

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

И. А. Артюков¹, А. В. Виноградов¹, Е. В. Жариков², К. С. Зараменских²,
М. В. Осипов¹, В. Н. Пузырев¹, А. Н. Стародуб¹, А. А. Фроня¹,
М. Л. Чернодуб¹, О. Ф. Якушев¹

Представлены результаты экспериментов по изучению пространственного распределения рентгеновского излучения плазмы, создаваемой лазерным излучением наносекундной длительности при воздействии на мишень, изготовленную из углеродных нанотрубок. Проводится сравнение с результатами, полученными для твердых магнелевых мишеней.

Ключевые слова: лазерная плазма, взаимодействие излучения с веществом, углеродные нанотрубки.

Взаимодействие лазерного излучения с микро- и наноструктурированными материалами – интенсивно развивающееся направление исследований в настоящее время. Проведение таких исследований преследует различные цели. С точки зрения прикладной науки ведутся активные исследования по определению оптимальных параметров и конструкций мишеней для осуществления лазерного термоядерного синтеза [1], а также по разработке источников излучения с требуемыми характеристиками в различных спектральных диапазонах, например, в рентгеновском и ВУФ диапазонах [2]. Кроме того, проводятся исследования по изучению влияния структуры материала на процессы взаимодействия лазерного излучения с таким материалом. В частности, в работе [3] представлены результаты эффективного использования наноразмерных кластеров для ускорения электронов под действием электромагнитного поля лазерного излучения и создаваемой плазмы.

Одним из вариантов наноструктурированных материалов являются углеродные нанотрубки. Углеродные нанотрубки (УНТ) используются в экспериментах по взаимо-

¹ Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 53.

² Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева.

действию лазерного излучения с веществом: изучается эффективность генерации высокоэнергетических электронов и ионов при облучении фемтосекундными лазерными импульсами мишеней с УНТ [4], интенсивность рентгеновского излучения плазмы, образуемой при воздействии фемтосекундного лазерного излучения на УНТ, осажденные на подложку [5]. В работах [4, 5] показано, что использование УНТ позволяет повысить энергию электронов и увеличить интенсивность рентгеновского излучения плазмы по сравнению с плоскими мишенями, которые использовались в качестве подложек для УНТ.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по взаимодействию лазерного излучения наносекундной длительности с углеродными нанотрубками, нанесенными на подложку. Получены изображения лазерной плазмы в собственном рентгеновском излучении в различных спектральных диапазонах ($\Delta\lambda = 180\text{--}200 \text{ \AA}$ и $\lambda \leq 9 \text{ \AA}$).

Мишени. В экспериментах лазерному воздействию подвергались углеродные наноструктурированные мишени, представляющие собой нанотрубки, осажденные на кварцевую подложку. Использование в качестве мишеней УНТ позволяет проводить исследования взаимодействия лазерного излучения с веществом, внутренние элементы которого имеют размеры порядка длины волны греющего излучения или меньше, и с объёмной плотностью на два порядка меньшей плотности твердотельного вещества, образующего отдельные элементы материала.

Образцы углеродного депозита, содержащего углеродные нанотрубки, были получены каталитическим пиролизом бензола при температуре $980 \text{ }^\circ\text{C}$ и атмосферном давлении в горизонтальном проточном реакторе [6].

Предкатализатор ферроцен вводили в процесс посредством испарения в печи предварительного подогрева. Пары ферроцена и аэрозоль бензола, полученный с помощью ультразвукового распыления с частотой 2.64 МГц, транспортировали в зону пиролиза потоком аргона с расходом 115 мл/мин. Полученные углеродные наноструктуры высаживались непосредственно в реакторе в процессе синтеза на кварцевую подложку размером $5 \times 5 \text{ мм}$ и толщиной 1000 мкм. Углеродные наноструктуры на поверхности подложки были расположены хаотически.

