

# 超强飞秒激光尾波场加速产生 58 MeV 准单能电子束实验\*

董克攻<sup>1)2)</sup> 谷渝秋<sup>2)†</sup> 朱 斌<sup>2)</sup> 吴玉迟<sup>2)</sup> 曹磊峰<sup>2)</sup> 何颖玲<sup>2)</sup> 刘红杰<sup>2)</sup> 洪 伟<sup>2)</sup>  
周维民<sup>2)</sup> 赵宗清<sup>2)</sup> 焦春晔<sup>2)</sup> 温贤伦<sup>2)</sup> 张保汉<sup>2)</sup> 王晓方<sup>1)</sup>

1) (中国科学技术大学近代物理系, 中国科学院基础等离子体物理重点实验室, 合肥 230026)

2) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2009 年 8 月 20 日收到; 2010 年 5 月 24 日收到修改稿)

超短超强激光与等离子体相互作用产生的激光尾波场可以在毫米尺度上加速产生高能量的准单能电子束. 在 SILEX-I 激光装置上进行的激光尾波场加速实验中, 利用超强飞秒激光与超声速锥形喷嘴产生的 2.7 mm 直径氦气气体柱相互作用, 获得了能散为 15.5%、发散角为 15 mrad、能量为 58 MeV 的准单能电子束. 在 70 TW 激光照射下获得的电子束总电量达到 15.4 nC. 介绍了实验条件、方法和主要实验结果.

**关键词:** 激光尾波场, 电子加速, 空泡, 自聚焦

**PACC:** 5260, 5240, 5240D

## 1. 引 言

1979 年, Tajima 等<sup>[1]</sup>提出了激光等离子体波加速器的设想, 由于其超高的加速电场而成为新一代的加速器, 并在近年来得到了大力发展. 近三十年来, 针对不同的激光参数, 出现了各种不同的等离子体波加速概念, 如利用两束频率差近似等于等离子体频率的长脉冲激光产生的激光拍频波加速 ( $\omega_1 - \omega_2 \approx \omega_p$ )、利用激光脉冲被等离子体频率调制而共振激发的激光自调制尾波场加速 ( $c\tau > \lambda_p$ )、利用超短超强激光产生的激光尾波场加速 ( $c\tau \approx \lambda_p$ ) 等<sup>[1-3]</sup>. 近年来, 随着啁啾脉冲激光放大技术的发展, 产生了脉冲宽度在  $10^{-14}$ — $10^{-13}$  s、输出功率在  $10^{12}$ — $10^{15}$  W 的激光器, 聚焦后的功率密度高达  $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup>. 当这样的超短超强激光束在次稠密等离子体中传播时, 激光脉冲的有质动力会推动等离子体中的电子运动, 使其离开原来位置, 而离子由于较大的质量而基本维持静止状态, 进而在电子与离子之间形成分离电场, 该分离电场将造成电子在

空间的纵向振荡, 形成大振幅电子等离子体波. 等离子体波的相速度等于激光群速度并以接近于光速向前运动, 在运动过程中会通过波破<sup>[4]</sup>等方式俘获背景电子, 加速产生高能电子束. 等离子体波的加速电场梯度可以用  $E_0 \approx 96 \sqrt{n_0}$  近似估算, 其中  $n_0$  为等离子体密度,  $E_0$  为等离子体波的加速电场梯度. 理论和实验研究表明, 当等离子体密度达到  $10^{18}$  cm<sup>-3</sup> 时, 加速电场梯度接近 100 GV/m, 远高于传统加速器的加速电场. 这么强的加速电场可以在厘米量级的距离内产生能量可达  $10^9$  eV 量级的电子束<sup>[5,6]</sup>, 为台面化加速器的实现提供了条件.

