

文章编号: 1001-4322(2007)02-0241-04

# 利用渡越辐射研究超热电子束的传输特性\*

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

(1. 成都医学院 物理教研室, 成都 610081; 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:** 为了探索超热电子束的传输特性, 利用光学 CCD 相机在靶背法线方向测量了光学渡越辐射积分成像图案。实验在 100 TW 掺钛蓝宝石激光器上进行, 飞秒激光与固体靶作用后, 靶表面发光信号由空间分辨装置聚焦成像并引到 CCD 狭缝上。在厚度为 20  $\mu\text{m}$  的 Ta 靶背表面观测到渡越辐射光斑呈现较平滑的圆形结构, 而且中心亮度高于周围, 这包含了非相干与相干渡越辐射的成分, 与理论模拟结果接近; 在厚度为 100  $\mu\text{m}$  的 Ta 靶背表面观测到渡越辐射光斑呈现出星状结构, 光斑较小, 与高能质子发射出现的星状结构极其相似; 在复合靶背表面观测到渡越辐射光斑虽然也呈现大致的圆形结构, 但光斑较大, 而且极不均匀, 中间有很明显的光斑分裂。

**关键词:** 渡越辐射; 超热电子束; 传输特性; 飞秒激光

**中图分类号:** O536 **文献标识码:** A

随着激光技术的发展, 强激光与物质相互作用产生的超热电子束被用作实现惯性约束聚变的“点火”物质。继加速器束流诊断之后, 超热电子束特性诊断成为渡越辐射的另一个重要研究领域。超热电子束的特性, 如电子束的能量、温度、数目、发散角、能谱分布、束半径及脉冲长度等信息, 是关系到能否实现“快点火”的重要条件, 渡越辐射无疑满足了测量电子束宏观特征及微结构信息的多参数测量要求。目前, 对激光等离子体中超热电子束产生的渡越辐射, 实验上取得一定成果的有 LULI 实验室<sup>[1-3]</sup>、Osaka 大学<sup>[4]</sup>、中国工程物理研究院激光聚变研究中心<sup>[5-7]</sup>。我们采用了 Ta 靶及复合靶 (Ta + Cu + Ta) 进行实验, 测量了靶背表面产生的渡越辐射光斑, 分析了超热电子束的传输特性。

## 1 实验设置

实验是在中国工程物理研究院 100 TW 掺钛蓝宝石飞秒激光器 SILEX-I 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: 激光能量  $E = 2 \sim 5 \text{ J}$ , 波长为 800 nm, 主激光带宽为 50 nm, 脉冲宽度为 26.7 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 5 维步进电机控制, 确保每发激光能够打在靶面的不同位置处。抛物面镜架由另一个 3 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 ( $p$  偏振) 与靶面法线成  $23^\circ$  角, 聚焦直径为  $30 \sim 50 \mu\text{m}$ , 聚焦后的激光功率密度为  $(2 \sim 5) \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 。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 5.6。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 光自准直系统, 用以模拟飞秒激光并对 OAP 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约  $10^{-2} \text{ Pa}$ 。

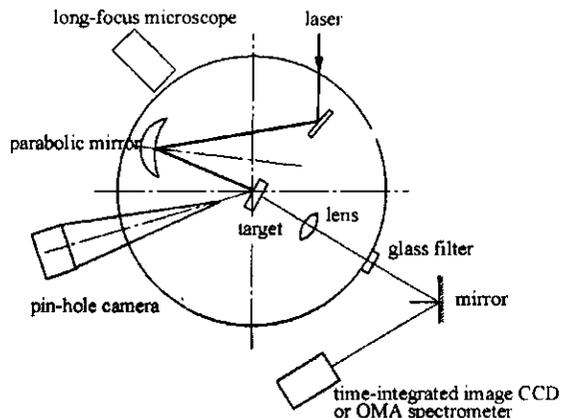


Fig. 1 Scheme of the experimental setup

图 1 实验布局

\* 收稿日期 2006-07-08; 修订日期 2006-11-23

基金项目 国家自然科学基金资助课题(10535030); 四川省青年科技基金资助课题(06ZQ026-053); 成都医学院科研基金资助课题(05Z2005-001)

