

# f<sub>s</sub> 激光与固体靶相互作用的 X 射线发射研究

刘亚青 张令清 宋向阳 杨晓东 范品忠 韩申生 张正泉 徐至展

(中国科学院上海光机所强光光学开放研究室 上海 201800)

**提要** 将针孔透射光栅谱仪和 X 射线 CCD 相结合, 探测到超短脉冲激光 (< 60 fs) 与多种固体平面靶相互作用而产生的、波长范围在 1~ 15 nm 之间的高重复频率 X 射线发射, 随着入射激光能量的增加, 各种靶不同的 X 射线带的发射呈线性增长, 并发现在超短脉冲激光作用下, L 带发射效率最高元素的原子序数比长脉冲打靶时要来得小。

**关键词** X 射线 CCD, X 射线, 针孔透射光栅

## 1 引言

近年来, 由于采用了啁啾脉冲放大技术(CPA), 使得激光器向着小型化高输出功率(> TW) 方向发展。从而使激光与物质相互作用的研究进入了一个新的阶段, 如高次谐波的发射<sup>[1]</sup>、高温高密度等离子体物理的研究<sup>[2]</sup>、光场电离下的 X 射线激光发射<sup>[3]</sup>、超强超快的 X 射线源的产生<sup>[4]</sup>、超强场( $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>) 中的原子行为<sup>[5]</sup>、ICF 中钻孔点火<sup>[6]</sup>等的研究都取得了令人振奋的结果。

但我国在这一领域里的实验研究还刚刚开始。本文就是利用本室的钛宝石超短脉冲(< 60 fs) 高功率(2 TW) 激光器, 与多种固体靶相互作用, 产生重复频率 X 射线源, 并利用 X 射线 CCD 结合针孔透射光栅谱仪作为探测系统, 成功地获得了多种金属靶的 X 射线发射光谱, 为 X 射线光源真正走向实用化准备了条件。

## 2 实验装置

实验光路如图 1 所示。其中, 入射激光经焦距为 50 cm 的复合透镜聚焦后正入射打到靶上, 焦斑直径约为 150  $\mu$ m, 针孔透射光栅谱仪 ( $\phi = 50 \mu$ m,  $d = 1 \mu$ m), 在和靶面的法线方向成 45°角的位置接收光谱, 且入射激光, 靶点和谱仪在同一水平面内。整个系统处在  $1.33 \times 10^{-3}$  Pa 的真空系统中。

实验所用钛宝石激光器由功率为 5 W 的氩离子激光器泵浦-锁模钛宝石激光振荡器, 产生 30 fs 的种子光, 经脉冲展宽器展宽至 200 ps, 再经再生放大器、前置放大器和主放大器逐级放大, 使能量达到 220 mJ, 最后由脉冲压缩器把脉冲压缩, 得到光束直径为 50 mm, 最大输出

能量为 120 mJ, 中心波长为 785 nm, 线宽为 18 nm, 脉宽为 45~60 fs, 工作频率为 10 Hz 的激光输出, 靶面功率密度为  $1.5 \times 10^{15} \sim 1.0 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ 。

实验中采用 CCD 结合针孔透射光栅谱仪作为 X 射线的接收系统。由于超短脉冲激光和物质相互作用时, 入射激光的吸收很弱, 而它的反射或散射光很强, 有时可以达到 80% 以上<sup>[7]</sup>, 要使上述探测系统真正在实验中得到很好的使用, 其关键是要降低入射激光对探测信号的干扰。即减少到达 CCD 灵敏面的入射激光的强度。到目前为止, 国际上大部分实验室是用一定厚度的无基底 Al 膜或 C 膜挡掉到达 CCD 的打靶激光<sup>[8]</sup>, 但这种膜损坏很快, 必须随时更换。在国内, 目前只能把无基底 Al 膜最薄做到 500 nm 左右, 而实验中为了尽量提高 Al 膜在软 X 射线区的透过率, 所用 Al 膜要求在 100 nm 以下, 因此在国内想随时获得这种挡光膜似乎是件很困难的事。另外还有一更重要的因素是, 同一厚度的 Al 膜对不同波长的软 X 射线的透过率不同<sup>[9]</sup>, 因此用 Al 膜作挡光膜时, 实验探测中难免会因此而失去许多信息, 给实验结果的分析带来困难。基于这两方面的原因, 我们用小孔准直衍射法来减少入射激光对实验数据的影响。如图 1 所示, 整个探测系统由两个小孔、一个狭缝、一个针孔透射光栅和 X 射线 CCD 组成。前面两个小孔的直径依次为 1.5 mm 和 6 mm, 第一小孔距靶点 180 mm, 第二小孔距第一小孔 70 mm, 光栅 (PTG) 距靶点 512 mm, 在光栅之后离光栅 259 mm 处再加一宽度为 2 mm 且平行于光谱色散方向的狭缝, 最后 CCD 的感光面距光栅 790 mm。

