

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ЗЕРКАЛ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ КОГЕРЕНТНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ИМПУЛЬСОВ

В.А. Корниенко¹, В.В. Кулагин^{1,2}, В.А. Черепенин¹

¹*ИРЭ РАН, Моховая 11, Москва*

²*Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова,
ГАИШ*

Университетский просп. 13, Москва

В настоящее время существует огромная потребность в создании мощного и компактного источника коротких рентгеновских импульсов. Когерентные аттосекундные импульсы рентгеновского диапазона могут найти широчайшее применение от визуализации динамических состояний сложных молекул до медицинской диагностики. Одним из способов генерации коротких рентгеновских импульсов является использование Томсоновского рассеяния встречных фотонов на релятивистских электронах. Однако обычно такая схема дает некогерентные импульсы рентгеновского диапазона. Для генерации когерентных рентгеновских импульсов длина пучка электронов должна быть достаточно малой (рассеяние на релятивистском электронном зеркале). Эта схема позволяет полностью контролировать параметры отраженного импульса, в частности, форму его огибающей, разность фаз между несущей и огибающей, частоту, амплитуду и др. В настоящей работе представлены результаты численного моделирования формирования релятивистских электронных зеркал мощным лазерным импульсом из нанопленок и отражение встречного пробного импульса от таких зеркал.

Одиночные сгустки электронов, имеющие релятивистскую скорость направленного движения и близкую к твердотельной плотность электронов, могут быть сформированы с помощью современных лазерных установок петаваттного уровня с длительностью импульса в несколько десятков фемтосекунд [1,2]. При этом необходимыми условиями являются неадиабатическая форма лазерного импульса (т. е. импульс должен иметь длительностью фронта меньше длины волны излучения) и достаточно большая амплитуда импульса, превышающая определенный порог. При нормальном падении такого импульса, например, на пленку нанометровой толщины возможно полное вытеснение электронов из нанопленки в направлении распространения импульса, при этом электроны приобретают релятивистские скорости за времена, значительно меньшие периода лазерного поля. Толщина сформированных электронных сгустков может составлять единицы нанометров, а диаметр сгустков оказывается на уровне нескольких десятков микрон (диаметр сфокусированного лазерного импульса), что значительно больше их толщины; в результате сформированные сгустки могут использоваться в качестве релятивистских электронных

зеркал.

Основным препятствием для практической реализации идеи формирования релятивистских электронных зеркал из нанопленок является недостаточная крутизна фронта ускоряющих лазерных импульсов. Для импульсов с пологим фронтом время жизни электронных сгустков оказывается небольшим, или они не формируются вовсе. Один из возможных методов увеличения крутизны фронта может быть основан на эффекте обострения петаваттного лазерного импульса при его взаимодействии с твердотельными нанопленками. Широкий контроль параметров сформированного импульса предоставляет концепция формирования, в которой используются плазменные слои с толщиной в несколько длин волн лазера и плотностью, в 3-20 раз превышающей критическую [3]. В настоящей работе с помощью численного моделирования найдены параметры плазменных слоев, позволяющие формировать мощные неадиабатические электромагнитные импульсы петаваттного уровня, фронт которых имеет длительность, меньшую периода поля, а амплитуда первой полуволны оказывается практически равной максимальной амплитуде импульса.

На рис. 1 представлено релятивистское электронное зеркало, сформированное импульсом с обостренным фронтом, через 4 периода после начала взаимодействия. Толщина релятивистского электронного зеркала в начале взаимодействия уменьшается, а затем растет и составляет в момент времени, соответствующий рис. 1, около 15 нм. Диаметр плоской части зеркала равен 30λ , что несколько меньше диаметра импульса (40λ). Среднее значение продольного импульса составляет около 43 (импульс нормирован на mc) при относительном разбросе менее 1.5%.

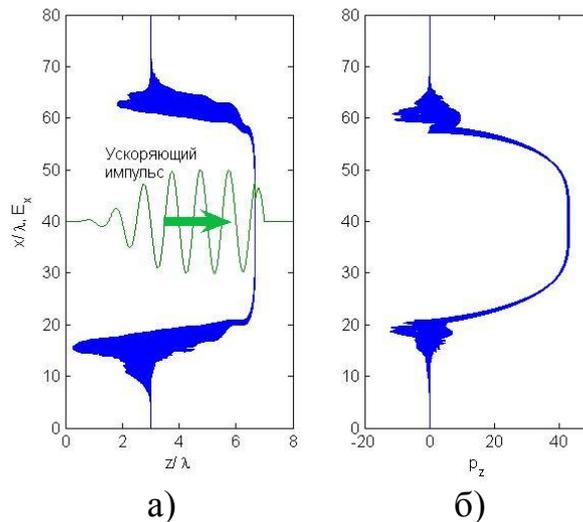


Рис. 1. Релятивистское электронное зеркало (а) через 4 периода после начала взаимодействия, сформированное импульсом с обостренным фронтом и максимальной нормированной амплитудой $a_0 = 10$ из мишени толщиной 6 нм с плотностью электронов $n_0 = 3.1 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ и фазовый пространство $x-p_z$ для зеркала (б) (импульс нормирован на mc). Диаметр импульса составляет 40λ . Поле ускоряющего импульса смещено по вертикальной оси для наглядности.

