

文章编号: 0258-7025(2008)04-0524-05

飞秒激光与固体靶相互作用中背表面的渡越辐射

王光昶^{1,2} 郑志坚²

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

摘要 在飞秒激光与固体靶相互作用中, 利用光学 CCD 相机和光学多道分析仪(OMA), 分别在固体薄膜靶背表面法线方向测量了渡越辐射(TR)积分成像图案和渡越辐射光谱。测量结果显示, 渡越辐射光斑呈现圆盘状结构, 在圆盘中明亮而强的光信号呈局部化分布, 并且有分离的光斑出现。该现象表明, 超热电子在输运过程中存在成丝效应, 引起严重的不稳定性; 渡越辐射光谱在 800 nm 附近出现了尖峰, 是基频波(ω_0), 并且光谱向红光方向移动; 基频波产生的原因归结于超热电子束在传输过程中产生的微束团而引起的相干渡越辐射(CTR); 光谱红移的原因是由于等离子体临界面的迅速膨胀所致; 渡越辐射光强随靶厚度的增加而减小。

关键词 飞秒激光; 超热电子束; 渡越辐射; 相干渡越辐射; 不稳定性; 红移

中图分类号 O 437 文献标识码 A

Transition Radiation from the Surface in Femtosecond Laser Interaction with Solid Targets

Wang Guangchang^{1,2} Zheng Zhijian²

(¹ Teaching and Research Section of Physics, Chengdu Medical College, Chengdu, Sichuan 610083, China)

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

Abstract For studying transport of hot electrons in solid targets by transition radiation (TR), the image pattern of spatial distribution and spectrum of optical emission were measured at the normal direction from the rear side of targets employing optical charge coupled device (CCD) camera and optical multi-channel spectrometer apparatus (OMA) on the 100 TW femtosecond laser facility. The image pattern of spatial distribution presents a tray-shape and in the tray-shape there is a bright localized signal, which shows filament effect during hot electron transport. The spectrum of optical emission presents a sharp peaks in the wavelength near 800 nm, which is attributed to the one-order harmonic (ω_0). The production of one-order harmonic is ascribed to the coherent transition radiation (CTR) generated by microbunches produced in the transporting of hot electron beams. The red shift is caused by the expansion of the critical density surface. With the increase of the laser energy, the peak of the CTR moves further to the long wavelength side. Intensity of transition radiation decreases with the increase of the target thickness.

Key words femtosecond laser; hot electron beam; transition radiation; coherent transition radiation; instability; red shift

1 引言

在激光惯性约束聚变(ICF)的“快点火”方案^[1,2]中, 超热电子是直接的点火物质, 其能量的高低、产额的多少以及其发射方向等都对“快点火”方

案极其重要。对于超热电子的微束团时间特征、截面形状等人们很感兴趣的方面而言, 渡越辐射(TR)是一种可能的、重要的测量手段^[3~6], 并且, 还能够通过渡越辐射来研究超短超强激光与等离子体相互

收稿日期: 2007-09-05; 收到修改稿日期: 2007-12-18

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

作用的一些重要的物理过程与机制^[7~9]。渡越辐射是电荷穿越折射率不同的两种介质之间的分界面时所产生的电磁辐射。超短超强激光与金属靶相互作用能够产生相对论超热电子束,此超热电子束在穿越靶与真空之间的界面时会发生渡越辐射。因为渡越辐射与电子的运动状态以及电子束的结构有关^[3,4],因此成为诊断超热电子束的强有力工具。最近,本文作者在前期工作中,利用渡越辐射这一工具对超热电子束在固体靶中的传输特性^[10]及超热电子在固体靶中的输运过程^[11]进行了详细诊断研究,均取得了较好的实验研究结果。

本文在固体薄膜金属靶背表面的法线方向,利用光学 CCD 相机和光学多道分析仪 (OMA),测量了斜入射飞秒超强激光与等离子体相互作用产生的渡越辐射积分成像光斑图案和渡越辐射光谱,得到了一些具有参考价值的实验结果。

