

УДК 538.9

## НАНОДЕФЕКТЫ В СИЛЬНОДЕФЕКТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ

© 2019 г. В. М. Лисицын<sup>1, \*</sup>, Л. А. Лисицына<sup>2</sup>, Е. Ф. Полисадова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский Томский политехнический университет”, Томск, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Томский государственный архитектурно-строительный университет”, Томск, Россия

\*E-mail: lisitsyn@tpu.ru

Поступила в редакцию 03.09.2018 г.

После доработки 10.09.2018 г.

Принята к публикации 22.10.2018 г.

Обсуждается возможность существования комплексных дефектов нанометрового размера в кристаллофосфорах с высокой концентрацией дефектов. Показано что оптически-активные нанодфекты в люминофорах на основе иттрий-алюминиевого граната активированного РЗИ и в сцинтиляционных кристаллах  $ZnWO_4:Eu$  имеют большое сечение захвата электронных возбуждений.

DOI: 10.1134/S036767651903013X

### ВВЕДЕНИЕ

Существующими моделями предполагается, что дефекты решетки распределены по кристаллу равномерно. Дефект, активатор, представляется некоторой элементарной единицей, которой характерны определенные свойства вне зависимости от того, в какой матрице он находится. Это допущение подтверждается исследованиями стимулированных радиацией процессов в кристаллофосфорах с совершенной структурой и малой концентрацией активатора.

Использование такого подхода обеспечило возможность установления структуры многих дефектов (центров свечения в том числе), процессов связанных с миграцией дефектов, их преобразованием, участием в передаче энергии возбуждения, релаксации возбуждения. Но во многих случаях в практике используемые кристаллофосфоры содержат большие концентрации дефектов, активаторов, кристаллическая структура сложна и несовершенна. Поэтому можно предполагать, что вводятся дефекты в такие кристаллы при синтезе в виде сложных комплексов. Комплексы должны представлять собою собственно активатор; вошедшие вместе с ним другие примеси, собственные дефекты решетки, которые компенсируют разницу в зарядах ионов матрицы и активатора, упругие напряжения в области активатора. Такой комплекс должен иметь нанометровые размеры и назван нанодфектом в отличие от точечного [1, 2]. Кристаллофосфоры, содержащие большие концентрации дефектов, из которых формируются нанодфекты, назовем сильнодефектными. Формирование при синтезе таких комплексных де-

фектов с центрами свечения и поглощения в их составе должно приводить к существенным изменениям совокупности процессов передачи энергии возбуждения центрам свечения и релаксации.

Основная информация о возможности формирования нанодфектов и их составе, имеющаяся к настоящему времени, получена на основании исследования кристаллов LiF, легированных поливалентными ионами Fe, Ti, U, W. Поливалентные ионы имеют заряд, отличающийся от заряда иона Li, который они замещают. Очевидно, для компенсации заряда, а также упругих напряжений в области примесного иона должны вводиться собственные дефекты, ионы в междоузлиях и вакансии. Выращивание кристаллов с поливалентными ионами проводится из шихты, в которую добавляются ионы в виде окислов; это означает, что в кристалл входят и ионы кислорода. Поливалентные ионы входят в кристалл только в том случае, когда выращивание проводится на воздухе.

При этом в кристаллы вместе с активатором, ионами поливалентных металлов, входит кислород [3–6]. Наличие кислорода в кристаллах LiF, активированных  $Li_2O$ , ионами поливалентных металлов, вводимых при синтезе в виде окислов, подтверждается появлением характерного поглощения в области от 4.5 эВ до границы собственного поглощения.

Предполагается, что в составе центра свечения в кристаллах LiF–O и активированных поливалентными ионами кристаллах LiF присутствует кислород: [7–10]. Вероятно, ион  $O^{2-}$  является эле-

ментом центра свечения. Основанием для этого предположения являются результаты исследования спектров фотолюминесценции при возбуждении импульсами лазерного излучения с энергией кванта 4.66 эВ. Излучение на 3.1 эВ в кристаллах LiF–O обусловлено свободными ионами  $O^{2-}$  [11]. В кристаллах LiF– $Me_nO_m$ , ( $Me$ : Fe, Ti, U, W) фото-возбуждением инициируется люминесценция с положением полос в области 2.5–3.0 эВ для разных активаторов, обусловленная центром свечения с  $O^{2-}$  рядом с ионом активатора [12].

