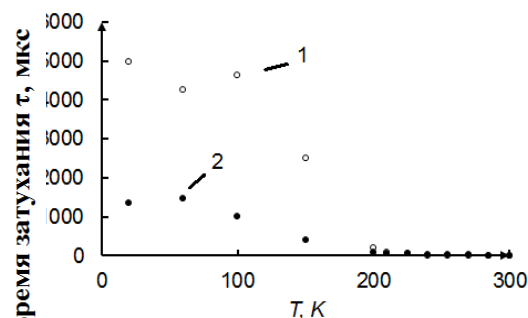


Рисунок 14 - Температурная зависимость τ_2 при $E = 3,1$ эВ (1) и при $E = 2,48$ эВ (2) в LiF-TiO₂.

14

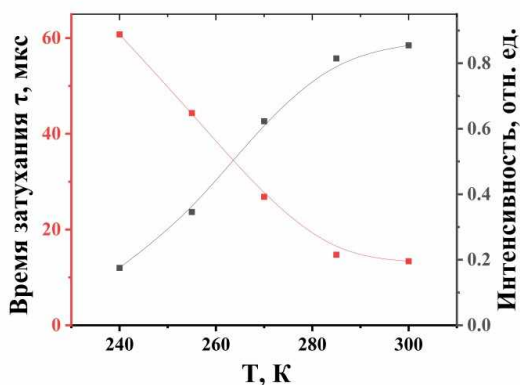
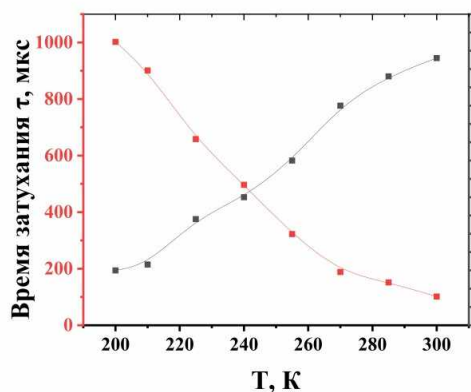


Рисунок 15 - Температурные зависимости τ_1 и интенсивности I_1 медленного компонента затухания ИКЛ в кристалле LiF-TiO₂

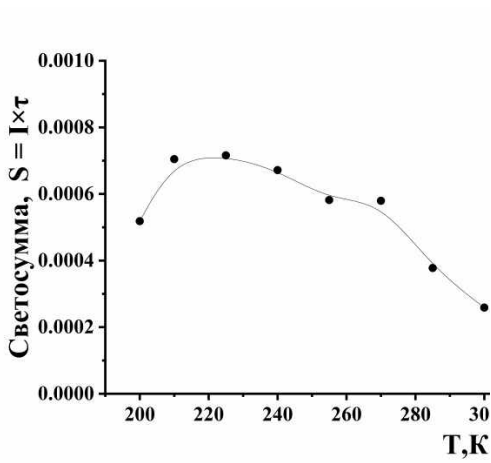


Рисунок 16 - Температурные зависимости τ_3 и интенсивности I_3 компонента разгорания ИКЛ в кристалле LiF-TiO₂ при $E = 3,1$ эВ.

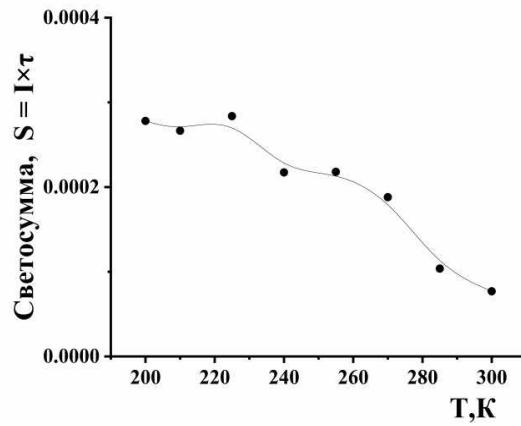


Рисунок 17 - Температурная зависимость высвеченной светосуммы ИКЛ LiF-TiO₂ при 400 нм (3,1 эВ)

