

文章编号: 100124322(2004)1121406203

# 超短超强激光与 Cu 靶相互作用中 质子背向发射的实验测量<sup>x</sup>

周维民<sup>1</sup>, 谷渝秋<sup>1</sup>, 丁永坤<sup>1</sup>, 郑志坚<sup>1</sup>, 蔡达峰<sup>1,2</sup>, 淳于书泰<sup>1</sup>,  
温天舒<sup>1</sup>, 陈 豪<sup>1,2</sup>, 焦春晔<sup>1,2</sup>, 葛芳芳<sup>1,3</sup>, 王光昶<sup>1,2</sup>, 尤永禄<sup>1</sup>, 何颖玲<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

2. 四川大学 原子分子物理研究所, 四川 成都 610065; 3. 重庆大学 数理学院, 重庆 400044)

**摘 要:** 在 20TW 激光器上进行了超短超强激光与金属 Cu 膜靶的相互作用实验, 当靶厚度不同时, 采用 CR39 核径迹探测器测量了质子发射的空间分布和产额; 使用 Thomson 磁谱仪测量了靶背法线方向质子束的能量分布。测量结果表明: 质子产额为  $10^5 \sim 10^6$  每发; 质子束沿靶背法线方向发射, 与入射激光方向无关, 并且存在较小的发射立体角, 在一定能量处出现截止, 截止能量的大小与靶厚度有关。

**关键词:** 超短超强激光; 质子; 空间分布; 能谱

**中图分类号:** O434.12; TL65 **文献标识码:** A

随着啁啾脉冲放大(CPA)<sup>[1]</sup>技术的出现, 新型超短超强激光器可产生脉冲宽度为几十 fs 到几 ps, 功率密度高达  $10^{21} \text{W cm}^{-2}$  的激光脉冲。在超短超强激光与等离子体相互作用过程中, 激光能量主要通过共振吸收、真空加热、有质动力加热等非线性机制传递给电子, 产生超热电子。超热电子输运至靶背表面, 形成一垂直于靶背表面的鞘层电场<sup>[2]</sup>, 该鞘层电场对靶背表面被电离的离子进行加速, 从而产生喷射的离子束。此前进行的一些实验<sup>[3~5]</sup>已经证明这些离子绝大部分是质子, 主要来源于靶表面的附着物<sup>[6]</sup>, 如凝结在靶表面的水, 附着在靶表面的真空泵油等。

超短超强激光与等离子体相互作用产生的质子束, 沿着靶背表面法线方向, 以一定立体角发射。对质子进行加速的鞘层电场是超热电子输运至靶背表面建立的, 在靶背测量到的超热电子温度为几十到几百 keV<sup>[7]</sup>, 电子速度已经接近光速, 因此该鞘层电场对质子的加速时间极短, 形成的质子束也可以认为是时间尺度很小(ns 级)的质子束脉冲。文献[8]中提出了以超短超强激光等离子体相互作用产生的质子束作为驱动源驱动核聚变的设想, Borghesi 提出以质子束成像作为探测等离子体电场分布的一种诊断手段<sup>[9]</sup>。本文报道了在激光功率密度和靶材料不变的条件下, 质子能量、空间分布以及产额与靶厚度的关系。

## 1 实验设置

实验是在中国工程物理研究院激光聚变研究中心高温高密度等离子体物理实验室的超短超强激光装置上进行的。激光波长 800nm, 脉宽 60fs, 经压缩后到达靶面的能量约为 300mJ, 激光能量波动小于 2%, 采用自相关技术测得的激光脉冲对比度约为  $1 \cdot 10^{-6}$  (主脉冲前 1~2ns), 利用针孔相机在靶面法线方向测得的激光焦斑为  $<35\mu\text{m}$ , 靶面激光功率密度约为  $5.2 \times 10^{17} \text{W cm}^{-2}$ 。