В ИК-спектрах поглощения LiF, активированных W, Ti, Fe, имеется характерная, обусловленная ионами  $OH^-$  в свободном состоянии полоса поглощения на  $3730\text{ см}^{-1}$  [12, 13]. В ИК-спектрах активированных кристаллов W, Ti, Fe, U обнаружены полосы в области  $3620\text{--}3560\text{ см}^{-1}$ , положения и количество которых зависит от типа катиона активатора.

Облучение кристаллов LiF, содержащих гидроксид лития, приводит к созданию молекулярных ионов кислорода  $O_2^-$ , проявляющемуся наличием электронно-колебательного спектра (ЭКС) [14]. В кристаллах с поливалентными активаторами наблюдаются эти полосы со смещением в зависимости от активатора [15].

В чистых кристаллах LiF образование  $F_2$ -центров окраски происходит в результате сложной совокупности процессов, которые в целом определяются вероятностью образования простых  $F$  центров окраски в пространственно близких узлах решетки. В кристаллах LiF, легированных ионами поливалентных металлов, накопление  $F_2$ -центров происходит эффективно со статистической вероятностью, пропорциональной концентрации вводимой примеси, но не вероятностью случайного образования двух  $F$ -центров в близких узлах решетки, что характерно для накопления  $F_2$ -центров в чистых кристаллах [10]. Очевидно, образование  $F_2$ -центров в активированных поливалентными ионами кристаллах происходит с участием уже существовавших в кристалле анионных вакансий. Таким образом, при выращивании кристалла LiF с активаторами – поливалентными ионами, в кристалл вводятся ионы  $O^{2-}$ ,  $OH^-$ , собственные дефекты решетки, которые объединяются в комплексы в области активатора, нанодфекты.

Нанодфект должен иметь большое сечение захвата носителей заряда, энергии. При радиусе нанодфекта в 3–4 межатомных расстояния сечение захвата электронных возбуждений в области нанодфекта превышает таковое для случайного в кристалле узла в 200–500 раз. В случае рекомбинационного характера передачи энергии центру свечения вероятность рекомбинации в этой области много выше. Подвижная дырка в релаксированной области автолокализуется с существенно

большой вероятностью, чем в регулярных узлах решетки. Захват электрона на этой дырке приводит к созданию околопримесного автолокализованного экситона, энергия которого передается центру свечения. В том случае, когда время жизни околопримесного экситона много больше времени жизни центра свечения в возбужденном состоянии, вероятность передачи энергии центру свечения должна быть близкой к единице. Это соотношение для сцинтилляторов всегда выполняется: время жизни околопримесного автолокализованного экситона имеет величину порядка  $10^{-4}\text{--}10^{-6}\text{ с}$  [16, 17]. Поэтому наличие нанодфектов делает кристалл LiF с поливалентными ионами эффективным преобразователем энергии радиации в люминесценцию.

Можно ожидать, что и в других кристаллофосфорах и сильнодефектных оптических материалах, возможно формирование нанодфектов при синтезе, которые могут существенно изменить излучательные характеристики этих материалов. В настоящей работе приведена экспериментально полученная информация о возможности существования нанодфектов в сцинтилляционных кристаллах и люминофорах.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для установления возможности существования в сильнодефектных кристаллах сцинтилляторов и люминофоров использовали спектральные и кинетические характеристики люминесценции. Люминесценция образцов материалов возбуждалась импульсными потоками высокоэнергетических электронов, излучений лазеров с  $\lambda_{\text{возб}} = 337, 266, 355\text{ нм}$ , светодиодного чипа с  $\lambda_{\text{возб}} = 452\text{ нм}$ . Плотность энергии возбуждения потоком электронов составляла  $70\text{ мДж} \cdot \text{см}^{-2}$ , средняя энергия ускоренных электронов  $\sim 250\text{ кэВ}$ , длительность импульса возбуждения – 10 нс. Длительность импульсов возбуждения потоками лазерного излучения составляла 2 нс. Для возбуждения люминофоров использовали излучение светодиодных чипов с полосой излучения 360, 395 и 452 нм. При измерении кинетических характеристик на чип подавали импульсное напряжение, что позволяло получить длительность вспышки 70 нс.

