

文章编号: 1007-4627(2005)02-0200-04

## 超热电子的产生与输运背向辐射的测量\*

王光昶<sup>1,2</sup>, 郑志坚<sup>2</sup>, 杨向东<sup>1, #</sup>, 谷渝秋<sup>2</sup>, 吴云波<sup>3</sup>

(1 四川大学原子分子物理研究所, 四川 成都 610065;

2 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

3 四川大学计算机学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**报道了在 20 TW fs 激光器上采用电子磁谱仪和光学 CCD 积分成像相机分别对激光-固体靶相互作用在靶背方向产生的超热电子能谱及其光学渡越辐射进行的测量。能谱测量结果显示:超热电子能谱呈双温类-麦克斯韦分布, 拟合的温度分别为 90 和 280 keV, 平均温度为 185 keV, 这与已知的温度定标率较好地吻合。光学渡越辐射测量结果显示:光学渡越辐射是由于超热电子输运穿越固体靶所致, 而辐射区域呈圆盘状、有发散角、有光强分布。如果考虑超热电子的产生和加热机制, 则占主导地位的加热机制是共振吸收对电子的加热。

**关键词:** fs 激光; 固体靶; 超热电子; 能谱; 光学渡越辐射

**中图分类号:** O536 **文献标识码:** A

### 1 引言

众所周知, 研究超热电子在固体密度等离子体中传播具有显著的潜在应用, 因为它关系到包括惯性约束聚变(ICF)基础上的“快点火”方案以及固态物质中超热电子的产生和输运<sup>[1-3]</sup>。“快点火”概念又是建立在超短超强激光束与稠密等离子体相互作用而产生的相对论电子基础上<sup>[4]</sup>, 超热电子在临界物质中输运, 最终将它们的能量沉积在装有核燃料的区域而达到加热点火。理解超热电子的产生机制及研究它输运穿越固体靶背向辐射, 对于“快点火”方案的成功是至关重要的。

超短超强激光脉冲与固体靶相互作用在临界密度  $n_c$  附近产生的电子束的能量可达几十 MeV, 超热电子可达到  $10^{13}$  量级, 温度为几百 keV—2 MeV<sup>[5]</sup>, 超热电子在固体靶内输运穿越固体靶在靶背引起明显不同程度的辐射。我们就是要在靶背方向通过对辐射信号的诊断, 来刻画超热电子输运穿越固态物质而引起的能量分布, 以及由此而引起的自发光, 即光学渡越辐射。

### 2 实验设置

实验是在中国工程物理研究院(CAEP)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 20 TW 掺钛蓝宝石激光器上进行。该激光器采用标准啁啾脉冲放大技术(CPA), 其技术指标为: 激光能量 600 mJ(压缩前), 波长 800 nm, 脉冲宽度 60 fs, 重复频率 10 Hz, 光束直径 70 mm, 激光能量波动在 2% 以内。采用自相关技术测得激光脉冲对比度约为  $1:10^{-6}$  (在主脉冲到达前 2 ns)。靶室的真空度为  $1.6 \times 10^{-2}$  Pa。

实验布局如图 1。采用 f/5 离轴抛物面镜将能量为 270 mJ(靶面), 光束直径为 70 mm 的激光聚焦在厚度为 20  $\mu$ m 铜靶上。激光垂直靶法线方向入射, P 偏振。靶架由一个五维步进电机控制, 确保每发激光能够打在靶面的不同位置上。抛物面镜架由另一个三维步进电机控制, 用于调节激光的聚焦。

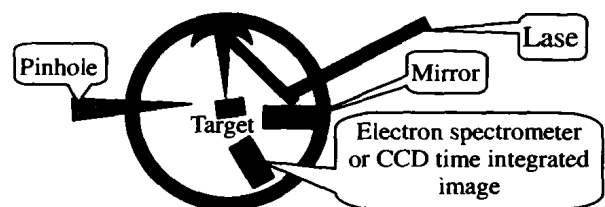


图 1 实验布局简图

收稿日期: 2004-09-15; 修改日期: 2004-10-25

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10275056, 10275055)

