

Увеличение выхода рентгеновских фотонов при двухимпульсном воздействии лазерным излучением на твердотельную мишень в воздухе

В.М.Гордиенко, М.С.Джиджоев, И.А.Жвания, И.А.Макаров

Предложена схема эффективной генерации жесткого рентгеновского излучения при двухимпульсном лазерном воздействии излучением нано- и фемтосекундной длительности на твердотельную мишень, находящуюся в воздухе. Обнаружено возрастание выхода жесткого рентгеновского излучения (~ 17 раз) в двухимпульсном режиме воздействия по сравнению с одноимпульсным (фемтосекундным). Оптимальное время задержки между импульсами составило 10 мкс.

Ключевые слова: двухимпульсное воздействие, рентгеновское излучение, фемтосекундная лазерная плазма.

При воздействии высокоинтенсивным ($I > 10^{15}$ Вт/см²) фемтосекундным лазерным излучением на твердотельную мишень в вакууме формируется горячая плазма. Такая плазма является источником некогерентного жесткого рентгеновского излучения, выход которого существенным образом зависит от интенсивности воздействующего излучения [1, 2]. В случае импульсно-периодического воздействия высокоинтенсивным фемтосекундным лазерным излучением на одну и ту же область мишени происходит формирование глубоких кратеров (каналов), которое сопровождается значительным ростом как выхода жесткого рентгеновского излучения, так и температуры горячей электронной компоненты плазмы в канале [3, 4]. Генерация горячей фемтосекундной лазерной плазмы в подобных схемах, но в присутствии газовой среды сопряжена с возникающими трудностями доставки высокоинтенсивного лазерного излучения на мишень из-за нелинейных процессов самовоздействия [5]. Создание приповерхностной области разреженного газа («огненного шара») в результате предварительного воздействия на поверхность мишени, например, наносекундными лазерными импульсами [6–8] может быть способом подавления процессов самовоздействия фемтосекундного лазерного излучения.

Целью настоящего письма является изложение результатов экспериментов по эффективной генерации горячей микроплазмы при периодическом двухимпульсном (нано- и фемтосекундном) лазерном воздействии на твердотельную мишень в воздухе.

В экспериментах использовалось излучение эксимерного ХеСl-лазера ($E \approx 5$ мДж, $\lambda = 308$ нм, $\tau \sim 30$ нс) и фемтосекундной лазерной системы на хром-форстерите ($E \approx 400$ мкДж, $\lambda = 1240$ нм, $\tau \sim 110$ фс) [9]. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Излучение эксимерного лазера фокусировалось на алюминиевую мишень тол-

щиной 100 мкм под углом 45° линзой с фокусным расстоянием $F = 28$ см. Это излучение формировало на поверхности мишени кратер диаметром ~ 300 мкм. Интенсивность излучения I на поверхности мишени оценивалась как $\sim 10^8$ Вт/см². Фемтосекундное лазерное излучение фокусировалось в центральную область пятна по нормали к мишени с помощью объектива с фокусным расстоянием 6 см в пятно диаметром ~ 5 мкм, что обеспечивало «вакуумную» интенсивность $I \sim 10^{16}$ Вт/см². Это излучение поступало на мишень с регулируемой задержкой 5–100 мкс после прихода наносекундного импульса. Для юстировки использовалось излучение гелий-неонового лазера. Жесткое рентгеновское излучение регистрировалось с помощью сцинтилляционного NaI-детектора на базе ФЭУ-119, на входе которого располагался бериллиевый фильтр толщиной 100 мкм.

В результате проведенных экспериментов была изменена зависимость выхода жесткого рентгеновского излучения (суммарная энергия квантов $E_\gamma > 2.5$ кэВ) от но-

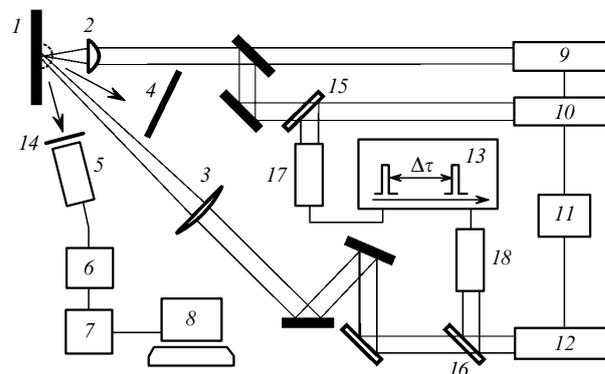


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – мишень; 2 – объектив ($F = 6$ см); 3 – линза ($F = 28$ см); 4 – экран для визуализации спекл-картин; 5 – фотоэлектронный умножитель; 6 – зарядово-чувствительный усилитель; 7 – аналогово-цифровой преобразователь; 8 – компьютер; 9 – гелий-неоновый лазер; 10 – хром-форстеритовый лазер; 11 – блок управления задержкой между импульсами; 12 – эксимерный ХеСl-лазер; 13 – осциллограф; 14 – бериллиевый фильтр; 15, 16 – стеклянная и кварцевая отклоняющие пластины; 17, 18 – детекторы лазерного излучения.

В.М.Гордиенко, М.С.Джиджоев, И.А.Жвания, И.А.Макаров. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет и Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: gord@femto.phys.msu.ru

Поступило в редакцию 31 мая 2007 г.