Регистрация спектров и кинетики затухания люминесценции при возбуждении потоками электронов и лазерного излучения осуществлялась фотоэлектронным умножителем ФЭУ-84-6 с использованием монохроматора МДР-3 и цифрового осциллографа LECROY 6030 (350 МГц). Временное разрешение измерительной системы составляло 7 нс. При возбуждении излучением чипа регистрация кинетики затухания люминесценции осуществлялась через монохроматор МДР-204 ФЭУ

“Hamamatsu 10720-20” и осциллографом Tetronix DPO-3033 с временным разрешением 2 нс.

При стационарных измерениях спектры люминесценции и возбуждения измеряли спектрофлуориметром Cary Eclipse фирмы Agilent, источником света служила импульсная ксеноновая лампа. Регистрация интегральных спектров свечения осуществлялась оптоволоконными спектрометрами AvaSpec-3648 и AvaSpec-2048 фирмы Avantes в спектральном диапазоне 200–1100 нм.

Элементный состав люминофоров был определен с использованием сканирующего электронного микроскопа Quanta3D 200i с системой энергодисперсионного рентгеновского анализа (EDAX). Морфологию порошков люминофоров исследовали с помощью оптического микроскопа “Leica DM 6000 M” и электронного микроскопа Quanta3D 200i.

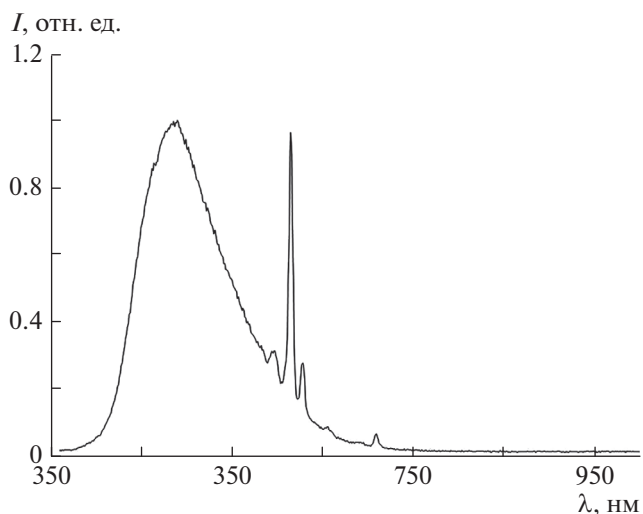
Образцы сцинтилляционных материалов были предоставлены Институтом сцинтилляционных материалов НАН Украины. Исследованы образцы люминофоров промышленных серий.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *О существовании нанодфектов в кристаллах вольфраматов металлов*

Обнаружено, что радиолюминесценция кристаллов  $\text{PbMoO}_4$ ,  $\text{CaMoO}_4$ ,  $\text{CaWO}_4$ ,  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{CdWO}_4$ ,  $\text{CdWO}_4\text{--Li}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CdWO}_4\text{--Li}_2\text{CO}_3\text{--Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{LiF:WO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{W}_{0.95}\text{Mo}_{0.05}\text{O}_4$  и других подобных структур имеет близкие спектральные характеристики. В спектрах люминесценции кристаллов присутствует полоса с максимумом около 2.6 эВ с полушириной ~0.6 эВ. Близкие значения спектрально-кинетических параметров возбуждаемого свечения в кислородсодержащих материалах, различных, как по типу кристаллической решетки, так и по типу соактиваторов, свидетельствуют о том, что в структуре излучательных центров есть нечто общее [1, 10, 18, 19].