作者简介 王光昶(1969—), 男, 博士, 副教授, 主要从事超短超强激光与等离子体相互作用研究, wjgchang@tom.com。

通讯作者 郑志坚(1941—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事惯性约束聚变与强场物理研究。

## 2 实验结果及分析

图 2 是针孔相机测量的激光焦斑和扫描图,该图显示焦斑直径为 30 ~ 50  $\mu\text{m}$ ( FWHM )。

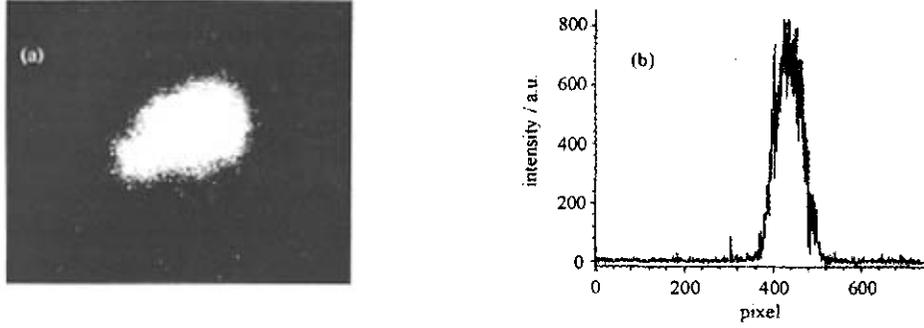


Fig. 2 Image of laser focus

图 2 激光焦斑

根据文献 [8] 可知,非相干渡越辐射( ITR )的光强分布近似为

$$\frac{d^2 \varepsilon_{\text{ITR}}}{d\omega d\Omega} \approx \frac{3e^2 N}{5\pi^2 c T} \int_0^\infty \exp(-\varepsilon/T) \beta^2 \sin^2 \theta d\varepsilon \propto \sin^2 \theta \quad (1)$$

而相干渡越辐射( CTR )的光强分布近似为<sup>[8]</sup>

$$\frac{d\varepsilon_{\text{CTR}}}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2 N^2}{\pi^2 c T^2 t_0^2} \sin^2 \theta \exp(-q^2 a^2) | \tilde{g}(\omega, \theta, T, d) |^2 \quad (2)$$

式中:  $N$  为电子数,  $\omega$  是辐射频率,  $\Omega$  是辐射立体角,  $\varepsilon$  是辐射强度,  $T$  是超热电子温度,  $c$  是光速,  $\lambda_0 = d/c$ ,  $d$  为相邻两个电子微脉冲之间的距离。

事实上,超热电子束所产生的渡越辐射是非相干与相干渡越辐射谱线在空间位置上的叠加,可以表示为

$$\frac{d\varepsilon}{d\omega d\Omega} = \frac{Ne^2}{\pi^2 c} [ Z_{\text{ITR}}(\theta) + Z_{\text{CTR}}(\omega, \theta) ] \quad (3)$$

又根据文献 [9] 的模拟结果可知,非相干的渡越辐射强度与  $N$  成正比,而相干渡越辐射则与  $N^2$  成正比。二者相比,非相干的渡越辐射极弱,在叠加的渡越辐射谱线中,它作为背景噪音,淹没在较强的渡越辐射之下。因此,叠加的渡越辐射仍然以相干的渡越辐射为主,出现在较小的观测角范围内。基频渡越辐射与二倍频渡越辐射相比,辐射较强,发射的立体角也比较大。

图 3 是光学 CCD 相机测量的 20  $\mu\text{m}$  厚 Ta 靶渡越辐射光斑像。因此,从图 3 的测量结果可以看出,超热电子在穿越靶后表面与真空的界面时发生了较强的渡越辐射,其光斑呈现较平滑的圆形结构,而且中心亮度高于周围,显然包含了非相干与相干渡越辐射的成份,与理论模拟结果比较接近。这说明等离子体中产生的超热电子在靶中输运时,由于只穿过一个靶与真空的界面,只有一束超热电子穿出了靶的后表面,渡越辐射光斑比较平滑。

