

На правах рукописи



ЮРИНА ВИКТОРИЯ ЮРЬЕВНА

**ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ
ПОЛЫХ ЧАСТИЦ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ
И ДИОКСИДА КРЕМНИЯ**

Специальность: 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», г. Томск и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Амурский государственный университет», г. Благовещенск

Научный руководитель: **Нещименко Виталий Владимирович**
доктор физико-математических наук, доцент

Научный консультант: **Михайлов Михаил Михайлович**
доктор физико-математических наук, профессор
заслуженный деятель науки Российской Федерации

Официальные оппоненты: **Буюкова Светлана Петровна**
доктор технических наук, профессор, главный
научный сотрудник
ФГБУН Институт физики прочности и
материаловедения Сибирского отделения
Российской академии наук (г.Томск)

Коханенко Андрей Павлович
доктор физико-математических наук, профессор
старший научный сотрудник,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский государственный университет» (г.Томск)

Защита диссертации состоится «14» сентября 2022 г. в 17:00 часов
диссертационного совета ДС.ТПУ.03 при ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028,
г. Томск, пр. Ленина, 2а строение 4, аудитория 245.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск,
ул. Белинского, 55 и на сайте: <https://portal.tpu.ru/council/indcouncils/6053/worklist>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

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



С.А. Гынгазов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Современные конструкции и устройства требуют учета многоуровневой, иерархической организации материалов различной природы. Это позволяет наиболее эффективно использовать новые возможности, которые открывают функциональные материалы с иерархической структурой. Иерархическая архитектура организации функционального материала дает возможность в рамках единой технологии создавать материалы с большим разнообразием «полезных» свойств, управляя составом или строением субструктур на одном или нескольких её уровнях [1-4]. Уменьшение характерных размеров частиц до нанодиапазона приводит к проявлению наноэффектов: квантового конфаймента, высокой нестехиометричности состава вещества и росту доли поверхностных атомов, высокой поверхностной энергии, дисторсии кристаллической структуры, возрастанию к поверхности диффузии точечных дефектов [5-8]. Это вызывает изменение оптических и электрофизических свойств наноструктурированных материалов, обуславливая принципиальные возможности создания новых наноматериалов с уникальными физико-химическими свойствами.

Материалы на основе оксида алюминия и диоксида кремния уже нашли широкое применение в различных областях науки и техники вследствие высоких диэлектрических характеристик, стойкости к воздействию различных внешних полей – механических, тепловых, электромагнитных и агрессивных сред [9*-12*]. Применение данных материалов в составе светоотражающих покрытий для космической техники рассматривается как перспективное направление вследствие наличия у них большой запрещенной зоны и высокой отражательной способности, обуславливающих малое значение интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения (α_s). Под действием факторов космического пространства у таких материалов изменяются оптические свойства за счет образующихся дефектов. Это служит причиной увеличения поглощения солнечной энергии покрытиями, изготовленными на их основе, и изменению в температурном режиме космического аппарата, что может привести к сбоям в работе радиоэлектронной аппаратуры. Решением проблемы может стать создание полых сферических частиц, которые можно использовать в качестве пигментов для отражающих покрытий. Такие наноструктурированные объекты могут одновременно обладать всей совокупностью свойств микро- и наноматериалов.

Степень разработанности темы

К настоящему времени выполнены исследования оптических свойств полых сферических частиц диоксида титана и оксида цинка при воздействии ионизирующих излучений [13*-15*] и установлено, что эти структуры в меньшей степени подвержены деградации оптических свойств при облучении по сравнению с объемными микрочастицами. Как полагают авторы данных исследований, это связано с малыми ионизационными потерями энергии при прохождении заряженных частиц через полые частицы по сравнению с объемными сплошными частицами.

В настоящее время разработаны подходы для получения полых частиц, в том числе микросфер Al_2O_3 и SiO_2 , с применением в качестве шаблона шаров из полистирола. Данный метод синтеза рассматривается как простой, универсальный и эффективный способ получения полых частиц. Однако, вопрос о возможности применения полых частиц в качестве порошков-пигментов для создания терморегулирующих покрытий с высокой отражательной способностью и высокой радиационной стойкостью остается не исследованным.

В связи с вышеперечисленными проблемами, **целью настоящей работы** является исследование влияния потоков протонов и электронов на изменение отражательной способности полых частиц оксида алюминия и диоксида кремния для создания на их основе отражающих покрытий с высокой отражательной способностью в солнечном диапазоне спектра и высокой стабильностью к действию заряженных частиц космического пространства.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **научные задачи**:

1. Синтезировать полые частицы сферической формы оксида алюминия и диоксида кремния с высокой отражательной способностью в солнечном диапазоне спектра.

2. Исследовать кристаллическую структуру и морфологию полученных полых частиц оксида алюминия и диоксида кремния.

3. Выполнить анализ закономерностей изменения спектров диффузного отражения и интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения полых частиц оксида алюминия и диоксида кремния в зависимости от условий действия различных видов излучений.

4. Исследовать изменения интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения полых частиц оксида алюминия и диоксида кремния при длительном действии излучений, выполнить анализ кинетики накопления точечных дефектов.

5. Установить закономерности изменения спектров диффузного отражения и интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения покрытий на основе полых частиц оксида алюминия и диоксида кремния при воздействии ионизирующих излучений.

6. Разработать схемы и модели физических процессов, проходящих при облучении полых частиц оксида алюминия и диоксида кремния.

Объекты исследования

Сплошные объемные микро- и наночастицы Al_2O_3 и SiO_2 . Полые субмикро- и микрочастицы оксида алюминия. Полые нано-, субмикро-, микро-, субмикро-частицы диоксида кремния.

Предмет исследования

Собственные и индуцированные точечные дефекты в наноструктурированных материалах на основе оксида алюминия и диоксида кремния при облучении протонами и электронами, обуславливающие изменение отражательной способности в солнечном диапазоне спектра.

Научная новизна исследования заключается в изучении закономерности изменения спектров диффузного отражения и интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения полых частиц оксида алюминия и диоксида кремния в зависимости от видов излучения, а именно:

1. Установлены закономерности изменения спектров диффузного отражения и интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения порошков полых частиц оксида алюминия и диоксида кремния в зависимости от размера частиц и видов излучений.

2. Исследованы типы дефектов наведенного поглощения, типы хемосорбированных газов, образующихся в порошках, полых частиц оксида алюминия и диоксида кремния.

3. Определены оптимальные размеры полых частиц оксида алюминия и диоксида кремния, обладающих высокой радиационной стойкостью к воздействию протонов.

4. Выявлены закономерности деградации спектров диффузного отражения и интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения при длительном воздействии электронов на полые частицы оксида алюминия и диоксида кремния.

5. Дано объяснение физическим процессам, происходящим при облучении и обуславливающим уменьшение концентрации центров поглощения полых частиц по сравнению с объемными частицами.

6. Исследованы спектры диффузного отражения и интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения покрытий, изготовленных на основе полых частиц оксида алюминия и диоксида кремния, до и после облучения протонами и электронами.

Теоретическая и практическая значимость исследования заключается в определении условий получения полых частиц оксида алюминия и диоксида кремния различных размеров и на их основе – покрытий с высокой отражательной способностью в солнечном диапазоне спектра, в установлении закономерности изменений их оптических свойств к воздействию протонов и электронов подпороговых энергий.

Предполагаемые формы внедрения ожидаемых результатов

Результаты исследований могут быть использованы в космической технике при разработке новых терморегулирующих покрытий, необходимых для поддержания теплового режима космических аппаратов при длительных сроках эксплуатации. Они также могут применяться в строительной индустрии как теплоизоляционные материалы, подверженные действию ионизирующих излучений.

