

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^{*}

王光昶¹⁾²⁾ 郑志坚²⁾ 杨向东¹⁾ 谷渝秋²⁾ 刘宏杰²⁾ 温天舒²⁾
葛芳芳²⁾ 焦春晔²⁾ 周维民²⁾ 张双根¹⁾²⁾ 王向贤¹⁾²⁾

¹⁾ (四川大学 原子分子物理研究所, 成都 610065)

²⁾ (中国工程物理研究院激光聚变研究中心 绵阳 621900)

(2005 年 1 月 6 日收到 2005 年 3 月 9 日收到修改稿)

从金属箔背表面测量了超热电子穿越固体靶产生的光发射. 光发射积分成像图案呈圆环状, 在圆环边缘附近出现局部化明亮光信号确定为光学渡越辐射; 光发射光谱在 300—500nm 之间出现一系列非周期锐利尖峰, 在 400nm (2ω) 附近的尖峰较明显. 这个光发射取决于 $v \times B$ 加热机制产生的超热电子束的微束团引起的相干渡越辐射 (v 为电子速度, B 为磁场强度), 光强随靶厚度的增加而减小.

关键词: 超热电子, 光发射, 光学渡越辐射, $v \times B$ 加热机制, 相干渡越辐射

PACC: 5250J, 5270K

1. 引 言

在激光惯性约束聚变“快点火”方案^[1]中, 点火激光的能量首先交给超热电子, 超热电子经过输运后到达高密度燃料区的边缘并加热氘氦离子形成热斑而实现点火, 可见, 超热电子对快点火来说是至关重要的. 最近, 关于固体靶外侧超热电子的能谱、角分布、产额及其加热机制等有人已经详细研究过^[2-5]. 但是, 在过稠密等离子体内部, 超短超强激光产生的超热电子所形成的电子流是很强的, 甚至超过 Alfvén 极限^[6]. 如此强的超热电子流是如何输运的, 效率如何, 是否会产生丝效应而引起严重的不稳定性等, 目前有很多物理问题还不是很清楚. 因此, 超热电子的输运问题的研究将直接关系到“快点火”方案的物理设计, 甚至影响到物理可行性. 为此, 利用渡越辐射研究超热电子在固体靶中的输运过程具有重要意义.

渡越辐射就是带电粒子穿越两种不同的介电常数媒质的交界面时而产生的一种电磁辐射, 在光学

波段的电磁辐射称为光学渡越辐射 (optical transition radiation 简称 OTR). 测量渡越辐射, 尤其是相干渡越辐射 (coherent transition radiation 简称 CTR), 可以用来研究自由电子激光中的相对论电子束. 通过测量相干渡越辐射光谱, 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. 因为相干渡越辐射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制. 本文报道对金属箔靶背表面光发射的测量实验. 在 Santos 等人^[7]和 Baton 等人^[8]的研究中, 他们观察到了光谱范围从 370nm 到 880nm 的宽带光发射. 在 Zheng 等人^[9]的研究中, 他们的测量集中在 1053nm 附近的窄带光发射上. 与他们不同, 我们的测量集中在 300—500nm 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. 我们确定明亮局部化光信号是光学渡越辐射 (OTR), 而在 400nm (2ω) 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相干渡越辐射 (CTR).

^{*} 国家自然科学基金项目 (批准号: 10275055, 10275056) 和高等学校博士点基金项目 (批准号: 200220610001) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: xdyangscu.edu.cn

2. 实验设置和方法

实验是在中国工程物理研究院(CAEP)激光聚变研究中心高温高密度等离子体国家重点实验室的 100TW 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: 激光能量 $E = 2 \sim 3\text{J}$, 波长 800nm , 主激光带宽 50nm , 脉冲宽度 30fs , 靶室的真空度为 $1.5 \times 10^{-2}\text{Pa}$.

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.

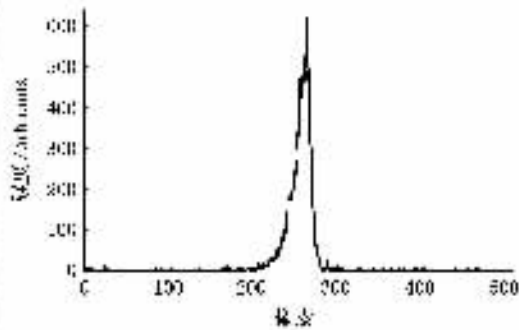
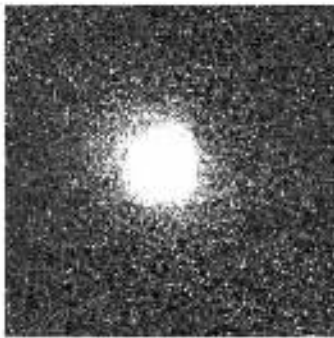


图 2 针孔相机测量的激光焦斑

靶室外放置光学积分成像 CCD 相机或高分辨率(0.1mm)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)经过聚焦成像引到 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, 光发射信号由计算机来记录光谱.

