

激光尾波场驱动准连续小角度电子束研究进展

李荣凤 高树超 肖朝凡 徐智怡 薛兴泰 刘建波 赵研英 陈佳洱 卢海洋 颜学庆

Generation of ultrafast broadband small angle hundreds MeV electron bunches from laser wakefield acceleration

Li Rong-Feng Gao Shu-Chao Xiao Chao-Fan Xu Zhi-Yi Xue Xing-Tai Liu Jian-Bo Zhao Yan-Ying Chen Jia-Er Lu Hai-Yang Yan Xue-Qing

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 154101 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.154101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.154101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光与近相对论临界密度薄层相互作用产生大电量高能电子束

[High energetic electron bunches from laser--near critical density layer interaction](#)

物理学报.2017, 66(7): 075203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.075203>

低密等离子体通道中的非共振激光直接加速

[Non-resonant direct laser acceleration in underdense plasma channels](#)

物理学报.2015, 64(14): 145201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.145201>

超强圆偏振激光直接加速产生超高能量电子束

[Ultrahigh-energy electron beam generated by ultra-intense circularly polarized laser pulses](#)

物理学报.2015, 64(14): 144102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144102>

电子在激光驻波场中运动产生的太赫兹及X射线辐射研究

[Motion-induced X-ray and terahertz radiation of electrons captured in laser standing wave](#)

物理学报.2015, 64(12): 124104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124104>

强激光与锥型结构靶相互作用准直电子束粒子模拟研究

[Collimated electrons generated by intense laser pulse interaction with cone-structured targets using particle simulation](#)

物理学报.2014, 63(9): 094101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.094101>

激光尾波场驱动准连续小角度电子束研究进展*

李荣凤¹⁾ 高树超¹⁾ 肖朝凡¹⁾ 徐智怡¹⁾ 薛兴泰¹⁾ 刘建波¹⁾ 赵研英¹⁾
陈佳洱¹⁾ 卢海洋^{1)2)†} 颜学庆¹⁾²⁾

1) (北京大学物理学院, 核科学与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

2) (北京大学应用物理与技术中心, 北京 100871)

(2017年4月5日收到; 2017年5月11日收到修改稿)

报道了在北京大学新建成的5 Hz 200 TW 飞秒激光加速器实验装置上利用68 TW (1.7 J, 25 fs) 的激光与混合气体(99% He 掺杂1% N₂) 进行激光电子加速的初步实验结果与理论分析. 在实验中观测到了最大截止能量为290 MeV的连续电子能谱, 并且最大输出能量在一定的聚焦范围内基本不变. 二维 particle-in-cell 模拟表明: 电离注入导致电子不断注入, 使得纵向相空间在激光传播几个毫米后基本被电子填满; 之后相空间中电子分布基本保持稳定, 随着激光传播距离的增加, 输出电子最大能量几乎不变, 这与实验观察到的最大输出能量随激光聚焦位置在一定范围内不变的现象一致. 实验与模拟结果揭示了在当前实验条件下连续电离注入对电子束品质的影响, 为今后进一步优化电离注入电子品质提供了依据.

关键词: 激光电子加速, 电离注入, 相空间, 宽能谱

PACS: 41.75.Jv, 52.38.Kd

DOI: 10.7498/aps.66.154101

1 引言

激光等离子加速器技术在1979年由Tajima和Dawson^[1]提出以后, 由于其独特的无击穿特性一直受到激光等离子体和加速器两个领域的学者大量关注. 随着啁啾脉冲放大技术(chirped pulse amplification, CPA)的提出^[2], 超短激光脉冲技术迅猛发展, 近年来在实验室条件下已可获得超过 10^{20} W/cm²的聚焦功率密度. 当前激光驱动电子束主要有两种加速机制: 激光直接加速(direct laser acceleration, DLA)和激光尾波场加速(laser wakefield acceleration, LWFA). DLA机制通常针对等离子体密度较高情况, 被加速电子能量不高且带宽大, 发散角也较大, 但是可以获得大电量的电子束^[3]. LWFA机制通常利用较低的等离子体密度, 在相对论强度激光作用下形成空泡结构, 注入

电子可在适当条件下获得长距离加速, 因而可以实现高能量电子束输出. 通过控制注入和激光等离子体匹配条件可以获得低能散高能电子束输出.

