

飞秒激光与固体靶相互作用中光辐射 时间特性的实验研究*

王光昶^{1)†} 马春生²⁾ 张建炜¹⁾ 白春燕²⁾ 刘玉红¹⁾ 郑志坚³⁾

1) (成都医学院物理教研室, 成都 610083)

2) (云南思茅师范高等专科学校计科系, 普洱 665000)

3) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2011年6月2日收到; 2011年8月30日收到修改稿)

为了探索光辐射的时间特性, 在 100 TW 掺钛蓝宝石飞秒激光器上利用光学条纹相机, 分别在靶背表面法线方向测量了光辐射的时间积分和时间分辨成像光斑. 实验测量结果显示: 光辐射时间积分成像光斑呈长条状, 而辐射区域有发散角、有光强分布, 包含多种辐射成分; 光辐射的时间分辨成像光斑进一步证明, 渡越辐射 (TR) 是信号强而快, 持续时间短, 为皮秒 (ps) 量级, 是最先到达屏幕上, 并推算出相应的持续时间为 85.5ps. 其他成分光辐射是信号弱而慢, 持续时间长, 为纳秒 (ns) 量级, 是最后到达屏幕上. 光辐射的时间特性能为鉴别和判断 TR 信号提供了新的依据.

关键词: 飞秒激光, 光辐射, 时间特性, 渡越辐射

PACS: 52.38.Ph, 52.38.Hb, 52.50.-b, 52.70.Kz

1 引言

在超强脉冲激光与等离子体相互作用中, TR 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^[1], TR 与电子的运动状态以及电子束的结构有关, 已成为诊断超热电子束的强有力工具. 并且, 人们还能够通过 TR 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理.

TR 就是带电粒子穿越两种不同的介电常数媒质的界面时而产生的一种电磁辐射, 测量 TR, 尤其是相干渡越辐射 (CTR), 可以用来研究自由电子激光中的相对论电子束. 通过测量 CTR 光谱, 可以推测出电子束的许多细微性质, 如微束团, 而这些性质通常无法用别的方法测得. 因为 CTR 光谱与电子束的组成有关, 而电子束的组成又受到超热电子产额的影响, 所以可以通过这种方式来研究超热电子的加热机理. 本文作者^[2]及远晓辉^[3]、于全芝^[4]、谭世杰^[5]等人在有关 TR 的前期工作中, 分

别就上述各种情况进行了大量的理论、实验及模拟研究, 在这些研究工作中, 至少还都没有对 TR 的时间特性进行研究. 然而, 关于 TR 时间特性的实验研究目前在国内、国际上的报道是很少的, 但比较成功的实验是, 2002 年 Santos 等^[6] 做的一个实验, 实验是在 LULT 100 TW 激光装置上完成的, 激光脉宽 350 fs, 波长 1.057 μm , 能量 10 J, 被 $f/3$ 离轴抛物面镜聚焦在法线方向入射到 AL 平面靶, 激光焦斑直径小于 20 μm , 最大功率密度 10^{19} W/cm², 靶背向的光辐射 (370—880 nm) 区域信号被 CCD 相机和条纹相机探测, 给出了靶厚 35 μm 到 400 μm 的 TR 的空间 - 时间分布图. 该实验给出了鉴别 TR 和“黑体”热辐射信号的一种方法: TR 是持续时间很短 (ps 量级) 信号强; 热辐射是持续时间长 (ns 量级) 信号弱. 同时也得出了 TR 和同步加速器辐射模型都能产生相一致的实验结果, 并给出了电子数目具有几百 keV 温度的表示法. 另一个实验是, 2003 年 Baton 等^[7] 也做了一个相似的实验, 他们也获得了在相对论强度上激光等离子体相互作用中

* 国家自然科学基金 (批准号: 10876039), 云南省教育厅科学研究基金 (批准号: 2010Y444) 和四川省教育厅重点项目科研基金 (批准号: 11ZA203) 资助的课题.

