

УДК 535-32

ИЗЛУЧЕНИЕ НАНОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ГАДОЛИНИЯ

А. А. Фроня^{1,2}, В. Н. Пузырёв¹, А. Н. Стародуб¹, О. Ф. Якушев¹

Представлены исследования лазерной плазмы, создаваемой при воздействии наносекундного лазерного излучения управляемой пространственной когерентности на различные мишени, содержащие гадолиний. Для изучения рентгеновского излучения такой плазмы применялся разработанный и созданный авторами рентгеновский диагностический комплекс. В качестве мишеней использовались металлический гадолиний, оксид гадолия, сплав гадолия и алюминия, алюминий. Проведены оценки электронной температуры образуемой плазмы, эффективности конверсии лазерного излучения в рентгеновское излучение, получены размеры излучающих областей. Особое внимание уделено изучению спектров лазерной плазмы в рентгеновской области вблизи длины волны 6.7 нм.

Ключевые слова: лазерная плазма, спектр излучения плазмы, вакуумный ультрафиолет, рентгеновское излучение плазмы, диагностика плазмы.

Введение. В настоящее время значительный интерес представляют источники коротковолнового излучения (диапазон вакуумного ультрафиолета и рентгеновский спектральный диапазон) [1–3]. Перспективны в этой области лазерно-плазменные источники, поскольку они обладают достаточно компактными размерами и позволяют работать в широком диапазоне спектра и интенсивностей.

Исследование свойств лазерно-плазменных источников требует разработки надежных методов диагностирования. Комплексная диагностика пространственных, угловых, временных и спектральных характеристик плазменного источника в рентгеновской, а

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: anastasiya@fronya.com.

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 115409 Россия, Москва, Каширское шоссе, 31.

также в области мягкого рентгеновского (МР) излучения и области вакуумного ультрафиолета (ВУФ) позволяет судить об эффективности поглощения лазерной энергии, о характере распределения плазменного факела в пространстве, а также о роли и характере различных нелинейных процессов, развивающихся при взаимодействии излучения с плазмой. В качестве мишеней, облучаемых лазерным излучением, как правило, используются различные металлы.

Гадолиний имеет достаточно узкий пик излучения в рентгеновской области спектра вблизи 6.7 нм [4, 5]. Данное обстоятельство делает этот материал привлекательным для ВУФ литографии [2, 6–8]. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что излучение вблизи длины волны 6.7 нм с достаточно узкой спектральной шириной может быть получено в лазерной плазме гадолиния [9, 10]. Интенсивный пик излучения формируется в результате ряда переходов ионов XVII-XXI Gd [5, 11]. Однако для создания плазмы с высокой степенью ионизации Gd XVII-XXI необходимо, чтобы температура плазмы составляла ~ 100 эВ и выше [4, 9]. Исследования в этой области направлены на изучение процесса генерации излучения вблизи 6.7 нм в Gd плазме и повышения эффективности такой генерации. В работе [12], например, исследуется эффективность гадолиниевого плазменного источника излучения на длине волны 6.7 нм в зависимости от длительности импульса лазерного излучения (в интервале от 140 фс до 10 пс).

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований излучения лазерной плазмы гадолиния в рентгеновском и ВУФ спектральных диапазонах.

Экспериментальная установка. Эксперименты по взаимодействию лазерного излучения с веществом были проведены на лазерной установке “Канал-2” [13], которая включает в себя Nd-лазер, вакуумную камеру с комплексом диагностической аппаратуры. Оптическая схема лазера позволяет управлять когерентностью лазерного излучения, что в свою очередь дает преимущества по сравнению с обычными схемами лазеров [13]. Управление когерентностью фактически происходит путем изменения таких характеристик лазерного пучка, как расходимость, число поперечных мод и спектральная ширина линии излучения лазера. В представленных экспериментах ширина линии излучения составляла 4.2 нм при максимуме спектральной линии лазерного излучения ~ 1.06 мкм, расходимость $\sim 10^{-3}$ рад, число поперечных мод ~ 1000 . Плотность потока мощности лазерного излучения на мишени составляла $\sim 10^{11} - 10^{14}$ Вт/см², при этом лазерная энергия изменялась от 0.4 до 100 Дж, длительность лазерного импульса ~ 3 нс, размер пятна фокусировки лазерного излучения на мишени ~ 160 мкм.

