

文章编号: 1001-4322(2006)11-1823-04

金锥对靶背向超热电子分布的影响*

熊 俊, 王 琛, 方智恒, 王瑞荣, 王世绩

(中国工程物理研究院 上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘 要: 采用 20 TW 啁啾脉冲放大的 ps 激光辐照金锥靶和平面靶, 对靶背向产生的超热电子角分布和能谱进行了实验研究。结果表明: 金锥对超热电子的产生具有重要的影响。与平面靶情况相比, 锥形靶背向产生的超热电子数量增加, 电子能量为 2.0~2.5 MeV 的超热电子数目有大幅度增长; 锥形靶背向超热电子的空间发散角大于平面靶, 这是由于啁啾脉冲放大激光所固有的较高脉冲前沿产生的预等离子体造成的影响。

关键词: 快点火; 金锥靶; 超热电子; 能谱; 角分布

中图分类号: O532.13 **文献标识码:** A

快点火是当前 ICF 研究的热点, 其点火过程涉及到相对论强度下激光与等离子体相互作用, 包含的物理现象非常复杂^[1]。其中一个关键问题是激光能量转换为超热电子并传输到靶心, 靶丸周围存在几百 mm 的冕区等离子体, 会使得入射激光分裂成丝或激发各种参量不稳定性^[2], 且激光在传输过程中有很大一部分能量被冕区吸收, 仅有一小部分转换为超热电子的能量。为了解决这一问题, 研究人员提出了许多方案^[3], 其中锥形靶可以使激光在非常接近压缩靶丸的地方沉积能量。K. A. Tanaka^[4]等发现锥形靶点火在演示实验中能够提高中子产额。模拟结果表明^[5], 激光脉冲被锥壁聚焦, 其强度在到达锥顶部时提高了数十倍。Z. L. Chen^[6]等在实验中发现锥形靶能产生高定向性的超热电子, 其数目要远高于平面靶。国内对锥形靶的研究主要集中在理论模拟方面^[7], 较少涉及实验。本文采用 20 TW 的 ps 激光分别辐照锥形靶和平面靶, 测量了两靶背向超热电子总量的角分布和能谱, 将实验结果进行对比, 考察了金锥对靶背向超热电子分布的影响。

1 实验介绍

实验在高功率激光物理国家实验室的“二路”ps 激光装置 (SPS) 上进行。实验布局如图 1 所示, 激光器采用啁啾脉冲放大技术, 输出光束波长为 $1.053 \mu\text{m}$, 脉宽约 1 ps, 能量约 10 J, 光束直径约 $\phi 90 \text{ mm}$ 。激光经反射镜 M_1, M_2 引入靶室后, 再经离轴抛物面镜 M_3 聚焦到靶面上, 焦斑约为 $\phi 30 \mu\text{m}$, 靶面功率密度约为 $1.5 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 。用两路相独立的平行光管 C_1, C_2 监测靶位, 保证靶有足够的复位精度。实验采用的金锥靶如图 2 所示, 锥体长 1 mm, 半锥角为 30° , 锥壁的厚度约 $20 \mu\text{m}$, 锥顶直径 $\phi 30 \mu\text{m}$, 锥顶为 $3 \mu\text{m}$ 的金箔。平面靶的金箔厚度也为 $3 \mu\text{m}$ 。在靶后放置电子角分布仪 S_2 以测量超热电子的角分布。测量时, 调节使角分布仪的球心与靶点重合。电子角分布仪是直径为 $\phi 110 \text{ mm}$ 的半球, 其内壁上均匀排布作为记录元件的热释光剂量片 (TLD)。

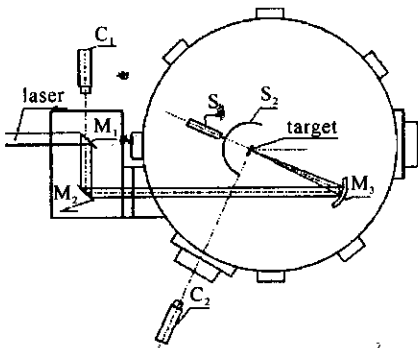


Fig. 1 Schematic of experimental setup
图 1 实验布局图

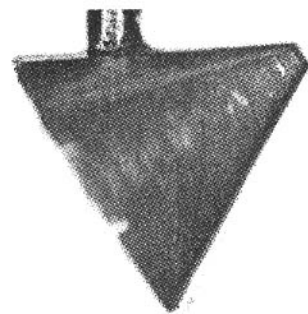


Fig. 2 30° cone-target
图 2 30° 金锥靶实物图

* 收稿日期: 2006-04-24; 修订日期: 2006-09-23

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 熊俊 (1981—), 男, 硕士研究生, 主要从事快点火基础物理的研究; bearbaby_x@hotmail.com。

