

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В ПЛАЗМЕ ТАЦ МИШЕНЕЙ

А. А. Фроня^{1,2}, А. Т. Саакян¹, В. Н. Пузырев¹, А. Н. Стародуб¹,
Т. Т. Кондратенко¹, Н. Г. Борисенко¹

В работе представлены результаты экспериментов по изучению генерации второй гармоники в плазме мало-плотных мишеней из триацетата целлюлозы. Мишени облучались излучением неодимового лазера на стекле на основной частоте наносекундной длительности. Получены данные по временной развертке генерируемой в плазме второй гармоники. Выявлены особенности спектрального и временного распределения излучения второй гармоники: с увеличением плотности в спектре появляется максимум, а в зависимости интенсивности от времени появляются два максимума.

Ключевые слова: лазерная плазма, излучение плазмы, вторая гармоника, мало-плотные материалы.

Введение. После создания лазеров высокой мощности началось исследование широкого спектра явлений, возникающих при взаимодействии излучения этих лазеров с разнообразными типами мишеней и сред. Одним из направлений является лазерная плазма – пороговое явление, происходящее вблизи поверхности мишени, облучаемой сфокусированным лазерным лучом с интенсивностью $> 10^9$ Вт/см². В настоящее время в мире существует ряд лазерных установок для изучения высокотемпературной лазерной плазмы: NIF (США), PALS (Чехия), LULI, LMJ (Франция), GEKKO-XII (Япония), Канал-2, Искра-5, Луч, Мишень (Россия) и др. Исследования на таких установках приобретают особую актуальность, поскольку позволяют изучать фундаментальные свойства вещества в экстремальных условиях, и нацелены на решение таких прикладных задач как инициирование ядерного синтеза, создание источников рентгеновского излучения, ускорение электронов и тяжелых ионов [1–5].

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

² НИЯУ «МИФИ», 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31; e-mail: aafronya@merphi.ru.

Свойства и характеристики плазмы определяются условиями взаимодействия лазерного излучения с мишенью, длиной волны и спектральной шириной излучения лазера, формой и длительностью его импульса, модовым составом, размером пятна фокусировки, материалом, состоянием облучаемой мишени, и пр.

В последние десятилетия интенсивно изучаются свойства плазмы малоплотных материалов различной структуры. Малоплотные материалы представляют собой перспективный материал по таким направлениям исследований, как эффективное сглаживание неоднородностей интенсивности лазерного пучка, задачи гидродинамики многослойных малоплотных мишеней, изучение уравнения состояния вещества, астрофизические исследования, исследования по ЛТС [6–8].

В настоящее время используют различные виды малоплотных мишеней, отличающиеся по материалу, плотности мишени, структуре, а также многослойные малоплотные структуры с добавками частиц металлов и без, и др. [9].

В работе представлены результаты экспериментов по взаимодействию наносекундного лазерного излучения с малоплотными мишенями. Изучены временные особенности генерации второй гармоники в плазме таких мишеней.

Экспериментальная установка. Цикл экспериментов по взаимодействию лазерного излучения с малоплотными мишенями был выполнен на установке “Канал-2” [10] в ОКРФ ФИАН. Уникальность лазера заключается в возможности управления когерентностью лазерного излучения, что дает преимущества по сравнению с обычными схемами лазеров [10]. Оптическая схема лазера позволяет без применения пространственной фильтрации сформировать выходное излучение с требуемыми характеристиками и исключить деградацию лазерного пучка: самофокусировку, филаментацию и т.п.

В экспериментах использовалось лазерное излучение с большим числом поперечных мод в пучке ~ 1000 и широким спектром излучения – 24 \AA на полувысоте. Длительность импульса лазерного излучения составляла 2.5 нс по полувысоте, длина волны излучения – 1060 нм , расходимость излучения – 10^{-3} рад, размер пятна фокусировки – 350 мкм . В качестве мишеней использовались малоплотные микроструктурированные полимерные аэрогели из триацетата целлюлозы (ТАЦ) с различной плотностью и толщиной [8].

