



·惯性约束聚变物理与技术·

填充预等离子体通道靶激光电子加速研究*

王子涛, 周维民, 邓志刚, 宋尧祥

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心 等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 采用紧聚焦的超强短脉冲激光与固体通道靶相互作用是获得大电量、高准直相对论电子束的一种有效方式。实验中由于激光预脉冲烧蚀靶壁产生预等离子体会膨胀、填充到真空通道中, 从而导致电子束品质发生变化。采用二维 PIC 粒子模拟程序研究了通道靶中填充预等离子体的电子加速过程。模拟结果显示, 在功率密度为 $5.0 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 的超强短脉冲激光条件下, 通道中填充一定密度的等离子体时激光场优先与低密度等离子体相互作用, 激光脉冲与通道壁的相互作用减弱, 电子加速机制由纵向场主导的真空电子加速转变为横向电场主导的等离子体电子加速, 产生电子束具有更大的电荷量, 但能量降低, 发散角增大。

关键词: 超强激光; 电子加速; 通道靶; 预等离子体; 粒子模拟

中图分类号: O434.12

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220067

Laser electron acceleration in pre-plasma-filled channel targets

Wang Zitao, Zhou Weimin, Deng Zhigang, Song Yaoxiang

(Science and Technology on Plasma Laboratory, Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Two-dimensional PIC (Particle-in-Cell) simulation is used to investigate the electron acceleration process when a vacuum channel is filled with pre-plasma. Using a tightly focused ultra-intense short-pulse laser to interact with a hollow plasma channel is an effective way to obtain a relativistic electron beam with high power and high collimation. In the experiment, the pre-plasma generated by the laser pre-pulse ablation of the target wall will expand and fill the vacuum channel, resulting in changes in the quality of the electron beam. The simulation results show that under the condition of short-pulse laser with a power density of $5.0 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$, the laser field preferentially interacts with the low-density plasma when the channel is filled with plasmas. The laser pulse interacts with the low-density plasma and the interaction of the channel wall is weakened. The electron acceleration mechanism is transformed from the vacuum electron acceleration dominated by the longitudinal field to the plasma electron acceleration dominated by the transverse electric field, resulting in an electron beam with a larger amount of charge, but with a lower energy and an increased divergence angle.

Key words: ultra-intense laser, electron acceleration, channel target, pre-plasma, particle simulation

相对论电子束是产生各类次级粒子源^[1-4]与辐射源^[5-7]的基础和前提, 在惯性约束聚变研究^[8-10]、高能量密度物理^[11-12]、实验室天体物理^[13-14]等研究领域具有广阔的应用前景。高功率激光技术的发展^[15-16]为物理学研究开辟了新领域, 激光驱动的电子加速器具有加速梯度高、结构紧凑、成本低廉等特点, 多种基于超强短脉冲激光的电子加速方案被提出并得到深入研究, 比如激光尾波场电子加速^[17-18]、共振吸收^[19-21]、真空加热^[22]方案等。

激光直接加速 (DLA)^[23-24]是一种极为有效的电子加速机制, 近年来受到广泛关注。当激光峰值功率达到 $1.37 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 的相对论强度 (激光波长为 $1.0 \mu\text{m}$, 激光电场无量纲振幅 $a_0 = eE_0 / (m_e \omega_0 c) = 1$, e 为电子电荷量, E_0 为激光电场振幅, ω_0 为激光频率, m_e 为电子静止质量, c 为真空中光速) 时, 电子在一个光学周期内获得的能量与电子本身的静止质量相当, 电子速度被提升至接近光速, 同时受到磁场力 $v \times B$ 的作用, 使其在激光传播方向获得极大的

* 收稿日期: 2022-03-13; 修订日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11775202)

联系方式: 王子涛, wzt12345@mail.ustc.edu.cn。

通信作者: 周维民, zhouwm@caep.cn;

邓志刚, dzgzju@163.com。

动量,电子被有效加速从激光场直接获得能量。通常 DLA 方案采用超强短脉冲激光与低密度等离子体相互作用驱动出等离子体通道,在抑制激光散焦的同时聚焦电子束,但是由于电子的横向震荡运动,电子束通常具有相对较大的发散角^[25]。