Разработанный и созданный диагностический комплекс [14] для изучения спектральных, пространственных, временных и энергетических характеристик рентгеновского излучения лазерной плазмы состоит из следующих каналов, используемых в экспериментах:

- каналы для изучения пространственного распределения рентгеновского излучения плазмы на основе камеры обскуры и объектива Шварцшильда;
- канал для изучения распределения рентгеновских квантов по энергии (метод фильтров), позволяющий определять электронную температуру плазмы и общий вид непрерывного спектра в диапазоне $< 8\text{\AA}$;
- два канала на основе спектрографа Иоганна со сферическим кристаллом и спектрографа скользящего падения (GIS) для регистрации спектров рентгеновского излучения;
- система регистрации временного поведения импульса греющего излучения и рентгеновского излучения;
- калориметрическая система для измерения энергетических характеристик излучения плазмы и лазерного излучения;
- канал на основе электростатического масс-спектрометра.

Также предусмотрена возможность регистрации таких параметров лазерного излучения, как энергия, длительность импульса, спектральный состав.

Мишени облучались одним пучком излучения лазера. В качестве мишеней использовались гадолиний (Gd), сплав алюминия и гадолиния с содержанием последнего 10% весовых, оксид гадолиния, а также алюминий (Al).

Результаты экспериментов. По условиям эксперимента облучению подвергались мишени, имеющие сверхкритическую плотность. В процессе взаимодействия вблизи поверхности мишени образуется плазма, которая имеет области как со сверхкритической плотностью, так и с критической и докритической плотностью.

При изучении временного поведения импульса рентгеновского излучения с энергией квантов ≥ 1500 эВ установлено, что происходит формирование области горячей плазмы, и время существования этой области плазмы порядка времени действия лазерного импульса. При этом жесткая компонента рентгеновского излучения отслеживает изменение электронной температуры плазмы [15]. Из полученных временных разверток видно, что электронная температура плазмы гадолиниевой мишени имеет небольшую задержку относительно лазерного излучения (рис. 1).

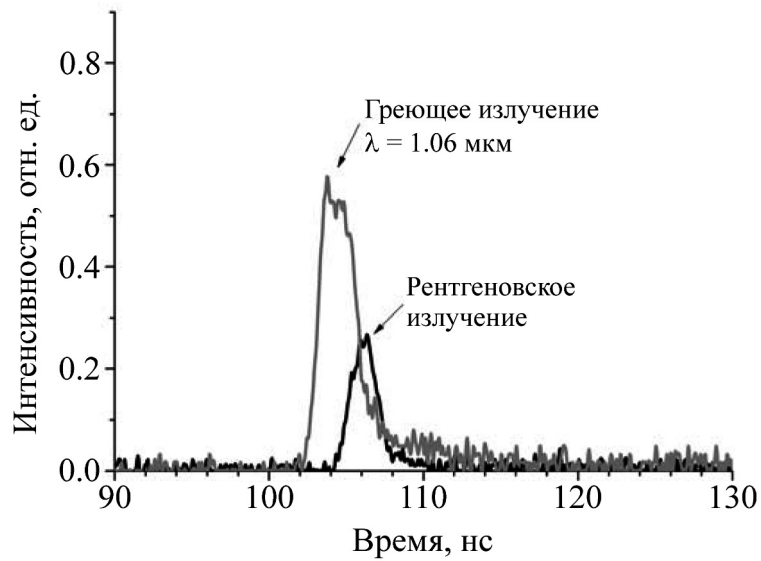


Рис. 1: Временное поведение импульсов греющего излучения и рентгеновского излучения плазмы Gd мишени, энергия лазерного импульса 7 Дж.