† E-mail: wgchang@tom.com

超短电子束团的证据. 这个实验是在 LULI 100 TW 激光装置上进行的. 脉宽 400 fs, 波长 $1.057 \mu\text{m}$ 激光脉冲, 能量高达 20 J 被聚焦在 $f/3$ 离轴抛物面镜在法线方向入射在 AL 靶上. 激光焦斑直径为 $15 \mu\text{m}$ 到 $20 \mu\text{m}$, 相应的最大功率密度是 $3 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$. 背表面的光辐射被收集在 $f/3.2$ 光学透镜的轴上. 发射区的信号由分光计 -S20 条纹相机探测. 这个实验结果在厚固体靶背表面观测到了激光的二次谐波 ($2\omega_0$). 与这两个实验相比较, 本文的实验有很大的不同: 一是在实验设置、激光参数和固体靶材料上不同, 二是在实验方法上不同. 本文的实验方法主要是利用光学条纹相机来测量光辐射的时间积分静态成像和时间分辨动态成像, 时间分辨的动态成像使得 TR 信号和其他辐射成分信号在时间上能够严格分开.

众所周知, TR 的时间特性的研究在实验上的要求是非常苛刻的, 无论是仪器设备还是实验设计、方法、手段都要求非常高, 成功的概率是可想而知. 因为 TR 信号快持续时间很短, 需要高速相机才能捕捉到, 并且要求信号出现的时间和探测器的响应时间严格同步等.

基于此, 本文首次开展了飞秒激光与固体靶相互作用中 TR 时间特性的实验研究, 在 100 TW 掺钛蓝宝石飞秒激光器上利用光学条纹相机, 在靶背表面法线方向分别测量了光辐射的时间积分和时间分辨成像光斑, 详细研究了光辐射的时间特性, 取得了比较有价值的实验结果, 这将为鉴别和判断 TR 信号提供新的依据.

2 实验

实验设置如图 1 所示. 实验是在中国工程物理研究院激光聚变研究中心国家重点实验室的 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), 该装置提供的各项技术指标为: 激光的波长为 800 nm, 最大能量为 6 J, 脉宽为 26.7 fs, 主激光带宽 50 nm, 最大输出功率为 286 TW, 激光信噪比好于 $1:10^{-5}$, 激光束直径为 140 mm, 离轴抛物面镜全反镜 F 数为 $f/3$ (f 是焦距: 420 mm), 激光经抛物面镜聚焦至靶表面. 靶室外的长焦距显微镜用来对光学焦斑进行实时监测. 针孔相机结合 X 射线 CCD 测量激光在靶面形成的 X 射线焦斑. 采用不同厚度的 Cu 薄膜靶, 靶室的真空度为 $1.5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$.

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 $46 \mu\text{m}$ (FWHM).

靶室外放置光学条纹相机, 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) 聚焦成像并引到条纹相机的狭缝上. 光学条纹相机的输出端与计算机结合并连接图像采集卡, 这样, 光辐射信号由计算机来记录.

光学条纹相机是一种结构复杂而精密的系统设备, 主要由狭缝成像系统、变像管、像增强器、扫描电子线路、高压供电线路、同步触发系统及 CCD 数据采集处理系统等组成, 结构如图 3 所示.