2 实验设置和方法

实验是在中国工程物理研究院激光聚变研究中心的 100 TW 掺钛蓝宝石激光器上进行的。该激光器采用标准啁啾脉冲放大技术 (CPA),其技术指标为:激光最大输出能量 5 J,波长 800 nm,主激光带宽 50 nm,脉冲宽度 30~100 fs。

实验布局如图 1 所示,圆柱形的靶室四周侧壁上接有法兰,通过法兰口将压缩后的激光引入靶室。镀膜反射镜将压缩后的激光引到 $f/3$ 的光学离轴抛物面镜上,抛物面镜再将此激光束聚焦在靶面上。靶架由一个三维步进电机控制,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。靶室外设置一台长焦距显微镜,用于监测激光聚焦状态,确保每一发激光都处于良好的聚焦状态。入射激光与靶面

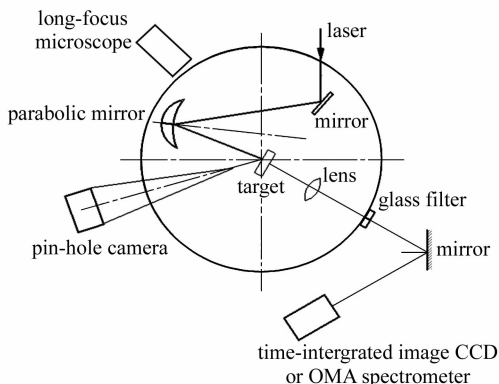


图 1 实验布局

Fig. 1 Scheme of the experimental setup

法线成 23° 角,聚焦直径约为 $30\sim 50\ \mu\text{m}$,聚焦后的激光功率密度大约为 $2\times 10^{18}\sim 5\times 10^{18}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。针孔相机在靶前上方对激光焦斑进行测量。靶后法线方向放置一 F 数为 1.7 的成像透镜,放大倍数为 10,由可见光 CCD 相机采集时间积分的渡越辐射光斑分布情况,CCD 前放置 800 nm 的干涉滤光片,用以滤除等离子体本身的辐射光。靶室外放置一台 He-Ne 激光自准直系统,用以模拟飞秒激光并对光学离轴抛物面镜聚焦及靶姿态进行大气与真空中的调试。打靶时靶室的真空度保持为 0.01 Pa 左右。

3 实验结果

实验中激光与靶法线方向成 23° 角分别入射到不同厚度 Cu 膜靶面上,P 偏振。

3.1 激光焦斑测量结果

图 2 是针孔相机测量的激光焦斑和扫描图,测量结果给出焦斑直径 $30\sim 50\ \mu\text{m}$ (半峰全宽)。

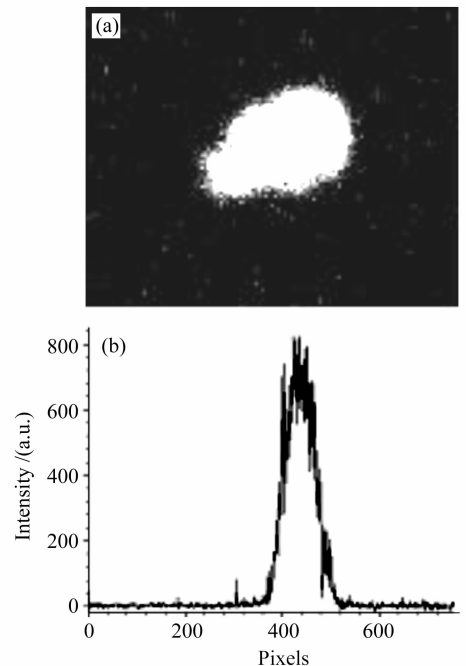


图 2 激光焦斑和扫描图

Fig. 2 Image of laser focus and scan profile

3.2 渡越辐射积分成像光斑测量结果

实验参数为:激光最大能量 3 J,脉冲宽度 30 fs,靶面激光峰值功率密度 I 约 $3.7\times 10^{18}\ \text{W}/\text{cm}^2$,铜膜靶,厚度分别为 $3\ \mu\text{m}$, $7\ \mu\text{m}$, $15\ \mu\text{m}$, $30\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m}$ 和 $80\ \mu\text{m}$ 。