Методология диссертационного исследования

В основу работы принята гипотеза о том, что в полых частицах в области, где отсутствует материал, центры поглощения, обуславливающие деградацию оптических свойств материала, возникать не могут, а индуцированные ионизирующим излучением точечные дефекты могут рекомбинировать в тонком сферическом слое таких полых частиц.

Предполагается, что большая часть ионизирующего излучения будет создавать центры окраски на достаточной глубине материала компактированного из полых частиц так, чтобы в наименьшей степени влиять на отражательную способность материала в солнечном диапазоне спектра.

Для анализа структуры объектов исследования были использованы методы структурной рентгенографии и растровой электронной микроскопии. Оценка радиационной стойкости осуществлялась с применением УФ-видимой-ИК спектроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии до и после воздействия протонов и электронов.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод синтеза полых частиц Al_2O_3 и SiO_2 путем осаждения прекурсоров на шаблоны из полистирола позволяет получить полые частицы сферической формы с высокой отражательной способностью.

2. Радиационная стойкость к воздействию протонов и электронов полых микрочастиц Al_2O_3 выше, чем объемных сплошных микро- и наночастиц, что объясняется меньшей концентрацией центров поглощения, обусловленных междоузельным кислородом и вакансиями по кислороду.

3. Радиационная стойкость к воздействию протонов и электронов полых микро- и субмикрочастиц SiO_2 выше, чем объемных сплошных микро- и наночастиц, что обусловлено меньшей концентрацией поверхностных E'_δ , E'_β , E'_γ – центров и дефектов, связанных с немостиковым кислородом и пероксидными группами кремния.

4. Радиационная стойкость покрытий на основе кремнийорганического лака и полых микрочастиц Al_2O_3 и SiO_2 к воздействию протонов энергией 100 кэВ флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ выше, чем у покрытий на основе объемных сплошных микрочастиц, на 5,6 % и 16 % соответственно. Радиационная стойкость покрытий на основе кремнийорганического лака и полых микрочастиц Al_2O_3 и SiO_2 к воздействию электронов энергией 30 кэВ флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ выше, чем у покрытий на основе объемных сплошных микрочастиц, на 16,6 % и 40,5 % соответственно.

Личный вклад автора

Автор участвовал в постановке решаемых задач, в получении всех научных результатов, изложенных в рамках диссертации, лично или в соавторстве. Экспериментальные исследования по синтезу полых частиц, изучению их структуры и свойств, обработка и анализ полученных результатов и сопоставление их с литературными данными осуществлялись автором лично, под руководством научного руководителя. Экспериментальная часть работы выполнена в Харбинском политехническом университете, Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники, Амурском государственном университете самим автором или при его непосредственном участии. По результатам, полученным в работе, написаны статьи (в соавторстве), сделаны доклады на российских и международных научных конференциях.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на российских и международных конференциях: Fifth Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials, Vladivostok, Russia, July 30 – August 03, 2020; XLIX Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 28-30 мая 2019 г.; Международная научная конференция «Полифункциональные химические материалы и технологии», Томск, 22-25 мая 2019 г.; Proceedings of 2018 ASRTUM Meeting in Guangzhou, Guangzhou, P. R. China, November 22-25, 2018; Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», Томск, 1-5 октября 2018 г.; Российская национальная научная конференция с международным участием «Современные проблемы науки», Благовещенск, 22 декабря 2017 г.

Публикации

Основной материал диссертации изложен в 19 публикациях, из них 7 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, цитируемых Scopus и Web of Science, в 1 патенте на изобретение, остальные – в тезисных докладах на всероссийских и международных конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников. Работа изложена на 147 страницах, включает 88 рисунков и 11 таблиц. Список цитированной литературы – 290 работ отечественных и зарубежных авторов.

Содержание работы

Во введении раскрываются актуальность темы, цель и научные задачи работы, новизна исследований, их теоретическая и практическая значимость, предполагаемые формы внедрения ожидаемых результатов, положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен литературный обзор работ, посвященных оптическим эффектам в наносистемах, способам получения полых частиц оксида алюминия и диоксида кремния и исследованию их кристаллической структуры, оптическим свойствам и собственным дефектам.

Выполненный обзор показал, что ширина запрещенной зоны варьирует от 5,13 до 7 эВ для оксида алюминия, для диоксида кремния значение запрещенной зоны меняется от 6,3 до 8,9 эВ в зависимости от кристаллической модификации. Энергия полос поглощения собственных точечных дефектов в оксиде алюминия имеет следующие значения (эВ): 6,1 – F, 5,4 (4,8) – F⁺, 4,1 – Al⁺_i, 3,5 – F⁺₂, 2,7 – F⁺²₂. Центры поглощения в диоксиде кремния обусловлены следующими точечными дефектами (эВ): 5,96 – E'_{s2} (≡Si[•]), 5,46 – E'_β (≡Si-O-O[•]), 5,05 – (≡Si-O[•]), 4,58 – E'_{s3} (≡Si[•]), 4,19 – (≡Si-O-O[•]), 3,84 – (≡Si-O-O-Si≡), 3,46 – (≡Si-V_O⁺-Si≡), 2,94 – (≡Si-O)₂Si(O₂), 2,35 – (≡Si-O), 1,70 – (O_{int}).

В ходе анализа литературы определено, что оптимальным способом получения полых частиц оксида алюминия и диоксида кремния является

шаблонный метод с применением полистирольных шариков. Этот метод прост в реализации и дешевле других.

Во второй главе описаны объекты исследования и методика приготовления образцов, а также экспериментальное оборудование и пакеты прикладных программ для моделирования взаимодействия потоков ионизирующих излучений с веществом.

Объектом исследования являются синтезированные полые частицы Al_2O_3 и SiO_2 , а также контрольные образцы объемных сплошных микро- и нанопорошков Al_2O_3 и SiO_2 высокой чистоты (99,99 %), купленные в компании *Aladdin Chemistry*. Средний размер микрочастиц оксида алюминия составляет 2-4 мкм, наночастиц – 10-20 нм. Для диоксида кремния средний размер микрочастиц соответствовал 3000-10000 нм, наночастиц – 20-40 нм.

Рентгеноструктурным анализом установлено, что микро- и наночастицы Al_2O_3 имеют симметрию кристаллической решетки корунда ($R\bar{3}c$). Параметры кристаллической решетки для наночастиц составили: $a=b=4,78 \text{ \AA}$, $c=13,01 \text{ \AA}$. Для микрочастиц параметры кристаллической решетки составили: $a=b=4,76 \text{ \AA}$, $c=12,99 \text{ \AA}$. Из рентгеновских спектров для SiO_2 установлено, что наночастицы и микрочастицы имеют аморфную структуру, которая определяется размытым пиком вблизи 21 градуса.

