

电子磁谱仪法测量超热电子温度

李业军, 单玉生, 张 骥, 张海峰, 王雷剑, 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: 利用超热电子磁谱仪测量了紫外超短脉冲激光与固体等离子体相互作用产生超热电子的能谱, 在无预脉冲、激光强度为 10^{17} W/cm² 条件下, 紫外超短脉冲激光与固体 (Cu) 等离子体相互作用产生超热电子的能谱呈双温麦克斯韦分布, 超热电子温度为 81 keV, 激光吸收的主导机制为真空吸收。

关键词: 超热电子; 磁谱仪; 超短脉冲激光; 固体等离子体

中图分类号: TL65 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2005)02-0106-04

Measurement of Hot Electron Temperature by Using Electron Magnetic Spectrometer

LI Ye-jun, SHAN Yu-sheng, ZHANG Ji, ZHANG Hai-feng,
WANG Lei-jian, TANG Xiu-zhang

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

Abstract: The hot electron spectrum was measured by using electron magnetic spectrometer during the interaction of ultrashort UV laser and solid plasmas. Under the condition of prepulse-free and intensity of 10^{17} W/cm², the electron spectrum with two temperature Maxwellian distribution was obtained and the temperature of hot electron was 81 keV. The dominant absorption mechanism of laser is vacuum absorption.

Key words: hot electron; magnetic spectrometer; ultrashort laser pulse; solid plasmas

随着啁啾脉冲放大(CPA)技术的发展,出现了能够在靶面产生更高功率密度的超短、超强激光,在激光惯性约束聚变研究中,人们提出一种全新的点火方式——快点火^[1](fast ignition),它是将靶丸压缩与点火过程分开,即利用长脉冲、中等强度的激光对靶丸进行压缩,用1束超短超强的激光进行打洞,再用1束更强超短脉冲激光点火,实现核聚变;近来又有新

的点火方式被提出——冕区点火(coronal ignition)、不需打洞的快点火^[2]。它们的物理过程都是将激光能量转变为超热电子的能量,然后再由超热电子将能量转移给核燃料,实现点火。因此,超热电子产生的物理机制以及对产生的实验条件的研究越来越为人们所关注。超短强激光脉冲与等离子体相互作用存在多种吸收机制,在较低激光功率密度 $I < 10^{15}$ W/cm²

收稿日期:2004-06-03;修回日期:2004-09-28

基金项目:国家高技术研究发展计划专项经费资助项目

作者简介:李业军(1969—),男,江苏淮阴人,高级工程师,等离子体物理专业

情况下,为经典碰撞吸收;在中等强度 $I > 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 时,主要为非碰撞吸收(非线性吸收);当 $I > 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 时,即进入强场物理领域,又会产生新的吸收机制。不同吸收机制所产生的超热电子温度定标率是不同的,因此,通过研究超热电子温度就可了解在一定实验条件下何种吸收机制占主导地位,从而对激光等离子体作用机理有深刻理解,进而对快点火研究提供实验基础。

电子能谱的测量方法有多种,如层靶的 K 线法^[3]、高能离子法^[4]、硬 X 射线法^[5],但它们都是间接的测量方法。电子磁谱仪法是最直接的测量方法,Bastiani^[6]测量了非相对论条件下超热电子的能谱,得出超热电子的温度与等离子体密度标长密切相关的结论。本工作利用电子磁谱仪测量超短紫外(248 nm)激光与固体靶等离子体相互作用产生的超热电子能谱。

1 电子磁谱仪

电子磁谱仪利用了带电粒子在匀强磁场中由于受到 Lorentz 力的作用而作匀速圆周运动,同时考虑了重力漂移及磁场的梯度漂移和曲率漂移的影响;探测器选择 0.38 mm 厚的 LiF (Mg、Cu、P) 热释光探测器,它具有对日光不灵敏且相对容易分析、在很宽的能量范围内为平响应且吸收剂量可累积的特点,便于对脉冲弱信号的测量;谱仪的磁场为 0.042 T,测量能区为 10~400 keV;利用¹³⁷Cs 标准源对探测器的参数进行了测量,并利用⁹⁰Sr 源对谱仪进行校核,满足对超热电子能谱测量的要求。

2 实验方案

在中国原子能科学研究院准分子激光实验室超短激光器上进行用磁谱仪测量超热电子能谱的实验。紫外超短激光器系统由 3 部分组成:红外超短脉冲激光器、三倍频器和 KrF 放电泵浦激光放大器(LL G50)。Ti:Sapphire 激光器产生的红外超短脉冲激光(744 nm/120 fs/10 mJ)经三倍频器后产生紫外超短脉冲激光(248 nm/280 fs/1 mJ),再经 KrF 放电泵浦激光放大器输出紫外超短脉冲激光(248 nm/440 fs/60 mJ/10 Hz)。聚焦系统采用口径为 90 mm、焦距为 400 mm 的平凸透镜,焦斑大小为 10 μm ,靶面功率密度为 10^{17} W/cm^2 。真空系统采用机械泵和分子泵抽真空,真空度可达 10^{-4} Pa 。靶传动系统为三维转动和一维平动,通过步进电机进行控制,移动精度为 10 μm 。实验时,靶在竖直平面内转动,以保证每次激光与靶相互作用均为新的靶面。靶为 5 mm 厚的铜片。