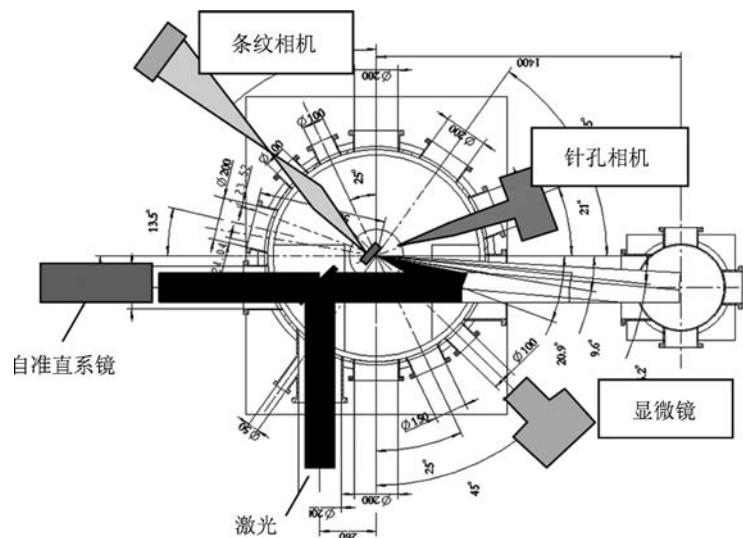


图 1 实验布局简图

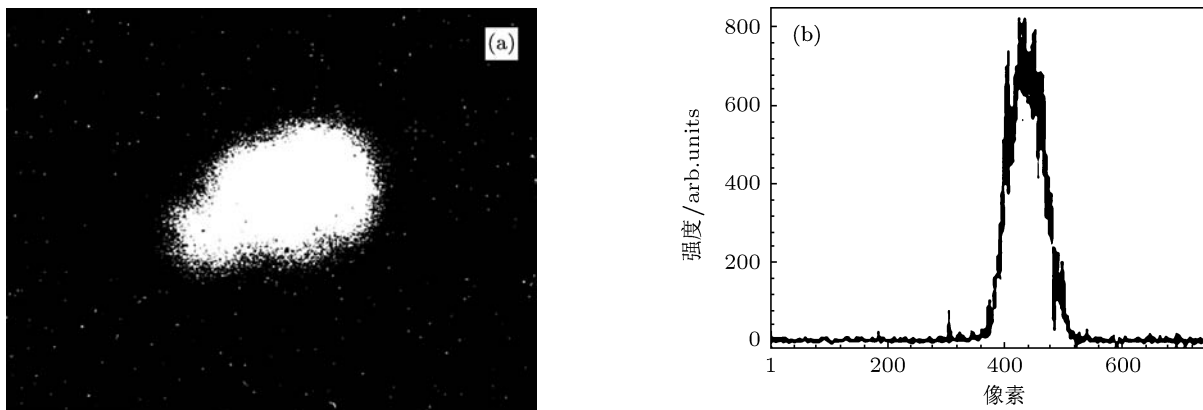


图2 激光焦斑和强度分布 (a) 激光焦斑; (b) 激光强度分布

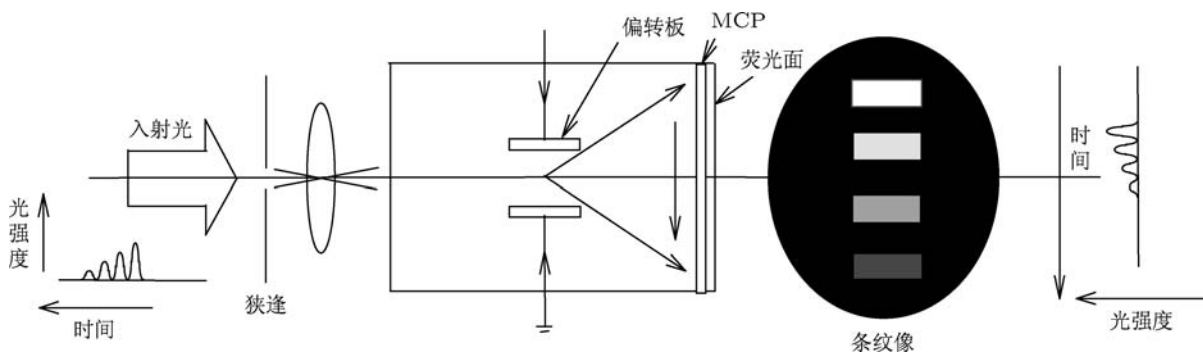


图3 光学条纹相机系统结构图

3 实验结果

实验中激光与靶法线方向成 21° 角入射到铜膜靶面上, P 偏振.

3.1 光辐射时间积分静态像测量结果

实验参数是: 激光能量为 500 mJ, 脉宽 26.7 fs, 靶面激光峰值功率密度约 10^{18} W/cm², 铜膜靶厚 20 μ m, 所测静态成像结果如图 4 所示.