Синтез полых частиц осуществлялся с применением шаблонного метода. В качестве шаблонов использовались полистирольные шарики. Для получения которых в 500 мл круглодонную колбу с тремя горлами заливали 300 мл этанола, затем добавляли 30 мл стирола и 0,12 г поливинилпирролидона, раствор смешивали со скоростью 300 об/мин. при температуре 80 °С в течение 30 минут. Затем добавляли водный раствор аммония персульфата в соотношениях: 36 мл деионизированной воды и 2 г аммония персульфата для получения частиц полистирола микронных размеров, 0,06 г – для субмикрочастиц. Далее смешивание происходило при температуре 75 °С в течение 3 часов, до образования белого раствора. Раствор был дважды промыт 500 мл этанола, дважды центрифугирован при 2000 об/мин., после каждого этапа раствор подвергался ультразвуковому воздействию. Наноразмерные полистирольные шарики для наносфер диоксида кремния были получены следующим образом, в 500 мл круглодонную колбу с тремя горлами добавляли 270 мл деионизированной воды, 30 мл стирола, 4,5 г поливинилпирролидона. Раствор смешивали при 300 об/мин. при температуре 80 °С в течение 30 минут, затем добавляли 1,2 г аммония персульфата на 72 мл деионизированной воды. После чего раствор был подвергнут размешиванию в течении 9 часов при температуре 80 °С, до образования белого раствора. Для получения субмакросфер диоксида кремния полистирольные частицы с характерным размером 10-20 мкм были закуплены в компании *Aladdin Chemistry*.

Для получения полых частиц оксида алюминия поверхность полистирольных шаблонов покрывали раствором хитозана (хитозан: уксусная кислота: дистиллированная вода (2:1:40)), затем добавляли наночастицы оксида алюминия, перемешивали с большой скоростью, чтобы шаблоны полистирола и

наночастицы Al_2O_3 сформировали компактную структуру $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PS}$, с последующим прогревом при $60\text{ }^\circ\text{C}$ до полного высыхания раствора. После чего осуществляли ступенчатую термообработку при температуре 300, 900 и $1300\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 часов для каждого режима в вакууме. На выходе получали белый мучнисто-сыпучий порошок.

Из РЭМ изображений (рис.1) видно, что полученные полые частицы оксида алюминия, действительно, имеют сферическую форму со средним размером субмикросфер равным 300-500 нм (рис.1.а), для микросфер – 1-3 мкм (рис.1.б). На основании полученных рентгеновских спектров (рис.1.в) установлено, что субмикросферы и микросферы Al_2O_3 имеют симметрию кристаллической решетки корунда ($R\bar{3}c$).

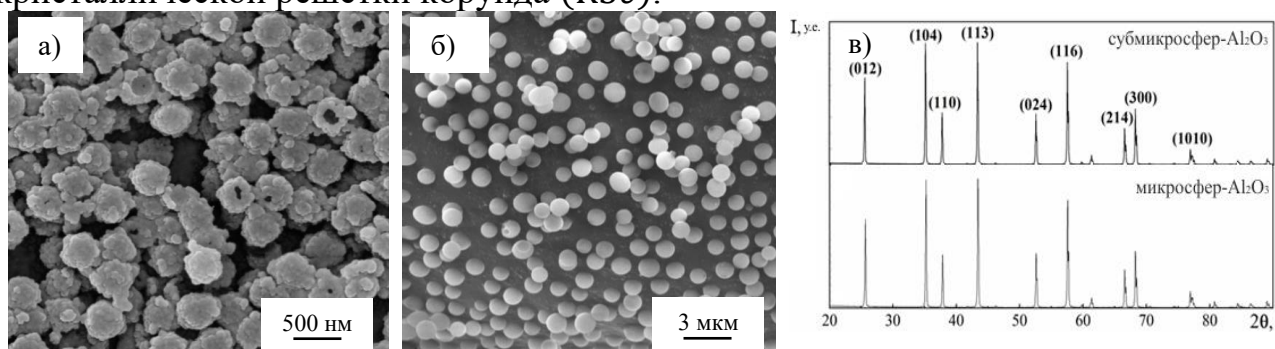


Рисунок 1 – РЭМ изображение субмикросфер (а) и микросфер (б) Al_2O_3 и соответственно рентгенограммы (в)

Для получения полых частиц диоксида кремния, осуществляли смешивание полистирольных шариков в растворе этанола и дистиллированной воды с добавлением раствора аммиака и тетраэтоксисилана в соотношениях к объему: 5:40:10:5:1. Полученный раствор перемешивали в течение 2 часов при температуре $50\text{ }^\circ\text{C}$. После этого раствор трижды промывали этанолом и водой, центрифугируя при 3000 об/мин. после каждого промывания. На последнем этапе его высушивали и подвергали трехстадийной термообработке при температуре 200, 300 и $500\text{ }^\circ\text{C}$. На выходе получали белый мучнисто-сыпучий порошок.

На рисунке 2 показаны РЭМ изображения полученных частиц диоксида кремния с различными размерами: наносфер, субмикросфер, микросфер, субмакросфер. На основании полученных рентгеновских спектров (рис.2.д) установлено, что наночастицы, наносферы, субмикросферы, микросферы, субмакросферы и микрочастицы диоксида кремния имеют аморфную структуру, которая определяется размытым пиком около 21 градуса.

Для измерения спектров диффузного отражения порошки прессовали под давлением 1 МПа, при времени выдержки 1 минуты в стальные подложки в форме стаканчика диаметром 17 мм и высотой 4 мм. Покрытия были приготовлены при смешивании 75 % по объему порошка-пигмента Al_2O_3 к 25 % по объему кремнийорганического лака; 50 % по объему порошка-пигмента SiO_2 к 50 % по объему кремнийорганического лака. Полученные покрытия наносили на алюминиевые подложки АМГ-6, высушивали при комнатной температуре на

воздухе. Толщину покрытий измеряли толщиномером лакокрасочных покрытий *Nicetu CM8801FN*, *Etari ET-15*, она составляла 200-250 мкм.

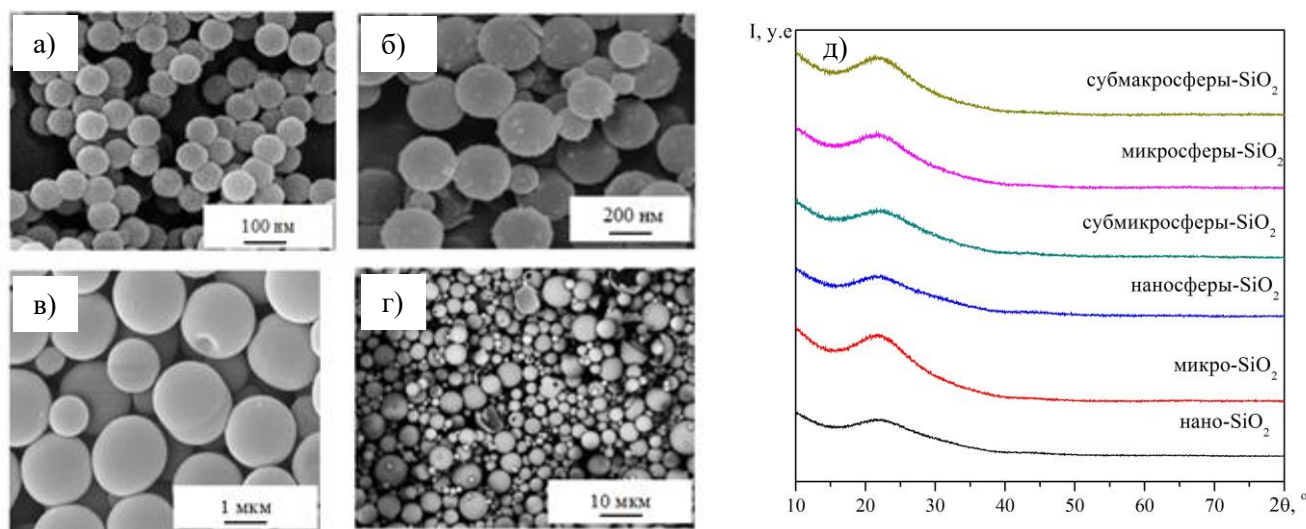


Рисунок 2 – РЭМ изображение наносфер (а), субмикросфер (б), микросфер (в), субмакросфер (г) частиц SiO_2 . Рентгенограмма микрочастиц (д), наночастиц, наносфер, субмикросфер, микросфер, субмакросфер SiO_2

Исследование морфологии поверхности образцов проводилось на растровом электронном микроскопе высокого разрешения *OXFORD MX2600FE*, в режиме вторичных электронов. Структуру и фазовый состав определяли на рентгеновском дифрактометре *Philips X'Pert PRO MRD* ($V = 40$ кВ, $I = 40$ мА, $\text{CuK}\alpha$) методом Дебая-Шеррера. Анализ рентгенограмм осуществляли в программе *Jade XRD Analys*. Спектры диффузного отражения регистрировали спектрофотометром *Perkin Elmer Lambda 950* с шагом 5 нм в области 200-2500 нм на воздухе. Для измерения спектров диффузного отражения *in situ* использовали интегрирующую сферу, расположенную в камере имитатора «СПЕКТР-1». Интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения (α_s) рассчитывали в соответствии со стандартами ASTM (E490-00a и E903-96).