TLD 的尺寸为 $\phi 4.5 \text{ mm}$, 任意两片 TLD 之间的角间距是 6° 。为避免高能离子的干扰^[8], 在 TLD 前放置 $50 \mu\text{m}$ 的铝膜作为滤片, 经过估算, $50 \mu\text{m}$ 铝膜可以阻挡 80 keV 以下的低能电子以及在实验中产生的高能质子。根据同类实验和理论模拟的结论^[9], X 射线在 TLD 中产生的剂量与电子产生的剂量相比很小, 可以忽略。采用磁场强度为 0.2 T 的电子磁谱仪 S_1 测量电子的能谱, 测量范围为 $0.1 \sim 5.0 \text{ MeV}$, 放置在靶后, 对准激光传播方向。入射孔 ($\phi 2 \text{ mm}$) 距靶点 55 mm , 接收立体角为 $1.1 \times 10^{-3} \text{ sr}$ 。

2 实验结果

图 3 为激光分别辐照 30° 锥形靶和平面靶时靶背向的电子能谱, 其中电子数目已归一化。从图 3 可以看出, 目标靶为锥形靶时, 电子能谱变宽, 尤其是在电子能量为 $2.0 \sim 2.5 \text{ MeV}$ 时谱线明显高于平面靶的电子能谱曲线, 也就是说能量高的电子所占份额增加, 这与文献^[6]结论一致。

图 4 为相同实验条件下的 30° 锥形靶和平面靶的单发次靶背向电子角分布, 图 5 为电子在激光偏振面上的角分布 (图 4 中的水平黑线位置)。对图 5 的结果进行高斯拟合, 取半高宽为电子发散角, 得到 30° 锥形靶的发散角约为 54° , 平面靶的发散角约为 38° 。根据拟合结果近似推导出两种靶的电子束能流差异, 锥形靶发散角 $\theta_1 \approx 0.3\pi$ (FWHM), 单片 TLD 读数的峰值 $I_1 = 500 \text{ mGy}$, 总剂量 $E_1 \approx I_1 \theta_1^2 = 45\pi^2 \text{ mGy}$; 平面薄膜靶发散角 $\theta_2 \approx 0.2\pi$, 单片 TLD 的峰值 $I_2 = 65 \text{ mGy}$, 总剂量 $E_2 \approx I_2 \theta_2^2 = 2.6\pi^2 \text{ mGy}$, 得到 30° 锥形靶的前向超热电子数目约是平面靶的 17 倍。

