

## 利用激光离焦的方法优化超强激光驱动的质子加速\*

徐妙华<sup>1)2)</sup> 李玉同<sup>1)†</sup> 刘峰<sup>1)</sup> 张翼<sup>1)</sup> 林晓宣<sup>1)</sup> 王首钧<sup>1)</sup> 孟立民<sup>2)</sup>王兆华<sup>1)</sup> 郑君<sup>3)</sup> 盛政明<sup>1)3)</sup> 魏志义<sup>1)</sup> 李英骏<sup>2)</sup> 张杰<sup>1)3)‡</sup>

1) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

2) (中国矿业大学(北京)理学院, 北京 100083)

3) (上海交通大学物理系, 上海 200240)

(2010年4月21日收到; 2010年6月30日收到修改稿)

在中国科学院物理研究所“极光 II 号”飞秒激光装置上, 对激光与薄膜靶相互作用产生的靶后质子束特性进行了实验研究. 结果发现, 在主脉冲前存在较强的飞秒预脉冲的情况下, 通过适当地对激光束散焦, 可以使质子束的转换效率提高 3 个数量级, 并同时改善质子束的准直性. 分析表明, 激光散焦的方法可以有效地抑制预脉冲的流体力学效应对质子加速的负面影响, 从而提高质子的转换效率. 此外, 粒子模拟还发现, 散焦量增大时可以产生更多的中低能超热电子, 这也有利于建立高质量的质子加速电场.

**关键词:** 超短脉冲激光与等离子体相互作用, 质子加速, 转换效率

**PACS:** 52.38.Kd, 52.50.Jm

## 1. 引言

近年来, 利用超强激光驱动的高能质子束由于在各方面具有潜在应用<sup>[1-5]</sup>, 已成为强场物理的一大研究热点<sup>[6-8]</sup>. 在超强激光与薄膜靶相互作用中产生准直性好、转换效率高的高能质子束是人们一直追求的目标. 研究表明, 主脉冲前的飞秒(fs)预脉冲和纳秒级自发辐射放大(ASE)对质子加速有着重要影响<sup>[9-11]</sup>. 比如, 预脉冲形成的冲击波效应将破坏薄膜靶后表面的加速电场, 从而降低质子加速的效率和束质量.

为了提高超强激光驱动的质子束质量, 人们在实验中投入了大量精力来改善激光的对比度, 如在激光系统中加超快泡克耳斯盒<sup>[12]</sup>、在靶场系统引入等离子体镜<sup>[13,14]</sup>, 以及倍频<sup>[15]</sup>等方法. 然而, 超快泡克耳斯盒的成本较为昂贵; 等离子体镜会造成 30%—50% 的激光能量损失, 且在一定程度上增大实验过程的困难性和复杂性; 使用倍频的方式不但会损失约 50% 的激光能量, 而且改变了激光的

波长.

在本文中, 我们采用了一种简单有效、且不损失激光能量的方法, 可以有效抑制飞秒预脉冲对质子加速的影响. 实验上发现, 在有较强的飞秒预脉冲存在的情况下, 通过对激光光束进行适当的散焦, 可以使质子束的转换效率增强 3 个数量级, 并且显著改善质子束的准直性.

## 2. 实验布局

实验是在中科院物理所 20 TW 飞秒激光系统“极光 II 号”(XL-II)上进行的. 该激光系统采用啁啾脉冲放大(CPA)技术, 输出波长为 800 nm, 脉宽为 30 fs, 最大输出能量为 640 mJ, 重复频率为 10 Hz. 水平偏振的主激光经过  $f/3.5$  的离轴抛物镜(OAP)后以  $25^\circ$  的入射角聚焦在薄膜铝靶上. 靶前利用光学成像系统对每发激光的聚焦情况进行监视. 在水平面上方  $45^\circ$ , 与靶面法线方向夹角为  $20^\circ$  的位置通过 X 射线针孔相机测量 X 射线焦斑的尺寸与强度. 在激光的反射方向, 采用能量卡计测量