如图 1 所示, 入射激光直径为  $<70\text{mm}$ , 经  $f/5$  的离轴抛物面镜聚焦于不同厚度的 Cu 靶表面, 与靶面法线成一定角度。实验利用 CR39 核径迹探测器<sup>[10]</sup>测量质子空间分布和产额。CR39 面积为  $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ , 厚 1mm。能量大于某一

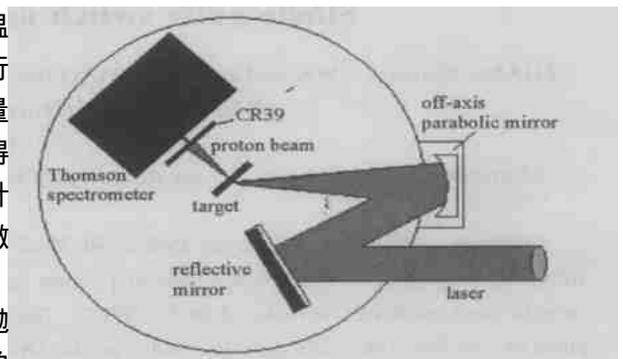


Fig. 1 Scheme of experimental setup

图 1 实验布局

<sup>x</sup> 收稿日期: 2004203216; 修订日期: 2004208225

基金项目: 中国工程物理研究院基金资助课题; 国家自然科学基金资助课题 (10275056, 10275057)

作者简介: 周维民 (1978 -), 男, 硕士, 从事超短超强激光与等离子体相互作用研究; 绵阳市 9192986 信箱。

联系作者: 丁永坤, 男, 研究员, 博士生导师; E2mail: ding2yk@vip.sina.com。

阈值(100keV)的离子穿过 CR39 后,使之产生辐射损伤。经 6.25mol/L 的 KOH 溶液刻蚀 5h 后,离子径迹会显示在 CR39 上。考虑到要使质子束完全落在该 CR39 上,并且不重叠而便于分辨,CR39 与靶背表面的合适距离为 30 ~ 60mm。靶背法线方向质子束的能量分布,利用 Thomson 离子谱仪<sup>[11]</sup>进行测量。

## 2 实验结果及其讨论

### 2.1 质子空间分布及产额的测量

在研究质子束空间分布的实验中,分别让入射激光与靶面法线成 22.5°和 45°,聚焦于不同厚度(20 和 30μm) Cu 靶表面。图 2 (a) 是 CR39 核径迹探测器记录的典型的质子束空间分布,其中中心的小孔用于定位激光焦点;图 2 (b) 是经显微镜放大 1 000 倍的质子径迹,可以看出质子径迹的大小和深浅存在差异,这是因为质子束具有一定的能量分布,而 CR39 对不同能量质子的响应是不同的。图 3 是质子束典型密度分布,其中横坐标为距离质子束中心的位置,纵坐标为该位置质子数密度。根据该密度分布可以得到质子束发射立体角,对其进行积分即可得到质子产额。

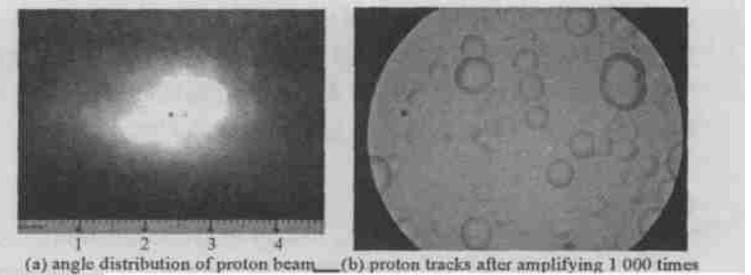


Fig. 2 Spatial distribution of proton beam

图 2 质子束空间分布

实验结果显示,在入射激光与靶面分别成 22.5°和 45°的两种情况下,都只在靶背法线方向测量到了与图 2 和图 3 类似的质子分布,即质子束只沿着靶背法线方向发射,与激光入射角度无关。根据实验测量,质子束发射立体角为 0.013 5 ~ 0.023 4sr,质子产额为 10<sup>5</sup> ~ 10<sup>6</sup> 每发。这两者与激光入射方向和靶厚度都没有明显关系。

