

15 TW 激光与氮气作用 产生稳定电子束的实验研究

李毅飞¹, 李大章², 王进光¹, 朱常青¹, 冯杰¹, 何雨航¹, 陈黎明^{1,3,*}

(1. 中国科学院 物理研究所 光物理重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院 高能物理研究所 加速器中心, 北京 100049;

3. 中国科学院 物理研究所 松山湖材料实验室, 广东 东莞 523808)

摘要: 利用 15 TW 激光脉冲, 系统研究了基于电离化注入的激光尾波场加速。实验中, 研究了等离子体密度、相互作用位置、激光脉宽以及激光能量对电子束的电荷量、发散角、指向性、能量以及产生概率的影响。将约 400 mJ、25 fs 的激光脉冲聚焦在喷嘴前沿, 等离子体密度约 $9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 电子的产生概率高达 100%, 获得了水平(竖直)发散角 $(6.5 \pm 0.5) \text{ mrad}$ ($(5.3 \pm 0.3) \text{ mrad}$)、水平(竖直)指向稳定性 $\pm 1.2 \text{ mrad}$ ($\pm 0.7 \text{ mrad}$)、峰值能量 $(135 \pm 8) \text{ MeV}$ 和电荷量 $(13.5 \pm 2.0) \text{ pC}$ ($> 50 \text{ MeV}$) 的稳定电子束, 为其应用奠定了基础。

关键词: 激光尾波场加速; 电离化注入; 高能电子束; 电子加速器

中图分类号: O531; O538; O539

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2019)09-1621-08

doi: 10.7538/yzk.2019.youxian.0203

Experimental Study on Stable Electron Beam Generation from 15 TW Laser Interacting with Nitrogen

LI Yifei¹, LI Dazhang², WANG Jinguang¹, ZHU Changqing¹,
FENG Jie¹, HE Yuhang¹, CHEN Liming^{1,3,*}

(1. *Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences,*

Beijing 100190, China; 2. *Accelerator Division, Institute of High Energy Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. *Songshan Lake Materials Laboratory,*

Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Dongguan 523808, China)

Abstract: The 15 TW laser pulses were used to systematically study laser wakefield acceleration based on ionization injection. In the experiments, the influence of plasma density, interaction position, laser pulse duration and laser energy on the charge, divergence, pointing stability, energy and generation probability of electron beams was stud-

收稿日期: 2019-03-23; 修回日期: 2019-04-19

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(11805266); 国家自然科学基金重点项目资助(11334013); 国家自然科学基金联合基金资助项目(U1530150)

作者简介: 李毅飞(1987—), 男, 河南新乡人, 助理研究员, 博士, 激光等离子体物理专业

* 通信作者: 陈黎明, E-mail: lmchen@iphy.ac.cn

网络出版时间: 2019-05-20; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20190520.1217.008.html>

ied. When laser pulses with about 400 mJ and 25 fs are focused on the nozzle's front and plasma density is about $9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, the generation probability of electron beams is as high as 100%. And, stable electron beams with horizontal (vertical) divergence of $(6.5 \pm 0.5) \text{ mrad}$ ($(5.3 \pm 0.3) \text{ mrad}$), horizontal (vertical) pointing stability of $\pm 1.2 \text{ mrad}$ ($\pm 0.7 \text{ mrad}$), peak energy of $(135 \pm 8) \text{ MeV}$ and charge of $(13.5 \pm 2.0) \text{ pC}$ ($>50 \text{ MeV}$) are obtained, paving a solid foundation for its application.

Key words: laser wakefield acceleration; ionization injection; energetic electron beam; electron accelerator

高能粒子加速器产生的粒子束和辐射源在物理、生物、化学、医学等领域有广泛的应用。目前,传统加速器受限于波导腔的电场承受阈值,射频电场的加速梯度小于 100 MV/m 。因此,发展具有更高加速梯度、台面化的新型加速器,作为传统加速器的一种有效补充,得到了广泛的研究。超强激光脉冲^[1]或相对论粒子束^[2-3]在等离子体中传播时,可激发大振幅的等离子体波对电子进行加速,相应地被称为激光尾波场加速(LWFA)和等离子体尾波场加速(PWFA)。等离子体波作为加速结构,其加速电场 E_0 (V/m, $E_0 \approx 96n_0^{1/2}$, n_0 为等离子体密度, cm^{-3}),对于密度为 10^{18} cm^{-3} 的等离子体,其加速梯度高达 100 GV/m ,较传统加速器高3个量级;此外,对于典型的等离子体加速器,等离子体波长 λ_p (μm , $\lambda_p \approx 3.3 \times 10^{10} n_0^{-1/2}$)通常只有几十 μm ,因此可产生 fs 量级脉宽的超短电子束^[4]。