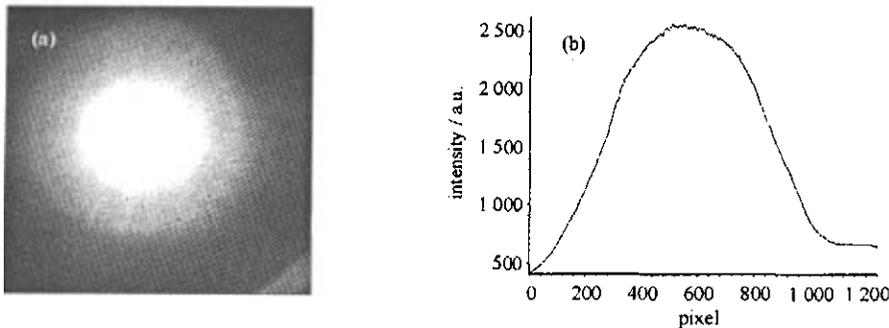


Fig. 3 Pattern of optical CCD integrated image of target of 20  $\mu\text{m}$  thick Ta

图 3 20  $\mu\text{m}$  厚 Ta 靶光学 CCD 积分成像图案

图 4 给出光学 CCD 相机测量的 100  $\mu\text{m}$  厚 Ta 靶渡越辐射光斑像。渡越辐射光斑呈现出星状结构,光斑变得较小,与高能质子发射出现的星状结构<sup>[10]</sup>极其相似。原因在于(1)超热电子在固体靶中输运时,由于自生电磁场和碰撞效应的影响,将产生超热电子成丝,这些成丝的超热电子将不断相互靠近,在纵向磁场的作用下产生合并,因而导致渡越辐射光斑变小(2)在 CCD 前挡有  $0^\circ$  800 nm 全反射镜,滤除了渡越辐射的基频成分,

因而辐射光斑变小,这与理论模拟结果<sup>[9]</sup>一致。由此可见,渡越辐射光斑出现星状结构,是由于超热电子成丝并在穿出靶的背表面后,导致一个星形的鞘电场,这个鞘电场对穿出靶背面的超热电子束团进行调制,从而也导致最终产生质子发射的星状结构。

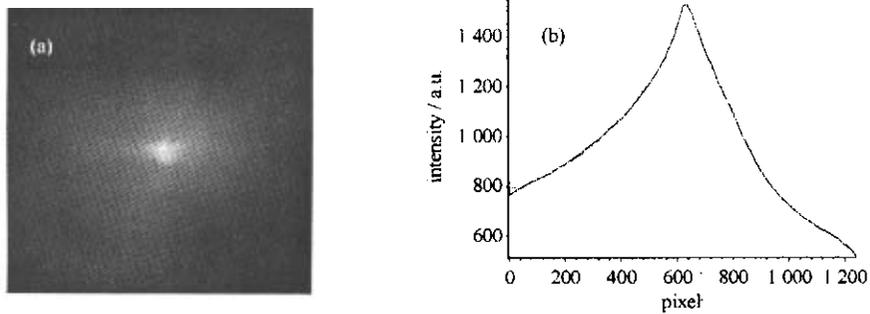


Fig. 4 Pattern of optical CCD integrated image of target of 100  $\mu\text{m}$  Ta

图 4 100  $\mu\text{m}$  Ta 靶光学 CCD 积分成像图案

图 5 是光学 CCD 相机测量的 10  $\mu\text{m}$ Ta + 10  $\mu\text{m}$ Cu + 5  $\mu\text{m}$ Ta 复合靶渡越辐射光斑像。渡越辐射光斑虽然也呈现大致的圆形结构,但光斑变得较大,而且极不均匀,中间有很明显的光斑分裂,隐约有两个分离的光斑出现。初步分析造成光斑分离的原因是:激光与第一层 Ta 靶相互作用产生超热电子,超热电子在穿越 Ta 靶与 Cu 靶界面时发生了第一次渡越辐射,超热电子在 Cu 靶与第二层 Ta 靶界面处发生了第二次渡越辐射,然后又在 Ta 靶与真空界面处发生了第三次渡越辐射。超热电子在穿越三个不同介质时发生了成丝不稳定性,使得电子束出现了分裂成丝的现象,每束电子束又跨越了多个介质界面,分别发生了渡越辐射,造成了渡越辐射光斑变大,而且有彼此分离的小光斑出现。