在利用等离子体波加速电子的初期, 由于激光功率较低且脉冲宽度较大, 相关实验都集中在拍频波加速和自调制尾波场加速, 这些加速机制产生的电子束能谱是连续的, 而在实际应用中需要的是单能电子束. 近年来, 随着激光脉冲宽度的降低和激光功率的增大, 激光尾波场加速已成为可能. 2004 年激光尾波场加速获得了重大突破<sup>[7-9]</sup>, 利用  $10^{12}$ — $10^{15}$  W 的飞秒激光与气体靶相互作用获得了

\* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 10535030)、国家自然科学基金 (批准号: 10876039) 和中国工程物理研究院科学技术基金重大项目 (批准号: 2006Z0202) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: yqgu@caep.ac.cn

准单能电子束,其中的加速过程<sup>[9]</sup>被认为是空泡加速<sup>[10]</sup>.空泡加速是近年来随着激光功率的不断增大而被广泛研究的一种激光尾波场加速.空泡加速机制可以作如下解释:当激光功率密度足够强以及激光脉冲与等离子体参数达到一定的匹配条件时,激光有质动力可以直接把轴向电子完全排空,从而在激光脉冲尾部形成只有离子组成的空泡,空泡随激光脉冲一起运动,电子会在空泡的尾部被俘获并被加速.由于这种空泡在运动过程中比较稳定,能够产生单能性比较好且能量较高的电子束.

空泡加速机制<sup>[11]</sup>所需要的激光阈值功率为  $P_{th} \approx \left(\frac{\tau}{30}\right) \times 30$ ,这里功率的单位为 TW,  $\tau$  为激光的脉冲宽度,单位为 fs,当激光脉冲宽度为 30 fs 时,对应的阈值功率为 30 TW.在本文的实验中选择激光功率为 70 TW,这将有利于空泡加速机制的产生.在激光参数保持不变的情况下,通过选择不同的等离子体密度以保证实验工作在空泡加速机制下.研究了超强飞秒激光脉冲在匹配的等离子体密度条件下进行的激光尾波场加速实验,获得了质量较好的 58 MeV 准单能电子束,介绍了实验条件、方法及主要结果.

## 2. 实 验

实验是在中国工程物理研究院激光聚变研究中心的高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室的 SILEX-I 钛宝石激光装置上进行的.该装置采用啁啾脉冲放大技术,输出脉冲宽度为 30 fs,中心波长为 800 nm,靶上最大能量为 8.5 J.

在激光与等离子体相互作用中,激光束的自然

散焦不仅对激光束在等离子体中的稳定传输有很大影响,而且也直接影响到电子的加速过程.在没有引导效应的情况下,激光的自然散焦长度为瑞利长度 ( $Z_R = \pi w_0^2 / \lambda_0$ ) 量级,其中  $w_0$  为激光的焦斑半径,  $\lambda_0$  为激光中心波长.大  $F$  数的离轴抛物面镜可以聚焦产生较大的激光焦斑,进而增大自然散焦长度以及增大激光脉冲在等离子体中的传输距离.实验研究表明,大  $F$  数不仅可以有效提高激光的稳定传输长度<sup>[12]</sup>,而且还可以避免成丝等导致的不稳定性对加速过程的影响<sup>[13]</sup>.为了在激光尾波场加速中获得比较稳定的准单能电子束,我们在实验中采用  $F$  数较大的离轴抛物面镜对激光束进行聚焦,这种条件下对应的瑞利长度为 663  $\mu\text{m}$ .

实验设置如图 1 所示.从压缩池引出的 160 mm 口径的激光脉冲经  $F$  数为 8.7 (焦距为 140 cm) 的离轴抛物面镜聚焦到喷嘴前沿,其半高全宽处的焦斑半径为 13  $\mu\text{m}$ ,对应的能量集中度为 13%.实验中激光功率为 70 TW,对应靶面处的激光功率密度  $I_0 = 6.8 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ .激光场的归一化矢势  $a_0 = 8.5 \times 10^{-10} \lambda_0 I_0^{1/2}$ ,代入激光中心波长及峰值功率密度可得  $a_0 = 1.8$ .在主激光前 4 ns 范围内的激光信噪比优于  $10^6$ .

