

Рентгеноспектральные наблюдения образования микрокапельной плазмы под воздействием сверхинтенсивного лазерного излучения

Й. Фукуда¹⁾, К. Ямакава¹⁾, Й. Акахане¹⁾, М. Аояма¹⁾, Н. Иноуэ¹⁾, Х. Уеда¹⁾, Дж. Абдаллах, мл.⁺¹⁾,
Дж. Ксанак⁺¹⁾, А. Я. Фаенов^{*2)}, А. И. Магунов^{*2)}, Т. А. Пикуз^{*}, И. Ю. Скобелев^{*}, А. С. Болдарев[□],
В. А. Гасилов[□]

Advanced Photon Research Center, Japan Atomic Energy Research Institute, 619-0215 Kyoto, Japan

⁺*Theoretical Division, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545, USA*

^{*}*Центр данных по спектрам многозарядных ионов ВНИИФТРИ, 141570 Менделеево, Московская обл., Россия*

[□]*Институт математического моделирования РАН, 125047 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 10 июня 2003 г.

Измерены спектры рентгеновского излучения плазмы, создаваемой лазерным излучением с интенсивностью свыше 10^{19} Вт/см² и длительностью импульса 30 фс при взаимодействии с аргоновой струйной мишенью с большим содержанием кластеров микронных размеров. Проведены расчеты временной зависимости выхода излучения в ионах различной кратности в нестационарной кинетической модели. Получено хорошее качественное согласие с наблюдаемым интегральным по времени спектром.

PACS: 47.40.Ki, 52.25.Dg, 52.38.Ph, 52.50.Jm

1. В последние годы быстро развивается важное направление в исследовании лазерной плазмы – спектроскопия рентгеновского излучения микроплазменных источников, создаваемых при взаимодействии сверхкоротких импульсов мультитераватной мощности с кластерными мишенями. Одной из целей исследований является выяснение механизмов взаимодействия излучения с веществом в таких экстремальных условиях, что позволило бы продвинуть разработку и создание интенсивных источников когерентного и некогерентного рентгеновского излучения для различных приложений. Эксперименты с высокоинтенсивным лазерным излучением (10^{17} – 10^{18} Вт/см²) проводились, в основном, на кластерах небольшого размера диаметром 10–100 нм [1–7]. Рентгеновские спектры излучения плазмы, создаваемой в условиях больших кластеров (порядка 1 мкм), исследовались ранее при меньшей интенсивности лазерного импульса фемтосекундной длительности [8]. Генерация жесткого рентгеновского излучения и горячих электронов в микрокаплях воды под действием фемтосекундного лазерного импульса исследовалась в [9]. Проведенные исследования показали, что при облучении струйных газовых мишеней с большим содержанием кластеров среднего размера (100–200 нм) наблюда-

ется значительный выход мягкого рентгеновского излучения.

Целью настоящей работы было исследование с использованием методов рентгеновской спектроскопии высокого разрешения эмиссионных спектров плазмы, создаваемой сверхинтенсивным лазерным излучением из аргоновых кластеров, содержащих более 10^{10} атомов (микрокапель).

2. Эксперименты с аргоновыми кластерами были выполнены на 100-тераваттной Ti:сапфировой-лазерной системе в JAERI (Киото, Япония), базирующейся на технике усиления чирпированного импульса. Система рассчитана на создание 20-фс импульсов с частотой повторения 10 Гц с возможностью их фокусировки до интенсивностей порядка 10^{20} Вт/см² [10, 11]. Исходные импульсы ($\lambda_{\text{las}} = 800$ нм, $\tau_{\text{las}} = 10$ фс, частота повторения 82.7 МГц) создаются Ti:сапфировым осциллятором. Эти импульсы растягиваются по длительности до 10 нс с временной модуляцией частоты и затем усиливаются регенеративным усилителем и двумя многопроходными усилителями. Усиленные импульсы сжимаются по длительности до 20 фс вакуумным компрессором с максимальной энергией на выходе 1.9 Дж. Сжатые импульсы направляются в вакуумную камеру мишени двумя позолоченными плоскими зеркалами и фокусируются позолоченным внеосевым параболическим зеркалом $f/3$. Измеренный размер фокусного пятна на уровне $1/e^2$ был 11 мкм, что лишь на 10% превышает дифракционный предел. В гауссовом

¹⁾ Y. Fukuda, K. Yamakawa, Y. Akahane, M. Aoyama, N. Inoue, H. Ueda, J. Abdallah Jr., G. Csanak.

