

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

# ТРУДЫ

XXVIII МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
«РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА»

(Севастополь, 9-14 июля 2018 г.)

под редакцией заслуженного деятеля науки РФ,  
д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г.

Москва – 2018

УДК 669.  
ББК 22.38  
Р15  
ISBN 978-5-89671-023-3

Труды XXVIII Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела» (Севастополь, 9 – 14 июля 2018 г.), под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г., М.: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2018 г., 522с.

В рамках конференции проводилась XXII Международная школа молодых учёных «Радиационная физика твёрдого тела».

Редакционная коллегия:

д.ф.-м.н. Бондаренко Г.Г. (ответственный редактор),  
к.т.н. Гавриш В.М. (Севастопольский Государственный университет),  
Шалковская Н. А. (Севастопольский Государственный университет),  
д.ф.-м.н. Кристя В.И.,  
к.ф.-м.н. Гайдар А.И.,  
к.ф.-м.н. Дьячкова И.Г.,  
Смирнова Е.В.  
к.т.н. Шахбазов С.Ю.

УДК 669.  
ББК 22.38  
© Издательство ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2018

ISBN 978-5-89671-023-3

© Труды XXVIII Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела»

## ПРОГРАММА-СОДЕРЖАНИЕ

**Понедельник, 9 июля****10.00-14.00****Открытие конференции - Бондаренко Г.Г.**

1. Рогожкин С.В., Никитин А.А., Хомич А.А., Искадаров Н.А., Хорошилов В.В., Лукьянчук А.А., Разницын О.А., Шутов А.С., Федин П.А., Кулевой Т.В., Васильев А.Л., Пресняков М.Ю. «Исследование микроскопических причин радиационного упрочнения стали Eurofer 97 с помощью имитационного облучения ионами»	11
2. Волков Н.В., Олейников И.В., Сысоева Н.В., Сафонов Д.А., Яшин С.А. «Влияние состояния кремниевой подложки и режимов ионно-пучковой обработки на размерные параметры элементов микроэлектронных механических систем»	21
3. Овчинников В.В. «О незатухающем режиме распространения уединенных волн, осуществляющих структурно-фазовые превращения в метастабильных средах»	30
4. Бондаренко Г.Г., Кристя В.И., Мьо Ти Ха «Расчет напряжения зажигания слаботоочного газового разряда при наличии на катоде тонкой диэлектрической пленки»	35
5. Стальцов М.С., Чернов И.И., Калин Б.А., Беляев А.А., Гордеев А.В., Шестакова В.М., Болат-оол А.А., Кузнецова Т.В., Лебедев В.В. «Газовая пористость вдоль пробега ионов в ванадии и его сплавах при последовательном облучении ионами гелия и водорода»	40
6. Korolev A.A., Kozlov S.A., Stumpf S.A., Golovanev Y.S. «Antireflection effect of electronic nonlinearity inertia in violet range for few-cycle laser beams at transparent isotropic dielectric media boundary»	50

**14.00-15.00 Перерыв.****15.00-17.00 Секция “Радиационная физика металлов” (заседание школы молодых ученых)**

1. Шиманский В.И., Углов В.В., Черенда Н.Н., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М., Медин А.А. «Структурные изменения в циркониевом сплаве, легированном хромом и ниобием в результате воздействия компрессионными плазменными потоками»	61
--	----

2. Долуденко И.М., Шаталов А.С., Жигалина О.М., Хмеленин Д.Н., Артёмов В.В., Бедин С.А., Бондаренко Г.Г., Загорский Д.Л., Фролов К.В., Перунов И.В. «Применение ядерных фильтров для получения слоевых нанопроволок»	70
3. Шаталов А.С., Бондаренко Г.Г., Чигарев С.Г., Дюжиков И.Н., Загорский Д.Л., Долуденко И.М., Артемов В.В. «Создание спин-инжекторного источника терагерцового излучения на основе массива нанопроволок из ферромагнитных металлов»	78
4. Черкасов Д.А., Долуденко И.М., Бондаренко Г.Г., Артёмов В.В., Загорский Д.Л. «Влияние магнитного поля на структуру нанопроволок, получаемых репликацией пор трековых мембран»	85
5. Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И., Горелова Е.Г., Каширина Н.В., Петров В.С. «Механизмы формирования слоя ВаО на поверхности прессованного Pd-Ва катода магнетрона с беззнакальным запуском»	93
6. Казенов К.Б., Познырев Е.Н. «Применение времяпролетной позитронной аннигиляционной спектроскопии для исследования изменения физико-химических свойств материалов под воздействием экстремальных факторов окружающей среды»	105
7. Казенов К.Б. «Экспериментальное определение потока быстрых нейтронов у внешней поверхности корпуса ядерного реактора типа ВВЭР-1000 при увеличенной топливной загрузке»	111

**Вторник, 10 июля**

**9.00-14.00 Секция “Радиационная физика неметаллических материалов”**

1. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Костюк В.И., Шишов К.А. «Исследования стекла К-208, облученного электронами и протонами средних энергий»	117
2. Арутюнян В.В., Ерицян Г.Н., Григорян Н.Е., Саакян А.А., Цаканов В.М., Григорян Б.А. «Радиационно-стимулированное дефектообразование при облучении кристаллов кремния пикосекундными электронами»	127
3. Арутюнян В.В., Алексанян Е.М., Акопян Н.А., Арестакян А.Г., Бадалян А.О., Григорян Н. Е., Баграмян В.В., Саркисян А.А. «Радиационная стойкость новых композитных терморегулирующих покрытий»	138