沿激光传播方向,一个积分束流仪 (ICT) 放置在喷嘴后 105 mm 处以测量电子束总电量,ICT 的内径为 55 mm,对应  $29^\circ$  收集角.同时利用永久磁铁和荧光屏构成的磁谱仪在线测量电子束的能谱,测量范围为 23—200 MeV,能量分辨约为 5%.电子束通过磁铁偏转之后打在荧光屏上,产生的荧光信号用电荷耦合器件 (CCD) 记录.由于荧光屏对散射光、各种辐射以及粒子束比较敏感,实验中在荧光屏外

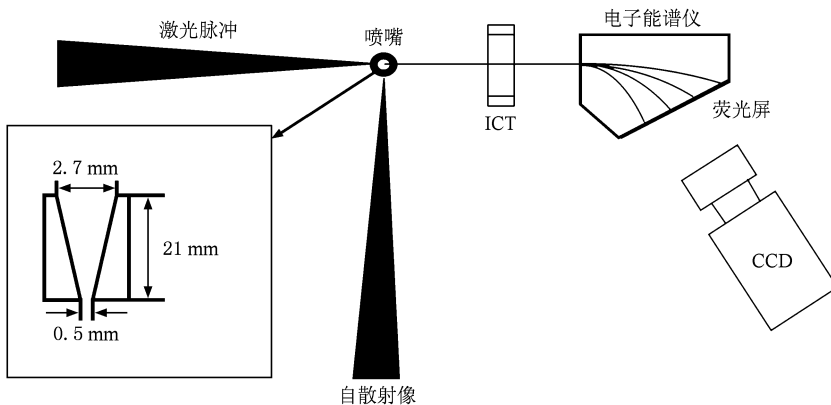


图 1 实验装置示意图及喷嘴结构

加上一层厚度为 50  $\mu\text{m}$  的铝膜以阻止 80 keV 以下的电子及其他杂散光干扰. 实验中超短超强激光在等离子体中传输的汤姆逊散射, 经过  $800 \pm 10 \text{ nm}$  的带通滤片被记录在另一台 CCD 上. 汤姆逊散射的强度与局部激光功率密度和等离子体密度密切相关, 可以有效反映激光脉冲在等离子体中传输时的自聚焦情况<sup>[14]</sup>.

稳定的激光尾波场是加速产生准单能电子束的关键. 当激光脉冲长度  $c\tau$  接近等离子体波长  $\lambda_p$  以及激光焦斑大于等离子体波长时, 激光尾波场的激发效率较高<sup>[1,12]</sup>. 在激光脉冲的焦斑、脉冲宽度和  $a_0$  等参数确定的情况下, 可以通过合理地选取等离子体密度来产生比较稳定的尾波场. 实验中采用的气体为氦气, 在全电离情况下, 根据实验测量的气体原子密度(图 2)乘以 2 即可得出等离子体密度, 该气体原子密度与压强的关系由干涉法测量给出<sup>[15]</sup>.

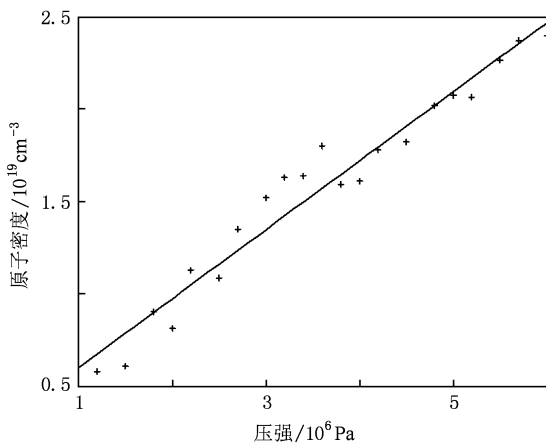


图 2 距喷嘴出口 2 mm 处气体原子密度随压强的变化

实验中通过调节喷气压强来控制等离子体密度. 实验发现, 存在匹配的等离子体密度 ( $2.16 \times 10^{19}$

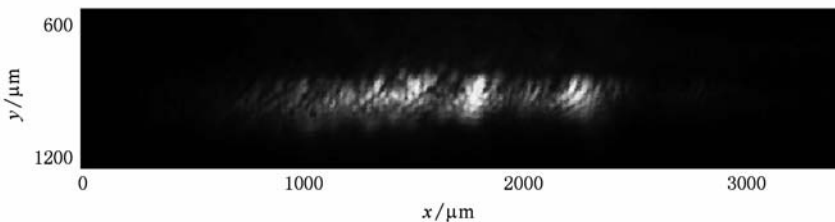


图 3 自散射像(激光沿  $x$  方向传播)

从理论上<sup>[19]</sup>可以估算激光尾波场加速产生的最大电子数为

$\text{cm}^{-3}$ ), 密度较低或较高都无法有效产生准单能电子束. 该等离子体密度对应的等离子体波长为 9.6  $\mu\text{m}$ , 而激光的脉冲长度  $c\tau$  为 9  $\mu\text{m}$ , 两者接近于共振条件, 有利于在实验中产生稳定的尾波场<sup>[16]</sup>.