По результатам исследования методами сканирующей (СЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (FEI Quanta-FEG-600, Philips CM200) было установлено, что депозит содержит тонкие углеродные нанотрубки диаметром от 20 до 45 нм (большая часть – около 30 нм). В меньшем количестве содержатся более толстые трубки и волокна диаметром около 120 нм. Волокнистые структуры достаточно прямые и в длину

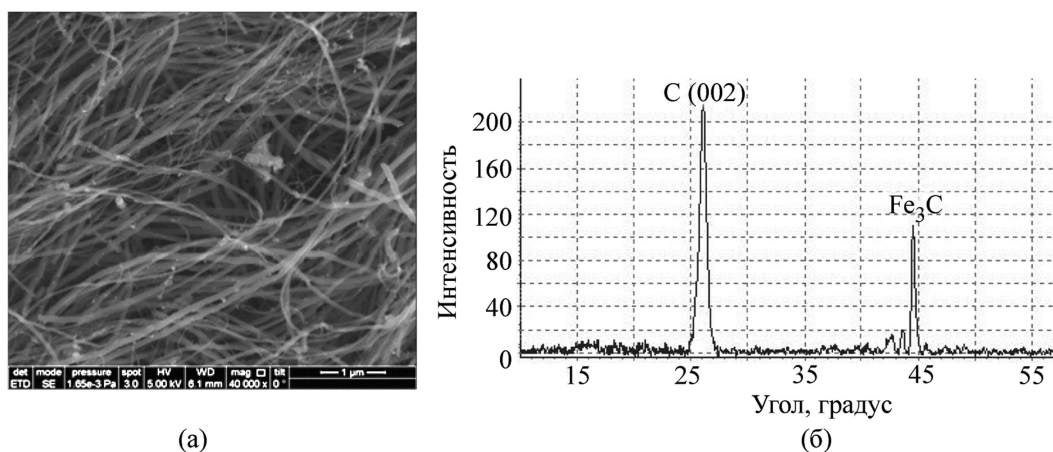


Рис. 1: Образец депозита, содержащий углеродные нанотрубки, полученные каталитическим пиролизом бензола: (а) СЭМ-изображение* и (б) рентгенограмма.

достигают 10-15 мкм (рис. 1(а)). Данные углеродные структуры также содержат металлические наночастицы, состоящие в основном из карбида железа Fe_3C , размером 5-10 нм, капсулированные внутри углеродных нанотрубок и нановолокон, о чем свидетельствует рентгенограмма депозита (рис. 1(б)). Оценочная плотность данного углеродного материала составляет 0.025 г/см^3 .

Условия эксперимента. Эксперименты по взаимодействию лазерного излучения с углеродными наноструктурированными мишенями были проведены на установке “Канал-2” [7]. Мишени облучались одним пучком лазерного излучения с длиной волны 1.06 мкм со стороны, где были нанесены нанотрубки. Плотность потока мощности лазерного излучения на мишени составляла $\sim 10^{13} \text{ Вт/см}^2$, длительность лазерного импульса $\sim 2.5 \text{ нс}$, диаметр пятна фокусировки лазерного излучения на мишени $\sim 170 \text{ мкм}$.

В экспериментах изучалось пространственное распределение интенсивности рентгеновского излучения плазмы УНТ. Для формирования изображения плазмы одновременно были задействованы два диагностических канала: на основе камеры-обскуры и объектива Шварцшильда. Изображение плазмы регистрировалось в собственном рентгеновском излучении в различных спектральных диапазонах: $\Delta\lambda = 180 - 200 \text{ \AA}$ и $\lambda \leq 9 \text{ \AA}$.

Объектив Шварцшильда представляет собой оптическую систему для формирования изображения микрообъектов в рентгеновском спектральном диапазоне [8, 9], которая позволяет скомпенсировать осевые аберрации третьего порядка. Регистрация изображения плазмы объективом Шварцшильда осуществляется в узком спектральном

