

Повышение выхода жестких рентгеновских квантов при взаимодействии фемтосекундного лазерного излучения на хром-форстерите с кластерами Хе

А. П. Голубев¹, В. М. Гордиенко^{1а}, М. С. Джиджоев¹, И. А. Макаров¹, Д. Н. Трубников^{2б}

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. ¹ Физический факультет, кафедра общей физики и волновых процессов. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: ^а gord@phys.msu.ru. ² Химический факультет, кафедра физической химии. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 3. E-mail: ^б tdu@phys.chem.msu.ru.

Проведены эксперименты по взаимодействию фемтосекундного лазерного излучения (1240 нм, 140 фс, 10^{16} Вт/см²) с кластерным пучком Хе в бинарной смеси Хе–Не. Получено сужение кластерного пучка Хе и увеличение выхода рентгеновских квантов в области около 4 кэВ при формировании кластеров Хе в присутствии легкого носителя Не. Эффективность генерации рентгеновского излучения составила порядка 10^{-8} .

PACS: 52.38., 36.40.

Ключевые слова: кластеры, кластерная плазма, рентгеновское излучение, фемтосекундное лазерное излучение.

Статья поступила 03.10.2008, подписана в печать 25.11.2008.

Воздействие фемтосекундного лазерного импульса сверхвысокой интенсивности ($I > 10^{16}$ Вт/см²) на кластеры позволяет формировать плазму, обладающую уникальными свойствами. Образующаяся наноразмерная плазма твердотельной плотности представляет собой эффективный источник рентгеновского излучения, гармоник лазерного излучения, высокоэнергетических ионов и нейтронов [1].

В проблеме повышения эффективности взаимодействия лазерного излучения с кластерной струей наряду с параметрами фемтосекундной установки определяющую роль играет концентрация больших (10^6 атомов) кластеров. В большинстве экспериментов типичная средняя плотность кластеров в области взаимодействия составляет $10^9 - 10^{10}$ см⁻³. При этом среднее расстояние между кластерами оказывается порядка 10 мкм и сравнимо с диаметром фокальной перетяжки. Поэтому для получения высоких абсолютных выходов используют большой объем перетяжки. Число методов управления параметрами кластерного пучка мало и обычно ограничивается применением сверхвысоких давлений либо охлаждением сопла до криогенных температур. Практическая реализация этих методов в ряде случаев затруднена. В работах [2, 3] для повышения концентрации кластеров в приосевой области предложено использовать смесь тяжелых и легких атомов — смесь молекул азота с гелием [3], при этом получено существенное возрастание выхода рентгеновского излучения в мягкой области спектра.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния легкого газа-носителя Не на параметры кластерного пучка Хе в интересах увеличения выхода рентгеновских фотонов при воздействии на кластерный пучок сверхинтенсивного ($I \sim 10^{16}$ Вт/см²) фемтосекундного излучения лазера на хром-форстерите.

Генерация рентгеновского излучения исследовалась на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1. Условным элементом установки для создания кластерных пучков является сопловой блок, включающий быстродействующий импульсный клапан, стеклянное коническое сопло с диаметром критического

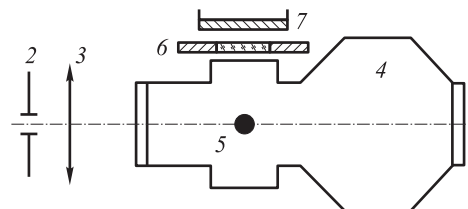


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — излучение лазерной системы на кристалле Cr:forsterit, 2 — диафрагма, 3 — объектив $F = 6$ см, 4 — вакуумная камера, 5 — кластерный пучок (распространяется перпендикулярно плоскости рисунка), 6 — бериллиевый фильтр, 7 — рентгеновский ФЭУ со сцинтиллятором NaI

сечения 500 мкм, углом полуоткрытия порядка 5° и длиной 30 мм. В экспериментах был использован клапан на основе биморфной керамики, разработанный в лаборатории молекулярных пучков химического факультета МГУ. Были определены условия, обеспечивающие моноимпульсный режим работы сопла. Давление в камере поддерживалось на уровне 10^{-3} торр. Клапан работал как в однократном режиме, так и с частотой 10 Гц.