4. Гынгазов С.А., Костенко В., Шевелев С.А., Купчишин А.И. «Модифицирование прочностных свойств оксидных материалов ионным облучением»	147
5. Милёхин Ю.М., Коптелов А.А., Коптелов И.А., Рогозина А.А. «Необратимые изменения теплофизических характеристик полимерных материалов при гамма-облучении»	155
6. Медведева И.Ф., Мурин Л.И., Маркевич В.П. «Формирование комплексов $C_s-C_s$ и $VO$ при отжиге E-центров в облученных кристаллах n-Si»	163
7. Макаренко Л.Ф., Ластовский С.Б., Якушевич А.С., Мурин Л.И., Крылов В.П., Татмышевский К.В. «Инжекционно-стимулированные реакции образования бистабильных дефектов в кремнии р-типа, облученном $\alpha$ -частицами»	170

**14.00-15.00 Перерыв.****15.00-17.00 Секция “Радиационная физика неметаллических материалов” (заседание школы молодых ученых)**

1. Дьячкова И.Г., Гурьева П.В, Монахов И.С., Новоселова Е.Г., Шахбазов С.Ю., Шупегин М.Л. «Исследование структуры нанокompозитных танталсодержащих кремний-углеродных пленок»	179
2. Толкачева Е.А., Мурин Л.И., Маркевич В.П. «Особенности процессов радиационного дефектообразования при облучении быстрыми электронами кристаллов Si, содержащих вакансионно-кислородные комплексы»	185
3. Мадатов Р.С., Асадов Ф.Г. «Радиационные эффекты в кристаллах GaS и GaS<YB>»	193
4. Мадатов Р.С., Джахангиров М.М., Фараджова У.Ф., Гаджиева С.А. «Применение метода комбинационного рассеяния света в кристаллах GaS и GaSe до и после ионного внедрения водорода с энергией 70 кэВ»	195
5. Мадатов Р.С., Нуриев И.Р., Мамедов М.А., Мамишова Р.М. «Исследование влияния $\gamma$ -излучения на фотоэлектрические свойства эпитаксиальных пленок $Pb_{1-x}Mn_xSe$ »	198
6. Файзуллаев Б.С., Исламов А.Х. «Инфракрасные спектры кварцевого стекла КУ-1, облученного быстрыми нейтронами»	201

**Среда, 11 июля****9.00-14.0 Секция “Радиационная физика металлов”**

1. Волков Н.В., Олейников И.В., Корневский Е.Л., Сафонов Д.А., Яшин С.А. «Применимость моделей ионного перемешивания для условий облучения систем «пленка-подложка» пучками ионов с широким энергетическим спектром»	203
2. Загорский Д.Л., Фролов К.В., Ломов А.А., Чуев М.А., Долуденко И.М., Шаталов А.С., Черкасов Д.А., Бедин С.А., Артёмов В.В., Панов Д.В. «Магнитные свойства нанопроволок из железа, никеля и кобальта, получаемых темплатным методом на основе трековых мембран»	213
3. Бакиева О.Р., Аверкиев И.К., Сурнин Д.В., Немцова О.М. «Исследование локальной атомной структуры поверхности 3d-металлов методом EELFS спектроскопии»	217
4. Быков П.В., Воробьёв В.Л., Тарасенков А.Н., Баянкин В.Я. «Формирование химического состава поверхностных слоёв титана, с напыленным слоем алюминия, методом ионно-лучевого перемешивания»	225
5. Портных И.А., Козлов А.В., Панченко В.Л. «Эволюция радиационной пористости в стали X18H9 при нейтронном облучении»	231
6. Кинев Е.А. «Размер зерна как монитор качества аустенитной стали с повышенной стойкостью к распуханию»	239
7. Углов В.В., Злоцкий С.В., Подобед А.Д. «Эрозия поверхности нанокompозитных пленок ZrSiN, облученных ионами гелия»	248

**14.00-15.00 Перерыв.****15.00-17.00 Секция «Физические основы радиационной технологии» (заседание школы молодых учёных)**

1. Чирская Н.П., Золотарев И.А., Тулупов В.И., Новиков Л.С., Оседло В.И. «Моделирование метрологических характеристик спектрометров заряженных частиц»	259
2. Епифанов Н.А., Грибков В.А., Дёмин А.С., Казилин Е.Е., Латышев С.В., Масляев С.А., Миньков К.Н., Морозов Е.В., Пименов В.Н., Сасиновская И.П., Сиротинкин В.П., Падух М. «Особенности деградации керамического покрытия из оксида Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> на алюминиевой подложке при импульсном пучково-	269

плазменном и лазерном воздействии»	
3. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Андреев В.В., Столяров А.А., Романов А.В. «Моделирование зарядовых явлений в МДП-структурах при сильнополевой инжекции электронов и воздействии ионизирующих излучений»	280
4. Ахмелкин Д.М., Андреев В.В., Бондаренко Г.Г. «Исследование инжекционно- и радиационно-термических процессов в диэлектрических пленках МДП-структур»	288
5. Козлова М.В., Шаталов Н.С., Козлов С.В., Павленко В.И., Едаменко О.Д. «Адсорбция радона на шунгите»	298
6. Клименко Д.И., Шаталов Н.С., Козлов С.В., Павленко В.И., Едаменко О.Д. «Наномодифицирование бетонов»	303
7. Горелова Е.Г. «Влияние нанесенной методом ионно-плазменного напыления поверхностной пленки осмия на эмиссионные свойства вольфрам-алюминатного катода»	307