随着高功率激光技术^[5-6]的不断进步和对加速物理过程的深入理解^[4],LWFA 实验研究在提高电子束能量^[7-11]和改善电子束品质^[12-24]方面取得了巨大进展。在电子能量方面,目前的世界纪录是由 Leemans 带领的研究团队于 2019 年报道的,他们利用 850 TW、35 fs 的激光脉冲,在 20 cm 长毛细管产生的预等离子体通道中传输,获得了 7.8 GeV 的准单能电子束^[14]。进一步提高能量需要更高的激光功率和更长的预等离子体通道,或通过级联加速的方式^[25]。不管是哪种方式,对激光功率、实验技术都有很高的要求或挑战性。另外,人们正在努力优化 LWFA 产生的电子束品质,目的是使其能作为次级粒子、辐射源的种子电子。

电子的注入过程是 LWFA 的一个关键问

题,对电子在尾波场加速过程中的动力学行为有非常重大的影响,进而影响产生电子束的品质和稳定性。对于自注入方式,电子的注入过程依赖于波破等非线性效应,对激光脉冲的非线性演化非常敏感,因此激光或等离子体初始条件的微小变化都可能会造成每次电子注入、加速过程的不同,进而严重影响被加速电子参数的稳定性。为克服自注入方式的不稳定性,一些更加可控的注入方式被提出来,主要包括光学注入^[15]、密度梯度注入^[17-19]、电离化注入^[26-28]。光学注入方式是利用额外 1 或 2 束激光脉冲加热电子、扰动电子轨道实现注入,但对脉冲间的时空同步精度(fs、 μm 量级)要求非常高,实验操作难度大。密度梯度注入是利用密度下降区尾波相速度减少来实现注入,但制造陡峭的密度下降区较困难,也会增加实验的复杂性。电离化注入是利用高 Z 气体(如氮气、氧气)内外层电子较大的电离势能差,使内层电子只在激光强度的峰值区域或激光自聚焦后才被电离,在尾波场内部获得加速并被捕获,具有较好的稳定性和对电子束相空间控制的潜力。电离化注入的优势是具有更低的注入阈值,可工作在相对低的激光功率和等离子体密度下;但由于注入通常难于截止,电子束的能散较大。很多应用对电子束的单能性要求不高,但对其参数的稳定性要求较高。通过将注入级和加速级分开^[29-31]、调制等离子体密度分布^[32]、引入额外的第 2 束激光脉冲^[33-35]、设计初始的激光等离子体条件^[36-39]等方式可优化电离化注入电子束的能散。因此,近年来基于电离化注入的电子加速研究是一个热点。氮气 K、L 层电子的电离势能差别很大^[40], N^{5+} 对应 98 eV、 N^{6+} 对应 552 eV,需要的激光功率密度分别是

约 $2 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ 和约 $6 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$, 因此氮气非常适合作为电离化注入的加速介质。

本文采用 15 TW 激光脉冲驱动尾波场加速, 利用纯氮气作为气体靶, 对电离化注入产生的电子束进行详细研究, 并研究等离子体密度、相互作用位置、激光脉宽、激光能量对出射电子束品质的影响, 包括电子束的发散角、指向性、电荷量、能谱结构等参数及产生概率。

