

文章编号: 1007-4627(2008)02-0135-04

百太瓦飞秒激光驱动复合靶产生质子的特性研究*

唐翠明¹, 谷渝秋², 周志坚¹, 洪伟², 王剑^{2,3}

(1 四川理工学院物理系, 四川 自贡 643000;

2 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

3 四川大学原子与分子物理研究所, 四川 成都 610065)

摘要: 在 SILEX-I 激光装置上实验研究了超强超短激光与 Au/CH 复合靶相互作用中在靶背法线方向发射的质子束的空间分布特征。保持复合靶前表面的 Au 厚度不变, 质子束流随着后表面的 C₈H₈ 层厚度的增加而减小, 同时质子空间分布呈现环状、成丝和圆盘状分布。实验没有发现高于 2.75 MeV 的高能质子产生。实验进一步完善了超短超强激光等离子体相互作用的物理模型。

关键词: 超短超强激光; 质子; 质子空间分布; 质子产额; 辐射变色膜片

中图分类号: O536

文献标识码: A

1 引言

强激光加速得到的质子与加速器产生的质子相比具有加速距离短、脉宽窄、空间小和费用较低等优点, 使得产生的高能质子在粒子加速^[1]、质子成像^[2]、“快点火”^[3]和治疗癌症^[4]等方面有很大的应用前景。最近几年强激光产生的质子束引起了人们极大的兴趣。

强激光与薄膜靶相互作用产生质子的主要加速机制是靶背法线鞘层加速机制^[5] (Target Normal Sheath Acceleration, 简称 TNSA)。TNSA 机制主要是靶前产生的超热电子在靶内回流电子的伴随下传输到达靶背表面且离化靶背物质, 建立强电场对质子加速。TNSA 加速电场强度 $E = (kT_e/e) \cdot \max(L_n, \lambda_D)$, k 为波尔兹曼常数, T_e 为靶背超热电子的温度, λ_D 为德拜长度, L_n 为等离子体标长。

最近几年激光与薄膜靶相互作用产生的质子束特性已被广泛地研究。Schwoerer 等^[6]用 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 的双层微型靶首次得到了 MeV 的准单能质子, 这使得超短超强激光与等离子体相互作用得到的质子有可能作为离子源。谷渝秋等^[7]和 Zepf 等^[8]在实验中先后观察到了质子束的环状结构及成丝调制结构。在实验中采用的 HD810 型号辐射变

色膜片(Radiochromic Film, 简称 RCF), 它的灵敏层在表面, 厚度为 $7 \mu\text{m}$ 。高能 X 射线和超热电子的射程很长, 因此高能 X 射线和超热电子沉积在 RCF 上的剂量很少, 故引起 RCF 变色最主要的是质子。质子束流越强, RCF^[9]变色越深, 则 RCF 的光密度(OD)就越大, RCF 能定性反映出质子束流大小和空间分布。文中用 RCF 和固体核径迹 CR39 测量了不同厚度的复合靶产生的质子空间分布。

2 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国家重点实验室的 fs 级激光装置 Silex-I 上进行的。该装置提供单路激光的波长 800 nm, 最大能量为 8.5 J, 激光能量波动小于 2%, 脉冲宽度为 30 fs, 最大输出功率高达 286 TW, 装置可稳定运行在 100 TW 及其以上。采用自相关技术测得的主激光与预脉冲的信噪比高于 3×10^5 (在主脉冲到达前 4 ns)。如图 1 所示, 直径为 140 mm 的激光脉冲经压缩池压缩后进入靶室, 经全反镜反射至 $f/3$ (f 是焦距, 为 420 mm) 离轴抛物面镜, 经抛物面镜聚焦至靶表面。

在调节激光聚焦的过程中, 靶室外的长焦距显

* 收稿日期: 2007-10-18; 修改日期: 2007-12-14

* 基金项目: 四川理工学院人才引进项目(07ZR45)

作者简介: 唐翠明(1977-), 女(汉族), 四川射洪人, 助教, 从事超短超强激光与等离子体相互作用研究; E-mail: smile5550@

显微镜(Quast)通过靶室法兰的玻璃窗口对光学焦斑进行实时监测。通过安置在靶室法兰上 X 光针孔 CCD 相机结合,可以测量激光在靶面形成的 X 光焦斑的强度分布。由 X 光针孔 CCD 相机测量得到的典型 X 光焦斑如图 2 所示。采用 $1.22 \mu\text{m}$ 的 Au