Кристаллы вольфраматов, молибдатов получают путем выращивания (обычно методом Чохральского) из расплава шихты, приготовленной смешиванием окислов металлов Zn, Pb, Cd с окислами вольфрама, молибдена в пропорциях, нужных для получения стехиометрического состава. Очевидно, что при таком выращивании кристалл содержит много дефектов кристаллической решетки, что должно сказываться на характеристиках материала. В [10] высказано предположение о том, что в сильнодефектных кристаллах, которыми являются вольфраматы, молибдаты, так же, как и в активированных поливалентными ионами кристаллах LiF, существуют комплексные дефекты (нанодфекты), представляющие собою совокупность собственных дефектов решетки, введенных



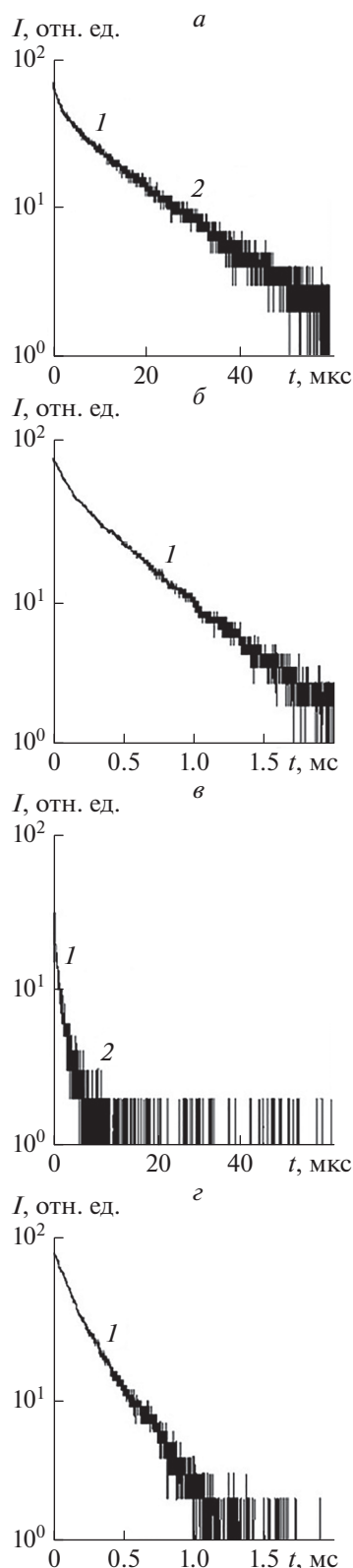
**Рис. 1.** Спектры импульсной катодолуминесценции кристалла  $\text{ZnWO}_4\text{--}3$  моль % Eu, измеренные способом “спектр за импульс”.

при выращивании примесных ионов, в числе которых есть ионы кислорода,  $\text{OH}^-$ .

Введение примеси Li и Bi в кристалл  $\text{CdWO}_4$  приводит к неконтролируемому изменению световых выходов. Это позволяет полагать, что роль Li и Bi в сцинтилляционном процессе является косвенной. Введение легирующей примеси должно сказываться на степени собственной дефектности из-за взаимной компенсации зарядовой разницы и, соответственно, на образовании нанодфекта. Поэтому введение легирующей примеси приводит к изменению световых выходов, но это изменение определяется сопутствующими образованию нанодфектов процессами при выращивании кристалла [20–22].

Были изучены спектрально-кинетические характеристики люминесценции  $\text{ZnWO}_4$  и  $\text{ZnWO}_4\text{:Eu}$ , изготовленных в виде моно-, микро- и макрокристаллов. Макрокристаллы были выращены на воздухе методом Чохральского, нанокристаллы — в условиях микроволновой активации при  $120^\circ\text{C}$  в течение 30 мин гидротермальным методом. Размеры нанокристаллов, имеющих вид зерен, составляли 25 нм. Нанокристаллы в виде стержней имели длину 50–100 нм, диаметр 5–7 нм. Макрокристаллы были получены путем дробления макрокристаллов.

