

на правах рукописи

Харькова Алёна Валерьевна

**СИНТЕЗ СФЕРИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ СУЛЬФИДА
ЦИНКА В УСЛОВИЯХ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ
В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ**

Специальность 1.3.8 Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Владимир – 2026

Работа выполнена на кафедре физики и прикладной математики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Кочуев Дмитрий Андреевич

Официальные оппоненты: **Кононенко Виталий Викторович**,
доктор физико-математических наук,
федеральное государственное бюджетное
учреждение науки **Федеральный**
исследовательский центр «Институт общей
физики им. А.М. Прохорова Российской
академии наук», центр естественно-научных
исследований, лаборатория лазерной оптики
поверхности, ведущий научный сотрудник;

Савельев Михаил Сергеевич,
кандидат физико-математических наук, доцент,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
университет «Московский институт электронной
техники», институт биомедицинских систем,
доцент.

Ведущая организация: федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Северо-Кавказский федеральный
университет»

Защита состоится 25 сентября 2026 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.411.03 при ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» по адресу: 170002, г. Тверь, Садовый пер., д. 35, ауд. 226.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Тверского государственного университета по адресу: 170100, г. Тверь, ул. Советская, д. 58 и в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» <https://dissertations.tversu.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Е.В. Барабанова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Оксидные и халькогенидные нанопорошки представляют собой перспективные материалы, которые позволяют создавать оптические элементы, находящие своё применение в различных отраслях: от производства ИК приборов до медицинских приложений [1-3]. Отдельным и важным направлением исследований является создание оптической керамики на основе порошков с заданной дисперсностью. Синтез наночастиц ZnS с контролируемой дисперсностью рассматривается с целью их применения в оптической керамике – в частности, в качестве активной добавки при формировании компактов для дальнейшего выращивания оптических элементов. В условиях современного развития оптоэлектроники и роста спроса на компоненты для мультиспектральных оптических систем, технологии шликерного литья и горячего прессования приобретают приоритетное значение по сравнению с методами классической механической обработки. Традиционный производственный цикл, включающий выращивание моно- и поликристаллических заготовок, их шлифование, полирование и нанесение покрытий, характеризуется низкой производительностью и не позволяет обеспечить массовый выпуск (тысячи единиц) оптических элементов. Методы формования из порошковых материалов демонстрируют высокую масштабируемость [4, 5]. Ключевым фактором эффективности данных технологий является использование сферических нанопорошков и оптимизация плотности упаковки частиц в компакте, что позволяет минимизировать светорассеяние, особенно в коротковолновой области спектра. В ряде отечественных научных работ [6, 7] отмечается, что отдельными научными группами были получены оптические заготовки сульфида цинка в виде пластин методом прессования порошка, однако также указывается, что разработанные методы не обеспечивали требуемого оптического качества материала. Настоящая работа направлена на решение указанных проблем за счёт управляемого синтеза частиц с заданными характеристиками (размера, фракционного состава, химического и фазового состояния). Актуальность исследований подтверждается тем, что синтезируемый наноматериал также находит активное применение для приложений нанофотоники, дифракционной оптики, синтеза метаповерхностей и т.д. Сферические наночастицы заданных (контролируемых) размеров могут выступать модельным объектом для изучения квантоворазмерных эффектов, оптического, электрического отклика, каталитической активности. Таким образом, несмотря на активное исследование и продвижение в данной области, при производстве керамических изделий оптического качества существует ряд нерешенных проблем: отсутствие на рынке в достаточном количестве (десятки и сотни грамм) необходимых порошковых материалов с требуемым фазовым, фракционным и химическим составом для проведения экспериментальных работ; длительный процесс подготовки материала для компактирования при изменении химического состава смеси. Данные проблемы приводят к появлению дефектов при компактировании порошковых материалов (поры, дефекты по границе зерен, примеси и трещины,

приводящие к негативным эффектам, таким, как двойное лучепреломление или разрушение заготовок). Цикл формирования заготовок керамики оптического качества является трудоемким и имеет в себе множество технологических операций: подбор компонентов порошковой смеси, компактирование, спекание, отжиг и конечная механическая обработка заготовки. В данной работе рассматривается синтез наночастиц с контролируемым размером, обеспечивающий максимальную плотность упаковки порошка при формовании. Максимальное заполнение объема формы достигается путем тщательного подбора фракционного состава смеси, так как размеры и форма частиц напрямую влияют на пустоты, образующиеся в смеси при ее укладке. В экспериментальной практике это итерационный, затратный с точки зрения ресурсов процесс.

Степень разработанности. Высокопрозрачная оптическая керамика требует высокой степени чистоты исходных компонентов и высокой плотности упаковки частиц в компактах. Авторы в работах [8, 9] указывают, что для получения высококачественных конечных продуктов необходимо использовать высокочистые порошки. Метод лазерной абляции широко используется для получения частиц высокого качества, так как он позволяет синтезировать частицы сферичной формы. На сегодняшний день все еще не решен целый ряд ключевых проблем, связанных с использованием ультракоротких лазерных импульсов для синтеза порошковых материалов. В частности, актуальной задачей является минимизация тепловых эффектов, возникающих при обработке. Также важно отметить присущую наночастицам агломерацию – слипание частиц между собой, при котором их последующее разделение становится практически невозможным. Фракционный состав порошка напрямую влияет на качество заготовки для производства высокопрозрачной оптической керамики. Хотя применение ультракоротких лазерных импульсов позволяет получать порошки с узким распределением по размерам частиц, это само по себе не гарантирует оптимальность состава с точки зрения технологических свойств. Всесторонний анализ современного состояния данной области позволяет говорить о том, что необходимо применение комплексного подхода, позволяющего оценить влияние не только параметров излучения, но и внешней среды, в которой происходит обработка материала.

Целью данной работы является исследование и установление физических закономерностей и механизмов, определяющих размер, дисперсность, фазовый состав и структуру наночастиц сульфида цинка, синтезируемых методом лазерной абляции в среде аргона, и разработка принципов управления этими параметрами при варьировании условий лазерного эксперимента.

Основные задачи исследования:

1. Исследовать влияние параметров плотности энергии и давления буферного газа на эффективность выхода, дисперсность и средний размер сферических наночастиц, синтезируемых методами лазерной абляции в среде аргона.

2. Выявить количественную зависимость среднего размера и дисперсности сферических наночастиц ZnS, образованных в облаке продуктов лазерного

абляционного воздействия, от давления буферного газа - аргона с точки зрения кинетики нуклеации.

3. Установить влияние давления буферного газа на фазовое состояние синтезируемых наночастиц: определить критическое давление, при котором происходит переход от образования поликристаллических агломератов к синтезу структурно-однородных наночастиц, и связать этот переход со сменой доминирующего механизма кристаллизации.

4. На основании установленных закономерностей предложить оптимальные параметры лазерного абляционного синтеза для получения сферических наночастиц ZnS с заданными размерами и дисперсностью.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы заключается в расширении фундаментальных представлений о физике лазерной абляции и кинетике нуклеации наночастиц в газовой фазе. Экспериментальные данные, полученные в ходе исследования, формируют основу для углублённого понимания механизмов управляемого синтеза наноматериалов.

Практическая значимость результатов состоит в развитии подходов к синтезу сферических наночастиц, формирующих методическую основу для разработки технологий получения наночастиц с заданным размером, формой и фазовым составом. Сферические нанообъекты сульфида цинка, синтезированные в данной работе, могут стать востребованными модельными системами в таких передовых направлениях, как плазмоника и оптоэлектроника. Кроме того, полученные зависимости позволяют перейти к разработке оптической керамики на основе ZnS, в том числе градиентных материалов, с использованием методов шликерного литья и 3D печати, что открывает возможности для повышения физико-механических характеристик изделий и масштабирования производства.