**Четверг, 12 июля****10.00-14.00 Секция “Физические основы радиационной технологии”**

1. Мадатов Р.С., Алекперов А.С., Набиев А.Э. «Влияние гамма-лучей на кристаллическую структуру монокристаллов $\text{Ge}_{0.995}\text{Ln}_{0.005}\text{S}$ »	312
2. Воробьев В.Л., Колотов А.А., Ульянов А.Л., Гильмутдинов Ф.З., Баянкин В.Я., Быков П.В., Быстров С.Г. «Формирование наноразмерных поверхностных слоев титанового сплава методом ионно-лучевого перемешивания углерода»	315
3. Воробьев В.Л., Гильмутдинов Ф.З., Баянкин В.Я., Быков П.В. «Формирование наноразмерных поверхностных слоев медно-никелевого сплава $\text{Cu}_{50}\text{Ni}_{50}$ ионной имплантацией кислорода»	323
4. Понарядов В.В., Пилипенко В.А., Солодуха В.А., Горушко В.А., Омельченко А.А. «Быстрый термический отжиг как метод улучшения электрических параметров подзатворного диэлектрика»	329
5. Саидахмедов К.Х., Нуритдинов И. «Влияние ионизирующего излучения на люминесцентные свойства кристаллов ВГО»	337
6. Гарькуша М. В., Шешин Е. П. «Автоэмиссионный катод нового типа»	346

**14.00-15.00 Перерыв.****15.00-17.00 Секция «Радиационная физика неметаллических материалов»**

1. Белько В.И., Гусаков В.Е., Дорожкин Н.Н. «Исследование радиационной стойкости наноразмерных структур методом молекулярной динамики»	348
2. Кабышев А.В., Конусов Ф.В., Павлов С.К. «Оптические свойства пленок нитридов алюминия и кремния, облученных ионами углерода в режиме высокоинтенсивной короткоимпульсной имплантации»	352
3. Курбанов А.М. «Роль примесей и структурных дефектов в образовании радиационных центров окраски в кристаллах $\text{Ca}_3(\text{Nb,Ga})_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ »	362
4. Мадатов Р.С., Тагиев Т.Б., Халыгзаде А.Ш. «Радиационные эффекты в облученных гамма - квантами монокристаллах $\text{GaS}\langle\text{Er}\rangle$ »	369
5. Пискарев М.С., Гильман А.Б., Кечекьян А.С., Кузнецов А.А. «Влияние модифицирования в низкотемпературной плазме на адгезионные свойства полимеров»	371

**Пятница, 13 июля****10.00-14.00 Секция «Физические основы радиационной технологии»**

1. Ибрагимова Э.М., Муссаева М.А., Сандалов В.Н., Амонов М.З., Бузриков Ш.Н. «Поверхностная электропроводность кристаллов LiF, облученных электронами»	375
2. Асадчиков В.Е., Бузмаков А.В., Дьячкова И.Г., Золотов Д.А., Чуховский Ф.Н. «Определение пространственной ориентации линейных дефектов кристаллической решетки методом рентгеновской дифракционной микротомографии»	384
3. Бузмаков А.В., Асадчиков В.Е., Золотов Д.А., Рошин Б.С., Дымшиц Ю.М., Шишков В.А., Чукалина М.В., Ингачева А.С., Кривонос Ю.С., Дьячкова И.Г. «Конструкция нового автоматизированного лабораторного рентгеновского микротомографа»	390
4. Асадчиков В.Е., Бузмаков А.В., Дьячкова И.Г., Золотов Д.А., Кривонос Ю.С., Пантюшов В.В., Сайфутдинов Р.Г. «Исследования конкрементов желчного пузыря человека методом рентгеновской микротомографии»	396
5. Гынгазов С.А., Костенко В., Овчинников В.В., Гущина Н.В., Махинько Ф.Ф. «Влияние ионного облучения на	403



механические свойства алюмооксидной керамики»	
6. Селищев П.А., Боков П.М. «Влияние параметров приповерхностного теплового импульса на неоднородный отжиг радиационных дефектов»	411

**14.00-15.00 Перерыв.****15.00-17.0 Секция «Радиационная физика металлов»**

1. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н., Крысина О.В., Денисов В.В., Петрикова Е.А., Тересов А.Д., Шугуров В.В., Толкачев О.С. «Структурно-фазовые превращения и свойства алюминия, подвергнутого азотированию в плазме несамостоятельного тлеющего разряда низкого давления»	420
2. Голубев О.Л. «Особенности конденсации слоев кремния на поверхности монокристалла вольфрама»	428
3. Гущина Н.В., Овчинников В.В., Махинько Ф.Ф., Кайгородова Л.И., Распосиенко Д.Ю. «Влияние вылеживания при комнатной температуре и последующего ионного облучения на структуру сплава 1441 (Al-Li-Cu-Mg), подвергнутого мегапластической деформации»	435
4. Новиков Л.С., Ермолаев И.К., Чирская Н.П. «Повреждение металлических материалов ударами техногенных космических частиц»	445
5. Боровицкая И.В., Коршунов С.Н., Мансурова А.Н., Парамонова В.В., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И., Казилин Е.Е. «Особенности изменения топографии поверхности ванадия в условиях отдельного и последовательного воздействия ионов аргона и импульсного лазерного излучения»	455

