

SILEX-1装置上等离子体尾场加速电子初步实验*

华剑飞^{1,1)} 安维明¹ 黄文会¹ 唐传祥¹ 林郁正¹ 谷渝秋² 刘红杰² 王向贤²
周维民² 焦春晔² 温天舒² 何颖玲² 温贤伦² 洪伟² 彭翰生² 黄小军²
王晓东² 周凯南² 郭仪² 朱启华² K. Nakajima³ 陈黎明³

1 (清华大学工程物理系 北京 100084)

2 (中国工程物理研究院激光聚变研究中心 绵阳 621900)

3 (Japan Atomic Energy Research Institute, Shirakata-Shirane 2-4, Tokai, Ibaraki, 319-1195, Japan)

摘要 激光等离子体加速电子机制可以产生准单能的高能电子束,近年来成为国际上的研究热点. 中国工程物理研究院激光装置已经能够达到286TW的输出功率,为国内在该领域的研究提供了实验条件. 文章介绍了在SILEX-1装置上开展的激光等离子体加速电子的初步实验,并对测得结果进行讨论,为下一步实验的进行提供了准备条件.

关键词 等离子体密度 气体喷嘴 电子能量

1 引言

近年来随着激光技术的飞速发展,激发了人们利用超强超短脉冲激光加速电子的想法,提出了相当多在不同介质(比如真空、气体、等离子体)中加速电子的方案. 尤其是激光等离子体加速机制由于能有效地避免介质击穿所带来的加速梯度限制,因此受到了广大科学工作者的关注,开展了一系列该领域的研究. 如果等离子体电子密度为 $N_e = 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 则其可承受的加速梯度能达到 100GeV/m 的量级,比传统的直线加速器要高3个量级以上.

中国工程物理研究院激光聚变研究中心的SILEX^[1] (Super Intense Laser for EXperiments on the EXtremes) 装置为795nm工作波长的Ti:Sapphire激光器,其输出功率最高可达到286TW,相应的聚焦功率密度则能达到 10^{21}W/cm^2 , 已经达到国际领先水平. 为了研究激光等离子体加速机制的物理本质,掌握该机制产生准单能高能电子的实验条件,在SILEX装置上首次在国内进行了一轮激光等离子体加速电子的实验探索,并初步得到了一系列的电子信号,对进一步获取高能电子的实验提供了准备条件.

2 激光等离子加速研究的国际进展

1979年, Tajima和Dawson提出了用电子等离子体波加速电子到极高能量的设想,从而开创了一种新的粒子加速理论^[2]. 他们认为,沿着等离子体波传播方向注入速度与波相速度接近的电子将被电子等离子体波俘获,其中处于加速相位的电子将在等离子体纵向强电场作用下得到明显加速,直到这些电子逃离加速相位. 类似于传统加速器技术中的慢波结构,等离子体加速也必须满足两个条件:波沿着粒子运动方向行进;粒子运动速度和波相速度同步. 理论研究表明,等离子体在激光驱使的加速器中作为加速介质能够承受GV/m以上的超高加速电场而不会导致波崩溃,并且在合适的条件下能够约束激光和粒子的传播方向. 而自调制的激光尾场加速电子机制^[3-6] (SM-LWFA: Self Modulated Laser Wakefield Acceleration) 由于不需要外加的电子源,可以直接俘获背景等离子体中的电子使其加速至高能量,因此倍受关注. 尤其是在去年,国际上4个不同的实验室(法国的LOA^[3]、美国的LBNL^[4]、英国的Rutherford^[5]以及日本的AIST^[6])分别观测到了准单能的电子信号,极

* 等离子体物理国家级重点实验室开放课题资助

1) E-mail: jfhua@mail.tsinghua.edu.cn

大地推动了该领域研究.