右的位置。激光极化方式为 p 极化,入射角度为 21° ,打靶时靶室的真空度保持为 10^{-2} Pa 量级。

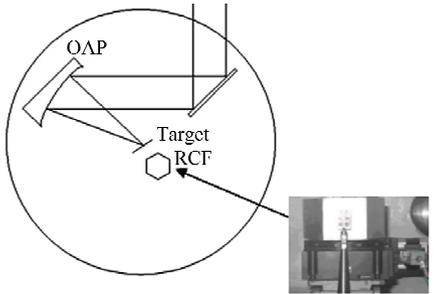


图 1 实验布局

分别和不同厚度的 C_8H_8 组成双层复合平面靶,每个靶架上有 6 片靶。将 RCF 叠加在 CR39 上面,然后放置在靶背法线方向来探测质子束的特性。由于在探测质子的空间分布上不能实现在线监测,为了提高实验效率,我们首次采用由同步电机控制自制的 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 6 面柱体,每面粘贴 1 片 HD810 型号 RCF 和 CR39 叠加在一起来探测质子空间分布,这样每打一发,在靶室外用电脑控制步进电机走动 48 200 步,则旋转台转动 60° ,就变作下一片 RCF 和 CR39 来测量质子束。用另一个步进电机控制靶架,靶面换作另一片靶。这样就在不开盖的情况下,可以首次连续测量 6 次质子束发射,实验效率比以往提高了 4 倍。为了测量靶背质子束全部空间分布,将 HD810 型号 RCF 和 CR39($5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$)沿靶背法线方向放置,距离靶背 26 mm 左

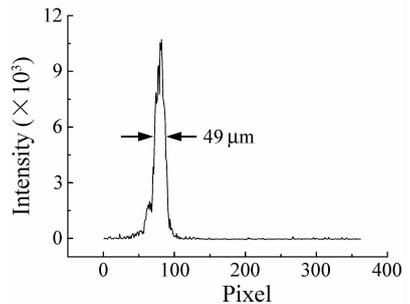


图 2 激光焦斑和扫描图

3 实验结果

表 1 给出了发次号、激光能量、焦斑、功率密度、靶材、靶厚和 RCF 测量得到的平均剂量。由于质子在物质中的散射较小,它的电离特性使其在靠近射程末端处形成了一个能量损失较大的 Bragg 峰,在峰位附近出现了一个较为严重的电离辐射损伤区域,引起 RCF 变色。厚度为 $107.55 \mu\text{m}$ 的 HD810 的 RCF,RCF 表面的灵敏层厚度为 $7 \mu\text{m}$ 。用 SRIM 计算得出,质子在其中的沉积能量最大约

表 1 实验参数

次号	激光能量/J	焦斑/ μm	功率密度/(W/cm^2)	靶材	靶厚/ μm	平均 OD
1	2.68	49×49	1.18×10^{18}	Au+ C_8H_8	$1.22+9.81$	0.854 8
2	2.99	18×30	5.88×10^{18}	Au+ C_8H_8	$1.22+17.31$	0.627 6
3	2.86	14×33	6.57×10^{18}	Au+ C_8H_8	$1.22+42$	0.560 4

500 keV,故 RCF 探测到的主要是能量较低的质子束。辐射变色反应是 RCF 受辐照后颜色由透明逐渐变为蓝色,质子束流越强则 RCF 颜色越深,则 RCF 光密度越大。根据 $OD = \log_{10}(I_0/I)$ (其中,OD 是光密度, I 是每点的光强, I_0 是没有加 RCF 时测量得到的光强度),用 matlab 编程将实验得到

的图片处理为 OD 图,如图 3 所示。CR39 没有探测到质子的信号,故质子没有穿过厚度为 $107.55 \mu\text{m}$ 的 RCF。用 SRIM 计算出质子能量低于 2.75 MeV 时不能穿过 $107.55 \mu\text{m}$ 的 RCF,这与我们在相同实验条件下^[10]得出的质子能量低于 2.75 MeV 时的结果相吻合。采用 Au 和 C_8H_8 复合双层靶时,中心

圆盘结构对应张角大小相等, 约为 37° , 质子束整个发散张角为 51° 。当 Au 的厚度不变和增加 C_8H_8 厚度时, RCF 的 OD 值变小, 即质子束流越弱, 质

