

## Подповерхностная генерация жесткого рентгеновского излучения при импульсно-периодическом воздействии на мишень из ВаF<sub>2</sub> излучением фемтосекундного хром-форстеритового лазера при интенсивностях ниже 10<sup>15</sup> Вт/см<sup>2</sup>

В.М.Гордиенко, И.А.Макаров, Е.В.Раков, А.Б.Савельев

*Обнаружен эффект подповерхностной генерации жесткого рентгеновского излучения ( $E_\gamma > 20$  кэВ) в процессе формирования канала последовательностью лазерных импульсов фемтосекундной длительности в мишени из ВаF<sub>2</sub> при интенсивностях 10<sup>14</sup> – 10<sup>15</sup> Вт/см<sup>2</sup>.*

**Ключевые слова:** рентгеновское излучение, фемтосекундные лазерные импульсы, взаимодействие лазерного излучения с веществом.

В настоящей работе сообщается о наблюдении ранее не известного эффекта подповерхностной генерации жесткого рентгеновского излучения при импульсно-периодическом взаимодействии излучения фемтосекундного хром-форстеритового лазера с твердотельной мишенью. Обнаружено жесткое рентгеновское излучение ( $E_\gamma > 20$  кэВ), возникающее в процессе лазерной микрообработки находящейся в вакууме мишени из ВаF<sub>2</sub> последовательностью аблирующих фемтосекундных импульсов при интенсивностях  $I$  ниже 10<sup>15</sup> Вт/см<sup>2</sup>. Генерация рентгеновского излучения, по-видимому, происходит в канале, который первоначально формируется 30–50 лазерными импульсами.

При изучении параметров высокотемпературной плазмы, зажигаемой на поверхности твердотельной мишени фемтосекундным лазерным излучением, наиболее часто используется режим однократного воздействия лазерного излучения на объект. В работе [1] увеличение выхода жесткой компоненты рентгеновского излучения ( $E_\gamma > 3$  кэВ) и перегрев высокотемпературной плазмы, формирующейся на развитой поверхности кратеров, возникали при абляции под действием нескольких выстрелов ( $I \sim 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>) фемтосекундного лазера. Следует отметить, что режим многократного взаимодействия фемтосекундного лазерного излучения ( $I = 10^{14} - 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>) с мишенью характерен для процессов микрообработки с целью формирования микроканалов [2–4].

В наших экспериментах использовалось излучение созданной в МЛЦ МГУ фемтосекундной лазерной системы на хром-форстерите ( $\lambda = 1240$  нм,  $\tau \sim 110$  фс, частота повторений 1–50 Гц), основанной на регенеративном и

многопроходовом усилении с использованием техники усиления chirпированных импульсов [5]. Лазерный импульс ( $E \sim 0.4$  мДж) фокусировался кварцевой линзой с фокусным расстоянием  $F = 10$  см в пятно диаметром  $D \sim 10$  мкм (по уровню 1/e), что обеспечивало получение на поверхности ВаF<sub>2</sub>-мишени излучения с интенсивностью  $\sim 3 \times 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> и плотностью энергии  $E \sim 350$  Дж/см<sup>2</sup>.

Угол падения р-поляризованного лазерного пучка на мишень составлял 45°. Мишень находилась в вакууме при остаточном давлении не хуже 10<sup>-2</sup> Тор. Выход рентгеновского излучения контролировался двумя сцинтилляционными детекторами на базе ФЭУ-119, один из которых регистрировал интегральный выход рентгеновского излучения в диапазон более 2.5 кэВ; перед вторым детектором ставились различные полосовые фильтры, позволяющие изменять диапазон регистрации рентгеновского излучения. На окнах кюветы были установлены бериллиевые фильтры толщиной 200 мкм.