\* 国家自然科学基金(批准号:10720101075, 10925421, 10974250, 10935002), 国家自然科学基金青年科学基金(批准号:10905092), 国家重点基础研究发展计划(批准号:2007CB815102), 国家高技术惯性约束聚变委员会、中央高校基本科研业务费专项资金资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: ytli@aphy. iphy. ac. cn

‡ E-mail: jzhang@aphy. iphy. ac. cn

激光的反射率,用于对靶前预等离子体的状态进行监测.采用安装在靶后法线方向、离靶 5 cm 的 CR39 核径迹探测器测量质子束的角分布,该探测器的尺寸为 5 cm × 5 cm.采用 Thomson 离子谱仪对质子束的能谱进行测量,谱仪的收集立体角为  $1.1 \times 10^{-5}$  sr.

实验中利用超快响应光电二极管和示波器(带宽 8 GHz)对激光脉冲的波形和对比度进行监测.结果发现在主脉冲前约 7.3 ns 有一个 fs 预脉冲,其强度约为主脉冲的 0.6%,如图 1 所示.激光的放大自发辐射(ASE)形成的 ns 前沿的对比度高于  $2 \times 10^{-6}$ .

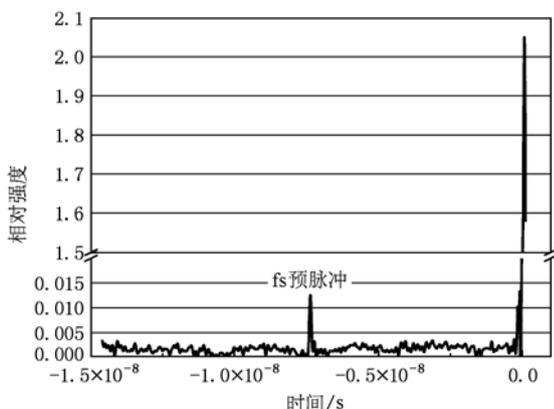


图 1 超快二极管和示波器测量的激光脉冲波形

### 3. 实验结果

#### 3.1. 激光紧聚焦情况下的靶后质子束

图 2 给出了激光紧聚焦到 5, 12, 30, 50  $\mu\text{m}$  厚的铝膜上(对应聚焦光强为  $1.6 \times 10^{18}$   $\text{W}/\text{cm}^2$ )时靶后质子束的能谱.结果发现,当薄膜靶厚度为 5  $\mu\text{m}$  时,靶后基本上观察不到质子束的信号.随着厚度的增大,质子束的截止能量增大到 300 keV 左右.

实验上对激光紧聚焦(最小焦斑)情况下不同靶厚度的质子束角分布也进行了测量.当薄膜靶厚度为 5 和 12  $\mu\text{m}$  时,CR39 上的质子径迹坑数目很少.当靶厚度增大到 30 和 50  $\mu\text{m}$  时,CR39 上观察到的峰值强度分别增大到  $1 \times 10^4$  个/ $\text{cm}^2$  和  $5.9 \times 10^4$  个/ $\text{cm}^2$ .

从结果中可以发现,当激光紧聚焦时,质子束的转换效率随着薄膜靶厚度的增大而增加,而截止能量也远小于类似激光光强下其他小组的结果.导

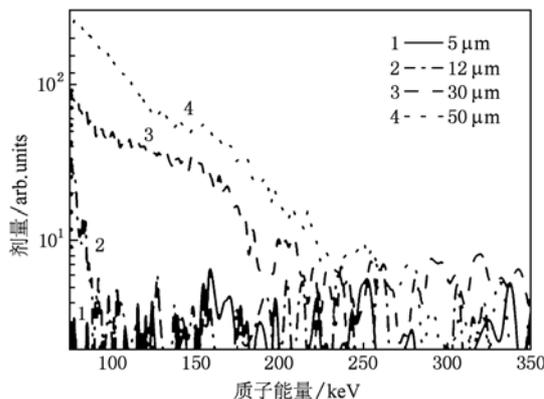


图 2 激光紧聚焦到 5, 12, 30, 50  $\mu\text{m}$  铝靶时靶后质子束的能谱

致这些现象的主要原因是前面提到的 fs 预脉冲对质子加速的影响.当主脉冲的聚焦光强为  $1.6 \times 10^{18}$   $\text{W}/\text{cm}^2$  时,fs 预脉冲的聚焦强度达到  $1.1 \times 10^{16}$   $\text{W}/\text{cm}^2$ .这一预脉冲作用于薄膜靶的前表面,产生了预等离子体,并激发了强冲击波.冲击波传播到薄膜靶的后表面,会使后表面等离子体发生膨胀,导致鞘层电场强度降低,加速效率大大降低<sup>[9]</sup>,这就是在紧聚焦的情况下质子束强度极低的原因.