表 1 4个准单能等离子体加速电子实验参数

	LOA	LBNL	RAL	AIST
$\lambda_L/\mu\text{m}$	0.82	0.81	0.8	0.8
P/TW	30	9	12.5	2
$I/(\text{W}/\text{cm}^2)$	3.2×10^{18}	1.1×10^{19}	2.5×10^{18}	5×10^{18}
τ_L/fs	33	55	40	50
N_e/cm^{-3}	6×10^{18}	4.5×10^{19}	2×10^{19}	1.3×10^{20}
Energy Gain $\Delta E_{\text{max}}/\text{MeV}$	$> 170 \pm 15$	$86 \pm 2 - 150$	78 ± 2	7 ± 1
Q_{ac}/pC	500	320	22	2
Remarks		Channel		Integrated over 90 shots spectrum

3 初步实验

根据目前激光等离子体加速机制的理论研究和计算机模拟结果^[7-9]表明, 实验条件必须满足:

(a) 激光脉宽度 L 和等离子体波长同量级, 即 $L = c\tau_L \sim \lambda_p = 2\pi c/\omega_p = 33.4/\sqrt{n_0 [10^{18}\text{cm}^{-3}]} [\mu\text{m}]$. 同时需考虑等离子体波中电子失相距离 $L_{dp} = (\lambda_p/2)(1 - v_p/c) \sim \lambda_p \gamma_p^2$ 和气体通道匹配的问题, 其中 $\gamma_p = (1 - v_p^2/c^2)^{-1/2} = \omega_0/\omega_p$ 为相对论因子. 这一点要求等离子体密度在 $10^{18} - 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 量级;

(b) 激光强度满足 $I\lambda_L^2 > 1.4 \times 10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ 的相对论条件, 同时其功率满足 $P_{cr} > 16.2(\omega_0/\omega_p)^2\text{GW}$ 的自聚焦条件.

激光等离子体加速电子实验是在 SILEX 装置的第三级输出端——100TW 靶室内进行, 具体实验布局如图 1 所示. 主激光采用 $F/3$ 的离轴抛物镜聚焦, 聚焦光斑尺寸为 $28\mu\text{m}$ (FWHM), 脉宽为 26.7fs, 实验中输

出的激光功率最大为 117TW. 气体为 He, 其喷嘴形状为 $1\text{mm} \times 10\text{mm}$ 狭缝, 考虑到加速距离增加能获得高能电子以及方便实验操作, 因此喷嘴长边和激光传输方向平行.

实验中主要对等离子体状态和电子信号进行在线监测, 并获得了一系列的数据.

3.1 等离子体状态

为了掌握气体喷嘴的工作状况, 用 CCD 观察等离子体通道, 发现其相对比较稳定且整个通道长度约为 5mm 左右. 另外由于等离子体密度参数的变化对实验结果影响非常大, 而利用探针光方法测等离子体密度的实验条件不成熟, 因此采用 OMA 谱仪来测背向的 Raman 散射光. 根据入射激光与散射光以及等离子体波之间的耦合关系 $\omega_L^2 = \omega_p^2 + \omega_s^2$, 当 He 气压在 3MPa 时, $\lambda_s = 866.2\text{nm}$ 的 Raman 散射光信号, 对应的等离子体密度约为 $1.2 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$.

3.2 电子束信号

考虑到常用的束测荧光屏(如 DRZ^[10]、酸敏变色片、YAG 晶体)对微弱电子信号不灵敏, 因此采用多层 IP 板 (Imaging Plate) 叠加 (见图 1) 来记录加速电子信号. 当激光能量在 3.1J、气压在 4MPa 条件下, 加速电子的发散角 (FWHM) 约为 7° . 此时如果认为从等离子体出射的电子束尺度和激光聚焦光斑同量级, 则可粗略估计其发射度约为 $1.8\text{mm}\cdot\text{mrad}$. 另外, 可根据 BCT 所测得的电流信号, 可推算其电荷量约为 0.52nC.

同时为了获得加速电子束的能量信息, 用 0.58T 的永久磁铁来偏转电子束, 并用 IP 板记录电子的偏转位置 (见图 2), 由此可粗略推算其加速能量约为 20MeV.