Установленные в работе корреляции между давлением буферного газа, размерами и фазовым составом сферических наночастиц значительно дополняют существующую научную базу о влиянии условий лазерного синтеза на конечные свойства материала.

Полученные результаты позволяют сформулировать практические рекомендации для широкого спектра прикладных задач: от разработки оптически прозрачной в ИК-диапазоне керамики до конструирования тераностических агентов нового поколения.

Результаты диссертации имеют образовательную ценность: они могут быть интегрированы в курсы лекций по физике конденсированного состояния, физики плазмы, лазерной физике, направлениях коллоидной химии.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ №25-22-20075 «Разработка методов лазерного синтеза наночастиц на основе сульфида цинка с управляемой дисперсностью для изготовления микрооптики из высокопрозрачной оптической керамики».

Методология и методы исследования. Исследовались наночастицы сульфида цинка (ZnS), синтезированные методом лазерной абляции.

Исследованию подвергались их морфология, дисперсность, фазовый и химический состав в зависимости от давления газа и плотности энергии лазерного излучения.

Синтез наночастиц осуществлялся методом фемтосекундной лазерной абляции мишени, полученной методом газофазового осаждения (CVD), из поликристаллического сульфида цинка. В качестве источника излучения использовалась фемтосекундная лазерная система с длиной волны $\lambda = 1030$ нм, длительностью импульса 280 фс и частотой следования 10 кГц. Лазерное воздействие на поверхность мишени осуществлялась с использованием объектива плоского поля в атмосфере аргона высокой чистоты (99,998%). Для визуального контроля зоны облучения, динамики распространения плазменного факела и процесса синтеза, использовалась CCD-камера со скоростью регистрации 40 кадров в секунду. Полученные видео- и фотоматериалы позволили качественно оценить стабильность процесса, геометрию плазменного факела и зафиксировать момент формирования свечения продуктов абляции в зависимости от плотности энергии лазерного излучения.

Выполнена характеристика полученных продуктов абляции с использованием комплекса методов: растровая электронная микроскопия (РЭМ) применялась для анализа морфологии частиц, контроля наличия агрегатов, агломератов и предварительной оценки размеров продуктов абляции. Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) применялась для детального исследования формы, размера и внутренней структуры. Рентгенофазовый анализ (РФА) применялся для определения фазового состава, политипии кристаллической решетки синтезированных наночастиц, размера кристаллитов. Обработка изображений с растрового и просвечивающего электронного микроскопа и анализ дифрактограмм проводились с использованием специализированного программного обеспечения. Совокупная погрешность определения размеров частиц по данным РЭМ/ПЭМ оценивались на уровне $\pm 5\%$, размеров кристаллитов по РФА – $\pm 10\%$, сходимость результатов измерений, полученных различными методами в пределах 20%.

На основании полученных данных были построены количественные зависимости среднего диаметра частиц, размера кристаллитов и фазового состава от давления газа, а также массы аблированного материала от плотности энергии лазерного излучения.

Объектами исследования в настоящей работе выступают наночастицы сульфида цинка, синтезированные методом ультракороткой лазерной абляции.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- Показано, что в процессе лазерной абляции возможно управлять фракционным составом порошкового материала в зависимости от величины давления буферного газа (патент на изобретение №2688001).
- Впервые продемонстрировано, что изменение давления буферного газа (аргона) при фемтосекундной лазерной абляции оказывает существенное влияние как на конечные размеры получаемых наночастиц, так и на внутреннюю

структуру материала, определяя вероятность формирования моно- и поликристаллических частиц.

- Обнаружено, что изменение плотности энергии лазерного излучения в пределах 0,2-0,9 Дж/см² позволяет осуществлять процесс лазерной абляции в режиме, исключающем образование плазменного факела. Экспериментально установлено, что при значении плотности энергии 1 Дж/см² в среде аргона при атмосферном давлении происходит оптический пробой на взвешенных частицах, что приводит к подавлению абляции и локальному оплавлению области воздействия.

Основные положения, выносимые на защиту:

I. Предложенный метод лазерной абляции объемной мишени ZnS в среде аргона, позволяет синтезировать сферические наночастицы с сохранением стехиометрии и контролируемыми диаметрами в заданном размерном диапазоне. Показано, что с увеличением давления в диапазоне 5-20 бар достигается монотонное уменьшение среднего диаметра от 63 ± 3 нм до 18 ± 2 нм, что обусловлено изменением плотности газовой среды, определяющей частоту столкновений частиц ZnS с атомами буферного газа и скорость теплопереноса в расширяющемся фронте продуктов абляции.

II. Изменение давления буферного газа приводит к изменению процесса роста частиц. До величины давления 5 бар наблюдается доминирующее образование поликристаллических частиц ZnS со средним размером кристаллитов 55 ± 5 нм. Повышение давления до диапазона 15-20 бар приводит к смене основного механизма на быструю нуклеацию и ограниченный рост частиц, обеспечивая формирование структурно-однородных наночастиц вюрцита 2H (средние размеры кристаллитов – 45 ± 4 нм).

III. Увеличение плотности энергии начиная с порогового значения 0,3 Дж/см² в импульсе, приводит к линейному росту количества удаляемого материала, с максимумом эффективности на уровне не более 0,9 Дж/см², при котором масса удаляемого материала составляет 2 нг/импульс. Дальнейшее увеличение плотности энергии в диапазоне 1,2-3,4 Дж/см² приводит к резкому снижению выхода продуктов абляции (менее 1 нг/импульс), что обусловлено доминированием процессов нагрева поверхностного слоя вещества, многофотонной ионизацией и образованием плазмы.

Достоверность полученных данных подтверждена использованием современного аналитического оборудования, сходимостью результатов, полученных независимыми методами измерений (РЭМ, ПЭМ, РФА). Результаты являются воспроизводимыми и статистически подтвержденными, обработка результатов измерений осуществлялась с использованием специализированного программного обеспечения. Полученные результаты были представлены на всероссийских и международных профильных конференциях, публиковались в рецензируемых научных изданиях.

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключается в определении концепции управляемого синтеза наночастиц, направления исследований и установлении граничных условий эксперимента. Также в непосредственном

проведении экспериментальных исследований, включая подготовку и проведение экспериментов по лазерной абляции в заданных диапазонах плотности энергии (0,2–3,4 Дж/см²) и давления буферного газа (5-20 бар). Непосредственно автором осуществлялась обработка данных сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, проведение РФА и интерпретация полученных результатов, на основе которых сформулированы выводы и положения диссертации.

Экспериментальные рентгенограммы получены старшим научным сотрудником кафедры минералогии ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» к. х. н. Потехиной Н. В. и заведующим лабораториями кафедры материаловедения и энергетических установок ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых» Киреевым А.В.

Изображения наночастиц сульфида цинка с растрового электронного микроскопа получены старшим научным сотрудником лаборатории электронной микроскопии Института кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН к. ф.-м. н. Артемовым В. В.

Обсуждение результатов теоретических расчётов осуществлялось автором при консультативной поддержке доцента кафедры общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых» к. ф.-м. н., доцента А. Ф. Галкина.

