

Ускорение электронов лазерным импульсом при его параллельном падении на твердую мишень

С.Ф.Шен, А.М.Пухов, С.Е.Перевалов, А.А.Соловьев

С использованием многомерного моделирования методом частиц в ячейках, показано, что сгусток электронов с огромным объемным зарядом может быть ускорен до высоких энергий при облучении интенсивным фемтосекундным лазерным импульсом поверхности твердотельной мишени параллельно ее боковой поверхности. Процесс набора энергии каждым электроном разбивается на две части: за счет поперечного лазерного поля и за счет продольного поля возбуждаемой поверхностной плазменной волны (ППВ). Показано, что при ускорении значительной части электронов продольное поле ППВ доминирует. Этот процесс приводит к генерации сильно коллимированного электронного пучка с большим зарядом.

Ключевые слова: лазерная плазма, ускорение электронов, сильно релятивистские процессы, PIC-моделирование.

1. Введение

Одним из наиболее перспективных приложений взаимодействия интенсивного лазерного излучения с плазмой является генерация пучков электронов высоких энергий. С 1979 г. были предложены и продемонстрированы различные механизмы ускорения, которые работают при разных лазерно-плазменных параметрах [1–6]. В последнее время исследуется взаимодействие лазерного излучения со структурированными мишенями, в том числе с полыми трубками, массивами нано- и микропроводков, наноплитками и другими аналогичными конструкциями. Исследования по релятивистской наноплазмонике вызывают большой интерес во всем мире [7–17]. В этих режимах поперечная электромагнитная мода лазерного излучения может легко преобразовываться в продольную моду поверхностной плазменной волны (ППВ) [18]. В этом режиме лазерный импульс падает почти параллельно боковым поверхностям мишени, в отличие от традиционно используемого режима нормального или наклонного падения импульса на плоскую мишень [19–21]. При параллельном падении значительное число электронов из скин-слоя может быть отделено от мишени и ускорено вдоль боковой поверхности до высоких энергий (назовем этот режим лазерным скребком). В режиме лазерного скребка можно выделить две группы электронов. Электроны одной группы в основном ускоряются поперечным лазерным полем [22]; в другой группе при ускорении электронов преобладающим фактором является продольное поле ППВ [7, 8, 15, 16].

В настоящей работе исследуется ускорение электронов при взаимодействии интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов с твердотельными мишенями (кон-

центрация $n_e > 10^{23} \text{ см}^{-3}$) при параллельном падении (лазерный скребок), при этом учитывается наличие преплазмы, которая окутывает мишень. Обнаружено, что ускорение, обусловленное ППВ, является доминирующим механизмом ускорения электронов, и максимальный набор энергии от ППВ примерно в три раза выше, чем в случае ускорения поперечным электромагнитным полем. Ускоренный электронный пучок сильно коллимирован и может иметь заряд до десятков нКл.

2. Моделируемая конфигурация

Двухмерное (2D) моделирование методом частиц в ячейках (particle-in-cell, PIC) проводилось с помощью кодов ЕРОСН [23] и VLPL (Virtual Laser Plasma Laboratory) [24]. Лазерный импульс с интенсивностью $I_0 = 2.16 \times 10^{20} \text{ Вт/см}^2$ и длиной волны излучения $\lambda = 800 \text{ нм}$, поляризованный вдоль оси y , фокусируется на переднем крае ленточной мишени. Амплитуда лазерного поля соответствует нормированному вектор-потенциалу $a_0 = E_{\text{las}}/E_0 = 10$, где E_{las} – амплитуда электрического лазерного поля; $E_0 = mc\omega_0/e$; ω_0 – частота излучения; m и e – масса и заряд электрона соответственно. Лазерный импульс имеет косинусоидальный временной профиль с длительностью $T_0 = 11 \text{ фс}$ (FWHM). Для простоты отображения динамики электронов используется плоская в поперечном направлении волна. Основная мишень имеет однородную твердотельную концентрацию $n_e = 200n_{\text{cr}}$ около $3.5 \times 10^{23} \text{ см}^{-3}$ (здесь $n_{\text{cr}} = m_e\omega_0^2/(4\pi e^2)$ – критическая концентрация электронов). Поперечная толщина мишени составляет 1.2λ , а продольная длина – 80λ . Ленточная мишень покрыта преплазмой со всех сторон. Переднему торцу мишени предшествует линейный градиент плотности длиной 5λ , а на боковых поверхностях длина преплазмы имеет масштаб 0.5λ .

