

Генерация рентгеновского излучения на L-переходах атомов иода при возбуждении крупных кластеров CF_3I излучением фемтосекундного лазера

В.М.Гордиенко, М.С.Джиджоев, И.А.Жвания, А.В.Прибытков, Д.Н.Трубников, Д.О.Федоров

Предлагается использовать кластеры многоатомных молекул с относительно низкой энергией ионизации (~ 10 эВ) для эффективной генерации рентгеновского излучения. Впервые зарегистрирована генерация характеристического рентгеновского излучения на L-переходах атомов иода при возбуждении интенсивным излучением фемтосекундного лазера молекулярных кластеров CF_3I , составляющих малую примесь в газе-носителе Ar. Эффективность генерации рентгеновского излучения достигает $\sim 10^{-6}$ (при выходе $\sim 10^7$ фотон/имп.), что на порядок превышает полученную нами эффективность в случае кластеров аргона при сопоставимых условиях.

Ключевые слова: фемтосекундный лазер, молекулярные кластеры, характеристическое рентгеновское излучение.

Процесс генерации жесткого (более 2 кэВ) характеристического рентгеновского излучения, возникающего в результате взаимодействия интенсивного ($I > 10^{15}$ Вт/см²) фемтосекундного лазерного излучения с кластерными мишенями, в последние годы является предметом активных исследований [1, 2]. Характеристическое рентгеновское излучение кластерной наноплазмы в диапазоне 2–4 кэВ может быть использовано для задач радиографии [3], т. к. излучение кластерной наноплазмы имеет более высокий контраст по сравнению с рентгеновским излучением высокотемпературной плазмы твердотельных мишеней. Выход рентгеновского излучения возрастает при увеличении как интенсивности и контраста лазерного излучения, так и размеров кластеров [4].

Одним из методов создания крупных кластеров для эффективного получения характеристического рентгеновского излучения является использование смеси, состоящей из кластеризующегося молекулярного газа (CO_2 [5], SF_6 [6]) и атомарного, относительно легкого газа-носителя с более высокой концентрацией. В этом случае из-за большой теплоемкости многоатомных молекул, связанной с большим числом их низколежащих колебательно-вращательных уровней и с большей теплотой конденсации, использование атомов газа-носителя позволяет осуществить эффективную термализацию молекул, способствуя тем самым и их более эффективной кластеризации. Очевидно, что эффективность генерации рентгеновского излучения также существенно зависит от

концентрации электронов, возникающих в результате начальной ионизации кластера лазерным излучением. Поэтому можно ожидать, что для кластеров многоатомных молекул с относительно низкой энергией ионизации, сопоставимых по размерам с атомарными кластерами, которые обычно используются в экспериментах, концентрация электронов в наноплазме молекулярных кластеров будет существенно выше. Таким образом, при достижении на переднем фронте лазерного импульса пороговой интенсивности для первого потенциала ионизации в элементарной молекулярной ячейке, определяемой радиусом Вигнера–Зейтца, окажется существенно больше электронов, чем в атомной. Генерация характеристического рентгеновского излучения в диапазоне энергий, превышающих 2 кэВ, индуцированного взаимодействием фемтосекундного лазерного излучения с крупными молекулярными кластерами, изучалась до сих пор лишь на примере процессов с участием K-переходов в атомах серы (кластеры SF_6 [6]).

В настоящей работе впервые получена генерация характеристического рентгеновского излучения на L-переходах атомов иода при возбуждении крупных кластеров CF_3I фемтосекундным лазерным излучением с интенсивностью $I \leq 10^{16}$ Вт/см². Выбор молекулярного газа CF_3I обусловлен относительно низким порогом ионизации (~ 10 эВ) этих молекул и тем обстоятельством, что они имеют характеристические рентгеновские линии вблизи 4 кэВ (4 кэВ для L_α -линии и 4.2 кэВ для L_β -линии). Характеристическая K-линия аргона соответствует энергии ~ 3 кэВ. Поэтому данные по выходу рентгеновского излучения при взаимодействии лазерного излучения с кластерами аргона удобно использовать в качестве опорных при проведении сравнительных экспериментов. В [7] наблюдалась кластеризация молекул CF_3I в смеси с Ar (в соотношении 1 : 15) при общем давлении газа над клапаном импульсного сопла ~ 0.5 атм. Можно ожидать, что в смеси газов такого состава, находящейся при более высоких давлениях, при газодинамическом истечении в вакуум будут легко образовываться крупные молекулярные кластеры. И это также будет способствовать эффективной генерации характеристического рентгеновского излучения.

В.М.Гордиенко, М.С.Джиджоев, И.А.Жвания, Д.О.Федоров. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; e-mail: gord@phys.msu.ru, djidjoevms@mail.ru, zhvania@mail.ru, **А.В.Прибытков, Д.Н.Трубников.** Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, химический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; e-mail: andkras@gmail.com, tdn@phys.chem.msu.ru

Поступила в редакцию 23 октября 2012 г.

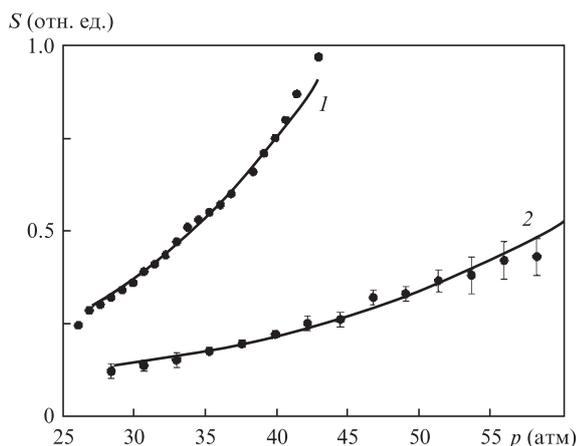


Рис.1. Зависимости интенсивности рэлеевского рассеяния S в газокластерных струях $\text{CF}_3\text{I}-\text{Ar}$ (1) и Ar (2) от давления газа p над клапаном. Кривые – аппроксимация степенными функциями.

