

# 利用渡越辐射研究超热电子在固体靶中的运输过程\*

王光昶<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 610083)

2) 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2006 年 4 月 17 日收到, 2006 年 6 月 26 日收到修改稿)

为了探索超热电子的运输过程, 在 100 TW 掺钛蓝宝石飞秒激光器上利用光学 CCD 相机和 OMA 光学多道分析仪, 分别在靶背表面法线方向测量了光发射空间分布图案和光谱. 实验测量结果显示, 光发射空间分布图案呈圆盘状, 在圆盘中明亮而强的光信号呈局部化分布, 该现象表明, 超热电子在运输的过程中存在成丝效应, 引起严重的不稳定性, 光发射光谱在 3 倍频和 3/2 倍频附近出现尖峰, 分别是 3 次谐波和 3/2 次谐波, 这一现象归因于超热电子束在传输的过程中产生的微束团而引起的相干渡越辐射 (CTR); 光发射光强随靶厚度的增加而减小.

关键词: 超热电子, 相干渡越辐射, 运输, 不稳定性

PACC: 5250J, 5270K

## 1. 引 言

自从点火概念提出以来, 与快点火概念相关的物理研究已成为激光惯性约束聚变研究的前沿热点问题. 对于惯性约束聚快点火方案, 超热电子的产生和运输及能量沉积研究是目前最受关注的课题之一<sup>[1,2]</sup>. 因为超短超强激光产生的超热电子电流很大 (有时远远超过 Alfvén 极限), 持续时间短, 涉及高密度, 在运输中伴随着强烈的电场和磁场, 再加之 wibel 不稳定性的成丝效应, 都将严重影响超热电子的运输和能量沉积效率, 使得快点火涉及到的超热电子运输和能量沉积的物理过程变得异常复杂, 有许多物理问题需要解决. 超热电子产生、运输涉及到固体密度等离子, 因此高密度区的运输过程实验探测就显得非常重要, 目前, 外流的超热电子的探测手段已有很多<sup>[3-7]</sup>, 但靶内部传输的超热电子的探测手段还很有限, 比较成功的实验是 Wei 等人<sup>[8]</sup>做的一个高强度激光与固体靶相互作用中 wibel 不稳定性探测实验, 对高强度激光产生的超热电子束而引起的 wibel 不稳定性的精细结构进行实验探测, 观测到了远离靶法线的超热电子成丝现象, 但没有对超热电子运输的横断面进行探测. Santos 等人<sup>[9]</sup>提出用超热电子运输穿越固体靶背向的渡越辐射诊断

超热电子运输的横断面, 并给出了靶厚 35—400  $\mu\text{m}$  的渡越辐射的空间分布图. 日本大阪大学激光工程学院 Zheng 等人<sup>[10]</sup>对超热电子引起的相干渡越辐射 (CTR) 进行实验研究, 他们观测到了在波长处的光谱呈现出狭窄的尖峰结构, 并得出光辐射是由于共振吸收加热机理产生的超热电子所致. 在 Wang 等人<sup>[11]</sup>的研究中, 他们的测量集中在 300—500 nm 之间的光发射上, 利用光学 CCD 相机和 OMA 光学多道分析仪直接测量光发射, 并确定明亮局部化光信号就是光学渡越辐射 (OTR), 而在 400 nm ( $2\omega$ ) 附近出现的锐利尖峰应归因于超热电子束中的微束团引起的 CTR. 与 Wang 等人测量结果不同, 我们的测量结果是 OTR 的 3 次谐波和 3/2 次谐波, 这个结果的产生, 是由于超热电子在不同的加热机理中产生特有的微束团运输穿越固体靶在背表面引起的 CTR, 由于加热机理不同, 就会出现不同的谐波结构.

## 2. 实验设置和方法

实验是在中国工程物理研究院 (CAEP) 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 3 J, 波长 800 nm, 主激

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10535030) 和四川省青年科技基金 (批准号: 06ZQ026-053) 及成都医学院科研基金 (批准号: 05Z2005-001) 资助的课题.

† E-mail: wgchang@tom.com

光带宽 50 nm,脉冲宽度 30 fs,靶室的真空度为  $1.5 \times 10^{-2}$  Pa.