Область моделирования размером $12\lambda \times 40\lambda$ разбита на 2400×4000 ячеек в направлениях $x \times y$. Каждая ячейка содержит 100 макрочастиц. Для экономии вычислительных ресурсов используется движущееся окно моделирования. В поперечном направлении приняты периодические граничные условия для полей и открытые – для частиц. В коде ЕРОСН используется предложенный А.Пу-

X.Shen, A.M.Pukhov. Institut für Theoretische Physik I Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Universitätsstraße 1, 40225 Düsseldorf, Germany; e-mail: shenx@uni-duesseldorf.de, pukhov@tp1.hhu.de
С.Е.Перевалов, А.А.Соловьев. Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: perevalov@ipfran.ru

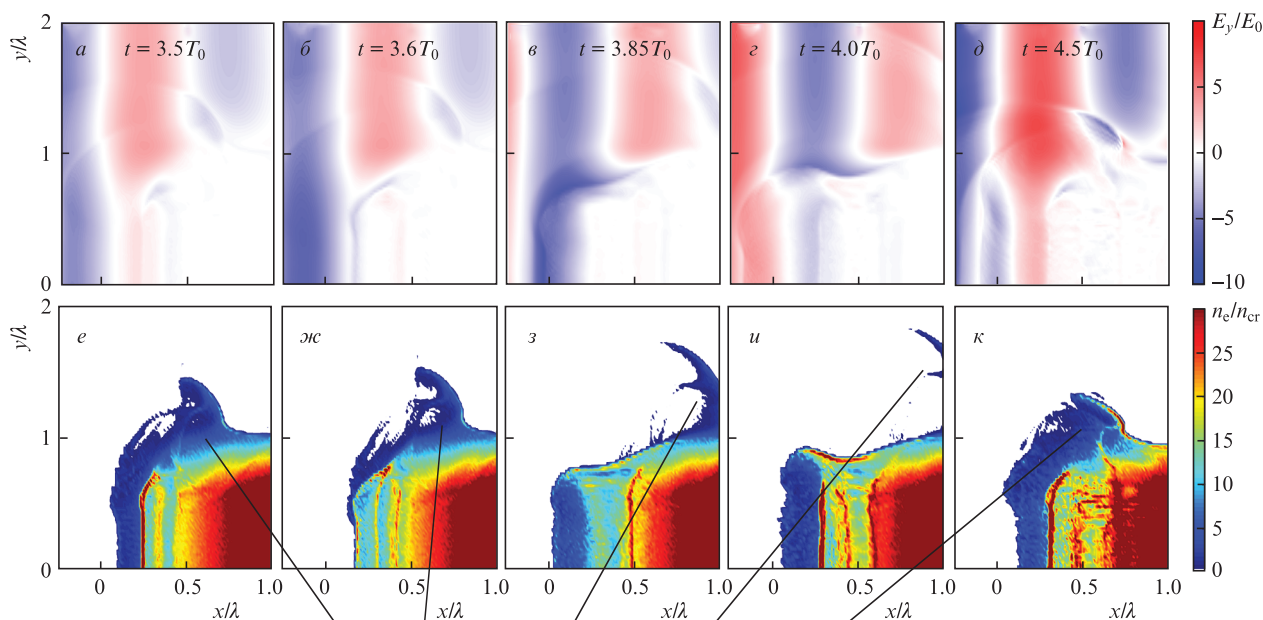
ховым алгоритм, минимизирующий численную дисперсию [24].