Разработка и создание реакционной камеры для синтеза наночастиц, исследования структуры наночастиц, исследование данных рентгенофазового анализа, постановка цели и задач, обсуждение результатов экспериментов, формулировка выводов выполнялись автором совместно с научным руководителем. Подготовка публикаций и научных докладов по результатам научных исследований в рамках диссертационной работы осуществлялась совместно с соавторами.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационного исследования были представлены на всероссийских и международных конференциях: 7-я Международная конференция «Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства» (г. Суздаль, 2018); International Conference «Laser Optics» (г. Санкт Петербург, 2022, 2020, 2018); III Междисциплинарный молодежный научный форум с международным участием «Новые материалы» (г. Москва, 2018); Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (г. Севастополь, 2018), Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (г. Сочи, 2019, 2020; Москва, 2018), VIII Международной молодежной научной школе конференции «Современные проблемы физики и технологий» (г. Москва, апрель 2019 г.), Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз (г. Москва, 2023, 2020, 2019, 2018), IX Международная конференция «Лучевые технологии и применение лазеров» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.); X Международная научная конференция студентов,

аспирантов и молодых учёных «Ломоносов - 2018» (г. Москва, 2018 г.); XII Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ'2019 (г. Суздаль, 2019 г.); XX Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (г. Москва, 2023 г.); 21-ой Международная конференция Оптика лазеров ICLO 2024 (г. Санкт-Петербург, 2024 г.); Симпозиум «Актуальные проблемы функциональных материалов» (АПФМ-2025), (г. Ставрополь, 2025 г.); Международная конференция Физика.СПб (г. Санкт-Петербург, 2025 г.); XII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2026» (г. Москва, 2026 г.); 68-я Всероссийская научная конференция МФТИ в честь 130-летия со дня рождения Н.Н. Семёнова (г. Москва, 2026 г.); 22-ое Международное совещание «Сложные системы заряженных частиц и их взаимодействие с электромагнитным излучением» (г. Москва, 2026 г.).

Материалы использовались для синтеза фракций сферических наночастиц широкого круга материалов, заданного размера и дисперсности наночастиц для медицинских приложений в области тераностики в рамках проекта, поддержанного грантом РФФИ №22-79-10348, для исследований в области создания эффективных методов объемной лазерной микромодификации алмазных материалов для создания оптоэлектрических устройств в рамках Госзадания FZUN-2024-0018 ВлГУ.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 научных работ, из них 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК и приравненных к ним; получено 5 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ и 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 190 наименований. Общий объем диссертации – 150 страниц, в том числе 61 рисунок и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность, отражена новизна работы и ее практическая значимость. На основании проведенного обзора работ, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, кратко изложено содержание работы.

В первой главе «ОСНОВЫ И ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ ПРИ ПОМОЩИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ» проведен анализ спектра применения оксидных и халькогенидных нанопорошковых материалов. Определены ключевые параметры воздействия, влияющие на характеристики продуктов абляции (плотность энергии лазерного излучения, давление буферного газа). Исследованы особенности взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с материалами в газовых средах. Структурированы данные влияния параметров давления буферного газа и режима облучения на физические процессы при лазерной абляции. Рассмотрены основные методы характеристики наночастиц.

Исследовано влияние характеристик наночастиц на компактируемость материалов. Влияние нанодисперсных добавок на текучесть среды зависит от их концентрации. В то время как низкие концентрации способствуют улучшению текучести, высокие могут приводить к ее снижению. Это указывает на необходимость проведения тщательного подбора фракции порошковой смеси, при этом форма частиц также оказывает влияние на компактируемость. Правильная сферическая форма является наиболее предпочтительной, так как «оскольчатые» частицы приводят к ухудшению текучести и, как следствие, снижению компактируемости порошка.

В заключении первой главы сформулированы основные задачи диссертационного исследования.

Во второй главе «ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ СУЛЬФИДА ЦИНКА ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИЕЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ» описаны разработанные методики проведения экспериментов для синтеза и анализа наночастиц сульфида цинка. Синтез наночастиц сульфида цинка осуществлялся с использованием фемтосекундной лазерной системы. Проведение исследования влияния условий воздействия на получаемые материалы происходило путем варьирования следующих параметров: плотности энергии лазерного излучения; скорости перемещения лазерного луча; давления буферного газа. Плотность энергии лазерного излучения менялась от 0,2 до 3,4 Дж/см², что позволило оценить эффективность синтеза частиц, влияние данного параметра на химический и фазовый состав, а также морфологию поверхности наночастиц. Исследование влияния стратегии сканирования лазерного пучка по поверхности мишени на результат абляции ZnS выполнялось как при изменении скорости сканирования, так и при стационарном воздействии. Перемещение луча осуществлялось при помощи гальваносканатора со скоростью от 4 до 1000 мм/с. На данном этапе исследования было выявлено, что скорость перемещения лазерного луча существенно влияет на степень нагрева поверхности материала в процессе лазерной абляции. Установлено, что наиболее негативный сценарий воздействия приводит к формированию ванны расплава в зоне лазерного воздействия, что способствует получению неконтролируемой по размерам фракции, содержащей брызги обрабатываемого материала. Для исследования влияния давления буферного газа на результат абляции ZnS его значения варьировались в диапазоне от 1 до 25 бар. При этом, результаты, полученные при атмосферном давлении, обладали низкой воспроизводимостью. Низкая плотность среды приводила к обильному выбросу брызг, на поверхности присутствовали выраженные следы плавления материала. Производительность синтеза сферических частиц крайне низкая. Повышение давления более 20 бар не приводило к значительным изменениям регистрируемых результатов абляции (производительность, размер частиц, ширина фракции), но значительно усложняло требования к рабочему сосуду и газовой магистрали. На основании вышесказанного, основной диапазон давления газа, приводящий к результатам с высокой степенью воспроизводимости, ценным в научном и академическом плане, составил 5-20 бар.

В работе в качестве основных измеряемых свойств рассматривались форма частиц, размер частиц, фазовый и химический состав материала, размер кристаллитов. Для определения формы частиц использовались методы РЭМ и

ПЭМ. Для определения размеров частиц в работе применены два метода с целью повышения достоверности получаемых данных: метод растровой электронной микроскопии и метод измерения размеров кристаллитов на основе данных рентгенофазового анализа. РЭМ позволяет оценить размер отдельных частиц/агломератов. Данные рентгенофазового анализа позволяют определить размеры кристаллитов - структур с одной кристаллической решеткой. Исследование фазового состава порошкового материала осуществлялось с целью определения фазы частиц, входящих в его состав, и исследования влияния лазерной абляции на ее изменение. Достоверное определение фазового состояния напрямую влияет на корректность измерения размеров кристаллитов. Химический состав материала был исследован при помощи энергодисперсионного рентгеновского микроанализа.

В третьей главе «ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ СУЛЬФИДА ЦИНКА ЗАДАННЫХ РАЗМЕРОВ И ИХ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ» проведено исследование влияния условий лазерного абляционного синтеза на свойства наночастиц сульфида цинка и их характеристика.

На процесс абляции оказывает влияние плотность газовой атмосферы, в которой осуществляется обработка. Изменение давления буферного газа в изолированном сосуде, где осуществляется абляционное воздействие, необходимо для исследования его влияния на динамику выброса материала в результате лазерного воздействия, фракционный и фазовый состав аблированных наночастиц. Путем изменения давления в процессе лазерной абляции можно управлять интенсивностью теплообмена аблированных частиц с объемом изолированного сосуда, тем самым регулировать скорость охлаждения потока частиц, движение фронта аблированных частиц и характеристики лазерного эрозионного факела. Лазерный эрозионный факел оказывает существенное влияние на динамику абляции материалов излучением фемто- и субпикосекундных лазерных систем, что особенно выражено при режимах обработки импульсов с высокой частотой следования. При высокой частоте следования импульсов тепловая энергия не успевает релаксировать до прихода следующего импульса, что приводит к накоплению тепла. При длительном воздействии лазерного излучения на одну область наблюдается значительный разогрев, вплоть до оплавления поверхности мишени. Наличие жидкой фазы препятствует процессу абляции, происходят процессы испарения материала. Нередко наблюдается коагуляция продуктов испарения в лазерном эрозионном факеле. Регулировать взаимодействие лазерного излучения с эрозионным факелом можно с помощью электростатического поля. Экспериментально установлено, что данный подход обеспечивает наиболее эффективное удаление продуктов абляции из зоны обработки.