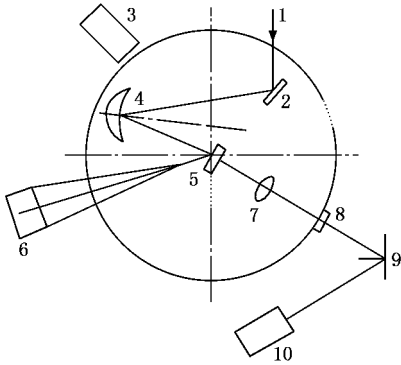


图1 实验布局简图 1为激光,2为镀膜反射镜,3为长焦距显微镜,4为离轴抛物面镜,5为靶,6为针孔相机,7为空间分辨聚焦镜,8为滤光片,9为平面反射镜,10为 CCD 相机或 OMA 光学多道分析仪

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.

实验采用平面铜膜靶,CCD 相机测量所需厚度分别为 3,7,15,30,50,80  $\mu\text{m}$ ;OMA 光学多道分析仪测量所需厚度为 17.78  $\mu\text{m}$  和 7  $\mu\text{m}$ .采用针孔配合 X 射线 CCD 相机测量激光焦斑,典型的测量结果如图 2,所测焦斑直径约为 48  $\mu\text{m}$  (FWHM).

靶室外放置光学积分成像 CCD 相机或高分辨率 (0.1 nm) 的 OMA 光学多道分析仪,分别在靶背法



线方向进行测量.铜膜靶表面光发射信号由空间分辨装置(消色差光学透镜)聚焦成像并引到 CCD 或者 OMA 谱仪的狭缝上.光学 CCD 相机或 OMA 谱仪的输出端与计算机结合并连接图像采集卡,这样,渡越辐射光信号由计算机来记录.

### 3. 实验结果

实验中激光与靶法线方向成  $21^\circ$  角入射到铜膜靶面上,P 偏振.

#### 3.1. 光学 CCD 相机测量结果

实验参数是:激光最大能量为 3 J,靶面激光峰值功率密度约为  $I = 3.7 \times 10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>,铜膜靶厚度分别为 3,7,15,30,50,80  $\mu\text{m}$ .

图 3(a)~(f)是在靶背表面法线方向测得光发射积分成像的空间分布图,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再增大的趋势.它也反映了超热电子束流横断面空间的分布情况.

图 4 是对图 3 所测实验数据进行处理,黑点代表实验数据点.从图 4 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.但 7  $\mu\text{m}$  厚度靶的强度比 3  $\mu\text{m}$  厚度靶强度还高,并且大约在 10  $\mu\text{m}$  处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.

#### 3.2. OMA 谱仪测量结果

1)实验参数为:激光能量为 1.92 J,脉宽 30 fs,靶面激光峰值功率密度  $I \approx 3 \times 10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>,铜膜靶厚 17.78  $\mu\text{m}$ ,所测结果如图 5.