Для оценки размера кластеров, которые можно получить на используемой установке, использовалась эмпирическая формула О. Хагена [4], характеризующая кластеризацию через параметр Хагена $\Gamma = \Gamma(k_0, d, \alpha, p_0, T_0)$, где k_0 — константа, зависящая от типа газа ($k_0 = 5500$ для Хе), d — диаметр критического сечения сопла (в мкм), α — угол полуоткрытия сопла (5°), p_0 — давление в камере высокого давления (торр), T_0 — температура газа в камере высокого давления. Параметр Хагена позволяет оценить число атомов N в кластере: $N = 100(\Gamma/1000)^{1.8}$ [5]. Оценку концентрации кластеров можно сделать исходя из размера кластера, расчетной концентрации атомов газа и данных о параметре сухости — количестве газа, испытывающего кластеризацию. Численные решения системы газодинамических и кинетических уравнений показывают [6], что кластеризация подвергается 10–20% от общего числа частиц. Расчеты

показали, что в условиях эксперимента (при давлении 2–16 атм и температуре 293 К) возможно получение кластеров размером 10^4 – 10^6 атомов при концентрации 10^9 – 10^{10} см $^{-3}$.

Диагностика кластерного пучка Хе осуществлялась методом рэлеевского рассеяния излучения эксимерного ХеСл-лазера (308 нм, 10 мДж, 30 нс). Зондирование производилось на расстоянии 10 мм от среза сопла. В результате получена степенная зависимость сигнала рэлеевского рассеяния от давления ксенона p_0 с показателем 2.7 в диапазоне 2–6 атм, сменяющаяся линейной в области давлений 6–16 атм.

В экспериментах для диагностики кластерного пучка использовался быстродействующий пироэлектрический приемник (ПЭП) МГ32 [7]. Отклик ПЭП на пучок атомарного газа является положительным и отражает временной профиль газового потока. При падении на ПЭП кластерного пучка сигнал становится отрицательным (рис. 2). Регистрируемое ПЭП формирование кластеров Хе начинается уже при давлении $p_0 = 1.8 \pm 0.2$ атм и хорошо коррелирует со значением, полученным из экспериментов по рэлеевскому рассеянию.

Для достижения условий генерации рентгеновского излучения (необходимая интенсивность лазерного излучения порядка 10^{16} Вт/см 2) применялся специальный объектив с фокусным расстоянием $F = 6$ см. Измеренный диаметр перетяжки составил 5 мкм, а объем перетяжки, оцененный по формулам для гауссовского пучка, был 30 мкм 3 . Регистрация рентгеновского излучения осуществлялась ФЭУ со сцинтиллятором NaI и полосовым фильтром из бериллия, отсекающим излучение с энергией меньше 2 кэВ. Геометрический фактор приема был около $5 \cdot 10^{-3}$.

Основные эксперименты выполнены со смесью Хе с легким газом-носителем Не. Нами было впервые проведено исследование пространственного распределения концентрации кластеров по выходу рентгеновского излучения для смеси Хе–Не в соотношении 2 : 1 (суммарное давление 15 атм). При постоянной мощности лазерного излучения фокальная перетяжка сканировалась вдоль пути распространения пучка с шагом 500 мкм (рис. 3). Видно, что в смеси с неоном полуширина распределения сужается от 3.2 до 2 мм, а интенсивность на оси возрастает в 1.7 раза. Ассиметричная форма кривой рас-