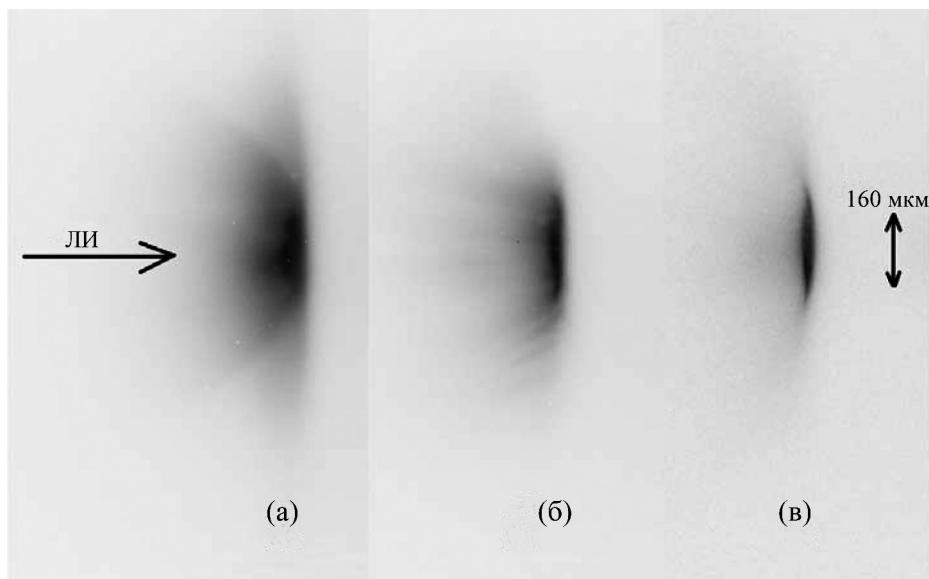


Рис. 2: Изображения плазмы в собственном излучении (ВУФ диапазон $\Delta\lambda = 18 - 20$ нм). (а) — Gd мишень, лазерная энергия 2.5 Дж; (б) — сплав Gd+Al, лазерная энергия 2 Дж; (в) — Al мишень, лазерная энергия 2.2 Дж. ЛИ — лазерное излучение.

Из полученных изображений излучения плазмы гадолиния, алюминия, сплава гадолиния и алюминия установлено, что пространственное распределение жесткого рентге-

новского излучения практически соответствует размерам фокального пятна лазерного излучения на мишени при энергиях лазерного излучения до 10 Дж. В то же время область свечения плазмы в ВУФ спектральном диапазоне при тех же энергиях лазера имеет общий размер, превышающий размеры фокального пятна в 3–4 раза (рис. 2).

Проведенное сравнение изображений плазмы алюминиевой, гадолиниевой мишени, и мишени из сплава алюминия и гадолиния показало, что излучение гадолиниевой мишени имеет выраженный неоднородный характер, видны “струи”, в то время как излучение алюминиевой мишени более равномерно по пространственным координатам. При этом интенсивность излучения алюминиевой мишени меньше, чем интенсивность излучения мишеней из гадолиния и сплава алюминия и гадолиния при близких значениях лазерной энергии.

Полученные непрерывные рентгеновские спектры с длиной волны $< 8\text{\AA}$ указывают на формирование плазмы с электронной температурой ~ 100 эВ при энергиях лазерного излучения до 10 Дж ($2 \cdot 10^{13}$ Вт/см²). Данная температура соответствует теоретическим оценкам энергии, необходимой для возбуждения ионов Gd XVII-XXI.

Кроме того, обнаружено, что в результате воздействия лазерного излучения на мишень образуется лазерная плазма с многозарядными ионами, причём степень ионизации достигает $Z = 21$ даже при небольшой энергии 2 Дж ($4 \cdot 10^{12}$ Вт/см²) [16]. Таким образом, в плазме присутствуют ионы Gd XVII-XXI, ответственные за генерацию излучения вблизи 6.7 нм.

Диагностический канал на основе спектрографа скользящего падения был использован для регистрации рентгеновских спектров многозарядных ионов лазерной плазмы. Для гадолиния, сплава гадолиния и алюминия, оксида гадолиния были получены спектры в диапазоне 2–40 нм. Особое внимание было уделено изучению спектра излучения вблизи 6.7 нм. Для всех трех видов материалов были зарегистрированы пики излучения вблизи 6.7 нм, однако форма спектров различна. Для гадолиния, сплава гадолиния и алюминия на фоне основного пика 6.7 нм присутствуют достаточно интенсивные пики в длинноволновой области спектра. В то же время для оксида гадолиния такие пики имеют значительно меньшую интенсивность, в результате чего пик вблизи 6.7 нм имеет более выраженный характер и меньшую спектральную ширину. При этом интенсивности излучения пика вблизи 6.7 нм больше для гадолиния, чем для сплава с алюминием и оксида гадолиния, при одинаковой энергии лазера.