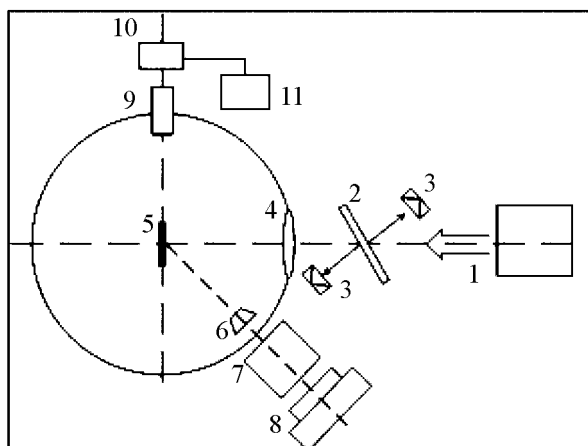


Рис. 2: Схема эксперимента по взаимодействию лазерного излучения с веществом. 1 – лазерное излучение, 2 – плоскопараллельная пластина, 3 – калориметры, 4 – фокусирующая система, 5 – мишень, 6 – камера-обскура, 7 – МКП-камера (на основе микроканальной пластины), 8 – цифровая фотокамера, 9 – объектив Шварцшильда, 10 – рентгеновская CCD-камера, 11 – компьютер.

диапазоне 180–200 Å, что обусловлено использованием многослойных интерференционных покрытий на зеркалах. Для выделения области спектра, регистрируемой объективом (18–20 нм), из непрерывного спектра излучения созданной плазмы, использовались алюминиевые фильтры различной толщины. Толщина подбиралась таким образом, чтобы в пределах рабочего диапазона энергий лазерного импульса не происходило насыщения высокочувствительной матрицы CCD-камеры, регистрирующей изображение. Схема канала была рассчитана так, чтобы увеличенное в 5 раз изображение плазмы полностью заполняло приёмную матрицу CCD-камеры. Предельное реальное разрешение диагностического канала на основе объектива Шварцшильда с учётом увеличения $M = 5$ составляет $R = 7.8$ мкм.

Диагностический канал на основе камеры-обскуры позволял получать изображение плазмы в собственном рентгеновском излучении под небольшим углом по отношению к оси греющего пучка. Для визуализации рентгеновского изображения, сформированного камерой-обсурой, использовалась МСР-камера (на основе микроканальной пластины), которая располагалась в плоскости изображения объекта. Пространственное разрешение диагностического канала определялось пространственным разрешением детектора (МСР-камеры) и увеличением, с которым камера-обскура формирует изображение плазмы [10]. С учётом того, что пространственное разрешение детектора 30 мкм, а уве-

личение 10, разрешение по объекту составило ~ 16 мкм. Спектральные характеристики рентгеновского излучения, регистрируемого камерой-обскурой, определялись внешними фильтрами ($\lambda \leq 9 \text{ \AA}$).

Результаты экспериментов. Изображения плазмы в жестком рентгеновском излучении ($\lambda \leq 9 \text{ \AA}$), полученные для мишеней с УНТ (рис. 3), демонстрируют неравномерное распределение интенсивности излучения плазмы. Наблюдается ярко выраженное интенсивное “ядро” и области менее интенсивного излучения (“ореол”). Размеры “ядра”, ~ 200 мкм, близки к размерам фокального пятна, а размеры ореола превышают размеры фокального пятна в ~ 3 раза. Увеличение энергии лазерного излучения, воздействующего на мишень, приводит к увеличению области свечения плазмы, указывающему на увеличение прогрева мишени и формирование плазмы в плоскости мишени.

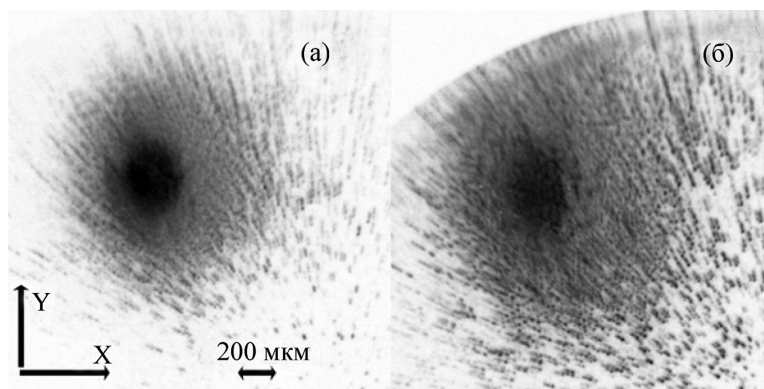


Рис. 3: Изображения плазмы, полученные с помощью камеры-обскуры в рентгеновском спектральном диапазоне $\lambda < 9 \text{ \AA}$ (Ве фильтр 100 мкм) для различных энергий греющего излучения (а) 18.1 Дж; (б) 57.7 Дж (мишени из углеродных нанотрубок).