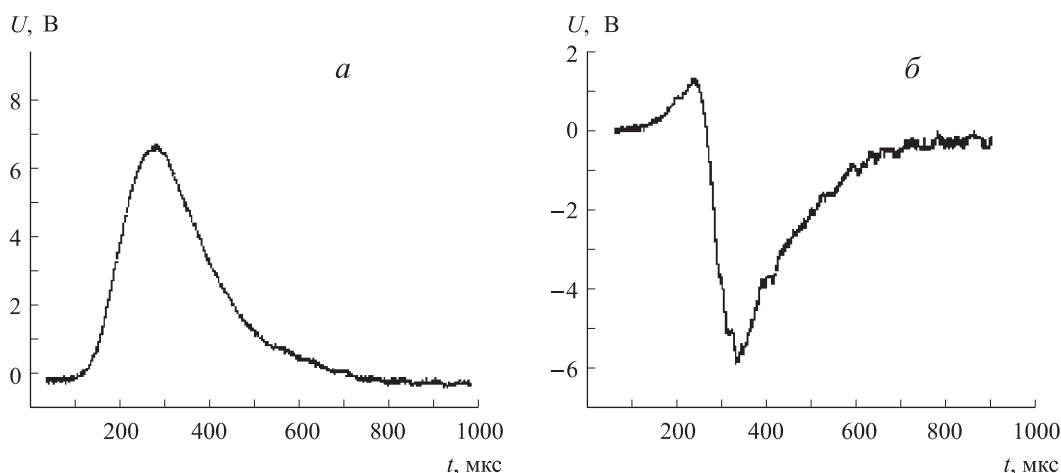


Рис. 2. Вид сигнала ПЭП, характеризующий газовую струю: а — расширение Не при давлении $p_0 = 3$ атм, б — расширение Хе при давлении $p_0 = 3$ атм

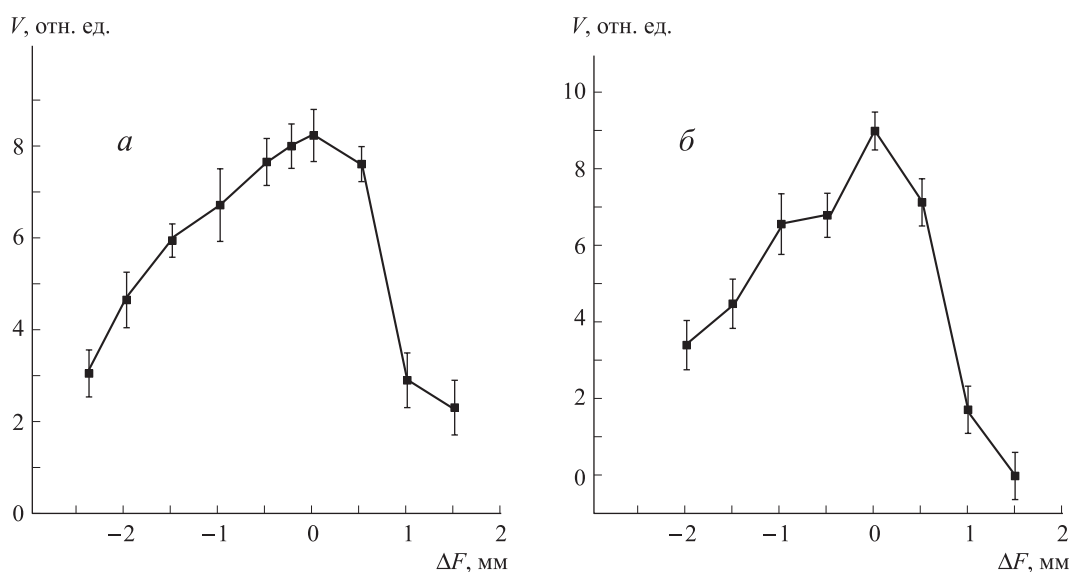


Рис. 3. Выход (V) рентгеновского излучения по сечению кластерного пучка, ΔF — смещение фокусирующего объектива: а — давление Хе $p_0 = 10$ атм, б — смесь Хе–Не (1 : 2), давление $p_0 = 15$ атм

пределения вызвана качеством изготовления конического сопла.

