

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский
федеральный университет»,
доктор экономических наук,
профессор

С.В. Зенченко

« 03 » « 09 » 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Харьковской Алёны Валерьевны на тему:
«Синтез сферических наночастиц сульфида цинка в условиях лазерной
абляции в газовой среде», представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.8. Физика конденсированного состояния

1. Актуальность работы

В настоящее время развитие твердотельных лазеров и оптических элементов инфракрасного диапазона является критически важным для решения широкого спектра задач в области медицинской диагностики, спектроскопии и оптических систем специального назначения. Перспективным направлением в этой области выступает создание активных лазерных сред на основе прозрачной поликристаллической керамики из сульфида цинка. Ключевой проблемой создания такой керамики лазерного качества является получение исходных нанокристаллических порошков, которые должны обладать заданным распределением частиц по размерам, сферической формой частиц и высокой химической чистотой. В связи с этим, всесторонние и детальные исследования, направленные на разработку технологий получения нанокристаллических порошков ZnS, предназначенных для создания «лазерной керамики» являются актуальной задачей. Для решения этой задачи требуется глубокое понимание физико-химических процессов, протекающих на всех стадиях синтеза наночастиц, механизмов нуклеации, роста и агрегации частиц.

Таким образом, диссертационная работа Харьковской А.В. посвященная исследованию влияния давления буферного газа и плотности энергии на дисперсность и фазовый состав синтезируемых методом лазерной абляции частиц несомненно является актуальной, и формирует научный задел

необходимый для разработки новых технологий получения оптической керамики лазерного качества

2. Структура и основное содержания работы

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.

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 проанализированы области применения оксидных и халькогенидных нанопорошков и методы их характеристики. Систематизированы данные о физике лазерной абляции ультракороткими импульсами в газовых средах, где ключевую роль играют плотность энергии излучения и давление буферного газа.

Исследовано влияние параметров наночастиц на компактируемость. Установлено, что текучесть смесей имеет оптимум по концентрации добавок и критически зависит от морфологии: сферическая форма обеспечивает наилучшую укладку, тогда как оскользящие частицы закономерно ухудшают текучесть и общую компактируемость порошка.

Во второй главе представлены разработанные методики проведения экспериментов для синтеза и анализа наночастиц сульфида цинка. Подробно описаны методы анализа полученных образцов для исследования их кристаллической структуры с помощью рентгенофазового анализа, растровой и просвечивающей электронной микроскопии. Химический состав материала был исследован при помощи энергодисперсионного рентгеновского микроанализа.

Третья глава посвящена результатам исследования влияния условий лазерного абляционного синтеза на свойства наночастиц сульфида цинка и их характеристики. Описаны результаты влияния условий лазерного абляционного синтеза на свойства наночастиц сульфида цинка, а именно влияние давления буферного газа на дисперсность синтезируемых частиц и влияние плотности энергии излучения на синтез наночастиц сульфида цинка. Представлено исследование размеров наночастиц при помощи растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа наночастиц сульфида цинка.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы. Основные экспериментальные результаты приводятся автором в третьей главе диссертации.

Среди основных научных результатов хотелось бы отметить следующие:

1. Формирование наночастиц при лазерной абляции базируется на процессах нуклеации и роста в стремительно остывающем плазменном факеле. Механизм проходит стадии гомогенного зарождения, конденсации и последующего роста (коалесценции и коагуляции). В условиях пониженного давления буферного газа определяющими становятся механизмы агрегации. Увеличение давления повышает плотность среды, что увеличивает частоту соударений между частицами, ускоряя диссипацию их кинетической энергии. Как следствие, характерное время синтеза конечных наночастиц сокращается.

2. Фазовый состав синтезируемого сульфида цинка связан со скоростью охлаждения частиц. В режиме высоких давлений (0.5-2.0 МПа) реализуется интенсивное охлаждение, которое благоприятствует формированию гексагональной фазы вюрцита (политип 2Н) со средним размером частиц менее 20 нм. Снижение давления буферного газа ниже 1.5 МПа замедляет процесс охлаждения, что ведет к укрупнению частиц и закономерному уменьшению доли 2Н-политипа в материале.

3. Экспериментально установлено, что при низком давлении (0.5 МПа) преобладает синтез поликристаллических частиц. Доминирующей фазой в этих условиях выступает вюрцит с политипом 8Н. Переход в область высоких давлений (0.5-2.0 МПа) подавляет поликристалличность: доминирующей становится фаза вюрцита 2Н.

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.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

На основании большого объема проведенных экспериментальных исследований и их анализа автором получен ряд новых результатов имеющих практическую значимость, среди которых особого внимания заслуживают следующие:

1. Показано, что при лазерной абляции увеличение давления буферного газа от 5 Бар (0.5 МПа) до 20 Бар (2.0 МПа) способствует уменьшению среднего размера частиц сульфида цинка на фоне увеличения степени гексагональности.