激光与固体靶相互作用实现真空激光加速(VLA)是近年来的研究热点^[26-30],其基本思想是具有一定初速度的电子通过激光-固体靶相互作用自注入到超强激光场中,电子在合适的相位被俘获,并在半个光学周期内获得持续加速。相关研究表明该过程中电子获得的最大能量满足 $\Delta E \propto m_e c^2 \gamma_0 a_0^2$ (其中 γ_0 为电子初始洛伦兹因子),因此,电子若要获得高能量增益则需要较高的初始能量($\gamma_0 \gg 1$)和较高的激光强度($a_0 \gg 1$)^[26]。这种加速方案的特点主要有靶结构简单易控,电子可以实现自注入,加速梯度高(TV/m),电子束准直性好(发散角约几度),电子电量大(nC)等。在众多 VLA 方案中,基于激光-通道靶相互作用的电子加速在理论与模拟方面已获得了广泛的研究,包括电子动力学研究^[29]、通道中纵向场增强^[30-31]、准静态电磁场演化^[28]、基于 VLA 的辐射研究^[7,32]及离子动理学的影响^[33-34]等。

尽管激光-通道靶加速机制的理论与模拟研究取得了重要进展^[35],但其实验观测以及机制论证依然具有挑战性^[27,29]。激光-通道靶作用中电子的注入以及激光-靶耦合所需要的苛刻条件为实验带来困难,尤其是实验中由于激光预脉冲作用产生的预等离子体是不可避免的,通道真空条件的破坏对纵向场主导的加速机制产生重要影响^[32]。本文采用了 2 维 PIC 模拟研究了超强短脉冲激光与填充等离子体通道靶的作用机制,考虑了填充不同密度的预等离子体对电子束的影响,并与理想条件下激光-通道靶电子加速进行了对比分析。

1 模型设置

为研究微通道中填充一定密度的预等离子体对电子加速过程的影响,我们采用二维 PIC 粒子程序 EPOCH^[36]对激光与通道靶的作用过程进行了数值模拟研究。模拟示意图如图 1 所示,模拟中采用一束高强度飞秒激光脉冲,使其由左向右传播且激光光轴与通道靶中心轴保持一致;激光在微通道靶前表面聚焦,随后正入射进入微通道靶内部,在通道内部捕获和加速电子。

模拟中选用脉冲宽度 $\tau = 42$ fs, 波长 $\lambda_0 = 1.0$ μm , 激光焦斑半径 $w_0 = 5$ μm 的 p 极化高斯脉冲,激光峰值功率密度 $I = 5.0 \times 10^{20}$ W/cm², 对应激光强度(无量纲振幅) $a_0 = eE_0/m_e c \omega_0 = 19$ 。微通道靶壁厚 $h = 1$ μm , 内径 $D = 12$ μm , 长度 $L = 150$ μm ,由完全电离的Si¹⁰⁺离子和电子组成, Si¹⁰⁺离子数密度 $10n_c$, 电子密度为 $100n_c$, 其中 $n_c = m_e \omega_0^2 / 4\pi e^2$ 为临界等离子体密度。通道内部均匀填充由完全电离的Si¹⁰⁺离子和电子组成的预等离子体。模拟窗口大小 $x \times y = 150\lambda_0 \times 20\lambda_0$, 网格大小为 $0.02\lambda_0 \times 0.02\lambda_0$, 每个网格包含 5 个Si¹⁰⁺宏粒子和 20 个电子宏粒子。

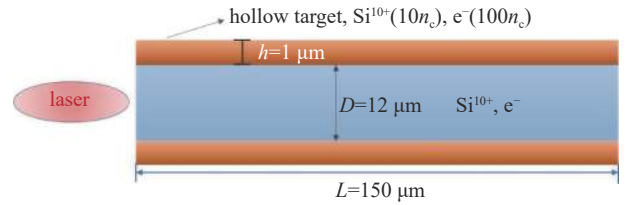


Fig. 1 Schematic of the channel target. Laser pulse injects coaxially to pre-plasma filled channel target