Для сравнения на рис. 4 приведены изображения плазмы, полученной при взаимодействии лазерного излучения с твердотельными мишенями из магния. Данные обработки изображений приведены на рис. 5.

Как видно из рис. 3 и 4, для магния и нанотрубок характерно наличие ограниченной области, выделяющейся более высокой интенсивностью и имеющей ограниченные пространственные размеры, что демонстрирует наличие областей горячих квантов как для магниевой мишени, так и для мишени с УНТ. Характерные размеры областей плазмы представлены на рис. 5(а) и 5(б).

Из рис. 5 можно заключить, что размер области интенсивного излучения для плазмы УНТ несколько превосходит размер такой же области излучения плазмы от магния при

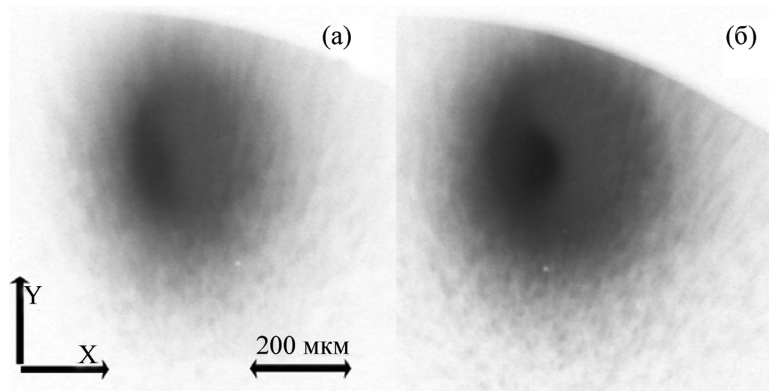


Рис. 4: Изображения плазмы, полученные с помощью камеры-обскуры в рентгеновском спектральном диапазоне $\lambda < 9 \text{ \AA}$ (Ве фильтр 100 мкм) для различных энергий греющего излучения (а) 42.5 Дж; (б) 56 Дж (мишени из магния).

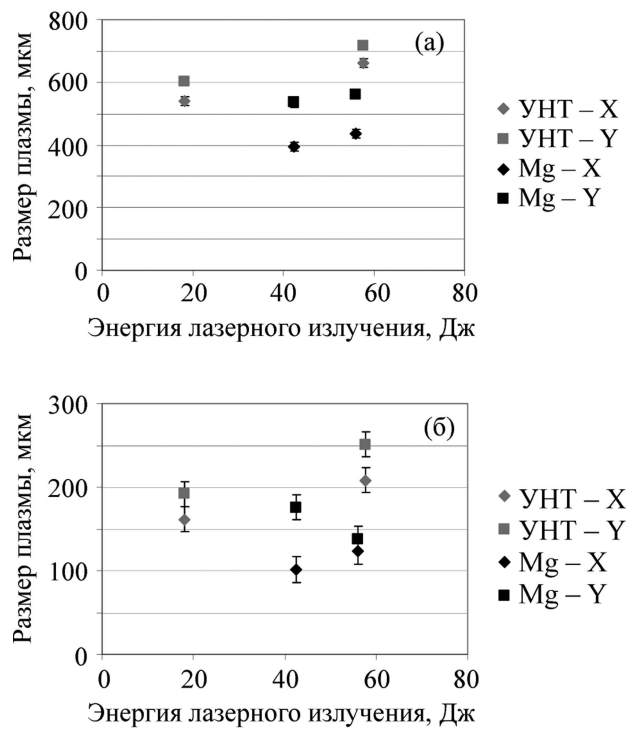


Рис. 5: (а) размеры “ореола” плазмы для магния и углеродных нанотрубок, (б) размеры “горячей области” плазмы для магния и углеродных нанотрубок. Маркер X соответствует размерам по координате “x”, Y – размерам по координате “y”.