**Суббота, 14 июля****9.00**

1. Овчинников В.В. «Тепловое излучение, взаимодействие заряженных частиц, гравитационное взаимодействие. Мировые физические константы»	464
2. Оксенгендлер Б.Л., Ашуров Х.Б., Максимов С.Е. «Современные тренды в радиационной физике твердого тела («магический квадрат»)»	477
3. Ерофеев В.Т., Урбанович А.И. «Моделирование взаимодействия электромагнитного излучения со средой с пространственной дисперсией, содержащей сфероидальные	481

частицы»	
4. Галанина Л.И., Новиков Л.С. «Моделирование радиационных эффектов в современных элементах микроэлектроники»	491
<b>Обсуждение докладов</b>	
<b>Общая дискуссия</b>	
<b>Закрытие конференции</b>	

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ НОВЫХ КОМПОЗИТНЫХ  
ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

Арутюнян В.В.<sup>1</sup>, Алексанян Е.М.<sup>1</sup>, Акопян Н.А.<sup>1</sup>, Арестакян А.Г.<sup>1</sup>, Бадалян А.О.<sup>1</sup>, Григорян Н. Е.<sup>1</sup>, Баграмян В.В.<sup>2</sup>, Саркисян А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальная Научная Лаборатория им А. И. Алиханяна  
(0036 Ереван, ул. Братьев Алиханян 2, Армения)

<sup>2</sup> Институт общей и неорганической химии НАН Армении  
(0051 Ереван, ул. Азгутун 2, Армения, vharut@yerphi.am)

К настоящему времени накоплен значительный опыт, касающийся поведения материалов в условиях космического полета поэтому актуальным является применение методов физического моделирования для всестороннего исследования поведения материалов космической аппаратуры (КА) в условиях наземного форсированного воздействия основных факторов космического пространства — глубокого вакуума, потоков высокоэнергичных заряженных частиц, электромагнитного излучения Солнца, термоциклирования и др [1-5]. Наиболее объективными для оценки являются прямые экспериментальные исследования при длительном экспонировании образцов материалов на борту КА в условиях космического пространства [3]. Однако сложности, связанные с проведением таких исследований, не являются главным ограничением. Важно то, что они не позволяют получать оперативные данные применительно к вновь создаваемым или предполагаемым к использованию в разрабатываемых космических конструкциях материалам. Другими словами, время разработки нового материала (равно как и некоторых технических решений, требующих экспериментальной проверки) может быть существенно меньше времени, требуемого для исследований изменения свойств материала под действием факторов окружающей среды — старения (которое не обязательно проявляется как ухудшение свойств). В связи с этим актуальны методы ускоренных наземных испытаний, один из возможных подходов рассмотрен в работе [4]. В настоящее время наиболее изучено влияние УФ излучения Солнца на оптические свойства терморегулирующих покрытий, показывающее определяющее значение этого фактора космического пространства [3,4]. Однако, если подобные исследования могут проводиться на образцах материалов с использованием лабораторных установок, имитирующих излучение Солнца, то для проведения исследований, связанных с оценкой влияния УФ излу-

чения Солнца на температурный режим конструкции и динамические характеристики ее крупногабаритных элементов, для которых этот фактор является определяющим, необходимо располагать соответствующей стендовой базой, обеспечивающей воздействие излучения с параметрами, аналогичными излучению Солнца. В космических аппаратах наибольшими, по покрываемой площади, именно являются устойчивые терморегулирующие покрытия (ТРП) класса “солнечные отражатели”, которые предназначены для отражения электромагнитного излучения Солнца и переизлучения в космическое пространство тепла, выделяемого бортовой аппаратурой. Среди пигментов для покрытий этого класса нашли наибольшее применение, как наиболее стабильные к действию заряженных частиц и квантов, солнечного, вакуумного и ближнего ультрафиолетового излучения, порошки из силикатных растворов кремнеземсодержащих горных пород, такие как силикаты цинка, циркония, натрия, калия, лития и т.д. [6]. Однако и в этих пигментах при длительных сроках орбитального полета космических аппаратов образуется достаточно большое количество дефектов и центров поглощения, что приводит к появлению полос поглощения, уменьшению коэффициента диффузного отражения в УФ, видимой и ближней ИК-областях спектра, обуславливая увеличение интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения [1-5]. Поэтому знание физико-химических характеристик, их чувствительности к длительному воздействию фактора космического пространства позволяет выбрать прогнозируемый и наиболее устойчивый материал терморегулирующего покрытия при создании пассивных систем терморегулирования долгоживущих КА [2]. Поэтому разработка способов повышения фото- и радиационной стойкости ТРП пигментов является актуальной проблемой. Одним из перспективных способов решения этой проблемы может быть модифицирование пигментов различными оксидными и редкоземельными нанопорошками, поскольку наночастицы, обладая большой удельной поверхностью, способствуют релаксации дефектов, образующихся при облучении высокоэнергетичными частицами например, электронами.

Целью настоящей работы является комплексное исследование влияния факторов космического пространства на радиационные и физические свойства композитных терморегулирующих покрытий.

Для проведения исследований по изучению радиационных и спектроскопических свойств композитных ТРП были использованы образцы полученные методом гидротермального микроволнового (ГТМВ)

синтеза силиката циркония. Силикат циркония является перспективным оптическим люминесцентным материалом благодаря высокому квантовому выходу при возбуждении, стабильности технологических свойств, устойчивости к химическим и тепловым воздействиям. Покрытия из силиката циркония не распространяют пламя, выдерживают высокие температуры, являются токопроводящими, радиационноустойчивыми материалами и могут быть использованы для защиты оборудования тепловых космических и атомных станций, в системах электростатической безопасности и др.