3. Результаты моделирования и их обсуждение

На рис.1 показан процесс формирования электронного нанобанча. В начале процесса ($t = 3.5T_0$) электроны выталкиваются вперед под действием лазерной пондеромоторной силы, образуя у переднего края мишени электронный слой высокой концентрации, который может возбуждать сильную ППВ (рис.1,а и е). Здесь $t = 0$ соответствует моменту входа лазерного импульса в окно моделирования. Для линейно поляризованного лазерного импульса пондеромоторная сила испытывает колебания на удвоенной частоте лазерного поля. Когда она меняет знак, часть электронов возвращается назад, и одновре-

менно они ускоряются вверх под действием лазерного электрического поля E_y (рис.1,ж и з). Под действием поперечной пондеромоторной силы эти электроны сжимаются до более высокой концентрации, образуя плотный электронный нанобанч (рис.1,г и и). Впоследствии этот нанобанч ускоряется как продольным полем ППВ, так и поперечным лазерным полем (рис.1,д и к). Данный процесс выглядит так, как будто нанобанч «отслаивается» от поверхности мишени под действием лазерного импульса, и повторяется каждую половину лазерного цикла либо вдоль верхней поверхности мишени, либо вдоль нижней ее поверхности в зависимости от знака лазерного поля. В результате образуется серия электронных нанобанчей, которые распределены с периодом λ с каждой стороны мишени (см. рис.2,в).

Результаты моделирования при $t = 16T_0$ представлены на рис.2, где показаны распределения поперечного электрического поля E_y , продольного электрического



Периодическое формирование электронного нанострукта

Рис.1. Временная эволюция нормированного лазерного поперечного электрического поля E_y/E_0 (а–д) и распределения электронной концентрации n_e/n_{cr} (е–к), иллюстрирующие процесс формирования плотного электронного нанострукта. Распределения взяты в моменты времени $t = 3.5T_0$ (а, е), $3.6T_0$ (б, ж), $3.85T_0$ (в, з), $4.0T_0$ (г, и) и $4.5T_0$ (д, к).

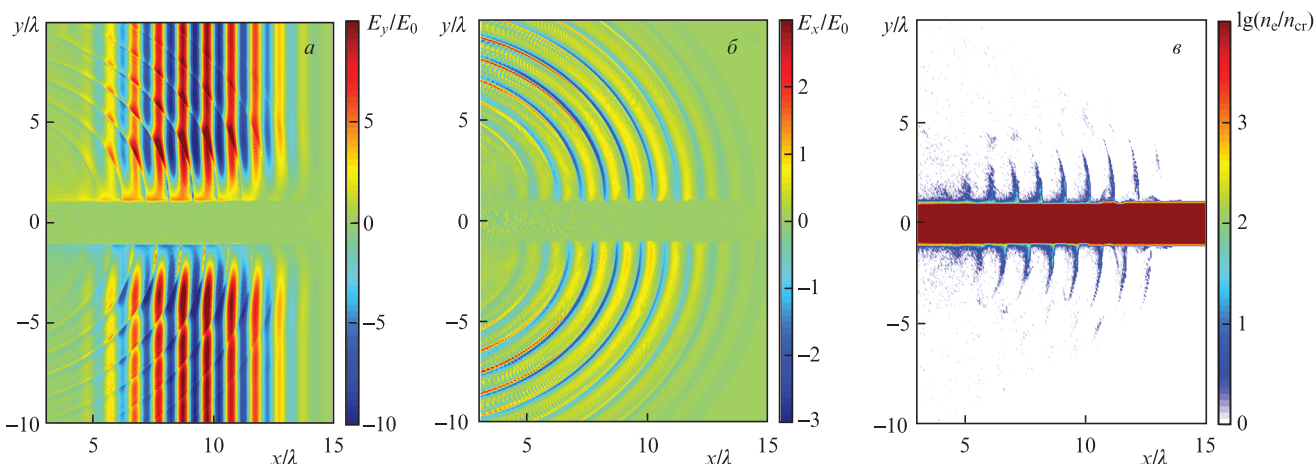


Рис.2. Распределения нормированного лазерного поперечного электрического поля E_y/E_0 (а), продольной компоненты электрического поля E_x/E_0 (б) и логарифма концентрации электронов $\lg(n_e/n_{cr})$ (в) при $t = 16T_0$.