图 1 模拟示意图, 激光脉冲同轴注入填充等离子体通道靶

2 填充预等离子体对电子加速的影响

在本文中,按照通道内部是否填充预等离子体将靶型分为填充通道和真空通道两种类型。图 2(a)给出激光脉冲与真空通道作用后 $t = 260$ fs时刻通道内部的电子数密度分布,部分电子被激光横向电场拉出并填充到真空通道,电子束被激光场捕获呈现周期性的规则排布,呈现为条带状结构且间隔周期为 λ_0 ,此外图中还观测到了管道内的电子密度分布以中心轴线为界上下两部分之间存在 $\lambda_0/2$ 的位置偏差,这是由于激光纵向电场以脉冲轴线为界上

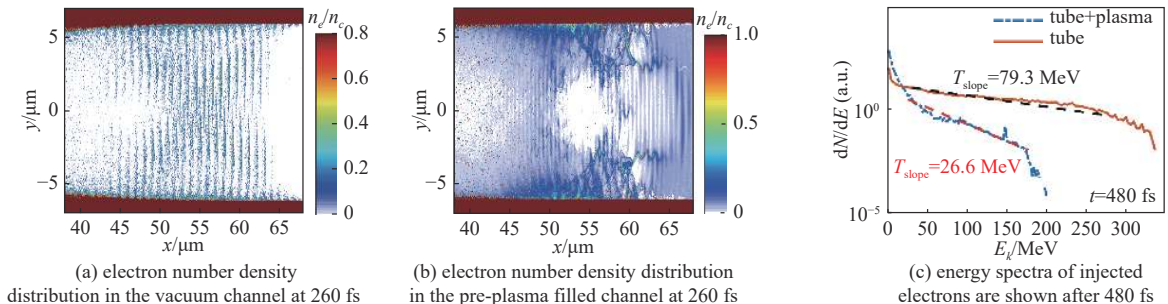


Fig. 2 Electron number density and electron spectral distribution

图 2 电子数密度及电子能谱分布

下两部分之间相位差为 π 的原因造成的^[30]。作为对比, 图 2(b) 给出 $t = 260$ fs 时刻通道内预先填充了密度为 $n_e = 0.05n_c$ ($n_c \approx 6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) 的预等离子体的情况。可以看出, 通道内填充预等离子体会显著影响到电子在通道内部的密度分布; 由于预等离子体存在, 激光不再与管道壁作用拉出管壁电子, 而是直接与填充等离子体作用, 利用激光有质动力将电子排开, 产生等离子体通道结构, 部分电子被注入到等离子体通道内部, 形成了不规则的电子密度分布结构。图 2(c) 给出了 480 fs 时刻两种靶型的电子能谱分布, 其中蓝色点划线代表填充等离子体通道产生的电子能谱, 橙色实线代表真空通道产生的电子能谱。由于电子的随机注入, 激光脉冲-真空靶作用中电子能谱分布呈现平台型结构, 高能端电子数目分布比较均匀, 电子斜率温度约为 79.3 MeV; 而当通道内部填充了预等离子体时产生的电子能谱呈现典型的指数谱结构, 大量电子集中于低能端, 高能端电子数目显著减少, 电子斜率温度 $T_e = 26.6 \text{ MeV}$ 也远小于真空通道情况。

预等离子体填充对电子束的发散角也有显著影响。图 3(a) 给出 $t = 260$ fs 时刻两种靶型的电子角束发散角, 其中蓝色点划线表示填充预等离子体情况 ($n_e = 0.05n_c$), 橙色实线代表真空通道情况。从图中可以看出, 激光与真空通道作用产生的电子束具有极好的准直性, 电子束的发散角仅为 5° (FWHM); 而当通道内部填充了一定密度的预等离子体后电子束角分布近似呈现宽平台分布, 有轻微的双峰结构, 电子束发散度显著增大, 半高全宽达到近 60° , 远超真空通道情况。图 3(b), (c) 给出了 480 fs 时刻填充通道和真空通道中电子发散角关于电子能量的数密度分布。填充通道中大多数电子位于低能端, 高能端电子 ($E > 200 \text{ MeV}$) 数目少且发散角大 (几十度), 具有双峰分布; 而真空通道中电子发散角较小, 大量电子集中在高能端, 仅具有几度的发散角。上述模拟结果显示, 等离子体填充会显著影响到激光与通道的相互作用过程, 进而导致加速电子束的特性发生明显变化。

