

# 单光子入射方法测量超快硬 X 射线能谱

陶业争<sup>1</sup>, 单玉生<sup>1</sup>, 王乃彦<sup>1</sup>, 李业军<sup>1</sup>, 高怀林<sup>1</sup>, 汤秀章<sup>1</sup>, 张海峰<sup>1</sup>, 石宗仁<sup>2</sup>, 徐 鸱<sup>2</sup>, 邢 雨<sup>2</sup>

(1. 中国原子能科学研究院 核技术与计算机应用研究所, 北京 102413;

2. 中国原子能科学研究院 放射性计量测试部, 北京 102413)

**摘要:**利用单光子入射方法测量了高强度超短脉冲激光(130 fs,  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>, 744 nm)与固体等离子体相互作用产生的超快(ps)硬 X 射线(>30 keV)能量连续谱。采用铅屏蔽、激光脉冲和线性门同步符合技术将 HPGe X 射线谱仪的本底计数率降低到  $10^{-4}$ /炮, 满足了单光子计数时的低本底要求。用该谱仪实际测量了激光等离子体产生的超快硬 X 射线能谱, 所得结果与理论预期符合。

**关键词:**单光子入射; 超快硬 X 射线; 超短脉冲激光; 固体靶

中图分类号: O532.25

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2002)01-0001-04

## Measuring Ultrafast X-ray Spectrum by Single-photon Incident Method

TAO Ye-zheng<sup>1</sup>, SHAN Yu-sheng<sup>1</sup>, WANG Nai-yan<sup>1</sup>, LI Ye-jun<sup>1</sup>, GAO Huai-lin<sup>1</sup>,  
TANG Xiuzhang<sup>1</sup>, ZHANG Hai-feng<sup>1</sup>, SHI Zong-ren<sup>2</sup>, XU Kun<sup>2</sup>, XING Yu<sup>2</sup>

(1. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-7, Beijing 102413, China;

2. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-20, Beijing 102413, China)

**Abstract:** Utilizing single photon incident method, the hard X-ray continuum from interaction of intense ultrashort laser(130 fs,  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>, 744 nm) with solid plasma is measured. By use of Pb shielding and coincidence technology, the background counts are kept below  $10^{-4}$  per shot, which satisfies the low background requirement of single photon incident. The measured hard X-ray spectrum coincides with theory prediction.

**Key words:** single photon incident; ultrafast hard X-ray; ultrashort; solid target

最近十几年中,高强度超短脉冲( $<1$  ps)激光器的飞速发展开辟了一系列崭新的、具有重要意义的研究领域<sup>[1]</sup>。当高强度超短激光脉冲入射到固体靶上时,激光能量沉积在一个非常薄(入射激光波长的几分之一)的表层内,在靶表面形成高温(keV)、高密度( $10^{23}$ /cm<sup>3</sup>)等离

子体。在激光等离子体相互作用过程中,各种反常吸收机制(例如,共振吸收、“真空”加热、有质动力势加热等)把等离子体中的电子加速到非常高的能量,高能电子在固体靶中发生韧致辐射产生了 keV ~ MeV 硬 X 射线<sup>[2]</sup>。这种由超短脉冲激光产生的硬 X 射线具有非常短的

收稿日期:2001-04-07;修回日期:2001-07-02

基金项目:国家“863”惯性约束聚变领域资助课题(863-416-6-1)

作者简介:陶业争(1970—),男,山东临清人,助理研究员,在读博士研究生,激光等离子体物理专业

持续时间,脉冲宽度和入射激光脉冲宽度近似<sup>[3]</sup>。这种超快 X 射线源在探测化学反应中原子重组、超快时间分辨 X 射线衍射、激光生物学、高温高密度等离子体测量等许多研究领域有着广泛应用<sup>[4]</sup>。

