

УДК 536.37, 536.331

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ АБЛЯЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Е. Ю. Локтионов¹, А. В. Овчинников², Ю. Ю. Протасов¹, Д. С. Ситников²

Исследованы оптико-газодинамические процессы, происходящие при воздействии ультракоротких импульсов лазерного излучения ($\tau_{0.5} \sim 45 - 70$ фс; $\lambda_{I,II,III} = 266, 400, 800$ нм, $E/S \sim 0.1 - 40$ Дж/см² при $r_0 \sim 20$ мкм) на полимерные мишени ((CH₂O)_n, (C₂F₄)_n) при нормальных условиях и в вакууме ($p \sim 10^{-2}$ Па). Методами интерференционной микроскопии, эмиссионной спектроскопии и тенеграфии изучены динамика массового расхода с поверхности мишеней ($m' \sim 10^{-5} - 10^{-4}$ г/Дж), определены спектрально-энергетические пороги лазерной абляции, распределение концентрации электронов ($n_e \sim 10^{14} - 10^{18}$ см⁻³), среднemasсовая скорость потока вещества с поверхности мишени ($\sim 10^3$ м/с), химический состав и средняя температура в приповерхностном плазменном образовании ($T \sim 5000$ К).

Ключевые слова: лазерная абляция, фемтосекундные лазерные импульсы, полимерные материалы.

Фемтосекундная лазерная абляция полимеров находит широкое применение в науке и технике, так как позволяет тонко дозировать количество удаляемого с облучаемой поверхности материала при минимальной зоне термического воздействия. Из-за высокой плотности мощности излучения изменяется механизм поглощения, открывая дополнительные возможности лазерной обработки прозрачных материалов ([1], табл. 1). Для адекватного технологического применения лазерной абляции необходимы сведения о

¹ Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5; e-mail: stcpe@bmstu.ru.

² Объединенный институт высоких температур РАН, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13.

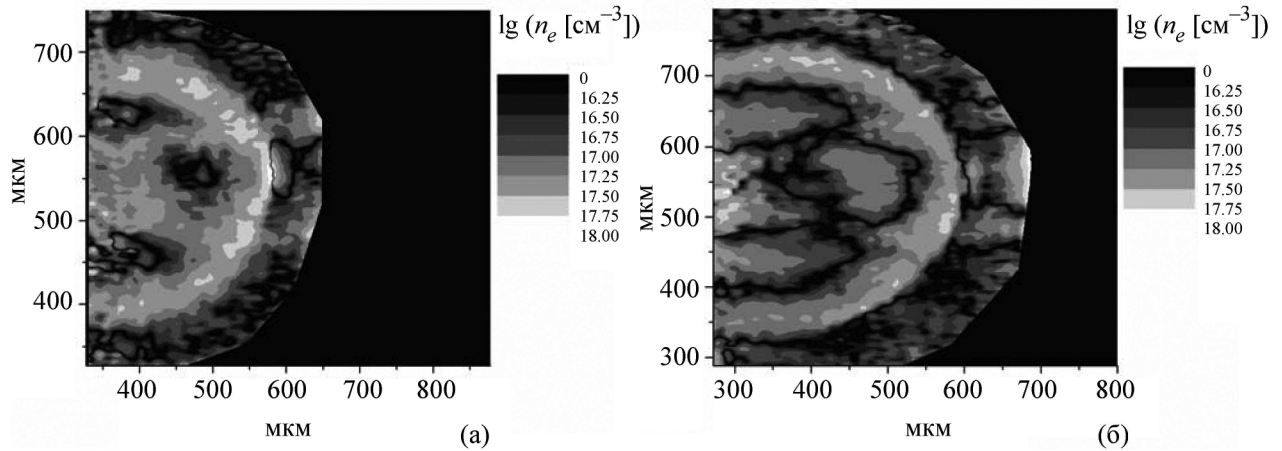


Рис. 1: Распределение концентрации электронов в ППО оптического разряда на $(\text{CH}_2\text{O})_n$ -мишени в атмосферных условиях ($\lambda = 800$ нм, $F \sim 40$ Дж/см²). Задержка после импульса: (а) $\Delta\tau \sim 42$ нс, (б) $\Delta\tau \sim 75$ нс.

процессах, происходящих как на облучаемой поверхности, так и в газовой-плазменном потоке удаленного вещества.

