

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу

Гавашели Юлии Олеговны «Теплофизические свойства хлорида натрия в поле интенсивного лазерного излучения», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертационная работа Гавашели Ю.О. является примером исследований в интенсивно развивающейся области теплофизики - физике высоких плотностей энергии, с которой тесно связано изучение явлений и процессов при интенсивном лазерном воздействии на материалы.

Представленной работой диссертант защищает результаты изучения термомеханической лазерной абляции хлорида натрия. Исследование с единых позиций этого соединения при лазерной абляции с использованием фазовых диаграмм и фазовых траекторий в условиях высокоинтенсивного облучения является необходимым для понимания происходящих при лазерной абляции процессов.

Учитывая важность поставленной задачи и потребность в такого рода информации, избранная тема диссертации представляется актуальной и, несомненно, имеющей практический интерес.

Диссертация включает введение, четыре главы, заключение и список литературы. Построение диссертации представляется логичным, а ее структурирование по вопросам обсуждения экспериментальных результатов и последующего анализа протекающих процессов на языке фазовых диаграмм вполне оправдано.

Далее рассмотрим наиболее важные результаты диссертанта.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, раскрывается цель работы, формулируется научная новизна, отмечается практическая значимость полученных результатов, определяются основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации приводится обзор по исследованиям в области тепловых процессов, лучевого разрушения и термомеханической абляции, возникающих при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с хлористым натрием. Большое внимание уделено фазовым диаграммам хлорида натрия и фазовым траекториям различных процессов в этом соединении, как важнейшему способу изучения материалов в условиях экстремально высоких давлений и температур. По итогам главы определены нерешенные вопросы по изучаемой теме, а также сформулированы задачи диссертационного исследования.

**Вторая глава** работы посвящена описанию экспериментальной установки, а также подходов и методов, используемых в работе.

Эксперименты по исследованию оптического разрушения кристалла хлорида натрия импульсами лазерного излучения на длине волны 800 нм длительностью  $40 \pm 2$  фс были выполнены на фемтосекундной титан-сапфировой лазерной установке в ЦКП уникальным научным оборудованием ОИВТ РАН. *p*- поляризованное излучение фокусировалось на грань (100) поверхности кристалла хлорида натрия (мишени) под углом  $60^\circ$ . Эксперименты были проведены для интенсивности излучения в импульсе от  $25 \text{ ТВт/см}^2$  до  $90 \text{ ТВт/см}^2$  и напряженности электрического поля от  $95 \text{ МВ/см}$  до  $182 \text{ МВ/см}$ , соответственно.

При исследованиях кратера на поверхности кристалла автор использует данные атомно-силовой микроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Представлены также методы и результаты анализа зависимости порога лучевого разрушения от длительности лазерного импульса.

В **третьей главе** рассмотрены экспериментально определенные пороги, а также характеристики термомеханической абляции, которая наблюдается при воздействии на хлорид натрия фемтосекундных лазерных импульсов.

В первом разделе этой главы с использованием фемтосекундной микроскопии определены размеры области лучевого разрушения на поверхности хлорида натрия. Схема эксперимента давала возможность фиксировать вид поверхности кристалла до лазерного воздействия, в момент воздействия (с контролируемой задержкой по времени) и после воздействия. Было обнаружено, что значения на графике зависимости размера пятна повреждения от энергии могут быть аппроксимированы прямой. По итогам исследований, представленных в этом разделе, найдены пороги термомеханической абляции поверхности грани (100) хлорида натрия лазерными импульсами длительностью  $40 \pm 2$  фс. Показано, что измеренная критическая напряженность электрического поля, равная  $94 \pm 2$  МВ/см, хорошо согласуется с предсказанным значением.

Во втором разделе данной главы установлено, что для хлорида натрия зависимость порога лучевого разрушения от длительности лазерного импульса в логарифмическом масштабе может быть аппроксимирована совокупностью прямых с разным углом наклона. Каждый линейный участок на такой зависимости может давать информацию о преобладающем механизме разрушения для выбранной длительности импульса. Используемый подход позволяет вычислять пороги термомеханической абляции, которая становится преобладающим механизмом разрушения при длительности лазерного импульса менее 30 пс. Сделано предположение о порогах лучевого разрушения хлорида натрия лазерными импульсами с длительностью 20 фс.

В третьем разделе этой главы представлены результаты изучения геометрических параметров кратера термомеханической абляции. Область повреждения изучалась с помощью атомно-силовой микроскопии: сканировался профиль кратера, и определялась его глубина. Определена зависимость глубины кратера на поверхности хлорида натрия от энергии импульсов лазерного излучения длительностью 40 фс. Установлено, что для импульса с плотностью энергии  $3,5$  Дж/см<sup>2</sup> глубина кратера на поверхности хлорида натрия значительно больше, чем у металлов.

В четвертом разделе данной главы проведено исследование поверхности хлорида натрия в кратере и вне кратера с использованием рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Найдено, что высокоинтенсивное лазерное облучение влияет на молекулярный состав поверхности хлорида натрия, на которой, по данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, обнаружен оксид натрия и наблюдается снижение взаимодействия натрия с другими компонентами верхних слоев ионного соединения.

В **четвертой главе** с использованием фазовой диаграммы рассмотрены тепловые явления, структурные и фазовые переходы, которые имеют место в объеме и на поверхности хлорида натрия при высоких давлениях и температурах.