Экспериментальные результаты. Важным моментом в проводимых экспериментах было полное разрушение малоплотных мишеней при взаимодействии с лазерным излучением интенсивностью $10^{12} - 10^{14} \text{ Вт/см}^2$. В результате отсутствовала возможность исследования кратеров. Для длины волны лазерного излучения 1.06 мкм величина кри-

тической плотности плазмы ρ_c составляет ~ 3 мг/см³. Плотность исследуемых мишеней составляла $\sim 0.75n_c$, $\sim 17n_c$, $\sim 433n_c$, где n_c – критическая плотность электронов.

В табл. 1 представлены данные по обсуждаемым мишеням.

Т а б л и ц а 1

Данные мишеней

Мишень	Плотность, мг/см ³	Толщина, мкм	Энергия лазера, Дж
ТАЦ	2	460	34
ТАЦ	50	100	32
ТАЦ	1300	180	29

В соответствии с экспериментальными данными [11], время существования плазмы, возникающей при воздействии наносекундного лазерного излучения, порядка длительности лазерного импульса. Таким образом лазерный импульс взаимодействует и с малоплотной мишенью, и с формируемой плазмой.

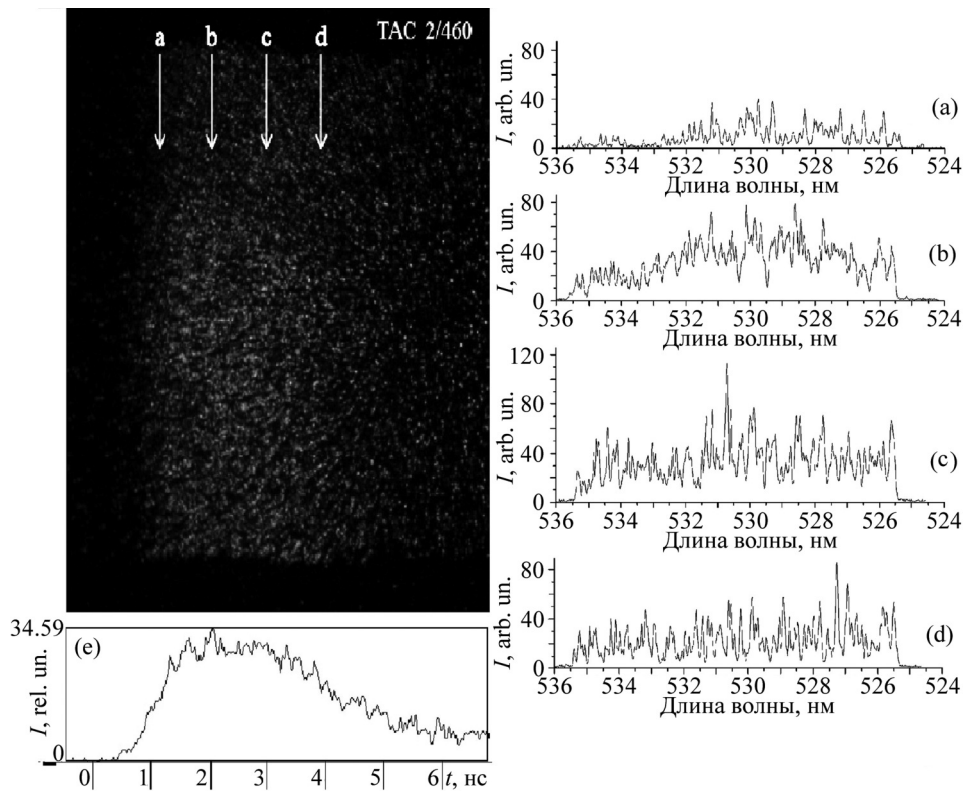


Рис. 1: Развертка излучения второй гармоники для ТАЦ мишени с плотностью 2 мг/см³ и толщиной 460 мкм.