#### 3.2. 激光离焦情况下的靶后质子束

为了抑制 fs 预脉冲对质子加速的负面影响,我们采用改变 OAP 与靶之间的距离(离焦)的方法,对激光束进行一定程度的散焦,来减小预脉冲的聚焦光强.实验中入射激光的能量保持不变(发与发之间的能量抖动  $< 15\%$ ),离焦量分别选取为 200, 500, 800 和 1200  $\mu\text{m}$ .由于离焦,主脉冲的聚焦光强也相应地降低为  $4 \times 10^{16}$   $\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $7.7 \times 10^{15}$   $\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $3.2 \times 10^{15}$   $\text{W}/\text{cm}^2$  和  $1.4 \times 10^{15}$   $\text{W}/\text{cm}^2$ .

图 3 给出了不同离焦量条件下、激光与 12  $\mu\text{m}$  厚的铝膜相互作用产生的靶后质子束的空间分布.随着离焦量从 0  $\mu\text{m}$ (最小焦点位置)增大到 800  $\mu\text{m}$ ,质子束的峰值强度和平均强度逐渐增大,但当离焦量增加到 1200  $\mu\text{m}$  时,质子束强度又急剧下降.离焦量为 0  $\mu\text{m}$  时,CR39 上质子束的峰值强度约为  $10^2$  个/ $\text{cm}^2$ ;离焦量为 500  $\mu\text{m}$  时峰值强度增大为  $5.9 \times 10^5$  个/ $\text{cm}^2$ ;离焦量为 800  $\mu\text{m}$  时增大到  $1.1 \times 10^6$  个/ $\text{cm}^2$ ;而当离焦量为 1200  $\mu\text{m}$  时,强度急剧下降为  $1.2 \times 10^5$  个/ $\text{cm}^2$ .对于其他厚度的铝膜,质子束的强度随离焦量的变化呈现出类似的趋势.

实验中还对不同离焦量下质子束的能谱进行

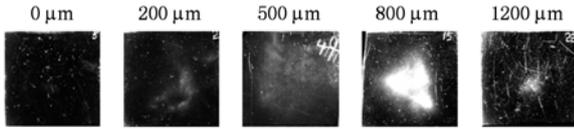


图3 不同离焦量下激光与 12 μm 铝膜相互作用产生的靶后质子束的空间分布

了细致研究. 图4 给出了不同的聚焦强度下激光与 12 μm 铝膜相互作用产生的质子束的能谱. 从图中可以看出, 质子束能谱随离焦量的变化与前面的角分布的趋势基本一致, 质子束的最大截止能量和最大强度出现在激光强度约为  $4.5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$  的情况下.