### 3. 实验结果及分析

图 3 是激光功率为 70 TW、等离子体密度为  $2.16 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、激光信噪比大于  $10^6$  时激光脉冲的自散射像. 激光的自聚焦传输对于等离子体波的稳定产生以及电子的注入过程都有重要影响<sup>[17]</sup>. 从图 3 可以看出, 激光脉冲在约 1.45 mm 的距离上横向尺寸基本保持不变, 说明激光在等离子体中经历了比较稳定的传输, 有利于尾波场的激发和电子束的产生.

图 4 给出的是与图 3 条件同时的电子能谱. 从图 4 可以看出, 电子能谱存在一个明显的单能谱峰, 对应能量为 58 MeV, 能散度为 15.5%. 在尾波场电子加速中, 除了自然散焦长度外, 失相长度以及激光脉冲的损耗衰减长度对电子束的产生也有较大影响. 在本实验工作的激光参数区, 加速长度  $L_{ac}$  将受限于失相长度<sup>[18]</sup>, 电子失相长度表示为

$$L_p \approx \frac{\lambda_p^3}{2\lambda_0^2} \frac{\sqrt{2}}{\pi} a_0.$$

将等离子体波长  $\lambda_p$  代入后得出失相长度  $L_p$  为 235  $\mu\text{m}$ . 根据尾波场的最大加速电场公式

$$E_{\max} = E_0 (a_0^2/2) (1 + a_0^2/2)^{-1/2},$$

可以得出电子从尾波场中获得的最大能量 ( $\Delta E = eE_{\max} L_{ac} \approx eE_{\max} L_p$ ) 为 105 MeV, 大于实验测量值. 这说明实验得到的单能电子能量接近最大能量增益, 但是还没有达到最佳匹配, 应在今后实验中进一步优化.

$$N_{e,\max} \approx 5 \times 10^5 \left( \frac{\delta n}{n_0} \right) \sqrt{n_0} A,$$

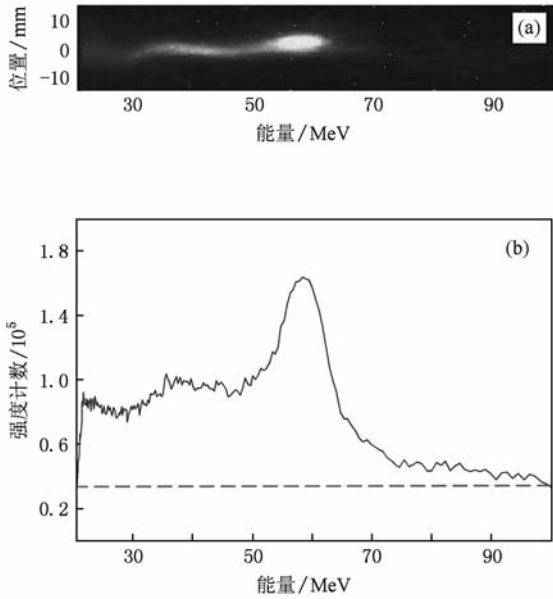


图4 电子能谱 (a)电子磁谱仪的记录结果,(b)处理之后的能谱,虚线为能谱本底

其中  $A$  是以  $\text{cm}^2$  为单位的等离子体波横截面积,  $\delta n$  为等离子体的密度扰动. 本实验中假定电子注入时满足  $\delta n/n_0 \approx 1$ , 由自散射像给出激光光束在等离子体中传输时的横向尺寸约为  $73 \mu\text{m}$ , 近似代替等离子体波的横向尺寸, 则等离子体波的横截面积可近似为  $A = \pi r^2 = 4.2 \times 10^{-5} \text{cm}^2$ . 因此获得电子束的最大电量约为  $15.6 \text{nC}$ , 接近实验中 ICT 测量得到的电子束总电量 ( $15.4 \text{nC}$ ). 在尾波场电子加速实验中, 产生的准单能电量是一个比较重要的参数. 实验中由于探测器位置的限制而无法测量准单能部分的电量. 从理论上可以近似给出准单能部分的电量, 空泡机制给出的准单能电子数为<sup>[11]</sup>

