

超热电子输运背向光辐射的实验研究^{*}

王光昶^{1)†} 郑志坚²⁾ 谷渝秋²⁾ 温贤伦²⁾
陈 涛¹⁾ 张 婷¹⁾ 张建炜¹⁾

1) 成都医学院信息管理学院, 成都 610083)

2) 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2007 年 10 月 18 日收到, 2008 年 3 月 14 日收到修改稿)

在 100 TW 掺钛蓝宝石飞秒激光器上利用光学 CCD 相机和光学多道分析仪, 分别在靶背法线方向测量了超热电子光辐射的空间分布和光谱. 测量结果显示, 光辐射空间分布图案呈圆环状, 而辐射区域有发散角和光强分布, 且包含多种辐射成分. 光辐射光谱在 800 nm 附近出现尖峰, 是激光的基频(ω_0)波, 这一现象归因于超热电子束在运输的过程中产生的微束团而引起的相干渡越辐射(CTR). 随着激光能量的增加, CTR 光谱峰向红光方向移动, 基频波红移的主要原因是由于等离子体临界面的迅速膨胀. 如果考虑超热电子的产生和加热机理, 共振吸收和真空加热对超热电子都有贡献, 其中占主导地位的加热机理则是共振吸收对电子的加热.

关键词: 超热电子, 光辐射, 共振吸收, 红移

PACC: 5250J, 5270K

1. 引 言

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价值, 因为它关系到包括惯性约束聚变基础上的“快点火”(fast ignition)方案以及固态物质中超热电子的产生和运输^[1-3]. “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^[4], 超热电子在临界物质中运输, 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的目的. 理解超热电子的产生机制及研究其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 附近产生的电子束能量可达几十兆电子伏特, 超热电子可达到 10^{13} 量级, 温度为几十万电子伏特到 2 MeV^[5]. 超热电子在固体靶内输运穿越固体靶在靶背引起不同程度的辐射, 其中渡越辐射是超热电子输运穿越固体靶在背表面引起光辐射成分占据最多的一种电磁辐射, 也是目前最受人们关注的问

题之一. 因为它已经成为研究超热电子束在固态物质中输运过程的强有力手段^[6,7]. 就超热电子的微束团时间特征、截面形状等方面, 渡越辐射是一种可能的、重要的测量工具, 并且人们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作用的一些重要的物理过程与机制. 因此, 本文在靶背方向通过对辐射信号的不同诊断来描述超热电子输运穿越固态物质的行为, 由此确定光辐射的性质和特征.

2. 实 验

实验是在中国工程物理研究院激光聚变研究中心的 100 TW 掺钛蓝宝石超强激光器上进行的. 该激光器采用标准啁啾脉冲放大技术, 技术指标如下: 激光最大输出能量为 5 J, 波长为 800 nm, 主激光带宽为 50 nm, 脉冲宽度为 100 fs, 靶室的真空度为 1.5×10^{-2} Pa. 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

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10535030)、四川省青年科技基金(批准号: 06ZQ026-053)和成都医学院科研基金(批准号: 05Z22005-001)资助的课题.

[†] E-mail: wgchang@tom.com

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.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.

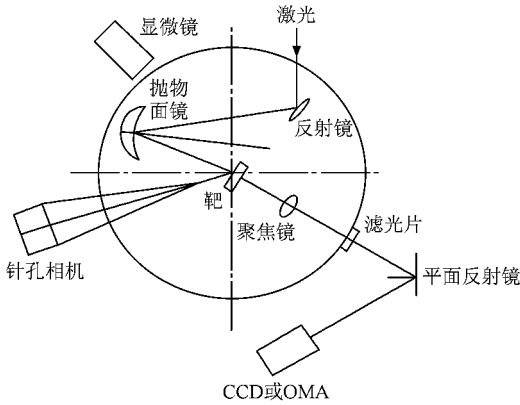


图 1 实验布局示意图

实验采用平面铜膜靶,利用光学 CCD 相机和光学多道分析仪(OMA)分别测量超热电子光辐射空间分布和光学渡越辐射(OTR)光谱.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 所示,所测焦斑直径约为 $38 \mu\text{m}$.