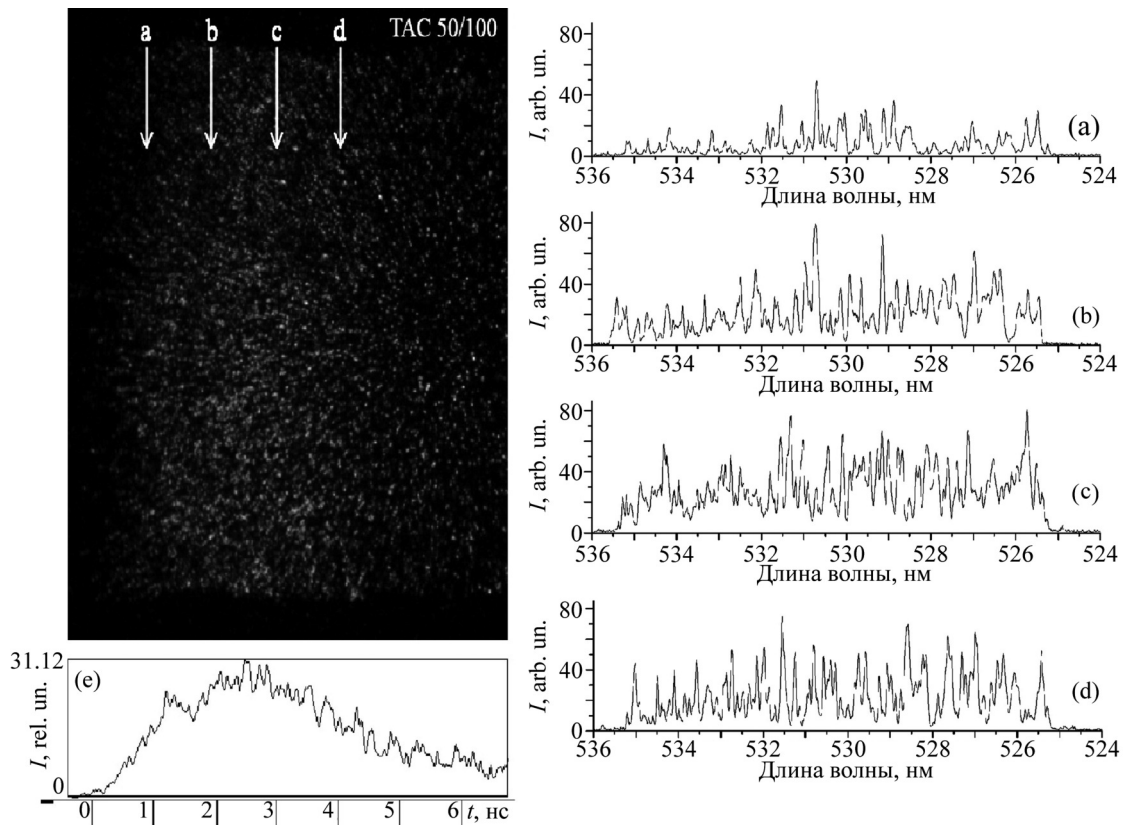


Рис. 2: Развертка излучения второй гармоники для ТАЦ мишени с плотностью 50 мг/см³ и толщиной 100 мкм.

На рис. 1–3 представлены временные развертки излучения второй гармоники в плазме малоплотных мишеней. Сечения (a), (b), (c), (d) соответствуют спектрам излучения гармоники в разные моменты времени. График (e) соответствует интегральному по интенсивности свечению второй гармоники во времени. Для мишеней с плотностями 2 и 50 мг/см³ интенсивность излучения слабая по сравнению с мишенью плотностью 1300 мг/см³. В спектре четко выделенного максимума не наблюдается, присутствуют неоднородности интенсивности на фоне непрерывного спектра в исследуемой области. Для всех мишеней характерно постепенное нарастание интенсивности излучения второй гармоники.

Если сравнить полученные результаты развертки интенсивности излучения второй гармоники с данными для ТАЦ мишеней с добавлением частиц меди [12], можно выявить следующие различия: наличие идентифицируемого пика интенсивности с течением времени генерации, более узкий по ширине спектр излучения второй гармоники.

