

文章编号: 0258-7025(2008)02-0216-05

## 强场物理中超热电子的产生及输运

王光昶<sup>1,2</sup> 陈涛<sup>1</sup> 张婷<sup>1</sup> 邓利<sup>1</sup> 郑志坚<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 成都医学院物理教研室, 四川 成都 610083; <sup>2</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 在 100 TW 超短脉冲钛宝石激光装置上完成了飞秒激光-固体靶相互作用中超热电子的产生及输运特性的实验研究。获得了超热电子的能谱、产额、注量和总能量。结果表明,随着功率密度的增加,靶前法线方向的超热电子更容易产生;超热电子的注量和总能量随靶厚度的增加而减少。超热电子约 80% 的能量主要沉积在靶内的前 10  $\mu\text{m}$ , 分析表明,这主要是静电场的影响所致。

**关键词** 超快光学;飞秒激光;超热电子;输运;能量沉积;静电场

中图分类号 O 437 文献标识码 A

### Hot Electron Generation and Transport in Intense Field Physics

Wang Guangchang<sup>1,2</sup> Chen Tao<sup>1</sup> Zhang Ting<sup>1</sup> Deng Li<sup>1</sup> Zheng Zhijian<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Teaching and Research Section of Physics, Chengdu Medical College, Chengdu, Sichuan 610083, China  
<sup>2</sup> Research Center of Laser Fusion, Academy of Engineering Physics of China, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** Hot electron generation and its transport characteristics in the interaction of femtosecond laser with solid target were studied in experiments, on the 100 TW ultrashort Ti:sapphire laser. The energy spectrum, yield, fluence and total energy of hot electrons were obtained. It shows that more hot electrons are generated at the rear normal direction of target with the increase of power density of laser, and the fluence and total energy of hot electrons decrease with the increase of target thickness. 80% hot electrons energy deposits in the place in front of the target about 10  $\mu\text{m}$ , which is induced by the static electric field effect.

**Key words** ultrafast optics; femtosecond laser; hot electron; transport; energy deposit; static electric field

## 1 引言

在激光惯性约束聚变“快点火”方案<sup>[1]</sup>中,点火激光的能量首先传递给超热电子,超热电子经过输运后到达高密度燃料区的边缘并加热氘氚离子形成热斑而实现点火,超热电子对快点火来说是至关重要的。关于固体靶外侧超热电子的能谱、角分布、产额及其加热机制等已有详细研究<sup>[2~10]</sup>。但是,在过稠密等离子体内部,超短超强激光产生的超热电子所形成的电子流很强,甚至超过阿尔文(Alfvén)极限。如此强的超热电子流在输运时,会产生成丝效应而引起严重的不稳定性。由于超热电子产生、输运涉及到固体密度等离子体,因此实验探测高密度区的输运过程就显得非常重要。我们在前期工作中

利用渡越辐射研究了超热电子在固体靶中的输运过程及其传输特性,获得了较为理想的实验结果<sup>[11,12]</sup>。与前期工作的研究方法不同,我们利用电子磁谱仪,在靶前法线方向和靶后激光传播方向测量了超热电子的产额、注量和能量,研究了超热电子在固体靶中向前传输的沉积量随靶厚的关系,及功率密度对超热电子产额的影响,对以上情况作了分析。