作者简介: 王光昶(1969-), 男(汉族), 黑龙江兰西人, 博士生, 讲师, 从事超短超强激光与等离子体相互作用研究。

# 联系人: 杨向东, E-mail: xdyang@scu.edu.cn

靶室外设置一台长焦距显微镜, 用于监测激光聚焦状态。

采用针孔配合 X 射线的时间积分成像 (CCD) 相机测量激光焦斑, 典型的测量结果如图 2 所示。所测焦斑直径约为  $31.8 \mu\text{m}$  (FWHM), 这样给出靶面激光峰值功率密度约为  $5.8 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ 。

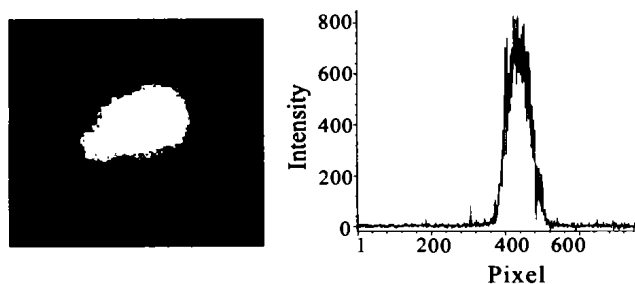


图 2 针孔相机测量的激光焦斑

在靶背方向先后放置电子磁谱仪和 CCD 相机, 分别用于测量超热电子能谱和光学渡越辐射 (OTR)。电子磁谱仪的磁感应强度为  $0.06 \text{ T}$ , 对应的量程约为  $70\text{--}1250 \text{ keV}$ 。用高斯计测量谱仪的磁场均匀性好于  $2\%$ 。电子谱仪的探头采用 LiF (Mg, Cu, P) 热释光探测器 (TLD) 进行探测, 其规格为  $3.2 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm} \times 0.38 \text{ mm}$ , 这样能量分辨率可达到  $2\%$ 。为了提高测量精度, 对 LiF TLD 进行了逐片刻度<sup>[6]</sup>。为了减小电子的散射, 在谱仪准直孔前未加滤片过滤。电子磁谱仪收集立体角约为  $1.55 \times 10^{-3} \text{ sr}$ 。

### 3 实验结果

实验结果是在激光能量为  $270 \text{ mJ}$  (靶面)、脉宽为  $60 \text{ fs}$ 、波长为  $800 \text{ nm}$  和对比度  $1:10^{-6}$  的条件下, 激光垂直靶法线方向入射, P 偏振, 靶面激光峰值功率密度约为  $5.8 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ , 无预脉冲, 靶为  $20 \mu\text{m}$  铜靶, 电子磁谱仪和 CCD 相机分先后两次放置靶背方向, 且各自是在连续打靶和单发打靶条件下获得的 (其它条件完全一致)。

图 3 给出了靶背方向所测超热电子能谱 (连续打靶条件下)。该能谱为双温类-麦克斯韦分布, 在大约  $150 \text{ keV}$  处, 超热电子注量达到  $6.8 \times 10^7 \text{ electrons}/(\text{keV} \cdot \text{cm}^2)$  的峰值; 然后, 随着能量的增加, 超热电子注量逐渐减少, 在约  $1100 \text{ keV}$  处, 超热电子注量仍达  $4.5 \times 10^4 \text{ electrons}/(\text{keV} \cdot$

$\text{cm}^2)$ , 大于本底信号 (本底信号的注量最多不超过  $10^4 \text{ electrons}/(\text{keV} \cdot \text{cm}^2)$ ), 故可以忽略本底信号。而在约  $700 \text{ keV}$  处, 则是两种温度的分界处。根据超热电子麦克斯韦分布函数  $f \propto e^{-m v^2/2kT}$ , 利用数学计算程序 ORIGIN 对电子磁谱仪探测器测量的数据进行处理, 对实验曲线进行线性拟合, 结果得出的温度分别为  $90$  和  $280 \text{ keV}$ 。