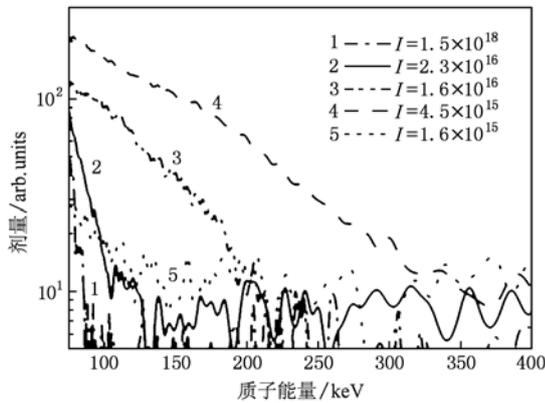


图4 不同的离焦量下激光与 12 μm 铝膜作用产生的靶后质子束的能谱

利用质子束的角分布和能谱, 可以得到不同离焦量下质子束的能量转换效率. 结果表明, 通过适度的离焦, 质子束的转换效率有显著的提高. 图5 给出了经过离焦优化后得到的质子束转换效率与薄膜靶厚度之间的关系. 从图中可以发现, 优化后的转换效率随靶厚度的减小迅速上升. 对于越薄的靶, 优化后效率提升的幅度越大. 举例来说, 对于 50 μm 的铝膜, 转换效率仅增强了 1.3 倍; 对于 30 μm 的铝膜, 转换效率提高了 1 个数量级; 而对于 5 μm 的铝靶, 转换效率相对于紧聚焦的情况提高了 3 个数量级.

此外, 从图3 中可以明显看出随着离焦量的增大, 质子束的空间均匀性也得到了很大改善, 且发散角显著减小. 以 12 μm 铝膜为例, 当离焦量为 200 μm 时, 质子束的强度分布呈现明显的絮状不均匀结构; 当离焦量为 500 μm 时, 质子束的均匀性得到了明显改善, 发散角约为 40°; 当离焦量为 800 μm 时, 发散角减小为 30°; 当靶离焦到 1200 μm 时, 质

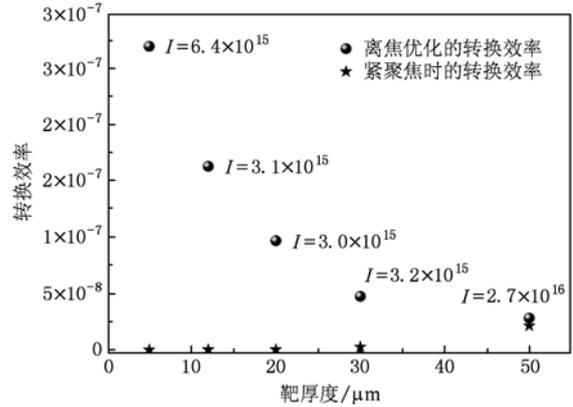


图5 离焦以及紧聚焦条件下, 质子束转换效率随薄膜靶厚度的变化, 其中圆点为离焦优化后的转换效率, 五角星是紧聚焦时质子束的转换效率. 圆点旁边标注的是相应的最佳激光聚焦光强

子束非常集中, 发散角仅为 14° 左右. 对于其他厚度的铝膜, 质子束的准直性也有显著的改善.

## 4. 分析与模拟

### 4.1. 离焦时质子束转换效率的分析

激光离焦时质子束的转换效率得到显著提高的原因主要有两方面. 首先, 离焦可以抑制 fs 预脉冲对质子加速的负面影响. 随着激光离焦量的增大, fs 预脉冲的强度随之逐渐降低. 当离焦量达到 800 μm 时, 尽管此时预脉冲强度 ( $1.2 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ ) 仍大于铝的电离阈值, 然而预等离子体的温度却显著下降, 冲击波的初始压强从原先的百 Mbar 量级降低到 Mbar 量级<sup>[16,17]</sup> ( $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ ), 冲击波对靶后等离子体状态的影响迅速减小. 因此, 超热电子在靶后表面能有效地建立鞘层电场, 进而加速质子.

然而, 单纯的对预脉冲效应的抑制不足以解释在光强降为  $3.0 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$  的条件下质子束仍能得到有效加速的现象. 随着离焦量的增大, 中低能超热电子数目的增大是导致转换效率迅速增大的另一个可能原因. 利用 2 维粒子 (particle-in-cell, PIC) 模拟得到的结果证实了这一想法 (PIC 模拟的结果将在后面给出). 这群数量很大的电子传输到薄膜的后表面后, 将建立一个横向尺度很大的电场, 使附着在靶后很大面积上的碳氢化合物得到电离并加速. 加速的质子数目  $N_p$  可近似的用下式描述:  $N_p = \pi d_L^2 \cdot \lambda_D \cdot n_p$ , 其中  $d_L$  是超热电子建立的鞘

层场的半径,近似等于激光聚焦光斑的半径,  $\lambda_D$  是鞘层场的厚度,  $n_p$  是鞘层场电离碳氢污染物层产生的质子的数密度. 因此,当激光聚焦面积增大时,质子的总数目和质子束的转换效率将迅速上升.