图 4(a) 是光学条纹相机在靶背表面法线方向测量的光辐射的时间积分静态像, 该成像呈条纹状, 中间部分变粗有发散角, 光强也最强, 包含有多种辐射成分. 图 4(b) 为光辐射强度分布状况曲线.

3.2 光辐射时间分辨动态像测量结果

1) 实验参数是: 激光能量为 535 mJ, 脉宽 26.7 fs, 靶面激光峰值功率密度约 10^{18} W/cm², 铜膜靶厚 20 μ m, 所测动态像及强度分布状况结果如图 5 所示.

图 5 是利用光学条纹相机在靶背法线方向测量的光辐射时间分辨动态成像图. 从图中可以看出,

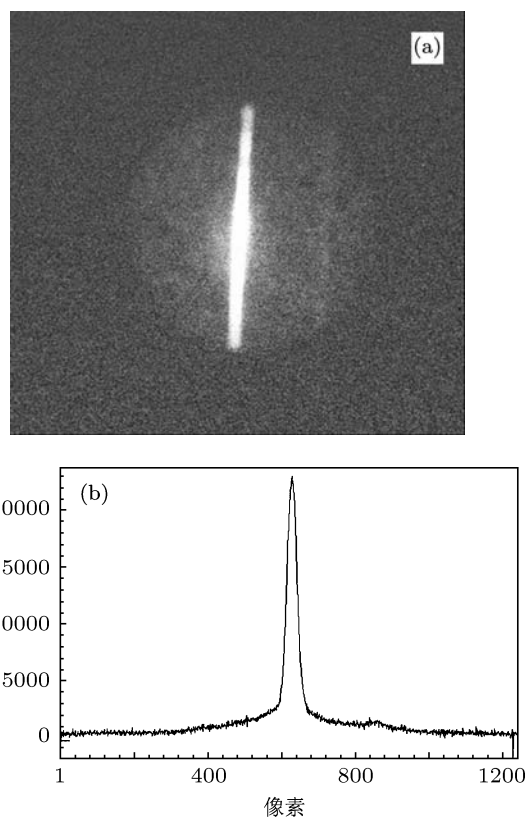


图4 光辐射静态像 (a) 光辐射光斑; (b) 光辐射强度分布扫描图

TR 光斑和其他光辐射光斑在时间上明显地分开了. 图 5(a) 中左侧明亮清晰的条纹状光斑像为 TR, 右侧光强暗一些的区域光斑像为其他成分光辐射信号. 图 5(b) 为光辐射强度分布状况曲线. 图 5 与图 4 进行比较可知, 无论是辐射光斑像还是扫描的强度分布曲线, 光辐射动态的时间分辨成像与静态的时间积分成像结果是截然不同的.

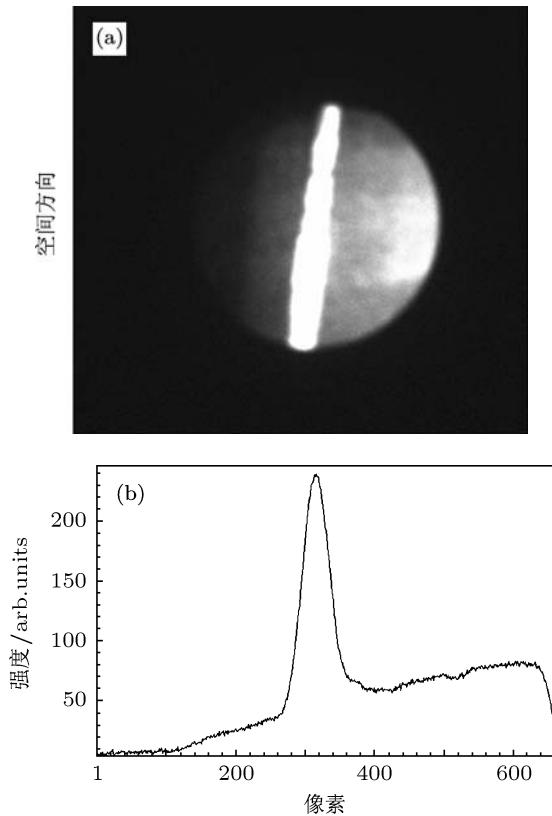


图 5 光辐射动态像 (a) 光辐射光斑; (b) 光辐射强度分布扫描图

2) 实验参数是: 激光能量为 2.2 J, 脉宽 26.7 fs, 靶面激光峰值功率密度约 10^{18} W/cm², 铜膜靶厚 20 μm, 所测动态像及强度分布状况结果如图 6 所示.