сравнимой энергии лазерного излучения, что указывает на более эффективный прогрев плазмы в поперечном направлении (в плоскости мишени) в мишенях с УНТ.

С помощью объектива Шварцшильда были получены изображения плазмы УНТ (рис. 6) в ВУФ спектральном диапазоне (180–200 Å). Направление распространения греющего излучения обозначено стрелкой. Изображения плазмы в собственном рентгеновском излучении демонстрируют, что излучающая область в поперечном направлении (в плоскости мишени) имеет размеры, превышающие размер фокального пятна. Данный факт свидетельствует о том, что в поперечном направлении происходит прогрев мишени за счёт энергии образованной плазмы.

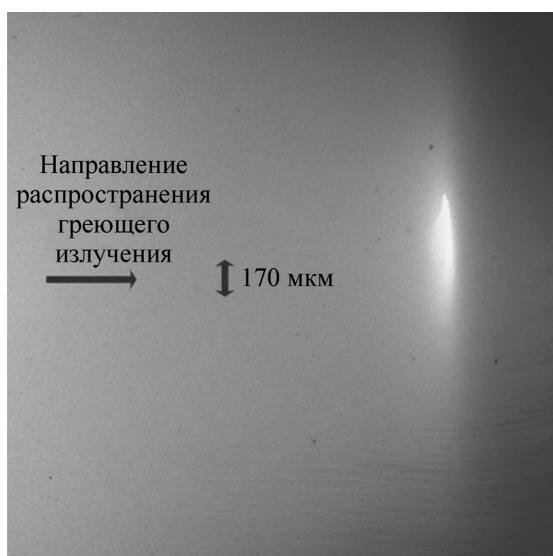


Рис. 6: Изображение плазмы УНТ в собственном рентгеновском излучении (180–200 Å). Энергия греющего излучения 18.1 Дж.

Заключение. Проведены эксперименты по взаимодействию наносекундного лазерного излучения с мишенями из углеродных нанотрубок. Обнаружено, что пространственные распределения рентгеновского излучения имеют четко выраженную область интенсивного излучения и ореол, размеры которого превосходят размеры фокального пятна. Последнее указывает на эффективный прогрев мишени в поперечном направлении.

* Авторы выражают благодарность за проведение электронно-микроскопического анализа образца, содержащего углеродные нанотрубки, Xavier Devaux (Institut Jean Lamour, Nancy Université, Ecole des Mines, Nancy, France).

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-02-00113) и Федеральной целевой программой “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” (грант № 2009-1.1-122-052-025).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] N. G. Borisenko, Yu. A. Merkul'ev, and A. I. Gromov, *Journal of the Moscow Physical Society* **4**, 247 (1994).
- [2] S. Bagchi, P. Kiran, K. Yang, et al., *Phys. Plasmas* **18**, 014502 (2011).
- [3] Th. Fennel, K.-H. Meiwes-Broer, J. Tiggesbaumker, et al., *Reviews of modern physics* **82**, No. 2, 1793 (2010).
- [4] Ji Yanling, J. Gang, W. Weidong, et al., *Appl. Phys. Lett.* **96**, 041504 (2010).
- [5] B. Suman, P. P. Kiran, K. Yang, et al., *Phys. Plasmas* **18**, 014502 (2011).
- [6] X. Devaux, S. Yu. Tsareva, A. N. Kovalenko, E. V. Zharikov, and E. McRae, *Carbon* **47**, 1244 (2009).
- [7] S. I. Fedotov, L. P. Feoktistov, M. V. Osipov, and A. N. Starodub, *Journal of Russian Laser Research* **25**, 1 (2004).
- [8] И. А. Артюков, К. М. Крымский, Preprint № 30 (М., ФИАН, 1998).
- [9] И. А. Артюков, К. М. Крымский, *Optical Engineering* **39**, No. 8, (2000).
- [10] Н. Г. Басов, Ю. А. Захаренков, А. А. Рупасов и др., *Диагностика плотной плазмы* (М., Наука, 1989).

Поступила в редакцию 1 марта 2011 г.