

06.4;09

Изучение оптического повреждения хлорида натрия ультракороткими лазерными импульсами

© Ю.О. Гавашели¹, П.С. Комаров², С.И. Ашитков²,
А.П. Савинцев¹

¹ Кабардино-Балкарский государственный университет, Нальчик

² Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

E-mail: savinal@mail.ru

Поступило в Редакцию 27 января 2016 г.

Найдены пороги оптического повреждения поверхности хлорида натрия лазерными импульсами длительностью порядка 40 fs. Эксперименты проводились на тераваттной титан-сапфировой лазерной установке. *P*-поляризованное лазерное излучение на длине волны 800 nm падало на поверхность образцов под углом 60°. Оптическое повреждение поверхности наблюдалось, когда критическая напряженность электрического поля достигала 94 MV/cm.

Ультракороткая длительность лазерного импульса позволяет выйти на уровень тераваттных мощностей и активно развивать физику сильных и сверхсильных световых полей, тесно связанную с физикой экстремальных состояний вещества.

В работе [1] были изучены критические напряженности электрического поля (E_{cr}) и поверхностные плотности мощности порога оптического повреждения поверхности (I_{cr}) хлорида натрия, облучаемого лазерными импульсами длительностью 80 fs. Было получено, что для таких лазерных импульсов $E_{cr} = 7.6 \cdot 10^7$ V/cm, а $I_{cr} = 1.6 \cdot 10^{13}$ W/cm².

В рамках продолжения исследований поведения ионных кристаллов в поле ультракоротких лазерных импульсов была выполнена работа, целью которой являлось изучение порогов оптического повреждения поверхности хлорида натрия лазерными импульсами меньшей длительности, чем в предшествующих работах [1,2].

Эксперименты проводились на тераваттной титан-сапфировой фемтосекундной лазерной системе, входящей в состав Центра коллективного пользования уникальным научным оборудованием „Лазерный фем-

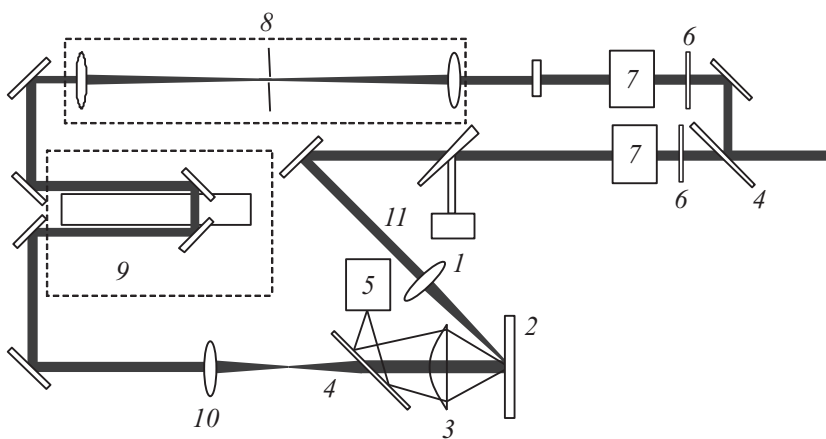
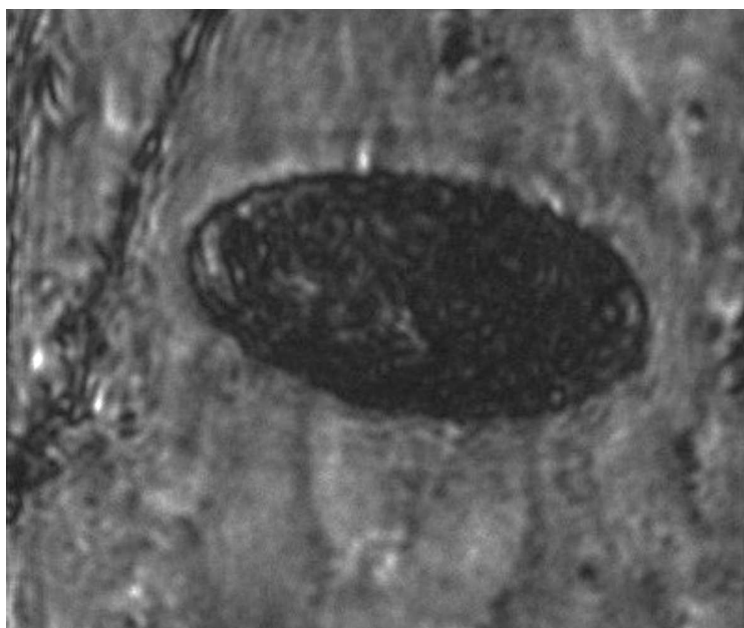