$$N_e \approx \frac{8/15}{k_0 r_e} \sqrt{\frac{P}{mc^3/r_e}},$$

其中  $r_e = e^2/(mc^2)$  为电子经典半径,  $k_0$  为激光中心波长对应的波矢. 结合本实验中的参数, 可以给出单能部分的总电量为  $0.34 \text{nC}$ . 因此实验中得到的总电量只有一小部分来自于准单能电子的贡献, 而更多的则是来自低能的连续谱以及一些本底电子.

大部分电子加速实验中等离子体密度较低(约为  $10^{18} \text{cm}^{-3}$ ), 在较高的等离子体密度条件下, 激光能量更容易受到损耗而在更短的尺度内把能量耦合给等离子体波, 从而比较容易激发大振幅的等离子体波. 尽管高密度等离子体由于失相长度的限制不利于获得高能量的电子束<sup>[20]</sup>, 但高密度条件下的等离子体波相速度较小, 相速度的减小相当于降低了电子的自注入阈值, 因此电子更容易被俘获, 从而获得更多的加速电子. 尾波场中的局域电子密度可以表示为<sup>[21]</sup>

$$n_e = \frac{v_p n_0}{v_p - v_e},$$

其中  $v_p$  为等离子体波的相速度,  $v_e$  为电子在激光传播方向的速度. 该表达式可以在一定程度上解释上述现象. 当局域电子密度达到无穷大, 即电子的运动速度接近于尾波的相速度时, 等离子体波将发生波破, 同时伴随着电子的自注入. 注入的电子越多, 获得加速的电子就越多. 实验中采用的高密度等离子体降低了等离子体波的相速度, 而相速度的减小意味着速度更低的电子也会满足自注入的阈值条件, 为更多的电子注入创造了条件, 有利于产生较大电量的电子束.

## 4. 结 论

通过较高信噪比的激光脉冲以及等离子体密度的优化选择, 在  $2.16 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  的等离子体密度条件下获得了中心能量为  $58 \text{MeV}$ 、能散度  $15.5\%$  的准单能电子束. 实验采用大  $F$  数的离轴抛物面镜增大了激光脉冲的自然散焦长度, 这样在保证激光脉冲在等离子体中稳定传输的同时, 也为后续尾波场中电子的自注入以及准单能电子束的产生奠定了基础. 实验产生的电子束既可以作为多级加速的注入源, 也可以作为产生 X 射线以及  $\gamma$  射线的电子源. 在提高电子束产额的同时也应提高电子束的能量, 这是下一步需研究的问题.

衷心感谢 SILEX-I 激光装置运行组的同事们对本工作的大力协助.