激光与等离子体相互作用过程中, 入射的强激光由于有质动力将电子排开, 离子质量较重相对保持在原位不动, 电子离子的分离造成了电荷分离场, 这种分离场将电子拉回, 形成振荡的等离子体波, 等离子体波的相速度与激光群速度相等, 具有一定初始动量的背景电子, 当速度赶上等离子体波的相速度时容易被俘获加速. 根据一维非相对论纵向波破极限, 强激光场驱动下的等离子体尾波结构形成的加速电场梯度可达100 GV/m, 即有可能在厘米尺度上获得GeV量级的加速粒子^[4]. 自2004年《Nature》封面报道了法、美、英三国科学家同时在实验室获得较高品质激光驱动电子束的突破性进展^[5-7]之后, 加速电子能量分别于2006年突破GeV^[8], 2013年达到2 GeV^[9], 2014年突破

* 国家自然科学基金(批准号: 11575011)、国家重大科学仪器设备开发专项(批准号: 2012YQ030142)和科技部重点研发专项(批准号: SQ2016ZY04003194)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hylu@pku.edu.cn

4.2 GeV^[10], 发展十分迅速. 通过近年的实验和理论研究, 各国科学家也在谋求电子品质的提升, 探索了各种注入方式和导引方式对加速电子的影响^[11-13]. 国内各研究小组在实验研究方面也取得了重大进展. 早在2008年, 中国工程物理研究院利用毛细管导引获得了0.56 GeV的电子束输出^[14]. 中国科学院上海光学精密机械研究所采用级联电子加速方案, 实现电子注入和加速分别控制, 成功开展了激光自引导电子级联加速实验研究, 获得0.8 GeV电子束^[15], 并开展放电毛细管尾波场电子加速实验, 获得高达1.8 GeV的高能电子束^[16]. 上海交通大学采用了自截断的电离注入方法, 得到了单能性比较好的GeV电子束^[17]. 2016年清华大学也获得了高品质准单能电子束输出, 且在尾场探测方面获得了突破性进展^[18,19].

北京大学为进行激光等离子体加速研究, 目前已建成5 Hz, 200 TW激光装置^[20], 利用68 TW激光进行了激光电子加速的初步实验, 采用含1% N₂掺杂的He气, 采用电离注入得到了最高能量稳定在290 MeV的连续谱电子输出, 其发散角~4 mrad (FWHM), 且在高能部分(大于250 MeV)发散角小于3 mrad. 结合电离注入的理论^[21,22]对实验结果

进行了分析, 发现这种连续注入的机制使得相空间被填满, 电子在加速时可以获得最大能量几乎不变的输出.

2 实验平台简介

用于实验的200 TW激光装置主要由振荡器与双CPA放大器构成, 其组成结构如图1所示. 振荡器输出飞秒脉冲经CPA1 (kHz) 放大后进入XPW滤波器, 再进入CPA2 (5 Hz) 进行后续放大. CPA2经过扩束及放大之后获得最高输出能量可达7.2 J, 经过压缩得到输出能量5 J, 脉冲宽度25 fs的激光脉冲.

现阶段电子加速实验采用的结构为单级气体靶形式, 其实验布局示意图如图2所示. 主激光经过F#12.5的离轴抛物面镜(OAP)后聚焦到喷嘴下方气体区域, 利用强激光驱动等离子体实现尾波场电子加速. 激光等离子体通道内等离子体密度由经过相互作用区域与主激光和喷嘴呈90°入射的探针光, 经干涉测量得到. 其基本原理是利用探针光的大光斑和等离子体通道的柱状特性, 探针光上

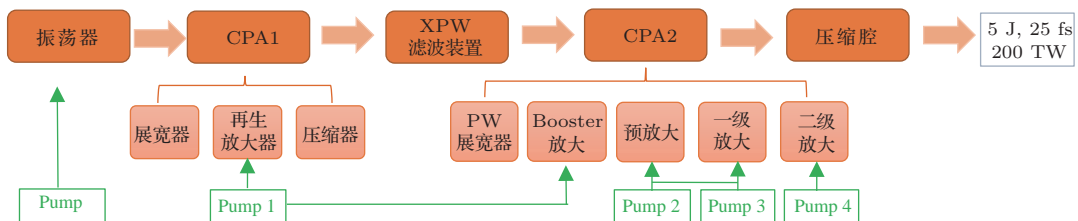


图1 已建成200 TW激光系统结构示意图

Fig. 1. The layout of 200-TW laser system.