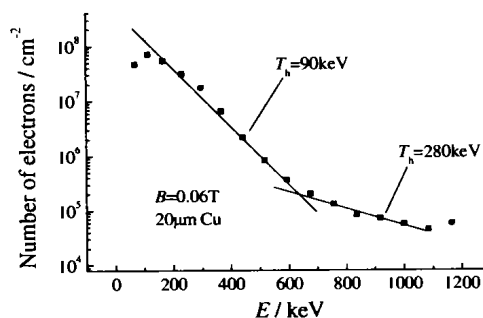


图 3 靶背方向超热电子能谱

图 4 为靶背方向所测超热电子运输穿越固体靶而引起的 OTR 图 (单发打靶条件下)。该图是用光学 CCD 相机在光学波段 (含一倍频光  $1\omega$  和二倍频光  $2\omega$ ) 所测结果。该结果显示, OTR 图呈圆盘型, CCD 相机所成的像的放大倍数为  $10$ , 那么 OTR 区域仍具有一定的范围 (圆盘半径  $R$  是可测的), 表明光辐射存在发散角; 而强度分布大致呈高斯形式, 一倍频光  $1\omega$  和二倍频光  $2\omega$  (对应  $400$  和  $800 \text{ nm}$  波长) 对 OTR 都有贡献, 但贡献最大的则是  $800 \text{ nm}$  波长附近的光。

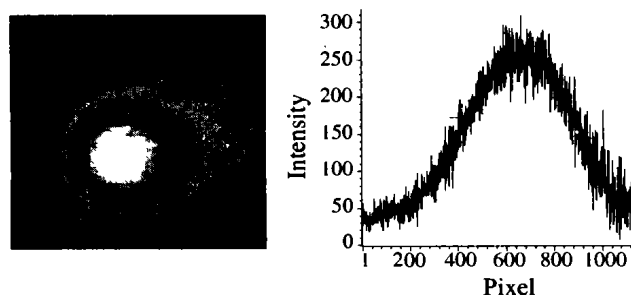


图 4 实验靶背方向 OTR 图谱 (CCD 相机)

### 4 分析与讨论

激光-等离子体相互作用过程中, 超热电子可以通过不同的吸收或加热机制产生, 而吸收或加热机制敏感地依赖于激光参数, 因为等离子体许多基本的性质是受强激光场的控制而不是受它本身密度

和温度的控制<sup>[7]</sup>。在激光参数中,激光对比度直接决定预等离子体的密度标长  $L = [(1/n)(dn/dx)]^{-1}$ , 而密度标长又强烈地影响超热电子加热机制<sup>[8]</sup>。所以,为了确定在我们的实验条件下超热电子的加速机制,首先需要确定预等离子体的密度标长。根据同类实验的流体力学模拟<sup>[8]</sup>,典型的预等离子体密度标长约为  $L = (1-2)\lambda$ ,  $\lambda$  为激光波长。

沿着靶背法线方向发射的超热电子可能由共振吸收或真空加热机制产生。为了判断哪种机制占主导地位,首先计算激光电场的振幅

$$E_0(v/m) = \sqrt{\frac{2I}{\epsilon_0 c}} = 2.75 \times 10^3 I^{1/2}, \quad (1)$$

式中,  $v$  为速度,  $m$  为质量,  $I$  为激光强度,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $c$  为光速。将  $I = 5.8 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$  代入上式可得  $E_0 = 2.3 \times 10^{12} v/m$ 。这样,电子抖动振幅为

$$X_{\text{osc}} = \frac{eE_0}{m_e \omega_0^2} \approx 0.1\lambda, \quad (2)$$

式中,  $e$  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。

由于真空加热要求  $L \approx X_{\text{osc}}$ , 共振吸收要求  $L \gg X_{\text{osc}}$ 。对于我们的实验条件,等离子体标长  $L = (1-2)\lambda$ , 或  $L = (10-20) X_{\text{osc}}$ 。因此,共振吸收是主要的加热机制。按照超热电子的温度定标率<sup>[9]</sup>

$$T_h = a \left( \frac{I\lambda^2}{10^{17}} \text{ W}\mu\text{m}^2/\text{cm}^2 \right)^{1/3-1/2}, \quad (3)$$