能量高于 30 keV 的硬 X 射线的能谱一般用 X 射线谱仪和组合滤波片谱仪测量,但因超快 X 射线源的脉冲宽度远小于谱仪的分辨时间,光子在探测器中叠加,谱仪将不能分辨同一个脉冲内的光子,所以,一般 X 射线谱仪不能直接用来测量超快 X 射线谱。而组合滤波片谱仪较为复杂,且需要谱的反演。单光子入射脉冲幅度分析方法是测量超快 X 射线谱的一个有效方法<sup>[2,5]</sup>。目前的单光子方法多基于 NaI 探测器,本底计数较高,限制了测量精度。

本工作利用 HPGe 半导体谱仪,且采用屏蔽和符合技术严格控制本底,用单光子入射方法测量超短脉冲激光等离子体相互作用产生的超快 X 射线能谱。

## 1 单光子入射方法的实现

超短脉冲激光和固体等离子体相互作用产生的超快 X 射线源在一非常短的时间内集中了大量的 X 射线光子,为了避免光子叠加,应减小 X 射线的探测几率,保证在谱仪工作时间内只有一个光子入射。激光等离子体 X 射线源的尺寸非常小,可认为是一点源,同时,在入射激光功率密度不是很高 ( $< 10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>) 情况下还可认为 X 射线在 4 空间均匀分布,因此,可通过减小探测器对点源的立体角来降低探测几率。当探测几率小于 0.2/炮时,光子叠加几率小于 4%,则可认为是单光子入射。

单光子入射本身的低计数率对谱仪的本底计数提出了更高的限制。实际实验环境中使用 HPGe 谱仪测到的本底计数率为 20/炮,显然不符合要求。将探测器放置在壁厚为 5 cm 的铅室内,前方壁上开一直径为 10 mm 的准直孔,此时测到的本底计数率为 5/炮。为进一步降低本底,采用了符合技术。信号脉冲集中在几  $\mu$ s 内,本底计数分布在 100 ms 范围内。在谱仪放大器和多道分析器之间放置一线性门 (ORTEC 542),门开启时间为 5  $\mu$ s,开门时刻和 X 射线脉冲同步,在不丢失信号脉冲的前提下,

把本底计数率降低至  $10^{-4}$ /炮。线性门和激光脉冲的同步由脉冲产生和延迟器 DG 535 控制,同步符合逻辑时序图示于图 1。DG535 能够同时输出 4 路独立的 TTL 脉冲,延迟时间为 1 ps ~ 1 s,延迟精度小于 1 ps,实验中用 A 触发激光器,用 D 触发线性门。调节 A 和 D 路之间的延迟,保证门提前打开,并延续到脉冲结束。

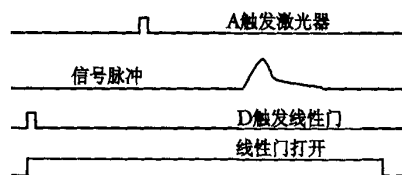


图 1 同步符合逻辑时序图

Fig. 1 Logic time sequence diagram of coincidence

## 2 实验安排

实验在中国原子能科学研究所的 Ti:Sapphire 高强度超短脉冲激光装置上进行。该装置可输出脉冲能量为 10 mJ、脉冲宽度为 130 fs、波长为 744 nm、重复频率为 10 Hz、束直径为 10 mm、线偏振、偏振方向在水平平面内的激光脉冲,是高强度紫外超短脉冲激光装置 (248 nm/440 fs/50 mJ/10 Hz) 的前端。激光束由一  $f/7.5$  的平凸透镜聚焦到靶表面上,对应于靶表面处焦斑由一个和聚焦透镜相同的物镜成像到 CCD 上,焦斑直径为 20  $\mu$ m,靶上功率密度为  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>。聚焦透镜、靶和靶传动平台均放置在真空靶室中,靶室真空度为  $10^{-3}$  Pa,靶可在垂直平面内连续转动,使得每次入射均为新鲜的表面。靶选用厚度为 5 mm 的铜板,表面经过机械处理,未经抛光。

实验安排如图 2 所示。靶表面位于垂直平面内与激光入射平面垂直,激光入射方向和靶表面法线方向成 45°。因激光偏振方向为水平偏振,故入射激光为 P 极化。通过监测激光等离子体产生的 X 射线强度对激光在靶上的聚焦情况进行优化。能量大于 5 keV 的 X 射线强度利用一个加置 30  $\mu$ m Al 膜的 PIN X 射线探测器配合示波器来测量。PIN 放置在真空靶室内,可以与靶成不同角度,从而能粗略估计 X 射线的角分布。