2)实验参数为:激光能量为 3 J,靶面激光峰值

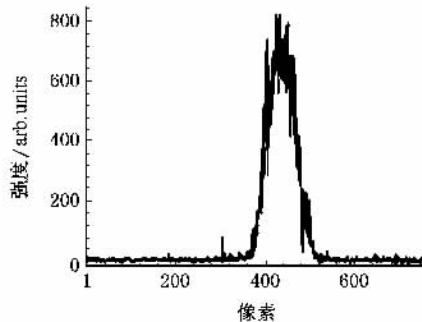


图2 激光焦斑和扫描图

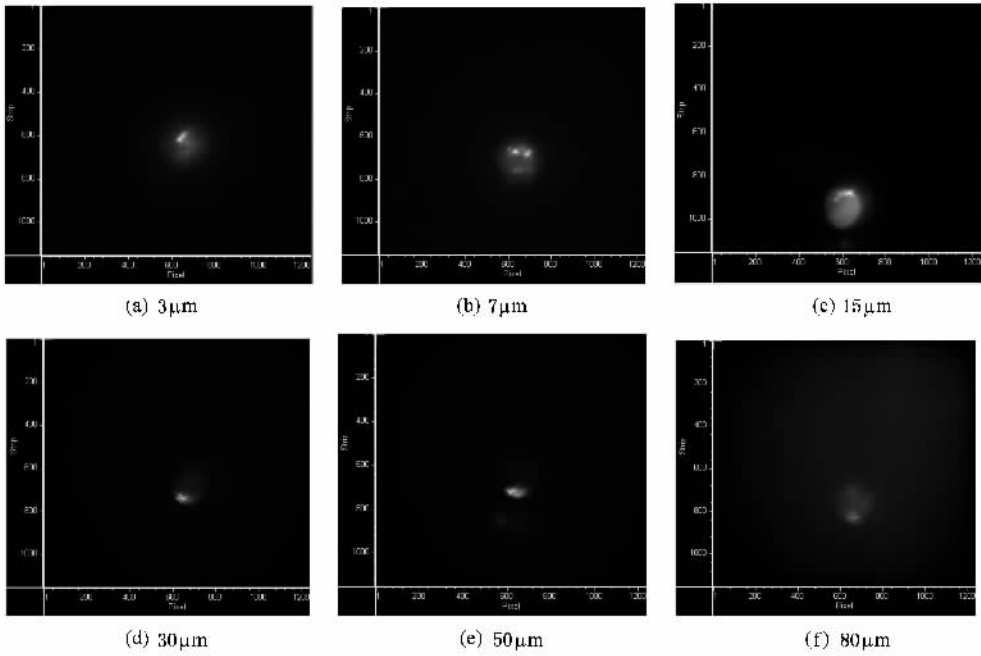


图 3 光发射积分成像空间分布

功率密度  $I \approx 5 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ , 铜膜靶厚  $7 \mu\text{m}$ , 在探测

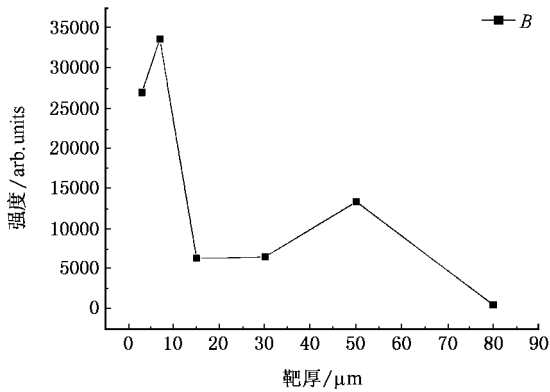


图 4 光发射强度与靶厚度的关系

光路中挡有两块  $800 \text{ nm } 0^\circ$  全反射镜, 所测结果如图 6.

图 5 和图 6 是在靶背表面法线方向测得 CTR 光谱图, 光谱分别是 3 次谐波 ( $3\omega_0$ ) 和  $3/2$  次谐波 ( $3\omega_0/2$ ), 最强的尖峰分别对应  $267 \text{ nm}$  和  $533 \text{ nm}$ .

### 4. 分析与讨论

通过对靶背表面光发射产生的物理机理进行分析可知, 首先, 我们可以排除入射激光直接进入的可能性, 因为靶不透明. 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: 冲击波发光、黑体热辐射发光、同步加速器辐射发光. 图 3 所