1 实验装置

本实验是在中国科学院物理研究所 L05 组的 20 TW 高功率 fs 激光装置上进行的。实验布局如图 1 所示, 包括激光打靶系统、激光焦斑监测系统、电子参数诊断系统和光学诊断系统(包括 Top-view 系统和 Nomarski 干涉及阴影成像系统)。利用 Pellica 将激光分为 2 束, 其中 92% 的反射激光作为主脉冲, 与气体靶作用; 8% 的透射激光作为探针光, 用于干涉和阴影成像。约 400 mJ、25 fs、 $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$ 的主脉冲被 $F = 12.5$ 的离轴抛物面镜(OAP)聚焦至 1.2 mm \times 10 mm 的超音速喷嘴上方 2 mm 处, 实验中用 1.2 mm 的长度。激光焦斑的束腰半径 w_0 约 13 μm , 能量集中度约 60%, 激光峰值功率密度 I_0 约 $6 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$, 对应的归一化矢势强度 a_0 约 1.7。实验使用纯氮气和纯氦气, 通过 Nomarski 干涉和阴影系统来测量不同气体背压下的等离子体密度和阴影通道。利用 Top-view 成像系统, 同时监测 800 nm 汤姆逊

散射光和可见光波段的等离子体自发光以监测激光与气体的相互作用。利用标定过的磷屏(DRZ-HIGH 型)^[41] 和 EMCCD, 或 IP(成像板)^[42], 结合磁场强度 0.9 T、长 8 cm 的电子谱仪测量出射电子束的发散角、电荷量、能谱、指向性等参数。电子谱仪入口处放置了接收角约 12 mrad 的准直器, 以减小指向不稳定性带来的能量不确定度。

2 电离化注入电子束的产生和优化

对于自注入, 通常需要激光归一化矢势强度 a_0 约 3 时才能实现注入^[43]。目前基于自注入产生单能电子的实验大部分都工作在空泡加速机制^[44]下, 当激光等离子体参数满足匹配条件^[44], 即 $a_0 \geq 4$ 和 $k_p w_0 \approx 2a_0^{1/2}$ (等离子体波数 $k_p = 2\pi/\lambda_p$) 时, 可产生单能电子束; 电子最大的能量增益通常受限于失相长度 ($L_d \propto n_p^{-3/2}$) 和腔内的最大纵向电场 ($E_{\text{max}} \propto n_p^{1/2}$)。这是目前实验上产生准单能电子束非常简单、有效的方式。

电离化注入需要的激光强度(对于氮气, $a_0 \geq 1.65$ 即可)较自注入所需的激光强度 ($a_0 \approx 3$) 低得多; 相同的激光功率下, 电离化注入可工作在更低的等离子体密度下, 有利于稳定地获得更高的电子能量^[43]。对于 20 TW 激光装置, 初始的激光归一化矢势强度 $a_0 \approx 1.7$ 满足电离化注入的条件, 可很容易实现电子注入, 稳定地加速电子。而自注入需要更高的等

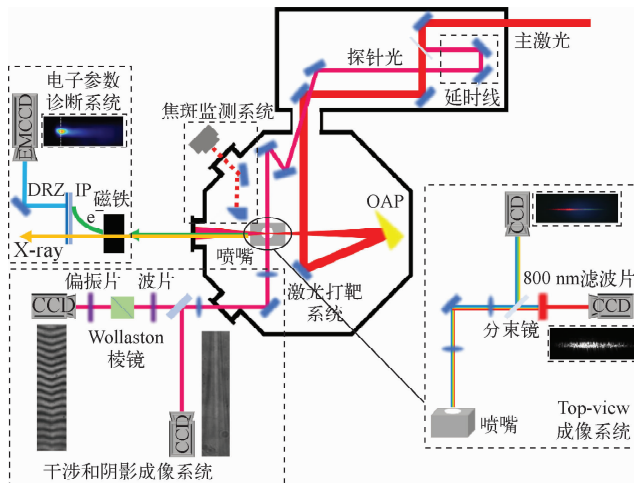


图 1 实验布局

Fig. 1 Experiment setup

离子体密度、更长的演化距离,使激光脉冲在经历足够的自聚焦、自压缩等效效应后, a_0 才能达到注入阈值,因此会一定程度上浪费激光能量和有效的加速长度,同时这种强烈的非线性演化会影响加速的稳定性。实验中,利用纯氦气作为自注入的加速介质时,电子束的发散角、指向性、能谱的稳定性都较电离化注入时差得多。因此,实验采用纯氦气作为加速介质,研究电离化注入的激光尾波场电子加速。为实现最优的加速,稳定地产生高品质的电子束,本文系统地研究等离子体密度、激光聚焦位置、激光脉宽以及能量对电子束的电荷量、发散角、峰值强度、指向性以及能量等参数的影响。