²⁾ e-mail: misdc@vniiftri.ru

пятне на такую область приходится приблизительно 64% энергии. При использованных в этом эксперименте длительности лазерного импульса 30 фс и энергии 300 мДж пиковая интенсивность составляла $1.2 \cdot 10^{19}$ Вт/см². Импульсы пропускались через две двойные ячейки Поккельса для подавления предимпульса. Контраст по интенсивности основного импульса относительно предшествующего за 1 нс предимпульса той же длительности был больше 10^5 .

3. Кластеры аргона создавались при сверхзвуковом расширении газа под высоким давлением (до $p = 60$ атм) в вакуум через специально сконструированное импульсное коническое сопло. Входной и выходной диаметры сопла были соответственно 0.5 и 2.0 мм, а его длина была 75 мм. Форма и размеры сопла определялись по результатам численного моделирования формирования двухфазной струи при оптимизации выхода кластеров требуемого размера ($d_{cl} \sim 1$ мкм) [12, 13].

На рис.1 приведены некоторые результаты двумерных гидродинамических расчетов двухфазной

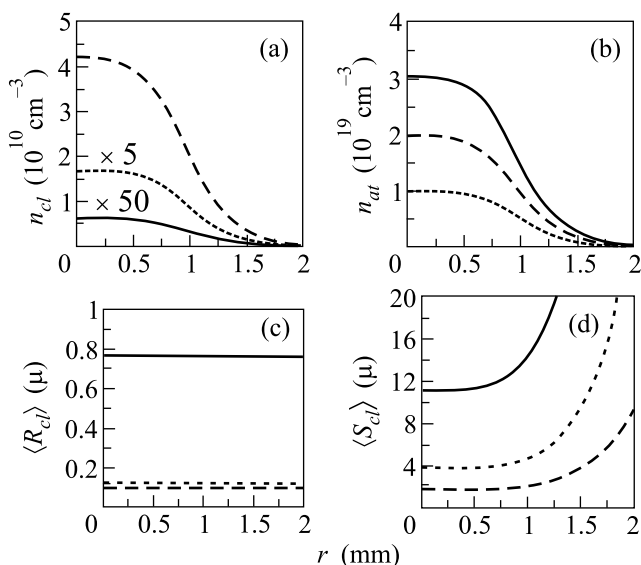


Рис.1. Рассчитанные профили параметров двухфазной аргоновой струйной мишени в зависимости от расстояния до оси струи на расстоянии 1.5 мм от выхода сопла. (a) Полная концентрация кластеров n_{cl} . (b) Концентрация атомарного газа n_{at} . (c) Средний радиус кластеров $\langle R_{cl} \rangle$. (d) Среднее расстояние между кластерами $\langle S_{cl} \rangle$. Сплошная кривая – при входном давлении 60 атм, штриховая кривая – при 40 атм, пунктирная кривая — при 20 атм

струи аргона при различных значениях давления на входе сопла. Как видно, при наибольшем давлении 60 атм средний размер кластеров резко возрастает, достигая в диаметре 1.5 мкм, причем он практиче-

ски не меняется в сечении струи. Полная концентрация кластеров и концентрация атомарного газа также почти неизменны в приосевой области сечения струи размером 1.5 мм. Такая однородность кластерной мишени важна с точки зрения ее использования как активной излучающей плазменной среды.

4. В эксперименте лазерный импульс фокусировался в струе на расстоянии 1.5 мм от выхода сопла. Рентгеновские спектры образующейся лазерной плазмы измерялись с использованием фокусирующих спектрометров с пространственным разрешением (ФСРП-1) [14–17]. Спектрометр был укомплектован сферически изогнутым кристаллом слюды ($R = 150$ мм) и вакуумно-совместимой рентгеновской камерой ПЗС (DX420-BN, ANDOR). Кристалл располагался на расстоянии 381.2 мм от плазменного источника излучения и ориентировался под брегговским углом отражения $\theta = 54.3^\circ$ к центру сферически изогнутой поверхности (четвертый порядок отражения для длины волны 0.405 нм). Плоскость отражения спектрометра была ориентирована вдоль направления распространения лазерного пучка для получения одномерного пространственного разрешения в поперечном направлении. Наблюдаемый размер плазменной области, излучающей в спектральном диапазоне линий He-подобного иона аргона и их диэлектронных спутников, в этом направлении был менее 200 мкм.

