

紫外超短激光驱动 铜薄膜靶产生质子的实验研究

路建新, 兰小飞, 戴辉, 黄永盛, 席晓峰, 王雷剑, 杨大为, 汤秀章

(中国原子能科学研究院 核技术应用研究所, 北京 102413)

摘要: 在中国原子能科学研究院的放电泵浦的紫外 KrF 超短脉冲激光放大装置上, 开展了紫外超短脉冲激光与铜薄膜靶相互作用加速产生质子束的实验研究。紫外超短脉冲激光输出能量为 30 mJ、波长为 248 nm、脉冲宽度为 500 fs, 采用离轴抛物面镜聚焦获得激光聚焦功率密度为 1.2×10^{17} W/cm²。激光以 45° 入射 5 μm 厚的铜薄膜靶, 质子最大能量超过 300 keV。紫外超短脉冲激光的高对比度和高吸收效率是紫外激光加速的优点。

关键词: 紫外; 超短激光; 质子; 薄膜靶; 靶后鞘层加速

中图分类号: O434; TL65

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2013)02-0178-03

doi: 10.7538/yzk.2013.47.02.0178

Experiment on Proton Acceleration Using Ultraviolet Ultra-short Laser Interaction With Copper Thin Foil Target

LU Jian-xin, LAN Xiao-fei, DAI Hui, HUANG Yong-sheng, XI Xiao-feng,
WANG Lei-jian, YANG Da-wei, TANG Xiu-zhang

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-7, Beijing 102413, China)

Abstract: Proton acceleration induced by ultraviolet laser interaction with a thin foil was studied on an ultra-short KrF laser amplifier called LLG50 in CIAE. The energy spectrum was recorded by a Thomson ion spectrometer. The ultraviolet laser system generated ultra-short pulses with energy of 30 mJ and pulse duration of 500 fs, and the peak focal intensity is 1.2×10^{17} W/cm². The maximal energy of protons recorded in the target normal direction is higher than 300 keV, and fast electrons were generated by vacuum heating or resonance absorption. The advantages of ultraviolet laser proton acceleration are high contrast in the laser pulse and high absorption rate.

Key words: ultraviolet; ultra-short laser; proton; thin foil target; target normal sheath acceleration

利用超短超强激光与薄膜靶相互作用产生高能质子束, 是超短超强激光与物质相互作用

物理的一重要研究方向, 它在质子照相、医用短寿命放射性同位素的生产^[1]以及约束核聚变等

领域^[2]有着重要的潜在应用价值。超短超强激光入射到薄膜靶上,产生的超热电子向前传播通过薄膜靶,在薄膜靶中与超热电子直接形成超强的电荷分离场,薄膜靶背面的质子在电荷分离场内被加速,并沿薄膜靶法线方向出射,这就是靶后鞘层加速^[3](target normal sheath acceleration, TNSA)机制。

利用 TNSA 机制已开展了众多研究^[4-6],超短超强激光加速质子束能量可达几到几十 MeV,当前强场激光加速获得的最大质子能量超过 65 MeV,而加速梯度达 TeV/m 量级。但这些超短超强激光与薄膜靶相互作用产生质子束的研究均利用红外激光器,如波长为 1 064 nm 的钕玻璃激光器、800 nm 的掺钛蓝宝石激光器。利用红外波长的超短脉冲激光的主要原因是超热电子定标率 $I\lambda^2$ (I 为激光功率密度, λ 为激光波长) 在相同功率密度下,红外波长的超短脉冲激光可获得更高能量的超热电子用于电荷分离场的形成和维持。另外一重要原因是很难产生其他波长尤其是紫外波长的超短脉冲激光。

利用紫外超短脉冲激光开展质子加速的实验研究鲜有报道。本文将利用 248 nm 的紫外超短脉冲激光开展紫外超短脉冲激光与薄膜靶相互作用加速产生质子的实验研究。紫外超短脉冲激光与红外超短脉冲激光相比有两个优点:紫外超短脉冲激光具有很高的脉冲对比度;紫外超短脉冲激光具有很高的临界密度和能量吸收效率。

