

УДК 533.95

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ СГУСТКА ЭЛЕКТРОНОВ ВДОЛЬ ОБЛУЧАЕМОЙ ТОНКОЙ ПРОВОЛОКИ

А. С. Куратов¹, А. В. Брантов^{1,2}, В. Ю. Быченков^{1,2}

При использовании трехмерного численного PIC моделирования обнаружено и исследовано формирование движущегося с релятивистской скоростью вдоль тонкой металлической проволоки сгустка электронов при облучении ее коротким лазерным импульсом релятивистской интенсивности. Движение сгустка сопровождается электромагнитным импульсом поверхностного типа.

Ключевые слова: релятивистская лазерная плазма, метод частиц в ячейках.

Мотивацией для проведения численного моделирования взаимодействия лазерного импульса с тонкой проволочной мишенью послужили результаты экспериментов, демонстрирующие появление пучков приповерхностных электронов, распространяющихся вдоль проволоки на значительные расстояния от области взаимодействия [1–3]. При наклонном облучении коротким мощным лазерным импульсом (250 мДж, 150 фс) тонкой металлической проволоки диаметром в десятки микрон вблизи конца проволоки был зарегистрирован сигнал от пучка электронов на расстоянии в несколько десятков см [1] и с диаметром в несколько мм. Эти эксперименты были повторены в случае нормального падения на мишень более мощного лазерного импульса (4 Дж, 400 фс) [2, 3], где генерировались более энергетичные электроны и наблюдалась слабая зависимость характеристик электронных пучков, наблюдаемых на обоих концах проволоки, от материала металлической проволоки (использовались титановые, медные и никель-хромовые проволоки) и ее диаметра (который изменялся от 15 до 100 мкм). Было высказано предположение, что удержание электронов вблизи проволоки может быть связано с генерацией поверхностных электромагнитных волн [2, 3], которое было частично подтверждено экспериментально [4].

¹ ФГУП “Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова”, Россия, Москва; e-mail: kuratov.andrew@gmail.com.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: brantov@lebedev.ru.

Электронный поток вдоль поверхности плоских мишеней наблюдался значительно раньше [5–8]. Природа его удержания связывалась с поверхностными электромагнитными полями, что подтверждалось подавлением приповерхностных электронных пучков при увеличении размера преплазмы [6] или при создании шероховатости поверхности мишени с помощью ее микроструктурирования [8]. Более высокой концентрации энергии поверхностных электромагнитных полей следует ожидать при переходе от плоских к проволочным мишеням, что должно приводить к более выраженному эффекту поверхностного захвата электронов. На таких мишенях должны эффективно возбуждаться поверхностные электромагнитные волны типа волны Зоммерфельда. Они распространяются вдоль поверхности проволоки со скоростью, близкой к скорости света, и способны захватывать релятивистские сгустки электронов, продвигаясь с ними на значительные расстояния от фокального пятна. Проведенные теоретические исследования демонстрируют возможность возбуждения поверхностных электромагнитных волн различными физическими механизмами [4, 9].

В данной статье нами проведено трехмерное численное моделирование облучения лазерным импульсом тонкой проволоки, показывающее как возникновение пучков электронов, распространяющихся от области взаимодействия вдоль проволоки, так и возбуждение поверхностных электромагнитных волн. Для выявления основных особенностей формирования пучка электронов на начальном этапе взаимодействия мы рассматриваем упрощенную постановку задачи, в которой проволочную мишень описываем плазменной моделью (плазменный цилиндр), как в области лазерно-плазменного взаимодействия, так и вдали от нее.

Моделирование проводилось кодом Мандор и коммерческим кодом VSim [10]. Лазерный импульс с максимумом интенсивности $3 \cdot 10^{19}$ Вт/см², имеющей гауссовское распределение как по времени (с характерной длительностью 50 фс), так и по пространству (радиус пятна фокусировки составлял 4 мкм), вводился в расчетную область вдоль оси x и фокусировался на цилиндрическую поверхность по нормали к оси цилиндра (ось y). Полная расчетная область составляла $x \times y \times z = 20 \text{ мкм} \times 240 \text{ мкм} \times 20 \text{ мкм}$ и использовался пространственный шаг $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z = 0.02 \text{ мкм} \times 0.1 \text{ мкм} \times 0.05 \text{ мкм}$. Цилиндрическая плазменная мишень диаметром 8 мкм состояла из электронов и тяжелых ($m_i/Zm_e = 4 \times 1836$) или неподвижных ионов. Плотность электронов в области взаимодействия (по 10 мкм от центра фокусировки) составляла $5n_c$ (n_c – электронная

критическая плотность) и $2n_c$ в остальной области. Поскольку задача является симметричной относительно направления движения лазерного импульса (оси x), импульс фокусировался вблизи края цилиндра ($y = 10$ мкм).