Одним из доминирующих факторов, определяющих эффективность выхода частиц, является величина плотности энергии лазерного излучения, сосредоточенная в области воздействия. Для экспериментальной оценки порогового значения абляции сульфида цинка был проведен ряд экспериментов по воздействию на поверхность образца в одноимпульсном режиме.

Экспериментально установлена величина плотности энергии, соответствующая условию получения минимального количества продуктов абляции, которая равна $0,3 \text{ Дж/см}^2$. Облучение поверхности сульфида цинка с изменением положения относительно фокальной плоскости лазерного луча схематично представлено на рисунке 1, где S1, S2 и S3 - положение поверхности облучаемого образца относительно фокальной плоскости объектива.

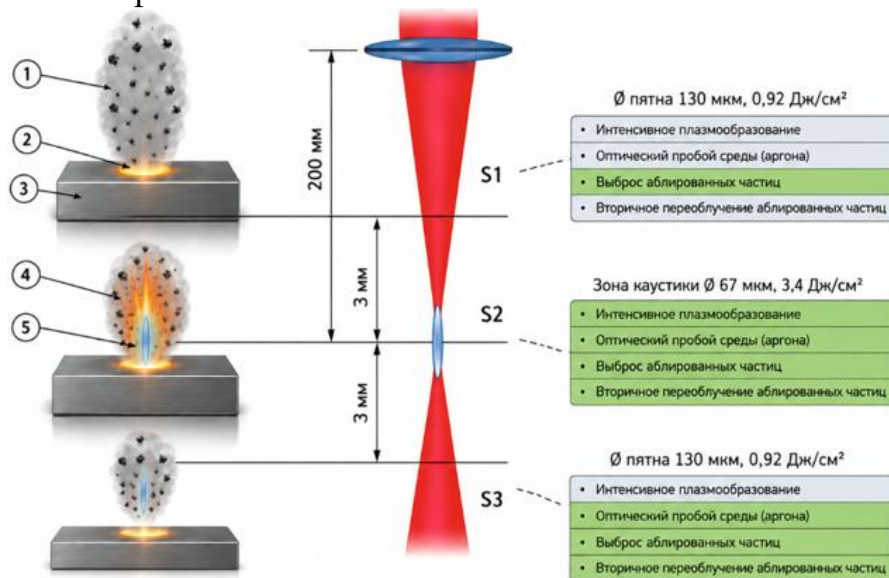


Рисунок 1 – Схема расположения поверхности облучаемого образца относительно каустики лазерного пучка.

На рисунке 1 представлена схема процессов при фемтосекундной лазерной абляции, где 1 – облако аблированных наночастиц, 2 – область воздействия лазерного луча, 3 – обрабатываемый образец поликристаллического сульфида цинка, 4 – лазерный эрозионный факел и плазменный канал при оптическом пробое аргона, 5 – плазменный канал, образованный в результате пробоя газа, находящихся в нем аблированных частиц. Серыми прямоугольниками обозначены процессы, не характерные для рассматриваемого состояния системы, зелеными - процессы, протекающие при обработке поверхности сульфида цинка ультракороткими лазерными импульсами согласно зонам обработки (S1, S2 и S3). Вынос наночастиц из области распространения лазерного луча для исключения повторного облучения было осуществлено при помощи электрофильтра. Положение плоскостей отличается расположением поверхности образца относительно фокальной плоскости объектива по оси z. Плоскость S1 подразумевает расположение поверхности обрабатываемого образца ZnS на 3 мм выше области каустики. Лазерный луч распространяется через аргон, не вызывая процессов плазмообразования и филаментации при энергиях, не превышающих лучевую стойкость среды. Достигая поверхности ZnS, плотность энергии лазерного излучения превышает порог абляции материала. Наблюдается выброс наночастиц без возникновения оптического пробоя среды и интенсивного плазмообразования, что позволяет избавиться от значительного воздействия лазерного эрозионного факела на продукты абляции.

Обработка в плоскости S2 представляет собой фокусировку на поверхность образца в области перетяжки пучка, в данной точке сосредоточена

наибольшая плотность энергии ($3,4 \text{ Дж/см}^2$). В таком положении образца наблюдается филаментация в среде аргона, возникновение оптического пробоя, выраженный эрозионный факел в зоне воздействия лазерного излучения, что в совокупности способствует снижению эффективности абляции.

В плоскости S3 область перетяжки расположена выше поверхности образца, при этом оптический пробой / плазмообразование имеют место над поверхностью образца. Негативным эффектом является снижение энергии лазерного излучения, доходящей до поверхности образца через область оптического пробоя. Происходит выраженное переоблучение при попадании аблированных наночастиц в область каустики.

Таким образом, условия обработки в области S1 являются наиболее подходящими для повышения эффективности процесса абляции, так как позволяют избежать повторного переоблучения наночастиц и теплового воздействия плазмы. При данных условиях плотность энергии лазерного излучения достигает порога абляции, при этом не достигая порога плазмообразования.

Исследование производительности абляционного воздействия от плотности энергии выполнялось на основании данных изменения массы обрабатываемого образца до и после обработки. На рисунке 2 представлена зависимость массы удаленного материала от плотности энергии лазерного излучения на поверхности образца.

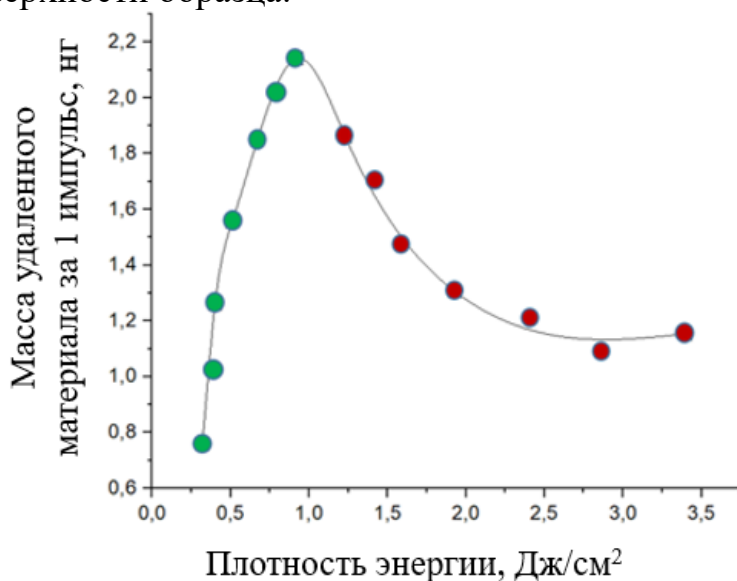


Рисунок 2 – Зависимость удаляемой массы за 1 импульс от плотности энергии лазерного излучения при абляции сульфида цинка.

На рисунке 2 стремительный рост до точки экстремума согласуется с увеличением энергии воздействия, приводящей к росту массы аблированного материала. Резкое снижение и монотонный выход на убывающее значение массы аблированного материала при увеличении энергии лазерного излучения связано с изменением доминирующего механизма взаимодействия лазерного излучения с веществом. Наблюдается значительный разогрев электронной подсистемы, который выражается в развитии плазменного канала над поверхностью образца. Как следствие разогрев электронной подсистемы приводит к перераспределению

энергии и выраженному подавлению процессов абляции материала. Наиболее эффективный экспериментально установленный режим абляции наблюдается в случае, когда фокус лазерного излучения находится в глубине образца, что соответствовало плотности энергии $0,92 \text{ Дж/см}^2$. При положении фокуса выше поверхности образца происходит оптический пробой среды, возникает плазменный факел, при этом, энергии достаточно для запуска процесса абляции материала. Наблюдается спад производительности абляции по сравнению с аналогичным значением плотности мощности при заглубленной фокальной плоскости в объем образца. Частицы, которые вылетают с поверхности, активно взаимодействуют с плазмой. В случае наличия лазерного эрозионного факела над поверхностью образца снижение производительности остается в пределах 10%. Увеличение плотности энергии приводит к значительному разогреву поверхности образца за счет лазерно-плазменного воздействия. При расположении фокальной плоскости в глубине образца, образование плазменного факела не наблюдается, что связано с недостаточностью энергии для пробоя среды, одновременно с этим, энергии хватает на процесс абляции материала. Вылетевшие в этом случае частицы свободно покидают зону обработки, не препятствуя вновь поступающему лазерному импульсу, что позволяет сохранять высокую эффективность абляции во время полного цикла обработки.