图 6 也是利用光学条纹相机在靶背法线方向测量的光辐射时间分辨动态成像图. 图 6 与图 5 进行比较, 图 6(a) 中没有出现明亮清晰的条纹状光斑, 说明没有 TR 信号. 而其他辐射比如黑体热辐射、冲击波光辐射等信号则与图 5(a) 中右侧光强暗一些的区域光斑像极为相似. 从图 6(b) 的光辐射强度分布扫描图中也可以看出, TR 信号并没有出现.

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, 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 TR 以外, 在靶背表面产生光学波段的发光现象还有以下几种: 黑体热辐射发光、同步加速器辐射发光、冲击波发光以及超热电子输运穿越固体靶的韧致辐射. 图 4 所测光辐射信号, 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^[8] 和 Baton 等^[7], 对靶背表面探测到的光辐射信号观察结果可知, 长条状中央出现的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 TR. 又根据 Zheng 等^[9] 的理论计算可知, TR 包括非相干渡越辐射 (ITR) 和 CTR, CTR 远远大于 ITR, CTR 在实验上较容易探测, 因此, 我们认为图 4、图 5 明亮而强的光信号则是 TR. 又根据 Santos 等^[6] 和 Popescu 等^[10] 对靶背表面探测到的光辐射信号观察可知, 图 4 整个光辐射区域除了很强的 TR 信号之外, 黑体热辐射信号同样不能被忽略, 它们是存在的是因为固体靶被超热电子和 (或者) 回流电子直接加热. 根据 Santos 等^[6] 对 TR 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部约一个德拜长度相同的距离, 它们的旋转重新进入靶而辐射的电磁波) 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接近的理论估计值.

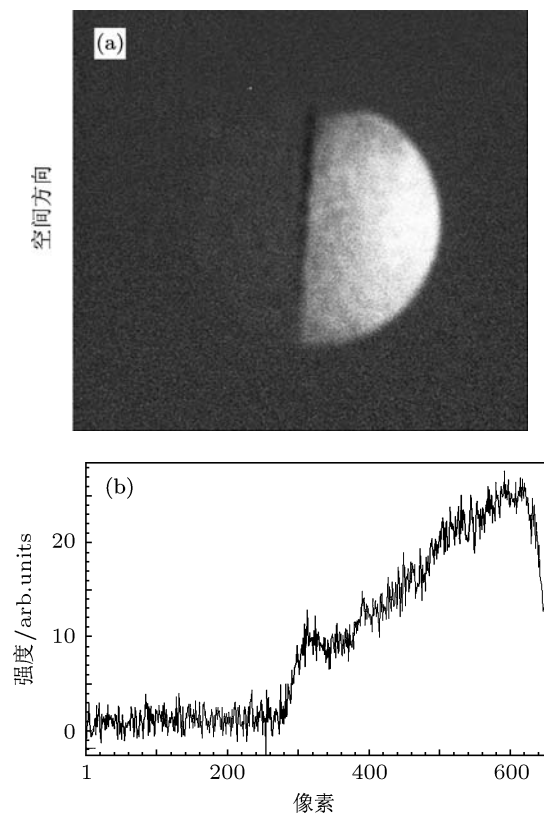


图 6 光辐射动态像 (a) 光辐射光斑; (b) 光辐射强度分布扫描图

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的研究可知, TR 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. 又根据 Santos 等人的计算公式^[6], 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

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

这里 p 是电子动量, 单位是 $m_e c$, $E_0 = 511 \text{ keV}$, $T_h(r, t)$ 是超热电子有效温度. 又根据 Santos 等人的计算公式^[8], TR 能量由表达式给出

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

这里 N 是超热电子束内部的电子总数, $|p(\omega)|$ 是电子动量, 依赖于靶厚度和超热电子能量分布.