我们利用 2 维 PIC 程序对激光与固体薄膜靶相互作用产生质子束的过程进行了模拟. 模拟中,激光脉冲采用  $\sin^2$  分布,半高宽为 36 fs,脉冲持续时间为 24 个激光周期,归一化的激光电场强度  $a_0 = eE/m\omega_0c = 2.0$ . P 偏振的激光脉冲以  $25^\circ$  的入射角入射到靶上,最佳聚焦处光腰半径  $R_{waist} = 2\lambda$ ,薄膜靶等离子体的厚度为  $1.5\lambda$ ,密度为  $4n_c$ ,等离子体由电子和质子构成. 靶的前表面存在一

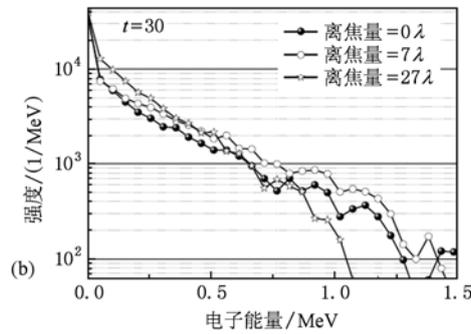
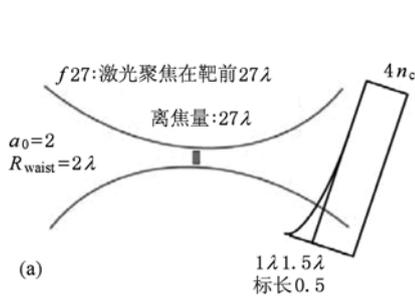


图6 (a) 2 维 PIC 模拟中的初始等离子体密度分布和激光参数; (b)  $t = 30T_0$  时不同离焦量下靶后超热电子的能谱

图 7 中给出了离焦量分别为  $0, 7\lambda$  和  $27\lambda$  时靶后质子束的能谱. 当离焦量为  $27\lambda$  时,质子束的截止能量明显小于紧聚焦时的截止能量,但是中等能量的质子数目却远大于紧聚焦时的数目. 而当离焦量为  $7\lambda$  时,质子的总数目和截止能量均高于最佳聚焦时的情况. 由此可知,即使在激光信噪比很高(不考虑预脉冲效应)的情况下,通过激光离焦的方法仍然可以对质子束进行优化,不仅可以使质子的

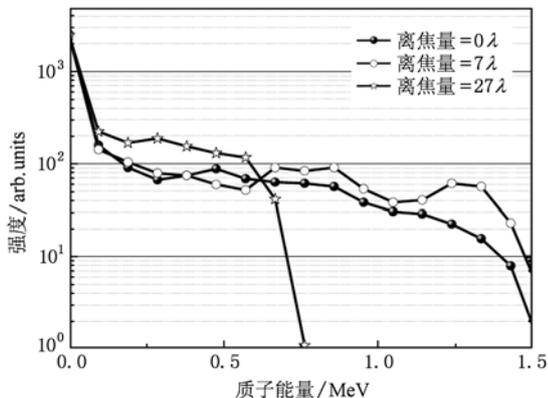


图7 2 维 PIC 模拟中离焦量为  $0, 7\lambda$  和  $27\lambda$  时靶后质子的能谱

个长度为  $1\lambda$ , 密度标长为  $0.5\lambda$  的预等离子体,如图 6(a) 所示. 激光的离焦量分别选取为  $0\lambda, 7\lambda$  和  $27\lambda$ .

图 6(b) 给出了  $t = 30T_0$  时刻靶后超热电子的能谱. 从图中可以看出,当离焦量为  $7\lambda$  时,能量介于  $0.1$  到  $1.5$  MeV 之间的超热电子数目和超热电子温度(斜率)甚至大于紧聚焦的情况. 当离焦量为  $27\lambda$  时,虽然电子的温度低于紧聚焦时的情况,但是总数目和中低能电子(能量小于  $500$  keV)的数目却明显大于紧聚焦时的数目. 由于中低能电子的运动速度相对较低,它们对于靶后鞘层场的建立与维持是非常有利的.