Рис. 1. Оптическая схема измерений: 1 — фокусирующая линза, 2 — мишень, 3 — микрообъектив, 4 — делитель пучка, 5 — ПЗС-камера, 6 — полуволновая пластина $\lambda/2$; 7 — призма Глана, 8 — пространственный фильтр, 9 — линия задержки, 10 — линза для изменения расходимости зондирующего импульса, 11 — фотоприемник.

тосекундный комплекс“ Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Лазерные импульсы, генерируемые титан-сапфировой системой на длине волны 800 nm длительностью $40 \pm 2\text{ fs}$, фокусировались на поверхность кристалла под углом 60° линзой с фокусным расстоянием 20 cm (рис. 1). Длительность импульсов (τ) измерялась автокоррелятором Coherent в схеме с генерацией неколлинеарной второй гармоники. Пространственное распределение плотности энергии в фокальном пятне соответствовало гауссову. Исследовалось воздействие на поверхность образцов p -поляризованного лазерного излучения. Энергия импульса плавно варьировалась с помощью поляризационного ослабителя, состоящего из фазовой пластины $\lambda/2$ и поляризатора, и контролировалась с помощью фотоприемника. Калибровка фотоприемника осуществлялась с помощью калориметра Sigma (Coherent), который при калибровке вводился в пучок непосредственно перед мишенью. Плотность мощности в проведенных экспериментах достигала 90 TW/cm^2 .



20 μm

Рис. 2. Область оптического повреждения на поверхности хлорида натрия.

Для фиксации повреждения поверхности мишени после лазерного воздействия применялась схема фемтосекундной микроскопии [3], которая позволяла регистрировать изображения поверхности до облучения, в момент облучения с регулируемой временной задержкой и после облучения.

Исследуемые образцы устанавливались на управляемый с компьютера трехкоординатный микроманипулятор, осуществляющий перемещение образца по трем взаимно перпендикулярным направлениям XYZ с шагом $1.25 \mu\text{m}$. Перемещением вдоль координаты Z осуществлялось позиционирование образца в предметной плоскости микрообъектива системы визуализации (с числовой апертурой 0.2), с помощью которой увеличенное изображение поверхности мишени переносилось на матрицу ПЗС-камеры.

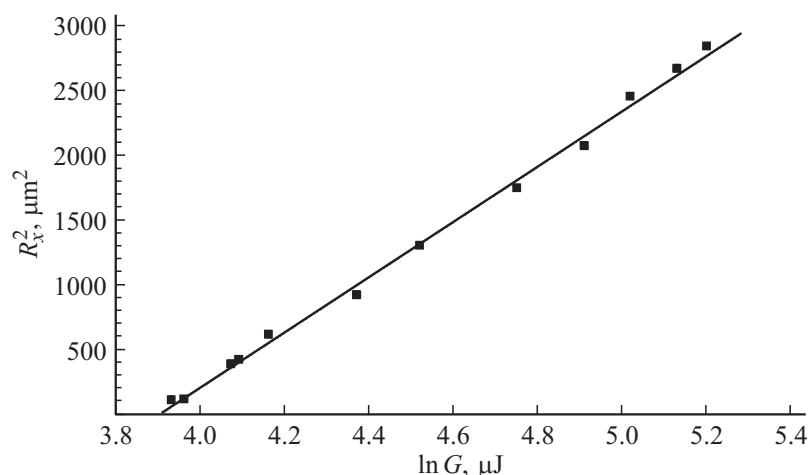


Рис. 3. Зависимость размера области оптического повреждения поверхности хлорида натрия от энергии лазерного импульса: точки — экспериментальные данные; линия — линейная аппроксимация.