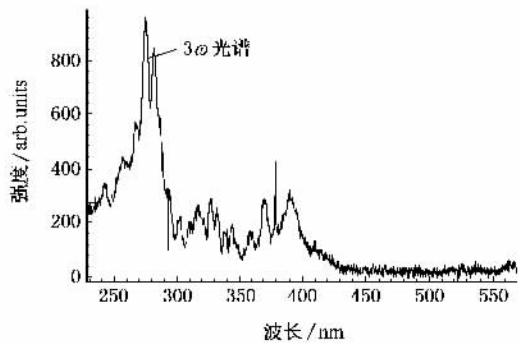


图 5 CTR 的 3 次谐波 (a) 横坐标为波长, 纵坐标为一维空间方向 (b) 横坐标为波长, 纵坐标为相对强度

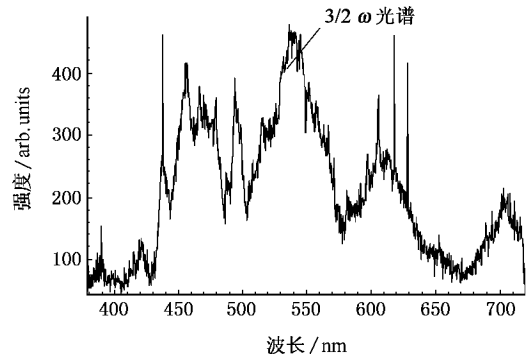
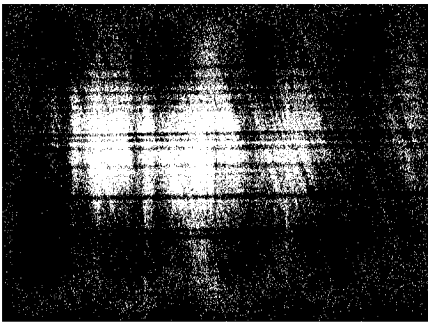


图6 CTR的3/2次谐波 说明同图5

测光发射信号,就有可能是包括渡越辐射在内的几种发光机理光信号之和。根据 Santos 等人<sup>[12]</sup>和 Baton 等人<sup>[13]</sup>对靶背表面探测到的光发射信号观察结果可知,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 OTR。又根据 Zheng 等人<sup>[14]</sup>的理论计算可知,OTR 包括非相干渡越辐射(I TR)和 CTR,CTR 远远大于 I TR,CTR 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则是 CTR 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,超热电子在传输的过程中存在成丝效应,是一种不稳定性的表现,说明超热电子束并不均匀分布。

超短超强激光与固体靶相互作用在靶的前表面产生大量的超热电子,超热电子形成的电流在靶内传播,远大于 Alfvén 极限电流,若靶的厚度不大时,超热电子将从靶的后表面穿出形成渡越辐射。单个电子在单位频率间隔和单位立体角内的 OTR 可表示为<sup>[14]</sup>

$$\frac{d^2 K(\omega, \theta)}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2 \beta^2}{4\pi^2 c} \cdot \frac{\sin^2 \theta}{1 - \beta^2 \cos^2 \theta}, \quad (1)$$

其中,  $\beta = v/c$ ,  $\theta$  为渡越辐射的出射角。对一束数量为  $N$  的电子微束团的渡越辐射强度为

$$I_{\text{total}} = K(\omega) [N + N(N-1) f(\omega)], \quad (2)$$

其中  $f(\omega)$  为电子束的纵向分布函数  $S(z)$  的空间自相关,即

$$f(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} dz S(z) e^{i\omega z/c} \right|^2. \quad (3)$$

由于超短超强激光产生的超热电子可看成间隔周期为激光周期的  $\delta$ -微脉冲,每个脉冲的电子数量为  $N_n$ ,具有 Maxwellian 速度分布,其温度符合定标律:  $T_{\text{hot}} = 100(I_{17} \lambda^2)^{1/3} \text{ KeV}$ ,其中,  $I_{17}$  以  $10^{17} \text{ W/cm}^2$  为单位的激光功率密度,  $\lambda$  为激光波长。则  $S(z) = \sum_0^n N_n \delta(z - 2\pi n v / \omega_0)$ 。在(2)式中,第1项为所有电子辐射的几何叠加项,第2项为相干项。于是在第2项中出现以激光频率为间隔的强度调制。对于  $3\omega$  或  $3\omega/2$  处的 CRT 的峰值强度  $I_{\text{total}}(3\omega) \propto N^2 f(3\omega)$  或  $I_{\text{total}}(3\omega/2) \propto N^2 f(3\omega/2)$ 。这样可以通过 CTR 强度反映穿过界面的电子束流特性及判定超热电子占主导地位的加热机理。

根据 Zheng 等人<sup>[15]</sup>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 CTR,我们还必须从靶背表面的发光机理加以说明。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,这两种发光机理可以排除。渡越辐射和同步加速器辐射发光都有可能出现尖峰,但是同步加速器辐射发光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[13]中 Baton 等人对实验光谱的分析也说明了这一点。另一方面,在靶的背表面,只有相干渡越辐射才有可能出现 3 次谐波和 3/2 次谐波这种现象。