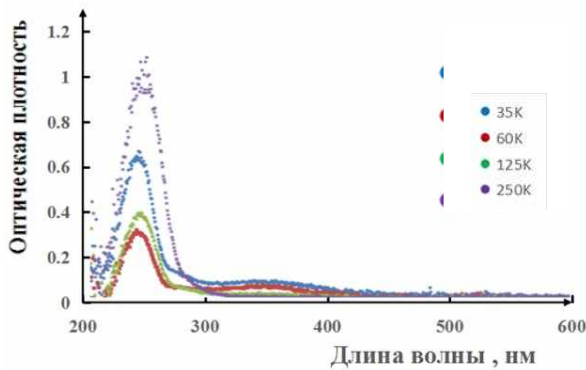


Рисунок 18 - Температурная зависимость высвеченной светосуммы ИКЛ LiF-TiO₂ при 500 нм (2,48 эВ)

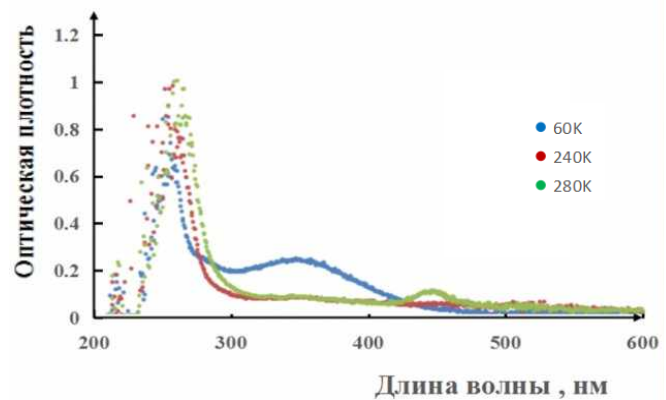


Рисунок 19 - Спектры поглощения кристаллов LiF, облученных дозой $1.5 \cdot 10^4$ Гр при температурах: 1 – 35 К, 2 – 60 К, 3 – 125 К, 4 – 250 К.

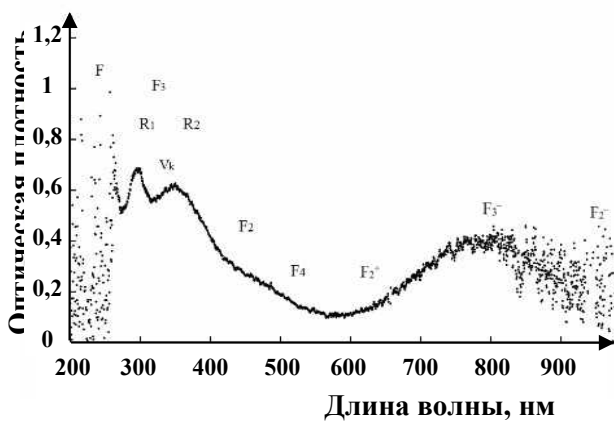


Рисунок 20 - Спектры поглощения кристаллов LiF-TiO₂, облученных дозой $1.5 \cdot 10^4$ Гр при температурах: 1 – 60 К, 2 – 240 К, 3 – 180 К

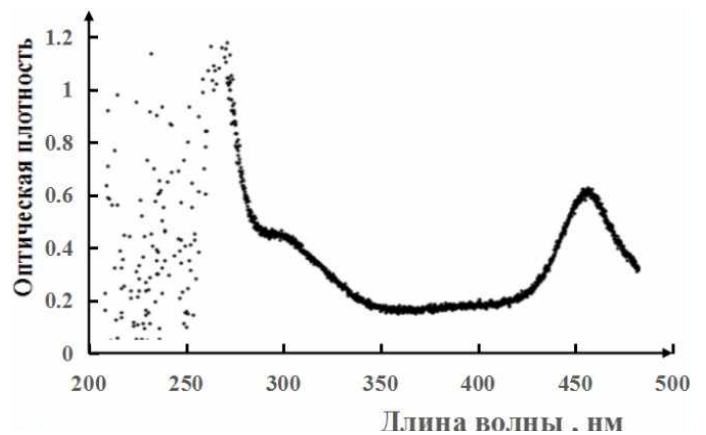


Рисунок 21 - Спектры поглощения LiF-WO₃

Рисунок 22 - Спектр поглощения LiF-WO₃ после

В пятой главе представлены результаты исследования процессов накопления центров окраски (ЦО), которые могут влиять на изменение сцинтилляционных свойств кристаллов LiF-WO_3 , LiF-TiO_2 в температурном диапазоне 20...300 К. Как оказалось, после облучения наносекундными электронными импульсами в LiF-WO_3 , LiF-TiO_2 при всех температурах накапливаются такие же ЦО, как и в чистых кристаллах фторида лития. При температурах ниже 125 К в кристаллах фторида лития присутствуют полосы поглощения собственных дефектов решетки LiF : F^- , V_k^- -центры, нейтральные и заряженные F_2^- -центры, нейтральные и заряженные F_3^- -центры, наводится также полоса в области 290 нм (4.27 эВ), которая, возможно, связана с примесью.

