

**Исследование инжекции в кильватерную волну фоновых электронов из плазмы с нисходящим градиентом плотности**

*Л. П. Пугачёв<sup>1,2</sup>, Н. Е. Андреев<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>2</sup> Объединённый институт высоких температур РАН

В настоящей работе с помощью моделирования методом «частиц в ячейке» [1] детально рассмотрен процесс инжекции электронов в кильватерную волну, которая, как показал анализ в работе [2], генерируется в процессе самомдуляционной неустойчивости лазерного импульса в докритической плазме, образованной под воздействием предимпульса лазерной системы, который приходит за 10 нс до основного фемтосекундного лазерного импульса.

Фемтосекундный лазерный импульс с длиной волны  $\lambda = 1$  мкм, пиковой интенсивностью  $I_L = 3 \times 10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup> и линейной поляризацией вдоль оси  $OY$  распространялся вдоль оси  $OX$  и имел гипергауссову временную форму огибающей с длительностью  $\tau_L \cong 47$  фс [2].

Для изучения процесса инжекции был выбран одномерно неоднородный профиль плотности плазменной короны с двумя областями постоянной плотности, при генерации и распространении кильватерной волны в котором в работе [2] продемонстрирована генерация пучка электронов с наиболее узкими угловым и энергетическим распределением. Все изменения плотности (нарастание в области  $0 \leq x \leq 40$  мкм и уменьшения при  $x \geq 80$  мкм и  $x \geq 140$  мкм) происходят по гауссову закону с экспоненциальной полушириной  $l_x = 15$  мкм. Значение электронной плотности на верхнем плато ( $40 < x < 80$  мкм) равно  $n_0 = 0.045n_{cr} = 5 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>, а плотность на нижнем плато ( $120 \leq x \leq 140$  мкм) принимала значение  $7.3 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Такая плотность плазмы на нижнем плато близка к резонансной плотности  $n_{res} = 1.1 \times 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, для которой  $k_p c \tau_L = 2\sqrt{2}$ , и амплитуда кильватерной волны максимальна. В поперечных направлениях плотность плазмы полагалась постоянной.

В нисходящем градиенте плотности плазмы фазовая скорость волны снижается и в некоторый момент сравнивается со скоростями фоновых электронов. При плотности плазмы во второй области постоянной плотности  $7.3 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup> электроны инжектируются

в третий период кильватерной волны. При  $l=ct=220$  мкм от момента времени, когда центр лазерного импульса находился при  $x=0$ , основная часть инжектированных электронов имеет импульс  $\sim 0.68mc$ , что соответствует энергии  $\sim 0.11$  МэВ, и находится в окрестности максимума ускоряющей силы  $e_x = eE_x / (mc\omega) = -0.0026$  при  $x=122$  мкм. Энергия электронов существенно меньше резонансной энергии  $E_{res} = \gamma_{ph} m_e c^2 \approx 20$  МэВ, где  $\gamma_{ph} \cong \omega / \omega_p \approx 40$  — гамма-фактор ( $\omega$  и  $\omega_p$  — лазерная и электронная плазменная частоты соответственно), определяемый фазовой скоростью кильватерной волны, поэтому электроны отстают от волны в процессе группировки и набора энергии, оставаясь однако в том же полупериоде ускоряющего поля кильватерной волны. Попадая в область  $x > 140$  мкм, где начинается второй спад плотности плазмы на границе с вакуумом, и фазовая скорость волны снижается, основная часть ускоренных электронов, все еще находясь в ускоряющем полупериоде, обгоняет волну и выходит из плазмы.

Оценка максимальной энергии электронов, инжектированных в максимум ускоряющей силы, может быть получена с помощью закона сохранения в потенциальной волне:  $\varepsilon / (mc^2) - \beta \sqrt{\varepsilon^2 / (m^2 c^4) - 1} - |e| \phi(\xi) / (mc^2) = \text{const}$ , где  $\varepsilon$  — полная энергия электрона,  $\phi(\xi)$  — потенциал кильватерной волны,  $\xi = k_p(x - v_{ph}t)$ ,  $x$  — координата вдоль оси  $OX$ ,  $t$  — время,  $k_p = \omega_p / c$ ,  $v_{ph}$  — фазовая скорость волны,  $\beta = \sqrt{1 - (1/\gamma_{ph})^2} \cong 1$  во второй области постоянной плотности. Таким образом, энергию, которую набирает электрон, двигаясь в третьем периоде кильватерной волны от максимума ускоряющей силы к точке, где сила равна нулю, находится из уравнения  $\varepsilon / (mc^2) - \sqrt{\varepsilon^2 / (m^2 c^4) - 1} \approx 0.43$ , которое имеет решение  $\varepsilon \cong 1.39mc^2$ , соответствующее кинетической энергии в 0.19 МэВ. Эта оценка хорошо согласуется с энергией в максимуме энергетического распределения квазимоноэнергетического пучка электронов, полученной при моделировании [2].

Работа выполнена при поддержке программой фундаментальных исследований Президиума РАН.

#### Литература

1. *Pukhov A.J.* Three-dimensional electromagnetic relativistic particle-in-cell code VLPL (Virtual Laser Plasma Lab) // *Plasma Physics*. — 1999. — V. 61. — P. 425–433.
2. *Л. П. Пугачёв, Н. Е. Андреев, П. Р. Левашов, Ю.А. Мальков, А. Н. Степанов, Д. А. Яшунин.* Генерация квазимонохроматических пучков ускоренных электронов при взаимодействии слабоконтрастного интенсивного фемтосекундного лазерного излучения с краем металлической фольги // *Физика плазмы*. — 2015. — Т. 41, № 7. — С. 588–599.