前面两个小孔主要用来准直光路挡掉杂散光, 当到达光栅的打靶激光经过针孔透射光栅时, 经  $50 \mu\text{m}$  的针孔衍射, 到达 CCD 表面时是一个直径约为 6 mm 的爱里斑。实验中入射激光的光强在 CCD 上形成的信号最大不超过 40 个计数, 大大低于 X 射线信号的强度。另外, 之所以要在透射光栅后面再加一狭缝, 是为了挡掉经针孔衍射的 785 nm 打靶激光的一级和更高级衍射光, 由于狭缝和 X 射线的衍射方向相同, 所以不会影响谱仪的摄谱范围, 同时又使 CCD 的背景很干净。

前面两个小孔主要用来准直光路挡掉杂散光, 当到达光栅的打靶激光经过针孔透射光栅时, 经  $50 \mu\text{m}$  的针孔衍射, 到达 CCD 表面时是一个直径约为 6 mm 的爱里斑。实验中入射激光的光强在 CCD 上形成的信号最大不超过 40 个计数, 大大低于 X 射线信号的强度。另外, 之所以要在透射光栅后面再加一狭缝, 是为了挡掉经针孔衍射的 785 nm 打靶激光的一级和更高级衍射光, 由于狭缝和 X 射线的衍射方向相同, 所以不会影响谱仪的摄谱范围, 同时又使 CCD 的背景很干净。

### 3 实验结果与分析

实验中分别选择了不同原子序数的平面固体靶与激光相互作用, 靶材分别为 Si, Ti, Cu, Ge, W。

图 2 是 X 射线 CCD 拍摄的 Cu 在激光输出能量为 20 mJ, 累计打靶时间为 2 s, 每打一枪换一位置时的二维 X 射线发射光谱图, 由此可以看出用上述摄谱系统完全可以挡去入射激光的干扰, 获得本底非常干净的 X 射线光谱图。

图 3 分别是上述各种靶材在激光输出能量为 50 mJ, 累计打靶时间为 2 s 时的一维 X 射线发射光谱图。其中 Si 出现 L 带光谱, Ti 出现 L 带光谱, Cu 出现 L 带和 M 带光谱, Ge 出现 L 带和 M 带光谱, W 出现 N 带和 O 带光谱。所有这些靶的 X 射线发射带的波长范围都是在 1~15