Расстояние, которое частица может пройти после того, как покинет зону воздействия, зависит от характеристик окружающей ее среды (наличие буферного газа и давление газа). Давление буферного газа оказывает доминирующее влияние на скорость охлаждения частицы (потерю энергии). При повышении давления в среде возрастает её плотность, что приводит к увеличению частоты взаимодействия аблированных частиц с атомами газа, передавая им при этом часть своей энергии. Вследствие этого, свободный пробег «вылетевших» с поверхности образца частиц также уменьшается, что приводит к возможности взаимодействия частиц между собой. В данной работе время охлаждения частиц ($t_{\text{общ}}$) рассчитано из уравнения (1):

$$t_{\text{общ}} = N \cdot t_1, \quad (1)$$

где N – количество соударений до полной потери энергии, t_1 – время на одно соударение.

На основе расчетных данных получена зависимость времени охлаждения частицы ZnS до температуры 800 К при упругих соударениях от давления буферного газа аргона, представленная на рисунке 3.

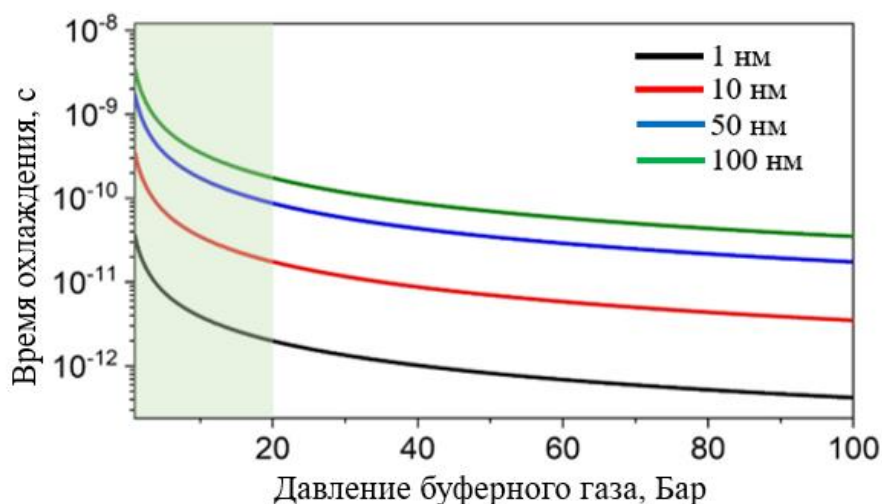


Рисунок 3 – Зависимость времени охлаждения частицы ZnS до достижения температуры 800 К при упругих соударениях от давления буферного газа аргона.

На рисунке 3 зеленая область соответствует диапазону давлений, для которых выполнены эксперименты по синтезу наночастиц. Полученный график демонстрирует зависимость времени охлаждения частиц от их размеров и давления буферного газа: чем меньше размер частицы, тем быстрее происходит ее охлаждение. Принимая во внимание скорости распространения аблированных частиц при неизменной начальной энергии, увеличение скорости охлаждения ведет к снижению способности агрегации в более крупные частицы. Сопротивление фронту расширения продуктов абляции определяет условия взаимодействия наночастиц.

На рисунке 4 представлены фотографии области воздействия во время проведения эксперимента при расположении поверхности образца непосредственно в фокальной плоскости.

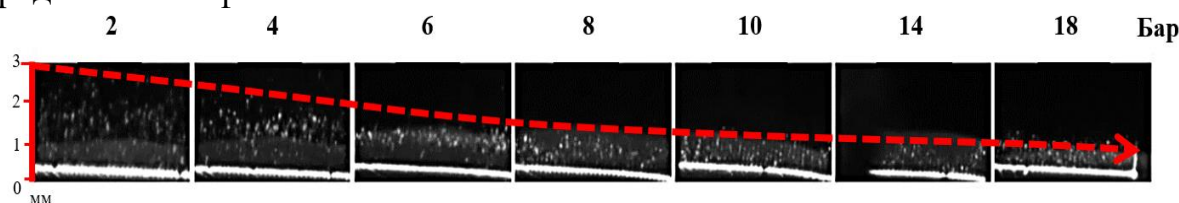


Рисунок 4 – Эволюция лазерного эрозионного факела на поверхности ZnS в фокальной плоскости при различном давлении буферного газа.

На рисунке 4 представлена эволюция лазерно-индуцированного эрозионного факела при абляции сульфида цинка в среде буферного газа давления от 2 до 18 бар. С ростом давления наблюдается сокращение протяжённости факела, что согласуется с уменьшением длины свободного пробега частиц и увеличением скорости охлаждения.

На основании данных, полученных по результатам РЭМ, исследована форма и размеры продуктов абляции, построены гистограммы распределения частиц по размеру от давления газа (рисунок 5).

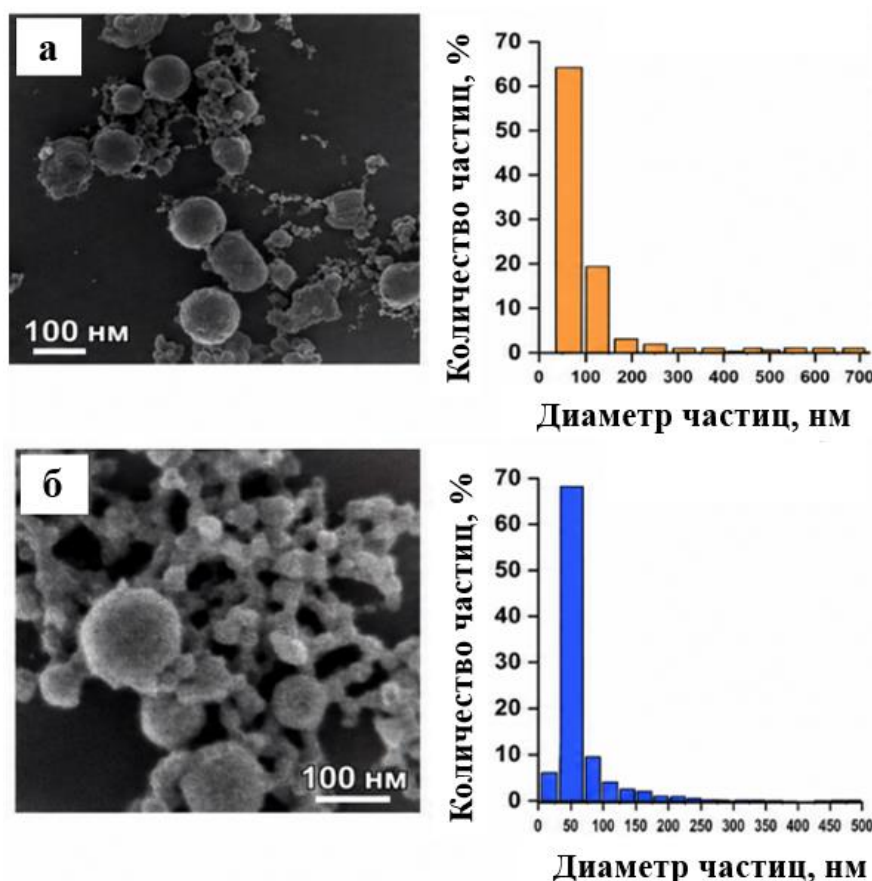


Рисунок 5 – РЭМ-изображения и гистограммы распределения по размерам наночастиц ZnS после лазерной абляции при давлении газа: (а) 5 бар, (б) 15 бар.