靶室外放置光学积分成像 CCD 相机或高分辨率 (0.1 nm) 的 OMA,分别在靶背法线方向进行测量.铜膜靶背表面光辐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 相机或者 OMA 上.光学 CCD 相机或 OMA 的输出端与计算机结合并连接图像采集卡,渡越辐射光信号由计算机来记录.

实验中激光与靶法线方向成 21° 入射到铜膜靶面上, P 偏振.

3. 实验结果

3.1. 光学 CCD 相机测量结果

图 3 是在靶背表面法线方向测得光辐射积分成像的空间分布.实验参数如下:激光能量为 4.16 J ,靶面激光峰值功率密度为 $3.1 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$,铜膜靶厚度为 $20 \mu\text{m}$.从图 3(a)可以看出,光斑图案呈圆环状,而辐射区域有发散角,光强有一定的分布,积

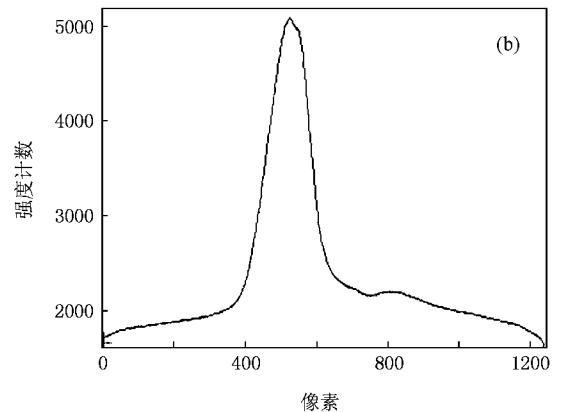
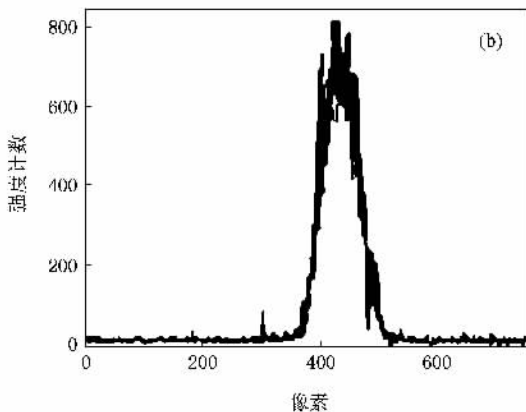
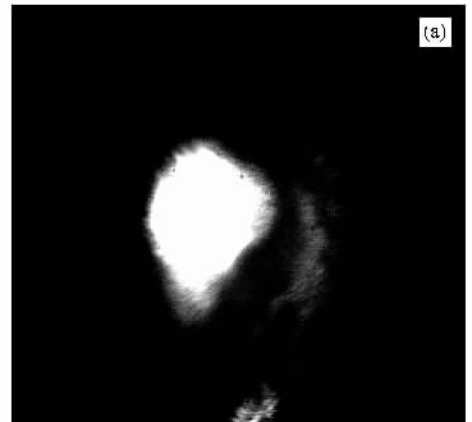
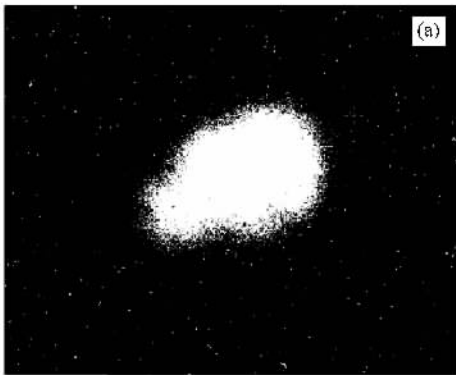


图 2 激光焦斑及强度分布 (a)激光焦斑 (b)激光强度分布

图 3 光辐射积分成像空间分布 (a)光辐射光斑 (b)光辐射强度分布

分成像的空间分布包含有 OTR、黑体热辐射及回旋加速器辐射等多种辐射成分。

3.2. OMA 测量结果

图 4(b)是在靶背表面法线方向测得相干渡越辐射(CTR)的光谱.实验参数如下:激光能量为 2.55 J,脉冲宽度为 100 fs,靶面激光峰值功率密度为 $3.0 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$,铜膜靶厚为 $35 \mu\text{m}$.从图 4 可以看出,最强的光谱出现在 800 nm 附近,对应基频(ω_0)波,最强的光谱线是一个锐利尖峰.图 4(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 4(b)为线阵光谱.