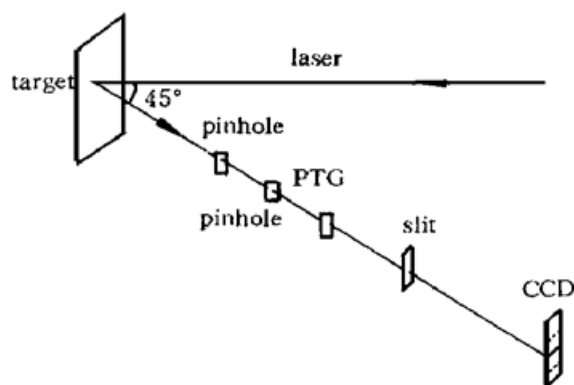


图 1 实验光路图

Fig. 1 Experimental set-up

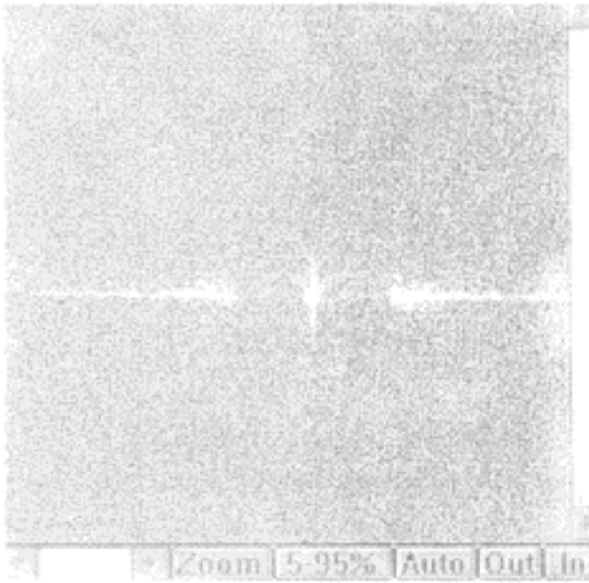


图 2 Cu 的 X 射线发射二维光谱图

Fig. 2 Two-dimansional graph of the X-ray emission of Cu

nm 之间。从各元素的带谱发射看,和长脉冲激光 ( $> 100$  ps) 打靶所发射的带谱分布基本相同,长脉冲打靶 X 射线发射光谱参看文献[10]。

如图 4 所示,随打靶激光能量的增加,不同靶的不同带谱的发射强度成线性增长,这是由于超短脉冲激光与固体靶相互作用时,随着打靶激光能量的增加,沉积在靶物质中的激光能量(正比于  $\text{Re}(\sigma)|E|^2$ , 其中  $\sigma$  为介质电导率,  $E$  为入射激光的强度)也相应地增加,于是电子温度升高,使得离子因和电子碰撞而电离的几率增大<sup>[7]</sup>,从而使电子密度增加,这又进一步增大了碰撞电离度,使得激光等离子体中相应的各离化态的离子数增加,最终使各带谱的发射增强。当然,随着打靶激光能量的增加,发射区域有所增加,从而对 X 射线积分谱的强度有一定影响。但超短脉冲激光(功率密度  $< 10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>)打靶产生的等离子体温度比较低,所以激光

对靶的消融作用很小,且激光等离子体的膨胀尺度远小于激光波长<sup>[7]</sup>,所以整个发射区随打靶激光能量的增加而增加的程度很小,因此由发射区增大而影响 X 射线总的发射强度在这里没有加以考虑。由于 W 靶的实验数据太少,所以没有作上述分析。