## 2 实验设置和方法

实验在中国工程物理研究院高温高密度等离子体国家重点实验室 100 TW 超短超强激光器上进行。实验布局如图 1,2 所示。

能量 3 J,脉宽 30 fs,中心波长 800 nm 的主激

收稿日期:2007-05-15;收到修改稿日期:2007-09-26

基金项目:国家自然科学基金(10535030),四川省青年科技基金(06ZQ026-053)和成都医学院科研基金(05Z2005-001)资助项目。

作者简介:王光昶(1969—),男,黑龙江人,副教授,博士,主要从事超短超强激光与等离子体相互作用研究。

E-mail: wgchang@tom.com

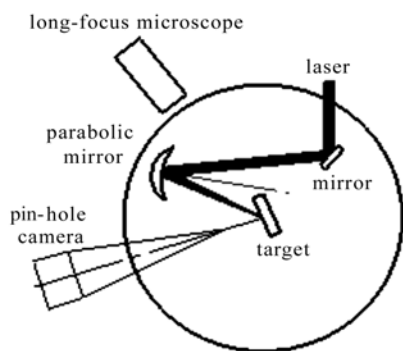


图 1 焦斑监测系统

Fig. 1 Monitoring system of focal spot

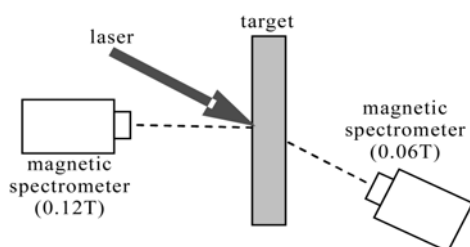


图 2 实验布局示意图

Fig. 2 Scheme of experimental setup

光经过压缩池后进入靶室,经过  $45^\circ$  全反射镜和高轴抛物面镜后聚焦到焦点。在焦点处放置一个铜平面薄靶(厚度  $3\sim 80\ \mu\text{m}$ ),仔细调整平面靶的方向,使主激光入射方向与靶面法线方向夹角为  $21^\circ$ 。针孔相机位于靶前斜上方,  $0.12\ \text{T}$  的电子磁谱仪放在靶前法线方向,  $0.06\ \text{T}$  电子谱仪放在靶后激光传播方向。实验过程中采用单发打靶。

激光焦斑测量用多针孔阵列针孔相机配合 X 射线 CCD 测量。它可给出激光打靶过程中能量在  $1\sim 9\ \text{keV}$  之间的 X 射线发射区域,该区域一般被认为是激光光学焦斑的大小。超热电子诊断系统包括电子磁谱仪, LiF 热释光片以及读数、退火系统。电子磁谱仪可以获得出射超热电子的能谱分布。LiF 热释光片是电子磁谱仪的配套探测元件,超热电子通过热释光片后会在其中沉积能量,采用热释光读数仪可以获得不同能量的超热电子沉积的剂量值,从而得知不同能量超热电子的注量,获得超热电子能谱。退火系统是用来对 LiF 热释光片进行预处理,避免实验结果受到热释光片本底的影响。采用的电子磁谱仪磁场大小为  $0.06\ \text{T}$  和  $0.12\ \text{T}$ , 能量测量范围分别为  $70\sim 1200\ \text{keV}$  和  $250\ \text{keV}\sim 3\ \text{MeV}$ 。

### 3 实验结果

#### 3.1 焦斑测量结果

激光最大输出能量  $3.02\ \text{J}$ , 脉冲宽度  $30\ \text{fs}$ , 波长

$800\ \text{nm}$ , 激光输出口径  $\phi 70\ \text{mm}$ , 经离轴抛物面聚焦后以  $21^\circ$  入射角入射到平面铜箔靶上。激光焦斑用  $\phi 10\ \mu\text{m}$  的针孔相机配 X 射线 CCD 监测, 测量的焦斑(图 3)直径(半峰全宽)为  $60\ \mu\text{m}$ , 靶面的最大功率密度为  $3.56\times 10^{18}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。

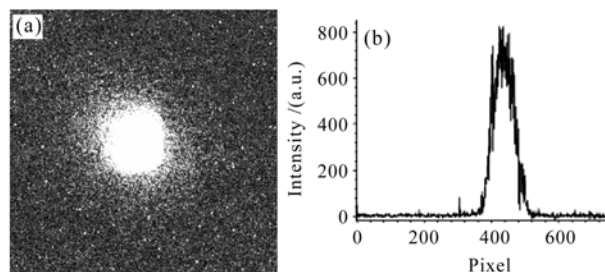


图 3 激光焦斑(a)和扫描图(b)

Fig. 3 Image of laser focus (a) and scan profile (b)

#### 3.2 靶后激光传播方向超热电子注量与靶厚关系

通过利用电子磁谱仪测量超热电子能谱, 得出超热电子的总注量, 平面铜靶厚度与靶后注量的关系如图 4 所示。随着靶厚的增加, 超热电子注量急剧减小, 靶厚由  $3\ \mu\text{m}$  增加到  $10\ \mu\text{m}$ , 超热电子注量下降到原来的  $1/6$ ; 当靶厚大于  $10\ \mu\text{m}$ , 电子注量减小趋势明显减缓。这说明超热电子注量的减少主要在前  $10\ \mu\text{m}$ , 即超热电子的能量沉积主要在前  $10\ \mu\text{m}$ 。