2.1 等离子体密度对电子束的影响

等离子体密度决定了失相长度、泵浦衰减长度和加速梯度,是 LWFA 中关键的参数之一,对电子束的能量、电荷量、发散角等影响巨大。实验中,固定激光参数(约 400 mJ、25 fs),改变气体背压(即等离子体密度)研究其对出射电子束的电荷量、峰值强度、发散角的影响,结果如图 2 所示。当等离子体密度低于 $3.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,在磷屏上探测不到电子束,表明尾波场强度太弱无法有效地捕获、加速电子;而当等离子体密度高于 $1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时,电子束呈现为大散斑,表明电子没有得到有效的加速。当等离子体密度为 $(8 \sim 11) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,电子束的竖直发散角最小、峰值强度大,表明此区间的电子能量没有明显下降(对于 LWFA,通常电子束的能量越高,发散角越小)。进一步提高等离子体密度,电子束的电荷量

继续增大,但由于失相长度减小,电子的能量会降低,发散角迅速增大;随着等离子体密度的进一步增高,激光脉冲可覆盖多个尾波场,此时以自调制尾波场加速为主,电子能谱将呈现麦克斯韦分布^[44],发散角更大、峰值强度显著降低。优化激光等离子体相互作用条件,在保证电子能量的前提下,稳定地获得更大电荷量的电子束是实验目标。

2.2 聚焦位置对电子束的影响

聚焦位置会影响激光脉冲在等离子体中的自演化和有效加速长度。固定激光参数(约 400 mJ、25 fs)和气体背压(0.345 MPa),改变喷嘴与激光焦点的相对位置,研究其对电子束的电荷量、峰值强度、发散角和峰值能量的影响,结果示于图 3^[45]。以喷嘴前沿为零点($z=0$),激光传输方向为正。当 $z \leq -200 \mu\text{m}$ 和 $z \geq 2500 \mu\text{m}$ 时,没有电子产生。从图 3 可发现,激光聚焦在喷嘴前沿附近时电子束品质最好,峰值强度最高、峰值能量最大、发散角小,这是由于聚焦在前沿时,有效加速距离长,电子得到了充分加速。随着焦点向喷嘴后沿移动,有效加速距离变短,电子峰值能量逐渐减小,发散角不断增大。当聚焦在 $400 \mu\text{m} \leq z \leq 1000 \mu\text{m}$ 之间时,电子束的发散角、电荷量对聚焦位置的变化不太敏感,这非常有利于通过等离子体镜反射的方式来产生逆康普顿散射。在保证电子束电荷量基本不变的情况下,聚焦位置靠近喷嘴后沿,可增强反射激光的强度,进而可提高 X 射线的产额^[45]。

2.3 激光脉宽对电子束的影响

在其他条件最优的情况下,利用 Dzzeler

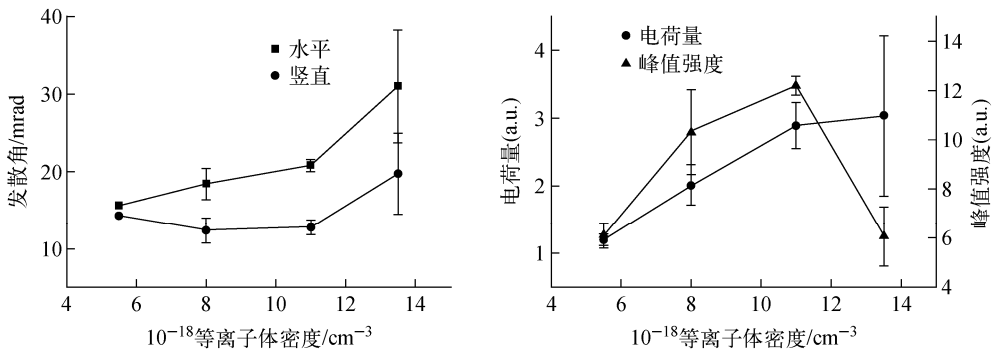


图 2 不同等离子体密度下电子束的发散角及电荷量和峰值强度

Fig. 2 Divergences and charge and peak intensity of electron beam under different plasma densities