Облучение образцов проводилось на комплексных имитаторах факторов космического пространства «КИФК» протонами и электронами с энергией 100 кэВ, флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, при плотности потока $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, и «СПЕКТР-1» – электронами с энергией 30 кэВ, флюенсом 0,5, 1, 2, 3, 5, $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, при плотности потока $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Давление остаточных газов в камере при облучении протонами составляло $2,5 \cdot 10^{-4}$ Па, а при облучении электронами – 10^{-5} Па, температура образцов при облучении была 25 °С.

Для проведения моделирования взаимодействия потока протонов с полыми частицами Al_2O_3 и SiO_2 был использован программный комплекс *GEANT4* и *SRIM*, для электронов – *CASINO*. Представлен формализм расчета сечения рассеяния электронов и протонов, формулы удельных ионизационных потерь.

В третьей главе представлены результаты исследования оптических свойств и радиационной стойкости полых микросфер и субмикросфер оксида

алюминия в сравнении с результатами объемных сплошных микро- и наночастиц.

Из полученных спектров диффузного отражения (рис.3) было установлено, что отражательная способность микрочастиц оксида алюминия выше во всем спектральном диапазоне по сравнению с наночастицами, микросферами и субмикросферами оксида алюминия. Отражательная способность микросфер и субмикросфер оксида алюминия выше 60 % во всем спектральном диапазоне, что свидетельствует об их высокой отражательной способности.

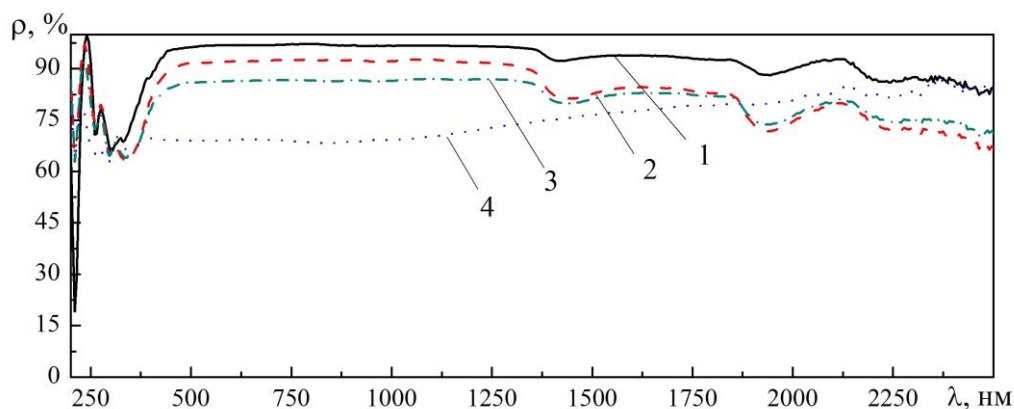


Рисунок 3 – Спектры диффузного отражения в области 250-2500 нм микрочастиц (1), наночастиц (2), микросфер (3), субмикросфер (4) Al_2O_3

Разностные спектры диффузного отражения ($\Delta\rho$), полученные вычитанием спектров после облучения из спектров необлученных образцов, позволили установить, что при воздействии протонами и электронами с энергией 100 кэВ и флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ наименьшая интенсивность судя по значениям $\Delta\rho$ регистрируется у микросфер и субмикросфер оксида алюминия. Интенсивность полос поглощения субмикросфер оксида алюминия в 5 раз меньше полос поглощения микрочастиц оксида алюминия, что свидетельствует о малой концентрации радиационных дефектов в полых частицах оксида алюминия.

Дальнейшее разложение разностных спектров диффузного отражения исследуемых образцов оксида алюминия на элементарные полосы вблизи значений энергии фотонов (эВ): 5,84, 5,54, 5,13, 4,84, 4,44, 3,96, 3,57, 3,17, 2,79, 2,4, 2,12, 1,8 (рис.4.Г) показывает, что увеличение радиационной стойкости полых частиц оксида алюминия, обусловлено, преимущественно, уменьшением концентрации центров поглощения, связанных с междоузельным кислородом и вакансиями по кислороду, по сравнению с объемными сплошными частицами.

Рентгеновские фотоэлектронные спектры для линии $\text{Al}2p$ позволили установить, что после облучения протонами с энергией 100 кэВ флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ регистрируется увеличение интенсивности пиков для сплошных микро- и наночастиц в 6 раз, тогда как для полых микрочастиц изменение составляет 20 %. Для микрочастиц имеет место уширение линии $\text{Al}2p$ в результате облучения в сторону меньших энергий, что может свидетельствовать об образовании металлических кластеров внутри микрочастиц. Тогда как для полых частиц завала плеча в низкоэнергетическую область не выявлено, что может быть следствием малой концентрации дефектов катионной подрешетке, включая их

ассоциаты в комплексы. В результате анализа кислородной линии O1s удалось установить, что только для микрочастиц после облучения протонами регистрируется сдвиг в область 530 эВ, который характеризуется присутствием ионов кислорода и определяет образование дефектов в кислородной подрешетке. Для полых частиц регистрируется изменения в спектрах только по интенсивности, что косвенно подтверждает результаты, полученные по разностным спектрам диффузного отражения, в которых регистрируются центры поглощения в полых частицах с малой интенсивностью по сравнению с объемными частицами.