Разработка и применение методов направленного синтеза позволит контролировать образование целевых продуктов. Синтез силикатов циркония методом осаждения из водных растворов силиката натрия и растворимых солей циркония прост в осуществлении и экономичен, однако химические реакции, протекающих в условиях нагрева микроволновым облучением, более эффективны. Условия синтеза: частота микроволн – 2,45 ГГц, мощность микроволновой печи – 600 Вт. Рентгенофазовый анализ термообработанных образцов силиката  $ZrOSiO_2$  проводили порошковым методом на дифрактометре ДРОН-2,  $CuK_\alpha$  излучение, а дифференциально-термический и термогравиметрический анализ до температуры 1500°C на приборе «Дериватограф». Проведены измерения коэффициента диффузионного отражения образцов  $Zr_2SiO_4$  и легированного иттрием, церием ( $Y, Ce-ZrSiO_4$ ) пигментов. В качестве источника УФ-излучения для облучения образцов силиката циркония использовалась ксеноновая ДКсЭЛ 1000-5 лампа сверхвысокого давления. Мощность спектра излучения ксеноновой лампы в области 240-360 нм составляет 1000 ватт. Облучения высокоэнергетичными электронами образцов ТРП проведено на Электронном Линейном Ускорителе ЭЛУ-5 МэВ и 20 МэВ при температуре 300 К с дозой  $10^{15}$  эл/см<sup>2</sup> и  $10^{17}$  эл/см<sup>2</sup>. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) измерены на экспериментальной установке LUMEN, что обеспечивает широкие возможности для проведения исследований в области УФ-видимой спектроскопии. Исследованы спектроскопические характеристики пигмента для ТРП-силиката циркония ( $ZrSiO_4$ ) (возбуждение люминесценции и люминесцентные свойства) с применением синхротронного излучения широкой области спектра 2-20 эВ на станции SUPERLUMI лаборатории HASYLAB. Эксперименты выполнены при температурах 300 и 10 К.

Изучены спектры оптического пропускания (поглощения) силиката циркония в ближней ИК-области длин волн от 1 мкм до 2,2 мкм (рис.1).

Из результате облучения УФ- радиацией уменьшаются интенсивности поглощения центров окраски, ответственные за полосы 1,32 мкм и 1,54 мкм, что связано созданием радиационных нарушений в структуре образца после электронного облучения. Внедрение ионов циркония в структуру приводит к значению (Zr-O) - 2.035 Å и может привести, что длина связи (Si-O) увеличивается до 1,639 Å, а длина связи O-H практически не изменяется и составляет 0.977 Å. С повышением температуры обработки наблюдается уменьшение интенсивности ФЛ и максимум полосы люминесценции наблюдается в области 1.9 eV. Наблюдаемые в спектрах ФЛ исследуемых ТРП-ZrOnSiO<sub>2</sub> полосы 2.2 eV; 2.4 eV; 2.6 eV характерные для люминесценции многих силикатов, обычно связывают с излучением, например, дефектных центров [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup>, обусловленных локальными искажениями кремний-кислородных тетраэдров. Ионы циркония могут находиться в тетраэдрическом окружении в виде групп (OH)-Zr-(OSi)<sub>3</sub> или Zr-(OSi)<sub>4</sub>. Позиция как центр [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup> является более выгодным и появляется при нарушении симметрии кремнекислородного тетраэдра из-за близко расположенного дефекта. В формировании указанных центров и их метастабильных состояний важную роль могут играть примеси – как зарядовые компенсаторы или факторы изменения распределения электронной плотности в тетраэдре. Изменение плотности в кристаллической структуре в образцах ТРП с примесями, по-видимому связано образованием особых дефектных центров излучения как Ce(Y)SiO<sub>4</sub>, дающий вклад в формировании фотолюминесценции. Полосы излучения наблюдаемые при максимумах 1.8 eV и 2.4 eV в необлученных и облученных электронами ТРП связана быть главным образом вызван созданием собственных дефектов: вакансий цинка, кислорода соответственно, а максимум после облучения в области 2.6 eV обусловлен промежуточной стадией формирования экситоно-дефектных комплексов или короткоживущие дефекты в виде вакансий VZr- и междоузельных ионов Zr<sup>+</sup> образующимся при разрыве связи, как оптические переходы в VZr-центре. Полученные результаты по повышению фото- и радиационной стойкости ТРП открывает возможность их использования в условиях космического пространства, характеризуемого действием на материалы различных видов ионизирующих излучений и квантов солнечного спектра.