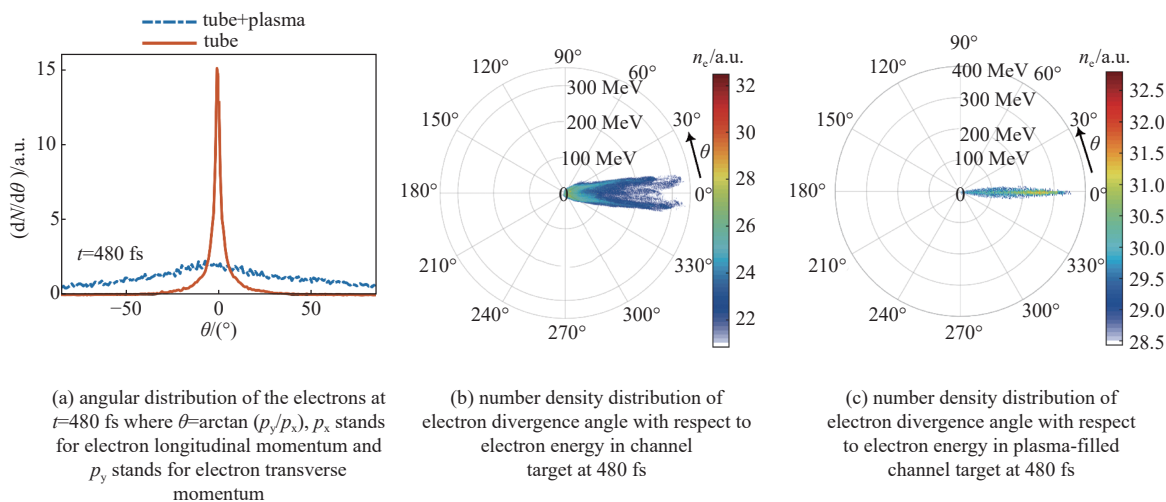


Fig. 3 Statistics of electron beam angle distribution

图 3 电子束角分布统计

填充等离子体导致电子束结构发生变化, 我们对两种情况中电子加速过程进行对比分析。图 4(a), (b) 分别统计了 480 fs 时刻填充等离子体通道 ($n_e = 0.05n_c$) 和真空通道中激光场对电子的累计做功。两种作用模型中, 电场分量对电子的做功贡献差异较大, 尤其体现在能量较高的电子 (电子能量 $E > 250 \text{ MeV}$)。真空通道中, $E > 250 \text{ MeV}$ 的电子以纵向电场做功为主导, 横向场对其能量贡献较小; 而填充等离子体通道靶中纵向场的作用效果较弱, 高能端电子以横向场做功为主导, 加速机制以及激光场做功的不同导致了电子束准直性的差异。

我们统计了不同时刻两种激光-靶作用方式下 $\gamma \geq 1.3$ 的电子总电量以及能量 $E \geq 50 \text{ MeV}$ 的电子电荷量, 如图 5 所示。当通道中填充等离子体时, 激光场迅速加热低密度等离子体使得电子温度升高, 超热电子数目增加; 而真空通道靶中电子由激光场与通道壁相互作用通过真空加热等机制实现电子的注入, 处于合适相位的电子被激光场捕获。随着激光向前传输, 填充等离子体通道靶中电子洛伦兹因子 $\gamma \geq 1.3$ 电子数目逐渐增多, 而真空靶中 $\gamma \geq 1.3$ 的电子数增长缓慢; 但是对于能量 $E \geq 50 \text{ MeV}$ 的电子电量在两种情况下变化趋势正好相反。在 480 fs 时刻, 填充等离子体通道靶中电子总量 ($\gamma \geq 1.3$) 为真空通道靶的 2.6 倍, 但是 $E \geq 50 \text{ MeV}$ 的电子电量却仅为真空通道靶的 21%。激光脉冲与填充预等离子体通道靶作用产生电子束电量更大, 但大多数电子集中于低能端, 能量较高的电子数目减少。