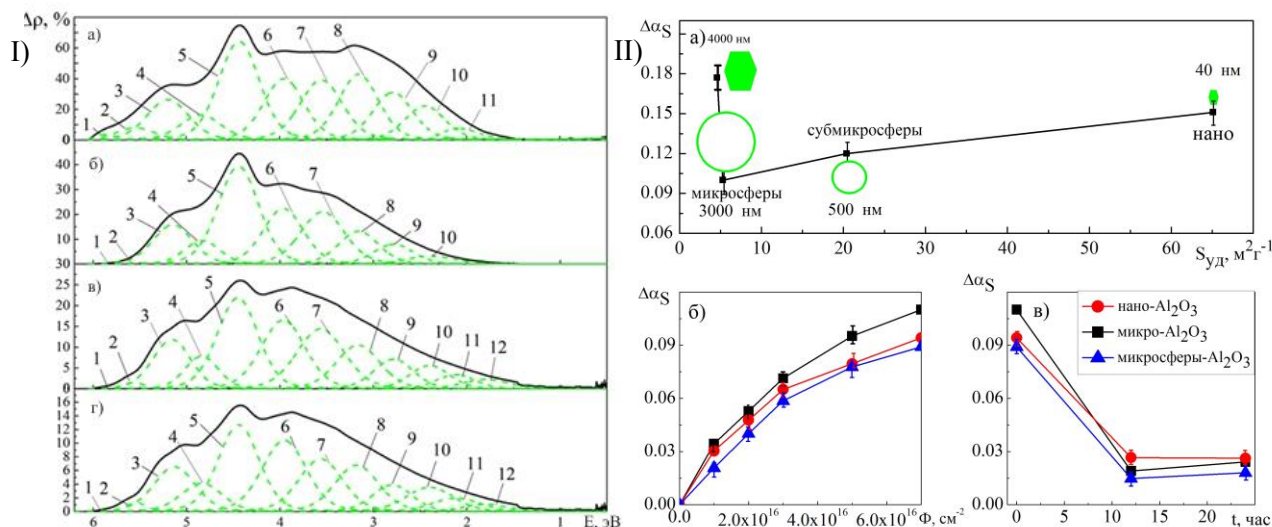


Рисунок 4 – I) Разностные спектры отражения микрочастиц (а), наночастиц (б), микросферы (в), субмикросферы (г) Al_2O_3 после облучения протонами с энергией 100 кэВ флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Разложение спектров на элементарные полосы (эВ): 1 – 5,84 (не опознан), 2 – 5,54 (не опознан), 3 – 5,13 (Al_i^{+}), 4 – 4,84 (Al_i^{+}), 5 – 4,44 (O_i^{+}), 6 – 3,96 (V_O^{+}), 7 – 3,57 (V_Al^{+}), 8 – 3,17 ($\text{K}(\text{V}_\text{Al})$), 9 – 2,79 (не опознан), 10 – 2,4 (не опознан), 11 – 2,12 (не опознан), 12 – 1,8 (Osp^*); II) Зависимость интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения от удельной поверхности и формы частиц Al_2O_3 после облучения протонами с энергией 100 кэВ флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (а). Изменение интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения от флюенса электронов с энергией 30 кэВ (б), от времени выдержки в вакууме и на воздухе после облучения электронов (в)

В разностных спектрах диффузного отражения после облучения электронами с энергией 30 кэВ и различным флюенсом $0,5, 1, 2, 3, 5, 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ было установлено увеличение интенсивности полос поглощения во всем спектральном диапазоне. Наибольшая деградация оптических свойств была зарегистрирована для микрочастиц, причем наибольшие изменения фиксируются в УФ и видимой областях спектра. В разностных спектрах диффузного отражения, регистрируемых в атмосфере, наблюдается уменьшение интенсивности полос поглощения по сравнению со спектрами, регистрируемыми непосредственно *in situ*.

Анализ изменения интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения ($\Delta\alpha_s$) после облучения протонами в зависимости от удельной поверхности частиц ($S_{уд}$) (рис.4.П.а), позволил установить, что радиационную стойкость

микрофер и субмикрофер обоснованно можно считать выше, чем радиационная стойкость наночастиц и микрочастиц, ряд значений $\Delta\alpha_s$, которых соответственно равен: $0,10 < 0,12 < 0,15 < 0,17$. Зависимость $\Delta\alpha_s$ от флюенса электронов для исследуемых образцов имеет похожую закономерность (рис.4.П.б). На фоне роста значений $\Delta\alpha_s$ при увеличении флюенса электронов наименьшими значениями $\Delta\alpha_s$ обладают микроферы. Значения $\Delta\alpha_s$ для наночастиц и микрочастиц выше по сравнению с микроферами на 5-10 % и 10-19 % соответственно.

Анализ изменений коэффициента поглощения α_s от времени выдержки покрытий в остаточном вакууме после облучения и на воздухе (рис.4.П.в), показывает уменьшение значений $\Delta\alpha_s$, обусловленное восстановлением дефектов, образованных при облучении. Для микрочастиц регистрируется уменьшение значений $\Delta\alpha_s$ на 25 %, а последующий вынос на воздух на 73 % по сравнению с исходным значением, полученным сразу после облучения. Для полых частиц такое изменение составляет 77 %, а для наночастиц – 70 %. Таким образом, наибольший эффект отжига дефектов наблюдается у полых частиц, что связано с их большой удельной поверхностью.

Моделирование воздействия протонов и электронов с энергиями 100 кэВ на объемные и полые частицы оксида алюминия в различных программных комплексах *SRIM*, *CASINO v.3.2.*, *GEANT4* показало, что длина свободного пробега в полых частицах больше по сравнению с объемными сплошными частицами в 10 раз при воздействии протонами и 2,4 раза при воздействии электронами.

Облучение протонами приводит к образованию междоузельных ионов алюминия и кислорода, и их вакансий в различном зарядовом состоянии по двум механизмам: прямое смещение при упругом взаимодействии; смещение при ионизации и искажении электрического поля кристаллической решетки. Ионы алюминия в различном зарядовом состоянии накапливаются в поверхностном слое и коагулируют, ионы кислорода после взаимодействия и нейтрализации частично выходят в вакуумный объем. Образуются вакансии алюминия и кислорода. Многочисленные выбитые атомы в ходе этих процессов производят каскад атомных столкновений, в результате создаётся неравновесное и неоднородное распределение точечных дефектов: в центре преобладают вакансии, на периферии – междоузельные атомы. В полых частицах из-за отсутствия основной фазы радиационные дефекты накапливаются в тонком слое сферы, часть из которых рекомбинирует из-за больших поверхностных сил. В итоге концентрация центров поглощения влияющих на оптические свойства в полых частицах меньше, по сравнению с объемными сплошными поликристаллами.

В случае облучения электронами процессы упругого столкновения электронов с ядрами не характерны для столь низких значений энергии, поэтому потери энергии определяются: образованием электронно-дырочных пар ($Al_i^\bullet$, $O_i^\bullet$), пространственное разделение которых приводит к разложению кристаллической решетки и образованием таких же типов дефектов, как и при упругом взаимодействии; а также ионизационным механизмом, при котором

многократная ионизация атомов приводит к смещению ионов из своих центров равновесия из-за электростатического отталкивания со стороны окружающих их ионов.

В четвертой главе представлены результаты исследования оптических свойств и радиационной стойкости полых частиц SiO_2 с размерами от нано- до субмакродиапазона в сравнении с результатами объемных сплошных микро- и наночастиц.

В спектрах диффузного отражения полых нано-, субмикро-, микро-, субмакросфер SiO_2 в области до 500 нм, также, как и для объемных сплошных микро- и наночастиц регистрируются два характерных «провала» – уменьшение коэффициента отражения (ρ) до 70-80 % (рис.5), а для субмакросфер регистрируется уменьшение до 45 %. В области свыше 500 нм коэффициент отражения полых частиц постепенно убывает и в ближней ИК-области составляет 30-45 % в зависимости от типа частиц.