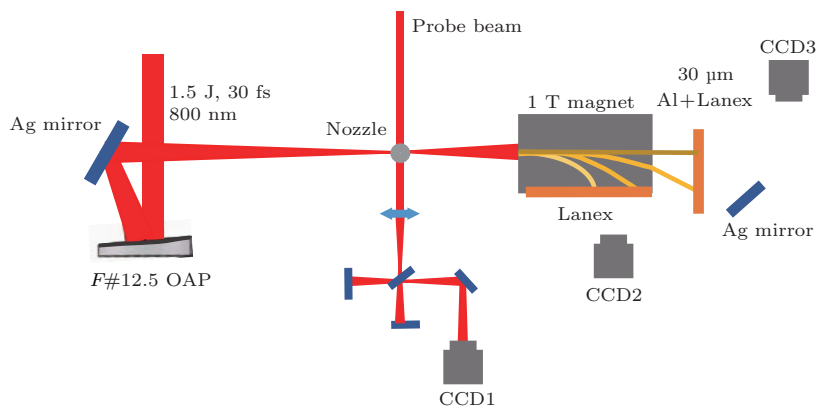


图2 激光加速电子实验布局示意图

Fig. 2. Schematic of experimental arrangement for laser electron acceleration.

半部分经过等离子体通道,其携带了等离子体相位信息,而下半部分未通过等离子体区域仅具有初始相位,由光斑的上下两部分相互干涉信息获得等离子体相位信息,根据等离子密度与相位的关系和等离子通道对称性反演出等离子体通道密度分布信息^[23].加速后的出射电子进入磁极面平行于入射激光偏振方向的磁谱仪中,磁极面大小200 mm × 160 mm,磁场强度1 T均匀分布,侧向能够出射电子最大能量145 MeV,正向出射电子最小能量265 MeV,采用Lanex荧光屏接收的电子信号经成像系统后由电荷耦合器件(CCD)直接记录.实验时CPA2输出激光脉冲经压缩及传输系统到达OAP后功率约为68 TW (1.7 J, 25 fs),其焦斑分布如图3所示.实验中测得激光焦斑半高全宽尺寸为15 μm,对应能量集中度约为15%,因而激光聚焦平均强度 I 约为 5.8×10^{18} W/cm².

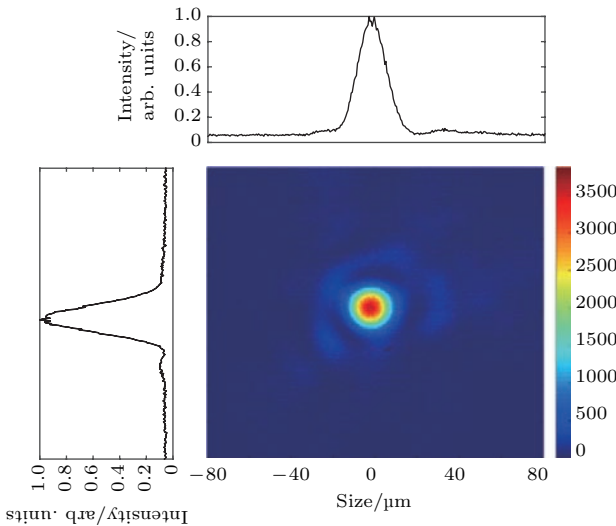


图3 (网刊彩色) 聚焦焦斑及焦斑分布

Fig. 3. (color online) The spot profile of the laser beam.

3 实验结果与分析

本实验中采用的脉冲气阀可提供上升时间(上升沿触发至形成稳定气流)约为1.2 ms,气体脉冲与激光相互作用时间可通过延时器精确控制(精度高于微秒),实验中延时采用1.5 ms,即激光在气阀触发后1.5 ms入射至气体区域.气阀置于三轴控制平移台上,因而可以精确控制气阀与激光脉冲的相对位置.使用圆锥形喷嘴,其喉径为0.3 mm,张角为5°,长度为33 mm,可提供长度超过5 mm的气体区域.喷嘴在激光方向上可移动

距离为20 mm.实验中使用的气体为He气掺杂了1%的N₂,背压为30 bar (1 bar = 10⁵ Pa),在距离喷嘴下方2.4 mm处经激光电离形成密度约为 $n_e = 4.7 \times 10^{18}$ cm⁻³的等离子体区域.测量中,探针光与主激光的延时设定为20 ps.作为示例,图4给出了背压为30 bar时,距离喷嘴下方2.4 mm处激光等离子体通道区域干涉密度图和相应反演密度分布.