子产额减小。在靶背法线方向分别观察到以环状、成丝、圆盘分布为主的质子空间分布。

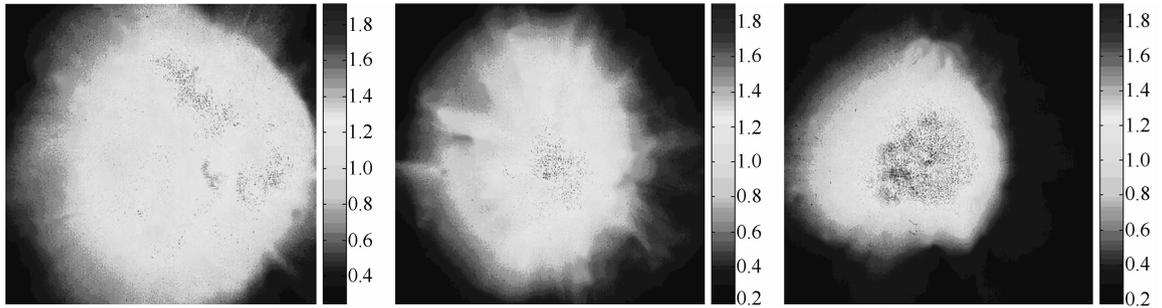


图 3 质子束空间分布

4 讨论

当激光功率密度增加到 10^{18} W/cm^2 时, 激光主要通过共振吸收^[11]和有质动力^[12]这两种主要的吸收机制, 在临界密度面附近将能量传递给超热电子。超热电子向靶内传输时形成的强电流 100—1 000 MA 之间, 远超过了 Alfvén 极限时, 则超热电子要向靶内输运, 将会被部分回流的电子补偿、中和。当超热电子束与靶内的冷电子回流构成的电流仍然超过 Alfvén 极限时, 大量的冷电子将聚集在靶的前表面, 形成一个静电场以阻碍超热电子继续进入, 使得靶内总电流低于 Alfvén 极限, 超热电子继续向靶内输运。在实验中 Au 的厚度很薄为 $1.22 \mu\text{m}$, 由文献^[13]知道 Au 已被预脉冲全部离子化且形成了预等离子体, 则当主脉冲与预等离子体作用产生的超热电子。只考虑在 C_8H_8 里的输运情况。由于 C_8H_8 材料为绝缘材料, 电导率很小, 很难产生自由电子以形成足够的冷电子回流, 则超热电子在材料内的能量损失所导致的靶加热效应以及碰撞电离等效应的电子成为冷电子的来源。由欧姆定律 $J = \sigma E$ 可知, 为了维持反向的冷电子回流需要激发更大的自生电磁场。这一自生电磁场使电子束受到反常阻止, 很大程度上抑制了电子束的输运, 使得传输到靶后表面的电子数目和能量降低。超热电子在固体靶中开始以一个平顶柱状电流输运, 随着超热电子电流继续向靶内输运, 则会由于自生电磁场和碰撞效应的影响, 将产生超热电子成丝, 每根丝都会建立强的自生磁场, 继续向靶内输

运时则在磁场的作用下将融合成较粗的丝状电流。当平顶的柱状电流到达靶背建立电场对质子加速时, 则将得到圆盘状的质子空间分布; 如果成丝的超热电子电流到达靶的后表面建立壳层电场时, 则将加速得到成丝的质子分布。关于实验中测量到的环状质子空间分布, 这是由于随着激光功率密度的提高, 超热电子电流更强, 超热电子更早地发展为平顶柱状电流, 此时若这种柱状电流尚未到达靶背表面, 那么随着回流电子的不断增强, 宏观电流逐渐被中和, 自生磁场逐渐减弱, 对电流的箍缩作用也逐渐减弱, 电流在热压和径向电场的作用下径向膨胀形成空心结构。如果这时电流刚好到达靶的后表面, 由质子加速机制 TNSA 可以知道质子空间分布由到达后表面超热电子建立的电场分布决定, 故探测到的质子空间分布将是环状分布。在实验中随着靶厚增加, 分别观测到了环状中心结构、破裂成丝、圆盘状的质子空间分布, 由 TNSA 加速机制可得出测量到的质子空间分布与到达靶背的超热电子的空间分布类似。质子空间分布推导出到达靶背的超热电子的空间分布与 Sentoku 等^[14]的模拟结果相似: 一个平顶的柱状电流随不稳定性的增长将发展为环状结构, 然后破裂成丝; 成丝的电流将在各自磁场作用下又会融合成较粗的丝状电流。当 Au 的厚度为 $1.22 \mu\text{m}$, C_8H_8 厚度由 $9.81 \mu\text{m}$ 到 $42 \mu\text{m}$ 时, 超热电子在靶内损失的能量增加、数量减小, 则超热电子在靶背建立的电场强度减小, 得到的质子束减小, 理论分析与实验结果吻合, 即随着靶厚增加, RCF 的平均 OD 值减小, 质子束流减小。