图 3(a)~(f)是在靶背表面法线方向利用光学 CCD 相机测量的渡越辐射积分成像光斑的空间分布图,图案呈圆环状,圆环边缘附近光信号呈明亮局

部化分布。光发射形成区域随靶厚度的增加呈现出先增大后减小的趋势。它也反映了超热电子束流横断面空间的分布情况。

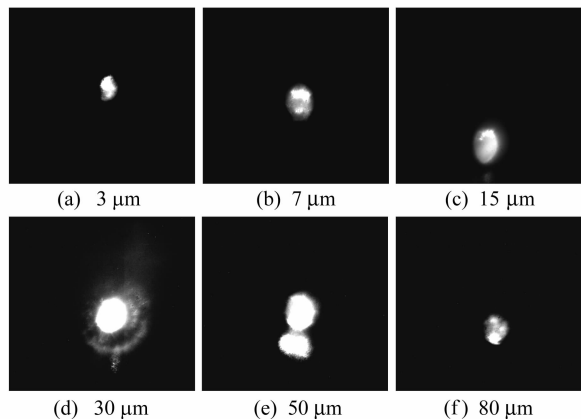


图 3 渡越辐射积分成像的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of TR integrated image

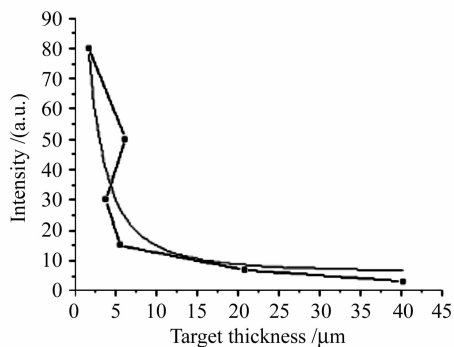


图 4 光学渡越辐射(OTR)光强与靶厚度的关系

Fig. 4 Relevancy of optical transition radiation (OTR) intensity with target thickness

图 4 是对图 3 所测实验数据进行统计处理的结果。黑点为实验数据点,另一条无黑点的曲线为洛伦兹拟合曲线。从图中可以看出,随着靶厚度的增加,光发射强度呈明显下降的趋势,大约在 $10 \mu\text{m}$ 前后强度变化较明显。在 $10 \mu\text{m}$ 之前,光发射强度随着靶厚急剧下降;在 $10 \mu\text{m}$ 之后,光发射强度随着靶厚下降比较平缓。

3.3 渡越辐射光谱测量结果

1) 实验参数为:激光能量 2.55 J ,脉宽 100 fs ,靶面激光峰值功率密度 I 约 $3 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$,铜膜靶厚 $35 \mu\text{m}$,所测结果如图 5 所示。

图 5 是在靶背表面法线方向利用光学多道分析仪测得的相干渡越辐射(CTR)光谱图,最强的光谱出现在 800 nm 附近,对应的是基频波 (ω_0),最强的光谱线是一个锐利尖峰。图 5(a)为面阵光谱,水平方向为波长方向,垂直方向为一维空间方向,图 5

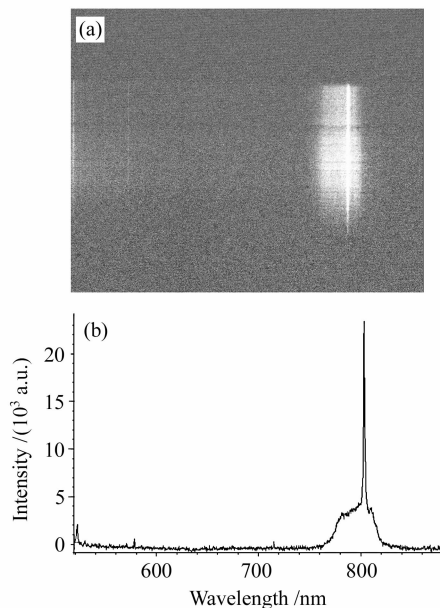


图 5 激光能量为 2.55 J 时渡越辐射基频波 (ω_0) 光谱
(a) 面阵光谱;(b) 线阵光谱

Fig. 5 Spectrum of transition radiation (ω_0) when laser energy is 2.55 J . (a) area array spectrum; (b) linear array spectrum