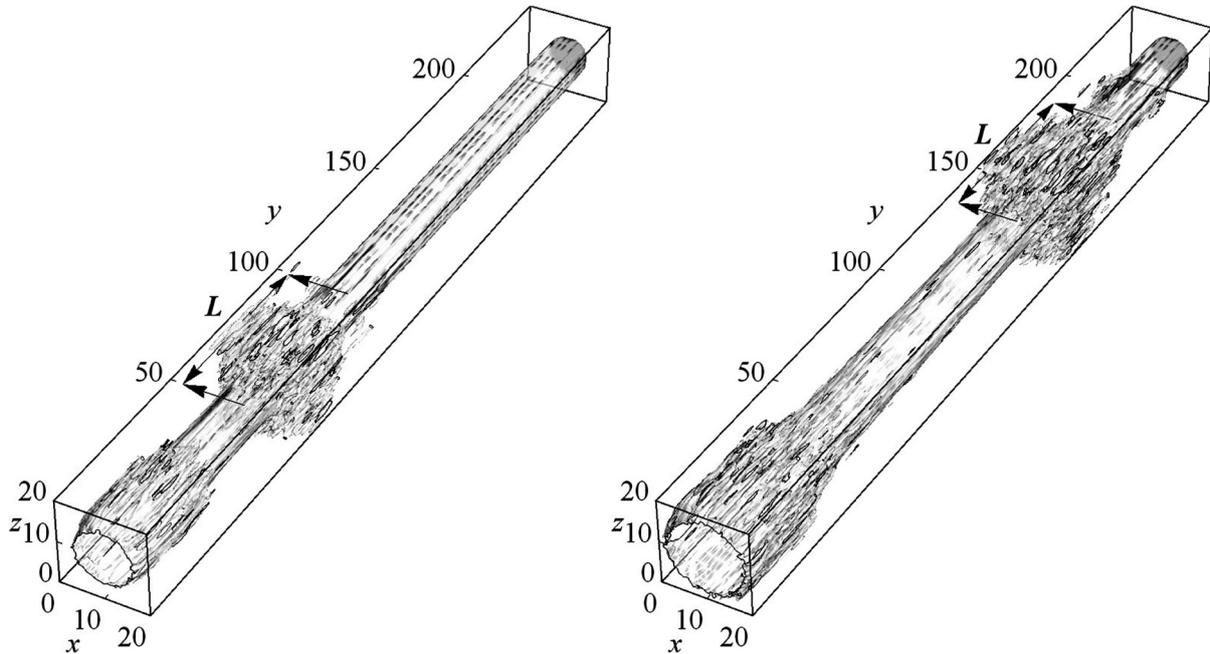


Рис. 1: Пространственное распределение плотности электронов в момент времени 520 фс (слева) и 780 фс (справа).

Рисунок 1 показывает плотность электронов после воздействия лазерного импульса на проволоку. Хорошо виден сгусток высокоэнергетичных электронов, отделившийся от основной массы частиц и движущийся вдоль проволоки со скоростью порядка скорости света. Полное число электронов в сгустке составляет 1.6×10^9 частиц, а его продольный размер оказывается порядка 50 мкм, что много больше размера фокального пятна лазера. При этом сам сгусток электронов формируется после окончания действия лазерного импульса. Под действием лазерного импульса значительная часть электронов внутри фокального пятна нагревается до больших “температур”. При этом большая часть электронов не может улететь от мишени, удерживаемая полем разделения заряда (двойным слоем). Электроны, имеющие составляющие скорости вдоль оси цилиндра начинают двигаться в среднем вдоль направления оси проволоки. Они испытывают осцилляции вокруг цилиндрической мишени (хорошо известное явление – рециркуляция электронов в тонких мишенях), проникая во внутрь (благодаря компенсационному обратному току холодных электронов) и вылетая с противоположной стороны. Все это

приводит к значительному увеличению длины прогретой области (L), определяемой не столько диаметром фокального пятна (d), сколько длительностью лазерного импульса (τ) и временем адиабатического остывания электронов (τ_e), $L \sim d + c\tau + c\tau_e$ [11]. Именно размер прогретой области и определяет размер сгустка электронов, который продолжает распространяться вдоль проволоки. Заметим, что размер сгустка практически не зависит от поляризации лазерного импульса.

Нами изучена зависимость размеров формируемого пучка электронов от длительности лазерного импульса, для чего были проведены аналогичные расчеты для длительности импульса 100 фс и 300 фс, демонстрирующие, что размер сгустка незначительно увеличивается с длительностью импульса, достигая 70 мкм и 100 мкм соответственно. В последнем случае он в основном определяется длительностью импульса, $L \sim c\tau$.