Установлено, что спектры люминесценции макро- и нанокристаллов близки по форме и положению. В спектре выделяется характерная для  $\text{ZnWO}_4$  основная сцинтилляционная полоса с максимумом в области 480 нм и узкая, обусловленная европием полоса на 614 нм (рис. 1). Однако кинетические кривые затухания люминесценции



**Рис. 2.** Кинетика затухания свечения в полосах 480 и 614 нм при возбуждении электронным пучком образцов макрокристаллов (*a* –  $\lambda = 480$  нм, *1* –  $\tau_1 \sim 1.3$  мкс, *2* –  $\tau_1 \sim 15$  мкс; *б* –  $\lambda = 614$  нм, *1* –  $\tau_1 \sim 0.5$  мс) и нанокристаллов  $\text{ZnWO}_4:\text{Eu}$  (*в* –  $\lambda = 480$  нм, *1* –  $\tau_1 \sim 0.3$  мкс, *2* –  $\tau_1 \sim 3$  мкс; *г* –  $\lambda = 614$  нм, *1* –  $\tau_1 \sim 0.3$  мс), легированных Eu (3 моль %).

ции нано- и макрокристаллов  $\text{ZnWO}_4:\text{Eu}$  после импульса возбуждения заметно различаются.

Кинетические кривые затухания люминесценции исследованных образцов приведены на рис. 2. Кинетики затухания полосы на  $\sim 480$  нм для макрокристаллов и нанокристаллов существенно различаются (*a*, *в* на рис. 2). Основная доля люминесценции в этой области спектра, которой определяется световыход сцинтиллятора, высвечивается в микросекундном диапазоне. В макрокристалле к 12 мкс полоса на  $\sim 480$  нм уменьшается в 2.5 раза, тогда как в нанокристалле – в 20 раз. Характеристическое время затухания люминесценции в области 480 нм в макрокристалле составляет 15 и в нанокристалле – 3 мкс. Имеет место и уменьшение характеристических времен затухания люминесценции и в области 614, обусловленной европием. В макро- и нанокристаллах оно равно 0.5 и 0.3 мс соответственно. Из представленных результатов исследований видно, что изменение со временем полосы на 614 нм в макро- и нанокристаллах много меньше, чем изменение полосы на 480 нм. Отметим, что кинетические характеристики образцов с нанокристаллами в виде стержней и зерен одинаковы.

Исследования спектрально-кинетических кинетических кривых затухания ИКЛ неактивированных намеренно кристаллов  $\text{ZnWO}_4$  разной дисперсности показали следующее: есть существенное различие в кинетических кривых затухания люминесценции образцов с синтезированными нанокристаллами и монокристаллов  $\text{ZnWO}_4$ . Характеристические времена затухания люминесценции монокристаллов равны 26, 15, 13 мкс. Времена затухания люминесценции нанокристаллических образцов с размерами зерен 25 нм, имеющих вид стержней длиной 50–100 нм, диаметром стержней 5–7 нм или длиной 150–200 нм, диаметром стержней 10 нм, равны 5, 7 мкс соответственно. Отметим, что в раздробленных монокристаллах с размером доминирующих частиц  $>250$  нм и с размером доминирующих частиц  $\leq 250$  нм характеристические времена затухания люминесценции имеют такие же времена затухания, как и в монокристаллах.

Приведенные результаты исследований свидетельствуют о том, что при нанометровых размерах наблюдается существенное влияние поверхности кристалла на излучательные характеристики кристаллов. При размерах кристаллов, превышающих микрометр в диаметре, излучательные характеристики неизменны. Такое возможно при условии, что размеры излучающих комплексов сопоставимы с размерами кристаллов. В пользу этого предположения свидетельствует и слабое влияние размеров кристаллов на излучательные характеристики европиевых центров.