На рис.2 приведены прописи измеренных спектров при давлении газа на входе сопла $p = 60$ атм для

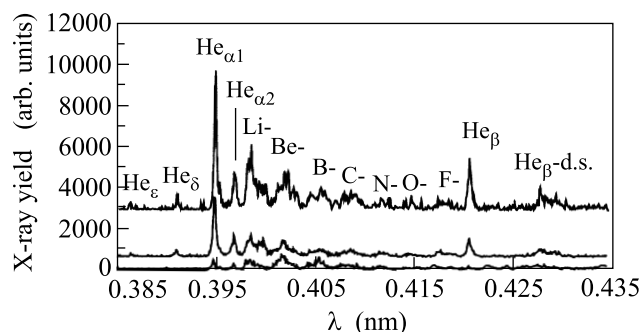


Рис.2. Результаты измерения интегрального по времени спектра микрокапельной плазмы при различных интенсивностях и контрастах лазерного импульса длительностью 30 фс. Верхняя кривая: $I = 1.2 \cdot 10^{19}$ Вт/см², $C = 2.2 \cdot 10^5$; средняя кривая: $I = 3 \cdot 10^{18}$ Вт/см², $C = 2 \cdot 10^3$; нижняя кривая: $I = 3 \cdot 10^{18}$ Вт/см², $C=50$

разных значений интенсивности и контраста лазерного импульса длительностью 30 фс. Верхняя кривая соответствует наибольшей интенсивности основного лазерного импульса $1.2 \cdot 10^{19}$ Вт/см². При этом, для уменьшения эффекта воздействия предимпульса на

кластеры, контраст основного импульса устанавливался на уровне $C = 2.2 \cdot 10^5$. В четвертом порядке отражения наблюдаются резонансная ($\text{He}_{\alpha 1}$) и интеркомбинационная ($\text{He}_{\alpha 2}$) линии перехода $1s2p-1s^2$ в He-подобном ионе аргона. Также видна спектрально разрешенная структура линий диэлектронных сателлитов в Li-подобном ионе и линий радиационных переходов из автоионизационных состояний с конфигурациями $1s2s^m2p^n$ в ионах с меньшим зарядом от Ве-подобного до Ф-подобного. В пятом порядке отражения наблюдаются также линии He-подобного иона $1snp-1s^2$ ($n = 3-6$) и диэлектронные сателлиты линии $1s3p-1s^2$ (He_{β}). Линия $n = 4$ (He_{γ}) попадает в область сателлитных линий Li-подобного иона. Средняя кривая показывает изменение спектра при пиковой интенсивности основного импульса $3 \cdot 10^{18}$ Вт/см² и контрасте $C = 2 \cdot 10^3$. Выход рентгеновского излучения уменьшился примерно пропорционально интенсивности основного импульса, несмотря на значительное уменьшение контраста. Драматическое изменение спектра наблюдается при дальнейшем уменьшении контраста до $C=50$ (нижняя кривая). Выход излучения в линиях He-подобного иона резко падает относительно свечения сателлитных линий. Это может быть обусловлено доминирующей ролью предимпульса, поскольку его интенсивность при таком контрасте почти достигает 10^{17} Вт/см². Этого вполне достаточно, чтобы ионизовать даже большие кластеры, так что они распадаются до прихода основного импульса.

Следует отметить, что при давлении газа 40 атм линии He-подобного иона и ближайших сателлитов совсем не наблюдались. Согласно результатам расчета (рис.1), при этом давлении размер образующихся кластеров почти на порядок меньше, чем при 60 атм. Таким образом, для $p=40$ атм при всех использованных значениях контраста воздействие предимпульса приводило к их разрушению.