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. 光学 CCD 相机测量结果

实验参数是: 激光能量为 2J , 靶 $\text{Cu} = 3, 7, 15,$

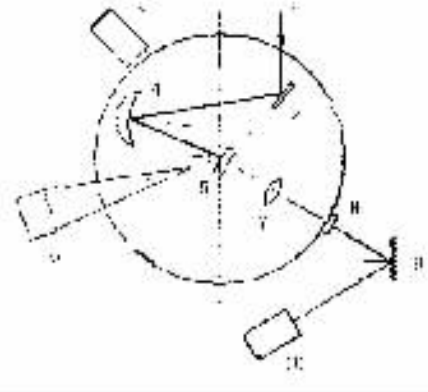


图 1 实验布局简图. 1 激光, 2 镀膜反射镜, 3 长焦距显微镜, 4 离轴抛物面镜, 5 靶, 6 针孔相机, 7 空间分辨聚焦镜, 8 滤光片, 9 平面反射镜, 10 CCD 相机或 OMA 光学多道分析仪

实验采用铜膜靶, 厚度分别为 $3, 7, 15, 30\mu\text{m}$ 和 $30.89\mu\text{m}$. 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 所示. 所测焦斑直径约为 $48\mu\text{m}$ (FWHM).

$30\mu\text{m}$ 经计算, 靶面激光峰值功率密度约为 $I = 3.7 \times 10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$.

图 3(a)–(d) 是在靶背法线方向测得光发射时间积分成像图案. 测得图案范围分别为 $58\mu\text{m}, 190\mu\text{m}, 200\mu\text{m}, 176\mu\text{m}$. 图案呈圆环状, 圆环边缘附近光信号呈明亮局部化分布. 随着靶厚度的增加, 圆环区域先增加后减小.

3.2. OMA 谱仪测量结果

实验参数是: 激光能量为 3J , 靶 $\text{Cu} = 30.89\mu\text{m}$, 经计算, 靶面激光峰值功率密度约为 $I = 5.53 \times 10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$.

图 4 是在靶背法线方向测得光发射散射光谱即 CTR 光谱. 图 4(a) 为面阵光谱, 图中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

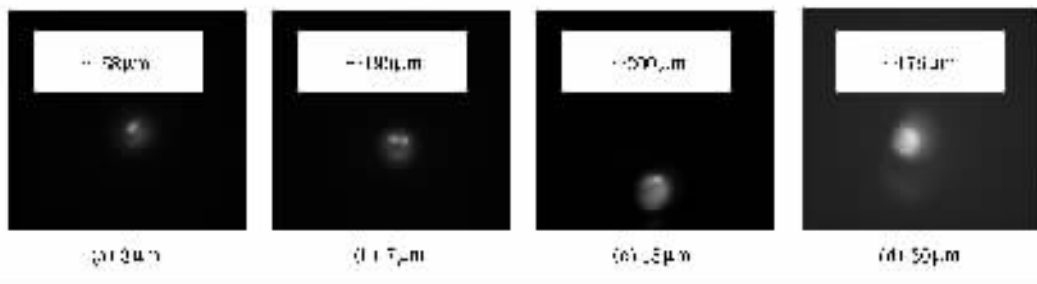


图3 光学 CCD 相机测得光学渡越辐射 (OTR) 图案

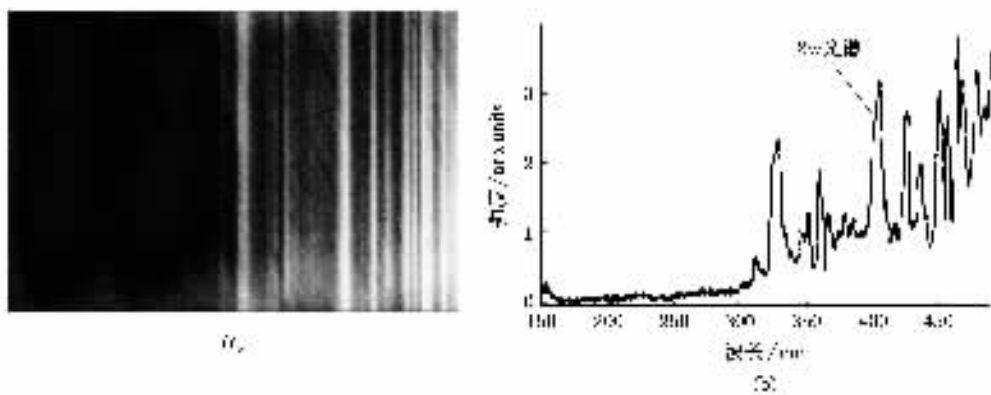


图4 OMA 谱仪测得相干渡越辐射光谱 (CTR)

光谱,图中水平方向为波长方向,垂直方向为相对强度方向.光谱在 300—500nm 之间出现一系列非周期锐利尖峰,在 400nm (2ω) 附近出现的尖峰明显可见.