**Таблица 1.** Элементный состав исследованных люминофоров

Люминофор	Содержание элемента, %						
	Y	Al	Ga	O	Gd	Ce	Eu
СДЛ5000	17.36	24.75	9.14	48.75	—	—	—
СДЛ4100	13.74	31.53	—	54.73	—	—	—
СДЛ 3000	15.91	21.27	11.78	51.04	—	—	—
СДЛ3300	8.87	27.60	—	53.31	10.22	—	—
СДЛ2466	14.36	28.35	—	53.27	4.02	—	—
СДЛ2700	3.81	24.48	—	59.32	12.26	0.13	—
СДЛ3400	9.10	27.72	—	57.57	5.06	0.56	—
СДЛ4000	13.74	26.60	—	59.66	—	—	—
MG 531W S 800	12.50	28.22	—	59.27	—	—	—
MG-397 2 W S800	12.46	26.77	—	60.77	—	—	—
MG-558-2W S800	12.76	27.78	—	58.70	0.77	—	—
MG-571-1w s800	12.50	28.22	—	59.27	—	—	—
MG-562-1w s800	13.35	27.10	—	59.55	—	—	—
L-2082-1+AWS-90821-3S 1000	10.04	25.25	—	62.98	1.73	—	—
L-2086 2W S 1000	11.37	27.97	—	56.19	4.46	—	—
GD 273-1 1W	11.04	28.92	—	55.76	4.29	—	—
AWS 5 90818-1	12.32	25.04	—	61.09	—	—	1.55
AWB3	6.42	28.18	—	56.72	7.98	0.70	—
FL-5049	4.61	26.09	—	54.73	11.66	2.90	—
LEUD	10.55	23.73	—	60.99	3.53	1.20	—

*О возможности существования нанодфектов в люминофорах*

Светодиоды, у которых синее излучение чипов преобразуется люминофором в видимое, являются наиболее эффективными источниками “белого” света. Чаще всего используют люминофоры на основе алюмоиттриевых гранатов, активированных редкоземельными ионами. Синтез люминофоров проводится на воздухе из шихты, представляющей смеси порошков по крайней мере четырех окислов. Очевидно, что при таком способе синтеза сложно обеспечить стехиометрию состава и образуются кристаллы с высокой концентрацией дефектов. Поэтому можно ожидать, что в люминофорах при синтезе могут формироваться нанодфекты, которые определяют высокую эффективность преобразования синего излучения в белое.

Для исследований была выбрана группа промышленных ИАГ-люминофоров, различающихся соотношением основных элементов состава. Исследованные люминофоры представляли собой твердые растворы окислов Y, Al, Gd, Ga, активированные Ce. Все люминофоры представляют собой порошки из микрокристаллов или микроплавней размерами менее 30 мкм.

Результаты определения состава исследованных люминофоров приведены в табл. 1. В исследованных люминофорах отклонение от среднего содержания алюминия не превышает 20%, содержание иттрия изменяется в 4 раза, гадолиния – от 0 до 12%. Все образцы по описаниям легированы церием. В ряде люминофоров церий не был обнаружен, поскольку его слабая полоса часто перекрывается фоном в спектре, обусловленным наличием в люминофоре других элементов.

Были измерены спектры возбуждения и люминесценции всех выбранных люминофоров. В табл. 2 приведены результаты исследования характеристик спектров люминесценции и возбуждения, измеренные стандартным методом с использованием спектрофлуориметра Cary Eclipse. В таблице  $\lambda_{em}$ ,  $\lambda_{ex}$ ,  $\lambda_{em-m}$ ,  $\lambda_{ex-m}$  – длины волн спектров люминесценции, возбуждения и положения максимумов полос,  $\Delta E$  – полуширина соответствующих полос в электронвольтах.

Были измерены кинетические характеристики затухания фотолюминесценции люминофоров при возбуждении излучением чипа с  $\lambda_{ex-m} = 452$  нм. Значения характеристических времен затухания люминесценции приведены в табл. 3. Характеристические времена затухания  $\tau$  всех исследованных люминофорах находятся в пределах 60–66 нс. Ис-