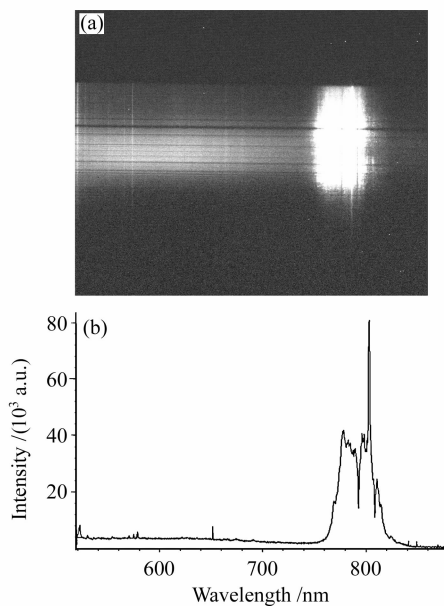


图 6 激光能量为 4.4 J 时渡越辐射基频波 (ω_0) 光谱
(a) 面阵光谱;(b) 线阵光谱

Fig. 6 Spectrum of transition radiation (ω_0) when laser energy is 4.4 J . (a) area array spectrum; (b) linear array spectrum

(b)为线阵光谱。

2) 实验参数为:除了激光能量 4.4 J 外,其他条件与图 5 的实验条件相同。

图 6 是在提高激光能量(相应的激光功率密度

也提高)的条件下,进一步对图 5 的实验结果进行的重复测量,结果显示,渡越辐射光谱基频波(ω_0)强度明显增强,发射峰继续向红波方向移动。

4 分析与讨论

根据 Santos 等^[5]和 Baton 等^[6]对靶背表面探测到的光发射信号观测结果可知,圆盘中出现的明亮而强的局部化光信号是由于超热电子输运穿越固体靶在靶背表面引起的光学渡越辐射。又根据 Zheng 等^[3,4]的理论计算可知,光学渡越辐射包括非相干渡越辐射(ITR)和相干渡越辐射(CTR),相干渡越辐射远远大于非相干渡越辐射,相干渡越辐射在实验上较容易探测,因此,我们认为图 3 明亮而强的局部化光信号是相干渡越辐射信号。根据单粒子理论可以知道,当超热电子达到相对论时,单个电子的渡越辐射在小角内发射大约是电子移动的方向。根据我们的实验条件,超热电子的速度已接近光速,图 3 所示的明亮而强的局部化光信号的分布就反映了超热电子束流横断面空间分布的情况。这一结果表明,超热电子在传输过程中存在成丝效应,是一种不稳定性的表现,说明超热电子束分布并不均匀。又根据文献[12]报道的结果,即由超热电子电流在固体密度的等离子体中不稳定性发展的过程可知,超短超强激光与固体靶前表面作用时产生的强大超热电子电流(大于阿尔文(Alfven)极限)并同时产生强的自生磁场和电场,这些自生场将引起反向的冷电子回流。这时超热电子电流开始在磁场的箍缩(Pinch)下向靶的后表面传输,磁压和热压平衡,但随着回流电子的不断增强,宏观电流逐渐被中和,自生磁场逐渐减弱,对电流的箍缩作用也逐渐减弱,电流在热压和径向电场的作用下径向膨胀形成空心结构。如果这时电流刚好到达靶的后表面,就将形成空心质子束发射。如果电流越大,中和电流的时间就越长。随着电子回流进一步增强,环形结构的电流会破裂成丝,成丝后的电流相互吸引会发生融合,细丝电流再次聚合为较大的粗丝电流,如果这时电流到达靶的后表面,就会形成如图 3 中所示的光学渡越辐射。

根据 Zheng 等^[4]的理论计算可知,渡越辐射很强,是由于光发射在一些特殊频率附近的干涉效应即相互叠加(强度调制)的结果,如果没有干涉效应,那么渡越辐射光谱将是平坦的宽带连续光谱。图 5 和图 6 所测光谱呈现出的尖峰结构能否表明是相干渡越辐射还必须从靶背表面的发光机制加以说明。