5. Экспериментальные спектры являются интегральными по времени и пространству (в плоскости брегговского отражения). Чтобы полнее прояснить радиационную динамику плазмы, были проведены модельные расчеты линейчатого спектра с учетом временной релаксации неравновесной функции распределения электронов по энергии, сформированной сразу после воздействия фемтосекундного импульса. Для упрощения рассматривалась пространственно однородная нестационарная кинетическая модель микрокапельной плазмы

$$\frac{\partial f(E, t)}{\partial t} = St f, \quad (1)$$

где интеграл столкновений в правой части учитывает упругие столкновения электронов и их неупругие

столкновения с ионами. Пространственная однородность обосновывается сопоставлением радиационных времен жизни автоионизационных состояний наблюдаемых ионов аргона ($0.1 - 10^{-2}$ пс) с характерным временем разрушения кластера (удвоения размера), оцениваемым соотношением

$$\tau_{\text{dec}} = 1.2 \cdot 10^{-12} D_0 \sqrt{A/T_i}, \quad (2)$$

где A – атомный номер, T_i – эффективная температура ионов в килоэлектронвольтах, D_0 – начальный диаметр кластера в микрометрах. Температуру ионов можно оценить по наблюдаемой доплеровской ширине резонансной линии He-подобного аргона ($T_i = 6.7$ кэВ), так что для микронных аргоновых кластеров ($A = 18$) из (2) следует $\tau_{\text{dec}} \approx 2$ пс, что много больше времени высвечивания автоионизационных состояний в сателлитных линиях.

Численное решение (1) проводилось в интервале энергий от нуля до 10 кэВ с равномерным шагом 100 эВ. В начальный момент, соответствующий окончанию импульса, полагалось, что все атомы ионизованы до He-подобных ионов. Пороговое значение лазерной интенсивности для туннельной ионизации Na-подобного иона аргона $I_{\text{th}} = 3.6 \cdot 10^{16}$ Вт/см² [18] может достигаться даже с учетом ослабления поля внутри микрокапли. Концентрация ионов полагалась равной 10^{21} см⁻³, а остаточная энергия электронов бралась в виде узкого распределения вблизи 5 кэВ. На каждом шаге по времени (в интервале от 0 до 2 пс) рассчитывались заселенности более 3000 уровней ионов от Ne- до He-подобного решением системы уравнений баланса. При этом скорости столкновительных переходов вычислялись с получаемой функцией распределения электронов по энергии. Заселенности уровней в свою очередь использовались для вычисления спектральной зависимости выхода рентгеновского излучения в исследуемом диапазоне.

На рис.3 показан результат расчета временной зависимости суммарного выхода излучения во всех линиях ионов различной кратности. Как видно, временная зависимость излучения ионов более низкой кратности раньше выходит на насыщение, что объясняется быстрым смещением ионного состава плазмы в сторону больших зарядов в результате ионизации горячими электронами. Интегральный выход излучения He-подобного иона продолжает расти при $t > 1$ пс, поскольку при этом электроны термализовались до средней энергии менее 1 кэВ, а ионный состав вышел на стационарное значение. Естественно, что дальнейший рост выхода излучения будет ограничиваться распадом плотной плазмы.

На рис.4 приведены результаты расчета интегрального по времени спектра к моментам времени

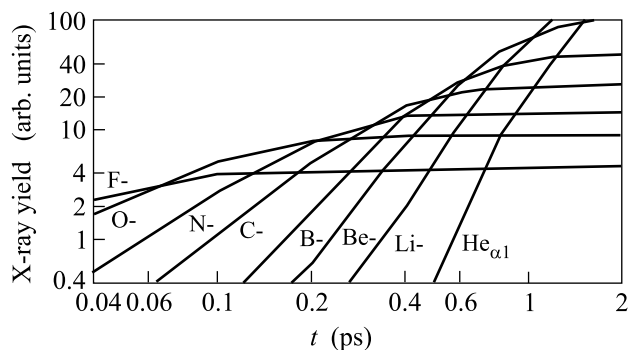


Рис.3. Результаты расчета временной зависимости выхода рентгеновского излучения для ионов аргона различной кратности, указанных в обозначениях

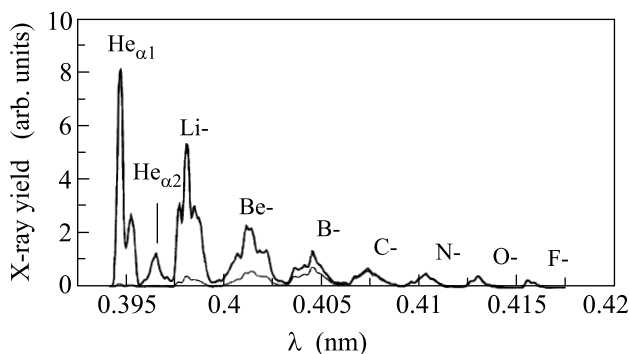


Рис.4. Результаты расчета спектра в разные моменты времени после окончания лазерного импульса. Тонкая кривая – 0.6 пс, толстая кривая – 1.4 пс

0.6 пс и 1.4 пс после окончания лазерного импульса. Как видно, спектр излучения для ионов от F- до C-подобного полностью сформировался к моменту 0.6 пс, тогда как излучение He- и Li-подобных ионов накапливается в последующее время. Эта особенность динамики формирования излучения может быть проверена в прямых измерениях с временным разрешением.