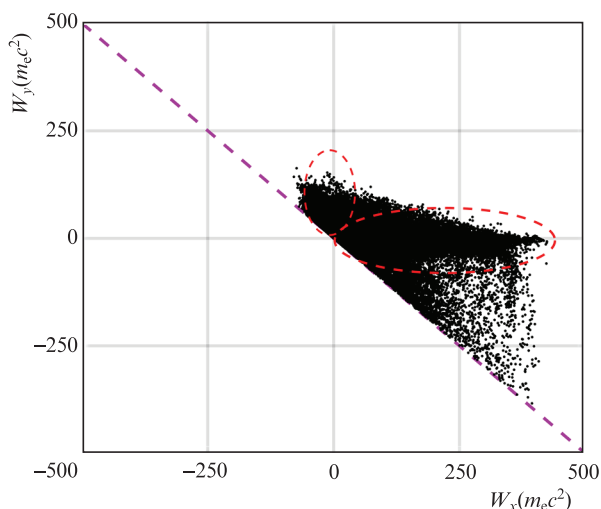


Рис.3. Отображение набора энергии электронами в плоскости (W_x, W_y) . Красные штриховые линии показывают населенности электронов, возникающие в результате продольного (большое значение W_x) и поперечного (большое W_y) ускорения. Фиолетовая штриховая линия соответствует $W_x + W_y = 0$.

поля E_x и электронной концентрации n_e . Отметим, что поле E_x вблизи тонкой пленки – это «чистое» поле ППВ, поскольку продольное поле симметричного лазерного импульса здесь равно нулю. Хорошо видно, что ППВ движется вперед вместе с лазерным импульсом со скоростью, близкой к скорости света. Между тем электронные нанобанки захватываются внутри потенциальной ямы, образованной ППВ, где они набирают энергию непосредственно от продольного поля ППВ. В качестве пояснения на рис.3 приведена плоскость набора энергии (W_x, W_y) каждого электрона в момент времени $t = 80T_0$, где W_x и W_y определены как

$$W_x = - \int ev_x E_x dt,$$

$$W_y = - \int ev_y E_y dt.$$

Фиолетовая штриховая линия означает, что $W_x + W_y = 0$, и поэтому все электроны расположены в верхней правой полуплоскости. Красные штриховые линии ограничивают области преимущественно продольного и поперечного ускорения. Хорошо видно, что большинство электронов приобретают больше энергии от продольного поля, т.е. их ускоряет ППВ. Для наиболее энергетичных электронов поперечное поле E_y даже замедляет их ($W_y < 0$). Максимальное значение W_x достигает $\sim 450m_e c^2$, что примерно в три раза больше, чем максимальное значение W_y . Это указывает на то, что в исследуемом режиме ППВ доминирует в процессе ускорения электронов.

Разделим далее электроны на две группы, чтобы облегчить сравнение и показать различия в процессах ускорения. Группа А представляет те электроны, которые получили больше энергии от продольной компоненты электрического поля, т.е. $W_x > W_y$, а группа В – те электроны, которые получили больше энергии от поперечной компоненты, т.е. $W_x < W_y$.

Траектории репрезентативных электронов из групп А и В показаны на рис.4, где эти траектории закодированы цветом относительно релятивистского фактора γ .

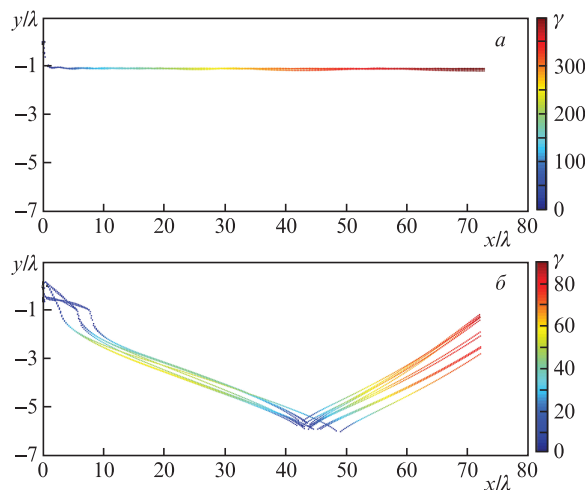


Рис.4. Траектории 10 электронов из группы А (а) и группы В (б). Цвет линий отвечает полной нормированной релятивистской энергии электрона γ .