4. 分析与讨论

根据 Santos 等人^[7]和 Baton 等人^[8]对靶背探测到的光信号观察结果可知,如图 3 所示,圆环边缘附近出现的明亮的局部化光信号是由于超热电子输运穿越固体靶在靶背引起的 OTR.而光信号的圆环状空间分布,与在 2002 年卢瑟福实验室的年报中 Santos 等人^[10]报道的靶背有电子束引起的渡越辐射的环形分布极其相似.明亮的局部化光信号的分布表明,超热电子束在传输的过程中的分布并不均匀,存在成丝效应,有一定的发散角展宽,这是超热电子输运过程中不稳定性发展的结果.

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光学渡越辐

射 (OTR) 强度可表示为^[11]

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

其中 ω 为光辐射频率, Ω 为立体角, e 为电子电量, v , c 和 β 分别为电子速度、光速和相对速度, $\beta = v/c$, θ 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

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

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

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

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 δ -微脉冲,每个脉冲的电子数量为 N_n ,具有 Maxwellian 速度分布,其温度符合定律:

$T_{\text{hot}} = 100(I_{17} \lambda^2)^{1/3}$ keV, 其中, I_{17} 以 10^{17} W/cm² 为单位的激光功率密度, λ 为激光波长,单位为 μm .

则 $S(z) = \sum_0^n N_n \delta(z - 2\pi n v / \omega_0)$. 其中 $\delta(z - 2\pi n v / \omega_0)$ 为 δ 函数, n 为整数.在 (2) 式中,第一项为所有电子辐射的几何叠加项,第二项为相干项.于是在第

二项中出现以激光频率为间隔的强度调制. 对于 2ω 处的相干渡越辐射的峰值强度 $I_{\text{total}}(2\omega) \propto N^2 \times f(2\omega)$. 这样可以通过相干渡越辐射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制.

根据 Zheng 等人^[12]的理论计算可知, 渡越辐射光谱是很强的, 是由于在一些特殊频率附近的干涉效应(强度调制), 即在那里沿着电子束的周期波动. 如果在那里没有干涉效应, 那么渡越辐射光谱是宽带几乎是平坦的. 众所周知, 电子可以在许多过程中被加速. 在一些过程中, 例如共振吸收和真空加热, 电子在每一激光周期被加速一次, 而在 $\nu \times B$ 加热机制中, 电子在每一激光周期被加速两次. 显而易见, 产生在这些过程中的高能电子束是由一系列电子微脉冲组成. 两个邻近的微脉冲之间的时间间隔 τ 将等于驱动力周期或半周期, 也就是激光的周期 $\tau = \lambda_0/c$ 或 $\tau = \lambda_0/2c$. 那么就可以推出, 超热电子束获得沿着它们传播的周期波动是由于加热过程. 如果这些波动能够幸存于直到束传播穿过靶背表面为止, 那么渡越辐射在束团频率 $1/\tau$ 或 $2/\tau$ 上变成干涉. 在这个频率上是非常强的. 光谱因而呈现出在 ω 或 2ω 附近的狭窄的光谱线即出现锐利的尖峰结构. 因此, 图 4 所示 2ω 处(400nm)光谱是超热电子在每一激光周期被产生两次的直接证据, 也就是 $\nu \times B$ 加热机制产生的超热电子束中的微束团引起的相干渡越辐射(CTR).

我们对 OTR 光强与靶厚度之间的关系进行统计, 结果如图 5 所示. 这一统计结果表明, 随着靶厚度的增加, OTR 强度呈明显下降的趋势. 当靶增加到 $20\mu\text{m}$ 厚度时, OTR 强度的下降变得平缓. 图中光滑曲线为 Lorentzian 拟合曲线. 同时又发现, 这一统计

结果与超热电子的注量随着靶厚度的变化关系非常接近, 说明我们探测的光发射信号的确是由超热电子引起的 OTR.