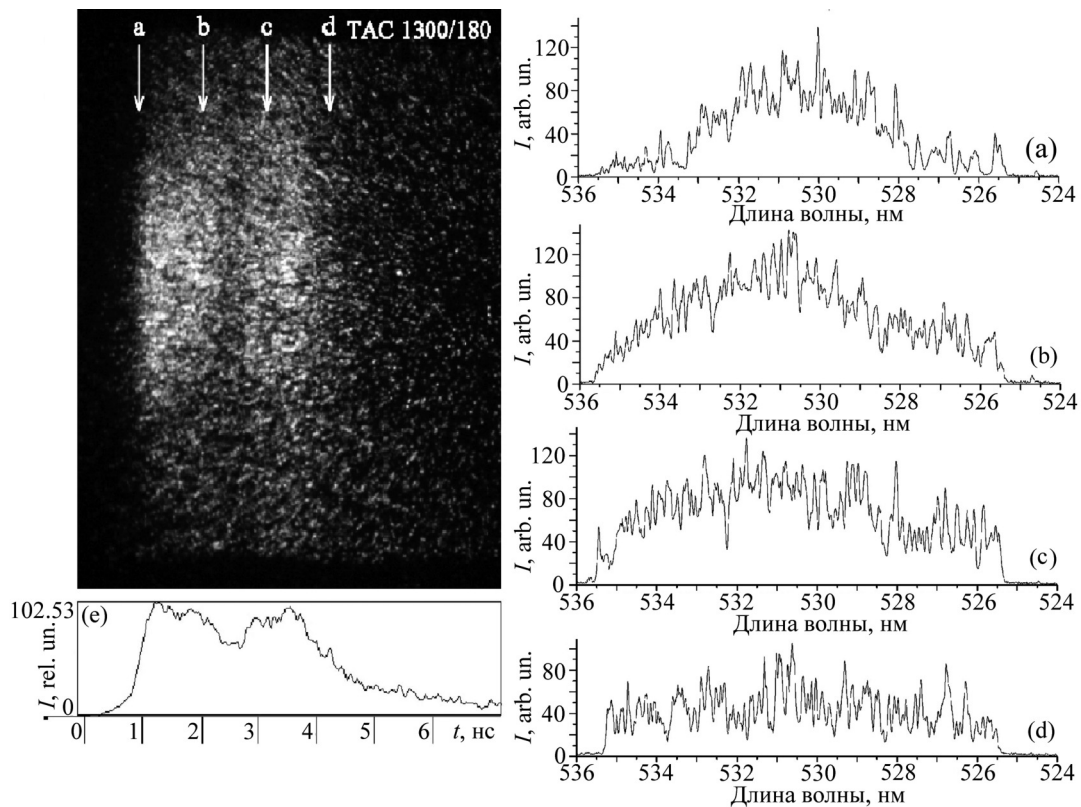


Рис. 3: Развертка излучения второй гармоники для ТАЦ мишени с плотностью 1300 мг/см^3 и толщиной 180 мкм .

Отличие в картине развертки излучения второй гармоники связывается с типом мишени. Добавление наночастиц меди изменяет характер спектрального распределения второй гармоники. Так в работе [13] продемонстрированы спектральные отличия генерации второй гармоники в ТАЦ мишенях и мишени из меди. Для меди характерно значительное превышение выраженного пика второй гармоники по отношению к пьедесталу, для ТАЦ мишеней же пик на фоне пьедестала выделяется незначительно. Это свидетельствует о преобладании разных процессов, отвечающих за процесс генерации второй гармоники. Наличие максимума в спектре вблизи длины волны $\lambda_0/2$ связано с линейной трансформацией лазерного излучения в плазме, а наличие пьедестала связано с развитием в плазме параметрических неустойчивостей. Все эти процессы протекают в плазме в областях с концентрацией электронов вблизи критической для данной длины волны лазерного излучения. Уширенная форма спектра позволяет полагать, что в лазерной плазме возникает турбулентность вследствие возбуждения коротковолновых плазменных волн.