При температурах выше 125 К V_k^- -центры не накапливаются, так как они не стабильны. При $T > 150$ К эффективно создаются и накапливаются различные типы F-агрегатных центров окраски (рисунки 19...22). При 300 К (рисунок 22) в LiF-WO_3 накапливаются преимущественно F_2^- , F_3^- -центры. Увеличение эффективности накопления ЦО в кристаллах с примесями оксидов металлов обусловлено появлением дополнительных ловушек для стабилизации электронных и ионных возбуждений. При температурах $T < 125$ К это связано с ловушками для электронов, а дырки автолокализуются, что приводит к увеличению эффективности накопления V_k^- -центров и F- центров в LiF-WO_3 . При высоких температурах увеличение эффективности накопления F- центров и их агрегатов обусловлено появлением дополнительных ловушек для H-центров, что увеличивает эффективность выживания ЦО.

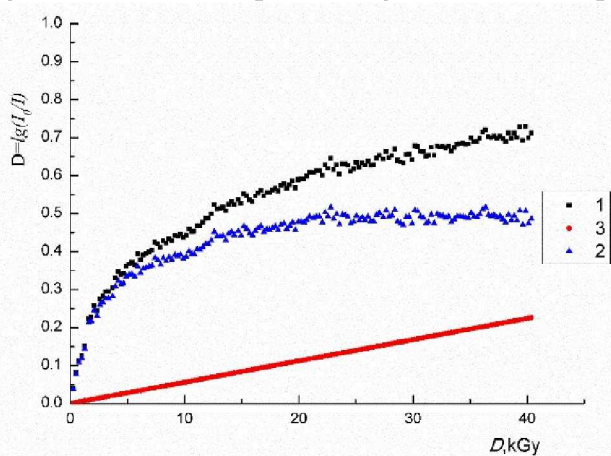


Рисунок 23 - Кинетика накопления F-центров в LiF-WO_3 в зависимости от дозы облучения, 40К, мониторинг при $\lambda = 270$ нм (4,6 эВ). 1 – кинетика, 2 – быстрый компонент, 3 – медленный компонент

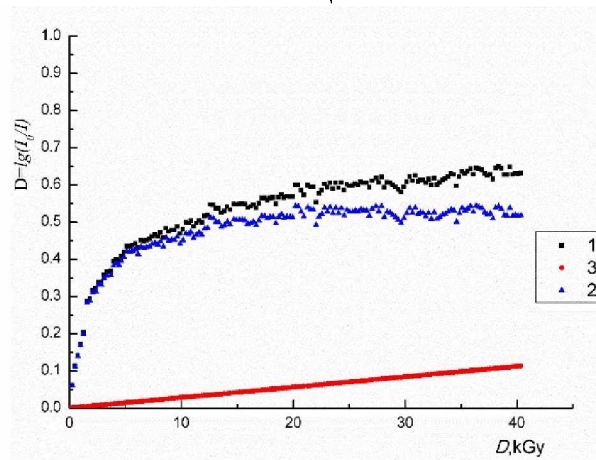


Рисунок 24 - Кинетика накопления V_k^- -центров в LiF-WO_3 в зависимости от дозы облучения, 40К, мониторинг при $\lambda = 350$ нм (3,54 эВ). 1 – кинетика, 2 – быстрый компонент, 3 – медленный компонент