对图 5 和图 6 的光谱进一步分析可知,谐波产生的原因是由于超热电子在不同的加热机理中产生特有的微束团输运穿越固体靶在背表面引起的 CTR,由于加热机理不同,就会出现不同的谐波结构。图 5 和图 6 的光谱除了谐波之外,还存在强度

弱一些的伴峰结构,这一现象很可能是超热电子在传输的过程中存在成丝效应而引起严重不稳定性的表现,或者是超热电子的加热机理和靶背表面的分离电场和磁场的周期变化机理对超热电子进行重新调制共同作用的结果.

此外,根据我们的实验条件和测量的结果可知,CTR对激光参数的依赖非常敏感,当预脉冲与固体靶相互作用时产生的预等离子体,预等离子体的标长决定产生超热电子束团的加热过程,由于加热机理的不同会产生特有的微束团,那么CTR光谱就不同.我们进一步研究发现,长脉冲和短脉冲与等离子体相互作用时产生的超热电子形成的CTR具有显著的不同.当脉宽越长时(亚ps),CTR光谱呈现出分立的周期结构,即是规则的锐利尖峰;当脉宽越短时(fs),CTR光谱呈现出非周期多峰结构,即是不规则的尖峰.这些现象表明,首先是长短脉冲所产生的超热电子的加热机理与短脉冲的不同,其次是超热电子在传输的过程中存在着各种各样的非线性效应,如碰撞,电场的阻止,自生磁场的箍缩等.当相对论飞秒激光与等离子体相互作用时,超热电子的速度接近光速,集体行为就表现得越来越明显,受电场的阻止远大于碰撞效应,在加之自生磁场的箍缩,就使得超热电子在传输的过程中表现出强烈的非线性,因此所形成的CTR光谱就呈现出不规则结构,即光谱出现多峰或者伴峰结构.

我们从图4的结果又可以看出,随着靶厚度的增加,光发射(渡越辐射)强度呈明显下降的趋势,大

约在 $10\ \mu\text{m}$ 之前光强度下降比较陡, $10\ \mu\text{m}$ 之后光强度下降比较平缓,这一结果与超热电子在固体靶中运输的沉积实验曲线极其相似,即输运到 $10\ \mu\text{m}$ 的距离内超热电子沉积最多,而这一距离恰好与激光的脉冲宽度相近,这一研究结果能为“快点火”方案的设计提供重要的依据.

## 5. 结 论

通过用飞秒激光脉冲照射铜金属薄膜靶,在靶背表面法线方向测量OTR来研究超热电子在固体靶中运输的过程.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发生显著变化,表明超热电子在运输的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;OMA光学多道分析仪测量结果表明,3次谐波和 $3/2$ 次谐波的出现,是由于超热电子在传输过程中在不同的加热机理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,而光谱的谐波及伴峰的出现又表明,当超热电子达到相对论电子时,它的速度接近光速,那么集体效应远大于碰撞效应,强烈的非线性效应和新的加热机理将严重影响超热电子的运输过程.我们只不过对超热电子的运输过程进行了粗略的研究,关于运输的详细时间发展过程及空间发展过程还需要改进实验优化诊断及借助于数值模拟研究才行.