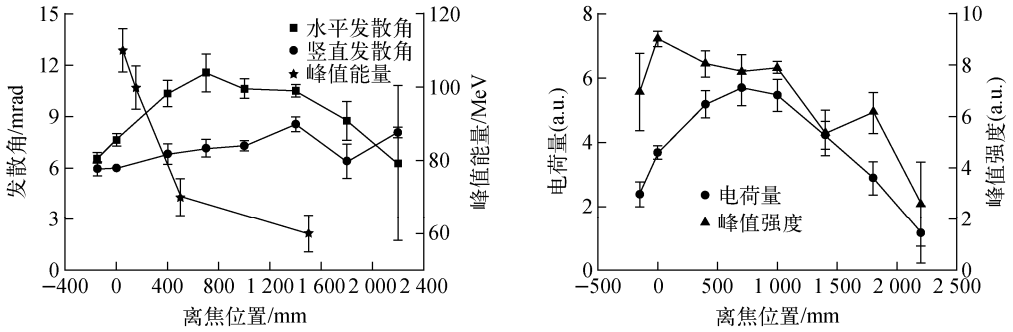


图3 不同离焦位置下电子束的发散角和峰值能量及电荷量和峰值强度

Fig. 3 Divergence and peak energy and charge and peak intensity of electron beam under different focus positions

(可编程的声光色散滤波器)精确地引入二阶色散(GDD),从而控制激光的脉宽;二者的对应关系为 $\tau' = \tau_0 (1 + (4\ln 2 \times \varphi'' / \tau_0)^2)^{1/2}$, 其中 τ_0 、 τ' 分别为展宽前、后的脉宽, φ'' 为引入的二阶色散量。不同脉宽下电子束的水平 and 垂直发散角及电荷量和峰值强度示于图 4。在最短脉宽时,电子束的发散角最小、峰值强度最高,说明此时电子加速效果最好,电子束的能量最高。脉宽变长后,电子束的水平发散角明显增大、椭圆率变大,表明电子与激光场发生了相互作用。引入二阶色散,除了改变脉宽,还会引入正负啁啾。正负啁啾对电子加速的影响研究详见文献[46]。

2.4 激光能量对电子束的影响

通过调谐波片与薄膜偏振片的角度,可线性衰减激光能量。在其他条件最优的情况下,发现电子束的电荷量、峰值强度、发散角与激光能量(归一化到激光最大能量)基本呈线性关

系,如图 5 所示。当激光能量降低时,电子的产生概率也降低。显然,更高的激光功率可激发更强尾波场,使电子注入更加容易,可捕获更多的电子,并将其加速到更高的能量。

3 高品质电子束的稳定产生

基于上述实验结果,在最优相互作用条件下,即将约 400 mJ、25 fs 的激光脉冲聚焦至喷嘴前沿,与 0.345 MPa 的氮气作用时,获得了产生概率 100% 的稳定电子束。统计连续 30 发电子的发散角和指向性,其水平、垂直发散角分别为 (6.5 ± 0.5) mrad 和 (5.3 ± 0.3) mrad,水平、垂直指向性抖动在 ± 1.2 mrad 和 ± 0.7 mrad 之间,如图 6c 所示。作为对比,使用氦气靶时,最佳条件下的电子产生概率只有 75%,电子束的发散角、指向性以及轮廓稳定性都明显变差。图 6a、b 为氮气靶时连续 4 发电子的能谱,可见其具有非常类似的能谱结构,其峰值能量约

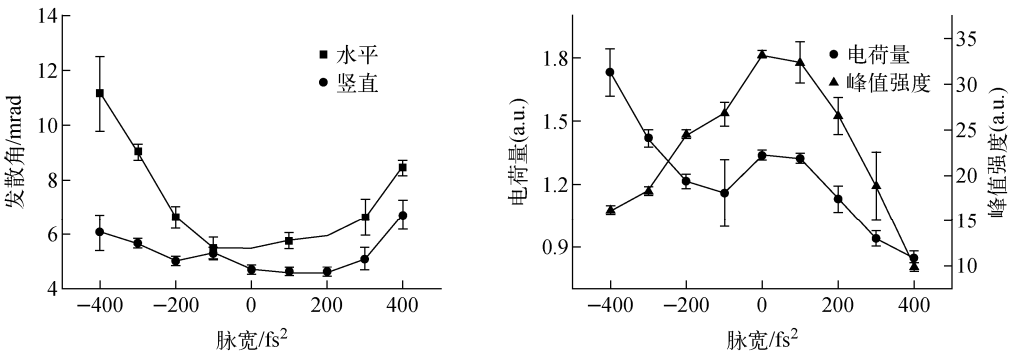


图4 不同脉宽下电子束的发散角及电荷量和峰值强度

Fig. 4 Horizontal and vertical divergences and charge and peak intensity of electron beam under different laser pulse durations