为进一步研究等离子体填充对通道靶电子加速过程的影响, 我们改变通道内部填充等离子体的密度, 研究电子束特性 (能量、电量、发散角等) 随填充等离子体密度的变化, 如图 6 所示。我们发现, 随着填充等离子体密度在

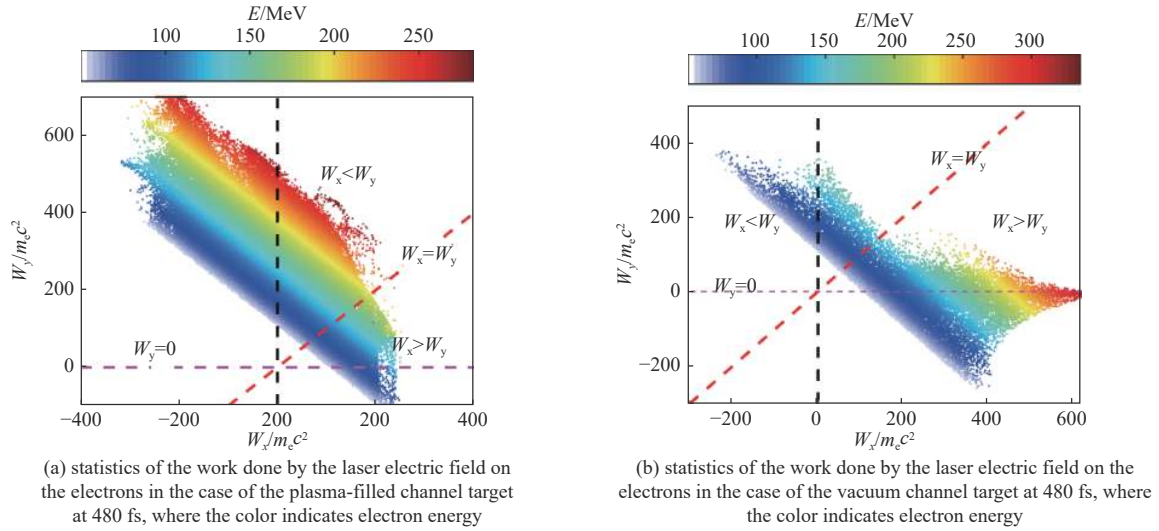


Fig. 4 Statistics of work done by the electric field on the electron beam

图 4 电场对电子束做功统计

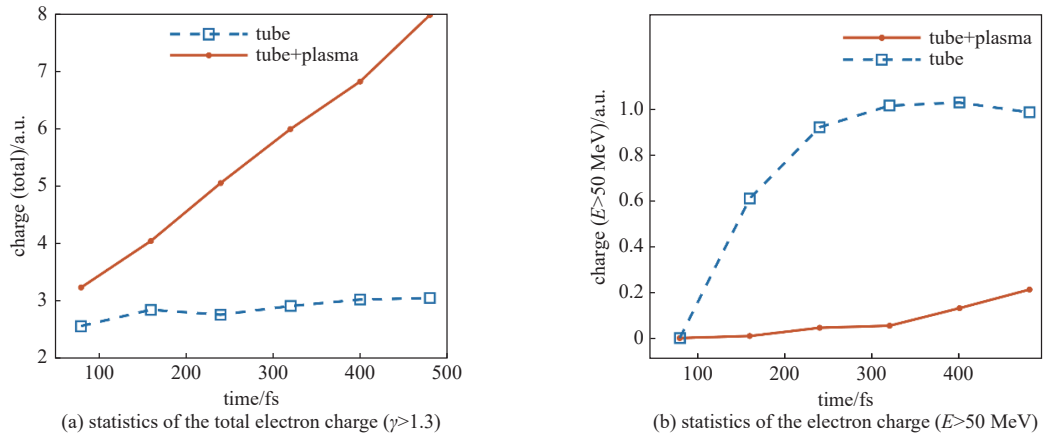
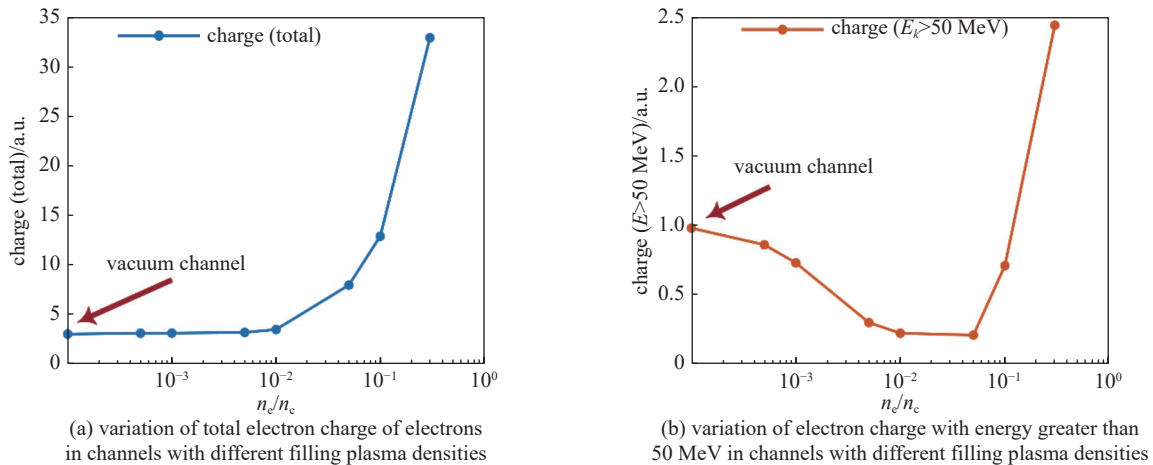


Fig. 5 Statistics of electron beam charge

图 5 电子束电荷量统计

$5 \times 10^{-4} n_c \sim 0.3 n_c$ 之间逐步增加, 所产生电子束的电荷量也逐步增加, 但高能端电子的电荷量提升效果不明显。以填充密度 $n_e = 0.1 n_c$ 为例, 加速电子束电荷量可以达到真空通道靶的 10 倍, 但此时大量电子集中于低能端, 高能端电子 ($E > 50$ MeV) 的电荷量仅为真空通道情况的 2.5 倍。填充不同密度预等离子体对电子束能量以及准直性有重要影响, 随着填充等离子体密度的升高电子温度逐渐降低, 且电子束发散角增大, 如图 6(c), (d) 所示。从上述分析可以看到, 通道内部填充等离子体会影响到激光与通道靶的相互作用过程, 会显著提高低能端电子的电荷量, 同时导致电子束温度的降低和发散角的增大。