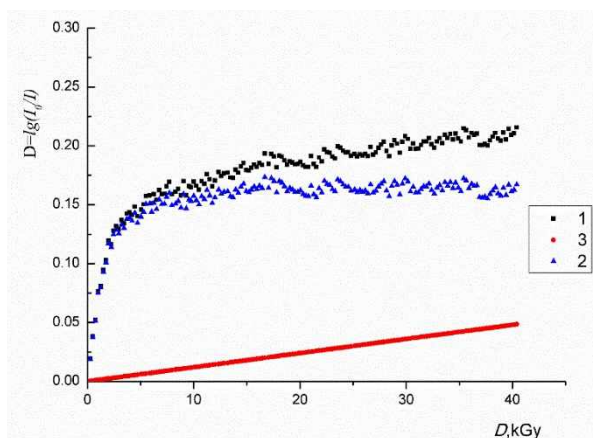


Рисунок 25 - Кинетика накопления F_2 -центров в LiF- WO_3 в зависимости от дозы облучения, 220 К, мониторинг при $\lambda = 450\text{nm}$ (2,76 эВ). 1 – кинетика, 2 – быстрый компонент, 3 – медленный компонент

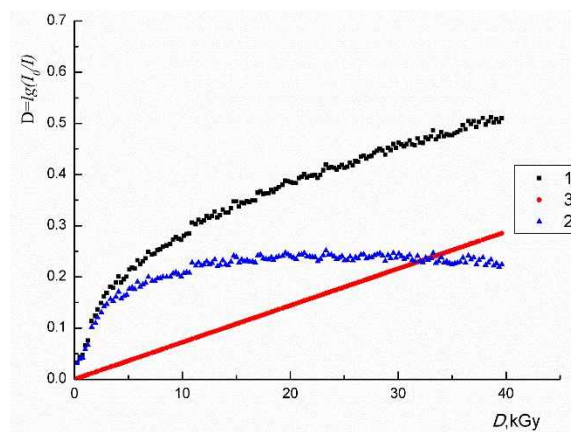


Рисунок 26 - Кинетика накопления ЦО при $\lambda = 290\text{nm}$ в LiF- WO_3 в зависимости от дозы облучения, 220 К. 1 – кинетика, 2 – быстрый компонент, 3 – медленный компонент

Подробно изучены процессы накопления центров окраски в кристаллах LiF- WO_3 в температурном диапазоне 20...300 К. В пределах изученных доз облучения в кристаллах LiF-W кинетики накопления (зависимости оптической плотности от дозы электронного облучения) всех типов центров окраски состоят из быстрой (нелинейной) и медленной (линейной) стадий при всех температурах в диапазоне 20 – 300 К. Примеры кинетических кривых, измеренные в процессе облучения в максимумах полос дырочных и электронных центров в зависимости от поглощенной дозы радиации приведены на рисунках 23...26. Отметим, что поглощенная доза за импульс составляла 250 ± 20 Гр.

Кинетики накопления и температурные зависимости эффективности накопления (ЭН) первичных дефектов (F-, V_k – центров) на медленной стадии подобны аналогичным зависимостям в чистых LiF и объясняются процессами пространственного разделения пар Френкеля и стабилизацией Н-центров в решетке кристалла. Быстрая стадия ЭН ЦО связана с примесями и дает значительный вклад в количество накапливаемых при малых дозах облучения центров и заканчивается при дозах 10^4 Гр для всех типов ЦО при всех температурах.

Температурные зависимости ЭН первичных дефектов на медленной и быстрой стадиях отличаются (рисунки 27, 28).

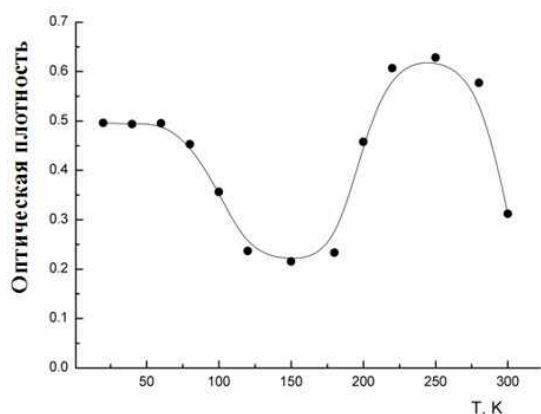


Рисунок 27 - Температурная зависимость ЭН F-центров в LiF-WO₃ (быстрая стадия)