总数目增大,截止能量也可得到提高.

综上所述,激光离焦时对预脉冲效应的有效抑制以及中低能电子数目增强的贡献,是导致质子束转换效率显著优化的主要原因.

#### 4.2. 离焦时质子束发散角的分析

实验中还发现质子束的发散角随着激光聚焦面积的增大迅速减小,准直性得到显著改善. 通过比较不同离焦量下离子波前的形状<sup>[18]</sup>,可以对这一现象进行解释. 当激光紧聚焦时,薄膜靶后表面的形变较严重,中心位置的膨胀距离很大(根据流体力学模拟结果,膨胀距离约为百微米量级),而质子源的横向空间尺寸  $d_L$  为几十  $\mu\text{m}$  左右(与激光焦斑相当),此时靶的后表面呈现出凸出的反抛物线型,如图 8(a) 所示. 由于质子束总是沿着法线方向发射,因此质子束的发散角很大. 而当聚焦面积变大时,冲击波对后表面的影响被很好地抑制了,后表面的形变程度较弱,而质子源的空间横向尺寸  $d_L$  较大(离焦量为  $1200 \mu\text{m}$  时,  $d_L$  约为  $350 \mu\text{m}$ ). 此时,离子波前的形状比较平坦,如图 8(b) 所示,所以质

子束的发散角变小,准直性变好.

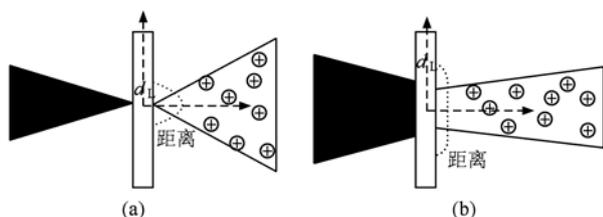


图8 离子波前形状示意图 (a)紧聚焦情况;(b)大尺度离焦情况

## 5. 结 论

在极光 II 号飞秒激光装置上,对不同激光离焦量条件下激光与薄膜靶相互作用产生的靶后质子

束特性进行了研究. 实验发现,当有较强的 fs 预脉冲存在时,通过离焦的方法,不仅可以大幅度提高质子束的转换效率,而且可以改善质子束的准直性. 这一现象与在卢瑟福实验室 ASTRA 飞秒激光装置上得到的结果是一致的. 质子束转换效率显著提高的原因主要包括两方面,首先,激光离焦可以有效地抑制预脉冲的流体力学效应对质子加速的负面影响,其次,离焦时中低能电子数目的增大有利于建立高质量的质子加速电场. 粒子模拟结果还表明,即使在激光对比度较高的情况下,通过适当的离焦也可以优化质子束的转换效率,这为今后进一步优化强激光驱动的质子源提供了新的思路.

感谢 D. Neely 对实验的建议和意见.