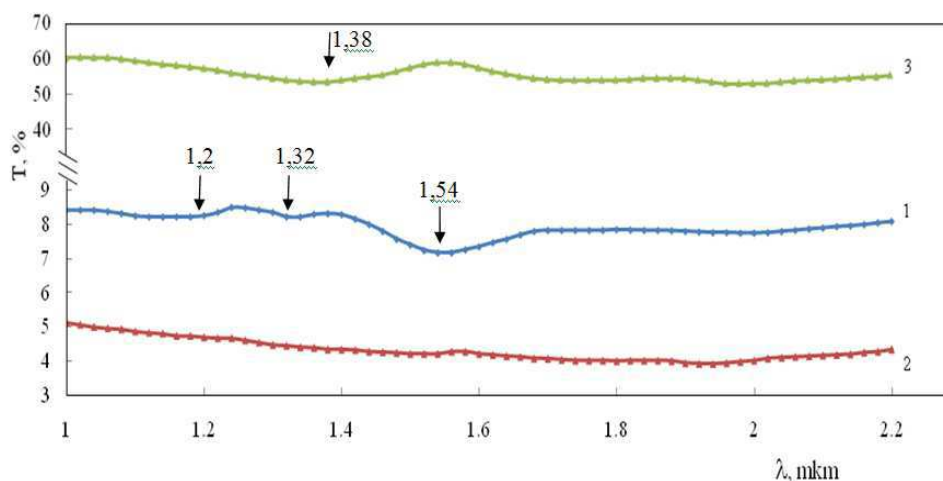


Рис. 1. Спектры оптического пропускания  $ZrSiO_4$ , термообработанных при  $1200^\circ C$ , 2 часа и облученного УФ излучением

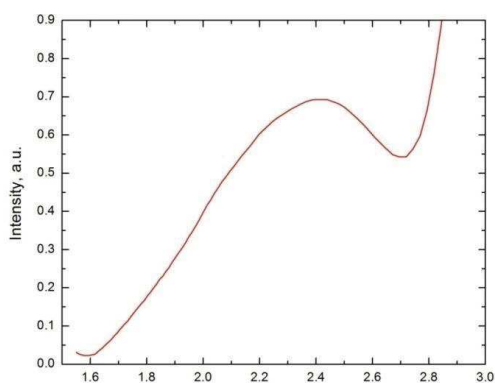


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции  $ZrO_2-SiO_2$  ( $240^\circ C$ ),  $T = 300 K$ ,  $E_{exc} = 3.5$  эВ и облученного электронами с дозой  $10^{15}$  эл/см<sup>2</sup> с энергией 5 МэВ

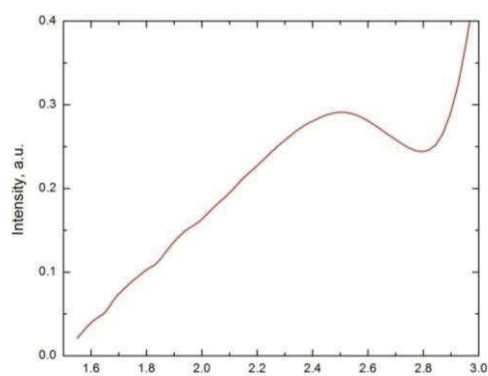


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции  $ZrO_2-SiO_2$  ( $240^\circ C$ ),  $T = 300 K$ ,  $E_{exc} = 3.5$  эВ и облученного электронами с дозой  $10^{16}$  эл/см<sup>2</sup> с энергией 20 МэВ

Спектры люминесценции и возбуждения люминесценции с применением синхротронного излучения в области спектра 2-20 эВ для образцов силиката циркония приведены на рисунках 4 и 5.