Отражение встречного пробного импульса от релятивистского электронного зеркала, сформированного ускоряющим импульсом с обостренным фронтом, представлено на рис. 2. Пробный импульс имеет полную длительность 2λ (по уровню $1/e$), диаметр импульса составляет 16λ , а его амплитуда равна амплитуде ускоряющего импульса (нормированная амплитуда поля $a_1 = 10$). Отраженный импульс по форме напоминает пробный импульс; длина волны отраженного излучения изменяется от 12 нм до 14 нм, что связано с изменением продольного импульса релятивистского электронного зеркала в процессе его ускорения. Длительность отраженного импульса по уровню e^{-1} составляет около 3 периодов колебаний (120 аттосекунд) и оказывается несколько увеличенной по сравнению с длительностью пробного импульса (2 периода), что связано с относительно большой толщиной (около 15 нм) релятивистского электронного зеркала в момент отражения пробного импульса.

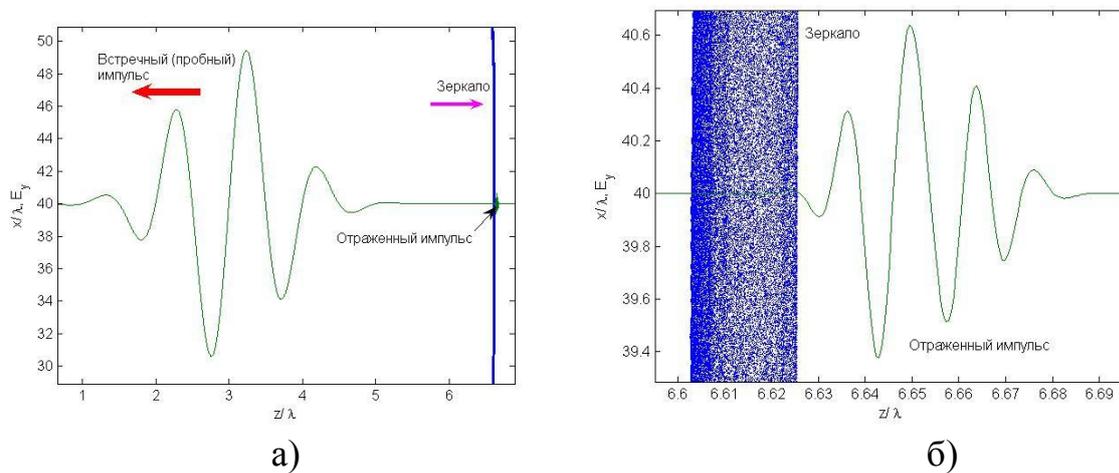


Рис. 2. (а) Встречный (пробный) импульс после прохождения через релятивистское электронное зеркало. Справа виден отраженный импульс. (б) Поле отраженного импульса на оси пучка в увеличенном масштабе и часть релятивистского электронного зеркала.

В момент отражения от зеркала части пробного импульса с максимальной амплитудой преобразование частоты, рассчитанное по полученным компонентам скорости релятивистского электронного зеркала, составляет около 80, что хорошо согласуется с длиной волны отраженного излучения. Пространственное распределение энергии отраженного импульса имеет четкую структуру, что говорит о хорошей временной и пространственной когерентности. Мощность отраженного импульса составляет около 580 ГВт.

Процесс отражения был промоделирован для различной амплитуды пробного импульса от $a_1 = 0.1$ до $a_1 = 10$, т. е. до амплитуды, равной амплитуде ускоряющего импульса. Коэффициент отражения меняется очень слабо (от 0.062 до 0.064) при увеличении амплитуды a_1 встречного пробного импульса от $0.01a_0$ вплоть до амплитуды ускоряющего импульса a_0 .

Аналитически это свойство отражения от релятивистского электронного зеркала, находящегося в поле ускоряющей волны, было доказано в одномерной модели в [4]. Следует отметить, что не только коэффициент отражения изменяется мало при увеличении амплитуды пробного импульса, но также и форма отраженного импульса меняется очень незначительно.

Таким образом, идея генерации мультигигаваттных когерентных аттосекундных рентгеновских импульсов при встречном отражении пробного лазерного импульса от релятивистских электронных зеркал [4] может быть реализована уже при современном развитии экспериментальной техники.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 12-02-92702-ИНД_a и 13-02-01398_a).

ЛИТЕРАТУРА

1. Kulagin V.V., Cherepenin V.A., Hur M.S., Suk H. // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99. P. 124801.
2. Kulagin V.V., Cherepenin V.A., Gulyaev Y.V. et. al. // Phys. Rev. E. 2009. V. 80. P. 016404.
3. Nam I.H., Kulagin V.V., Hur M.S., Lee I.W., Suk H. // Phys. Rev. E. 2012. V. 85. P. 026405.
4. Kulagin V.V., Cherepenin V.A., Suk H. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. P. 3322.