На рис.4,а выбраны электроны, удовлетворяющие условиям $W_x > W_y$ и $W_x > 0.95W_{x \max}$ при $t = 80T_0$, поскольку нас в основном интересуют электроны с высокой энергией (здесь $W_{x \max}$ – максимальное значение W_x в рассматриваемый момент времени). Из рисунка видно, что эти электроны в основном ускоряются вперед вблизи поверхности мишени, а их поперечные смещения очень малы. Этим они сильно отличаются от электронов группы В (рис.4,б), которые имеют гораздо большие поперечные смещения при движении вперед, поскольку преимущественно ускоряются полем E_y , а затем поворачиваются вперед под действием силы $v \times B$. В то же время эти электроны колеблются в поперечном направлении, что указывает на их переход в фазу ускорения или замедления, определяемую продольным положением электронов относительно фазы лазерного поля (подобно процессу ускорения одиночного электрона в вакууме). Однако из-за продольной компоненты полей, такие электроны могут достигать более высоких энергий, чем предельная энергия для «свободных электронов» $m_e c^2 a_0^2 / 2 \sim 26$ МэВ [22]. Отметим, что репрезентативные электроны группы В выбраны из тех, которые удовлетворяют условиям $W_x < W_y$ и $W_y > 0.85W_{y \max}$ (учитывалось, что в этой группе гораздо меньше электронов высоких энергий). Здесь $W_{y \max}$ – максимальное значение W_y при $t = 80T_0$.

Угловые распределения для двух групп электронов представлены на рис.5. Для группы А угловой разброс электронов чрезвычайно мал; угол расходимости высокоэнергетических (более 100 МэВ) электронов составляет всего около 1° (рис.5,а). Что касается электронов группы В, то их угловой разброс намного больше: угол расходимости составляет около 5° для электронов с энергией более 50 МэВ (рис.5,б).

На рис.6,а приведены временные изменения максимальной энергии электрона E_{\max} , $W_{x \max}$ и $W_{y \max}$. Видно, что вначале эти зависимости растут быстро, а затем – существенно медленнее. Максимальная энергия при $t = 80T_0$ достигает примерно 220 МэВ, что намного выше, чем предел для «свободных электронов» (26 МэВ). Отметим, что значение $W_{x \max}$ всегда немного больше значения E_{\max} . Это означает, что поперечное поле даже замедляет эти электроны. Соответствующие энергетические спектры изображены на рис.6,б. Видно, что большая