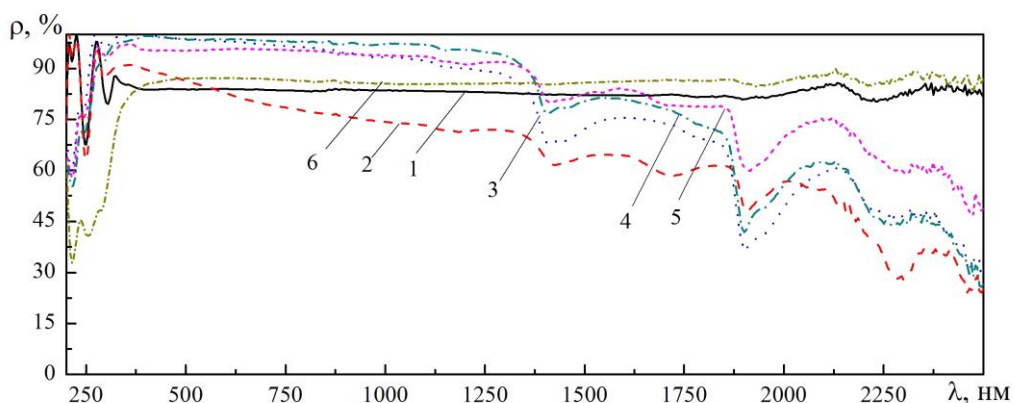


Рисунок 5 – Спектры диффузного отражения в области 250-2500 нм микро- (1), наночастиц (2), наносфер (3), субмикросфер (4), микросфер (5), субмакросфер (6) диоксида кремния

Исследовали деградацию оптических свойств при облучении протонами порошков диоксида кремния с различной морфологией поверхности. Облучение протонами с энергией 100 кэВ флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ приводит к образованию интегральной полосы наведенного поглощения наиболее интенсивная часть которой расположена в УФ- и видимой областях в спектрах всех образцов. Наименьшая интенсивность значений $\Delta\rho$ во всем спектральном диапазоне характерна для субмакросфер.

Разностные спектры отражения микро-, наночастиц, субмакросфер диоксида кремния после облучения протонами с энергией 100 кэВ с флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ были разложены на элементарные полосы (рис.6.1). Максимальную интенсивность полос поглощения имеют наночастицы и наносферы ($\Delta\rho$ достигает 82 %), минимальную – микрочастицы и субмакросферы ($\Delta\rho$ достигает 25 %). Такое соотношение связано с различной концентрацией таких центров поглощения, как $E'_{s2} (\equiv \text{Si}\cdot)$, $E'_\beta (\equiv \text{Si-O-O}\cdot)$, $(\equiv \text{Si-O}\cdot)$, $E'_{s3} (\equiv \text{Si}\cdot)$, $(\equiv \text{Si-O-O}\cdot)$, $(\equiv \text{Si-O-O-Si}\equiv)$, $(\equiv \text{Si-V}_\text{O}^+-\text{Si}\equiv)$, $(\equiv \text{Si-O})_2\text{Si}(\text{O}_2)$, $(\equiv \text{Si-O})$, интенсивность, которых для субмакросфер, меньше в сравнении с другими типами частиц в диапазоне энергий от 6 до 1 эВ. Наиболее интенсивная часть поглощения в спектрах $\Delta\rho$ характерна для центров поглощения обусловленных дефектами с присутствием радикалов кислорода захвативших дырку.

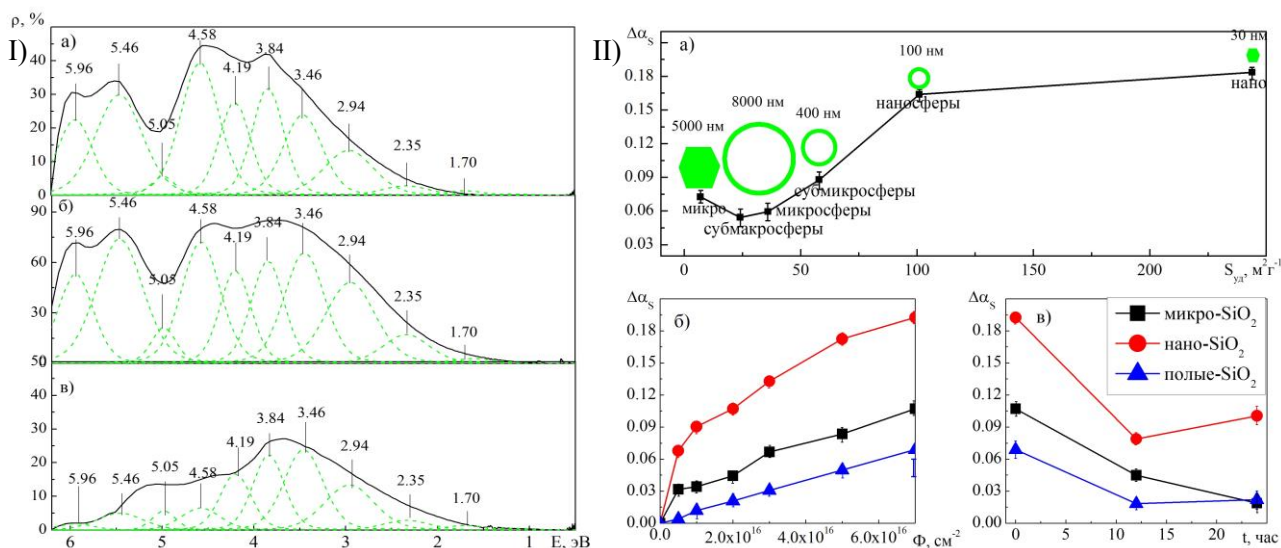


Рисунок 6 – I) Разностные спектры отражения микро- (а), наночастиц (б), субмикро-сфер (в) SiO_2 после облучения протонами с энергией 100 кэВ флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Разложение спектров на элементарные полосы (эВ): 5,96 – $E'_{s2} (\equiv \text{Si} \cdot)$, 5,46 – $E'_\beta (\equiv \text{Si-O-O} \cdot)$, 5,05 – $(\equiv \text{Si-O} \cdot)$, 4,58 – $E'_{s3} (\equiv \text{Si} \cdot)$, 4,19 – $(\equiv \text{Si-O-O} \cdot)$, 3,84 – $(\equiv \text{Si-O-O-Si} \equiv)$, 3,46 – $(\equiv \text{Si-V}_O^+ \text{-Si} \equiv)$, 2,94 – $(\equiv \text{Si-O})_2 \text{Si}(\text{O}_2)$, 2,35 – $(\equiv \text{Si-O})$, 1,70 – (O_{int}) ; II) Зависимость изменений коэффициента поглощения солнечного излучения частиц SiO_2 от удельной поверхности и формы частиц после облучения протонами с энергией 100 кэВ флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (а). Зависимость изменений интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения от флюенса электрона с энергией 30 кэВ (б), от времени выдержки в вакууме и на воздухе после облучения электронами (в)

Рентгеновские фотоэлектронные спектры показали, что облучение образцов диоксида кремния протонами приводит к уменьшению интенсивности фотоэлектронной эмиссии для линии $\text{Si}2p$ и $\text{O}1s$. Смещение пиков после облучения для различных образцов выявлено не было. Эмиссия для $\text{Si}2p$ в области энергий от 100 до 106 эВ определяет тип связи кремния с кислородом, фактически характеризует степень стехиометрий. Низкоэнергетическая область соответствует соединению кремния в виде оксида (Si=O), смещение пика эмиссии в высокоэнергетическую область свидетельствует о формировании диоксида кремния (O-Si-O). Из экспериментальных данных было установлено, что состав субмикро-сфер определяется монооксидом кремния, тогда как состав других образцов относится к стехиометрии SiO_2 или Si_2O_3 . Для линии $\text{O}1s$ был получен сходный результат.

Спектры наведенного поглощения микро-, нано- и полых частиц диоксида кремния, полученных при различных флюенсах 0,5, 1, 2, 3, 5, $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ электронов с энергией 30 кэВ, показывают, что с увеличением флюенса наведенное поглощение увеличивается практически по всему спектру, за исключением УФ-области для нанопорошков, где такое увеличение незначительно. При флюенсе $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ интенсивность интегральной полосы наведенного поглощения для микро-частиц достигает значений 46 %, тогда как в видимой области значения $\Delta\rho$ составляют 30 %. По сравнению с микропорошками деградация оптических свойств для полых частиц происходит с меньшей степенью: в видимой области различие в интенсивности поглощения при наибольшем флюенсе ($7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$)

достигает значений 20 %, что практически в два раза меньше, чем у сплошных микрочастиц SiO_2 .