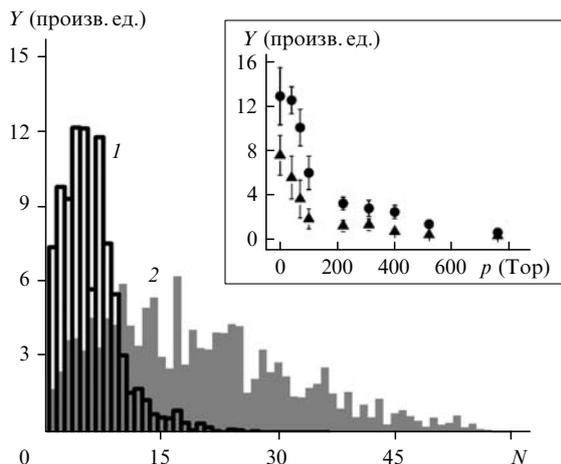


Рис.2. Зависимости выхода жесткого рентгеновского излучения Y от номера «фемтосекундного» выстрела N при двухимпульсном (1) и одноимпульсном (2) лазерном воздействии на алюминиевую мишень в воздухе. Масштаб диаграммы 2 увеличен в 5 раз. На вставке – зависимости выхода жесткого рентгеновского излучения Y фемтосекундной лазерной плазмы алюминия на поверхности мишени (▲) и в канале при максимальном выходе Y (●) от давления воздуха p .

мера «фемтосекундного» выстрела при двухимпульсном (нано- и фемтосекундном) и одноимпульсном (фемтосекундном) воздействии на мишень (рис.2). Оптимальная задержка между импульсами Δt составила ~ 10 мкс. После первого выстрела было обнаружено увеличение выхода жесткого рентгеновского излучения Y в 17 раз по сравнению с одноимпульсным режимом воздействия. Такое увеличение в двухимпульсном режиме воздействия на мишень свидетельствует о возрастании интенсивности излучения на поверхности мишени более чем в 4 раза по сравнению с одноимпульсным режимом в силу зависимости $Y \sim I^2$ [4]. В мишени возникал канал, глубина которого (и выход из него рентгеновского излучения в виде «пачки» импульсов) зависела от номера лазерного выстрела [4]. При этом максимум выхода жесткого рентгеновского излучения в «пачке» в режиме двухимпульсного воздействия на мишень возрастал примерно в 8 раз. Сопоставление полученных результатов с ранее измеренными зависимостями выхода жесткого рентгеновского излучения от давления газовой среды (см. вставку на рис.2) позволило оценить снижение плотности газа в канале и в приповерхностной области в 19 и 8 раз соответственно. Оценка степени разрежения газа в приповерх-

ностной области мишени находится в хорошем согласии с данными известных работ [5–7], в которых при сопоставимых параметрах наносекундного лазерного излучения ($\tau \sim 10$ нс, $I \sim 10^8$ Вт/см²) достигалась плотность газа в «огненном шаре» $\rho \sim (0.02 - 0.04)\rho_{\text{atm}}$ (где ρ_{atm} – плотность воздуха при нормальных условиях).

Наблюдалось уменьшение числа импульсов в «пачке» в двухимпульсном режиме по сравнению с одноимпульсным и достижение максимума выхода жесткого рентгеновского излучения в канале за меньшее число выстрелов. Это обстоятельство, по-видимому, связано с увеличением средней скорости фемтосекундной лазерной абляции из-за роста интенсивности воздействующего излучения при «вакуумной откачке» и быстрой перфорации мишени.

Таким образом, продемонстрирована возможность эффективного подавления нелинейных процессов самодействия высокоинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения при создании горячей микроплазмы в приповерхностной области твердотельной мишени, находящейся в воздухе. Полученные результаты могут применяться для разработки экспресс-методов рентгеновского спектрального анализа материалов с использованием характеристического рентгеновского излучения из фемтосекундной лазерной плазмы [10] в отсутствие вакуумной камеры.

Настоящая работа поддержана грантом РФФИ № 05-02-16476.

1. Андреев А.В., Гордиенко В.М., Савельев А.Б. *Квантовая электроника*, **31** (11), 941 (2001).
2. Лютер-Дэвис Б., Гамалий Е.Г., Янжи Ванг, Роде А.В., Тихончук В.Т. *Квантовая электроника*, **19** (4), 317 (1992).
3. Гордиенко В.М., Макаров И.А., Раков Е.В., Савельев А.Б. *Квантовая электроника*, **35** (6), 487 (2005).
4. Gordienko V.M., Makarov I.A., Rakov E.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6606**, 66060S (2007).
5. Букин В.В., Воробьев Н.С., Гарнов С.В., Конов В.И., Лозовой В.И., Малютин А.А., Щелев М.Я., Ятковский И.С. *Квантовая электроника*, **36** (7), 638 (2006).
6. Конов В.И., Никитин П.И., Прохоров А.М., Силенок А.С. *Письма в ЖЭТФ*, **39** (11), 501 (1984).
7. Першин С.М. *Квантовая электроника*, **16** (12), 2518 (1989).
8. Климентов С.М., Пивоваров П.А., Конов В.И., Брайтлинг Д., Даусингер Ф. *Квантовая электроника*, **34** (6), 537 (2004).
9. Gordienko V.M., Ivanov A.A., Podshivalov A.A., Savel'ev A.B., Rakov E.V. *Laser Phys.*, **16** (3), 427 (2006).
10. Takeyasu N., Hirakawa Y., Imasaka T. *Rev. Sci. Instr.*, **72** (10), 3940 (2001).