- [1] Borghesi M, Bigongiari A, Kar S, Macchi A, Romagnani L, Audebert P, Fuchs J, Toncian T, Willi O, Bulanov S V, Mackinnon A J, Gauthier J C 2008 *Plasma Phys. Control. Fusion* **50** 124040
- [2] Teng J, Hong W, Zhao Z Q, Wu S C, Qin X Z, He Y L, Gu Y Q, Ding Y K 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1635 (in Chinese) [滕建,洪伟,赵宗清,巫顺超,秦孝尊,何颖玲,谷渝秋,丁永坤 2009 物理学报 **58** 1635]
- [3] Naumova N, Schlegel T, Tikhonchuk V T, Labaune C, Sokolov I V, Mourou G 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 025002
- [4] Dyer G M, Bernstein A C, Cho B I, Osterholz J, Grigsby W, Dalton A, Shepherd R, Ping Y, Chen H, Widmann K, Ditmire T 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 015002
- [5] Fourkal E, Velchev I, Fan J, Luo W, Ma C M 2007 *Med. Phys.* **34** 577
- [6] Hegelich B M, Albright B J, Cobble J, Flippo K, Letzring S, Paffett M, Ruhl H, Schreiber J, Schulze R K, Fernández J C 2006 *Nature* **439** 441
- [7] Chen M, Pukhov A, Yu T P, Sheng Z M 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 024801
- [8] Henig A, Steinke S, Schnurer M, Sokollik T, Hörlein R, Kiefer D, Jung D, Schreiber J, Hegelich B M, Yan X Q, Meyer-ter-Vehn J, Tajima T, Nickles P V, Sandner W, Habs D 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 245003
- [9] Xu M H, Li Y T, Yuan X H, Yu Q Z, Wang S J, Zhao W, Wen X L, Wang G C, Jiao C Y, He Y L, Zhang S G, Wang X X, Huang W Z, Gu Y Q, Zhang J 2006 *Phys. Plasma* **13** 104507
- [10] Lindau F, Lundh O, Persson A, McKenna P, Osvay K, Batani D, Wahlstrom C G 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 175002
- [11] Neely D, Foster P, Robinson A, Lindau F, Lundh O, Persson A, Wahlstrom C G, McKenna P 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 21502
- [12] Oak S M, Bindra K S, Narayan B S, Khardekar R K 1991 *Rev. Sci. Instrum.* **62** 308
- [13] Lévy A, Ceccotti T, D'Oliveira P, Réau F, Perdrix M, Quéré F, Monot P, Bougeard M, Lagarde H, Martin P, Geindre J P, Audebert P 2007 *Opt. Lett.* **32** 310
- [14] Dromey B, Kar S, Zepf M, Foster P 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 645
- [15] Chen L M, Kando M, Xu M H, Li Y T, Koga J, Chen M, Xu H, Yuan X H, Dong Q L, Sheng Z M, Bulanov S V, Kato Y, Zhang J, Tajima T 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 45004
- [16] Swift D C, Tierney T E, Kopp R A, Gammel J T 2004 *Phys. Rev. E* **69** 36406
- [17] Eidmann K, Meyer-ter-Vehn J, Schlegel T, Hüller S 2000 *Phys. Rev. E* **62** 1202
- [18] Brambink E, Schreiber J, Schlegel T, Audebert P, Cobble J, Fuchs J, Hegelich M, Roth M 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 154801

## Enhancement of ion generation in low-contrast laser-foil interactions by defocusing\*

Xu Miao-Hua<sup>1)2)</sup> Li Yu-Tong<sup>1)†</sup> Liu Feng<sup>1)</sup> Zhang Yi<sup>1)</sup> Lin Xiao-Xuan<sup>1)</sup> Wang Shou-Jun<sup>1)</sup> Meng Li-Min<sup>2)</sup>  
Wang Zhao-Hua<sup>1)</sup> Zheng Jun<sup>3)</sup> Sheng Zheng-Ming<sup>1)3)</sup> Wei Zhi-Yi<sup>1)</sup> Li Ying-Jun<sup>2)</sup> Zhang Jie<sup>1)3)‡</sup>

1) (*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*Department of Physics, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China*)

3) (*Department of Physics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240 China*)

(Received 21 April 2010; revised manuscript received 30 June 2010)

### Abstract

The characteristics of proton beams generated from ultra-intense laser-foil interactions under varied focal offsets are experimentally studied on XL-II laser facility. The experimental results show that when strong femtosecond prepulses are presented before the main pulse, the conversion efficiency from the laser energy to the protons is enhanced by 3 orders of magnitude with effective improvement of the beam collimation by properly defocusing the laser pulses. The depression of the prepulse effect on the proton acceleration is believed to be one of the main reasons for the significant optimization. Besides, the particle-in-cell (PIC) simulation results indicate that the population of moderate energy electrons increases under large focal offsets, which in turn effectively improves the acceleration electric field and the beam quality.

**Keywords:** ultrashort laser-plasma interactions, proton acceleration, conversion efficiency

**PACS:** 52.38.Kd, 52.50.Jm

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10720101075, 10925421, 10974250, 10935002), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10905092), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2007CB815102), the National High-Tech ICF program, and the Fundamental Research Funds for the Central Universities.

† Corresponding author; E-mail: ytli@aphy.iphy.ac.cn

‡ E-mail: jzhang@aphy.iphy.ac.cn