- [1] Gremillet L, Amiranoff F, Baton S D 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 5015
- [2] Pisani F, Bernardinello A, Batani D 2000 *Phys. Rev. E* **62** R5927
- [3] Beg F N, Bell A R, Dangor A E 1997 *Phys. Plasmas* **4** 447
- [4] Key M H, Cable M D, Cowan T E 1998 *Phys. Plasmas* **5** 1966
- [5] Cai D F, Gu Y Q, Zheng Z J, Yang X D, Wen T S, Chun Y S T, Chen H, Jiao C Y, Zhou W M 2003 *High Power Laser and Particle Beams* **15** 575 (in Chinese) [蔡达锋、谷渝秋、郑志坚、杨向东、温天舒、淳于书泰、陈豪、焦春晔、周维民 2003 强激光与粒子束 **15** 575]
- [6] Wang G C, Zheng Z J, Yang X D, Gu Y Q, Huang W Z, Wen T S, Zhang S G, Zhou W M, Ge F F, Jiao C Y 2005 *J. of Opt. Laser* **16** 179 (in Chinese) [王光昶、郑志坚、杨向东、谷渝秋、黄文忠、温天舒、张双根、周维民、葛芳芳、焦春晔 2005 光电子激光 **16** 179]
- [7] Gu Y Q, Cai D F, Zheng Z J, Yang X D, Zhou W M, Jiao C Y, Chen H, Wen T S, Chun Y S T 2005 *Acta. Phys. Sin.* **54** 186 (in Chinese) [谷渝秋、蔡达锋、郑志坚、杨向东、周维民、焦春晔、陈豪、温天舒、淳于书泰 2005 物理学报 **54** 186]
- [8] Wei M S, Beg F N, Dangor A E, Gopal A, Tatarakis M, Krushelnick K, Clar E L 2001/2002 *Central Laser Facility Annual Report* (Palaiseau: Laboratoire Pour) P7
- [9] Santos J J, Amiranoff F, Baton S D, Gremillet L, Koenig M, Martinolli E, Rabec M, Gloaghec Le, Rousseaux C, Batani D, Bernardinello A, Greison G, Hall T 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 025001-1
- [10] Zheng J, Tanaka K. A, Sato T, Yabuuchi T, Kurahashi T, Kitagawa Y, Kodama R, Norimatsu T, Yamanaka T 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 165001-1
- [11] Wang G C, Zheng Z J, Yang X D, Gu Y Q, Liu H J, Wen T S,

- Ge F F , Jiao C Y , Zhou W M , Zhang S G , Wang X X 2005 *Acta . Phys . Sin .* **54** 4803 ( in Chinese ) 王光昶、郑志坚、杨向东、谷渝秋、刘宏杰、温天舒、葛芳芳、焦春晔、周维民、张双根、王向贤 2005 *物理学报* **54** 4803 ]
- [ 12 ] Santos J J , Amiranoff F , Baton S D , Koenig M , Martionlli E , Gremillet L , Popescu H , Batani D 2001/2002 *Central Laser Facility Annual Report* ( Palaiseau : Laboratoire Pour ) P4
- [ 13 ] Baton S D , Saantos J J , Amiranoff F , Popescu H , Gramillet L , Koenig M , Martinolli E , Guilbaud O 2003 *Phys . Rev . Lett .* **91** 5001-1
- [ 14 ] Lai R , Sievers A J 1994 *Phys . Rev . E* **50** R3342
- [ 15 ] Zheng J , Tanaka K A , Miyakoshi T , Kitagawa Y , Kodama R , Kurahashi T , Yamanaka T 2003 *Physics of Plasma* **10** 2994

## Study of transport of hot electrons in solid targets using transition radiation<sup>\*</sup>

Wang Guang-Chang<sup>1,2)†</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 610083 , China )

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

( Received 17 April 2006 ; revised manuscript received 26 June 2006 )

### Abstract

For studying the transport of hot electrons in solid targets by transition radiation , 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 CCD camera and OMA optical multi-channel spectrometer on the 100 TW femtosecond laser facility. The image pattern of spatial distribution has a disc-shape , in which is distributed a bright localized signal , which shows the filament effect during hot electron transport . The spectrum of optical emission has sharp peaks near the 3 and 3/2 multiple of the fundamental frequency , corresponding to the third-order harmonic and 3/2-order harmonics , respectively , which is ascribed to the coherent transition radiation ( CTR ) generated by microbunches of hot electron beams produced in transport . The intensity of transition radiation decreases with the increase of target thickness .

**Keywords :** hot electron , coherent transition radiation , transport , instability

**PACC :** 5250J , 5270K

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10535030 ) , the Science and Technology Fund for Younger of Sichuan Province ( Grant No. 06ZQ026-053 ) and the Science Research Fund of Chengdu Medical College ( Grant No. 05Z2005-001 ) .

<sup>†</sup> E-mail : wgchang@tom.com