Форма частиц соответствует сферической, отклонение не превышает 20%, что может быть обусловлено погрешностью средства измерения. Качественный анализ на основании РЭМ позволяет говорить о наличии агломератов наночастиц, что характерно для подобных материалов [8]. Размер синтезированных наночастиц определялся на основании измерения их диаметров. По построенным гистограммам прослеживается «сужение» дисперсии частиц по размерам и сдвиг максимума в область меньших размеров с увеличением давления буферного газа. При давлении газа 5 бар среднее время охлаждения длительное, что приводит к формированию частиц со средним размером 63 нм и широким разбросом. Длительное охлаждение способствует более эффективной агрегации. При давлении газа 15 бар время охлаждения сокращается, средний размер частиц уменьшается до 43 нм, а распределение становится более узким. Расчётные зависимости времени охлаждения от размера частиц и давления буферного газа согласуются с экспериментальными данными по синтезу наночастиц сульфида цинка методом лазерной абляции, полученными в данной работе.

При давлении газа 5 бар плотность среды остаётся невысокой. Частица после стадии зародышеобразования находится в разогретом состоянии и теряет кинетическую энергию при столкновениях с атомами буферного газа и другими наночастицами ZnS. Благодаря достаточно большой длине свободного пробега

при низком давлении газа (до 5 бар), сформированная частица долгое время сохраняет потенциал к коагуляции с другими частицами, постепенно увеличиваясь в размерах, пока окончательно не потеряет энергию. Увеличение плотности газовой среды за счет повышения давления буферного газа до 15 бар оказывает влияние на уменьшение свободного пробега частиц после вылета с поверхности образца. Фронт разлета частиц становится более «сжатым», зародыши (продукты абляции) встречают на своем пути атомы газа намного чаще, что заставляет их стремительно терять энергию и остывать. За подобный временной промежуток частицы не успевают активно коагулировать и имеют потенциал к сохранению исходного размера.

В зависимости от условий синтеза частицы могут формироваться как монокристаллы с единой кристаллической решёткой, либо как поликристаллы, состоящие из множества мелких кристаллитов. Анализ фазового состояния и внутренней структуры частиц был проведен методом рентгеновской дифракции. Необходимо учитывать, что РФА предоставляет информацию относительно среднего размера частиц в объёме образца. Однако данные РЭМ не позволяют провести анализ по объемной доле. Для верификации и совокупного анализа полученных в работе данных произведен перерасчет размеров частиц, полученных на основе РЭМ, который базируется на преобразовании площади частиц в объём, что позволяет получить средний объёмный диаметр частиц. Учет объемной доли также позволяет учесть возможную поликристалличность структуры. Таким образом, по перерасчету по объемной доле диаметр частиц составил: при давлении газа 5 бар – 149 нм, 10 бар – 94 нм, 15 бар – 92 нм, 20 бар – 62 нм.

На полученных экспериментальных рентгенограммах наблюдались рефлексы плоскостей гексагональной фазы сульфида цинка (вюрцита). Присутствует небольшая доля фазы сфалерита в пробах, полученных при давлениях газа 5-15 бар. Полученные в работе данные РФА подтверждают описанную тенденцию к уменьшению среднего размера частиц, так как наблюдается уширение линий по плоскостям кристаллизации. В качестве примера на рисунке 6 представлены пики, соответствующие двум плоскостям кристаллизации (101) и (103). С увеличением давления буферного газа аргона прослеживается уширение пиков рентгеновской дифракции, что также позволяет говорить об уменьшении средних размеров частиц.

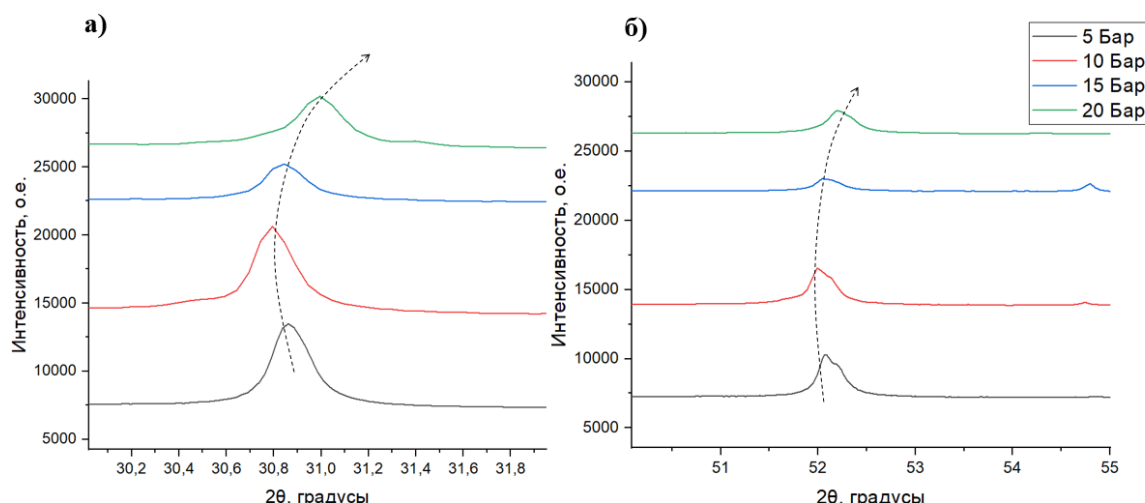


Рисунок 6 – Рентгенограмма наночастиц сульфида цинка, представлены пики, соответствующие плоскостям кристаллизации: а – (101) и б – (103).

Сдвиг пиков в область больших углов, указанный зелеными стрелками, вероятно, обусловлен возникновением сжимающих напряжений в кристаллической решетке. Аблированный образец представляет собой поликристалл с размером кристаллитов 2-500 мкм. При облучении ультракороткими лазерными импульсами в поверхностном слое материала возникают значительные термомеханические напряжения, что запускает механизм откольной абляции. Вследствие этого в пробах присутствуют твёрдые фрагменты с признаками поверхностного оплавления. Поскольку вылетевшие с поверхности осколки не нагреваются до температуры объёмного плавления, их внутренняя кристаллическая структура сохраняется, что объясняет присутствие исходной фазы сфалерита. При этом энергии недостаточно для их полной сфероидизации. Также возможно формирование фазы сфалерита в процессе рекристаллизации при лазерной абляции. В зависимости от давления газа меняется соотношение политипов вюрцита. Лазерная абляция при давлении буферного газа 5 бар способствует образованию наночастиц сульфида цинка с преобладанием политипа 8Н. При увеличении давления буферного газа доминирующим становится политип 2Н (рисунок 7).

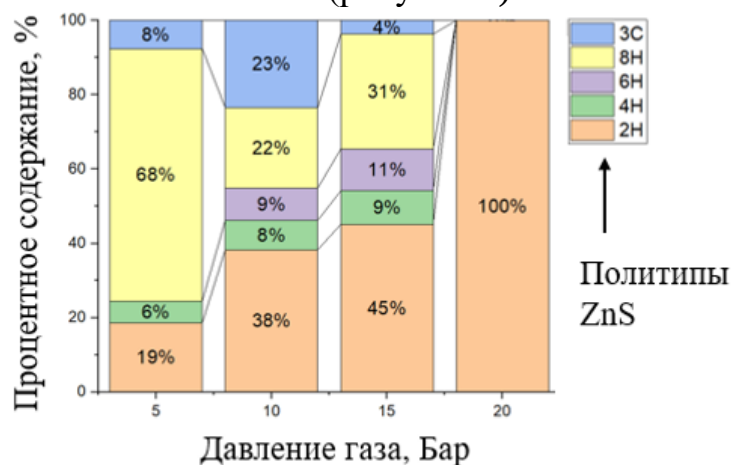


Рисунок 7 – Содержание политипов сульфида цинка в зависимости от давления буферного газа.