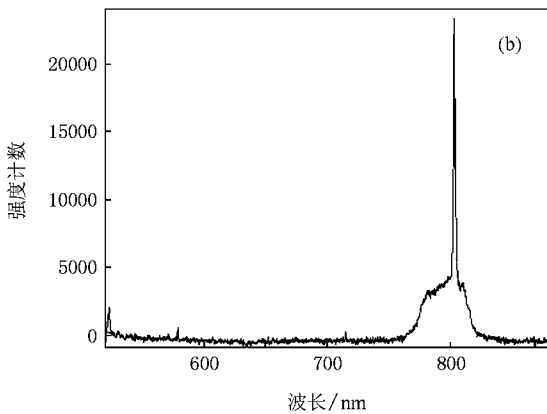
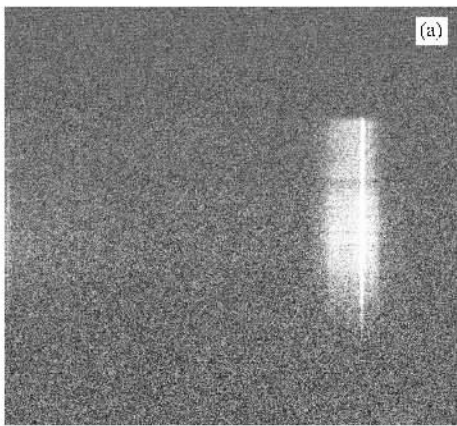


图 4 CTR 基频(ω_0)波光谱 (a)CTR 面阵光谱 (b)CTR 线阵光谱

图 5(b)是在靶厚度不变的情况下,提高激光的输出能量在靶背表面法线方向测得 CTR 光谱.实验参数如下:激光能量为 4.4 J,脉冲宽度为 100 fs,靶面激光峰值功率密度为 $3.57 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$,铜膜靶厚为 $35 \mu\text{m}$.从图 5 可以看出,最强的光谱仍出现在 800 nm 附近,对应的是基频(ω_0)波,最强的光谱线是一个锐利尖峰.将图 5(b)与图 4(b)比较可知,除

了光谱强度提高之外,图 5 的光谱峰明显向长波(红光)方向移动.

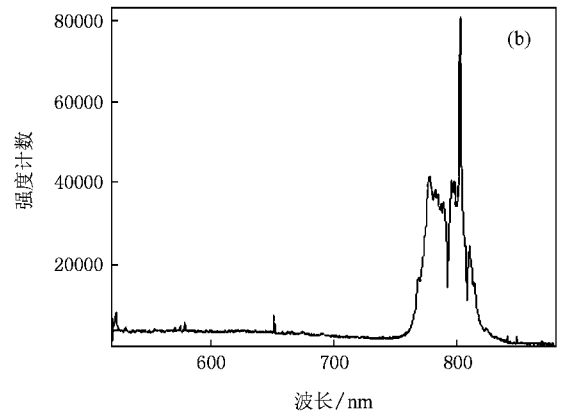
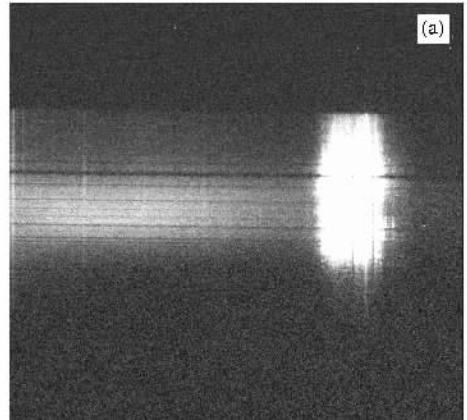


图 5 激光能量提高后的 CTR 基频波(ω_0)光谱 (a)CTR 面阵光谱 (b)CTR 线阵光谱

4. 分析及讨论

通过对靶背表面光辐射产生的物理机理进行分析可知,首先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黑体热辐射发光和同步加速器辐射发光两种.图 3 所示的光辐射信号就有可能是包括渡越辐射在内的几种发光信号之和.根据文献[8,9]对靶背表面探测到的光辐射信号结果可知,圆环中出现明亮而强的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.根据 Zheng 等[10]的理论计算可知,OTR 包括非相干渡越辐射(ITR)和 CTR,CTR 远远大于 ITR,CTR 在实验上更容易探测.因此,我们认为图 3 中明亮而强的光信号应是 CTR 信号.又根据文献[3,11]对靶背表面探测到的光辐射信号可知,图 3 的整个光辐射区域除了有