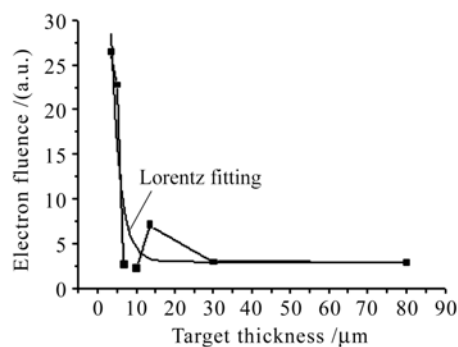


图 4 靶后激光传播方向超热电子注量与靶厚度的关系

Fig. 4 Hot electron fluence in laser direction from the rear side of targets with target thickness

#### 3.3 靶后激光传播方向超热电子总能量与靶厚关系

通过利用电子磁谱仪测量的超热电子能谱, 将超热电子按照对应的能量进行积分, 得到靶后激光传播方向单位立体角内超热电子总能量与靶厚的关系如图 5 所示。可以看出, 靶后激光传播方向超热电子总能量随着靶的厚度增加而急剧减小, 当靶厚大于  $10\ \mu\text{m}$  以后, 超热电子总能量变化不大。这说明超热电子输运到靶后的能量在  $10\ \mu\text{m}$  之前随着靶厚度的增加急剧减小, 在  $10\ \mu\text{m}$  之后则变化比较平缓, 图 4 与图 5 的结果一致。

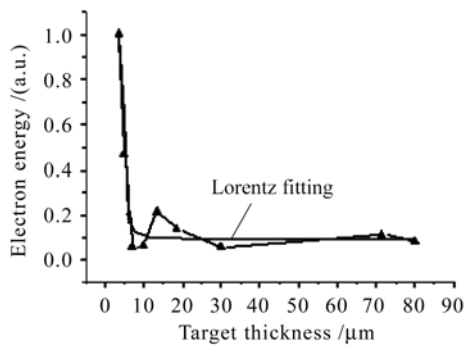


图5 靶后激光传播方向超热电子总能量与靶厚度的关系

Fig. 5 Hot electron energy in laser direction from the rear side of targets with target thickness

### 3.4 超热电子产额与激光功率密度关系

超热电子注量与功率密度的关系如图6所示。靶前超热电子产额随功率密度增加而增加,靶后超热电子产额无明显变化。随着功率密度的增加,靶前法线方向超热电子产额增加,而且增加速度比靶前反射方向更快。这表明随着功率密度的增加,法线方向的超热电子更容易产生。

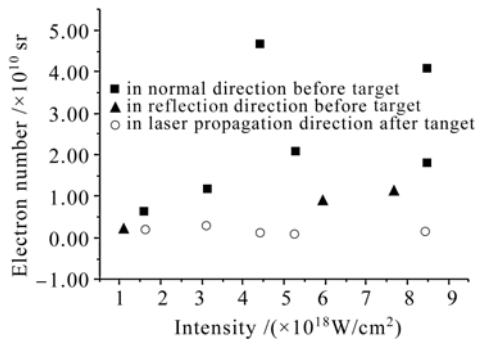


图6 超热电子注量与功率密度的关系

Fig. 6 Hot electron fluence versus with intensity

## 4 分析与讨论

对图4,5靶后激光传播方向超热电子注量、总能量与靶厚关系的分析表明,超热电子在金属靶中的输运效率与靶厚度密切相关。超热电子的能量沉积集中在靶内的前10 μm,约80%的能量集中在这里。当靶厚度小于10 μm时,注量、能量与靶厚度近似成正比;当靶厚度大于10 μm时,注量、能量变化很小,与靶厚度近似无关。这与前期工作获得的渡越辐射光强随靶厚度的关系变化结果相一致<sup>[13]</sup>,即靶厚度10 μm处是一个关键点。