Для изучения коэффициента конверсии лазерного излучения в энергию плазмы вблизи длины волны 6.7 нм использовался абсолютно калиброванный спектрограф

скользящего падения GIS [17]. Таким образом, были получены значения коэффициента конверсии для плазмы исследуемых мишеней, и для гадолиния коэффициент конверсии составил 0.5% при энергии лазера 2 Дж.

Были проведены эксперименты для мишени в виде сетки. Данная сетка была изготовлена из проволоки из нержавеющей стали диаметром 20 мкм, с напыленным на нее гадолинием с толщиной покрытия 10–20 мкм. Сетка имела размер ячейки с открытым пространством 70×70 мкм². Лазерное излучение направлялось в открытое пространство такой сетки так, что пятно фокусировки покрывало полностью одну ячейку сетки. Результаты показали, что такая мишень дает больший выход рентгеновского излучения вблизи 6.7 нм, чем обычная плоская мишень из гадолиния. Сравнение проводилось по интенсивностям линий спектра вблизи 6.7 нм при одинаковом значении энергии греющего излучения. Предположительно различия связаны с процессом формирования и разлета плазмы. При конфигурации мишени в виде сетки и направлении излучения в открытое отверстие размер пятна фокусировки перекрывает полностью ячейку мишени, и исследуемый материал оказывается как бы в объеме излучения. На протяжении действия лазерного импульса разлетающаяся во все стороны плазма подпитывается лазерным излучением.

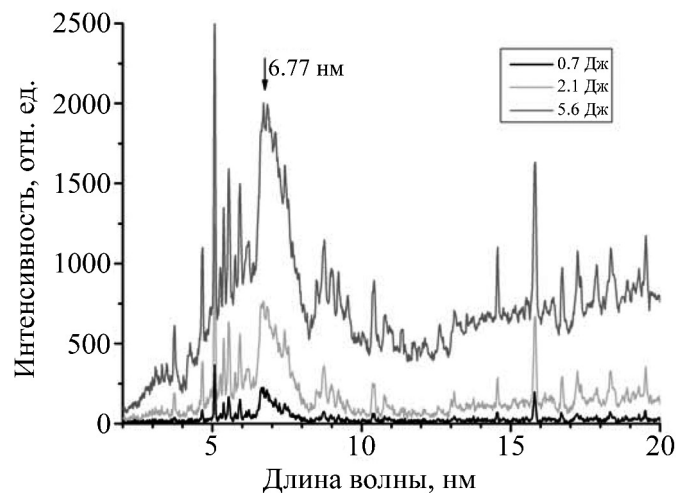


Рис. 3: Спектр излучения плазмы в диапазоне 2–40 нм при различных энергиях лазера для сплава гадолиния и алюминия.

Для мишеней из сплава Gd+Al и гадолиния были получены зависимости спектров интенсивности рентгеновского излучения от энергии импульса лазерного излучения и его длительности (рис. 3 и рис. 4). Видно, что интенсивность выходного рентгенов-

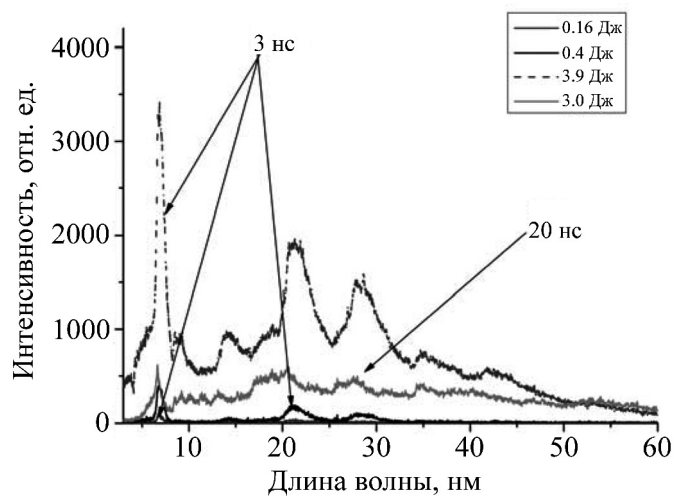


Рис. 4: Зависимости интенсивности пика излучения плазмы гадолиния близки 6.7 нм от энергии лазера.