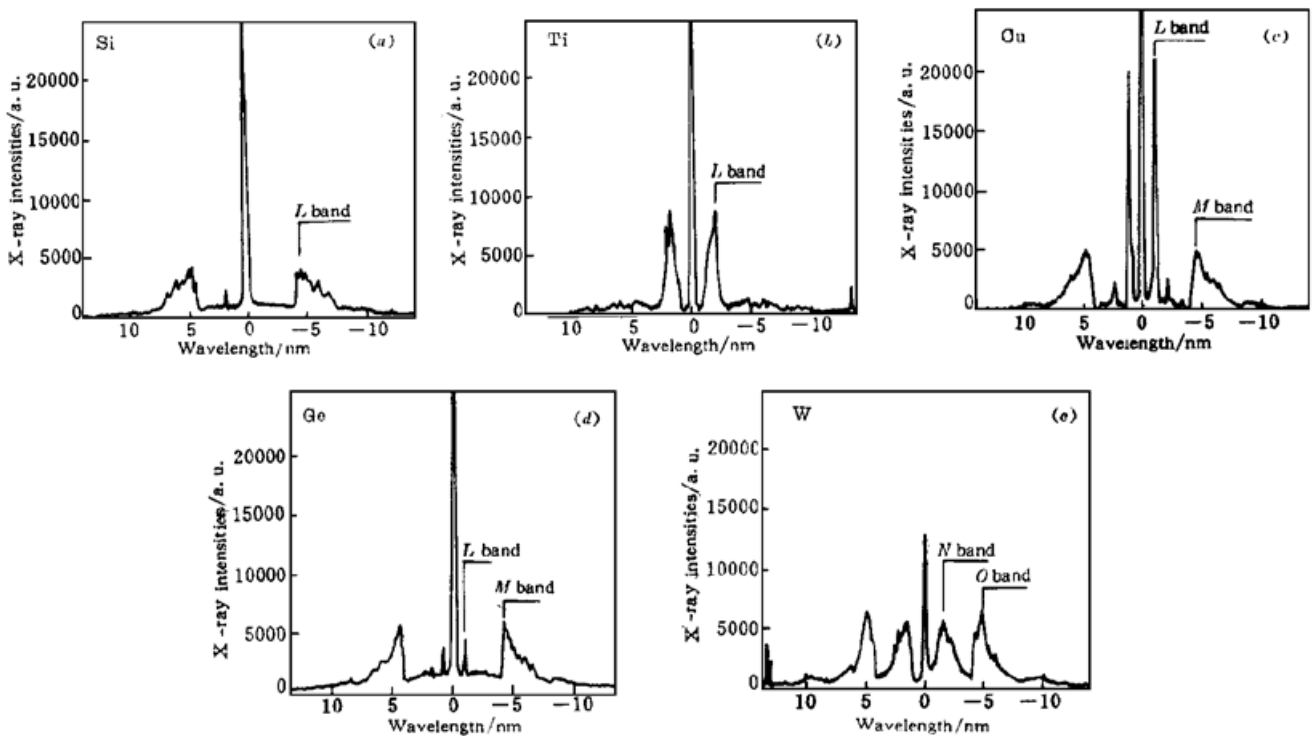


图 3 (a) ~ (e) 分别为 Si, Ti, Cu, Ge, W 的 X 射线发射强度随波长的变化图

Fig. 3 The spectra of X-rays emitted from different elements

如图 5 所示,同一打靶条件下,从 Si 到 Cu,各元素 L 带的发射强度随原子序数的增加而增加,且随打靶激光能量的增大,各元素 L 带的发射也随原子序数的不同,增强的程度也不

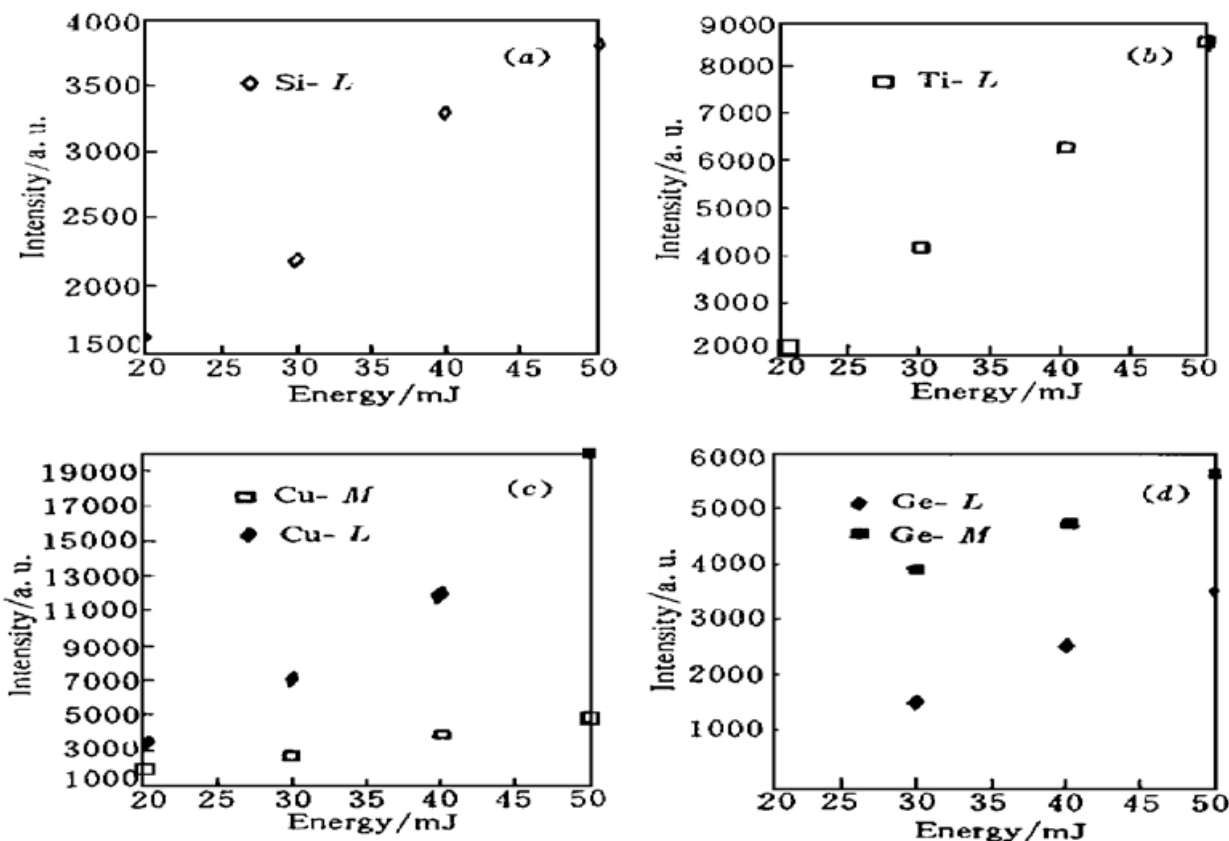


图 4 (a) ~ (d) 分别为 Si, Ti, Cu, Ge 元素相应的 X 射线发射带谱的强度随入射激光能量增强的变化图  
 Fig. 4 The intensities of different X-ray bands emitted from different elements vs the intensity of the incident laser