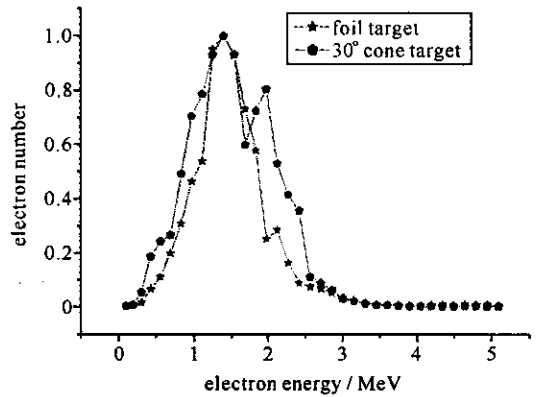


Fig. 3 Energy distribution of forward hot electrons

图 3 靶背向电子能谱

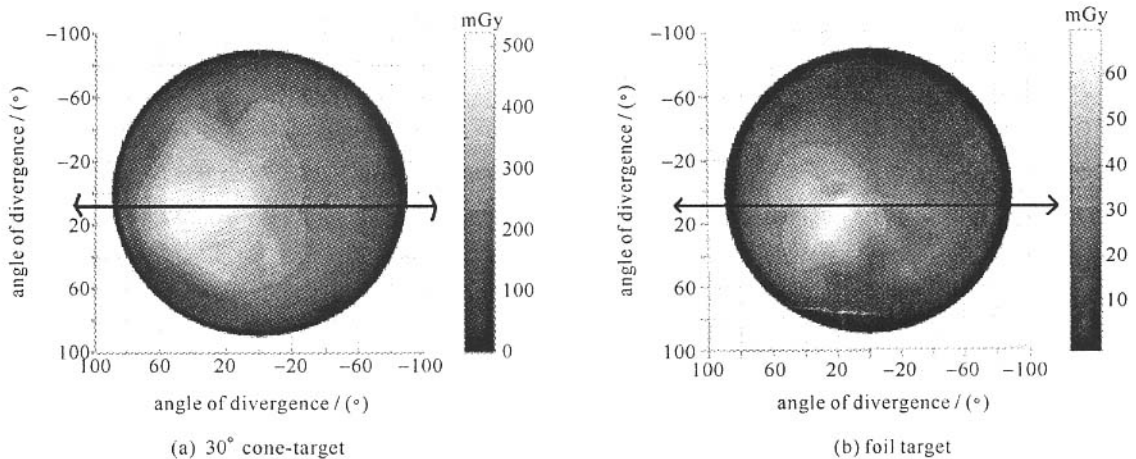


Fig. 4 Spatial distribution of forward hot electrons

图 4 靶背向电子的角分布

综上所述, 与平面靶相比, 30° 锥形靶大大提高了靶背向的超热电子产额, 尤其是能量为 2 MeV 以上高能电子的数目。但是 30° 锥形靶的靶背向电子的定向性变差, 电子发散角大于平面靶, 这与文献^[6, 10]结果不一致。

3 分析讨论

实验得到 30° 锥形靶的电子发散角大于平面靶, 是入射激光脉冲前沿噪声产生的预等离子体造成的。采用啁啾脉冲放大技术的短脉冲激光, 前沿有很强的噪声。实验使用的激光在主脉冲前 100 ps , 前沿噪声强度约为主脉冲强度的 0.1% , 会形成密度标长较大的预等离子体。采用非平衡辐射流体力学 2 维程序对脉冲前沿噪声产生的预等离子体进行模拟, 图 6 为平面靶和 30° 金锥靶在主脉冲前 1 ps 时刻的等离子体电子密度分布。由图 6 可以看出, 平面靶和 30° 锥形靶的等离子体密度分布具有显著的差别, 平面靶的等离子体临界面分布较为平坦, 临界面基本平行于靶面; 30° 锥形靶的临界面呈三角状。

电子抖动归一化动量

$$a = \frac{eE_0}{m_e \omega_0 c} = 8.53 \times 10^{-10} (I \lambda^2)^{1/2} \quad (1)$$

式中： $E_0 = \sqrt{2I/\epsilon_0 c}$ 是激光电场振幅， I 为激光强度， ϵ_0 为真空介电常数； e 为电子电量； m_e 为电子静止质量； $\omega_0 = 2\pi c/\lambda$ 为激光圆频率。

将实验条件 $I = 1.5 \times 10^{18} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ， $\lambda = 1.053 \mu\text{m}$ 代入式(1)得： $a = 1.1 > 1$ 。这说明相对论效应显著，相对论 $J \times B$ 加热^[11] 机制占主导地位，它沿激光传播方向加速电子，超热电子传播的方向与等离子体密度分布无关。