实验安排示于图 1。无预脉冲激光以水平方向入射进入靶室并与竖直靶面成 45° 聚焦到靶面上,激光偏振方向为水平方向,所以,入射激光为 P 极化光。5 mm 厚的铜靶片的表面光洁度为 $\lambda/10$ 。实验时的真空度保持在 10^{-3} Pa 以上。采用 PIN 探测器对激光聚焦进行监测。磁谱仪的入口位于靶面法线方向上,谱仪开口为 $\phi 4 \text{ mm}$,对焦斑的立体角为 1.2×10^{-3} 。谱仪探测器采用 3.2 mm \times 3.2 mm \times 0.38 mm 的 LiF 热释光探测器(TLD),它具有对日光不灵敏、在比较宽的能区(0.1~1.0 MeV)内为平

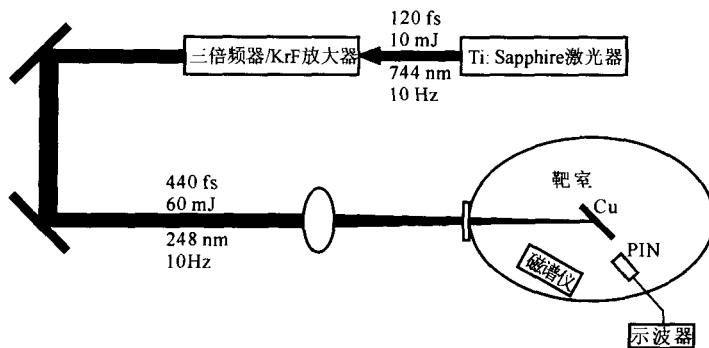


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of experimental set

响应等特点,有关文献^[7,8]已采用 LiF TLD 测量了电子的温度。实验前已对探测器 LiF TLD 进行了参数测量以及有效质量阻止本领的计算,并使用⁹⁰Sr 源对谱仪进行了标定。

3 实验结果

图 2 为磁谱仪在靶法线方向测量得到的超热电子能谱,谱仪的磁场为 0.042 T,测量能区为 25 ~ 350 keV。靶上激光功率密度 $I = 1.3 \times 10^{17}$ W/cm² ($E = 60$ mJ、焦斑 10 μ m、脉宽 440 fs),激光入射方向与靶面成 45°,累积 12 000 炮。采用最小二乘法拟合了超热电子能谱。超热电子能谱呈现双温 Maxwellian ($\exp(-E/T_h)$) 结构,得到特征超热电子温度为 81 keV。

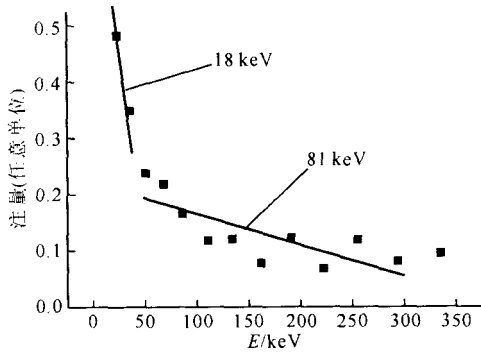


图 2 靶法线方向测量的超热电子能谱

Fig. 2 Hot electron spectrum at normal of target

4 讨论

中等强度 $10^{15} \sim 10^{17}$ W/cm² 紫外激光与固体靶相互作用的吸收机制,主要为碰撞吸收和共振吸收以及真空吸收。碰撞吸收不会产生超热电子,共振吸收或真空吸收可能是产生超热电子的主要原因。在一定实验条件下,何种吸收机制占主导地位与激光的参数有关,等离子体的许多性质都受激光场的制约而不受它本身一些参数控制^[6]。在本实验条件下,在无种子光注入时,测得 $I_{ASE} = 3$ mJ,脉冲宽度为 30 ns,焦斑大小为 2 mm,则焦斑功率密度小于 10^7 W/cm²,不能形成预等离子体,因此,可不考虑放电 KrF 准分子激光放大器 ASE 的影响。注入三倍频的红外激光的对比度为 $1 \cdot 10^{-6}$,经三倍频后对比度约为 $1 \cdot 10^{-18}$,虽