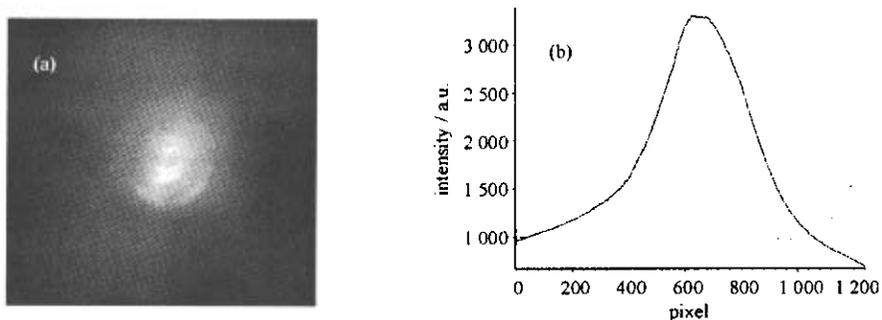


Fig. 5 Pattern of optical CCD integrated image of composite target of 10  $\mu\text{m}$  Ta + 10  $\mu\text{m}$  Cu + 5  $\mu\text{m}$  Ta

图 5 10  $\mu\text{m}$  Ta + 10  $\mu\text{m}$  Cu + 5  $\mu\text{m}$  Ta 复合靶光学 CCD 积分成像图案

由于实验上没有安排对渡越辐射角分布的测量,所以通过成像获得的渡越辐射光斑无法推断超热电子束的温度。电子束的其它信息则可以通过渡越辐射的光谱分布、条纹相机成像等推断。这里我们只是在实验上用成像方法获得超热电子束的传输特性,我们的实验结果与理论模拟结果<sup>[9]</sup>一致。由于理论模型没有考虑超热电子束在靶中的传输过程,只考虑一束电子穿越靶与真空的界面发生的辐射<sup>[9]</sup>,所以理论模型应该更加细化,实验诊断也应该更加优化。

### 3 结 论

我们利用渡越辐射对超热电子束的传输特性进行了实验诊断,并与理论模拟结果进行了比较。实验结果表明,当靶较薄时,只有一束超热电子穿出了靶的后表面,渡越辐射光斑呈现出比较平滑的圆形结构,而且中心亮度高于周围,包含了非相干与相干渡越辐射的成份,与理论模拟结果比较接近;当靶较厚时,由于自生电磁场和碰撞效应的影响,将造成超热电子成丝又合并,再加之滤除了渡越辐射的基频成分,渡越辐射光斑变小,该结果与理论模拟结果一致。又由于靶背表面鞘电场的存在,将导致渡越辐射光斑出现星形结构;当靶为复合靶时,由于超热电子在穿越多个不同介质时发生了成丝不稳定性,使得电子束出现了分裂成丝的现象,每束电子束又跨越了多个介质界面,分别发生了渡越辐射,造成了渡越辐射光斑变大,而且有彼此分离的小光斑出现。由此可见,渡越辐射可为电子束在不同靶中的传输特性的诊断提供有效的判断方法。同时,与理论模拟结果的比较也说明,理论模拟对实验上如何得到渡越辐射、以及通过渡越辐射分析超热电子束的结构信息具有参考意义。