实验中有效激光功率(考虑激光焦斑能量集中度后)为10 TW,在密度为 $n_e = 4.7 \times 10^{18}$ cm⁻³的等离子体中激光的自聚焦阈值为 $P_{crit}[GW] \simeq 17(\omega_L/\omega_p)^2 = 6.3$ TW (其中 $\omega_p = \sqrt{(e^2 n_e)/(\epsilon_0 m_e)}$, ω_L 为激光频率),因而激光在其中可以通过自聚焦获得更高强度.根据LWFA理论^[24],其对应耗散长度 $L_{etch} \approx (\omega_L^2/\omega_p^2)c\tau = 2.78$ mm.通参数计算可知

$$\Delta E[\text{GeV}] \simeq 1.7 \left(\frac{P[\text{TW}]}{100} \right)^{1/3} \left(\frac{10^{18}}{n_p[\text{cm}^{-3}]} \right)^{2/3} \times \left(\frac{0.8}{\lambda_L[\mu\text{m}]} \right)^{4/3} = 0.283 \text{ GeV},$$

与实验中测得的最优加速电子能量基本一致.

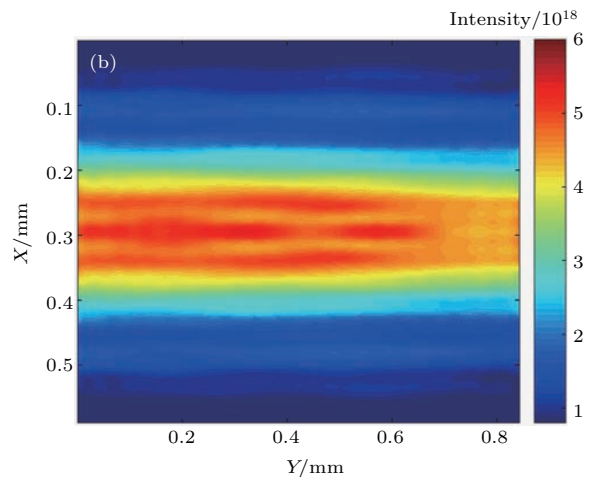
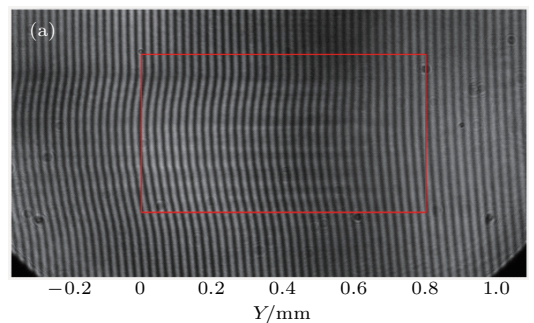


图4 (网刊彩色) 背压为30 bar,距离喷嘴下方2.4 mm处,(a)密度干涉图和(b)反演得到的密度图

Fig. 4. (color online) (a) Raw image of interferogram; (b) density of plasma inverted from (a).

图5给出了磁谱仪正向测得的三发电子能谱原始数据, 实验中由于激光抖动、喷嘴气流的不稳定性等因素使得发次之间的信号强弱略有差异, 初步实验中未对成像系统传输效率进行标定, 因此未对电子加速的电荷量进行测量. 根据磁谱仪的几何结构和磁场分布, 我们计算了电子的能谱曲线. 不难看出, 发散角在能谱反演过程中将具有较大影响. 图6给出了磁谱仪正向测得的能谱横向发散角随能量的变化, 对应正向能谱数据图5(c), 由于正向屏的成像系统呈缩小倍率, 单个像素对

应0.22 mrad, 所以根据像素计数得到的发散角在2.5 mrad附近略有起伏. 侧向能谱能量较低, 对应发散角约为4 mrad, 大于磁谱仪正向对应的高能发散角(约为3 mrad). 我们针对正向能谱反解时, 对发散角的影响进行了计算比较, 如图7所示, 分为三种情况: 1) 不考虑发散角的影响; 2) 发散角为 ± 1 mrad; 3) 发散角为 ± 2 mrad. 可以看出, 选择与数据相匹配的发散角对应分辨率反解出的能谱将更接近真实情况.