2. Установлена нелинейная зависимость эффективности абляции от плотности энергии лазерного излучения. Показано, что при плотности энергии, превышающей режим эффективной абляции (0,9 Дж/см²), дальнейшее возрастание энергии приводит к разогреву электронной

подсистемы, что способствует развитию интенсивного лазерно-индуцированного плазмообразования. Дальнейший процесс характеризуется лазерно-плазменным воздействием, с доминированием теплового гидродинамического воздействия на обрабатываемую поверхность.

3. Научная значимость полученных результатов

Совокупность экспериментальных данных, полученных в ходе исследования, формируют основу для углублённого понимания механизмов управляемого синтеза наноматериалов. 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 продуктов абляции.

4. Степень обоснованности и достоверности научных положений

Результаты работы прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях по тематике исследования. 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.

Работа написана грамотным научным языком, аккуратно оформлена. Особенно хотелось бы отметить высокое качество подготовки графического материала. Данные представлены в логической последовательности, стиль изложения и оформление соответствуют уровню требований, предъявляемых к кандидатским диссертациям.

5. Основные вопросы и замечания по содержанию диссертации

1. На ст. 110 отмечено, что «Средний диаметр частиц, полученных при давлении буферного газа 5 бар составлял 63 нм, в то время как диаметр частиц, синтезированных при давлении 20 бар снизился до 18 нм». При этом, на ст. 121. в таблице №5. приведены величины «среднего диаметра», которые с повышением давления уменьшаются со 162 нм до 62 нм. Требуется пояснение, чем обусловлено такое различие в измеренных величинах «среднего диаметра».

2. На странице 117, автор делает предположение, что появление в порошке ZnS фракции сфалерита связано с откольной абляцией и образованием осколков. Однако при этом хотелось бы получить более подробное объяснение, как и почему образование осколков при лазерной абляции зависит от давления буферного газа в реакторе.

3. Хотелось бы получить представление о влиянии условий лазерной абляции на отклонение (если такое имеет место быть) в соотношении цинка и

серы в синтезированных порошках ZnS. Это важно, так как избыток цинка или серы может приводить к появлению в объеме керамики включений, которые будут оказывать негативное влияние на оптические свойства.

4. В п.п. 1.3. автор обращает внимание на проблему получения плотных компактов, которую предлагается решать путем синтеза порошков с заданными гранулометрическими характеристиками методом лазерной абляции. Однако в последующих разделах вопрос компактирования полученных в работе порошков не рассматривается. Кроме того, не уточняется, в какой форме – в виде шликера или сухого порошка – планируется использовать синтезированный материал, что является важным с точки зрения выбора оптимальной технологии формования и спекания керамики.

5. Работа содержит ряд неточностей и некорректных выражений. В частности, на с. 65 рис. 21, отсутствует пояснение режимов получения соответствующих проб. Есть пересортица в единицах измерения давления (Ат, бар, Бар, Па), следовало бы использовать систему СИ. Термины «средний диаметр частицы» и «средний размер частицы» не раскрыты, что создает путаницу при восприятии материала.

Представленные замечания не снижают качества диссертации. Диссертационная работа Харьковской А.В. представляет собой теоретическое и экспериментальное исследование, проведенное на высоком научном уровне. Работа обладает значительной научной и практической значимостью.

Заключение

Диссертационная работа Харьковской Алёны Валерьевны на тему «Синтез сферических наночастиц сульфида цинка в условиях лазерной абляции в газовой среде» по актуальности поставленных задач, научной новизне, объему, уровню опубликованных работ, практической значимости, достоверности полученных результатов и степени обоснованности выводов соответствует паспорту специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния по физико-математическим наукам по пунктам: 4. Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ; 6. Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами; и отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемых к кандидатским диссертациям в соответствии с п.п. 9-14 «Положения о присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 № 842), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа была представлена автором и обсуждена на научном семинаре научно-лабораторного комплекса чистых зон физико-технического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» 3 сентября 2026 г. (протокол № 1). По результатам обсуждения работа была рекомендована к защите.

Составители отзыва:

Директор научно-образовательного центра Фотовольтаики и нанотехнологии, Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет», доктор технических наук Сысоев Игорь Александрович

«03» сентября 2026 г

Заведующий научно-исследовательской лаборатории технологии перспективных материалов и лазерных сред, научно-лабораторного комплекса чистых зон физико-технического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет», кандидат химических наук Тарала Виталий Алексеевич

«03» сентября 2026 г

Сведения об организации:

Полное наименование: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет».

Сокращенной наименование: Северо-Кавказский федеральный университет (СКФУ)

Адрес: 355017, Ставропольский край, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1..
Тел.: 8(865-2) 95-68-08. E-mail: info@ncfu.ru