真空加热^[12] 和共振吸收^[13] 均沿密度梯度方向加速电子，超热电子的传播方向依赖临界面的分布。两者的

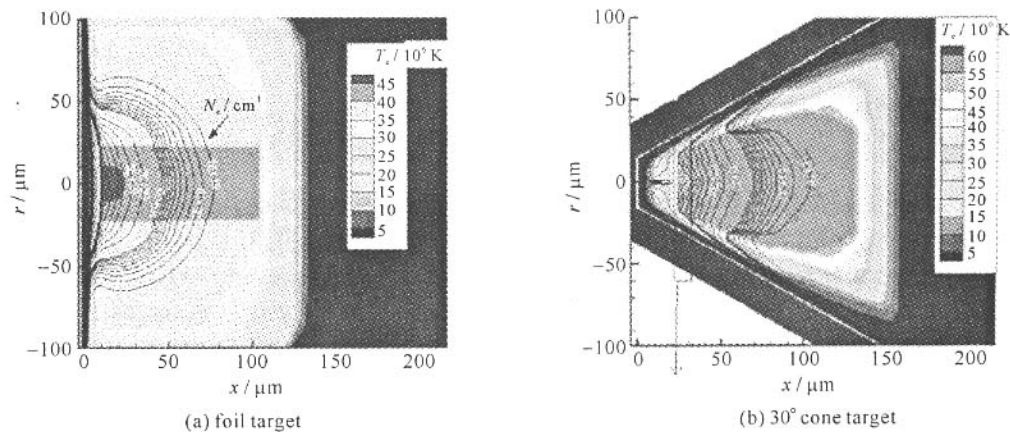


Fig. 6 Analog result

图 6 等离子体密度分布模拟结果

差别在于等离子体密度标长 L 与电子抖动振幅 X_{osc} 之间的关系不同，真空加热要求 $L \approx X_{osc}$ ，共振吸收要求 $L \gg X_{osc}$ 。本实验预等离子体的密度标长 L 为 $(3 \sim 4)\lambda$ ，电子抖动振幅值为

$$X_{osc} = eE_0/m_e \omega_0^2 \approx (0.1 \sim 0.2)\lambda \quad (2)$$

因此， $L \gg X_{osc}$ ，理论上可以确定共振吸收的影响远大于真空加热。平面靶的等离子体临界面与靶面平行，因此共振吸收机制产生的电子的传播方向垂直于靶面，而 30° 锥形靶的等离子体临界面形状呈三角状，共振吸收产生的超热电子可能沿两个方向传播(见图 7)，形成一个夹角。计算可得 30° 锥形靶共振吸收引起的电子发散角约为 56° ，而实验测得电子发散角约 54° ，两者较为吻合。

实验结果与文献[6]不同的原因是实验条件不同。文献[6]实验采用的激光对比度很高，约为 $1 : 10^{-8}$ ，在此条件下，主脉冲到达之前，不会产生较大密度标长的预等离子体。而本实验中由于采用的驱动激光对比度较低，约 $1 : 10^{-3}$ ，产生了密度标长较大的预等离子体，改变了锥形靶的等离子体临界面分布，从而导致锥形靶实验获得的超热电子发散角大于平面靶。因此采用普通的 CPA 技术产生的超短超强激光(对比度约为 $1 : 10^{-3}$)作为驱动源是不合适的，必须大大提高驱动激光的对比度。光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术的发展，为获得高功率超短超强脉冲输出提供了新的途径。与 CPA 相比，OPCPA 具有极高的输出光束质量，其理论信噪比可以达到 10^9 ，因此采用 OPCPA 技术产生的超短超强激光作为驱动源，或许是一种较好的选择。

4 结 论

本文采用 20 TW 啁啾脉冲放大的 ps 激光辐照 30° 金锥靶和平面靶，对靶背向产生的超热电子角分布和能

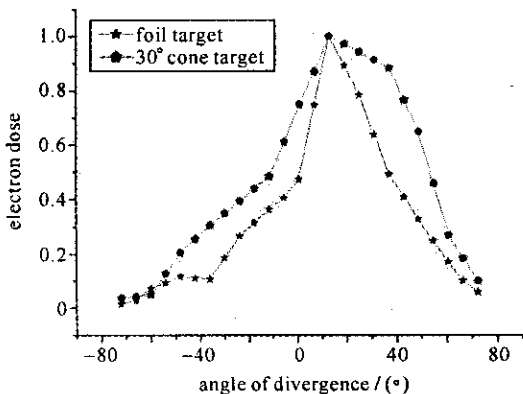


Fig. 5 Angular distribution in laser polarization plane

图 5 激光偏振面上的角分布

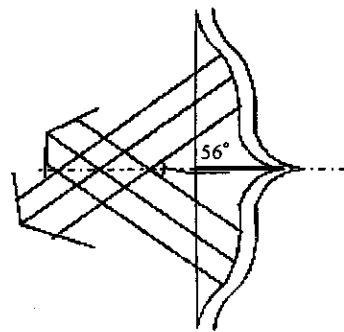


Fig. 7 Resonant absorption accelerated electron at the 30° cone target's critical surface