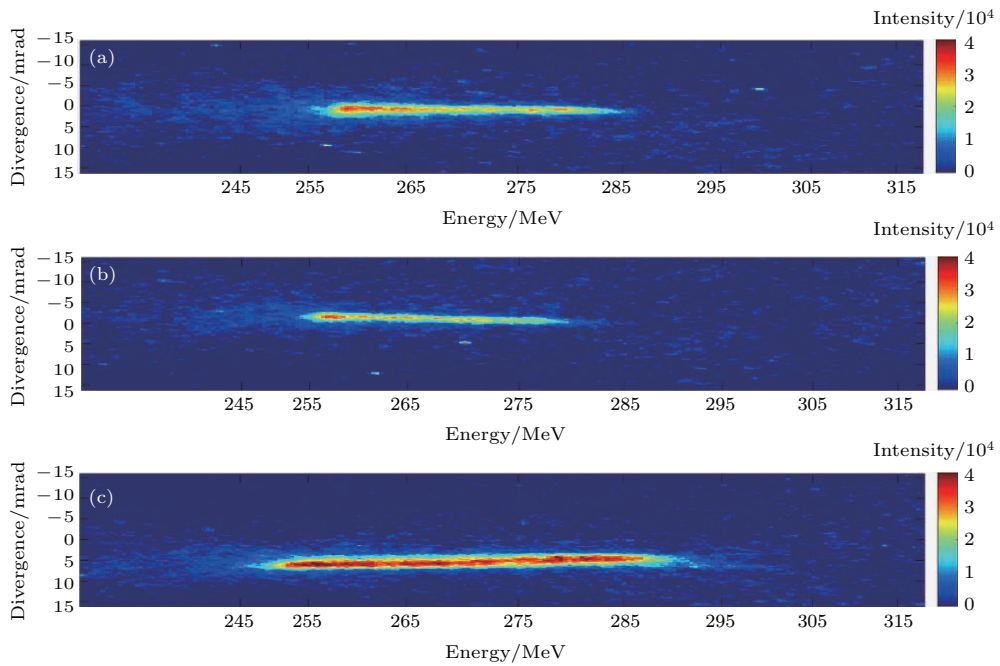


图5 (网刊彩色) 磁谱仪正向屏测得的电子能谱 (a)–(c) 分别表示相同实验条件下的不同发次
 Fig. 5. (color online) The original electron spectra of (a)–(c) different shot number with the same experiment condition.

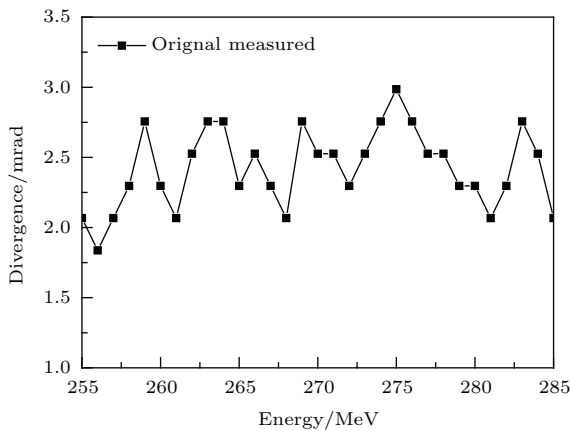


图6 正向出射电子的发散角 (对应图5(c))
 Fig. 6. The divergence of the forward electrons corresponds to Fig. 5(c).

实验中, 我们通过改变激光在气体中的相对位置来控制激光在气体中传输和自聚焦条件, 获得了一组激光加速电子的最高能量与激光焦点距离喷嘴中心位置的相对关系曲线, 如图8所示(其中负号表示激光焦点位于喷嘴正下方与激光传播相反的方向). 从图8可以看出, 激光在气体中需要经过一定距离的自聚焦演化才能够形成足够强度的驱动激光场, 从而驱动电子加速, 在激光焦点相对于喷嘴中心变化400 μm 时对加速电子最大能量影响不大.

采用与实验条件相同的参数进行二维(2D) Epoch模拟分析, 模拟区域大小为100 μm \times 100 μm , 网格密度为5000 \times 2500 cells, 采用移

动窗口, 计算总长为6200 μm , 激光中心波长 $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$, 脉宽30 fs (FWHM), 归一化光强 $a_0 = 2.6$, 等离子体采用纯He中掺杂1% N_2 , 前后各有500 μm 线性上升沿、下降沿, 中间5 mm的密度均匀区域 $n_e = 5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 激光聚焦于等离子体平台区前500 μm 处. 模拟中看到, 激光入射到等离子体中, 先产生了非线性尾场, 当采用纯He时由于不满足自注入条件 $P/P_{\text{cr}} \gtrsim 3$, 没有自注入电子^[25], 在实验中也未观察到电子信号; 当采用在纯He中掺杂1% N_2 时模拟中可以观察到N原子K壳