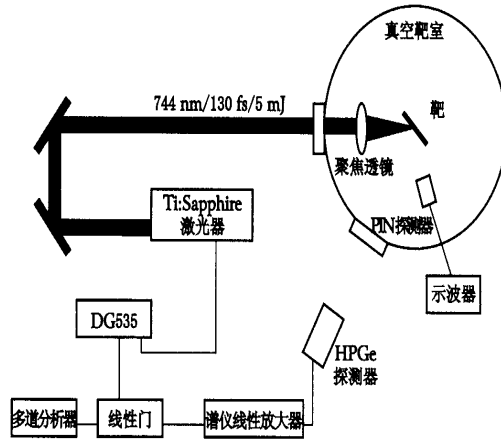


图 2 实验安排示意图

Fig. 2 The scheme diagram of experiment arrangement

能量高于 30 keV 的 X 射线能量连续谱由 HPGe 半导体探测器配合多道分析器的 X 射线谱仪测量,包括 HPGe 半导体探测器、谱仪线性放大器、线性门、多道分析器。探测器放置在壁厚为 5 cm 的铅室内,前方壁开一直径为 10 mm 的准直孔,焦点、窗口、准直孔和探测器用 He-Ne 激光准直。

谱仪放置在真空靶室外面,靶室窗口使用 1 cm 厚的有机玻璃,在准直孔前面放置一厚度为 2.6 mm 的 Cu 板作为滤波片以屏蔽能量在 30 keV 以下的 X 射线。探测器到靶的距离为 65 cm,探测器对源的立体角为  $6 \times 10^{-5}$  sr。HPGe 探测器放置在激光入射平面内,和靶面法线方向成 15°。在谱的计算中考虑了窗口、滤波片、探测器窗口 (0.2 mm) 和探测器的探测效率。用  $^{241}\text{Am}$  和  $^{60}\text{Co}$  标定谱仪的能谱响应和探测效率。

### 3 测量结果和讨论

实验中,激光器工作频率为 10 Hz,每个能谱积累 6 000 炮,谱仪计数时间为 600 s,在此计数时间内实际测到的本底计数小于 1。当探测器到靶表面的距离为 65 cm 时,整个能谱范围内的总计数为 990,则计数几率为 0.165/炮,光子叠加几率小于 0.03/炮。在这样的实验条件下,能谱中能量大于 500 keV 的部分的光子叠加可以忽略。调节激光器和线性门之间的触发延迟使得计数最大。图 3 为在功率密度为

$10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>、P 极化、入射角度为 45°、5 mm Cu 板靶等实验条件下得到的能量大于 30 keV 的 X 射线能量连续谱。谱已经过处理,靶室窗口、滤波片、探测器窗口 (0.2 mm) 和探测器的探测效率等对能谱的衰减已经被恢复。

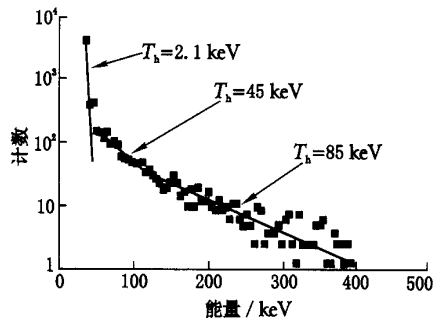


图 3 用单光子入射方法测量到的超短激光产生的硬 X 射线能谱

Fig. 3 Hard X-ray continuum generated by ultrashort laser measured by single photon incident method

能谱是一个连续谱,无明显的峰,这和以前的实验结果和理论预期相符合。从图中可以看出已产生了能量为 400 keV 的光子。图 3 中的数据可以由具有 3 个特征温度的 Maxwellian ( $\exp(-E/T_h)$ ) 分布拟合,拟合式中  $E$  和  $T_h$  分别为 X 射线能量和超热电子温度,特征温度分别为 2.1、45 和 85 keV,得到超热电子温度为 85 keV。