Т а б л и ц а 1

Линейный и эффективный (при фемтосекундном лазерном воздействии) коэффициенты поглощения пленки $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$ толщиной 5.7 мкм

λ , нм	α_{lin} , см ⁻¹	α_{eff} , см ⁻¹
266	2465	7479
400	1032	4150
800	385	3240

Процессы на поверхности и в приповерхностной зоне полимерных $((\text{CH}_2\text{O})_n$, $(\text{C}_2\text{F}_4)_n$) мишеней, облучаемых фемтосекундными ($\tau_{0.5} \sim 45\text{--}70$ фс) лазерными импульсами в УФ-БИК диапазоне ($\lambda_{I,II,III} = 266, 400, 800$ нм), исследовались при помощи интерферометрического комплекса, состоящего из интерферометров Майкельсона и Маха-Цендера [2]. Наблюдение приповерхностного плазменного образования (ППО), возникающего в результате интенсивного лазерного воздействия, в двух плоскостях позволило наиболее полно исследовать динамику формирования кратера, так как были определены оптические характеристики ППО, вносящего искажения в картину, полу-

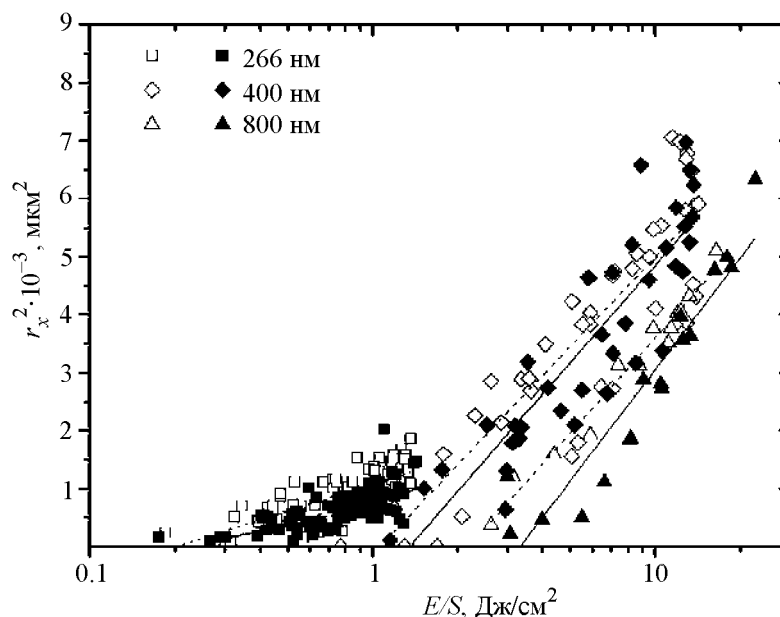


Рис. 2: Зависимость квадрата радиуса кратера на поверхности $(C_2F_4)_n$ -мишени от плотности энергии и длины волны излучения (затемненные символы и непрерывные линии – атмосферные условия, пустые символы и штриховые линии – вакуум).

чаемую в плече интерференционного микроскопа. В качестве мишеней были использованы микротонные срезы массивных образцов полимеров толщиной порядка глубины проникновения излучения (5–7 мкм), а не пленки, осажденные из растворов. Облучение происходило как в атмосферных условиях, так и в вакууме ($p \sim 10^{-2}$ Па) с плотностями энергии 0.1–40 Дж/см² при радиусе фокального пятна $r_0 \sim 20$ мкм.

Т а б л и ц а 2

Пороги абляции полимеров при различных длинах волн и длительностях импульсов (в числителе – атмосфера, в знаменателе – вакуум), Дж/см²

Мишени	$\tau_{0.5} \sim 60$ фс			$\tau_{0.5} \sim 27$ пс	
	$\lambda = 266$ нм	$\lambda = 400$ нм	$\lambda = 800$ нм	$\lambda = 532$ нм	$\lambda = 1064$ нм
$(C_2F_4)_n$	0.25	1.35	3.34	–	0.55
	0.23	1.15	2.1	–	–
$(CH_2O)_n$	> 0.8	2.04	7.05	0.84	2.32
	> 0.8	1.6	6.7	–	–