Расчет изменений интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения после облучения протонами (рис.6.П.а) образцов диоксида кремния с различной морфологией поверхности показал, что наименьшее значение $\Delta\alpha_s = 0,054$ соответствует субмакросферам, затем следуют микросферы со значениями $\Delta\alpha_s = 0,059$, и микрочастицы – 0,072. Для субмикросфер, наносфер и наночастиц радиационная стойкость существенно ниже. На рисунке 6.П.б представлены зависимости интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения от флюенса электронов. При увеличении флюенса до $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ значения $\Delta\alpha_s$ увеличиваются до 0,066 для полых частиц. Для объемных сплошных микро- и наночастиц $\Delta\alpha_s$ составляет 0,098 и 0,196, соответственно. Обращает на себя внимание ход зависимости, в которой имеются точки перелома. Так, для микрочастиц и наночастиц наблюдается излом хода кривой при флюенсе $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Такое изменение определяется механизмом накопления дефектов. Как было показано ранее на образцах оксида алюминия: первая стадия – это накопление дефектов на поверхности поликристаллов, вторая стадия – накопление дефектов в объеме поликристаллов. Для полых частиц характерного излома не наблюдается, поскольку процесс накопления дефектов происходит в поверхностном слое сферы. Изменения значений $\Delta\alpha_s$ в остаточном вакууме и в атмосфере воздуха, свидетельствует об отжиге (восстановлении) дефектов (рис.6.П.в). Для наночастиц происходит уменьшение значений $\Delta\alpha_s$ на 47 % от 0,196 до 0,093, а последующий вынос на воздух на 71 % по сравнению с исходным значением, полученным сразу после облучения. Для полых частиц такое изменение составляет 74 %, а для наночастиц – 72 %. Отличительной особенностью аморфного диоксида кремния является наличие гибкой связи $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$, обуславливающей неупорядоченную структуру стекла. В такой структуре высока вероятность рекомбинации образованных дефектов и релаксации продуктов реакции на поверхность поликристаллов.

Моделирование воздействия протонов и электронов с энергиями 100 кэВ на объемные и полые частицы диоксида кремния в различных программных комплексах *SRIM*, *CASINO v.3.2.*, *GEANT4* показало, что длина свободного пробега в полых частицах больше по сравнению с объемными сплошными частицами в 4 раза при воздействии протонами и 2,3 раза при воздействии электронами.

Механизмы образования дефектов в диоксиде кремния могут быть обусловлены следующими процессами: разрушение мостиковых кислородных связей при взаимодействии с ускоренными протонами или электронами с образованием дефектов на немостиковых атомах кислорода и кремния с неспаренными электронами; образование гидроксильных групп при ассоциации термолизованного протона на образовавшихся дефектах кремния и кислорода; образование кислородных вакансий (E'_γ , E'_δ , E'_β -центров), либо кремни-кремниевой связи при упругом взаимодействии с мостиковым кислородом ускоренных протонов с последующей ассоциацией термолизованных протонов

на вакансиях кислорода; образование перекисных радикалов и дефектов на немостиковом атоме кислорода; образование молекулярного кислорода и его уход в вакуумный объем.

В пятой главе представлены результаты исследования оптических свойств и радиационной стойкости покрытий на основе полых микрочастиц оксида алюминия и диоксида кремния в сравнении с результатами объемных сплошных микрочастиц.

Установлено, что отражательная способность покрытий на основе полых частиц диоксида кремния и оксида алюминия больше, чем отражательная способность покрытий на основе микрочастиц, на 3-5 %.

Расчет зависимости изменений интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения после облучения протонами энергией 100 кэВ флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ показал, что наилучшую радиационную стойкость имеют покрытия на основе полых микросфер оксида алюминия и микросфер диоксида кремния.

После облучения электронами энергией 30 кэВ при флюенсах $2 \cdot 10^{16}$ и $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ максимальное значение коэффициента поглощения солнечного излучения имеют образцы с микрочастицами оксида алюминия и покрытия на основе микрочастиц диоксида кремния. При флюенсе $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ радиационная стойкость покрытий на основе микросфер оксида алюминия выше по сравнению с покрытиями на основе микрочастиц оксида алюминия на 12,3 %, при флюенсе $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ – выше на 16,6 %. При флюенсе $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ значение интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения для покрытий на основе микросфер диоксида кремния по сравнению с покрытиями на основе микрочастиц диоксида кремния ниже на 34 %, при флюенсе $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ – ниже на 40,5 %.

Увеличение радиационной стойкости покрытий на основе полых частиц оксида алюминия может быть следствием того, что часть из имеющихся до облучения свободных радикалов в лаке при облучении соединяется с некомпенсированными радикалами в полых частицах оксида алюминия с образованием комплексов.

Высокая радиационная стойкость покрытий на основе полых частиц диоксида кремния может быть связана с дефицитом кислорода в структуре, что определяется стехиометрией SiO, а не SiO₂, характерной для микрочастиц. Следовательно, при облучении ионизирующим излучением в полых частицах со структурой SiO центры поглощения, обусловленные различными радикалами кислорода, будут возникать с меньшей вероятностью, поскольку атомов кислорода меньше.

Основные выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие общие выводы.

1. Разработана технология получения порошков полых частиц Al₂O₃ и SiO₂ с высокой отражательной способностью на основе полистирольных сферических частиц в качестве растворимой подложки.

2. Выполнены исследования структуры, спектров диффузного отражения синтезированных полых частиц различных размеров Al₂O₃ и SiO₂. Установлены

закономерности изменения концентрации собственных точечных дефектов, концентрации свободных электронов и хемосорбированных газов на поверхности микро-, нано- и синтезированных полых частиц Al_2O_3 и SiO_2 при облучении протонами и электронами. Предложены механизмы взаимодействия протонов с полыми частицами Al_2O_3 и SiO_2 и механизмы образования радиационных дефектов.

3. Установлено, что отражательная способность порошков субмикронных и микронных размеров полых частиц оксида алюминия, полученных осаждением наночастиц оксида алюминия на полистирольные частицы с последующим их удалением, – свыше 60 % во всем спектральном диапазоне.

4. Радиационная стойкость микросфер оксида алюминия к воздействию протонов энергией 100 кэВ флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ выше по сравнению с радиационной стойкостью субмикросфер, микро- и наночастиц оксида алюминия на 16 %, 40 %, 33 % соответственно. Радиационная стойкость микросфер оксида алюминия к воздействию электронов энергией 30 кэВ флюенсом до $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ выше радиационной стойкости микро- и наночастиц оксида алюминия на 19 % и 15 %.

5. Увеличение радиационной стойкости полых частиц микронных размеров оксида алюминия по сравнению с радиационной стойкостью объемных микрочастиц обусловлено малой концентрацией наведенных дефектов анионной подрешетки.

6. Установлено, что отражательная способность порошков полых частиц диоксида кремния, синтезированных с применением шаблонов из полистирольных частиц с последующим их удалением, – свыше 75 % в видимой части спектра.

7. Радиационная стойкость микросфер и субмакросфер диоксида кремния к воздействию протонов энергией 100 кэВ флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ выше, чем радиационная стойкость микрочастиц и наночастиц, на 25 % и 70 % соответственно. Радиационная стойкость микросфер диоксида кремния к воздействию электронов энергией 30 кэВ флюенсом до $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ по сравнению с радиационной стойкостью микрочастиц и наночастиц диоксида кремния выше на 36 % и 64 % соответственно.