Можно отметить, что с увеличением давления от 5 до 15 бар происходит выраженное снижение доли поли типа 8Н (с 68% до 31%) и увеличение доли поли типа 2Н при давлении от 5 до 20 бар (с 19% до 100%). Таким образом, высокое давление способствует преобладанию 2Н поли типа, который является наиболее стабильной полиморфной модификацией при данных условиях. Доля кубической фазы (3С) остаётся низкой во всём диапазоне давлений 5-15 бар (не превышает 8%), что согласуется с её термодинамической нестабильностью в наноразмерном масштабе. Поли типы 6Н и 4Н присутствуют в количестве до 12% и не демонстрируют выраженной зависимости от давления. На рисунке 8 представлены основные механизмы, которые демонстрируют изменение фазового состояния сульфида цинка после абляции.

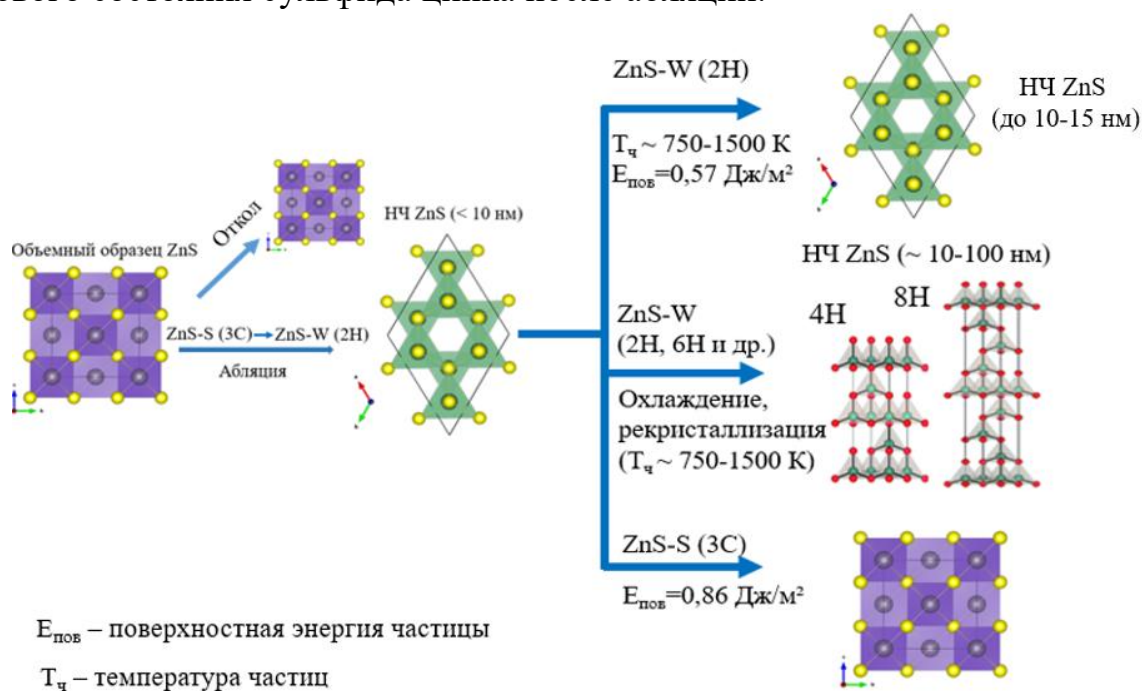


Рисунок 8 – Основные механизмы фазовых переходов после лазерной абляции ZnS.

После абляции материал в зависимости от скорости охлаждения (определяется давлением среды) может переходить в фазу вюрцита с поли типом 2Н, что наблюдается чаще при высоких давлениях (15-20 бар). Также наблюдается образование частиц вюрцита с поли типами 4Н, 6Н, 8Н (в случае увеличения размеров частиц более 10-15 нм). Можно говорить о том, что первоначально в стадии кристаллизации частицы имеют фазу вюрцита, так как их поверхностная энергия меньше, чем при кубической решетке в фазе сфалерита [9].

Проведенное исследование демонстрирует управление фазовым составом и структурой конденсированного вещества (ZnS) через кинетические параметры неравновесного синтеза: давление буферного газа и плотность энергии лазерного излучения. Полученные зависимости позволяют прогнозировать фазовое состояние на основе термодинамических (поверхностная энергия) и кинетических (время охлаждения) параметров.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлен нелинейный характер зависимости плотности энергии лазерного излучения от удаляемой массы ZnS. Абляция осуществлялась с использованием источника лазерного излучения с длиной волны 1030 нм, длительностью импульса 280 фс. При увеличении плотности энергии с порогового значения 0,3 Дж/см² в импульсе, наблюдается линейный рост с максимумом эффективности на уровне не более 0,9 Дж/см², масса удаляемого материала составляет порядка 2 нг за 1 импульс. Дальнейшее увеличение плотности энергии 1,2-3,4 Дж/см² приводит к резкому снижению выхода продуктов абляции, менее 1 нг за 1 импульс, что обусловлено доминированием процессов нагрева электронной подсистемы поверхностного слоя вещества, многофотонной ионизации, образованием плазмы.

2. Изменение давления буферного газа – аргона, в диапазоне от 5 до 20 бар при абляции ультракороткими лазерными импульсами, позволяет получать наночастицы сульфида цинка сферической формы с заданным диаметром частиц. При давлении 5 бар средний размер частиц составил 63 нм, при давлении 10 бар – 50 нм, при давлении 15 бар – 43 нм, при давлении 20 бар – 18 нм. Размеры частиц представлены по измерению диаметров, наблюдаемых на РЭМ-изображениях. По построенным гистограммам прослеживается «сужение» дисперсии частиц по размерам и сдвиг максимума в область меньших размеров с увеличением давления буферного газа. Доминирующим процессом при формировании конечного размера частиц является агломерация, что зависит от времени нахождения частицы в «разогретом состоянии» (температура частицы выше или равна температуре плавления материала).

3. Показано, что изменение давления буферного газа при лазерной абляции влияет на фазовый состав материала. Продемонстрировано изменение содержания поликристаллов в материале в зависимости от давления газа. При повышении давления средний размер кристаллитов стремится к равенству с диаметром частиц по объемной доле, что подтверждает факт уменьшения количества столкновений и приводит к меньшей коагуляции частиц. Данные РФА подтверждают проведенную количественную оценку скорости охлаждения частиц на основе метода молекулярной динамики.

4. Продемонстрировано, что при давлении 5 бар активно синтезируются поликристаллические частицы. Доминирующей фазой при этих условиях является вюрцит с политипом 8Н, средний диаметр составляет частиц по объемной доле составляет 150 нм, средний размер кристаллитов 55 нм. При давлении от 15 до 20 бар количество поликристаллических включений снижается, доминирующей фазой является вюрцит с политипом 2Н, средний размер частиц по объемной доле составляет величину порядка 60 нм, средний размер кристаллитов 45 нм.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

В журналах, входящих в перечень ВАК и приравненных к ним

А1. Тарасова М.А., Хорьков К.С., Кочуев Д.А., Иващенко А.В. Исследование явления филаментации фемтосекундного лазерного излучения // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2018 – № 8. – С. 33-40. [Tarasova M. A.,

Khorkov K. S., Kochuev D. A., Ivaschenko A. V. Study of the filamentation phenomenon of femtosecond laser radiation // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2018. – V. 45. – No. 8. – P. 246-250].