很强的 OTR 信号之外,黑体热辐射信号同样不能被忽略,它们的存在是因为固体靶被超热电子和(或)回流电子直接加热.根据 Santos 等^[3]对 OTR 信号和同步加速器辐射(快电子离开平面靶造成正的鞘电压,鞘电压将快电子重新拉回靶内约一个德拜长度的距离,它们的旋转重新进入而辐射的电磁波)光信号的能量进行估计,两种辐射模型都能给出与实验值相近的理论估计值.

根据 Zheng 等^[12]对飞秒激光固体靶相互作用中产生的超热电子 CTR 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,CTR 的强度依赖靶的厚度和超热电子温度.根据 Santos 等^[8]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.根据文献[3]的计算公式,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,即

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

这里 p 为电子动量,单位是 $m_e c$; $E_0 = 511 \text{ keV}$; $T_h(r, t)$ 为超热电子有效温度.

根据文献[8]的计算公式,OTR 能量由下列表达式给出:

$$E_\omega \propto N^2 |p(\omega)|^2. \quad (2)$$

这里 N 为超热电子束内部的电子总数, $|p(\omega)|$ 为电子动量,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,辐射大约是半角为 17° 的圆锥范围,这与我们的实验光辐射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^[3],

$$d f(\theta) \propto e^{-\theta^2/\theta_0^2} \sin\theta d\theta. \quad (3)$$

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.

根据 Zheng 等^[10]的理论计算可知,渡越辐射很强是由于光辐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.对图 4 和图 5 的光谱进一步分析可知,基频(ω_0)波产生的原因是由于超热电子在共振吸收或者真空加热机制中产生特有的微束团输运穿越固体靶在背表面引起

的 CTR.在 CTR 中,我们必须从超热电子的产生机制出发加以分析.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,因为等离子体的许多基本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^[13].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 $L = \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dx}\right)^{-1}$,而密度标长又强烈地影响超热电子加热机制^[14].所以,为了确定在我们的实验条件下超热电子的加热机制,首先需要确定预等离子体的密度标长.

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.为了判断占主导地位的加热机制,首先计算激光电场的振幅

$$E_0 = \sqrt{\frac{2I}{\epsilon_0 c}} = 2.75 \times 10^3 I^{1/2}, \quad (4)$$

式中 I 为激光功率密度, ϵ_0 为真空介电常数, c 为光速.将 $I = 3.1 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 代入(4)式可得 $E_0 = 4.84 \times 10^{12} \text{ V/m}$.这样,电子抖动振幅为

$$\begin{aligned} X_{\text{osc}} &= \frac{eE_0}{m_e \omega_0^2} \\ &\approx 0.2\lambda, \end{aligned} \quad (5)$$

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.真空加热要求等离子体标长^[14] $L \approx X_{\text{osc}}$,共振吸收要求^[14] $L \gg X_{\text{osc}}$.对于我们的实验条件,等离子体标长 $L = (50-60)\lambda$ (或 $L = (250-300)X_{\text{osc}}$).因此,共振吸收是主要的加热机制.又由于预等离子体的标长 $L = (250-300)X_{\text{osc}}$,它还不能完全满足 $L \gg X_{\text{osc}}$,同时该标长仅大于电子抖动振幅 X_{osc} 两个数量级,不能排除真空加热机制扮演次要角色.根据 Zheng 等^[12]对飞秒激光固体靶相互作用中产生超热电子的 CTR 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,CTR 强度依赖靶厚度和超热电子温度,共振吸收最佳激光入射角为 20° ,而我们的实验条件中激光入射角为 21° ,表明共振吸收是主要机制.