ского излучения увеличивается с ростом интенсивности лазерного излучения. Кроме того, выход излучения плазмы в рентгеновском диапазоне уменьшается с увеличением длительности лазерного импульса. Такое поведение рентгеновского излучения плазмы обусловлено различной плотностью потока лазерного излучения, воздействующего на мишень.

Для гадолиния и сплава гадолиния и алюминия были изучены зависимости интенсивности (в относительных единицах) пика излучения плазмы вблизи 6.7 нм от энергии лазера. Показано, что мишень из гадолиния дает больший выход, чем мишень из сплава.

Заключение. В результате проведенных экспериментов было исследовано рентгеновское (в том числе, в ВУФ диапазоне) излучение плазмы различных типов гадолиниевых мишеней. Проведен сравнительный анализ результатов, полученных для плоских мишеней из гадолиния, сплава гадолиний-алюминий, алюминия и мишени в виде сетки с напыленным гадолинием. Обнаружено, что пространственное распределение жесткого излучения плазмы для плоских мишеней сконцентрировано в области, соответствующей размеру фокального пятна, а размеры излучающей области плазмы в ВУФ диапазоне значительно превосходят размеры фокального пятна. Изучение рентгеновских спектров и ионного состава показало, что формируется многозарядная плазма с электронной температурой 100 эВ и выше, и происходит генерация интенсивного излучения вблизи 6.7 нм. Интенсивность излучения вблизи 6.7 нм зависит от типа гадолиниевой

мишени (Gd, GdO, сплав Gd и Al), геометрической конфигурации мишени и энергии лазерного излучения.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 12-02-31441.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] С. Ю. Зуев, А. Е. Пестов, Н. Н. Салащенко и др., Известия РАН. Серия физическая. **77**, 1 (2013).
- [2] *EUV Sources for Lithography*, Editor Vivek Bakshi, (SPIE Press, 2006).
- [3] P. Wachulak, A. Bartnik, H. Fiedorowicz et al., AIP Conf. Proc. **1437**, 79 (2012).
- [4] D. Kilbane and G. O'Sullivan, J. Appl. Phys. **108**, 10 (2010).
- [5] S. S. Churilov, R. R. Kildiyarova, A. N. Ryabtsev et al., Phys. Scr. **80**, 045303 (2009).
- [6] G. O'Sullivan, T. Cummins, P. Dunne et al., Phys. Scr. **2013**, 014105 (2013).
- [7] B. Li, P. Dunne, T. Higashiguchi, et al., Appl. Phys. Lett. **99**, 231502 (2011).
- [8] Н. Н. Салащенко, Н. И. Чхало, Коротковолновая проекционная литография. Вестник РАН. **78**, 5 (2008).
- [9] T. Otsuka, D. Kilbane, J. White et al., Appl. Phys. Lett. **97**, 111503 (2010).
- [10] T. Higashiguchi, T. Otsuka, N. Yugami et al., Appl. Phys. Lett. **99**(19), 191502 (2011).
- [11] V. Y. Vanine, K. N. Koshelev and G.H.P.M. Swinkels, J. Phys. D: Appl. Phys. **44**, 253001 (2011).
- [12] T. Cummins, T. Otsuka, N. Yugami, et al., Appl. Phys. Lett. **100**, 061118 (2012).
- [13] S. I. Fedotov, L. P. Feoktistov, M. V. Osipov, and A. N. Starodub, Journal of Russian Laser Research **25**, 1 (2004).
- [14] В. А. Бураков, Б. Л. Васин, А. А. Кологривов и др., Препринт ФИАН №3 (Москва ФИАН, 2012).
- [15] О. Б. Ананьин, Ю. В. Афанасьев, Ю. А. Быковский, О. Н. Крохин, *Лазерная плазма. Физика и применение* (М., МИФИ, 2003).
- [16] A. A. Fronya, V. A. Burakov, A. A. Kologrivov et al., J. Phys.: Conf. Ser. **572**, 012054 (2014).
- [17] Ю. Э. Бороздин, Е. Д. Казаков, В. И. Лучин, и др., Письма в ЖЭТФ **87**, 1 (2008).

Поступила в редакцию 18 марта 2015 г.