对图4,5进一步分析可知,当一定强度的超短超强激光与预等离子体相互作用时,产生向靶内发射的超热电子束,超热电子束的电流超过阿尔文极

限,它将产生强大的自生磁场使电子轨道弯曲,并阻止电子穿入过密等离子体。然而,在过密等离子体中有屏蔽效应产生,且靶中的冷电子回流中和高能电子流,这样,高能电子可以进入过密等离子体。超热电子束与靶内的冷电子回流构成的电流可以超过阿尔文极限。这时大量的冷电子聚集在靶的前表面,形成一个静电场以阻碍超热电子继续进入,因此超热电子的部分能量用于抵抗这个静电场。一个脉宽为 $\tau$ (30 fs)的激光可以看作由十几个光子脉冲群组成。每个脉冲群都会产生大量超热电子进入靶内。高能超热电子速度接近光速 $c$ ,因此超热电子会形成一个长度 $L(L = c \cdot \tau)$ 等于9 μm长的电子脉冲,这与实验中得到的10 μm距离非常相近。而这恰好是在一个激光脉冲(30 fs)内超热电子在靶内传输的距离。当靶厚度小于9 μm时,最前端超热电子穿出靶的后表面时,靶前还有超热电子继续进入。因此,回流电子产生的静电场强度保持不变,静电场宽度为靶的厚度也就是在一个激光脉冲内超热电子在靶内传输的距离。随着靶的厚度继续减小,超热电子损耗的能量越小,有更多的超热电子通过平面靶,超热电子数量与靶厚度近似为线性关系,这与实验结果符合。当靶的厚度大于9 μm,靶前的超热电子全部进入靶内时,最前端的超热电子还没有到达靶的后表面,因此静电场宽度等于超热电子群的宽度。根据Y. Sentoku等<sup>[14]</sup>的理论,超热电子经典碰撞的能量( $E$ )沉积率为

$$\frac{dE}{dx} \approx \frac{Z^2 \omega_p^2 e^2}{2\pi\beta^2 c^2} = \frac{2Z^2 e^4 n_e}{m\beta^2 c^2}, \quad (1)$$

式中 $Z$ 为电荷数, $\omega_p$ 为等离子体振荡频率, $m$ 为粒子质量, $\beta$ 为相对论因子。对于电子数密度 $n_e = 10^{23}$ ,兆电子伏量级的电子能量沉积率只有15 eV/μm。又根据Y. Sentoku等采用的广义欧姆定律

$$\epsilon = \eta j \cdot v, \quad (2)$$

式中 $\epsilon$ 为电场强度, $\eta$ 为电阻率, $j$ 为电流密度, $v$ 为相对论超热电子的速度。他们估算了静电场的大小,发现静电场可以阻止能量低于有效温度的超热电子,其能量沉积效率是经典碰撞模型的 $10^3$ 倍。因此,根据(1),(2)式,就能判断出超热电子在固体靶中输运时能量沉积占主导地位的机制。

根据我们的实验条件,一个脉冲宽度30 fs,功率密度为 $3.56 \times 10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>的激光脉冲产生的超热电子的速度已接近光速。因此,在大于9 μm的金属靶内形成的静电场对超热电子的能量衰减是一个固定值,之后超热电子的输运可以认为遵循经典碰撞

理论, 由于其自由程较大, 因此能量损耗很小。通常情况下, 由于低能电子具有较大的阻止本领, 而高能电子具有较小的阻止本领。当能量分布一定的电子穿过某种材料后, 低能电子的数目减少较多, 高能电子的数目减少较少。蔡达锋等<sup>[15]</sup>模拟了穿过 $20\ \mu\text{m}$ 铜靶仅受碰撞影响的超热电子能谱, 结果表明, 超热电子由于碰撞损失的能量是相当小的。根据 J. R. Davies 等的理论<sup>[16]</sup>, 超热电子在穿越过密等离子体和冷材料靶时, 电场、磁场、变化的电阻率以及碰撞效应扮演了重要角色, 其中电场的作用是超热电子最重要的能量损失机制。也正如文献<sup>[15]</sup>指出的那样, 超热电子在穿过固体靶的输运过程中, 磁场将减少超热电子的横向传播, 增加中等能量超热电子的穿透, 同时反射掉低能量的超热电子。这种作用导致穿出靶背面的中等能量的超热电子数目更大。因此, 铜靶厚度从 $10\sim 80\ \mu\text{m}$ , 超热电子注量、能量变化不大, 即当靶厚度大于 $10\ \mu\text{m}$ 时, 注量、能量与靶厚度近似无关, 与静电场的影响是密不可分的。