Запись оптических изображений осуществлялась ПЗС-камерой SensiCam QE (PCO CCD Imaging) с охлаждаемой матрицей, числом пикселей 1375×1375 px и разрядностью 12 bit. С помощью программы обработки изображения определялись геометрические размеры R_x и R_y (размеры главных полуосей) пятен повреждений, которые имели форму эллипса вследствие наклонного падения излучения на мишень (рис. 2). Размеры пятен сопоставлялись с энергией лазерного импульса G , вызвавшего повреждение поверхности. Далее строился график зависимости размера пятна от G для нахождения пороговой энергии, когда размеры пятна лучевого повреждения обращаются в нуль (рис. 3) [3,4]. Линейная аппроксимация полученных экспериментальных данных в координатах R_x^2 от $\ln G$ на приведенном графике подтверждает корректность проведенных измерений для пучка с гауссовым пространственным распределением.

По результатам аппроксимации (рис. 3) была определена энергия импульса, соответствующая порогу повреждения поверхности ($49 \mu\text{J}$). Учитывая размеры лазерного пучка $R_{ox} = 29 \mu\text{m}$ и $R_{oy} = 56 \mu\text{m}$ по уровню e^{-1} , найдено, что плотность энергии порога оптического повре-

ждения поверхности хлорида натрия лазерными импульсами длительностью 40 ± 2 fs составляет 0.97 J/cm^2 . Это в пересчете дает значения $I_{cr} = (2.4 \pm 0.1) \cdot 10^{13} \text{ W/cm}^2$ и $E_{cr} = (9.4 \pm 0.2) \cdot 10^7 \text{ V/cm}$.

Ранее в [5,6] указывалось, что для $\tau = 40$ fs следует ожидать $E_{cr} = 100 \pm 5 \text{ MV/cm}$. Проведенные эксперименты показали хорошее согласие с предсказанными величинами.

Для хлорида натрия в работе [2] приведены значения E_{cr} в интервале 10 ns–80 fs. Наши результаты дали новую опорную точку на зависимости критической напряженности электрического поля от длительности импульса в фемтосекундном диапазоне τ .

Величина I_{cr} позволяет оценить нижнее значение давлений, возникающих при абляции (одного из быстропротекающих фазовых переходов, рассматриваемых на высокотемпературной фазовой диаграмме хлорида натрия [2,5,7,8]).

В отличие от процесса испарения, характерного при воздействии на материалы импульсов миллисекундной, микросекундной и наносекундной длительности, в случае фемтосекундных импульсов основным механизмом повреждения поверхности является термомеханическая абляция, приводящая к удалению поверхностного слоя в результате возникновения в веществе мощных растягивающих напряжений. Нагретый в результате многофотонного поглощения при фемтосекундном воздействии поверхностный слой прозрачного диэлектрика начинает деформироваться и разрушаться [9,10].

Таким образом, в работе был экспериментально определен порог оптического повреждения поверхности хлорида натрия лазерными импульсами длительностью порядка 40 fs. Получено хорошее согласие с ранее предсказанными значениями порога.

Работа поддержана в рамках базовой части госзадания Министерства образования и науки РФ КБГУ на 2014–2016 годы (проект 2014/54-2228).

Список литературы

- [1] Савинцев А.П. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 3. С. 66–69.
- [2] Savintsev A.P., Gavasheli Y.O. // J. Physics: Conference Series. 2015. V. 653. P. 012 011.
- [3] Агранат М.Б., Анисимов С.И., Ашитков С.И., Овчинников А.В., Кондратенко П.С., Ситников Д.С., Фортвов В.Е. // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 83. № 11. С. 592–595.

- [4] *Liu J.M.* // Opt. Lett. 1982. V. 7. Iss. 5. P. 196–198.
- [5] *Савиццев А.П., Гавашели Ю.О.* // Доклады РАН. 2013. Т. 452. № 4. С. 379–381.
- [6] *Савиццев А.П.* // Известия КБГУ. 2015. Т. 5. № 4. С. 95–96.
- [7] *Савиццев А.П., Гавашели Ю.О.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 21. С. 82–86.
- [8] *Савиццев А.П., Гавашели Ю.О.* // Доклады РАН. 2014. Т. 458. № 2. С. 153–154.
- [9] *Анисимов С.И., Лукьянчук Б.С.* // УФН. 2002. Т. 172. № 3. С. 301–333.
- [10] *Stuart B.C., Feit M.D., Herman S., Rubenchik A.M., Shore V.W., Perry M.D.* // Phys. Rev. B. 1996. V. 53. N 4. P. 1749–1761.