现在相关的研究者已普遍接受文献[2]对靶背法线方向质子加速机制的解释,认为超热电子在靶背表面建立的鞘层电场是质子加速的主要因素。该鞘层电场垂直于靶背表面,强度为

$$E = T_h / \max(L_i, D) \tag{1}$$

式中:  $T_h$  为超热电子温度;  $L_i = (dn_i / n_i dx)^{-1}$  为等离子体密度标长;  $D = (kT_e / 4 ne^2)^{1/2}$  为等离子体德拜长度。本文报道的实验结果证明了质子束只沿着靶背法线方向发射,这符合该理论有关加速电场方向的结论。

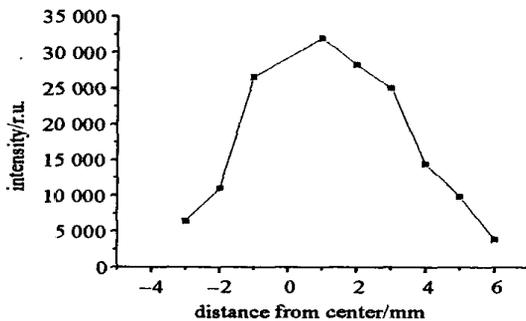


Fig. 3 Intensity distribution of proton beam

图 3 质子束密度分布

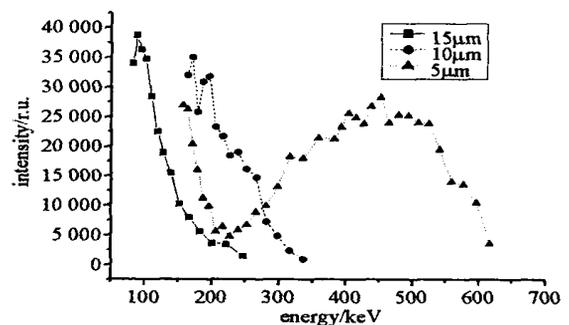


Fig. 4 Proton beam spectra of Cu targets with different thickness

图 4 不同厚度靶质子能谱

### 2.2 质子能谱的测量

在确定质子束的发射沿靶背表面法线方向后,为了研究质子束能量分布与靶厚度的关系,利用 Thomson 离子谱仪测量相同能量激光与不同厚度 Cu 靶产生的质子束的能量分布。将 Thomson 离子谱仪放置在靶背法线方向,Cu 靶厚度分别为 5,10 和 15μm。

根据质子能谱(图 4)显示,质子束在某一能量处出现截止<sup>[3]</sup>。在激光功率密度相同而靶厚度不同的情况下,随着靶厚度的增加,质子束截止能量降低。文献[2]认为,在主激光到达靶面之前,预脉冲已将靶表面电离,形成具有一定密度梯度的等离子体区域,而激光只能传播到临界密度处,因此,几十 μm 厚的靶对于激光脉冲来说是不透明的。根据前面的讨论可知,对质子进行加速的主要因素是超热电子在靶背建立的鞘层电场。超热电子产生后,经过稠密等离子体区域的输运,在稠密等离子体内会损失能量,超热电子能谱的实验结果<sup>[7]</sup>就

可以说明这一点。实验<sup>[7]</sup>中,在靶前、靶背方向测得的超热电子温度分别为 282 和 96keV,这说明超热电子在输运过程中损失了相当多的能量。随着靶厚度的增加,超热电子输运距离变长,能量损失更多,温度也相应变得更低。根据公式(1),加速电场与超热电子温度成正比。当超热电子温度降低的时候,加速电场变小,质子获得的加速相应降低,质子的截止能量变小,这与本文报道的实验结果是一致的。