Чтобы оценить электромагнитные поля, возникающие на стадии формирования сгустка электронов, было проведено моделирование с помощью кода VSim [10] с размером расчетной области $x \times y \times z = 35 \text{ мкм} \times 120 \text{ мкм} \times 35 \text{ мкм}$ и размером ячейки 0.1 мкм.

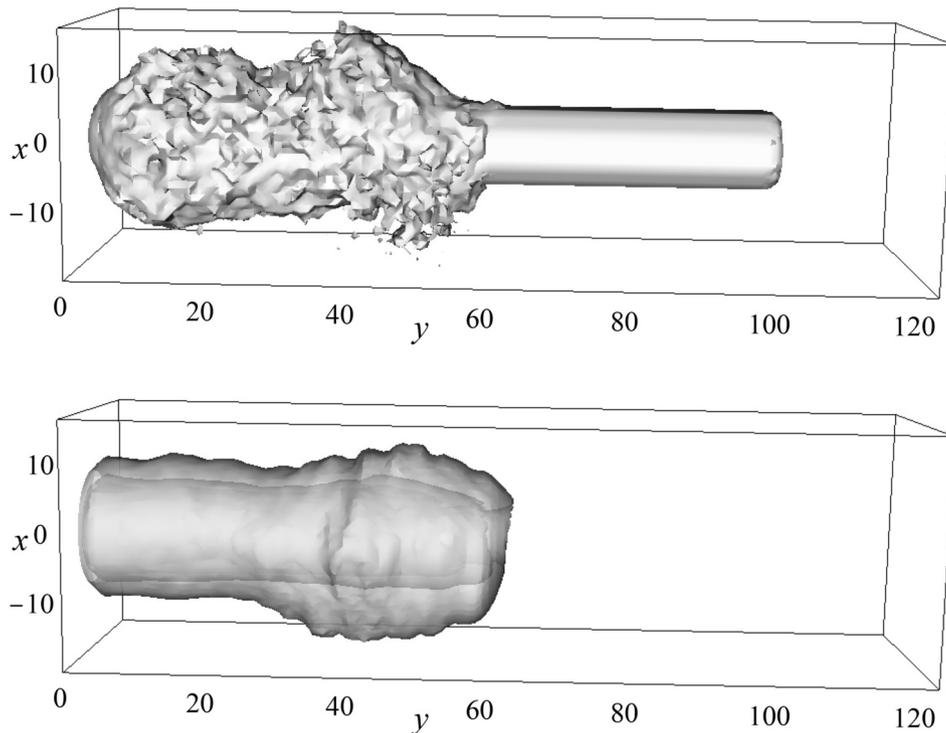


Рис. 2: Плотность электронов, вылетающих из области взаимодействия (верхняя панель), и амплитуда электромагнитного поля (нижняя панель) в момент времени 354 фс.

В ячейках, находившихся в области взаимодействия лазерного импульса с проволокой, в начальный момент находилось 20 макрочастиц. Плотность проволоки и характеристики лазерного импульса соответствовали предыдущему моделированию.

В процессе моделирования было видно, что заметная часть нагретых электронов из области взаимодействия лазерного импульса с мишенью начинает движение вдоль проволок (рис. 2, где показаны электроны только из области взаимодействия). При этом движение электронов сопровождается распространением поверхностного электромагнитного поля.