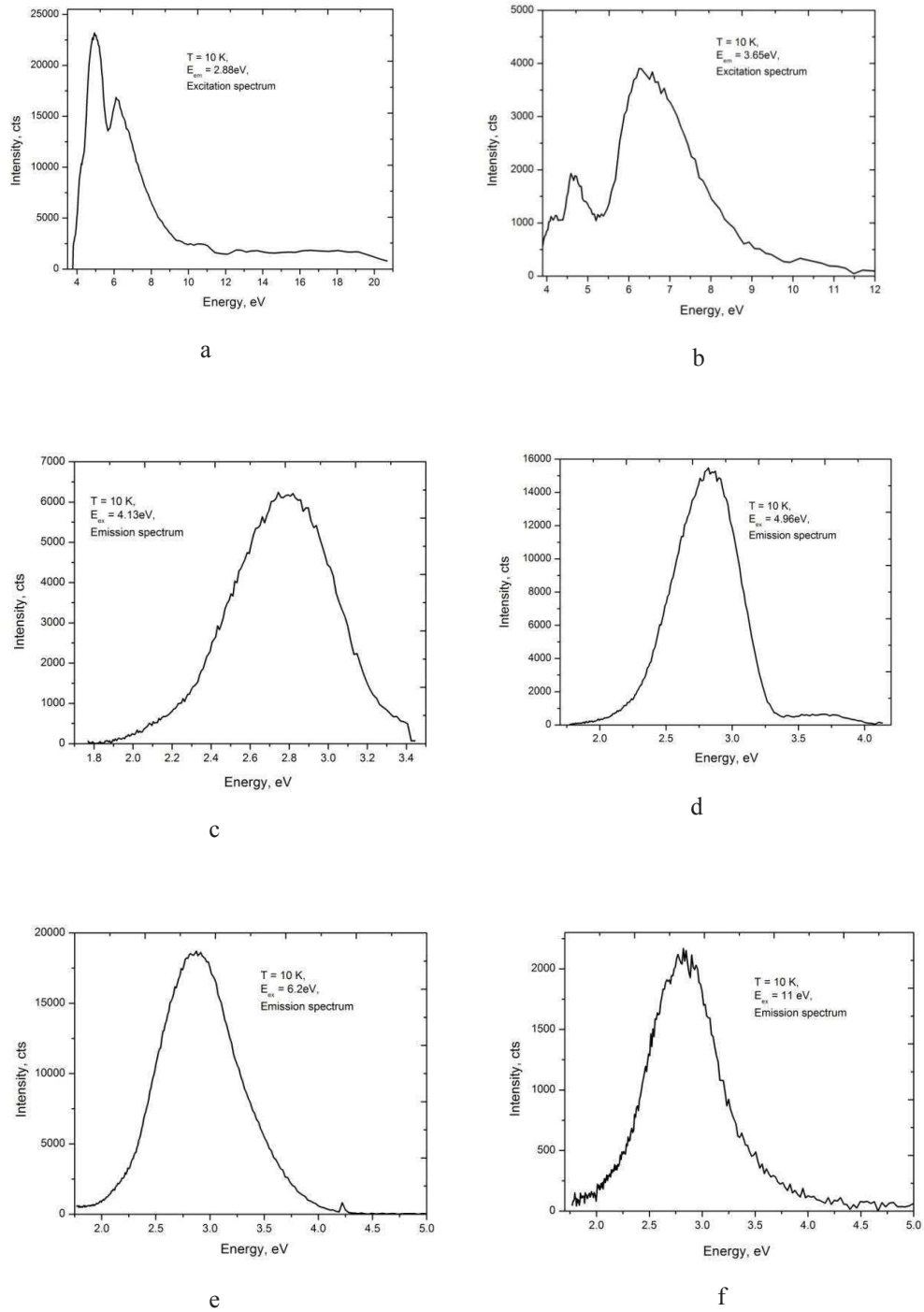


Рис.4. Спектры люминесценции ZrSiO<sub>4</sub> при возбуждении люминесценции синхротронным излучением энергией E<sub>ex</sub> = 2.88 eV (a); 3.65 eV (b); 4.13 eV (c); 4.96 eV (d); 6.2 eV (e); 11 eV (f) при T=10 K



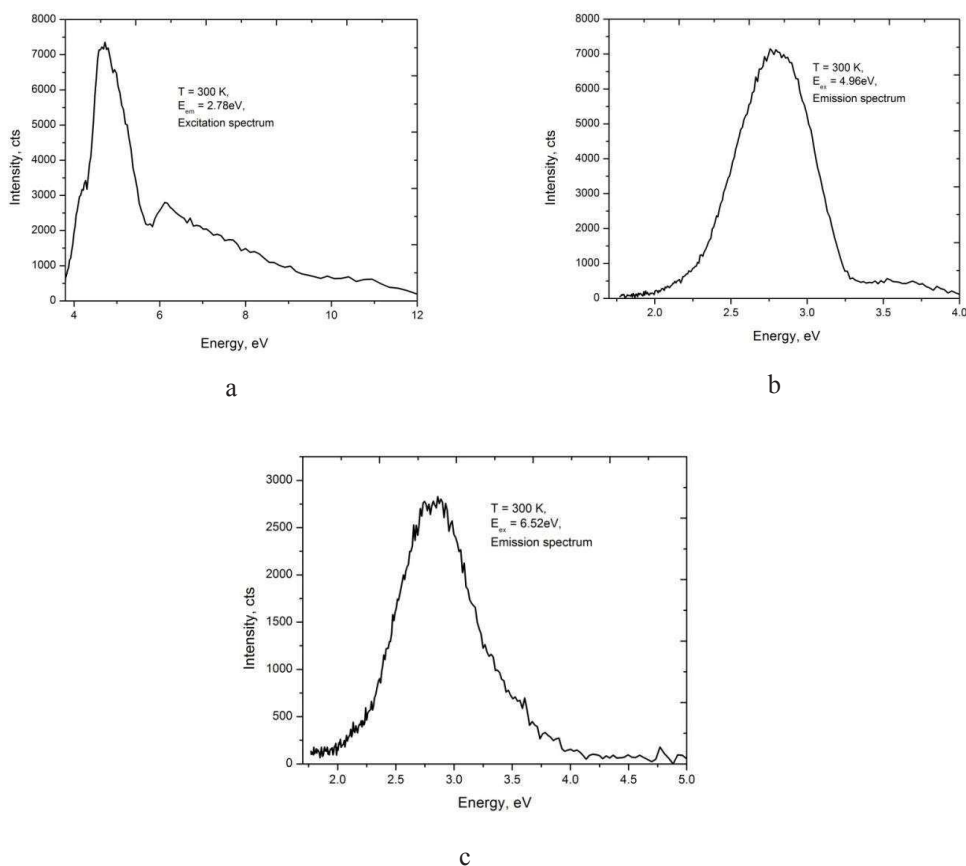


Рис.5. Спектры возбуждения люминесценции энергией  $E_{em} = 2.78$  эВ (а) и люминесценции ZrSiO<sub>4</sub>;  $E_{ex}$  - 4.96 (b); 6.52 эВ(с), при T=300 К

Селективное возбуждение силиката циркония энергией возбуждающего СИ использовано для разделения наблюдаемых полос на связанные со свечением дефектов примесной или собственной природы и со свечением матрицы, возможно, с участием экситонов или экситонно-дефектных комплексов из которого видно, что структура спектров существенно зависит от вида возбуждения образцов. По данным EXAFS – спектроскопии в силикате циркония расстояние d (Zr –O) составляет 2.070 Å.