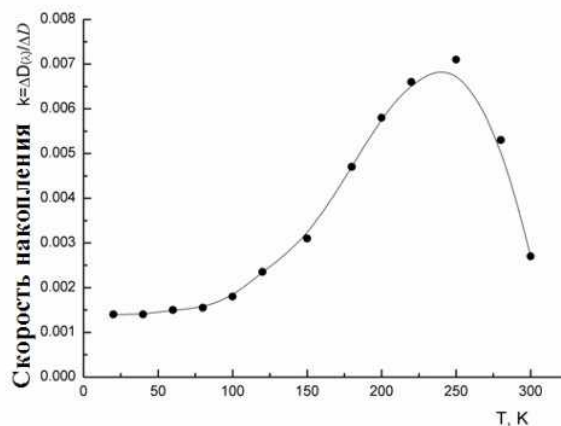


Рисунок 28 - Температурная зависимость ЭН F-центров в LiF-WO₃ (медленная стадия)

Температурная зависимость эффективности накопления F₂-центров, которые вносят основной вклад в деградацию активаторной люминесценции, облученных дозой 40×10³ Гр кристаллов LiF-WO₃ показана на рисунке 29. Накопление F₂-центров на быстрой стадии в диапазоне 60... 100 К значительно выше, чем в чистых образцах фторида лития. Причина – накопление при этих температурах более высокой концентрации F-центров, из которых F₂-центры образуются в результате реакций взаимного преобразования в поле радиации. То есть оптимальная температура эксплуатации сцинтиллятора 200 К.

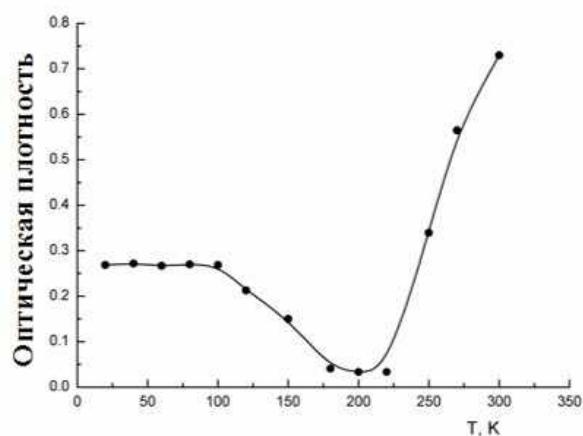


Рисунок 29 - Температурная зависимость накопления F₂-центров в LiF-WO₃, 40×10³ Гр

Из представленных результатов следует, что при любых температурах из интервала 20 – 300 К с ростом дозы электронного облучения происходит **искажение спектра и изменение интенсивности** активаторной КЛ кристаллов LiF-WO₃. Это основные причины деградации сцинтиллятора. Характер и степень изменений зависит от типа примеси, температуры, дозы облучения, типа и количества накопленных ЦО. Отметим, что такие же закономерности деградации характерны для кристалла LiF-TiO₂.

Выводы

1. В кристаллах LiF с многовалентными примесями металлов, замещающих ионы Li⁺ создается два вида центров свечения, которые могут находиться в едином комплексе или разделены в пространстве в виде расположенных в соседних узлах и связанных ионов O²⁻-Va⁺ и O²⁻-Me. Эти два центра создают две полосы люминесценции с максимумами в области 3,1 эВ и 2,6 эВ.