经电子束放大后对比度会减小,但它仍会约为 $1 \cdot 10^{-10}$,因此,不会产生预脉冲。等离子体密度梯度长度 $L = n / (\partial n / \partial x)$,其中, n 为等离子体密度,对超热电子产生的机制具有决定性的影响。共振吸收要求等离子体标度长度 $L/$ 不能太大,也不能太小,太小没有足够的距离形成共振,太大则使反射面到临界面的距离太大,渗透到临界面的场太低,共振吸收降低。共振吸收定标率为:

$$T_h(\text{keV}) = 6 \times 10^{-5} (I^2)^{\frac{1}{3}}$$

其中: I 为入射激光功率密度,单位为 W/cm²; λ 为激光波长,单位为 μ m。

在本实验条件下,超热电子温度应为 11 keV,而测量得到的超热电子温度为 81 keV,因此,共振吸收不能解释本实验的结果。粒子模拟 (PIC) 表明^[9],对中等强度激光 $10^{14} \sim 10^{18}$ W/cm²,当 $L/ < 0.1$ 时,真空吸收将超过共振吸收,的本质是电子被 P 极化激光场沿等离子体密度梯度方向的分量直接加热,不需大尺寸欠密等离子体存在。真空吸收定标率 $T_h \propto I^2$,采用 PIC 给出的真空吸收定标率为 $T_h = (I^2)^{\frac{1}{3} - \frac{1}{2}}$ 。可见,真空吸收产生超热电子的温度比共振吸收的高得多。在 10^{17} W/cm² 激光功率密度下,从光谱频移^[10]的实验来看,光谱几乎不发生变化,这就说明有质动力的影响不能忽略。在激光脉冲期间,等离子体以离子声速向真空膨胀,同时由于有质动力 ($\mathbf{v} \times \mathbf{B}$) 的光压抑制等离子体向真空膨胀,有可能使等离子体标度长度 $L/ < 0.1$,从而使得真空吸收成为本实验中超热电子产生的主导机制。欲详细解释吸收机制还需进行粒子模拟。

5 结论

在无预脉冲、激光强度为 10^{17} W/cm² 的条件下,紫外 (248 nm) 超短 (440 fs) 脉冲激光与固体 (Cu) 等离子体相互作用产生超热电子温度为 81 keV,激光吸收的主导机制为真空吸收,这是由于有质动力的作用抑制了等离子体的热膨胀,减小了等离子体的标度长度,使得真空吸收成为主导机制。当然,不排除共振吸收也起了一定的作用,因为有质动力的压缩可能不均匀,在某一方向会存在大的尺寸,在这一方

向上共振吸收有可能起主导作用。进一步详细了解产生机制,还应进行流体力学与粒子模拟(PIC)验证。

参考文献:

- [1] Tabak M, Hammer J, Glinsky M, et al. Ignition and High Gain With Ultrapowerful Lasers[J]. Phys Plasmas, 1994, 1(5):1 626 ~ 1 634.
- [2] Hain S, Mulser P. Fast Ignition Without Hole Boring[J]. Phys Rev Lett, 2001, 86(6):1 015 ~ 1 018.
- [3] Hares JD, Kilkenmy JD, Key MH, et al. Measurement of Fast-electron Energy Spectra and Preheating in Laser-irradiated Targets[J]. Phys Rev Lett, 1979, 42(18):1 216 ~ 1 219.
- [4] Bell AR, Beg FN, Chang Z, et al. Observation of Plasma Confinement in Picosecond Laser Plasma Interaction[J]. Phys Rev E, 1993, 48(3):2 087 ~ 2 093.
- [5] Tao Yezheng, Li Yejun, Shan Yusheng, et al. Generation of Hot Electron With Higher Temperature From Femtosecond Laser-solid Plasma [J]. Chinese Physics Letter, 2002, 19(7):956 ~ 958.
- [6] Bastiani S, Rouse A, Geindre JP, et al. Experimental Study of the Interaction of Subpicosecond Laser Pulses With Solid Targets of Varying Initial Scale Lengths[J]. Phys Rev E, 1997, 56(6):7 179 ~ 7 185.
- [7] 蔡达锋,谷渝秋,郑志坚,等. 飞秒激光与等离子体相互作用过程中超热电子能谱的测量[J]. 强激光与粒子束,2003,15(6):575 ~ 579.
- [8] Chen LM, Zhang J, Dong QL, et al. Hot Electron Generation Via Vacuum Heating Process in Femtosecond Laser-solid Interactions [J]. Phys Plasmas, 2001, 8(6):2 925 ~ 2 929.
- [9] Gibbon P, Bell AR. Collisionless Absorption in Sharp-edged Plasmas[J]. Phys Rev Lett, 1992, 68(10):1 535 ~ 1 538.
- [10] 陶业争,李业军,单玉生,等. 有质动力对超短脉冲激光与固体等离子体相互作用的影响[J]. 强激光与粒子束,2002,14(5):720 ~ 722.