图 7 30° 锥形靶临界密度面共振吸收加速电子

谱进行了实验研究。实验发现,锥形靶的靶背向产生的超热电子是平面靶的 10 倍左右,且能量范围 2.0~2.5 MeV 的电子所占份额增大,这说明金锥靶对超热电子的产生具有重要的影响。目标靶为锥形靶时,靶背向超热电子的空间发散角约为 54° ,而平面靶为 38° ,锥形靶的发散角大于平面靶,与相关文献结果不同,原因是脉冲前沿噪声形成了密度标长较大的预等离子体,改变了锥形靶内的等离子体临界面分布,使得共振吸收加速电子的方向发生改变,从而导致了超热电子的发散角增大。要用锥形靶来获得定向性好的超热电子,必须将点火脉冲的强度对比度提高到 $1:10^{-7}$ 以上,不能采用一般的 CPA 技术产生的激光作为驱动源,而采用 OPCPA 技术可能是一种较好的选择。

致 谢 感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心、SPS 器件运行组和北京应用物理与计算数学研究所郑无敌先生的大力协助!

参考文献:

- [1] Tabak M, Hammer J, Glinsky M E, et al. Ignition and high gain with ultra powerful laser[J]. *Phys Plasmas*, 1994, **1**(5):1626-1634.
- [2] Sentoku Y, Esirkepov T Z, Mima K, et al. Bursts of superreflected laser light from inhomogeneous plasmas due to the generation of relativistic solitary waves[J]. *Phys Rev Lett*, 1999, **83**(17):3434.
- [3] Kodama R, Mima K, Tanaka K A, et al. Fast ignitor research at the institute of laser engineering, Osaka University[J]. *Phys Plasmas*, 2001, **8**(5):2268-2274.
- [4] Tanaka K A, Kodama R, Mima K, et al. Basic and integrated studies for fast ignition[J]. *Phys Plasmas*, 2003, **10**(5):1925.
- [5] Sentoku Y, Mima K, Ruhl H, et al. Laser light and hot electron micro focusing using a conical target[J]. *Phys Plasmas*, 2004, **11**(6):3083.
- [6] Chen Z L, Kodama R, Nakatsutsumi M, et al. Enhancement of energetic electrons and protons by cone guiding of laser light[J]. *Phys Rev E*, 2005, **71**:036403.
- [7] 刘占军,郑春阳,曹莉华,等.次稠密等离子体对激光与锥形靶相互作用的影响[J].物理学报,2006,**55**(1):304-309.(Liu Z J, Zheng C Y, Cao L H, et al. Influence of under-dense plasma on laser conical target interaction. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(1):304-309)
- [8] Maksimchuk A, Gu S, Flippo K, et al. Forward ion acceleration in thin films driven by a high-intensity laser[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **84**(18):4108.
- [9] Li Y T, Zhang J, Sheng Z M, et al. High-energy electrons produced in subpicosecond laser-plasma interactions from subrelativistic laser intensities to relativistic intensities[J]. *Phys Rev E*, 2004, **69**:036405.
- [10] Sentoku Y, Mima K, Ruhl H, et al. Laser light and hot electron micro focusing using a conical target[J]. *Phys Plasmas*, 2004, **11**(6):3083.
- [11] Liu S B, Zhang J, Yu W. Acceleration and double-peak spectrum of hot electrons in relativistic laser plasmas[J]. *Phys Rev E*, 1999, **60**(3):3279.
- [12] Brunel F. Anomalous absorption of high intensity subpicosecond laser pulses[J]. *Phys Fluids*, 1988, **31**(9):2714.
- [13] Tajima T, Dawson J M. Laser electron accelerator based on laser-plasma[J]. *Phys Rev Lett*, 1979, **43**:267.

Influence of Au cone on distribution of forward hot electrons

XIONG Jun, WANG Chen, FANG Zhi-heng, WANG Rui-rong, WANG Shi-ji
(Shanghai Institute of Laser Plasma, CAEP, P. O. Box 800-229, Shanghai 201800, China)

Abstract: The 30° Au conical target and Au foil target were irradiated by 20 TW ps P-polarized laser plasma, the characteristics of the forward produced hot electrons were studied. The hot electron number of the cone target was larger than that of the foil target, especially within the range of 2.0~2.5 MeV. The divergence of the forward hot electrons of the cone target was larger than that of the plane one, which was caused by different electron density of the pre-plasma with dissimilar target geometry produced by the driving laser.

Key words: Fast ignition; Au conical target; Hot electron; Energy spectra; Angular distribution