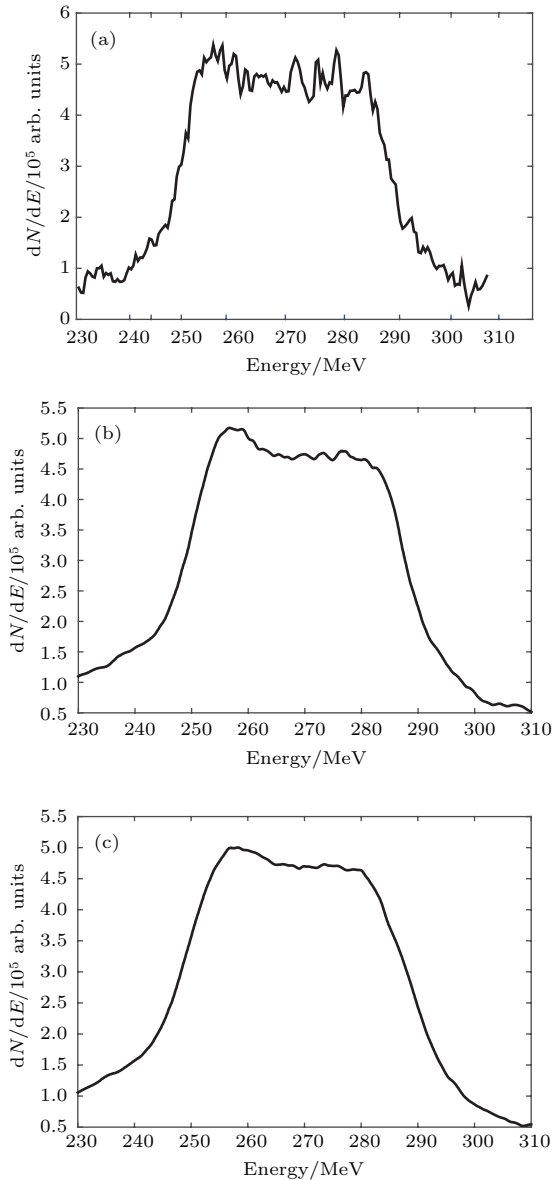


图7 能谱计算 (a) 不考虑发散角的影响; (b) 发散角为 $\pm 1 \text{ mrad}$; (c) 发散角为 $\pm 2 \text{ mrad}$
 Fig. 7. The typically electron spectrum integrated with different divergence from original electron signal: (a) with 0 divergence; (b) with $\pm 1 \text{ mrad}$ divergence; (c) with $\pm 2 \text{ mrad}$ divergence.

层电子发生电离, 并持续注入到尾场加速结构中, 当最开始注入的电子超过失相位置之后, 后注入的电子仍在加速, 整个相空间基本被填满, 得到连续分布的电子能谱; 如图9所示, 相空间被填满后随着激光传输, 相空间结构较稳定, 输出电子的最大截止能量基本不变. 当激光焦点再继续前移时, 加速电子能量将由于加速距离不足而下降. 这样的加速结构最终在实验上得到了稳定输出的、最大能量近290 MeV连续谱电子束.

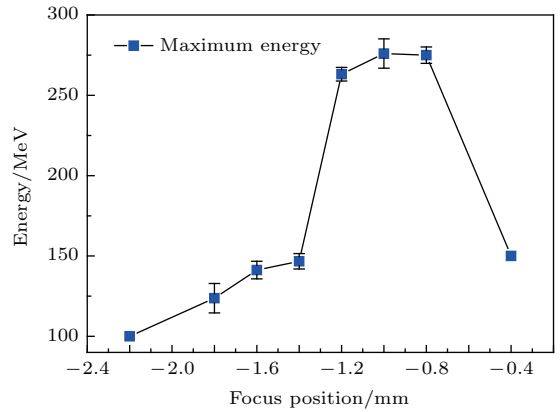


图8 激光焦点相对于喷嘴中心距离对加速电子的影响
 Fig. 8. The effect of laser focal location on accelerated electrons maximum energy.