1 实验装置

实验在中国原子能科学研究所的 248 nm 紫外超短激光系统上进行。此紫外超短脉冲激光系统采用掺钛蓝宝石固体激光和 KrF 准分子气体激光混合模式,运行于波长为 744 nm 的掺钛蓝宝石固体激光器,输出光三倍频后,获得的 248 nm 紫外超短脉冲激光作为紫外超短脉冲激光的基频光,后进入放电泵浦的 KrF 准分子气体激光放大器 LLG50 放大输出。

此掺钛蓝宝石固体激光输出 744 nm、10 mJ、120 fs 的红外超短激光,衍射极限倍数约 1.5,对比度约 10^5 。三倍频后输出 248 nm、0.5 mJ、300 fs 紫外超短激光,此时获得的紫外超短脉冲激光种子光的对比度接近 10^{14} 。对比度提高

的主要原因是三倍频效率和功率密度的对应关系及倍频过程中的饱和效应和 GVD 展宽效应,注入 LLG50 激光放大器后获得 248 nm、50 mJ、500 fs 的紫外超短激光脉冲,放大输出的紫外超短激光衍射极限倍数为 3.3。

紫外超短脉冲激光经扩束和准直后,进入真空靶室利用紫外离轴抛物面镜聚焦,如图 1 所示。实际到靶能量为 30 mJ,聚焦功率密度为 1.2×10^{17} W/cm²。

紫外超短脉冲激光以 45° 入射到薄膜靶表面,在薄膜靶的法线方向利用 PIN 软 X 射线探测器探测软 X 射线强度以实现精确对焦,在靶背法线方向利用磁谱仪测量质子的能谱,记录设备采用固体径迹探测器 CR39。CR39 的探测阈值一般认为是 100 keV,但经标定发现对于垂直入射质子探测阈值可达 40 keV,故将 CR39 抛物线形放置(图 1)以保证质子垂直入射,避免入射角对探测阈值的影响,但在实际操作中由于放置误差的影响,实际探测阈值约为 50 keV。固体径迹探测器 CR39 放置于 70 °C、6.25 mol/L 的 NaOH 溶液中蚀刻 8 h,此后利用 TASL 固体径迹分析仪进行测量分析。

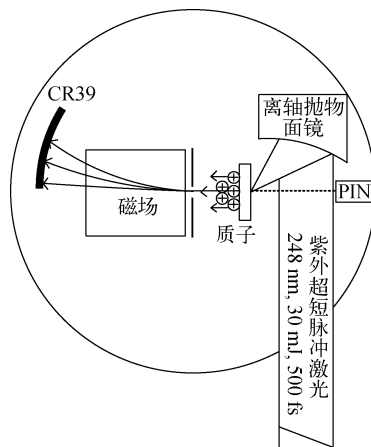


图 1 实验布局图

Fig. 1 Scheme of experimental setup

2 实验结果与分析

利用磁谱仪获得的质子能谱如图 2 所示。从图 2 可看出,质子最大能量超过 300 keV,在 50~300 keV 范围内符合波尔兹曼分布,其在对数坐标下基本为直线,质子温度 91 keV,但在 300~500 keV 范围内质子的分布发生变化,

其形成原因主要是中性粒子的干扰,由于实验采用的离子磁谱仪磁场强度降低,导致高能区域与中心区域间隔太近,而中心区域存在大量的中性粒子径迹,中性粒子径迹是高速飞行的中性碎片和原子团形成的径迹,中性粒子在通过小孔时碰撞小孔壁会产生散射,导致在中心区域附近存在中性粒子本底,从而影响了300 keV以上质子能谱的判读。