**Таблица 2.** Характеристики спектров люминесценции и возбуждения исследованных люминофоров

Наименование люминофора	Характеристики спектров							
	Люминесценция				Возбуждение при $\lambda_{em}$			
	$\lambda_{ex} = 340$ нм		$\lambda_{ex} = 440$ нм					
	$\lambda_{em}$ , нм	$\Delta E$ , эВ	$\lambda_{em}$ , нм	$\Delta E$ , эВ	$\lambda_{ex-m}$ , нм	$\Delta E$ , эВ	$\lambda_{ex-m}$ , нм	$\Delta E$ , эВ
СДЛ5000	515	0.396	515	0.393	344	0.257	446	0.441
СДЛ4100	532	0.413	533	0.403	341	0.322	446	0.457
СДЛ 3000	—	—	—	—	341	0.273	453	0.421
СДЛ 1000	532	0.416	530	0.440	340	0.273	446	0.419
СД3300	532	0.390	532	0.384	340	0.261	448	0.447
MG 531 W S800	533	0.398	533	0.399	340	0.313	445	0.447
MG 633 1 W S800	533	0.401	533	0.405	340	0.322	448	0.447
L-2083-2-+L2085-1-S1000	533	0.408	533	0.415	340	0.332	446	0.409
AWS5-90818-1	533	0.398	533	0.406	340	0.332	448	0.447
ЕДЛ 5100	511	0.420	511	0.411	340	0.322	448	0.447
FL-4255	512	0.411	512	0.419	345	0.331	450	0.494
FL-5049	560		564	0.502	340		480	0.448
FL-6040	500		510	0.273			510	0.542

ключение составляет люминофор СДЛ-5000, для которого время затухания составляет 53 нс. Измеренные времена затухания совпадают с измеренными в [23, 24].

**Таблица 3.** Характеристики полос фотолюминесценции и времена затухания в максимумах полос люминесценции исследованных люминофоров

Люминофор	$\lambda_{ex-m} = 452$ нм		$\tau$ , нс
	$\lambda_{em-m}$ , нм	полуширина полосы, эВ	
AWS-5/90818-1	535 ± 2	0.474	61
L-2086/2W	550 ± 2	0.457	62
MG-397/2W	545 ± 2	0.438	64
MG-531/W	532 ± 2	0.447	62
MG-558/2W	537 ± 2	0.457	65
MG-571/W	535 ± 2	0.447	62
СДЛ-3300	553 ± 2	0.443	64
СДЛ-3000	556 ± 2	0.475	66
СДЛ-3400	550 ± 2	0.455	65
СДЛ-4000	532 ± 2	0.468	61
СДЛ-4100	530 ± 2	0.462	60
СДЛ-5000	517 ± 2	~0.450	53

Сопоставление результатов исследования излучательных характеристик люминофоров с их элементным составом позволяет сделать следующее заключение. Нет прямой связи спектральных и кинетических характеристик излучения с составом исследованных люминофоров. Это означает, что излучательные характеристики люминофоров определяются не только элементным составом, но и дефектами решетки, вводимыми в кристалл при синтезе. С изменением элементного состава меняется и дефектная структура кристалла, возможно с формированием подобных друг другу комплексов дефектов, нанодефектов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты исследований сцинтилляционных кристаллов на основе вольфрамата цинка свидетельствуют о том, что при синтезе в этих кристаллах формируются комплексные дефекты, имеющие нанометровые размеры. Кинетические характеристики исследованных кристаллов  $ZnWO_4:Eu$  резко изменяются при уменьшении размеров кристаллов до 10 нм и менее.

В исследованных люминофорах для белых светодиодов спектральные и кинетические характеристики люминесценции в области основных полос близки, хотя элементный состав люминофоров сильно различается. Это позволяет предположить, что центры свечения и процессы их релаксации в