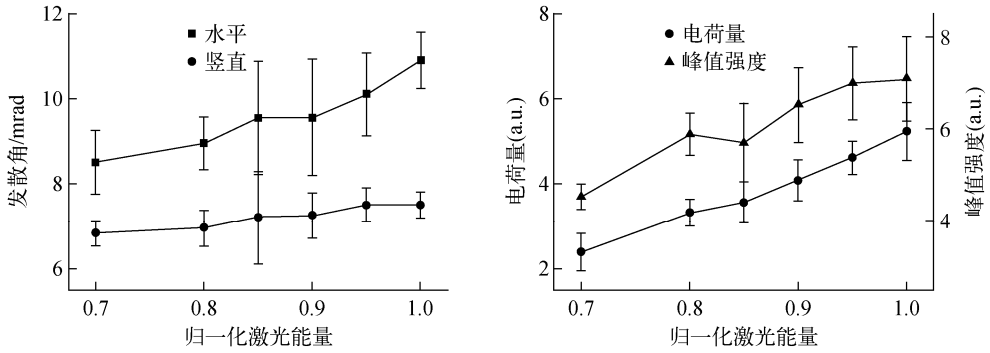


图5 不同激光能量(归一化到最大值)下电子束的发散角及电荷量和峰值强度

Fig. 5 Horizontal and vertical divergences and charge and peak intensity of electron beam under different laser energy (normalized to maximum value)

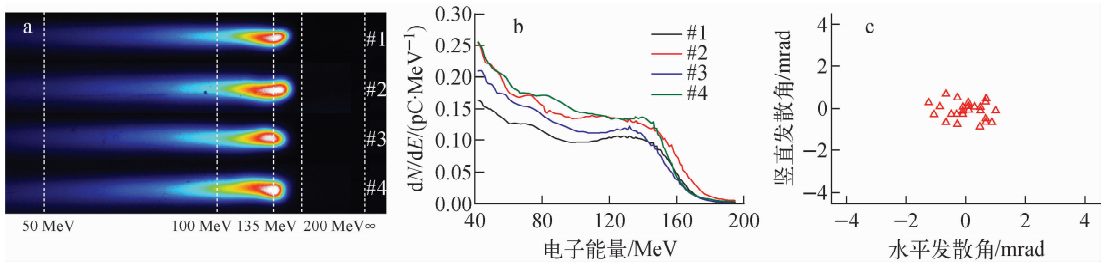


图6 电子能谱(a,b)和电子指向稳定性(c)

Fig. 6 Electron energy spectrum (a, b) and pointing stability of electron beam (c)

(135 ± 8) MeV, 电荷量(13.5 ± 2.0) pC (> 50 MeV)。在后续实验中,进一步优化激光传输、打靶系统,得到了发散角更小、指向性更好、能量更高、能谱结构更稳定的电子束^[45]。尽管电子束的能谱是连续的,通过前文提到的一些方式可优化其能散,使其具有准单能性。例如,合理选择初始的激光强度和等离子体密度,使激光强度仅在很短的传播距离上高于电离化注入阈值,从而降低电子束的能散^[39]。

4 结论

利用中国科学院物理研究所的 20 TW 激光装置,研究了 fs 激光与氮气、氦气靶的相互作用。系统研究了氮气背压(等离子体密度)、离焦、激光脉宽以及能量对产生电子束的电荷量、发散角、能量、指向性的影响。最优条件下,电子的产生概率高达 100%,电子束的能谱、电荷量、发散角以及指向性都非常稳定。实验结果表明,对于 10 TW 量级的激光器,基于电离化注入的 LWFA 是一种产生高质量电子束简单、有效的方式。如此稳定的电子束,为其应用

奠定了坚实的基础;可用作逆康普顿散射的种子电子,提高辐射的稳定性;或作为种子电子稳定地产生正电子。

参考文献:

- [1] TAJIMA T, DAWSON J M. Laser electron accelerator[J]. *Physical Review Letters*, 1979, 43: 267-270.
- [2] CHEN P, DAWSON J M, HUFF R W, et al. Acceleration of electrons by the interaction of a bunched electron beam with a plasma[J]. *Physical Review Letters*, 1985, 54: 693-696.
- [3] CALDWELL A, LOTOV K, PUKHOV A, et al. Proton-driven plasma-wakefield acceleration [J]. *Nature Physics*, 2009, 5: 363-367.
- [4] ESAREY E, SCHROEDER C B, LEEMANS W P. Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81: 1 229-1 285.
- [5] STRICKLAND D, MOUROU G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Optics Communications*, 1985, 56: 219-221.

- [6] MOUROU G A, TAJIMA T, BULANOV S V. Optics in the relativistic regime[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78: 309-371.
- [7] LEEMANS W P, NAGLER B, GONSALVES A J, et al. GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator[J]. *Nature Physics*, 2006, 2: 696-699.
- [8] WANG X, ZGADZAJ R, FAZEL N, et al. Quasi-monoenergetic laser-plasma acceleration of electrons to 2 GeV[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1988.
- [9] KIM H T, PAE K H, CHA H J, et al. Enhancement of electron energy to the multi-GeV regime by a dual-stage laser-wakefield accelerator pumped by petawatt laser pulses[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111: 165002.
- [10] LEEMANS W P, GONSALVES A J, MAO H S, et al. Multi-GeV electron beams from capillary-discharge-guided subpetawatt laser pulses in the self-trapping regime[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113: 245002.
- [11] GONSALVES A J, NAKAMURA K, DANIELS J, et al. Petawatt laser guiding and electron beam acceleration to 8 GeV in a laser-heated capillary discharge waveguide[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122: 084801.
- [12] MANGLES S P D, MURPHY C D, NAJMU-DIN Z, et al. Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser-plasma interactions [J]. *Nature*, 2004, 431: 535-538.
- [13] GEDDES C G R, TOTH C, van TILBORG J, et al. High-quality electron beams from a laser wakefield accelerator using plasma-channel guiding[J]. *Nature*, 2004, 431: 538-541.
- [14] FAURE J, GLINEC Y, PUKHOV A, et al. A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams[J]. *Nature*, 2004, 431: 541-544.
- [15] FAURE J, RECHATIN C, NORLIN A, et al. Controlled injection and acceleration of electrons in plasma wakefields by colliding laser pulses[J]. *Nature*, 2006, 444: 737-739.
- [16] OSTERHOFF J, POPP A, MAJOR Z, et al. Generation of stable, low-divergence electron beams by laser-wakefield acceleration in a steady-state-flow gas cell[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101: 085002.
- [17] GEDDES C G R, NAKAMURA K, PLATEAU G R, et al. Plasma-density-gradient injection of low absolute-momentum-spread electron bunches [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100: 215004.
- [18] SCHMID K, BUCK A, SEARS C M S, et al. Density-transition based electron injector for laser driven wakefield accelerators[J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2010, 13: 091301.
- [19] BUCK A, WENZ J, XU J, et al. Shock-front injector for high-quality laser-plasma acceleration [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110: 185006.
- [20] LI D Z, YAN W C, CHEN M, et al. Generation of quasi-monoenergetic electron beams with small normalized divergences angle from a 2 TW laser facility[J]. *Optics Express*, 2014, 22: 12 836-12 844.
- [21] GUILLAUME E, DOEPP A, THAURY C, et al. Electron rephasing in a laser-wakefield accelerator[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115: 155002.
- [22] WANG W T, LI W T, LIU J S, et al. High-brightness high-energy electron beams from a laser wakefield accelerator via energy chirp control[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117: 124801.
- [23] LI Y F, LI D Z, HUANG K, et al. Generation of 20 kA electron beam from a laser wakefield accelerator[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24: 023108.
- [24] COUPERUS J P, PAUSCH R, KOEHLER A, et al. Demonstration of a beam loaded nanocoulomb-class laser wakefield accelerator[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 487.
- [25] STEINKE S, van TILBORG J, BENEDETTI C, et al. Multistage coupling of independent laser-plasma accelerators[J]. *Nature*, 2016, 530: 190-193.
- [26] PAK A, MARSH K A, MARTINS S F, et al. Injection and trapping of tunnel-ionized electrons into laser-produced wakes[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104: 025003.
- [27] MCGUFFEY C, THOMAS A G R, SCHUMAKER W, et al. Ionization induced trapping in a laser wakefield accelerator[J]. *Physical Review*