## 参考文献：

- [ 1 ] Santos J J , Amiranoff F , Baton S D , et al. High power laser programme-short pulse plasma physics[ R ]. Central Laser Facility Annual Report ,2001/2002 :4-6.
- [ 2 ] Baton S D , Saantos J J , Amiranoff F , et al. Evidence of ultrashort electron bunches in laser-plasma interactions at relativistic intensities[ J ]. *Phys Rev Lett* ,2003 ,**91** :105001.
- [ 3 ] Popescu H , Baton S D , Amiranoff F , et al. Subfemtosecond , coherent , relativistic , and ballistic electron bunches generated at  $\omega_0$  and  $2\omega_0$  in high intensity laser-matter interaction[ J ]. *Physics of Plasmas* 2005 ,**12** :063106.
- [ 4 ] Zheng J , Tanaka K A , Sato T , 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** :165001.
- [ 5 ] 王光昶 , 郑志坚 , 杨向东 , 等. 飞秒激光-固体靶相互作用中渡越辐射的测量[ J ]. 强激光与粒子束 ,2005 ,**17**( 6 ) 871-874. ( Wang G C , Zheng Z J , Yang X D , et al. Measurement of transition radiation in femtosecond laser-solid target interaction. *High Power Laser and Particle Beams* , 2005 ,**17**( 6 ) 871-874 )
- [ 6 ] 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. ( Wang G C , Zheng Z J , Yang X D , et al. Experimental study of optical emission from the rear surface in ultrashort ultra-intense laser interaction with solid targets. *Acta Physica Sinica* ,2005 ,**54**( 10 ) 4803-4807 )
- [ 7 ] 王光昶 , 郑志坚 , 杨向东 , 等. 超短脉冲激光辐照固体靶背向光发射的测量[ J ]. 光谱学与光谱分析 ,2006 ,**26**( 5 ) 785-789. ( Wang G C , Zheng Z J , Yang X D , et al. Measurement of optical emission from the rear surface with solid targets irradiated by ultrashort pulse laser. *Spectroscopy and Spectral Analysis* ,2006 ,**26**( 5 ) 785-789 )
- [ 8 ] Zheng J , Tanaka K A , Miyakoshi T , et al. Theoretical study of transition radiation from hot electrons generated in the laser-solid interaction[ J ]. *Physics of Plasma* ,2003 ,**10**( 7 ) 2994-3003.
- [ 9 ] 于全芝. 激光等离子体的 Thomson 散射与渡越辐射的理论模拟与实验研究[ D ]. 北京 : 中国科学院物理研究所 ,2005 :89-102. ( Yu Q Z. Thomson scattering process in laser-produced plasmas and experimental studies with theoretical simulation of physics. Beijing : Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences ,2005 :89-102 )
- [ 10 ] 蔡达锋. 超短超强激光-等离子体中高能粒子的实验研究[ D ]. 成都 : 四川大学 ,2003 :123-137. ( Cai D F. Experimental studies on high-energy particles produced during the interaction of ultrashort ultra-intense laser pulse with plasma. Chengdu : Sichuan University ,2003 :123-137 )

## Transport characteristic of hot electron bunches in solid targets by transition radiation

WANG Guang-chang<sup>1,2</sup> , DENG Li<sup>1</sup> , ZHENG Zhi-jian<sup>2</sup> , GU Yu-qiu<sup>2</sup> , CHEN Tao<sup>1</sup> , ZHANG-Ting<sup>1</sup>

( 1. Teaching and Research Section of Physics , Chengdu Medical College , Chengdu 610081 , China ;

2. Research Center of Laser Fusion , CAEP , P. O. Box 919-986 , Mianyang 621900 , China )

**Abstract** : For exploring the transport characteristic of hot electron bunches , the integrated image pattern of optical transition radiation were measured at the normal direction of the rear side of targets employing the optical CCD camera. The experiment was carried out on the 100 TW laser. The transition radiation facula on the rear side of a 20  $\mu\text{m}$  thick target Ta was a smooth round structure with the center brighter than the periphery , indicating incoherent transition radiation and coherent transition radiation , which is close to the results of the theoretical simulations. For a 100  $\mu\text{m}$  thick target Ta , the facula was a star-structure and became smaller , which resembles a star-structure of the energetic proton emission. For a 10  $\mu\text{m}$  Ta + 10  $\mu\text{m}$  Cu + 5  $\mu\text{m}$  Ta composite target , the facula was a ring structure and became bigger and non-uniform , looked like two apart faculae.

**Key words** : Transition radiation ; Hot electron bunches ; Transport characteristic ; Femtosecond laser