超热电子的产生和具体的实验条件密切相关

关。在主激光脉冲到达固体靶之前,利用预脉冲在靶表面形成一欠密等离子体,可有效地增强激光吸收和提高 X 射线产额。Bastiani 等观测到预脉冲的提前时间存在一个使吸收最强、超热电子产额最大的最佳值,最佳延迟时间对应的等离子体长度与由共振吸收最佳角度计算值一致,从而证明共振吸收是主导的吸收机制。在  $4 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$  强度下,引入一个比主激光脉冲提前 6 ps 的 1% 的预脉冲,把超热电子温度由 19 keV 提高到 182 keV<sup>[6]</sup>。在  $5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$  条件下,利用一个提前 70 ps、8% 的预脉冲把超热电子温度由 18 keV 提高到 83 keV<sup>[5]</sup>。本工作在  $10^{16} \text{ W/cm}^2$  无预脉冲条件下,实验测量到高得多的超热电子温度。

超短脉冲激光与固体靶相互作用中超热电子的产生机制非常复杂。在目前的实验条件下,可能的机制包括共振吸收、真空加热等。共振吸收给出的超热电子温度定标率为

$$T_h = 6 \times 10^{-5} (I^2)^{\frac{1}{3}}$$

其中:  $I$  和  $\lambda$  分别为入射激光的强度 ( $\text{W/cm}^2$ ) 和波长 ( $\mu\text{m}$ )。在本实验条件下,  $T_h = 11 \text{ keV}$ , 明显低于实验值。PIC 数值模拟已经证明<sup>[7]</sup>, 在  $10^{14} \sim 10^{18} \text{ W/cm}^2$  范围内,当  $L/\lambda < 0.1$  时,真空吸收将超过共振吸收而起主导作用,其中,  $L$  为等离子体密度梯度长度。真空吸收可以把电子加速到比共振吸收定标率给出值高的温度。但是,直到最近才有“真空”加热在超短脉冲激光等离子体相互作用中存在的实验证据,欲理解实验结果必须作细致的理论和数值分析。

利用单光子入射方法测量超短脉冲激光辐

照固体靶产生的硬 X 射线谱时采取了屏蔽和符合技术,把本底计数率减小到  $10^{-4}$  /炮,满足了单光子入射测量方法的低本底要求。测到的能谱的波形与理论预期符合,同时还观测到了和他人实验不同的结果。

本工作得到了王孝君研究员和汪建清副研究员的帮助,在此表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] Perry MD, Mourou G. Terawatt to Petawatt Subpicosecond Lasers[J]. Science, 1994, 264: 917 ~ 924.
- [2] Kmetec JD, Gordon CL, Macklin JJ, et al. MeV X-ray Generation With a Femtosecond Laser[J]. Phys Rev Lett, 1992, 68(10): 1 527 ~ 1 530.
- [3] Murnane MM, Kapteyn HC, Rosen MD, et al. Ultrafast X-ray Pulses From Laser-produced Plasmas[J]. Science, 1991, 251: 531 ~ 536.
- [4] Rose-Petruck C, Jimenez R, Guo T. Picosecond-milliangstrom Lattice Dynamics Measured by Ultrafast X-ray Diffraction[J]. Nature, 1999, 398: 310 ~ 312.
- [5] Zhang P, He J T, Chen DB, et al. Effects of a Pre-pulse on X-ray Radiation Produced by a Femtosecond Laser With Only 5-mJ Energy[J]. Phys Rev E, 1998, 57(4): R3 746 ~ 3 748.
- [6] Bastiani S, Rousse A, Geindre JP, et al. Experiment Study of the Interaction of Subpicosecond Laser Pulses With Solid Targets of Varying Initial Scale Lengths[J]. Phys Rev E, 1997, 56(6): 7 179 ~ 7 185.
- [7] Gibbon P, Bell AR. Collisionless Absorption in Sharp-edged Plasmas[J]. Phys Rev Lett, 1992, 68(10): 1 535 ~ 1 538.