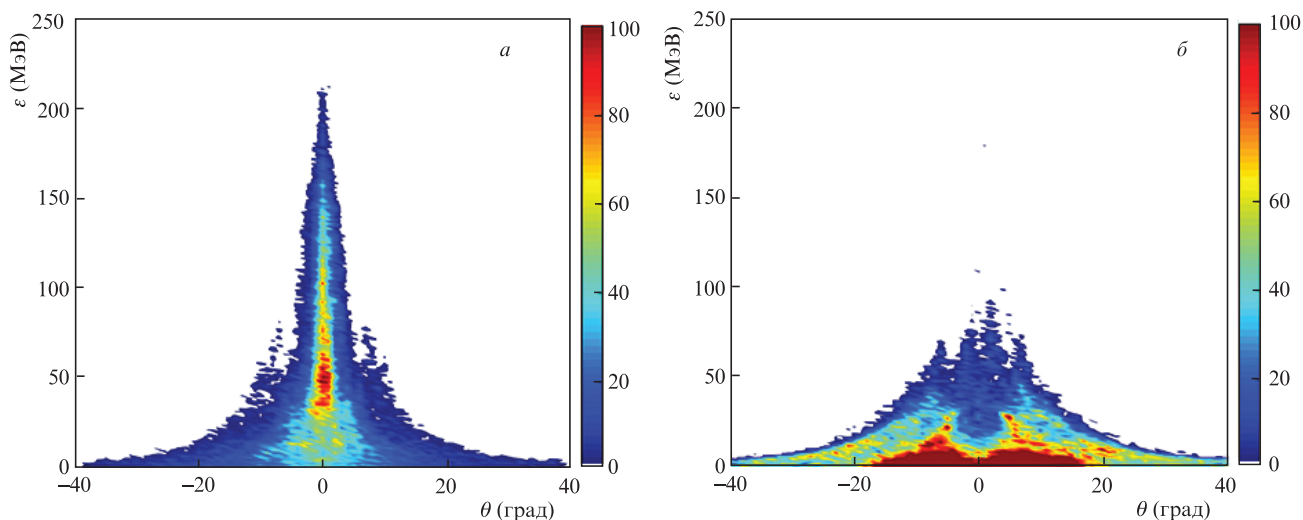


Рис.5. Угловые распределения электронов из группы А (а) и группы В (б) при $t = 80T_0$ (цветовая шкала представляет относительное число электронов).

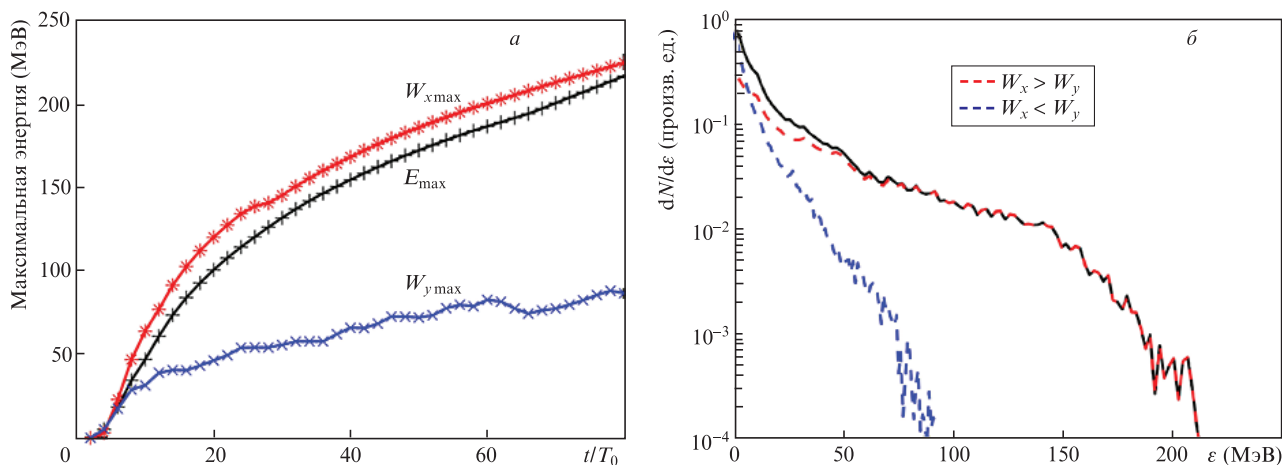


Рис.6. Временная эволюция максимальной энергии электрона E_{\max} , а также $W_{x\max}$ и $W_{y\max}$ (а) и энергетические спектры всех электронов (черная сплошная кривая), электронов из группы А (красная штриховая кривая) и группы В (синяя штриховая кривая) (б) при $t = 80T_0$.

часть электронов высоких энергий в основном ускоряется продольным полем, в то время как лишь небольшая часть электронов ускорена преимущественно за счет поперечного поля. Максимальная энергия электронов в группе В составляет около 90 МэВ, что заметно меньше, чем в группе А.

Общее число электронов с $\gamma > 10$ достигает примерно 7.5×10^{10} , при этом на группы А и В приходится 5.4×10^{10} и 2.1×10^{10} электронов соответственно. В данных расчетах принята длина третьего измерения как 10λ .