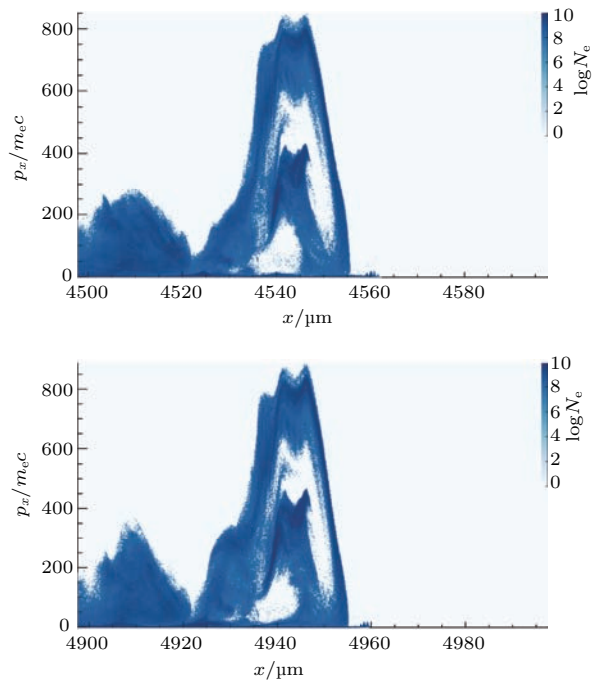


图9 (网刊彩色) 2D 模拟中随着加速距离的增加加速电子相空间的演化
 Fig. 9. (color online) The evolution of phase space with the increase of the acceleration distance in 2D Epoch simulation.

4 结 论

在北京大学已建成的 200 TW 飞秒激光加速器装置上利用 68 TW 激光进行了电子加速实验研究, 采用电离注入的方式获得了发散角小于 4 mrad 的最高能量稳定在 290 MeV 的准连续电子束输出, 通过实验测量及理论计算比较, 确认了加速电子的能量测量系统的可靠性, 利用该宽谱电子束可实现康普顿背散射 X 光源以及电子束超快成像等应用. 本工作将给未来在该系统上进行的电子加速实验, 提供可靠诊断基础, 为进一步获得高性能电子束奠定条件.

本文受到北京大学重离子物理研究所激光加速器团队成员的帮助, 对所有对本工作做过贡献的组员表示感谢.

参考文献

- [1] Tajima T, Dawson J M 1979 *Phys. Rev. Lett.* **43** 267
- [2] Strickland D, Mourou G 1985 *Opt. Commun.* **55** 219
- [3] Gahn C, Tsakiris G D, Pukhov A, Meyer-ter-Vehn J, Pretzler G, Thirof P, Habs D, Witte K J 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 4772
- [4] Esarey E, Schroeder C B, Leemans W P 2009 *Office of Scientific & Technical Information Technical Reports* **81** 1229
- [5] Faure J, Glinec Y, Pukhov A, Kiselev S, Gordienko S, Lefebvre E, Rousseau J P, Burgy F, Malka V 2004 *Nature* **431** 541
- [6] Geddes C G R, Toth C, Tilborg J V, Esarey E, Schroeder C B, Bruhwiler D, Nleiter C, Cary J, Leemans W P 2004 *Nature* **431** 538
- [7] Mangles S P, Murphy C D, Najmudin Z, Thomas A G R, Collier J L, Dangor A E, Divall E J, Foster P S, Gallacher J G, Hooker C J, Jaroszynski D A, Langley A J, Mori W B, Norreys P A, Tsung F S, Viskup R, Walton B R, Krushelnick K 2004 *Nature* **431** 535
- [8] Leemans W P, Nagler B, Gonsalves A J, Toth C, Nakamura K, Geddes C G R, Esarey E, Schroeder C B, Hooker S M 2006 *Nat. Phys.* **2** 696
- [9] Wang X M, Rafal Z, Neil F, Li Z Y, Yi S A, Zhang X, Henderson W, Chang Y Y, Korzekwa R, Tsai H E, Pai C H, Quevedo H, Dyer G, Gaul E, Martinez M, Bernstein A C, Borger T, Spinks M, Donovan M, Khudik V, Shvets G, Ditmire T, Downer M C 2013 *Nat. Commun.* **4** 1988
- [10] Leemans W P, Gonsalves A J, Mao H S, Nakamura K, Benedetti C, Schroeder C B, Toth C, Daniels J, Mittelberger D E, Bulanov S S, Vay J L, Geddes C G R, Esarey E 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 245002
- [11] Faure J, Rechatin C, Norlin A, Lifschitz A, Glinec Y, Malka V 2006 *Nature* **444** 737
- [12] Schmid K, Buck A, Sears C M S, Mikhailova J M, Tautz R, Herrmann D, Geissler M, Krausz F, Veisz L 2010 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **13** 091301
- [13] Clayton C E, Ralph J E, Albert F, Fonseca R A, Glenzer S H, Joshi C, Lu W, Marsh K A, Martins S F, Mori W B, Pak A, Tsung F S, Pollock B B, Ross J S, Silva L O, Froula D H 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 105003
- [14] Kameshima T, Hong W, Sugiyama K, Wen X L, Wu Y C, Tang C M, Zhu Q H, Gu Y Q, Zhang B H, Peng H H, Kurokawa S-ichi, Chen L M, Tajima T, Kumita T, Nakajima K 2008 *Appl. Phys. Express* **1** 066001
- [15] Liu J S, Xia C Q, Wang W T, Lu H Y, Wang C, Deng A H, Li W T, Zhang H, Liang X Y, Leng Y X 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 035001
- [16] Lu H Y, Liu M W, Wang W T, Wang C, Liu J S, Deng A H, Xu J C, Xia C Q, Li W T, Zhang H 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 091502
- [17] Mirzaie M, Li S, Zeng M, Hafz N A M, Chen M, Li G Y, Zhu Q J, Liao H, Sokollik T, Liu F 2015 *Sci. Rep.* **5** 14659
- [18] Li F, Zhang C J, Wan Y, Wu Y P, Xu X L, Hua J F, Pai C H, Lu W, Gu Y Q, Mori W B 2016 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **58** 034004
- [19] Zhang C J, Hua J F, Xu X L, Li F, Pai C H, Wan Y, Wu Y C, Gu Y Q, Mori W B, Joshi C 2016 *Sci. Rep.* **6** 29485
- [20] Shang Y, Zhu K, Lin C, Lu H Y, Zou Y B, Shou Y R, Cao C, Zhao S, Geng Y X 2013 *Sci. Sin.: Phys. Mech. Astron.* **43** 1282
- [21] Chen M, Sheng Z M, Ma Y Y, Zhang J 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 056109
- [22] Chen M, Esarey E, Schroeder C B, Geddes C G R, Leemans W P 2012 *Phys. Plasmas* **19** 033101
- [23] Lu H Y, Liu J S, Wang C, Wang W T, Zhou Z L, Deng A H, Xia C Q, Xu Y, Leng Y X, Ni G Q, Li R X, Xu Z Z 2009 *Phys. Plasmas* **16** 083107
- [24] Lu W, Tzoufras M, Joshi C, Tsung F S, Mori W B, Vieira J, Fonseca R A, Silva L O 2007 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **10** 061301
- [25] Froula D H, Clayton C E, Döppner T, Marsh K A, Barty C P, Divol L, Fonseca R A, Glenzer S H, Joshi C, Lu W, Martins S F, Michel P, Mori W B, Palastro J P, Pollock B B, Pak A, Ralph J E, Ross J S, Siders C W, Silva L O, Wang T 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 215006