8. Увеличение радиационной стойкости полых частиц микронных размеров оксида алюминия по сравнению с объемными микрочастицами обусловлено малой концентрацией индуцированных дефектов E'_γ , E'_δ , E'_β -центров.

9. Установлено, что покрытия с пигментом из полых частиц Al_2O_3 обладают большей на 5,6 % радиационной стойкостью по сравнению с покрытиями на основе микрочастиц Al_2O_3 ; покрытия с пигментом из полых частиц SiO_2 обладают большей на 16 % радиационной стойкостью по сравнению с покрытиями на основе микрочастиц SiO_2 .

Список цитируемой литературы

- 1*. Caruso F. Nanoscale Particle Modification via Sequential Electrostatic Assembly, Colloids and Colloid Assemblies: Synthesis, Modification, Organization and Utilization of Colloid Particles // Wiley-VCH, Weinheim. – 2003. – P. 246–283.
- 2*. Sattler K. D. Handbook of Nanophysics: Functional Nanomaterials // Taylor&Francis Publisher, CRC Press. – 2010. – P. 787.
- 3*. Грачева И. Е. Наноматериалы с иерархической структурой пор / И. Е. Грачева, В. А. Мошников // Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2011. – С.107.
- 4*. Елисеев А. А. Функциональные наноматериалы / А. А. Елисеев, А. В. Лукашин // Под ред. Ю.Д. Третьякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2010. – С. 456.
- 5*. Пчеляков О.П. Кремний-германиевые наноструктуры с квантовыми точками: механизмы образования и электрические свойства / О.П. Пчеляков, Ю.Б. Болховитянов, А.В. Двуреченский. // ФТП.-СПб.:Наука. –2000. –Т. 34. – вып. 11. – С. 1281–1299.
- 6*. Kolonitskii Petr D. Electrosurface and adsorption properties of nanodimensional chromium oxide. St Petersburg State University. / Petr D. Kolonitskii, D.M. Dolin, N. G. Sukhodolov. // Vestnik of St Petersburg University. Physics and Chemistry. – 2018. – V. 5(63). – P. 68–73.
- 7*. Panin V.E. Fundamental Role of Local Curvature of Crystal Structure in Plastic Deformation and Fracture of Solids / V. E. Panin, V.E. Egorushkin // AIP Conf. Proc. Melville, NY: American Institute of Pysics. – 2014. – V. 1623. – P. 475–478.
- 8*. Панин В.Е. Пластическая дисторсия – фундаментальный механизм в нелинейной мезомеханике пластической деформации и разрушение твердых тел. / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, А.В. Панин, А.Г. Чернявский // Физическая мезомеханика 19.1. – 2016. – Т. 19., № 1. – С. 31–46.
- 9*. Chen S. New opportunities for transparent ceramics. / S. Chen, Y. Wu // Am Ceram Soc Bull. – 2013. – V. 92. – P. 32–37.
- 10*. Arnal P. M. High-Temperature-Stable Catalysts by Hollow Sphere Encapsulation / P. M. Arnal, M. Comotti, and F. Schüth //Angew. Chem. Int. Ed. – 2016. – V. 45. – P. 8224–8227.
- 11*. Соловьянчик Л.В. Исследование влияния наночастиц диоксида кремния на поверхностные свойства кремнийорганических покрытий. / Л.В. Соловьянчик, А.А. Пыхтин, В.С. Ведникова, С.В. Кондрашов, Б.Ф. Павлюк // Российские нанотехнологии. – 2019. – Т. 14, № 5–6. – С. 31–36.
- 12*. Путилин Э.С. Оптические покрытия. / Э.С. Путилин // Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО. – 2010. – С. 227.
- 13*. Neshchimenko V. V. Optical radiation stability of ZnO hollow particles / V. V. Neshchimenko, Li Chundong, M.M. Mikhailov, Lv Jinpeng // Nanoscale. – 2018. – V. 47, №10. – P. 22335–22347.
- 14*. Neshchimenko V. V. Radiation Resistance of Nanomodified Organosilicic Enamel / V. V. Neshchimenko, Li Chundong, M. M. Mikhailov // Dyes and Pigments. – 2017. – V. 145. – P. 354–358.

15*. Mikhailov M.M. Thermal control coatings based on pigments modified with Al₂O₃ nanoparticles / M.M. Mikhailov, V.V. Neshchimenko, A.N. Sokolovskiy, V.Yu. Yurina // Progress in Organic Coatings. – 2019. – V. 131. – P. 340–345.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Iurina, V.Yu. Size Effect on Optical Properties of Silicon Dioxide Hollow Particles / V. Yu. Iurina, V.V. Neshchimenko, Chundong Li, A.N. Dudin // Solid State Phenomena. – November 2020. – V. 312. – P.26-31.

2. Iurina, V. Yu. Optical Properties and Radiation Stability of Al₂O₃ Microparticles, Nanoparticles and Microspheres / V. Yu. Iurina, V.V. Neshchimenko, Chundong Li. // Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques. – March 2020. – V. 14 – No.2. – P.253-259.

3. Дудин, А.Н. Радиационные дефекты, индуцированные воздействием протонов в полых частицах оксида цинка / А.Н. Дудин, В.В. Нешименко, В.Ю. Юрина // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. – 2020. – № 8. – С.78-85.

4. Mikhailov, M.M. Modification of Organosilicon Compounds with Al₂O₃ Nanoparticles in Order To in-crease Radiation Resistance / M.M. Mikhailov, S.A. Yur'ev, A.S. Bakhtaulova, V.Yu. Yurina // Metal Science and Heat Treatment. – 2020. – V.62. – P.81-85.

5. Mikhailov, M.M. Comparison of the optical property degradation of oxide micro- and nanopowders irradiated by 100 keV protons / M.M. Mikhailov, V.I. Iurina, V.V. Neshchimenko, Chundong. Li // Surface and Coatings Technology. – 2020. – V.389. – P.125620.

6. Mikhailov, M.M. Thermal control coatings based on pigments modified with Al₂O₃ / M.M. Mikhailov, V.V. Neshchimenko, A.N. Sokolovskiy, V.Yu. Yurina // Progress in Organic Coatings. – 2019. – V.131. – P.340-345.

7. Iurina, V.I. Color centers induced by proton exposure in aluminum oxide hollow particles / V.I. Iurina, V.V.Neshchimenko, M.M. Mikhailov, & C. Li // AIP Conference Proceedings 2051. – 2018. – 020108.

8. Солнечный отражатель на основе порошка BaSO₄, модифицированного наночастицами Al₂O₃. Михайлов М.М., Юрьев С.А., Лапин А.Н., Нешименко В.В., Юрина В.Ю., Ващенко И.С. Патент на изобретение RU 2702688 C1, 09.10.2019. Заявка № 2019108514 от 25.03.2019.

Помимо указанных статей, материалы диссертации опубликованы в 11 тезисах докладов на конференциях, перечисленных в разделе «Апробация работы».

Юрина Виктория Юрьевна

**ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПОЛЫХ ЧАСТИЦ
ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И ДИОКСИДА КРЕМНИЯ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Подписано к печати 30.05.2022 г.

Усл.п.л. 1.0

Уч.-изд. л. 0.8

Формат 60×84/16.

Тираж 100 экз.

Заказ № 1

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования Амурский государственный университет (ФГБОУ ВО АмГУ)

Издано ФГБОУ ВО АмГУ 675027, г. Благовещенск, Игнатьевское ш., дом 21

E-mail: master@amursu.ru