4. Заключение

Таким образом, с помощью двумерного PIC-моделирования исследовано ускорение электронов в режиме лазерного скребка с учетом преплазмы. Показано, что ускорение в основном происходит за счет продольного поля, т.е. через поверхностную плазменную волну. Это определяет сильную коллимацию электронного пучка. Максимальная энергия электронов достигает примерно 220 МэВ, что намного превышает предел для «свободных электронов», а заряд высокоэнергетических электронов может

достигать десятков нКл, что очень важно для разнообразных приложений [10, 12, 16, 17, 25].

Работа поддержана DFG (проект ПУ 213/9). С.Ф.Ш. с благодарностью признает поддержку со стороны Фонда Александра фон Гумбольдта. Авторы выражают признательность Центру Гаусса для суперкомпьютеров (GCS) за поддержку этого проекта путем предоставления вычислительного времени на суперкомпьютере GCS JUWELS в суперкомпьютерном центре Jülich. С.Ф.Ш. благодарит за полезные обсуждения с Л.Райхвайном (L. Reichwein) в Университете им. Генриха Гейне (HNU). Начальный набор параметров численного эксперимента разработан при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-62-46050).

1. Tajima T., Dawson J.M. *Phys. Rev. Lett.*, **43**, 267 (1979).
2. Pukhov A., Sheng Z.-M., Meyer-Ter-Vehn J. *Phys. Plasmas*, **6**, 2847 (1999).
3. Pukhov A., Meyer-Ter-Vehn J. *Appl. Phys. B*, **74**, 355 (2002).
4. Esarey E., Schroeder C.B., Leemans W.P. *Rev. Mod. Phys.*, **81**, 1229 (2009).
5. Gonsalves A.J. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **122**, 084801 (2019).
6. Rosmej O.N. et al. *Plasma Phys. Controlled Fusion*, **62**, 115024 (2020).

7. Kluge T., Gaillard S.A., Flippo K.A., et al. *New J. Phys.*, **14**, 023038 (2012).
8. Xiao K.D., Huang T.W., Ju L.B., et al. *Phys. Rev. E*, **93**, 043207 (2016).
9. Kaymak V., Pukhov A., Shlyaptsev V.N., Rocca J.J. *Phys. Rev. Lett.*, **117**, 035004 (2016).
10. Yi L.Q., Pukhov A., Luu-Thanh P., Shen B. *Phys. Rev. Lett.*, **116**, 115001 (2016).
11. Jiang S. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **116**, 085002 (2016).
12. Zou D.B., Pukhov A., Yi L.Q., Zhuo H.B., Yu T.P., Yin Y., Shao F.Q. *Sci. Rep.*, **7**, 42666 (2017).
13. Curtis A., Calvi C., Tinsley J., et al. *Nat. Commun.*, **9**, 1077 (2018).
14. He H. et al. *New J. Phys.*, **21**, 033035 (2019).
15. Gong Z., Robinson A.P.L., Yan X. Q., Arefiev A.V. *Plasma Phys. Controlled Fusion*, **61**, 035012 (2019).
16. Shen X.F., Pukhov A., Qiao B. arXiv:2009.04279 (2020).
17. Gizzi L.A. et al. *Phys. Rev. Research*, **2**, 033451 (2020).
18. Macchi A. *Phys. Plasma*, **25**, 031906 (2018).
19. Macchi A., Borghesi M., Passoni M. *Rev. Mod. Phys.*, **85**, 751 (2013).
20. Shen X.F., Qiao B., Zhang H., Kar S., Zhou C.T., Chang H.X., Borghesi M., He X.T. *Phys. Rev. Lett.*, **118**, 204802 (2017).
21. Qiao B., Shen X.F., He H., Xie Y., Zhang H., Zhou C.T., Zhu S.P., He X.T. *Plasma Phys. Controlled Fusion*, **61**, 014039 (2019).
22. Robinson A.P.L., Arefiev A.V., Neely D. *Phys. Rev. Lett.*, **111**, 065002 (2013).
23. Arber T. et al. *Plasma Phys. Controlled Fusion*, **57**, 113001 (2015).
24. Pukhov A. *J. Comput. Phys.*, **418**, 109622 (2020).
25. Shen X.F., Pukhov A., Günther M.M., Rosmej O.N. *Appl. Phys. Lett.*, **118**, 134102 (2021).