- [1] Tajima T, Dawson J M 1979 *Phys. Rev. Lett.* **43** 267
- [2] Esarey E, Sprangle P, Krall J, Ting A 1996 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **24** 252
- [3] Chang W W, Zhang L F, Shao F Q 1991 *Acta Phys. Sin.* **40** 182 (in Chinese) [常文蔚、张立夫、邵福球 1991 物理学报 **40** 182]
- [4] Xu H, Sheng Z M, Zhang J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 968 (in Chinese) [徐 慧、盛政明、张 杰 2007 物理学报 **56** 968]
- [5] Kneip S, Nagel S R, Martins S F, Mangles S P D, Bellei C, Chekhlov O, Clarke R J, Delerue N, Divall E J, Doucas G, Ertel K, Fiuza F, Fonseca R, Foster P, Hooker C J, Krushelnick K, Mori W B, Streeter M J V, Urner D, Vieira J, Silva L O, Najmudin Z 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 035002
- [6] Froula D H, Clayton C E, Doppner T, Marsh K A, Barty C P J, 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
- [7] Mangles S P D, Murphy C D, Najmudin Z, Thomas A G R, Collier J L, Dangor A B, 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] Geddes C G R, Toth C, Tilborg J V, Esarey E, Schroeder C B, Bruhwiler D L, Nieter C, Cary J R, Leemans W P 2004 *Nature* **431** 538
- [9] Faure J, Glinec Y, Pukhov A, Kiselev S, Gordienko S, Lefebvre E, Rousseau J P, Burgy F, Malka V 2004 *Nature* **431** 541
- [10] Pukhov A, Meyer-Ter-Vehn J 2002 *Appl. Phys. B* **74** 355
- [11] Lu W, Tzoufras M, Joshi C, Tsung F S, Mori W B, Vieira J, Fonseca R A, Silva L O 2007 *Phys. Rev. Spec. Top.* **10** 061301
- [12] Thomas A G R, Najmudin Z, Mangles S P D, Murphy C D, Dangor A E, Kamperidis C, Lancaster K L, Mori W B, Norreys P A, Rozmus W, Krushelnick K 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 095004
- [13] Thomas A G R, Mangles S P D, Murphy C D, Dangor A E, Foster P S 2009 *Plasma Phys. Contr. Fusion* **51** 024010
- [14] Chen L M, Kotaki H, Nakajima K, Koga J, Bulanov S V, Tajima T, Gu Y Q, Peng H S, Wang X X, Wen T S, Liu H J, Jiao C Y, Zhang C G, Huang X J, Guo Y, Zhou K N, Hua J F, An W M, Tang C X, Lin Y Z 2007 *Phys. Plasmas* **14** 040703
- [15] Wu Y C, Wang L, Wang H B 2007 *High Power and Particle Beams* **19** 1129 (in Chinese) [吴玉迟、王 磊、王红斌 2007 强激光与粒子束 **19** 1129]
- [16] Hafz N A M, Jeong T M, Choi W, Lee S K, Pae K H, Victor V 2008 *Nat. Photon.* **2** 571
- [17] Malka V, Faure J, Glinec Y, Pukhov A, Rousseau J P 2005 *Phys. Plasmas* **12** 056702
- [18] Esarey E, Schroeder C B, Leemans W P 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 1229
- [19] Katsouleas T, Wilks S, Chen P, Dawson J M, Su J J 1987 *Part. Accel.* **22** 81
- [20] Nakamura K, Nagler B, Toth C, Geddes C G R, Schroeder C B, Esarey E, Leemans W P, Gonsalves A J, Hooker S M 2007 *Phys. Plasmas* **14** 056708
- [21] Gibbon P 2005 *Short Pulse Laser Interactions with Matter* (London: Academic) p61

# Experimental generation of 58 MeV quasi-monoenergetic electron beam by ultra-intense femto-second laser wakefield \*

Dong Ke-Gong<sup>1)2)</sup> Gu Yu-Qiu<sup>2)†</sup> Zhu Bin<sup>2)</sup> Wu Yu-Chi<sup>2)</sup> Cao Lei-Feng<sup>2)</sup> He Ying-Ling<sup>2)</sup>  
Liu Hong-Jie<sup>2)</sup> Hong Wei<sup>2)</sup> Zhou Wei-Min<sup>2)</sup> Zhao Zong-Qing<sup>2)</sup> Jiao Chun-Ye<sup>2)</sup>  
Wen Xian-Lun<sup>2)</sup> Zhang Bao-Han<sup>2)</sup> Wang Xiao-Fang<sup>1)</sup>

1) (*Key Laboratory of Basic Plasma Physics of Chinese Academy of Sciences, Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

2) (*Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 20 August 2009; revised manuscript received 24 May 2010)

## Abstract

Monoenergetic electron bunches can be generated by the interaction between the ultra-intense laser and underdense plasma on the mm scale. In the experiment conducted on the SILEX-I, by the interaction between an ultra-intense femtosecond laser pulse and 2.7 mm supersonic He gas jet, a 58 MeV quasi-monoenergetic electron beam with 15.5% energy spread and 15 mrad beam divergence is produced. The total charge of the electron beam is about 15.4 nC when the laser power is 70 TW. In this paper the experimental conditions, the method and main results are presented.

**Keywords:** laser wakefield, electron acceleration, bubble, self focusing

**PACC:** 5260, 5240, 5240D

---

\* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10535030), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10876039) and the Major Program of the Science and Technology Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2006Z0202).

† Corresponding author. E-mail: yqgu@caep.ac.cn