首先,可以排除入射激光直接进入的可能性。因为靶不透明,并且激光光谱与本实验所测光谱毫无相似之处。除了渡越辐射以外,在靶背表面产生光学波段的自发光还有以下几种:1)冲击波发光。根据文献[13]对冲击波实验测量与分析可知,冲击波光信号出现的时间晚(几百皮秒),波形是宽带连续谱(光谱范围在 250~500 nm),也称作普朗克谱,与我们探测到的光谱毫无相似之处,可以排除。2)黑体热辐射发光,超热电子及其关联机制加热冷的和扩展的等离子体发光。这种辐射的时间比冲击波发光时间还长。在文献[5]中,Santos 等测量了靶后自发光的时间特性,实验证明这种热辐射确实存在但相对来说较弱,可不考虑。3)同步加速器辐射发光,超热电子离开靶背后引起强的静电鞘电场,鞘电场将超热电子重新拉回靶内部约与德拜长度相同的距离,它们的运动“反转”重新进入靶将产生同步加速器辐射。但这种辐射主要是由外流的低能电子产生的,对相干渡越辐射的贡献并不大。文献[6]中 D. S. Baton 等对实验光谱的分析也说明了这一点。因此,冲击波发光和黑体热辐射发光的光谱都是宽带连续谱,不会出现分立的尖峰,这两种发光机制可以排除。根据我们的实验条件和结果,同步加速器辐射发光机制也可排除。另一方面,在靶的背表面,只有相干渡越辐射才有可能出现谐波结构(锐利尖峰)。

又根据 Zheng 等^[7]对实验中测量的相干渡越辐射光谱的研究可知,光谱基频波(ω_0)产生的原因是由于超热电子束是由一连串频率等于入射光波频率 ω_0 的电子微脉冲所组成。电子在每个激光周期内加速一次,相应的机制有共振吸收和真空加热,后者仅在等离子体密度标长较小的情况下占主导地位。而本实验中的密度标长相当大(约 1.6 μm),可以排除真空加热的可能。因此图 5 和图 6 是共振吸收加热机制中产生的特有的微束团输运穿越固体靶在背表面引起的相干渡越辐射。

对图 5 和图 6 光谱基频波(ω_0)出现红移进行分析,我们认为这是由于相邻微脉冲之间的间隔变大造成的,而临界密度面的高速膨胀是造成超热电子微脉冲间隔变大的主要原因。不考虑临界面运动时,共振吸收加热机制产生超热电子微脉冲的间隔可以表示为

$$L_1 = \beta \cdot T, \quad (1)$$

式中 $\beta = (1 - \gamma^{-2})^{\frac{1}{2}}$, γ 为相对论因子, T 为激光周期。而如果临界面以速度 c_0 向真空方向膨胀时,共

振吸收加热机制产生超热电子微脉冲的间隔要改写为

$$L_2 = (\beta - c_s) \frac{v_p}{v_p + c_s} \cdot T, \quad (2)$$

式中 v_p 为光在等离子体中的相速度。相邻微脉冲间隔的改变为

$$\Delta L = L_2 - L_1 = \frac{c_s(v_p - \beta)}{v_p + c_s} \cdot T > 0, \quad (3)$$

在临界面附近,当 $v_p \rightarrow \infty$ 时, $\Delta L \approx c_s \cdot T$ 。因此,临界面运动速度的增大,导致了电子束相邻微脉冲间隔的增大,产生的相干渡越辐射峰向长波长方向移动(即红移)。红移量满足

$$\Delta\lambda/\lambda_T \approx c_s/\beta, \quad (4)$$

式中 $\lambda_T = \lambda$ 为激光的基频波波长。同理,如果临界密度面以速度 c_s 向高密度区运动时,相邻微脉冲间隔的改变为

$$\Delta L = L_2 - L_1 = \frac{c_s(\beta - v_p)}{v_p - c_s} \cdot T < 0, \quad (5)$$