Диагностика плазмы, использованная в эксперименте, основана на двухканальной регистрации выхода жесткого рентгеновского излучения из плазмы [6]. Измеренный выход рентгеновского излучения в спектральный диапазон  $E_\gamma > 20$  кэВ (использовался танталовый фильтр толщиной 26 мкм) в зависимости от номера лазерного выстрела представлен на рис.1. Видно, что генерация рентгеновского излучения возникает после воздействия на мишень примерно 30 выстрелов, длится на протяжении 25 выстрелов и возобновляется примерно через 40 выстрелов (в районе 170-го выстрела также виден слабый сигнал).

При перемещении перетяжки фокусируемого лазерного пучка относительно поверхности мишени, позволяющем варьировать интенсивность излучения, качественная картина генерации жесткого рентгеновского излучения сохраняется вплоть до интенсивности  $I \sim 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>. При этом зависимость номера выстрела  $N$ , в момент которого начинает регистрироваться жесткое рентгеновское излучение, от положения перетяжки аппроксимируется полиномом второй степени, что может указывать на обратную зависимость  $N$  от интенсивности  $I$ . Отметим

В.М.Гордиенко, И.А.Макаров, Е.В.Раков, А.Б.Савельев. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: gord@femto.phys.msu.ru, makarov@femtotsrv.phys.msu.ru, rakov@femto.phys.msu.ru, savelev@femto.phys.msu.ru

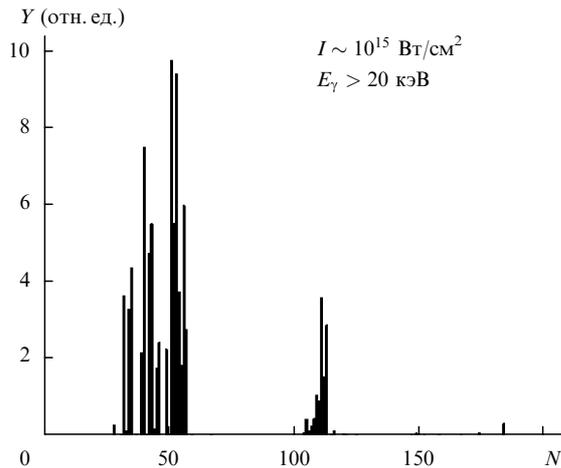


Рис.1. Выход жесткого рентгеновского излучения  $Y$  в спектральный диапазон  $E_\gamma > 20$  кэВ в зависимости от номера выстрела  $N$ .

также, что в эксперименте были зарегистрированы гамма-кванты с энергией более 60 кэВ (использовался медный фильтр толщиной 1 мм). Выход жесткого рентгеновского излучения в спектральный диапазон  $E_\gamma > 20$  кэВ при данных условиях взаимодействия оказался сравнимым с выходом жесткого рентгеновского излучения в регистрируемую область при взаимодействии одиночного лазерного импульса с поверхностью мишени в условиях более жесткой фокусировки.

Для проведения сравнительных экспериментов в последнем случае использовался специальный объектив, позволявший получать на гладкой поверхности мишени интенсивность лазерного излучения  $\sim 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup> при диаметре пучка в перетяжке  $\sim 4$  мкм (рис.2). Полученные результаты измерения выхода рентгеновского излучения при  $I \sim 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup> в режиме однократного воздействия, на наш взгляд, однозначно указывают, что при формировании канала (остаточная модификация мишени длиной  $\sim 50$  мкм наблюдалась под микроскопом) последовательностью фемтосекундных импульсов с интенсивностью на поверхности мишени менее  $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> возникают условия для генерации «горячей» фемтосекундной плазмы.

Этот вывод подтверждается и наблюдением излучения второй гармоники ( $\lambda = 620$  нм), возникающей синхронно с генерацией рентгеновского излучения [7]. Интересно отметить, что в этом случае интегральный выход рентгеновского излучения в более широкий спектральный диапазон ( $E_\gamma > 2.5$  кэВ) в условиях нашего эксперимента оказался в среднем примерно в 3.5 раза меньше, чем аналогичный выход рентгеновского излучения при интенсивности  $I \sim 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup> (см. рис.2).