其中,  $I\lambda^2$  为激光的规格化强度,单位为  $\text{W}\mu\text{m}^2/\text{cm}^2$ ;  $a$  为与脉冲宽度相关的常数,对长脉冲取 30, 对短脉冲取 100。当激光的规格化强度  $I\lambda^2 > 10^{16} \text{ W}\mu\text{m}^2/\text{cm}^2$  时,指数接近 1/2<sup>[9]</sup>。实验中,激光为短脉冲(60 fs),其规格化强度约为  $3.712 \times 10^{17} \text{ W}\mu\text{m}^2/\text{cm}^2$ 。因此,  $a$  取 100,指数取 1/3,按照(3)式,超热电子的有效温度为 155 keV。而根据图 3 超热电子能谱拟合的平均温度约为 185 keV,原因在于真空加热机制可能加速了少部分电子使超热电子的有效温度偏高。正如上文提到的,预等离子体的标长  $L = (10-20) X_{\text{osc}}$ , 它还不完全满足  $L \gg X_{\text{osc}}$ , 同时该标长仅大于电子抖动振幅  $X_{\text{osc}}$  1 个量级,不能排除真空加热机制扮演次要角色的可能。如果在(3)式中指数取 1/2,则给出 194 keV 的超热电子有效温度,这与由能谱拟合的平均温度更接

近。实际上,正如文献[9]指出的,指数从 1/3 增加到 1/2 反映了超热电子加热机制的变化。

根据 Jian Zheng 等<sup>[10]</sup>对 fs 激光固体相互作用中产生的超热电子连续渡越辐射的研究可知,铜金属靶背表面光辐射是由于共振吸收机制中产生的超热电子引起的,连续渡越辐射强度依赖靶厚度和超热电子温度。根据 Santos 等<sup>[11]</sup>对受辐照固体物质中快电子的产生和输运靶背方向自发辐射的诊断研究可知,OTR 强度依赖于超热电子能量分布,而超热电子能量分布又与超热电子温度有关。根据 Santos 理论<sup>[3]</sup>,初始的超热电子能量分布为一维相对论麦克斯韦分布函数:

$$f_p(r,t) \propto \exp\left\{-\frac{E_0}{T_h(r,t)}[(1+p^2)^{1/2}-1]\right\}, \quad (4)$$

其中,  $p$  是电子动量,单位是  $m_e c$ ,  $E_0 = 511 \text{ keV}$ ,  $T_h(r,t)$  是超热电子有效温度。又根据 Santos 理论<sup>[11]</sup>,OTR 能量由下表达式给出:

$$E_{2\omega} \propto N^2 |p(2\omega)|^2, \quad (5)$$

其中,  $N$  是超热电子束内部的电子总数,  $|p(2\omega)|$  是电子动量,依赖于靶厚度和超热电子能量分布。

根据文献[3]报道的结果,光辐射方向与超热电子束散射方向相接近,辐射大约是  $17^\circ$  半角的圆锥范围,这与我们的实验(OTR 区域存在发散角相一致。这个发散角分布与相互作用轴有关,也由文献[3]给出:

$$df(\theta) \propto e^{-\theta^2/\theta_0^2} \sin\theta d\theta. \quad (6)$$

OTR 区域存在发散角足以说明超热电子具有散射角,散射角形成的原因主要在于超热电子输运过程中的碰撞效应,按电子输运理论将产生一个均方角展宽。

文献[11]报道,使用 1 054 nm 的激光脉冲,对渡越辐射光强贡献最大的是 530 nm(二倍频光  $2\omega$ ) 附近波长的光。而我们的实验结果是 800 nm 附近波长的光学渡越辐射光强贡献最大,原因很可能是光辐射信号中包含杂散光、冲击波发光及热波辐射发光等成分,如何去区分这些成分的发光,还必须借助于带有时间分辨的条纹相机来做深入研究。