根据 Baton 等^[7]对 CTR 产生的条件分析可知, 在靶背表面探测器上总电磁场是个别场的总和, 是来源于每个移动的超热电子. 当这些电子在很短和很窄的束团内部捆成一束时, 这些场加起来对于辐射波长比束团长度大得多时是相干的. CTR 引导更高的发射功率, 粗略地与电子数目的平方 N^2 成正比, 在 TR 不相干的情况中用 N 代替. 当电子在相干的短束团中捆成一束时被时间延迟 δT 分开, 对于波长靠近 $c\delta T$ 光发射是相干的.

在 M 个同样的电子束团被时间延迟分开的情况下, 每个束团包含 P 个电子垂直入射靶表面. 在靶背表面, 在频率 ω 上的 TR 相干强度的一般公式为^[7]

$$I(\omega) = \eta(\omega) P^2 |i(\omega)|^2 \frac{\sin^2 M\omega\delta T/2}{\sin^2 \omega\delta T/2}, \quad (3)$$

其中, $\eta(\omega)$ 是探测器光圈内的单个电子发射的光强, $i(t)$ 是电子通量, 最后一项为 M 个束团产生的场的相干叠加.

在理论估计中, 我们必须进一步假定每个束团具有初始的持续时间 τ , 也就是初始的电流 $\sim \exp(-t^2/\tau^2)$ 和一维麦克斯韦速度分布. 靶背表面上的初始电流 $j(t)$ 由 δ 函数给出. $J(t)$ 是规格化的, 即 $\int j(t) dt = 1$. 方程 (3) 的第三项就变成, $|i(\omega)|^2 = |j(\omega)|^2 e^{-\omega^2\tau^2/2}$, 其中 $j(\omega)$ 是 $j(t)$ 的傅里叶变换.

对于 TR 中的 ITR, 是由每个超热电子穿越固态媒质后发出信号的强度之和^[7]:

$$I(\omega) = \eta(\omega) P M = \eta(\omega) N. \quad (4)$$

根据文献^[6]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 17° 半角的圆

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^[6]

$$df(\theta) \propto e^{-\theta^2/\theta_0^2} \sin\theta d\theta. \quad (5)$$

TR 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.

又根据 Santos 等^[6]和 Baton 等^[7]对快电子输运背向自发辐射的诊断的时间特性研究可知, TR 信号强持续时间非常短, 为皮秒 (ps) 量级; 紧接着其后的其他光辐射信号弱持续时间长, 为纳秒 (ns) 量级. 根据我们的实验条件和实验结果, 对图 5、图 6 进行分析. 我们先推算一下光辐射信号持续的时间值, 这个值由条纹相机的扫描速率决定

$$V = \frac{\Delta t}{Z(\text{ps/pixel})}, \quad (6)$$

这里 Z 为条纹平均峰间隔, pixel 为像素, Δt 为持续时间.

我们所使用的条纹相机的扫描速率为 2.85 ps/pixel , 这样, 我们就可以推算出图 5、图 6 光辐射信号的持续时间.

图 5 中, 条纹相机满屏为 650 pixel . 当条纹相机开始扫时, 经过约 855 ps 最强的 TR 信号才出现, 又经过约 940.5 ps , 其他光辐射信号才出现, 整个 TR 信号持续的时间约为 85.5 ps . 接下来是持续时间更长的信号, 经推算该辐射信号持续的时间约 1040 ps (1.04 ns) 被认为是冲击波发光或者是等离子体自发光等.

图 6 中, 当激光的能量提高到 2.2 J , 并没有测到 TR 信号, 但其光辐射信号还是比较明显, 经推算该信号的持续时间为 1.026 ns , 被认为是光辐射的其他成分.

综合图 5、图 6 的实验结果, 能够为鉴别和判断 TR 信号提供依据.