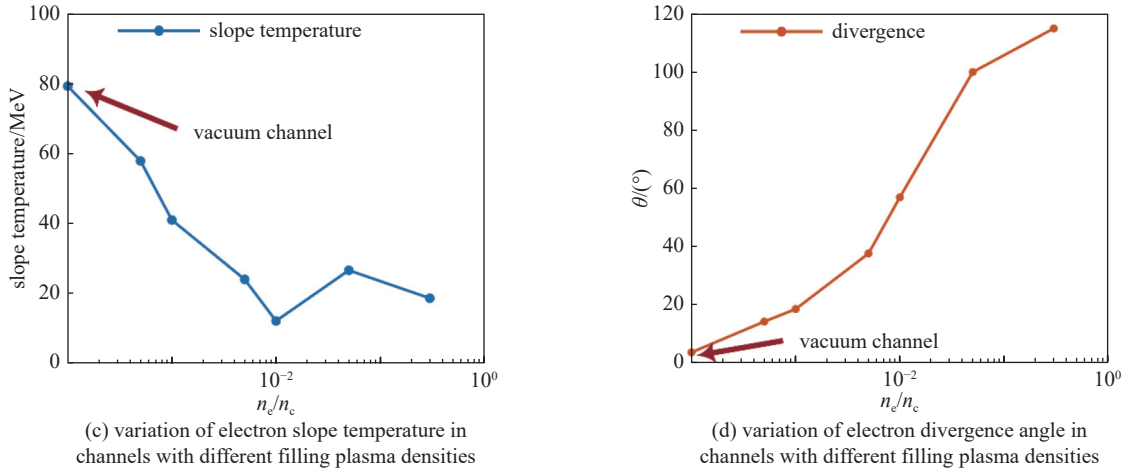


Fig. 6 Statistics of electron beams in the channel under different filling plasma densities at $t=480$ fs

图 6 $t = 480$ fs 时刻不同填充等离子体密度下通道内电子束统计

3 结论

本文采用二维 PIC 模拟程序研究了 p 极化高斯脉冲与填充预等离子体通道靶相互作用的电子加速, 并与真空通道情况进行了对比分析。模拟结果显示, 当真空通道中填充预等离子体时, 激光脉冲优先与低密度等离子体相互作用, 电子加速由横向电场主导, 产生相对论电子束总电量增大, 但是具有大的发散角且电子能量降低, 这对于超强短脉冲激光与通道靶相互作用的电子加速实验研究具有重要的参考意义。

参考文献:

- [1] Snavely R A, Key M H, Hatchett S P, et al. Intense high-energy proton beams from petawatt-laser irradiation of solids[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(14): 2945-2948.
- [2] Willingale L, Mangles S P D, Nilson P M, et al. Collimated multi-MeV ion beams from high-intensity laser interactions with underdense plasma[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96: 245002.
- [3] Roth M, Jung D, Falk K, et al. Bright laser-driven neutron source based on the relativistic transparency of solids[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110: 044802.
- [4] Vranic M, Klimo O, Korn G, et al. Multi-GeV electron-positron beam generation from laser-electron scattering[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 4702.
- [5] Stark D J, Toncian T, Arefiev A V. Enhanced multi-MeV photon emission by a laser-driven electron beam in a self-generated magnetic field[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116: 185003.
- [6] Huang T W, Kim C M, Zhou C T, et al. Highly efficient laser-driven Compton gamma-ray source[J]. *New Journal of Physics*, 2019, 21: 013008.
- [7] Yu J Q, Hu R H, Gong Z, et al. The generation of collimated γ -ray pulse from the interaction between 10 PW laser and a narrow tube target[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112: 204103.
- [8] Zhang F, Cai H B, Zhou W M, et al. Enhanced energy coupling for indirect-drive fast-ignition fusion targets[J]. *Nature Physics*, 2020, 16(7): 810-814.
- [9] Theobald W, Solodov A A, Stoeckl C, et al. Initial cone-in-shell fast-ignition experiments on OMEGA[J]. *Physics of Plasmas*, 2011, 18: 056305.
- [10] Jarrott L C, Wei M S, McGuffey C, et al. Visualizing fast electron energy transport into laser-compressed high-density fast-ignition targets[J]. *Nature Physics*, 2016, 12(5): 499-504.
- [11] Drake R P. High-energy-density physics[J]. *Physics Today*, 2010, 63(6): 28-33.
- [12] Del Sorbo D, Feugeas J L, Nicolai P, et al. Extension of a reduced entropic model of electron transport to magnetized nonlocal regimes of high-energy-density plasmas[J]. *Laser and Particle Beams*, 2016, 34(3): 412-425.
- [13] Verbeeck J, Tian H, Schattschneider P. Production and application of electron vortex beams[J]. *Nature*, 2010, 467(7313): 301-304.
- [14] Arnould M, Goriely S, Takahashi K. The r-process of stellar nucleosynthesis: astrophysics and nuclear physics achievements and mysteries[J]. *Physics Reports*, 2007, 450(4/6): 97-213.
- [15] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Optics Communications*, 1985, 55(6): 447-449.
- [16] Danson C, Hillier D, Hopps N, et al. Petawatt class lasers worldwide[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2015, 3: e3.
- [17] Faure J, Glinec A, Pukhov A, et al. A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams[J]. *Nature*, 2004, 431(7008): 541-544.
- [18] Pukhov A, Meyer-Ter-Vehn J. Laser wake field acceleration: the highly non-linear broken-wave regime[J]. *Applied Physics B*, 2002, 74(4/5): 355-361.
- [19] Pukhov A, Sheng Z M, Meyer-Ter-Vehn J. Particle acceleration in relativistic laser channels[J]. *Physics of Plasmas*, 1999, 6(7): 2847-2854.
- [20] Tsakiris G D, Gahn C, Tripathi V K. Laser induced electron acceleration in the presence of static electric and magnetic fields in a plasma[J]. *Physics of Plasmas*, 2000, 7(7): 3017-3030.
- [21] Gahn C, Tsakiris G D, Pukhov A, et al. Multi-MeV electron beam generation by direct laser acceleration in high-density plasma channels[J]. *Physical Review*