Наблюдаемые в спектрах возбуждения люминесценции и люминесценции исследуемых ZrSiO<sub>4</sub> широкополосные полосы 2.78 эВ, 4.96 эВ, 6.52 эВ и 2.88 эВ, 3.65 эВ, 4.13 эВ, 4.96 эВ, 6.2 эВ, 11.0 эВ характерны для многих силикатов, что обычно связываются с излучением дефектных примесных центров и [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup>, обусловленных присутствием примесных ионов и локальными искажениями кремний-кислородных тетраэдров. Центр [ZrO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup> может образоваться при замещении в регулярной тетраэдрической позиции кремния атомом циркония. Центр

$[\text{SiO}_4]^{4-}$  появляется при нарушении симметрии кремне-кислородного тетраэдра из-за близко расположенного дефекта. В формировании указанных центров и их метастабильных состояний важную роль могут играть редкоземельные примеси, как зарядовые компенсаторы или факторы изменения распределения электронной плотности в тетраэдре. Нарушение регулярных связей в циркониевых и кремниевых подрешетках может привести к возникновению короткоживущих оптически-активных дефектов, как например, анионные вакансионные центры люминесценции, типа F и  $F^+$  в УФ и ВУФ областях спектра. Образование указанных анионных центров люминесценции может происходить под действием квантов света высокой энергии, как например, синхротронное излучение, в результате в объеме кристаллической решетки генерируются электронно-дырочные пары, часть из них рекомбинируют. Электроны захватываются анионными вакансиями, которые всегда присутствуют при синтезе силиката циркония и, таким образом, возникают F и  $F^+$  - центры окраски или излучения максимумами в УФ и ВУФ спектрах возбуждения и люминесценции.

Наблюдаемые максимумы в спектрах возбуждения люминесценции 2.78 эВ возможно обусловлены дефектным центром  $[\text{ZrO}_4]^{4-}$  или связаны с промежуточной стадией формирования экситонно-дефектных комплексов (4.96 эВ, 6.52 эВ) -  $F^+$  -центром, а в спектрах люминесценции максимумы излучения 2.88 эВ -  $[\text{ZrO}_4]^{4-}$  или как короткоживущие дефекты в виде вакансий  $V\text{Zr}^-$  и междоузельных ионов  $\text{Zr}^+$ , образующимся при разрыве связи, как оптические переходы в  $V\text{Zr}^-$  центре, 3.65 эВ -  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ , 4.13 эВ - F – центром, 4.96 эВ, 6.2 эВ, 11.0 эВ -  $F^+$ - центром. Причина смещения максимумов излучений в спектрах возбуждения и люминесценции заключается в том, что генерация экситонного возбуждения происходит непосредственно в искаженных присутствием дефекта участках решетки, а его безызлучательная релаксация осуществляется преимущественно с участием локальных колебаний дефектного центра. Указанные выводы сделаны с учетом того, что в условиях низкотемпературного эксперимента ( $T = 10 \text{ K}$ ) доминирует процесс излучательной релаксации, а вероятность безызлучательных переходов практически равна нулю. Таким образом, люминесценция в силикатах в случае возбуждения указанных оптически- активных центров фотонами с энергией в области межзонных переходов процесс их релаксации включает стадию формирования многокомпонентных дефектных комплексов и эффективно возбуждаются в области УФ – ВУФ излучения.

Литература

1. Mikhailov M.M. - Journal of Advanced Materials. – 1995. – V.2, No.1. – P.41-49.
2. Lewis B.J., Green A.R., Bennett L.G.I., “Effect of ‘Noisy’ sun conditions on aircrew radiation exposure”, Advances in Space Research, Vol. 44, pp. 184-189, 2009.
3. Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York, 2010. Available from: [http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753\\_Report\\_2008\\_Annex\\_B.pdf](http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753_Report_2008_Annex_B.pdf).
4. Товстоног В.А. Комплексное моделирование характеристик старения полимерных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение – 2007. – № 3. – С. 3–22.
5. H. Yeritsyan, A. Sahakyan, S. Nikoghosyan et al. Effect of Electron and Ultraviolet Radiations and Temperature on n-Si Conductivity. Journal of NASA, Spacecrafts and Rockets, 2011, v.48, #1, pp. 34-37.
6. V.V. Baghramyanyan, A.A. Sarkisyan, K. Ponzoni, R. Rosa, C. Leonel. Production of sodium silicate solutions from perlite by microwave method, Journal of Chemical Technology. 2014, 10 pp. 585-590.
7. V.V. Baghramyanyan, A.A. Sargsyan, A.S. Sargsyan, N.B. Knyzyan, V.V. Harutyunyan, E.M. Aleksanyan, N.E. Grigoryan, A.H. Badalyan. Optical Properties and Radiation Resistance of Zirconium Silicate Obtained by Microwave Method. Armenian Journal of Physics, 2017, vol. 10, issue 1, pp. 56-63.

**Труды XXVIII Международной конференции  
«Радиационная физика твёрдого тела»  
(Севастополь, 9 – 14 июля 2018 г.)**

Научный редактор:  
д.ф.-м.н. Бондаренко Геннадий Германович

Подписано в печать 22. 06. 2018г.  
Бумага типографская. Печать - ризография.  
Формат 70x108/16.  
Тираж 100 экз. Заказ 385.

Издательство ФГБНУ «НИИ ПМТ»  
115054, Москва, ул. М.Пионерская, д. 12  
Тел/факс (499) 959-37-03, 959-37-05 e-mail: [info@niipmt.ru](mailto:info@niipmt.ru)

Отпечатано в ООО «Телер»  
125130, Москва, ул. Клары Цеткин, д. 28  
Тел/факс (495) 937-86-64, e-mail: [piskarev@teler.ru](mailto:piskarev@teler.ru)

ISBN 978-5-89671-023-3



9 785896 710233