В наших экспериментах использовалось излучение титан-сапфирового лазера ($\lambda \approx 800$ нм, $\tau = 60$ фс, $W \sim 5$ мДж, наносекундный энергетический контраст $\sim 10^6$, диаметр пучка 1 см), которое фокусировалось линзой с фокусным расстоянием $f = 20$ см в газокластерную струю на расстоянии 2 мм от среза сопла. Регистрация рентгеновских спектров осуществлялась с помощью кремниевого pin-диода Amptek с разрешением по энергии ~ 200 эВ. Для измерения интегрального выхода рентгеновского излучения с энергией свыше 2 кэВ использовался рентгеновский ФЭУ. Генерация кластеров происходила при сверхзвуковом расширении газа, находящегося под давлением, через коническое сопло в вакуум. Детальное описание установки приведено в [6]. Кластеризация газа определялась методом рэлеевского рассеяния лазерного излучения, которым служила вторая гармоника YAG: Nd-лазера с модуляцией добротности.

На рис.1 приведены зависимости интенсивности рэлеевского рассеяния от давления смеси над клапаном импульсного сопла. Эти зависимости аппроксимируются степенными функциями с показателями степени 3.2 (для смеси $\text{CF}_3\text{I}-\text{Ar}$) и 3 (для Ar), что свидетельствует об эффективном процессе кластеризации [8]. Однако интенсивность рэлеевского рассеяния кластерами CF_3I в смеси $\text{CF}_3\text{I}-\text{Ar}$ существенно превышает соответствующую интенсивность в чистом аргоне. Поскольку интенсивность рэлеевского рассеяния растет с увеличением размера и концентрации кластеров, а концентрация кластеризуемого вещества в смесях приблизительно на порядок ниже, чем в чистом аргоне, можно сделать вывод о том, что создаваемые молекулярные кластеры, как и предполагалось, крупнее аргоновых. Согласно оценке по формуле Хагены [8], размер аргоновых кластеров составил ~ 30 нм при сопоставимых давлениях. Нами установлено, что максимальный выход интегрального рентгеновского излучения для кластеров как CF_3I , так и Ar достигался

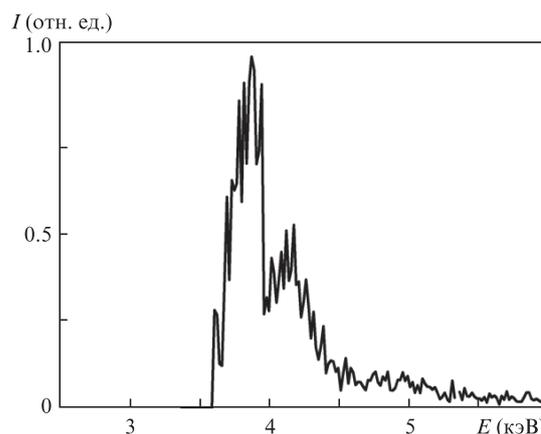


Рис.2. Спектр рентгеновского излучения для кластеров CF_3I .

при положительно chirпированном лазерном импульсе длительностью ~ 300 фс, сфокусированном в область переднего края газокластерной струи. Лазерному излучению с длительностью импульсов 300 фс соответствовала интенсивность излучения в вакууме 2×10^{15} Вт/см².

На рис.2 показан рентгеновский спектр излучения кластеров CF_3I . Низкоэнергетические спектральные компоненты «задавлены» набором фильтров из бериллия (толщиной 100 мкм) и алюминия (толщиной 22 мкм), а также слоем воздуха (8 см). Аппроксимация высокоэнергетической компоненты тормозного излучения экспоненциальной зависимостью позволяет грубо оценить среднюю энергию электронов в кластерной наноплазме, которая оказывается равной ~ 1.2 кэВ. Контраст (отношение числа квантов в максимуме спектра характеристического излучения к числу квантов тормозного излучения в данном энергетическом диапазоне) составляет ~ 10 . Эффективность генерации рентгеновского излучения достигает $\sim 10^{-6}$ (при выходе $\sim 10^7$ фотон./имп.), что на порядок превышает полученную нами эффективность в случае кластеров аргона.

Работа поддержана грантами РФФИ № 11-02-00585 и 11-02-12197, а также Минобрнауки РФ № 8393.

1. Крайнов В.П., Смирнов Б.М., Смирнов М.Б. *УФН*, **177**, 953 (2007).
2. Hayashi Y., Pirozhkov A.S., Kando M. *Opt. Lett.*, **36** (9), 1614 (2011).
3. Chen L.M., Kando M., Kotaki J.M., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **90** (21), 211501 (2007).
4. Dorchies F., Caillaud T., Blasco F., et al. *Phys. Rev. E*, **71**, 066410 (2005).
5. Faenov A.Y., Fukuda Y., Pikuz T.A., et al. *J. Korean Phys. Soc.*, **56** (1), 279 (2010).
6. Гордиенко В.М., Джиджоев М.С., Жвания И.А. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **91** (7), 355 (2010).
7. Апатин В.М., Компанец В.О., Лохман В.Н. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **94** (7), 610 (2011).
8. Ditmire T., Donnelly T., Rubenchik A.M., et al. *Phys. Rev. A*, **53** (5), 3379 (1996).