- Letters, 2010, 104; 025004.
- [28] VARGAS M, SCHUMAKER W, HE Z H, et al. Improvements to laser wakefield accelerated electron beam stability, divergence, and energy spread using three-dimensional printed two-stage gas cell targets[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104; 174103.
- [29] CLAYTON C E, RALPH J E, ALBERT F, et al. Self-guided laser wakefield acceleration beyond 1 GeV using ionization-induced injection [J]. Physical Review Letters, 2010, 105; 105003.
- [30] LIU J S, XIA C Q, WANG W T, et al. All-optical cascaded laser wakefield accelerator using ionization-induced injection[J]. Physical Review Letters, 2011, 107; 035001.
- [31] POLLOCK B B, CLAYTON C E, RALPH J E, et al. Demonstration of a narrow energy spread, similar to 0.5 GeV electron beam from a two-stage laser wakefield accelerator[J]. Physical Review Letters, 2011, 107; 045001.
- [32] THAURY C, GUILLAUME E, LIFSCHITZ A, et al. Shock assisted ionization injection in laser-plasma accelerators[J]. Scientific Reports, 2015, 5; 16310.
- [33] LI F, HUA J F, XU X L, et al. Generating high-brightness electron beams via ionization injection by transverse colliding lasers in a plasma-wakefield accelerator[J]. Physical Review Letters, 2013, 111; 015003.
- [34] YU L L, ESAREY E, SCHROEDER C B, et al. Two-color laser-ionization injection[J]. Physical Review Letters, 2013, 112; 125001.
- [35] ZENG M, CHEN M, YU L L, et al. Multi-chromatic narrow-energy-spread electron bunches from laser-wakefield acceleration with dual-color lasers[J]. Physical Review Letters, 2015, 114; 084801.
- [36] MO M Z, ALI A, FOURMAUX S, et al. Quasimonoenergetic electron beams from laser wakefield acceleration in pure nitrogen[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100; 074101.
- [37] KAMPERIDIS C, DIMITRIOU V, MANGLES S P D, et al. Low energy spread electron beams from ionization injection in a weakly relativistic laser wakefield accelerator[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2014, 56; 084007.
- [38] HUANG K, LI D Z, YAN W C, et al. Simultaneous generation of quasi-monoenergetic electron and betatron X-rays from nitrogen gas via ionization injection [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105; 204101.
- [39] WANG Jinguang, FENG Jie, ZHU Changqing, et al. Small energy spread electron beams from laser wakefield acceleration by self-evolved ionization injection[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2017, 60; 034004.
- [40] CHEN M, ESAREY E, SCHROEDER C B, et al. Theory of ionization-induced trapping in laser-plasma accelerators[J]. Physics of Plasmas, 2012, 19; 033101.
- [41] WU Y C, ZHU B, DONG K G, et al. Note: Absolute calibration of two DRZ phosphor screens using ultrashort electron bunch[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83; 026101.
- [42] NAKANII N, KONDO K, YABUUCHI T, et al. Absolute calibration of imaging plate for GeV electrons[J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79; 066102.
- [43] MANGLES S P D. An overview of recent progress in laser wakefield acceleration experiments [C]//Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School; Plasma Wake Acceleration. Geneva, Switzerland; CERN, 2016.
- [44] LU W, TZOUFRAS M, JOSHI C, et al. Generating multi-GeV electron bunches using single stage laser wakefield acceleration in a 3D nonlinear regime[J]. Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams, 2007, 10; 061301.
- [45] ZHU Changqing, WANG Jinguang, FENG Jie, et al. Inverse Compton scattering X-ray source from laser electron accelerator in pure nitrogen with 15 TW laser pulses[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2019, 61; 024001.
- [46] ZHU Changqing, WANG Jinguang, FENG Jie, et al. Steering of asymmetric laser-wakefield accelerated electrons with group delay dispersion [J]. Applied Physics Letters (in press).