6. Таким образом, нами проведены исследования спектров излучения микрокапельной аргоновой плазмы, образующейся при воздействии лазерного импульса с длительностью 30 фс и пиковой интенсивностью более 10^{19} Вт/см². Для этого по результатам моделирования струйной мишени было изготовлено специальное сопло, позволяющее получать аргоновые кластеры больших размеров без дополнительного охлаждения клапана. Из-за сравнительно большого времени распада таких кластеров уменьшается влияние предимпульса, которое при такой высокой интенсивности приводит к разрушению малых кластеров даже при контрасте выше 10^5 . Расчеты релаксации функции распределения электронов по энер-

гии после лазерного воздействия и соответствующих ей заселенностей уровней ионов дали качественное согласие с наблюдаемым интегральным по времени спектром рентгеновского излучения микрокапельной плазмы. Особенности зависимости выхода рентгеновского излучения от времени могут быть проверены в прямых измерениях с временным разрешением.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 02-01-00708) и INTAS (грант # 01-0233), а также Департамента по энергии США (J.A. и G.C., контракт W-7405-ENG-36). Исследование, описанное в этой публикации, стало возможным частично при поддержке гранта # RP1-2328-ME-02 Американского фонда гражданских исследований и развития для независимых государств бывшего Советского Союза (CRDF).

1. A. McPherson, T. S. Luk, B. D. Thompson et al., Phys. Rev. Lett. **72**, 1810 (1994).
2. T. Ditmire, T. Donnelly, A. M. Rubenchik et al., Phys. Rev. **A53**, 3379 (1996).
3. T. Ditmire, J. Zewelback, V. P. Yanovsky et al., Nature **398**, 489 (1999).
4. V. Kumarappan, M. Krishnamurthy, D. Mathur, and L. C. Tribedi, Phys. Rev. **A63**, 023203 (2001).
5. G. C. Junkel-Vives, J. Abdallah, Jr., F. Blasco et al., Phys. Rev. **A63**, 021201R (2001).
6. J. Abdallah, Jr., A. Ya. Faenov, I. Yu. Skobelev et al., Phys. Rev. **A63**, 032706 (2001).
7. T. Shiraishi, M. Mori, and K. Kondo, Phys. Rev. **A65**, 045201 (2002).
8. E. Parra, T. Alexeev, J. Fan et al., Phys. Rev. **E62**, R5931 (2000).
9. T. D. Donnelly, M. Rust, I. Weiner et al., J. Phys. **B: At. Mol. Opt. Phys.** **34**, L313 (2001).
10. K. Yamakawa, M. Aoyama, S. Matsuoka et al., Opt. Lett. **23**, 1468 (1998).
11. K. Yamakawa and C. P. J. Barty, IEEE J. Select. Topics Quantum Electron. **6**, 658 (2000).
12. А. С. Болдарев, В. А. Гасилов, Ф. Бласко и др., Письма в ЖЭТФ **73**, 583 (2001).
13. G. C. Junkel-Vives, J. Abdallah, Jr., T. Auguste et al., Phys. Rev. **E65**, 036410 (2002).
14. A. Ya. Faenov, S. A. Pikuz, A. I. Erko et al., Phys. Scr. **50**, 333 (1994).
15. T. A. Pikuz, A. Ya. Faenov, S. A. Pikuz, et al., J. X-Ray Sci. Technol. **5**, 323 (1995).
16. И. Ю. Скобелев, А. Я. Фаенов, Б. А. Брюнеткин и др., ЖЭТФ **108**, 1263 (1995).
17. B. K. Young, A. L. Osterheld, D. F. Price et al., Rev. Sci. Instrum. **69**, 4049 (1998).
18. М. В. Аммосов, Н. Б. Делоне, В. П. Крайнов, ЖЭТФ **91**, 2008 (1986).