2. Центр O^{2-} -Me создает в области 4,0...6,1 эВ полосы поглощения (ВФЛ) с параметрами близкими для однотипных полос в кристаллах с разными металлами. Количество этих полос определяется валентностью металла, то есть количеством ионов O^{2-} необходимых для компенсации избыточного заряда металла, которые расположены в ближайших к нему узлах и образуют единый центр, по-видимому, с разной ориентацией осей диполей.
3. Закономерности затухания ФЛ полос 3,1 эВ и 2, 6 в кристаллах LiF-WO₃ и LiF-TiO₂ схожи, но параметры и характеристики индивидуальны для каждой полосы, типа примеси металла, полосы ВФЛ, температуры кристалла.
4. При электронной бомбардировке в кристаллах LiF-WO₃, LiF-TiO₂ возбуждаются O^{2-} -Me- и O^{2-} -Va⁺-центры, которым соответствуют две полосы КЛ с близкими к ФЛ значениями параметров, а соотношение интенсивностей КЛ увеличивается в пользу O^{2-} -Me-центров с ростом валентности примесного металла.
5. С ростом дозы электронного облучения интенсивность КЛ при $D < 10^3 \dots 10^4$ Гр быстро возрастает и при $D > 10^3 \dots 10^4$ Гр медленно убывает. Причины – преобразование дорадиационной дефектности и накопление F₂ центров окраски, соответственно. Кинетика ИКЛ содержит три компонента (два затухания и один разгорания). Все компоненты описываются экспоненциальными законами с параметрами, зависящими от типа примеси, температуры и полосы люминесценции.
7. Существует 2 механизма передачи энергии O_2^- -Va- и O_2 -Me-центрам люминесценции: быстрый (последовательный захват зонных электронов и дырок) и медленный, обусловленный процессами миграции и захвата дырок ионами кислорода.
8. Облучение кристаллов LiF, LiF-WO₃, LiF-TiO₂ приводит к накоплению одинаковых ЦО, но с более высокими концентрациями в LiF-WO₃, LiF-TiO₂ при изодозном облучении.
9. Кинетики накопления всех типов центров окраски в кристаллах LiF-WO₃ и LiF-TiO₂ при всех температурах в пределах изученных доз радиации состоят из быстрой (нелинейной) и медленной (линейной) стадий. Медленная идентична кинетике в чистых кристаллах фторида лития, а быстрая для всех типов ЦО насыщается при дозах $10^3 \dots 10^4$ Гу и определяется эффективностью выживания первичных дефектов (V_k при $T < 125$ К и Н при $T > 150$ К).
10. Температурные зависимости эффективности накопления F-центров в LiF и LiF-WO₃ отличаются тем, что при $T < 120$ К в LiF-WO₃ накапливается существенно больше центров, что обусловлено увеличением эффективности выживания дырочных центров (V_k) при этих температурах за счет взаимодействия с дорадиационной дефектностью.
11. Оптимальный температурный интервал эксплуатации сцинтилляторов LiF-WO₃ - 175...225 К

Цитируемые источники:

1. Егранов А.В. Спектроскопия кислородных и водородных примесных центров в щелочно-галогенидных кристаллах / А.В. Егранов, Е.А. Раджабов. – Новосибирск: Наука, 1992. – 159 с.
2. Мысовский С.Н. Молекулярные магний-кислородные центры в кристаллах LiF / С.Н. Мысовский, С.Н. Мироненко, А. И. Непомнящих, А.Л. Шлюгер // Опт. и спектр. – 1987. – Vol 63, № 4. – Р. 807 – 809.

Публикации

Основные результаты исследований опубликованы в 4 статьях, индексируемых в зарубежных базах данных (Scopus), сборниках трудов научных конференций:

1. **Ge Guanghui.** Luminescence of LiF Crystals Doped with Metal Oxide Impurities / V.I. Korepanov, P.V. Petikar, Guanghui Ge // Key Engineering Materials Submitted. – 2016. – V. 685. – P. 623-626.
2. **Ge Guanghui.** Pulsed Cathodoluminescence of LiF Crystals Doped with W and Ti / V.I. Korepanov, P.V. Petikar, Guanghui Ge, Yanyi Li // Key Engineering Materials Submitted. – 2016. – V. 712. – P. 372-375.
3. **Ge Guanghui.** Photoluminescence of LiF Crystals Doped with Oxygen-Containing Impurities / V.I. Korepanov, P.V. Petikar, Guanghui Ge, A.A. Lipovka // Key Engineering Materials Submitted. – 2018. – V. 769. – P. 141-145.
4. **Гэ Гуанхуэй.** Радиационная деградация сцинтилляторов LiF:W / Гэ Гуанхуэй, В.И. Корепанов, П. В. Петикарь // Письма в ЖТФ. – 2019. – Т. 45, Вып. 14. – С.28-30.
5. **Гэ Гуанхуэй.** Люминесценция кислородных центров в кристаллах LiF / Гуанхуэй Гэ, П. В. Петикарь, А. А. Липовка; науч. рук. В. И. Корепанов // Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2017): сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 27–29 ноября 2017 г. — Томск: Изд-во ТПУ. – 2017. – С. 140-141.
6. **Гэ Гуанхуэй.** Кинетика накопления центров окраски в кристаллах LiF с оксидами металлов / Гуанхуэй Гэ, П.В. Петикарь; науч. рук. В. И. Корепанов // Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2017): сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 27–29 ноября 2017. – Томск: Изд-во ТПУ. – 2017. – С. 138-139.