5 结论

在飞秒激光与固体靶相互作用中, 利用光学条纹相机在固体靶背表面法线方向分别测量了光辐射时间积分静态成像和光辐射时间分辨动态成像. 测量结果显示, 光辐射静态像呈长条状, 而辐射区域有发散角、有光强分布, 包含有 TR、黑体热辐射和回旋加速器辐射、冲击波辐射、韧致辐射等多种辐射成分; 光辐射的时间分辨成像进一步表明, TR 是持续时间短, 为皮秒 (ps) 量级, 信号强; 而其

他光辐射,如冲击波或黑体热辐射发光等信号弱,持续时间长,为纳秒(ns)量级,并推测出了光辐射信号持续的时间值.光辐射的时间分辨成像的测量为鉴别和判断TR信号提供了新的依据.至于几个焦耳的激光能量的TR时间分辨成像没有测成功,可能是测量系统的触发晃动或者是杂散光的干扰而导致同步触发超前或落后而测不到信号的缘故,

我们还需通过改进实验设置,进一步深入研究才行.

感谢中国科学院物理研究所李玉同研究员的实验指导和帮助.感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心六部主任谷渝秋研究员、一部光学组刘永刚高级工程师的技术支持与帮助.

-
- [1] 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]
- [2] 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 2006 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **26** 785 (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 2006 光谱学与光谱分析 **26** 785]
- [3] 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]
- [4] Yu Q Z 2005 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Institute of physics, Chinese Academy of Sciences) 289—102 (in Chinese) [于全芝 2005 博士学位论文 (北京: 中国科学院物理研究所) 第 89—102 页]
- [5] 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]
- [6] Santos J J, Amiranoff F, Baton S D, Gremillet L, Koenig M, Martinolli E, Rabec M, Gloahec M Rabec Le, Rousseaux C, Batani D, Bernardinello A, Greison G, and Hall T 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 025001
- [7] Baton S D, Saantos J J, Amiranoff F, Popescu H, Gramillet L, Koenig M, Martinolli E, and Guilbaud O 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 5001
- [8] 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 2003) p4
- [9] Zheng J, Tanaka K A, Miyakoshi T, Kitagawa Y, Kodama R, Kurahashi T, Yamanaka T 2003 *Phys. Plasmas* **10** 2994
- [10] Popescu H, Baton S D, Amiranoff F, Santos J J, Gremillet L, Koenig M, Martionlli E 2005 *Phys. Plasmas* **12** 063106

Experimental study of time characteristic of optical radiation in femtosecond laser interaction with solid targets*

Wang Guang-Chang^{1)†} Ma Chun-Sheng²⁾ Zhang Jian-Wei¹⁾ Bai Chun-Yan²⁾
Liu Yu-Hong¹⁾ Zheng Zhi-Jian³⁾

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

2) (*Department of Computer Science, Simao Teachers, College Puer, Puer 665000, China*)

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

(Received 2 June 2011; revised manuscript received 30 August 2011)

Abstract

In this paper, the time-integrated image pattern of spatial distribution and time-resolved image of optical radiation are measured in the normal direction from the rear side of targets by employing optical streak camera on the 100 TW femtosecond laser facility. The image pattern of spatial distribution presents a strip-shape: the region of optical radiation has a radiation angle and optical intensity distribution, and contains various components; the time-resolved image of optical radiation presents the time-resolved pattern of the optical radiation, which further proves that the transition radiation is intense, which has short duration (ps) and corresponds to duration of TR of 85.5 ps. and other optical radiations are weak, which have very long duration (ns). The time-resolved characteristic of optical radiation can provide new evidence for discrimination and judgement of TR.

Keywords: femtosecond laser, time characteristic, optical radiation, transition radiation

PACS: 52.38.Ph, 52.38.Hb, 52.50.-b, 52.70.Kz

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 10876039), the Scientific Research Foundation of the Education Department of Yunan Province, China (Grant No. 2010Y444), and the Scientific Research Foundation of the Education Department of Sichuan Province, China(Grant No. 11ZA203).

† E-mail: wgchang@tom.com