#### 4 结 论

我们在实验中测量得到超短超强激光等离子体相互作用过程中产生的质子束,质子产额为  $10^5 \sim 10^6$  每发,沿靶背法线方向发射,与入射激光方向无关。质子束存在着较小的发射立体角,这将有利于该机制下产生的质子束的实际利用。从质子束的能量分布可以看出,质子束在一定的能量处出现截止,截止能量的大小与靶厚度有关。这些实验结果均与质子加速理论<sup>[2]</sup>吻合得很好。

#### 参考文献:

- [1] Perry M D, Mourou G. Terawatt to petawatt subpicosecond lasers [J]. *Science*, 1994, **264**: 917.
- [2] Wilks S C, Langdon A B, Cowan T E, et al. Energetic proton generation in ultra2intense laser2solid interactions[J]. *Phys Plasmas*, 2001, **8**: 542.
- [3] Clark E L, Krushelnic K, Davies J R, et al. Measurements of energetic proton transport through magnetized plasma from intense laser interaction with solids [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **84**: 670.
- [4] Snavely R A, Key M H, Hatchett S P, et al. Intense high2energy proton beams from petawatt2laser irradiation of solids[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **85**: 2945.
- [5] Macsimchuk A, Gu S, Flippo K, et al. Forward ion acceleration in thin films driven by a high2intensity laser[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **84**: 4108.
- [6] Gtomer S, Jones R, Begay F, et al. Fast ions and hot electrons in the laser2plasma interaction[J]. *Phys Fluids*, 1986, **29**: 2679.
- [7] 蔡达峰,谷渝秋,郑志坚,等. 超短超强激光与固体靶相互作用中超热电子角分布的实验观测[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(5): 587. (Cai D F, Gu Y Q, Zheng Z J, et al. Experimental measurement of the angular distribution of hot electrons generated by ultrashort ultra2intense laser interaction with solid target. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(5): 587)
- [8] Roth M, Cowan T E, Key M H, et al. Fast ignition by intense laser2accelerated proton beams[J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **86**: 436.
- [9] Borghesi M, Schiavi A, Campbell D H. Proton imaging: a diagnostic for inertial confinement fusion/fast ignitor studies[J]. *Plasma Phys Control Fusion*, 2001, **A43**: 267.
- [10] Fews A P. Flexible analysis of etched nuclear particle tracks[J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res*, 1992, **B72**: 91.
- [11] Sakabe S, Mchizuki T, Yamanaka T, et al. Modified Thomson parabola ion spectrometer of wide dynamic range[J]. *Rev Sci Instrum*, 1980, **51**: 1314.

### Measurement of proton jet in the interaction of ultra2short ultra2intense laser with Cu foil target

ZHOU Wei2min<sup>1</sup>, GU Yu2qiu<sup>1</sup>, DING Yong2kun<sup>1</sup>, ZHENG Zhi2jian<sup>1</sup>, CAI Da2feng<sup>1,2</sup>,  
CHUNYU Shu2tai<sup>1</sup>, WEN Tian2shu<sup>1</sup>, CHEN Hao<sup>1,2</sup>, JIAO Chun2ye<sup>1,2</sup>,  
GE Fang2fang<sup>1,2</sup>, WANG Guang2chang<sup>1,2</sup>, YOU Yong2lu<sup>1,2</sup>, HE Ying2ling<sup>1,2</sup>

(1. Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 9192986, Mianyang 621900, China;

2. Atomic and Molecular Physics Institute, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. School of Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** This paper reports the experimental research on the interaction of ultra2short and ultra2intense laser with Cu foil target. The spa2tial distributions and yield of the protons with different target thicknesses were recorded by nuclear track detector CR39. And the proton energy spectrum was measured by Thomson magnetic spectrometer. The results show that about  $10^5 \sim 10^6$  high energy protons jet only in the direction no2r2mal to the surface of target within a little cone angle. A sharp cutoff energy exists in the proton energy spectrum, and it depends on the target thickness.

**Key words:** Ultra2short ultra2intense laser; Proton; Spatial2distribution; Energy2spectrum