В первом разделе этой главы изучена базовая фазовая диаграмма хлорида натрия в координатах плотность–температура. Для определения критических параметров исследуемого соединения использовался расчет по методу Лидерсена. Сделано предположение, что значения данных критических параметров хлорида натрия находятся в той же области, что и критические параметры иных соединений. Исходя из проведенного анализа, построена базовая фазовая диаграмма хлорида натрия в широком интервале температур.

Во втором разделе данной главы изучены дополнения на фазовой диаграмме, возникающие в случае значительного статического и динамического сжатия хлорида натрия. Автором рассмотрена область структурного фазового полиморфного В1–В2 перехода и

фазового перехода диэлектрик–металл. Установлена плотность соединения для изученных переходов. Оба перехода отражены на базовой фазовой диаграмме.

В третьем разделе этой главы изучены тепловые явления и фазовые переходы, которые возникают в объеме и на поверхности хлорида натрия при высоких температурах. Рассмотрены фазовые траектории различных тепловых процессов на фазовой диаграмме этого ионного соединения. Показана возможность изучения тепловых процессов, инициированные фемтосекундными лазерными импульсами с использованием фазовых траекторий.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить, что автором выполнен значительный объем сложного и трудоемкого лазерного эксперимента, им использован обширный арсенал классических и современных методов диагностики вещества при высоких концентрациях энергии. Получен экспериментальный материал, обладающий неоспоримой новизной. Достоверность выполненных исследований не вызывает сомнений.

Несомненную значимость для науки и практики имеют следующие результаты диссертации:

- впервые измерены пороги оптического повреждения (термомеханической абляции) поверхности кристалла хлорида натрия лазерными импульсами длительностью 40 фс,
- установлены параметры кратера термомеханической абляции на поверхности хлорида натрия и выявлена зависимость глубины кратера от энергии импульсов лазерного излучения;
- обнаружено, что высокоинтенсивное лазерное облучение влияет на молекулярный состав поверхности хлорида натрия, а также снижает взаимодействие натрия с другими компонентами верхних слоев щелочно-галлоидного кристалла;
- впервые построена высокотемпературная фазовая диаграмма хлорида натрия в широком диапазоне температур и показано, что фазовая траектория на диаграмме позволяет выявить особенности быстропротекающих теплофизических процессов, индуцированных воздействием на ионные соединения фемтосекундных лазерных импульсов.

Также установлен характер связи между пробойной напряженностью электрического поля и длительностью лазерного импульса в широком диапазоне, включая область, в которой термомеханическая абляция становится преобладающим механизмом разрушения поверхности кристалла. Это является решением поставленной задачи, имеющей существенное значение для соответствующей отрасли знаний (Теплофизика и теплотехника), и свидетельствует о выполнении соискателем критериев, установленных **пунктом 9 Положения о порядке присуждения учёных степеней.**

Одним из главных итогов работы является разработка рекомендаций по оценке свойств щелочно-галлоидных кристаллов при наличии теплофизических процессов, протекающих в экстремальных условиях, что позволяет указать конкретные пути использования результатов диссертации.

Предложенная широкодиапазонная (высокотемпературная) фазовая диаграмма может быть использована на практике при построении кривых фазового равновесия диэлектрических материалов (в том числе, в области высоких температур и давлений), изучения особенностей быстропротекающих теплофизических процессов, индуцированных воздействием на ионные соединения фемтосекундных лазерных импульсов.

Однако к работе имеются следующие замечания:

1. В таблице 3 на стр. 47, без достаточного объяснения, приведены данные по иодиду калия, хотя диссертационная работа посвящена исключительно хлориду натрия.
2. В подписи к рисунку 25 на стр. 49 не расшифрованы обозначения на графике.

3. В тексте диссертации нет объяснения: почему кратер, показанный на рисунке 29 стр. 56, имеет симметричную форму, хотя излучение падает на поверхность хлорида натрия под углом  $60^\circ$ ?

4. В тексте главы 4 стр. 103 мало внимания уделено обсуждению электронных состояний (или электронных ансамблей), возникающих в материале под действием фемтосекундных лазерных импульсов.

Однако приведенные замечания не умаляют высокой оценки, которую заслуживает данная работа.

Следует отметить, что диссертационная работа Гавашели Ю.О., выполненная на хорошем экспериментальном и теоретическом уровне, является законченным научным исследованием. Тщательность работы и высокий профессионализм автора позволяют сделать вывод о высокой надежности полученных им результатов. Выводы диссертационной работы сделаны квалифицированно, и их обоснованность не вызывает сомнений. Основные положения диссертации являются в высокой степени достоверными.

Качество оформления диссертации, несмотря на отдельные замечания, высокое.

Основные результаты диссертации в полной мере опубликованы соискателем в научных изданиях.

Автореферат диссертации правильно и полно отражает ее содержание, основные идеи и выводы.

Учитывая актуальность и практическую ценность, хороший методический уровень работы, новизну и достоверность полученных результатов, следует отметить, что диссертационная работа Гавашели Юлии Олеговны «Теплофизические свойства хлорида натрия в поле интенсивного лазерного излучения», несомненно отвечает всем квалификационным требованиям Высшего аттестационного комитета Российской Федерации, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Доктор физико-математических наук, профессор  
кафедры инженерных дисциплин и управления  
Новороссийского политехнического института  
(филиала) КубГТУ



Шеманин Валерий Геннадьевич

Подпись В.Г. Шеманина заверяю.

Ученый секретарь Ученого совета НИИ

Вишневецкая В.В.

Адрес: 353900, Новороссийск, ул. К. Маркса, 20

Тел. 8(8617)641814

E-mail: vshemanin@mail.ru

«23» октября 2019 г.