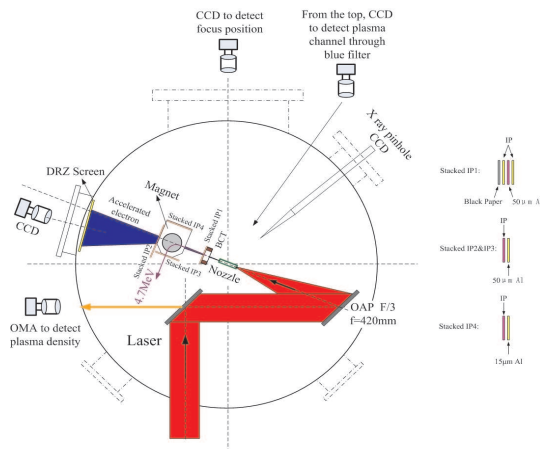


图 1 实验布局

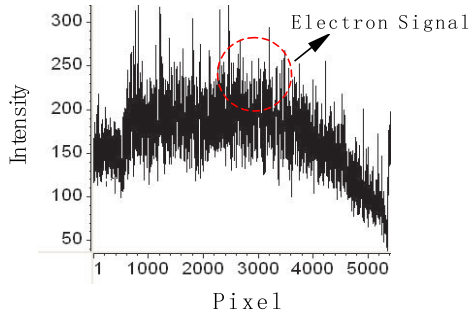


图2 IP上电子信号

4 结论

初步实验结果证明, 超短超强激光条件下能探测到20MeV左右的高能电子束信号. 下一步工作将精确控制等离子体密度和激光工作状态以期望获得准单能的高能电子束.

参考文献(References)

- 1 PENG Han-Sheng et al. Proceeding of SPIE., Vol.5627 (SPIE, Bellingham, WA, 2005)
- 2 Tajima T, Dawson J M. Phys. Rev. Lett., 1979, **43**(4): 267—270
- 3 Faure J et al. Nature, 2004, **431**: 541—544
- 4 Geddes C G R et al. Nature, 2004, **431**: 538—541
- 5 Mangles S P D et al. Nature, 2004, **431**: 535—538
- 6 Miura E et al. Appl. Phys. Lett., 2005, **86**: 251501
- 7 Umstadter D. Phys. Plasmas, 2001, **8**: 1774—1785
- 8 Pokhov A et al. Phys. Plasmas, 1998, **5**: 1880—1886
- 9 Esarey E et al. Phys. Rev. Lett., 1998, **80**: 5552—5555
- 10 <http://www.kasei-optonix.co.jp>

A Preliminary Experiment of Plasma Electron Acceleration at the SILEX-1*

HUA Jian-Fei^{1;1)} AN Wei-Ming¹ HUANG Wen-Hui¹ TANG Chuan-Xiang¹ LIN Yu-Zheng¹
 GU Yu-Qiu² LIU Hong-Jie² WANG Xiang-Xian² ZHOU Wei-Min² JIAO Chun-Ye²
 WEN Tian-Shu² HE Ying-Ling² WEN Xian-Lun² HONG Wei² PENG Han-Sheng²
 HUANG Xiao-Jun² WANG Xiao-Dong² ZHOU Kai-Nan² GUO Yi² ZHU Qi-Hua²
 K. Nakajima³ CHEN Li-Ming³

1 (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2 (Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyan 621900, China)

3 (Japan Atomic Energy Research Institute, Shirakata-Shirane 2-4, Tokai, Ibaraki, 319-1195, Japan)

Abstract Laser-plasma acceleration has obtained considerable attention in recent years, for its ability to produce quasi-monoenergetic electron beams. A 286TW Ti: Sapphire laser system at CAEP referred as SILEX-1 can provide the experimental conditions for laser-plasma electron acceleration domestically. A preliminary experiment at the SILEX-1 is described in this paper and the results are also discussed.

Key words plasma density, gas nozzle, electron energy

*Supported by National Key Laboratory of Laser Fusion

1) E-mail: jfhua@mail.tsinghua.edu.cn