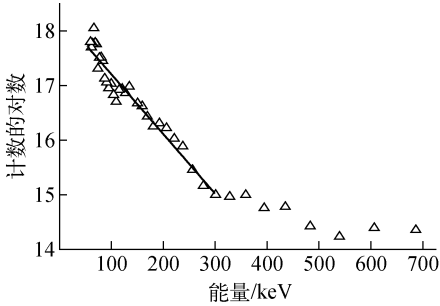


图2 质子能谱

Fig. 2 Energy spectrum of protons

根据 TNSA 机制,紫外超短脉冲激光与薄膜靶相互作用加速产生的超热电子穿过薄膜靶,与薄膜靶之间形成超强电荷分离。对于该机制,最为广泛的解析模型是 Mora^[7]的等离子体空间膨胀模型,质子加速的过程即等离子体膨胀的过程,此模型加速电子密度呈波尔兹曼分布,通过求解 Poisson 方程、连续性方程和运动方程,获得 TNSA 机制加速质子的最大能量为:

$$E_{\max} \approx 2k_B T_e [\ln(\tau + \sqrt{1 + \tau^2})]^2$$

$$\tau = \omega_{pi} t / \sqrt{2e}$$

$$\omega_{pi} = \sqrt{n_{eo} e^2 / m_e \epsilon_0}$$

其中: $k_B T_e$ 为超热电子的平均温度; t 为加速时间; ω_{pi} 为质子等离子体频率; ϵ_0 为真空电容率; e 为电子电量; n_{eo} 为电子密度。

从上式可看出,鞘层加速电场不仅与电子温度(电子温度 $k_B T_e \propto I \lambda^2$)有关,还与电子密度和加速时间有关。而紫外超短脉冲激光具有高对比度和临界密度的特点,在实验中易获得高密度梯度和高密度的等离子体,有利于提高鞘层电场强度。另外,紫外超短脉冲激光具有很高的激光吸收效率,有利于提高参与鞘层电场形成的超热电子的密度和数量,也进而提高

了鞘层加速电场的维持时间,而 KrF 紫外脉冲激光具有 500 fs 的脉冲宽度,可持续加热等离子体,产生超热电子,因此,较长脉冲的紫外脉冲激光与薄膜靶相互作用加速质子,可获得高电子密度和长加速时间。

3 小结

本文开展了较低功率密度的紫外超短脉冲激光与铜薄膜靶相互作用加速产生质子束的实验研究,实验测量了产生的质子能谱,最大截止能量超过 300 keV。并分析了紫外超短脉冲激光在质子加速过程中,虽超热电子温度较低,但由于其具有高对比度和高吸收效率,可获得更高的电子密度和更长的加速时间。

参考文献:

- [1] LEDINGHAM K W D, McKENNA P, McCANNY T, et al. High power laser production of short-lived isotopes for positron emission tomography[J]. J Phys D: Appl Phys, 2004, 37: 2 341-2 345.
- [2] MACKINNON A J, PATEL P K, BORGHESI M, et al. Proton radiography of a laser-driven implosions[J]. Phys Rev Lett, 2006, 97(4): 045001-16.
- [3] WILKS S C, LANGDON A B, COWAN T E, et al. Energetic proton generation in ultra-intense laser-solid interactions[J]. Physics of Plasmas, 2001, 8(2): 542-549.
- [4] SPENCER I, LEDINGHAM K W D, McKENNA P, et al. Experimental study of proton emission from 60 fs, 200 mJ high-repetition-rate tabletop-laser pulses interacting with solid targets [J]. Phys Rev E, 2003, 67(4): 046402-05.
- [5] MACKINNON A J, SENTOKU Y, PATEL P K, et al. Enhancement of proton acceleration by hot-electron recirculation in thin foils irradiated by ultraintense laser pulses[J]. Phys Rev Lett, 2002, 88(21): 215006-09.
- [6] BORGHESI M, MACKINNON A J, CAMPBELL D H, et al. Multi-MeV proton source investigations in ultraintense laser-foil interactions [J]. Phys Rev Lett, 2004, 92(5): 055003-06.
- [7] MORA P. Plasmas expansion into a vacuum[J]. Phys Rev Lett, 2003, 90(18): 185002-05.