5 结论

实验中强激光分别与 1.22 μm 的 Au 与 9.81, 17.31 和 42 μm 的 C_8H_8 复合平面靶作用, 分别观测到环状、成丝、圆盘分布为主的质子空间分布。实验中随着靶厚增加质子束流减小, 用 TNSA 模型解释的超热电子输运到靶背形成的空间鞘层电场结构决定了质子束的空间结构的理论分析与实验结果一致。我们的实验为进一步完善超短超强激光等离子体相互作用的物理模型, 实现质子束应用的可能, 获得控制质子束特性的方法提供了依据, 并为强场物理在该领域的研究奠定了一些良好的基础。

参考文献 (References):

- [1] Pukhov A. Phys Rev Lett, 2001, **86**: 3 562.
 [2] Borghesi M, Schiavi A, Campbell D H, *et al.* Plasma Physics and Controlled Fusion, 2001, **A43**: 267.
 [3] Roth M, Cowan T E, Key M H, *et al.* Phys Rev Lett, 2001, **86**: 436.
 [4] Hu Jiacheng, Yang Xiaoyuan, Yang Yuandi, *et al.* Advanced Measurement and Laboratory Management, 2005, **6**: 25 (in Chinese).
 (胡家成, 杨小元, 杨元第等. 现代测量与实验室管理, 2005,

- 6**: 25.)
 [5] Hatchett S P, Brown C G, Cowan T E, *et al.* Physics of Plasmas, 2007, **7**: 2 076.
 [6] Schwoerer H, Pfoth S, Jäckel O, *et al.* Nature, 2006, **439**: 445.
 [7] Gu Yuqiu, Cai Dafeng, Zheng Zhijian, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2004, **16**(7): 875.
 [8] Zepf M, Clark E L, Beg F N, *et al.* Phys Rev Lett, 2003, **90**(6): 064 801.
 [9] Xu Xuechun, Lin Libin, Jiang Bo, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2005, **17**(2): 291(in Chinese).
 (徐雪春, 林理彬, 蒋波等. 强激光与粒子束, 2005, **17**(2): 291.)
 [10] Tang Cuiming, Gu Yuqiu, Zhou Weimin, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2007, **19**(1): 5(in Chinese).
 (唐翠明, 谷渝秋, 周维民等. 强激光与粒子束, 2007, **19**(1): 5.)
 [11] Forslund D W, Kindel J M, Lee K, *et al.* Phys Rev, 1975, **A11**: 679.
 [12] Malka G, Fuchs J, Amiranoff F, *et al.* Phys Rev Lett, 1977, **79**: 2 053.
 [13] Batani D, Manclossi M, J Santos J, *et al.* Plasma Physics and Controlled Fusion, 2006, **48**: B211.
 [14] Sentoku Y, Mima K, Sheng Z M, *et al.* Phys Rev, 2002, **E65**: 046 408.

Proton Characteristic Research Generated by Hundred TW Femtosecond Laser and Compound Target Interaction*

TANG Cui-ming^{1,1)}, GU Yu-qiu², ZHOU Zhi-jian¹, HONG Wei², WANG Jian^{2,3}

(1 Department of Physics, Sichuan University of Science & Engineering Physics Institute,

Zigong 610065, Sichuan, China;

2 Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;

3 Atom and Molecule Physics Institute, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Proton beam behavior at the normal direction of the rear surface of the target produced from ultra-intense short pulse laser irradiated Au/CH double layers targets was explored on SILEX-I laser facility. With the same thickness of Au layer, the proton beam flux decreases with the increasing of CH layer thickness, and the corresponding spatial profile of proton beam shows ring-, filament-, and disc-like distribution. The energy of proton beam was not beyond 2.75 MeV in our experiment.

Key words: ultra-short and ultra-intense laser; proton; space attribution of proton; yield of proton; radiochromic film

* Received date: 8 Oct. 2007; Revised date: 14 Dec. 2007

* Foundation item: Bringing in human resource project of Sichuan University of Science & Engineering

1) E-mail: smile5550@163.com