В работе [14] представлены результаты по изучению временной эволюции излучения второй гармоники плазмы для мишеней из агар-агара и вспененного полистирола (средняя плотность составляла 1–30 мг/см³, толщина – 100–1000 мкм), имеющих квазиупорядоченную структуру. Установлено, что генерация второй гармоники в плазме носит импульсно-периодический характер в течение времени существования греющего импульса. Авторы связывают периодическую во времени генерацию второй гармоники с квазиупорядоченной структурой мишеней.

В настоящей работе в ТАЦ мишенях с плотностями 2 и 50 мг/см³ периодичности в генерации второй гармоники не выявлено. Для ТАЦ мишени с плотностью 1300 мг/см³ наблюдается два пика интенсивной генерации второй гармоники во времени на фоне непрерывного сигнала в отличие от работы [14]. Такая форма импульса свидетельствует о влиянии плотности мишеней ТАЦ хаотической структуры на процесс генерации второй гармоники.

Заключение. Проведена серия экспериментов по исследованию эволюции спектра излучения второй гармоники, генерируемого в плазме при воздействии лазерного излучения на малоплотные мишени из ТАЦ. Генерируемая в плазме вторая гармоника подтверждает формирование в плазме областей с критической плотностью электронов для всех исследуемых типов мишеней, в том числе и с плотностью $0.75n_c$. Анализ временной развертки второй гармоники, генерируемой в плазме, показал, что спектр второй гармоники имеет уширенную форму для малоплотных мишеней. Хаотическая структура мишеней из ТАЦ оказывает влияние на характер генерации второй гармоники в плазме.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Jean-Luc Miquel and Emmanuelle Prene, Nucl. Fusion **59**, 032005 (2019).
- [2] A. Casner et al., Nucl. Fusion **59**, 032002 (2019).
- [3] T. W. Huang et al., Plasma Phys. Control. Fusion **60**, 115006 (2018).
- [4] M. A. Belyaeva, R. L. Berger, O. S. Jones, et al., Phys. Plasmas **25**, 123109 (2018).
- [5] S. G. Garanin, 15th International conference on high-power particle beams. Saint-Petersburg (Russian Federation); 18-23 July 2004 (BEAMS'2004). Proceedings ISBN 5-87911-088-5, Worldcat; 2005, p. 387-392.
- [6] T. Hall, D. Batani, W. Nazarov, et al., Laser and Particle Beams **20**, 303 (2002).

- [7] R. Dezulian, F. Canova, S. Barbanotti, et al., Phys. Rev. E **73**, 047401 (2006).
- [8] N. G. Borisenko, I. V. Akimova, A. I. Gromov, et al., Fusion Science and Technology **49**(4), 676 (2006).
- [9] A. S. Orekhov, A. A. Akunets, L. A. Borisenko, et al., Journal of Physics: Conference Series, 8th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA 2013), **688**, 012080 (2016).
- [10] S. I. Fedotov, L. P. Feoktistov, M. V Osipov, and A. N. Starodub, Journal of Russian Laser Research **25**(1), 79 (2004).
- [11] A. N. Starodub, N. G. Borisenko, A. A. Fronya, et al., Laser and Particle Beams **28**, 371 (2010).
- [12] A. A. Fronya, N. G. Borisenko, V. N. Puzyrev, et al., J. Phys.: Conf. Ser. **1189**, 012024 (2019).
- [13] А. А. Фроня, Н. Г. Борисенко, В. Н. Пузырев и др., Квантовая электроника **47**(2), 101 (2017) [A. A. Fronya, N. G. Borisenko, V. N. Puzyrev, et al., Quantum Electron **47**, 101 (2017)].
- [14] A. E. Bugrov, I. N. Burdonskii, V. V. Gavrilov, et al., Plasma Physics Reports **30**(2), 143 (2004).

Поступила в редакцию 25 июля 2019 г.

После доработки 8 октября 2019 г.

Принята к публикации 9 октября 2019 г.

Публикуется по рекомендации VIII Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий” (НИЯУ “МИФИ”, Москва, 2019 г.).