至于在图 4 和图 5 中 $15\ \mu\text{m}$ 附近有个峰, 很可能是由于超热电子在该处输运时存在成丝效应而引起不稳定性。成丝不稳定性会激发或增强其他等离子体不稳定性非线性效应<sup>[17]</sup>。如果等离子体不稳定性增长率大, 会导致等离子体局域密度分布的极端非均匀性, 结果就会在该处出现反常现象。

对图 6 进行分析表明, 固体靶不同方向产生的超热电子是受不同的加热机制支配的<sup>[18]</sup>, 不同方向超热电子产生的加热机制不同, 导致不同方向超热电子的产额不同。根据文献<sup>[19]</sup>报道, 靶前法线方向超热电子的产额比靶后激光传播方向超热电子的产额高约一个量级, 又由于加热机制受激光功率密度的影响, 通常是随激光功率密度的增加, 加热机制对超热电子的产生更加有效。因此, 图 6 靶前法线方向超热电子产额比靶后激光传播方向超热电子的产额高且随激光功率密度的增加而增加, 这与实验结果符合。至于激光强度在 $4.5\times 10^{18}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 时, 法线方向的高能电子数比激光强度更高条件下还高, 可能与电子的角分布、激光条件以及探测器的探测方向等因素有关, 还需做重复性实验来研究验证。

图 6 靶后激光传播方向超热电子产额随激光功率密度的增加而几乎无明显变化, 这说明超热电子在固体靶内的传输受到了很大的阻碍。结合对图 4 和图 5 的讨论, 我们认为, 这个阻碍来源于超热电子的经典碰撞和静电场阻止, 其中, 静电场阻止在我们的实验中是主要机制。

## 5 结 论

利用电子磁谱仪, 在 $100\ \text{TW}$ 飞秒激光器上完成了飞秒激光-固体靶相互作用过程中超热电子的产生及输运特性实验测量工作。测量结果显示, 随着激光功率密度的增加, 靶前法线方向超热电子产额增加, 靶后超热电子产额无明显变化; 靶后沿激光传播方向超热电子注量和总能量急剧衰减; 当靶厚度大于 $10\ \mu\text{m}$ 以后, 注量和能量变化缓慢, 近似与靶厚度无关。分析认为是由于超热电子在靶内传输超过阿尔文极限, 大量回流电子在靶前形成阻碍超热电子进入的静电场所致。静电场的宽度等于在一个激光脉冲( $30\ \text{fs}$ )内超热电子在靶内传输的距离。超热电子在靶内输运的过程中, 约 $80\%$ 能量沉积在靶内的前 $10\ \mu\text{m}$ , 这一结果与渡越辐射光强随靶厚度的变化关系结果一致。

## 参 考 文 献

- 1 Max Tabak, James Hammer, Michael E. Glinsky *et al.*. Ignition and high gain with ultrapowerful lasers [J]. *Phys. Plasmas*, 1994, **1**(5):1626~1634
- 2 S. C. Wilks, W. L. Kruer, M. Tabak *et al.*. Absorption of ultra-intense laser pulses [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **69**(9):1383~1386
- 3 G. Malka, J. L. Miquel. Experimental confirmation of ponderomotive-force electrons produced by an ultrarelativistic laser pulse on a solid target [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(1):75~78
- 4 F. N. Beg, A. R. Bell, A. E. Dangor *et al.*. A study of picosecond laser-solid interactions up to  $10^{19}\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$  [J]. *Phys. Plasmas*, 1997, **4**(2):447~457
- 5 Th. Schlegel, S. Bastiani, L. Gremillet *et al.*. Comparison of measured and calculated X-ray and hot-electron production in short-pulse laser-solid interactions at moderate intensities [J]. *Phys. Rev. E*, 1999, **60**(2):2209~2217
- 6 Alexei Zhidkov, Akira Sasaki, Takayuki Utsumi *et al.*. Prepulse effects on the interaction of intense femtosecond laser pulses with high-Z solids [J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **62**(5):7232~7240
- 7 A. G. Zhidkov, A. Sasaki, I. Fukumoto *et al.*. Pulse duration effect on the distribution of energetic particles produced by intense femtosecond laser pulses irradiating solids [J]. *Phys. Plasmas*, 2001, **8**(8):3718~3723
- 8 L. M. Chen, J. Zhang, Q. L. Dong *et al.*. Hot electron generation via vacuum heating process in femtosecond laser-solid interactions [J]. *Phys. Plasmas*, 2001, **8**(6):2925~2929
- 9 Gu Yuqiu, Cai Dafeng, Zheng Zhijian *et al.*. Experimental study on energy distribution of the hot electrons generated by femtosecond laser interacting with solid targets [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(1):186~191  
谷渝秋, 蔡达锋, 郑志坚等. 飞秒激光-固体靶相互作用中超热电子能量分布的实验研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(1):186~191
- 10 Wang Guangchang, Zheng Zhijian, Yang Xiangdong *et al.*. Measurement of hot electron energy spectrum produced by femtosecond laser in the specular direction [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(2):179~182