但在一些发次中也观测到渡越辐射的非圆盘形状,这可能与靶背形成的鞘电场及高能质子环形分布有关,还需进一步研究。

## 5 结论

用电子磁谱仪和光学 CCD 相机首次在 20 TW fs 激光器上完成了激光-固体靶相互作用过程中在靶背方向产生的超热电子的能谱和光学渡越辐射 (OTR) 的测量结果。测量结果指出, 靶背方向产生的超热电子的加热机制为共振吸收; 超热电子输运穿越固体靶引起 OTR。由于 20 TW fs 激光器输出

的能量波动范围较大, 功率密度还不十分稳定, 使所测实验结果必然存在一定的偏差。我们只不过有限地分析讨论了 OTR 的测量结果, 而 OTR 强度与靶厚和超热电子温度到底存在什么样的定量关系, 以及光辐射信号中还存在哪些重要信息等, 我们还有待于在更高的激光能量、更高的激光功率密度条件下提高实验精度去探索、去研究。

## 参 考 文 献:

- [1] Gremillet L, Amiranoff F, Baton S D, *et al.* Phys Rev Lett, 1999, **83**(24): 5 015.
- [2] Pisani F, Bernardinello A, Batani D, *et al.* Phys Rev, 2000, **E62**(5): R5 927.
- [3] Santos J J, Amiranoff F, Baton S D, *et al.* Phys Rev Lett, 2002, **89**(2): 025001.
- [4] Tabak M, Hammer J, Glisky M E, *et al.* Phys Plasmas, 1994, **1**(5): 1 626.
- [5] Wei M S, Beg F N, Dangor A E, *et al.* Central Laser Facility Annual Report, 2001/2002.
- [6] 蔡达峰, 谷渝秋, 郑志坚等. 强激光与离子束, 2003, **15**(2): 141.
- [7] Bastiani S, Rousse A, Geindre J P, *et al.* Phys Rev, 1997, **E56**(6): 7 179.
- [8] Alexei Zhidkov, Akira Sasaki, Takayuki Utsumi, *et al.* Phys Rev, 2000, **E62**(5): 7 232.
- [9] Beg F N, Bell A R, Dangor A E, *et al.* Phys Plasmas, 1997, **4**(2): 447.
- [10] Jian Zheng, Tanaka K A, Sato T, *et al.* Institute of Laser Engineering, Osaka University, JPS Meeting, Hokkaido University, March, 2003.
- [11] Santos J J, Amiranoff F, Baton S D, *et al.* Central Laser Facility Annual Report, 2001/2002.

## Measurement of Hot Electrons Generation and Transport in Targets at Rear-side Radiation<sup>\*</sup>

WANG Guang-chang<sup>1,2</sup>, ZHENG Zhi-jian<sup>2</sup>, YANG Xiang-dong<sup>1</sup>, GU Yu-qiu<sup>2</sup>, WU Yun-bo<sup>1</sup>

(1 Atom and Molecule Physics Institute, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

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

3 School of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** This paper reports hot electron energy spectrum measured with electron spectrometer, and Optical Transition Radiation measured with optical time-integrated image of CCD during the interaction of laser-solid target in targets at the rear-side radiation of laser on 20 Terawatt femtosecond laser facility. It shows that hot electron energy spectrum can be fitted with two-temperature like-Maxwellian distribution, with  $T \approx 90$  and 280 keV, but average temperature of hot electrons  $T \approx 185$  keV, which accorded with the known temperature scaling law. Because Optical Transition Radiation is produced by the hot electrons transport through solid targets, region of Optical Transition Radiation has larger radiation angle and optical intensity distribution. The main acceleration of hot electron comes from resonance absorption.

**Key words:** femtosecond laser; solid target; hot electron; energy spectrum; optical transition radiation

\* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10275056, 10275055)