- Letters, 1999, 83(23): 4772-4775.
- [22] Brunel F. Not-so-resonant, resonant absorption[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 59(1): 52-55.
- [23] Arefiev A V, Khudik V N, Robinson A P L, et al. Beyond the ponderomotive limit: direct laser acceleration of relativistic electrons in sub-critical plasmas[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23: 056704.
- [24] Wang H Y, Lin C, Sheng Z M, et al. Laser shaping of a relativistic intense, short Gaussian pulse by a plasma lens[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107: 265002.
- [25] Hussein A E, Arefiev A V, Batson T, et al. Towards the optimisation of direct laser acceleration[J]. *New Journal of Physics*, 2021, 23: 023031.
- [26] Thévenet M, Leblanc A, Kahaly S, et al. Vacuum laser acceleration of relativistic electrons using plasma mirror injectors[J]. *Nature Physics*, 2016, 12(4): 355-360.
- [27] Snyder J, Ji L L, George K M, et al. Relativistic laser driven electron accelerator using micro-channel plasma targets[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26: 033110.
- [28] Gong Z, Robinson A P L, Yan X Q, et al. Highly collimated electron acceleration by longitudinal laser fields in a hollow-core target[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2019, 61: 035012.
- [29] Xiao K D, Huang T W, Ju L B, et al. Energetic electron-bunch generation in a phase-locked longitudinal laser electric field[J]. *Physical Review E*, 2016, 93: 043207.
- [30] Ji L L, Snyder J, Pukhov A, et al. Towards manipulating relativistic laser pulses with micro-tube plasma lenses[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23256.
- [31] 何武, 周维民, 张智猛, 等. 强激光与柱腔靶作用下准直高能电子束的产生[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 072003. (He Wu, Zhou Weimin, Zhang Zhimeng, et al. High-energy collimated electron acceleration from ultra-intense laser interaction with tube targets[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 072003)
- [32] 吉亮亮, 耿学松, 伍艺通, 等. 超强激光驱动的辐射反作用力效应与极化粒子加速[J]. *物理学报*, 2021, 70: 085203. (Ji Liangliang, Geng Xuesong, Wu Yitong, et al. Laser-driven radiation-reaction effect and polarized particle acceleration[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70: 085203)
- [33] Gong Zheng, Mackenroth F, Wang Tao, et al. Direct laser acceleration of electrons assisted by strong laser-driven azimuthal plasma magnetic fields[J]. *Physical Review E*, 2020, 102: 013206.
- [34] Wang Tao, Gong Zheng, Chin K, et al. Impact of ion dynamics on laser-driven electron acceleration and gamma-ray emission in structured targets at ultra-high laser intensities[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2019, 61: 084004.
- [35] Ji L L, Snyder J, Shen B F. Single-pulse laser-electron collision within a micro-channel plasma target[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2019, 61: 065019.
- [36] Arber T D, Bennett K, Brady C S, et al. Contemporary particle-in-cell approach to laser-plasma modelling[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2015, 57: 113001.