从图 4 和图 5 的光谱结构可以看出,CTR 光谱的尖峰下面仍有作为背景出现的 ITR 光谱和黑体热辐射光谱,在图 4 和图 5 的面阵图像上它们的表现同样明显.此外,我们还发现随着激光能量的提高,CTR 光谱强度也随之提高,并且 CTR 光谱峰向长波(红光)方向移动.对图 4 和图 5 中光谱基频(ω_0)波

出现红移进行分析认为,基频(ω_0)波辐射的红移是由于相邻微脉冲之间的间隔变大所致,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^[15]

$$L_1 = \beta T, \quad (6)$$

式中 γ 为相对论因子, T 为激光周期,

$$\beta = (1 - \gamma^{-2})^{1/2}.$$

如果临界面以速度 c_s 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^[15]

$$L_2 = (\beta - c_s) \frac{v_p}{v_p + c_s} T, \quad (7)$$

式中 v_p 为光在等离子体中的相速度.相邻微脉冲的间隔改变为

$$\begin{aligned} \Delta L &= L_2 - L_1 \\ &= \frac{c_s(v_p - \beta)}{v_p + c_s} T \\ &> 0. \end{aligned} \quad (8)$$

在临界面附近,当 $v_p \rightarrow \infty$ 时,

$$\Delta L \approx c_s T.$$

因此,临界面运动速度的增大,导致了电子束相邻微脉冲的间隔增大,产生的 CTR 峰向长波长方向移动(红移).红移量满足

$$\Delta\lambda/\lambda_T \approx c_s/\beta, \quad (9)$$

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,相邻微脉冲的间隔改变为

$$\begin{aligned} \Delta L &= L_2 - L_1 \\ &= \frac{c_s(\beta - v_p)}{v_p - c_s} T \\ &< 0. \end{aligned} \quad (10)$$

若相邻微脉冲的间隔减小,产生的 CTR 峰就向短波长方向移动(蓝移).因此,等离子体临界密度面的高速膨胀才是 CTR 光谱谐波峰发生红移或者蓝移的主要原因.

在我们的实验中,没有对激光的二次谐波 CTR 信号进行观测.根据谭世杰等^[16]对不同加热机制产

生的超热电子的 CTR 谐波研究可知,共振吸收(或真空加热)及 $V \times B$ 加热机制在相对论飞秒激光与等离子体相互作用过程中都是可能存在的,根据不同加热机制的大致比例关系就能判定占主导地位的加热机制过程.根据文献 [11] 的报道,不同加热机制产生的超热电子的总能量是造成谐波发射的原因.文献 [11] 的数据显示,约 40% 的电子被激光电场共振吸收(或真空加热)机制在 ω_0 处加速,约 60% 的电子被 $V \times B$ 加热机制在 $2\omega_0$ 处加速.我们的探测器(OMA)只不过是 800 nm(ω_0)波长范围的 CTR 信号进行了探测,并没有对 400 nm($2\omega_0$)波长范围的 CTR 信号进行探测,而 $2\omega_0$ 谐波 CTR 信号很强,是不可忽略的.因此,在以后的实验中要改进实验方法,优化实验诊断设备,对 ω_0 谐波和 $2\omega_0$ 谐波甚至 $3\omega_0$ 谐波等高次谐波的 CTR 信号进行探测,研究不同谐波的强度、能量及不同加热机制所占的比例关系.

5. 结 论

我们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光辐射空间分布和光谱.光学 CCD 相机的测量结果显示,光辐射空间分布图案呈圆环状,而辐射区域有发散角和光强分布,包含有 OTR、黑体热辐射和回旋加速器辐射等多种辐射成分.OMA 测量结果表明,光谱在 800 nm 附近出现尖峰是基频(ω_0)波,即 CTR.这是由于超热电子在传输过程中由共振吸收或真空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.随着激光能量的增强,光谱峰随之增强并发生红移,是由于等离子体临界面的迅速膨胀所致.如果考虑超热电子的产生和加热机理,共振吸收和真空加热对超热电子都有贡献,其中占主导地位的加热机理则是共振吸收对电子的加热.我们只是对超热电子行为进行了粗略的研究,关于输运的详细时间演化过程及空间发展过程还需要改进实验方法并借助于数值模拟研究.