- 王光昶, 郑志坚, 杨向东 等. 飞秒激光中镜向超热电子能谱的测量[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(2):179~182
- 11 Wang Guangchang, Zheng Zhijian, Gu Yuqiu *et al.*. Study of transport of hot electrons in solid targets by transition radiation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(2):982~986  
王光昶, 郑志坚, 谷渝秋 等. 利用渡越辐射研究超热电子在固体靶中的运输过程[J]. 物理学报, 2007, **56**(2):982~986
- 12 Wang Guangchang, Deng Li, Zheng Zhijian *et al.*. Study of transport characteristic of hot electron bunches in solid targets by transition radiation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(2):241~244  
王光昶, 邓 利, 郑志坚 等. 利用渡越辐射研究超热电子束的传输特性[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(2):241~244
- 13 Wang Guangchang, Zheng Zhijian, Yang Xiangdong *et al.*. Experimental study of optical emission from the rear surface in ultrashort ultra-intense laser interaction with solid targets [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(10):4803~4807  
王光昶, 郑志坚, 杨向东 等. 超短超强激光与固体靶相互作用中背表面光发射的实验研究[J]. 物理学报, 2005, **54**(10):4803~4807
- 14 Y. Sentoku, T. E. Cowan, A. Kemp *et al.*. High energy proton acceleration in interaction of short laser pulse with dense plasma target [J]. *Phys. Plasmas*, 2003, **10**(5):2009~2015
- 15 Cai Dafeng, Gu Yuqiu, Zheng Zhijian *et al.*. A comparison of energy distribution of hot electrons from the front and the rear sides of targets during the interaction of femtosecond laser with foil targets [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(1):346~352  
蔡达锋, 谷渝秋, 郑志坚 等. 飞秒激光-金属薄膜靶相互作用中靶前后超热电子能谱的比较[J]. 物理学报, 2007, **56**(1):346~352
- 16 J. R. Davies, A. R. Bell, M. G. Haines *et al.*. Short-pulse high-intensity laser-generated fast electron transport into thick solid targets [J]. *Phys. Rev. E*, 1997, **56**(6):7193~7202
- 17 Li Yutong, Zhang Jie, Chen Liming *et al.*. Study on filamentation in femtosecond laser plasmas [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(2):204~208  
李玉同, 张 杰, 陈黎明 等. 对飞秒激光等离子体中成丝现象的研究[J]. 物理学报, 2001, **50**(2):204~208
- 18 Cai Dafeng, Gu Yuqiu, Zheng Zhijian *et al.*. Measurement of hot electron energy spectrum in femtosecond laser-plasma [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(6):575~579  
蔡达锋, 谷渝秋, 郑志坚 等. 飞秒激光与等离子体相互作用中超热电子能谱的测量[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(6):575~579
- 19 Zhang Shuanggen, Gu Yuqiu, Wen Xianlun *et al.*. A measurement of hot electron energy spectrum in the interaction of relativistic laser with solid target [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(3):347~351  
张双根, 谷渝秋, 温贤伦 等. 相对论激光-固体靶作用中超热电子能谱的测量[J]. 光电子·激光, 2006, **17**(3):347~351