Generation of ultrafast broadband small angle hundreds MeV electron bunches from laser wakefield acceleration*

Li Rong-Feng¹⁾ Gao Shu-Chao¹⁾ Xiao Chao-Fan¹⁾ Xu Zhi-Yi¹⁾ Xue Xing-Tai¹⁾
Liu Jian-Bo¹⁾ Zhao Yan-Ying¹⁾ Chen Jia-Er¹⁾
Lu Hai-Yang^{1)2)†} Yan Xue-Qing¹⁾²⁾

1) (State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

2) (Center for Applied Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China)

(Received 5 April 2017; revised manuscript received 11 May 2017)

Abstract

Electrons can be accelerated to a GeV level in centimeters by plasma wakefield driven by laser. With the development of chirped pulse amplification technique, the accelerating field can reach 100 GV/m. The laser driven wakefield acceleration experiments with ionization injection are carried out using 68 TW (1.7 J, 25 fs) laser and a mixture gas of 99% He and 1% N₂. In experiment, the output electron beam has broadband spectrum with a maximum cut-off energy of about 290 MeV and a maximum output energy is quite stable in a certain range of laser focal positions. Two-dimensional particle-in-cell simulation is carried out. It is found that the longitudinal phase space is occupied by the continuously injected electrons and the phase space distribution is quite stable after the laser has propagated several millimeters inside plasma. This acceleration process can lead to quite stable maximum output energy of electron beam. These experiments reveal the physical nature of continuous ionization injection, which is very important for improving the performance of ionization injection.

Keywords: laser driven wakefield acceleration, ionization injection, phase space, large energy-spread

PACS: 41.75.Jv, 52.38.Kd

DOI: 10.7498/aps.66.154101

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11575011), the National Grand Instrument Project, China (Grant No. 2012YQ030142), and the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. SQ2016ZY04003194).

† Corresponding author. E-mail: hylu@pku.edu.cn