исследованных люминофорах подобны. По-видимому, излучательные характеристики люминофора определяются не только составом, но и дефектностью этой среды, прежде всего связанной с собственными дефектами. Вероятно, при синтезе в люминофоре формируются комплексные дефекты (нанодфекты) с центрами свечения в них, включающими в свой состав собственные дефекты структуры. Наличие нанодфектов приводит к повышению эффективности передачи энергии возбуждения центрам свечения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисицына Л.А., Олешко В.И., Путинцева С.Н., Лисицын В.М. // Опт. и спектроск. 2008. Т. 105. С. 598; Lisitsyna L.A., Oleshko V.I., Putintseva S.N., Lisitsyn V.M. // Opt. and Spectrosc. 2008. V. 105. № 4. P. 531.
2. Lisitsyna L.A., Lisitsyn V.M. // Phys. Sol. St. 2013. V. 55. № 11. P. 2297.
3. Непомнящих А.И., Раджабов Е.А., Егранов А.В. Центры окраски и люминесценция кристаллов LiF. Новосибирск: Наука, 1984. 112 с.
4. Лисицына Л.А., Путинцева С.Н., Лисицын В.М., Олешко В.И. // Неорган. матер. 2008. № 6. С. 754; Lisitsyna L.A., Putintseva S.N., Lisitsyn V.M., Oleshko V.I. // Inorganic Mater. 2008. V. 44. № 6. С. 659.
5. Шварц К.К., Кристансон Я.Ж., Лусис Д.Ю., Подиць А.В. / В сб.: Радиационная физика. V. Рига: Зинатне, 1967. С. 179.
6. Коржик М.В. Физика сцинтилляторов на основе кислородных монокристаллов. Минск: Белорусский гос. ун-т, 2003. 263 с.
7. Егранов А.В., Раджабов Е.А. Спектроскопия кислородных и водородных примесных центров в щелочно-галогенидных кристаллах. Новосибирск: Наука, 1992. 160 с.
8. Jain V.K. // J. Phys. D. 1986. V. 19. № 9. P. 1791.
9. Ребане Л.А. // Тр. ИФААН ЭССР. 1968. Т. 37. С. 14.
10. Лисицына Л.А., Корепанов В.И., Лисицын В.М. и др. // Оптика и спектроск. 2011. Т. 110. № 4. С. 582; Lisitsyna L.A., Korepanov V.I., Lisitsyn V.M. et al. // Opt. and Spectrosc. 2011. V. 110. № 4. P. 529.
11. Lammers M.J.J., Blasse G., Robertson D.S. // Phys. Stat. Sol. A. 1981. V. 63. P. 569.
12. Stoebe G.J. // Phys. Chem. Solids. 1970. V. 31. P. 1291.
13. Wedding B., Klein M. // Phys. Rev. 1969. V. 177. P. 1274.
14. Meistrich M.L. // J. Phys. Chem. Sol. 1968. V. 29. P. 1119.
15. Dauletbekova A., Lisitsyna L., Korepanov V. et al. // Phys. St. Sol. C. 2013. V. 10. № 2. P. 263.
16. Лисицын В.М., Корепанов В.И., Стреж В.В. и др. // Физика тв. тела. 1985. Т. 27. Вып. 10. С. 3052.
17. Лисицын В.М., Малышев А.А., Яковлев В.Ю. // ФТТ. 1983. Т. 25. № 11. С. 3356.
18. Kolobanov V.N., Kamenskikh I.A., Mikhailin V.V. et al. // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A. 2002. V. 486. P. 496.
19. Баранова О.П., Курсанова С.В., Колобанов В.Н. и др. // Персп. матер. 2008. № 4. С. 34.
20. Лисицын В.М., Валиев Д.Т., Туницына И.А. и др. // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 7/2. С. 75.
21. Kornulo A., Jankowska-Frydel A., Kuklinski B. et al. // Radiat. Meas. 2004. V. 38. P. 707.
22. Лисицын В.М., Валиев Д.Т., Лисицына Л.А. и др. // Журн. прикл. спектроск. 2013. Т. 80. № 3. С. 373; Lisitsyn V.M., Valiev D.T., Lisitsyna L.A. et al. // J. Appl. Spectrosc. 2013. V. 80. № 3. P. 361.
23. Xinbo Yang, Hogjun Li, Qunyu Bi, Liangbi Su, Jun Xu // J. of Crystal Growth. 2009. V. 311. P. 3692.
24. Зоренко Ю.В., Савчин В.П., Горбенко В.И. и др. // Физика тв. тела. 2011. Т. 53. Вып. 8. С. 1542.