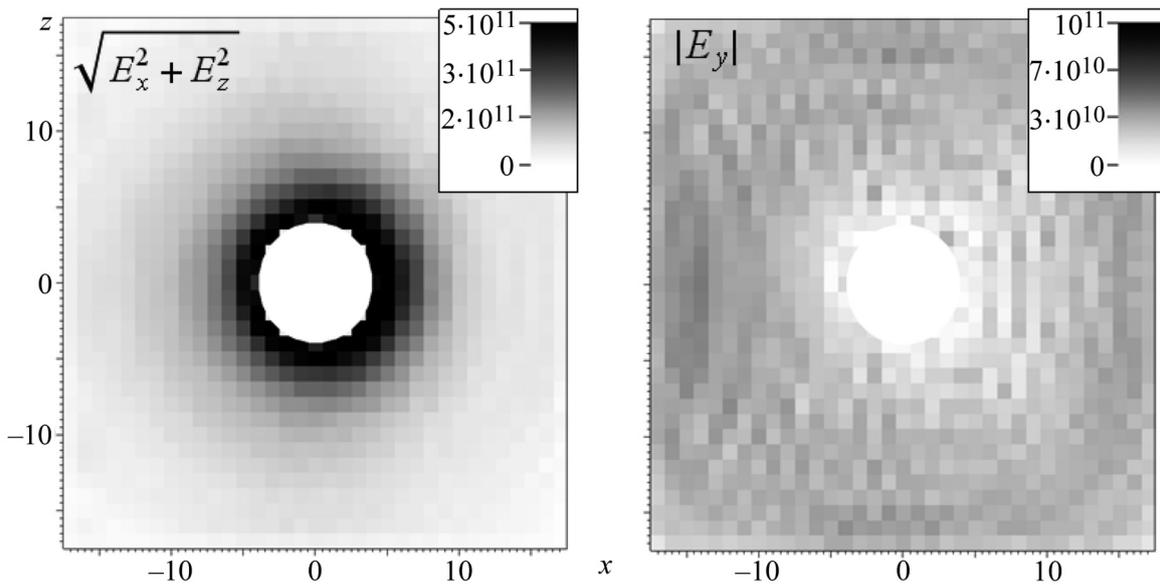


Рис. 3: Амплитуда поперечного $\sqrt{E_x^2 + E_z^2}$ (слева) и продольного $|E_y|$ (справа) электрического поля в единицах В/м, распространяющегося вдоль поверхности мишени электромагнитного импульса в перпендикулярной к оси цилиндра плоскости ($y = 40$ мкм) в момент времени 354 фс.

Отметим, что поперечная компонента электрического поля имеет максимум на границе цилиндра и по величине на несколько порядков превосходит продольное поле, имеющее плавный максимум вдали от цилиндра (рис. 3). Кроме того, величина поперечной компоненты поля оказывается намного больше собственного поля электронного сгустка. Таким образом, структура возникающих полей подтверждает формирование поверхностной электромагнитной волны в ближней зоне, которая может трансформироваться вдали от области взаимодействия в волну Зоммерфельда [12]. Основной причиной возникновения поверхностной волны являются токи горячих электронов, фор-

мирующих двойной слой на поверхности мишени, и более энергетичных электронов, покидающих мишень [11].

Таким образом, проведенное трехмерное численное моделирование демонстрирует формирование сгустков электронов, движущихся вдоль цилиндрической мишени совместно с поверхностными электромагнитными полями. Детальное описание распространения и взаимодействия этих полей с захваченными электронами на больших расстояниях от фокального пятна требует дополнительного исследования с привлечением теории и ресурсозатратных расчетов. Вместе с тем, уже из проведенного исследования видно, что генерируемый импульс поверхностных волн способен хорошо удерживать сгусток приповерхностных релятивистских электронов. Это обосновывает наблюдаемое в экспериментах [1–4] распространение электронного пучка вдоль проволоки на большое расстояние. Практическое использование такой транспортировки электронных сгустков МэВных энергий планируется обсудить в дальнейшем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 16-02-00088, № 18-02-00452).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] H. Nakajima, S. Tokita, S. Inoue, et al., *Phys. Rev. Lett.* **110**, 155001 (2013).
- [2] A. Maksimchuk, P. Belancourt, M. J.-E. Manuel, et al., *Bull. Am. Phys. Soc.* **58**, 242 (2013).
- [3] A. Maksimchuk, P. Belancourt, P. Kordell, et al., *Bull. Am. Phys. Soc.* **59**, N15, NP8.00101 (2014).
- [4] S. Tokita, S. Sakabe, T. Nagashima, et al., *Sci. Rep.* **5**, 8268 (2015).
- [5] L. M. Chen, J. Zhang, Y. T. Li, et al., *Phys. Rev. Lett.* **87**, 225001 (2001).
- [6] Y. T. Li, X. H. Yuan, M. H. Xu, et al., *Phys. Rev. Lett.* **96**, 165003 (2006).
- [7] P. McKenna, D. C. Carroll, J. Clarke, et al., *Phys. Rev. Lett.* **98**, 145001 (2007).
- [8] Ye Tian, J. Liu, W. Wang, et al., *Plasma Phys. Control. Fusion* **56**, 075021 (2014).
- [9] H. B. Zhuo, S. J. Zhang, X. H. Li, et al., *Phys. Rev. E* **95**, 013201 (2017).
- [10] C. Nieter and J. R. Cary, *J. Comp. Phys.* **196**, 448 (2004).
- [11] А. С. Куратов, А. В. Брантов, Ю. М. Алиев, В. Ю. Быченко, *Квантовая электроника* **48**(7), 653 (2018).
- [12] G. J. Goubau, *Appl. Phys.* **21**, 1119 (1950).

Поступила в редакцию 27 августа 2018 г.