В эксперименте получено, что число излученных рентгеновских фотонов с энергией около 4 кэВ (L_{α} -линия Xe) с учетом геометрического фактора составило величину порядка 10^4 . Значение спектральной яркости, рассчитанное как $B = N_{ph}/(tS\Delta\Omega\Delta\nu/\nu)$, где $t \sim 1$ пс — время излучения рентгеновских фотонов, $S \sim 400$ мкм² — площадь источника излучения, $\Delta\Omega = 4\pi$ — телесный угол, $\Delta\nu/\nu \sim 0.2$ — спектральный диапазон, оказалось порядка 10^{13} фотон/(с·мкм²·ср). Эффективность выхода рентгеновского излучения 10^{-8} . Однако прямое сравнение эффективности с литературными данными [8] затруднительно в силу разных условий экспериментов. Ввиду использования режима жесткой фокусировки, при котором величина перетяжки мала, для эффективной генерации рентгеновского излучения представляется целесообразным сравнить эффективности, нормированные на объем перетяжки. В этом случае полученные значения оказываются в 2–3 раза меньше, что можно объяснить наличием косых скачков уплотнения по течению газовой струи.

Таким образом, в работе показано, что наличие легкого газа-носителя в смеси с тяжелым газом, испытывающим кластеризацию, ведет к сужению кластерного пучка, увеличению концентрации кластеров на оси и к соот-

ветствующему увеличению выхода рентгеновского излучения. В дальнейшем представляет интерес исследование процессов кластеризации, возбуждения кластеров и генерации рентгеновского излучения в смеси легких атомов и многоатомных молекул.

Авторы выражают благодарность Ф.И. Паначеву за техническую поддержку работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-02-90259).

Список литературы

1. Крайнов В.П., Смирнов Б.М., Смирнов М.Б. // УФН. 2007. **177**. С. 953.
2. Diimire T., Donnelly T., Rubenchik A.M. et al. // Phys. Rev. A. 1996. **53**. P. 3379.
3. Namba S., Hasegawa N., Nagashima K. et al. // Phys. Rev. A. 2006. **73**. P. 013205.
4. Hagen O.F. // Rev. Sci. Instrum. 1992. **63**, N 4. P. 2374.
5. Dorchies F. et al. // Phys. Rev. A. 2003. **68**. P. 023201.
6. Boldarev A.S., Gasilov V.A., Faenov A.Ya. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2006. **77**. P. 083112.
7. Макаров Г.Н. // УФН. 2006. **176**, № 2. С. 121.
8. Prigent C., Adoui L., Lamour E. et al. // arxiv.org/pdf/physics/0507042.pdf. 2005.

Enhancement of hard X-ray yield under interaction of Cr:forsterite femtosecond laser radiation with Xe-clusters

A. P. Golubev¹, V. M. Gordienko^{1a}, M. S. Djidjoev¹, I. A. Makarov¹, D. N. Trubnikov^{2b}

¹Department of General Physics and Wave Processes, Faculty of Physics;

²Department of Physical Chemistry, Faculty of Chemistry,

M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^agord@phys.msu.ru, ^btdn@phys.chem.msu.ru.

Experiments on interaction of femtosecond laser radiation (1240 nm, 140 fs, 10^{16} W/cm²) with Xe-cluster beam in binary mixture Xe–Ne were carried out. Xe-clusters were formed in the presence of light carrier gas Ne and narrowing of Xe-cluster beam and X-ray (about 4 keV) yield enhancement was registered. X-ray generation efficiency appeared to be about 10^{-8} .

PACS: 52.38., 36.40.

Keywords: cluster, cluster plasma, X-ray, femtosecond laser irradiation.

Received 3 October 2008.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 2(2009).

Сведения об авторах

1. Голубев Александр Павлович — аспирант; e-mail: lamma@bk.ru.

2. Гордиенко Вячеслав Михайлович — д. ф.-м. н., профессор; тел.: 939-53-18, e-mail: gord@phys.msu.ru.

3. Джиджоев Мурат Суликоевич — к. ф.-м. н., вед. научн. сотр.; тел.: 939-53-18, e-mail: djidjoevms@mail.ru.

4. Макаров Иван Андреевич — к. ф.-м. н., инженер; тел.: 939-53-18, e-mail: makarov@femtorsv.phys.msu.ru.

5. Трубников Дмитрий Николаевич — д. х. н., профессор; тел.: 939-45-60, e-mail: tdn@phys.chem.msu.ru.