那么若相邻微脉冲的间隔减小,产生的相干渡越辐射峰就向短波长方向移动(即蓝移)。因此,等离子体临界密度面的高速膨胀才是相干渡越辐射光谱谐波峰发生红移或者蓝移的主要原因。

5 结 论

通过利用光学 CCD 相机和光学多道分析仪,在飞秒激光脉冲照射铜金属薄膜靶的相互作用中,分别在固体薄膜靶背表面法线方向测量了渡越辐射积分成像图案和渡越辐射光谱。CCD 相机的测量结果显示,圆环状而明亮局部化光信号及光辐射区域的显著变化表明,超热电子在输运过程中存在成丝效应而引起严重的不稳定性,超热电子束流分布并不均匀;光学多道分析仪测量结果表明,基频波(ω_0)的出现,是由于超热电子在传输过程中在共振吸收加热机制中获得特有的微束团,当这些微束团穿越靶背表面时,在它们的束团频率处形成干涉且在该频率处振幅增强所致,即相干渡越辐射;基频波(ω_0)光谱红移的原因是由于等离子体临界面的迅速膨胀所致,并且随着激光能量的增加,红移表现得更加明显;渡越辐射光强随靶厚度的增加而减小。关于渡越辐射详细的时间演化过程及空间发展过程还需要进一步改进实验、优化诊断方法并借助于数值模拟研究。

参 考 文 献

- Peng Hansheng. Ultraintense solid-state laser and applications to the frontiers of sciences (1) [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6):721~729
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿科学中的应用(1)[J]. 中国激光, 2006, **33**(6):721~729
- Peng Hansheng. Ultraintense solid-state laser and applications to the frontiers of sciences (2) [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):865~870
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿科学中的应用(2)[J]. 中国激光, 2006, **33**(7):865~870
- J. Zheng, K. A. Tanaka, T. Miyakoshi *et al.*. Theoretical study of transition radiation from hot electrons generated in the laser-solid interaction [J]. *Physics of Plasmas*, 2002, **9**(8):3610~3616
- J. Zheng, K. A. Tanaka, T. Miyakoshi *et al.*. Theoretical study of transition radiation from hot electrons generated in the laser-solid interaction [J]. *Physics of Plasmas*, 2003, **10**(7):2994~3003
- J. J. Santos, F. Amiranoff, S. D. Baton *et al.*. Fast electron transport in ultraintense laser pulse interaction with solid targets by rear-side self-radiation diagnostics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(2):025001
- S. D. Baton, J. J. Saantos, F. Amiranoff *et al.*. Evidence of ultrashort electron bunches in laser-plasma interactions at relativistic intensities [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(10):105001
- J. Zheng, K. A. Tanaka, T. Sato *et al.*. Study of hot electrons by measurement of optical emission from the rear surface of a metallic foil irradiated with ultraintense laser pulse [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(16):165001
- H. Popescu, S. D. Baton, F. Amiranoff *et al.*. Subfemtosecond, coherent, relativistic, and ballistic electron bunches generated at ω_0 and $2\omega_0$ in high intensity laser-matter interaction[J]. *Physics of Plasmas*, 2005, **12**(6):063106
- Yuan Xiaohui, Li Yutong, Xu Miaohua *et al.*. Observation of the rear-side transition radiation generated by hot electrons [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10):5362~5367
远晓辉,李玉同,徐妙华等. 超热电子产生的靶后相干渡越辐射光谱实验研究[J]. 物理学报, 2006, **55**(10):5362~5367
- 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
- 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输运过程[J]. 物理学报, 2007, **56**(2):982~986
- L. Gremillet, G. Bonnaud, F. Amiranoff *et al.*. Filamented transport of laser-generated relativistic electrons penetrating a solid target [J]. *Physics of Plasmas*, 2002, **9**(3):941~948
- Gu Yuan, Ni Yuanlong, Wang Yonggang *et al.*. Experimental observation of laser driven high pressure shock waves [J]. *Acta Physica Sinica*, 1988, **37**(10):1690~1693
顾援,倪元龙,王勇刚等. 激光驱动高压冲击波的实验观察[J]. 物理学报, 1988, **37**(10):1690~1693