[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] Santos J J, Amiranoff F, Baton S D, Gremillet L, Koenig M, Martinolli E, Rabec M, Le Gloahec M R, Rousseaux C, Batani D, Bernardinello A, Greison G, Hall T 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89**

- 025001
- [4] Tabak M , Hammer J , Glisky M E 1994 *Phys. Plasmas* **1** 1626
- [5] Wei M S , Beg F N , Dangor A E , Gopal A , Tatarakis M , Krushelnick K , Clar E L 2003 2001/2002 *Central Laser Facility Annual Report* (Palaiseau : Laboratoire Pour) p7
- [6] Wang G C , Deng L , Zheng Z J , Chen T , Zhang T 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 241 (in Chinese) [王光昶、邓 利、郑志坚、陈 涛、张 婷 2007 强激光与粒子束 **19** 241]
- [7] Wang G C , Zheng Z J , Gu Y Q , Chen T , Zhang T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 982 (in Chinese) [王光昶、郑志坚、谷渝秋、陈 涛、张婷 2007 物理学报 **56** 982]
- [8] Santos J J , Amiranoff F , Baton S D , Koenig M , Martionlli E , Gremillet L , Popescu H , Batani D 2003 2001/2002 *Central Laser Facility Annual Report* (Palaiseau : Laboratoire Pour) p4
- [9] Baton S D , Santos J J , Amiranoff F , Popescu H , Gramillet L , Koenig M , Martinolli E , Guilbaud O 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 5001
- [10] Zheng J , Tanaka K A , Miyakoshi T , Kitagawa Y , Kodama R , Kurahashi T , Yamanaka T 2003 *Phys. Plasmas* **10** 2994
- [11] Popescu H , Baton S D , Amiranoff F , Santos J J , Gremillet L , Koenig M , Martionlli E 2005 *Phys. Plasmas* **12** 063106
- [12] 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
- [13] Bastiani S , Rousse A , Geindre J P 1997 *Phys. Rev. E* **56** 7179
- [14] Alexei Z , Akira S , Takayuki U 2000 *Phys. Rev. E* **62** 7232
- [15] Yuan X H , Li Y T , Xu M H , Yu Q Z , Wang S J , Zhang J , Zhao W , Wang G C , Wen X L , He Y L , Zhang S G , Wang X X , Huang W Z , Gu Y Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5362 (in Chinese) [远晓辉、李玉同、徐妙华、于全芝、王首钧、张 杰、赵 卫、王光昶、温贤伦、何颖玲、张双根、王向贤、黄文忠、谷渝秋 2006 物理学报 **55** 5362]
- [16] Tan S J , Zheng J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7132 (in Chinese) [谭世杰、郑 坚 2007 物理学报 **56** 7132]

Experimental study of optical radiation of hot electrons transport in targets at the rear-side radiation *

Wang Guang-Chang^{1)†} Zheng Zhi-Jian²⁾ Gu Yu-Qiu²⁾ Wen Xian-Lun²⁾
Chen Tao¹⁾ Zhang Ting¹⁾ Zhang Jian-Wei¹⁾

^{1) †} Faculty of Information and Management , Chengdu Medical College , Chengdu 610083 , China)

^{2) †} Research Center of Laser Fusion , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China)

(Received 18 October 2007 ; revised manuscript received 14 March 2008)

Abstract

This paper reports the image pattern of spatial distribution and spectrum of optical radiation measured in the normal direction from the rear side of the target employing optical CCD camera and optical multi-channel analyser on the 100 TW femtosecond laser facility. The image pattern of spatial distribution has a ring-shape , the region of optical radiation has larger radiation angle and optical intensity distribution , and the radiation is comprised of many components. The spectrum of optical radiation shows a sharp peak near 800 nm , which is attributed to the laser fundamental (ω_0) , and is ascribed to the coherent transition radiation (CTR) generated by microbunches of hot electron beams generated in transport. With the increase of the laser energy , the peak of the CTR moves further to the long wavelength side , the red shift is caused by the expansion of the critical density surface. The acceleration of hot electron comes mainly from resonance absorption.

Keywords : hot electron , optical radiation , resonance absorption , red shift

PACC : 5250J , 5270K

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10535030) , the Outstanding Yang Researchers Foundation of Sichuan Province , China (Grant No. 06ZQ026-053) and the Scientific Research Foundation of Chengdu Medical College , China (Grant No. 05Z2005-001) .

† E-mail : wgchang@tom.com