При различных параметрах воздействия изучены динамика массового расхода с облучаемой поверхности (интегральный удельный массовый расход зависит от энергии импульса, достигая в оптимуме – при превышении спектрально-энергетического порога абляции в ϵ раз – $m' \sim 10^{-4}$ г/Дж), пространственно-временное распределение концентрации электронов в ППО (в течение первых десятков наносекунд после воздействия достигающей 10^{18} см $^{-3}$ – рис. 1), среднемассовая скорость разлета частиц ($\sim 2 \cdot 10^3$ м/с в вакууме, где скорость разлета частиц и их дисперсия по скоростям заметно превосходят эти величины в атмосферных условиях) и скорости распространения ударно-волнового фронта (при $F = E/S \sim 40$ Дж/см 2 $v_{SW} \sim 9$ км/с для $(C_2F_4)_n$ и $v_{SW} \sim 5$ км/с для $(CH_2O)_n$).

Значения спектрально-энергетических порогов абляции для обоих полимеров имеют тенденцию к снижению с уменьшением длины волны воздействующего излучения; при облучении в вакууме значения порогов ниже, чем в атмосферных условиях (рис. 2, табл. 2). Данные, полученные для абляции ультракороткими импульсами $(C_2F_4)_n$, при $\lambda_I = 800$ нм в вакууме находятся в хорошем согласии с данными из [3] – 2 Дж/см 2 и заметно превосходят полученные в [4] на воздухе при воздействии с частотой 1 кГц – 0.5 Дж/см 2 , что, видимо, связано с возникновением и поддержанием оптической пробойной искры у поверхности мишени или уменьшением действительной площади пятна фокусировки. Данные об оптогазодинамических процессах при фемтосекундной лазерной абляции $(CH_2O)_n$ получены впервые. При многократном облучении поверхности мишеней на воздухе с частотой менее 1 Гц не отмечено эффектов накопления для 10 импульсов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. Ovsianikov, et al., *Laser Ablation and its Applications* (Berlin, Springer, 2007), p. 121–157.
- [2] Е. Ю. Локтионов и др., Приборы и техника эксперимента N 3, 2010 (в печати).
- [3] M. Womack, M. Vendan, and P. Molian, *Appl. Sur. Sci.* **221**(1-4), 99 (2004).
- [4] Z. B. Wang et al., *Journal of Applied Physics* **93**(10), 6375 (2003).

По материалам 3 Всероссийской молодежной школы-семинара “Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики”, Москва, ФИАН, октябрь 2009 г.

Поступила в редакцию 10 декабря 2009 г.

УДВОЕНИЕ ЧАСТОТЫ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В НЕЛИНЕЙНОМ ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ ТЕТРАБОРАТА СТРОНЦИЯ

А. М. Вьюнышев^{1,2,*}, А. С. Александровский^{1,2}, А. В. Черепахин¹,
В. Е. Ровский², А. И. Зайцев^{1,2}, А. В. Замков¹

Экспериментально исследован процесс генерации второй гармоники фемтосекундного лазера на титан-сапфире в режиме нелинейной дифракции в нелинейном фотонном кристалле тетрабората стронция. Спектр векторов обратной решетки доменных структур включает компоненты, ответственные за эффективную перестраиваемую по частоте ГВГ в спектральной области 355–510 нм. Максимальная эффективность ГВГ составила 1.9%. Сужение спектра излучения второй гармоники не превышает 10–20%. Измеренная спектральная зависимость угла нелинейной дифракции находится в хорошем согласии с расчетом.

Ключевые слова: генерация второй гармоники, ультракороткие импульсы, нелинейный фотонный кристалл.

Расширение спектрального диапазона лазерного излучения по-прежнему остается актуальной задачей современной квантовой электроники. Особую важность представляет получение когерентного излучения в области вакуумного ультрафиолета, в том числе излучения фемтосекундной длительности, поскольку выбор нелинейных сред в этой области ограничен. В этом отношении привлекательным является кристалл тетрабората стронция (SBO), который имеет область прозрачности вплоть до 125 нм в сочетании с относительно высокими нелинейными коэффициентами. Однако ввиду малого дупреломления угловой синхронизм в SBO отсутствует. В таком случае альтернативным путем достижения эффективного нелинейно-оптического преобразования может

¹ Институт физики СО РАН, 660036, г. Красноярск, Академгородок 50.

² Сибирский федеральный университет, 660036, г. Красноярск, Свободный 79.

* e-mail: vyunishev@iph.krasn.ru