А2. Харькова А.В., Вознесенская А.А., Кочуев Д.А., Хорьков К.С. Влияние параметров лазерного воздействия на температуру обрабатываемой поверхности // Известия РАН. Серия физическая. – 2022. – № 6. – С. 864-868 [Kharkova A. V. et al. Effect of the Parameters of Laser Impact on the Temperature of a Processed Surface // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2022. – V. 86. – No. 6. – P. 726-729].

А3. Харькова А.В., Кочуев Д.А., Черников А.С. и др. Влияние скорости охлаждения на размер наночастиц сульфида цинка в процессе лазерного абляционного синтеза // Физика и техника полупроводников. – 2024. – Т. 58. – № 10. – С. 525-528. [Kharkova A. V. et al. Influence of cooling rate on the size of zinc sulphide nanoparticles during laser ablation synthesis // Semiconductors. – 2024. – V. 58. – No. 10. – P. 485-487].

А4. Харькова А.В., Кочуев Д.А., Вознесенская А.А., Хорьков К.С. Влияние положения поверхности образца относительно фокальной плоскости оптической системы на эффективность выхода наночастиц ZnS при лазерной абляции // Физика и техника полупроводников. – 2025. – Т. 59. – № 6. – С. 324-327 [Kharkova A. V. et al. Effect of the position of the sample surface relative to the focal plane of the optical system on the efficiency of the ZnS nanoparticle yield during laser ablation // Semiconductors. – 2025. – V. 59. – No. 6. – P. 301-303].

А5. Харькова А.В., Кочуев Д.А., Галкин А.Ф., Хорьков К.С. Влияние давления буферного газа на скорость охлаждения наночастиц сульфида цинка и их размеры при абляции ультракороткими лазерными импульсами // Письма в Журнал технической физики. – 2025. – Т. 51. – № 7. – С. 20-22 [Kharkova A. V. et al. Effect of buffer gas pressure on the cooling rate and size of zinc sulfide nanoparticles ablated by ultrashort laser pulses // Technical Physics Letters. – 2025. – V. 51. – No. 7 – P. 20-22].

Объекты интеллектуальной собственности:

Б1. Патент № 2688001 Российская Федерация, МПКВ22F 9/06, С22С 32/00, С22В 34/12. Способ получения титановых микросфер узкого гранулометрического состава с содержанием карбида титана: № 2017137066: заявлено 20.10.2017: опубликовано 17.05.2019 / **Иващенко А.В.** Вознесенская А.А., Кочуев Д.А., Прокошев В.Г., Хорьков К.С.; патентообладатель ВлГУ – 4 с.: ил. – Текст: непосредственный.

Б2. Свидетельство № 2023618556. Программное обеспечение для вычисления параметров смеси с максимальной плотностью упаковки частиц: № 2023617328: заявл. 19.04.2023: опубл. 26.04.2023 / **А.В. Харькова**; заявитель, патентообладатель ООО «НАНОТЕХ» – 1 с.: – Текст: непосредственный.

Б3. Свидетельство № 2022616216. Модуль переключателя полюсов узла сбора наночастиц электростатическим полем синтезированных в процессе лазерной абляции: № 2022615736: заявл. 06.04.2022: опубл. 06.04.2022 / **Харькова А.В., Кочуев Д.А., Чкалов Р.В., Вознесенская А.А.**; заявитель, патентообладатель ВлГУ – 1 с.: – Текст: непосредственный.

Б4. Свидетельство № 2022619807. Расчет скорости сублимации материалов: № 2022618891: заявл. 18.05.2022: опубл. 26.05.2022 / **Харькова А.В.**; заявитель, патентообладатель ВлГУ – 1 с.: – Текст: непосредственный.

Б5. Свидетельство № 2022611929. Программа расчета энергии сублимации металлов: № 2022618870: заявл. 15.12.2021: опубл. 04.02.2022 / **Харькова А.В.**, Кочуев Д.А.; заявитель, патентообладатель ВлГУ – 1 с.: – Текст: непосредственный.

Б6. Свидетельство № 2025696189. Программный код для моделирования гидродинамики внутри устройства типа циклон и трассировки частиц с целью их сфероидизации: № 2025695139/69: заявл. 10.12.2025: опубл. 16.12.2025 / **Харькова А.В.**, Кочуев Д.А., Вознесенская А.А.; заявитель, патентообладатель Харьков А.В. – 1 с.: – Текст: непосредственный.

Другие публикации по теме диссертации:

В1. **Харькова А.В.** Моделирование процесса воздействия лазерного излучения на нержавеющую сталь // Журнал Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 3. – С. 56-61.

В2. Voznesenskaya A., Kireev A., **Ivashchenko A.** Synthesis of Ultra-Dispersed Spherical Composite Materials // Solid State Phenomena. – 2020. – V. 299. – P. 205-209.

В3. **Ivashchenko A.**, Kochuev D., Davydov N. Formation of Coatings under the Action of Laser Radiation in Liquid Media // Solid State Phenomena. – 2020. – V. 299. – P. 743-748.

В4. Вознесенская А.А., **Иващенко А.В.**, Жданов А.В., Кочуев Д.А., Хорьков К.С. Синтез сферических гранул композиционного порошкового материала узкого гранулометрического состава для аддитивных технологий // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 3. – С. 25-29.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chevereau, M. First Ga₂Se₃ infrared transparent chalcogenide ceramics/ M. Chevereau, E. Veron, S. Brassamin et al. // Journal of the European Ceramic Society. – 2025. – С. 117823.

2. Calvez, L. Chalcogenide glasses and glass-ceramics: Transparent materials in the infrared for dual applications/ L. Calvez // Comptes Rendus. Physique. – 2017. – V. 18. – №. 5-6. – P. 314-322.

3. Cao, Z. Chalcogenide glass ceramics: a high-performing innovative infrared acousto-optic material / Z. Cao, S. X. Dai, S. Ding et al. // Journal of the European Ceramic Society. – 2021. – V. 41. – №. 14. – P. 7215-7221.

4. Durand, G.R. New insights in structural characterization of transparent ZnS ceramics hot-pressed from nanocrystalline powders synthesized by combustion method / G. R. Durand, N. Hakmeh, V. Dorcet, et al // Journal of the European Ceramic Society. – 2019. – T. 39. – №. 10. – С. 3094-3102.

5. Osipov, V.V. Features of synthesis of ZnSe ceramics from nanopowders obtained using a high-power laser / V.V. Osipov, V.V. Platonov, V.A. Shitov et al. // Journal of the European Ceramic Society. – 2025. – T. 45. – №. 3. – С. 116971.

6. Кульчицкий, Н. Современные оптоэлектронные приборы на основе селенида цинка / Н. Кульчицкий, А. Наумов, В. Семенов // Фотоника. – 2015. – №. 6. – С. 90-104.

7. Гаврищук, Е.М. Оптические элементы из сульфида цинка и селенида цинка для инфракрасной техники / Е. М. Гаврищук, Э. В. Яшина // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71. – №. 12. – С. 24-31.

8. Zhilnikova, M.I. Laser-assisted generation of elongated Au nanoparticles and analysis of their morphology under pulsed irradiation in water and CaCl_2 solutions / M.I. Zhilnikova, E.V. Barmina, G. Shafeev // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – V. 1439. – №. 1. – P. 012026.

9. Zhang, H. Molecular Dynamics Simulations, Thermodynamic Analysis, and Experimental Study of Phase Stability of Zinc Sulfide Nanoparticles / H. Zhang, F. Huang, B. Gilbert, J.F. Banfield // J. Phys. Chem. B – 2003. – V. 107. - № 47. – p.13051–13060.

Подписано в печать 13.07.2026. Формат $60 \times 84^{1/16}$.
Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ № 115.
Издательство Тверского государственного университета.
Адрес: 170100, г. Тверь, Студенческий пер. 12, корпус Б.
Тел.: (4822) 35-60-63.