Обсудим кратко особенности импульсно-периодического воздействия фемтосекундного лазерного излучения на мишень. При плотности энергии  $E \sim 10^2$  Дж/см<sup>2</sup> за

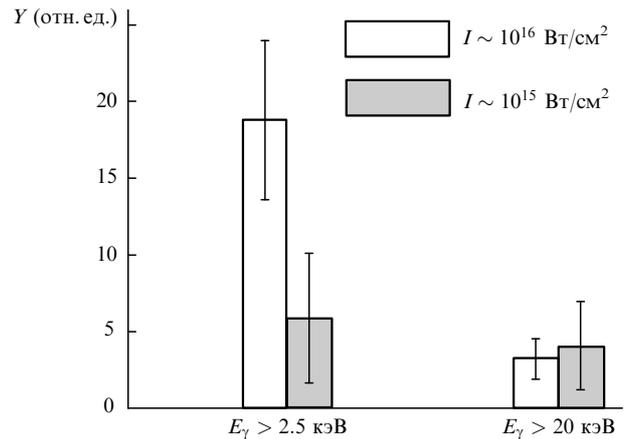


Рис.2. Средний выход жесткого рентгеновского излучения  $Y$  в спектральные диапазоны  $E_\gamma > 2.5$  кэВ и  $E_\gamma > 20$  кэВ при различных режимах взаимодействия излучения с мишенью из ВаF<sub>2</sub>.

один выстрел выносится слой вещества мишени толщиной  $\sim 1$  мкм [2]. Это означает, что генерация рентгеновского излучения после воздействия 30–50 импульсов возникает в канале, который уходит в глубь мишени более чем на 40 мкм под углом  $45^\circ$ . Слой ВаF<sub>2</sub> такой толщины пропускает гамма-кванты с энергией более 7 кэВ и, напротив, поглощает кванты с меньшей энергией. Таким образом, выход рентгеновского излучения в спектральный диапазон  $E_\gamma > 2.5$  кэВ при генерации в канале должен быть меньше выхода рентгеновского излучения в данный диапазон при генерации непосредственно с поверхности мишени (режим воздействия одиночным импульсом) и не изменяться при энергии регистрируемых гамма-квантов более 7 кэВ.

Итак, длительное (более 25 выстрелов) воздействие фемтосекундного лазерного излучения при интенсивности  $\sim 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> на поверхность ВаF<sub>2</sub> приводит к генерации в образовавшемся канале, уходящем в глубь мишени на несколько десятков микрон, жесткого рентгеновского излучения с энергией квантов свыше 20 кэВ.

Работа поддержана РФФИ (грант № 05-02-16476).

- Gavrilov S.A., Golishnikov D.M., Gordienko V.M., Savel'ev A.B., Volkov R.V. *Laser Part. Beams*, **22**, 306 (2004).
- Momma C., Chichkov B., Nottle S. *Opt. Commun.*, **129**, 134 (1996).
- Климентов С.М., Пивоваров П.А., Конов В.И., Брайтлинг Д., Даусингер Ф. *Квантовая электроника*, **34**, 537 (2004).
- Shah L., Tawney J., Richardson M., Richardson K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **40**, 57 (2004).
- Gordienko V.M. In: *Techn. Digest of Intern. Conf. ILLA-2003* (Smolyan, Bulgaria, 2003. с. 38).
- Волков Р.В., Гаврилов С.А., Голишников Д.М., Гордиенко В.М., Михеев П.М., Савельев А.Б., Серов А.А. *Квантовая электроника*, **31** (3), 240 (2001).
- Волков Р.В., Гордиенко В.М., Джиджоев М.С., Жуков М.А., Михеев П.М., Савельев А.Б., Шашков А.А. *Квантовая электроника*, **24** (12), 1114 (1997).