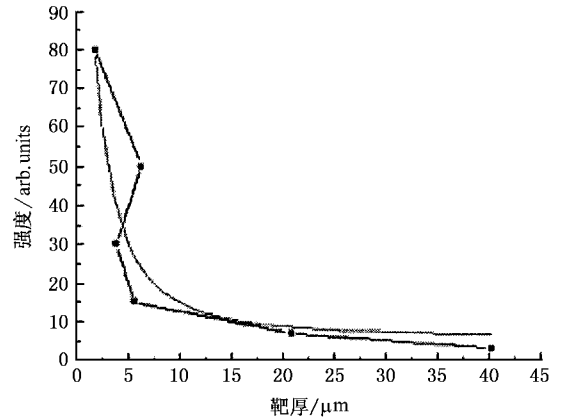


图 5 OTR 光强与靶厚度的关系

5. 结 论

在 100TW 飞秒激光器上, 我们首次研究了用超短激光脉冲照射铜金属薄膜靶在靶背表面的光发射. OTR 积分成像图案呈圆环状, 圆环区域先增加后减小, 在圆环边缘附近出现局部明亮光信号, 说明超热电子在传输的过程中存在不稳定性; 光发射光谱在 300—500nm 之间出现一系列非周期锐利尖峰结构, 在 400nm(2ω)附近出现的尖峰应归因于 $\nu \times B$ 加热机制产生的超热电子束的微束团引起的相干渡越辐射(CTR). OTR 光强随着靶厚度的增加而减少.

非常感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心激光工程部的王晓东、周凯南和郭仪等人的大力支持和帮助.

[1] Tabak M, Hammer J, Glisky M E *et al* 1994 *Phys. Plasmas* **1** 1626
 [2] Cai D F, Gu Y Q, Zheng Z J *et al* 2003 *High Power Laser and Particle Beams* **15** 575 (in Chinese) [蔡达锋、谷渝秋、郑志坚等 2003 强激光与粒子束 **15** 575]
 [3] Cai D F, Gu Y Q, Zheng Z J *et al* 2003 *Physics of Plasmas* **10** 3265
 [4] Cai D F, Gu Y Q, Zheng Z J *et al* 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **16** 587 (in Chinese) [蔡达锋、谷渝秋、郑志坚等 2004 强激光与粒子束 **16** 587]
 [5] Gu Y Q, Cai D F, Zheng Z J *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 186 (in Chinese) [谷渝秋、蔡达锋、郑志坚等 2005 物理学报 **54** 186]

[6] Allen H 1939 *Phys. Rev.* **55** 425
 [7] Santos J J, Amiranoff F, Baton S D *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 025001-1
 [8] Baton S D, Santos J J, Amiranoff F *et al* 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 105001-1
 [9] Zheng J, Tanaka K A, Sato T *et al* 2004 *Phys. Rev. Lett.* **16** 165001-1
 [10] Santos J J, Amiranoff F, Baton S D *et al* 2001/2002 *Central Laser Facility Annual Report* (Palaiseau: Laboratoire pour p4)
 [11] Lai R and Sievers A J 1994 *Phys. Rev. E* **50** R3342
 [12] Zheng J, Tanaka K A, Miyakoshi T *et al* 2003 *Physics of Plasma* **10** 2994

Experimental study of optical emission from the rear surface in ultrashort ultra-intense laser interaction with solid targets^{*}

Wang Guang-Chang^{1)†} Zheng Zhi-Jian²⁾ Yang Xiang-Dong^{1)†} Gu Yu-Qiu²⁾ Liu Hong-Jie²⁾ Wen Tian-Shu²⁾
Ge Fang-Fang²⁾ Jiao Chun-Ye²⁾ Zhou Wei-Min²⁾ Zhang Shuang-Gen^{1)‡} Wang Xiang-Xian^{1)‡}

¹⁾*(Atom and Molecule Physics Institute, Sichuan University, Chengdu 610065, China)*

²⁾*(Research Center of Laser Fusion, Academy of Engineering Physics of China (CAEP) P. O. Box 919-986 Mianyang 621900, China)*

(Received 6 January 2005; revised manuscript received 9 March 2005)

Abstract

Optical emission generated by hot electrons passing through solid targets is measured from the rear surface of a metallic foil. The integrated image taken by CCD camera shows that the optical emission forms a ring, on the edge of the ring there is a bright localized signal, which is the optical transition radiation (OTR). The optical emission spectrum shows a series of sharp nonperiodic peaks between 300—500nm, obviously near 400nm (2ω). The sharp peaks are ascribed to the coherent transition radiation (CTR) of hot electron-beam microbunching generated by $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ acceleration mechanism. The OTR intensity decreases with the increase of the target thickness.

Keywords: hot electron, optical emission, optical transition radiation, $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ acceleration mechanism, coherent transition radiation

PACC: 5250J, 5270K

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10275055 and 10275056) and the Doctorate Foundation of the Ministry of Education of China (Grant No. 200220610001).

[†] Corresponding author. E-mail: xdyang@scu.edu.cn