同, Si 增强得最慢, Cu 增强得最快。但 Ge 的 L 带发射强度没有因它的原子序数比铜高而比铜的 L 带发射强, 且随入射激光的能量的增加其发射强度增长也比较慢, 这可能是, 对于功率密度不是很高 ( $< 10^{16} \text{ W/cm}^2$ ) 的超短脉冲激光与固体靶相互作用时, 电子温度相对比较低<sup>[7]</sup>, 因此在原子序数达到一定程度时, 高离化态的离子数产额减少, 使得 Ge 的 L 带发射减弱。这和长脉冲打靶时的结果有所不同, 根据文献[10], 同样打靶条件下, 各元素的 L 带发射随原子序数的增加而增加, 直到 Se ( $Z = 34$ ) 元素, 它的 L 带的发射达到最大, 即同一打靶激光能量下, 相对 L 带发射 Se 的效率最高。而在超短脉冲与固体靶相互作用时, L 带发射效率最高的元素将在 Cu ( $Z = 29$ ) 和 Ge ( $Z = 32$ ) 之间。本文对这一现象所作的分析和结论还有待于以后进一步的实验去证实。

由于我们在实验中没有对 X 射线的强度作绝对测量, 所以无法和长脉冲激光打靶时的 X 射线发射作强度上的比较, 但由于超短脉冲激光与固体靶相互作用时反射很强, 且激光的能量相对也比

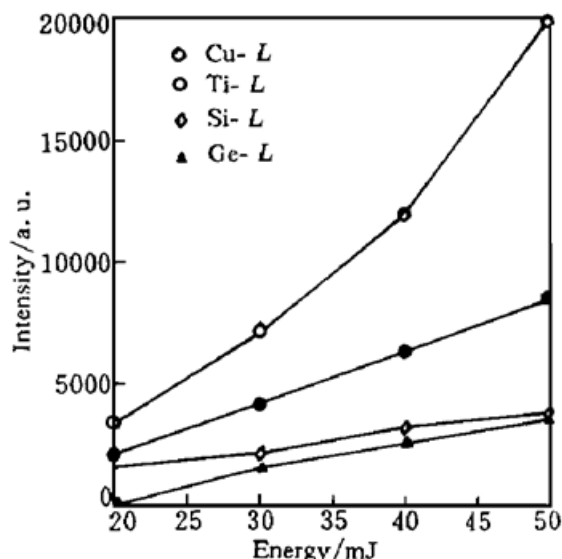


图 5 不同元素 L 带的 X 射线发射强度随入射激光能量增强的变化图  
 Fig. 5 The intensities of L band X-rays emitted from different elements vs the intensity of the incident laser

由于超短脉冲激光与固体靶相互作用时反射很强, 且激光的能量相对也比

较小,估计单枪的 X 射线发射强度将比长脉冲的弱,但由于 fs 激光器是每秒 10 次打靶,由此产生的 X 射线光源也是一个每秒 10 次的准连续光源,另外,我们注意到,这些元素的某些带带宽很窄,这有利于 X 射线源在 X 光平板印刷、X 光显微技术中应用,从而使 X 射线光源真正走向实用化。

### 参 考 文 献

- 1 X. F. Li, A. L'Huillier, M. Ferray *et al.*. Multiple-harmonic generation in rare gases at high laser intensity. *Physics. Rev. A*, 1989, **39**(11): 5751~ 5761
- 2 P. Sprangle, E. Esarey, A. Ting. Nonlinear theory of intense laser-plasma interactions. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(17): 2011~ 2014
- 3 D. V. Korobkin, C. H. Nam, S. Suckewer *et al.*. Demonstration of soft X-ray lasing to ground state in  $\text{Li}^{\text{II}}$ . *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(26): 5206~ 5209
- 4 J. C. Kieffer, M. Chaker, J. P. Matte *et al.*. Ultrafast X-ray sources. *Phys. Fluids B*, 1993, **5**(7): 2676~ 2681
- 5 K. Burnett, V. C. Reed, P. L. Knight. Atoms in ultra-intense laser fields. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 1993, **26**(4): 561~ 598
- 6 S. C. Wilks, W. L. Kruer, B. Hammel *et al.*. Ultra-intense, short pulse laser-plasma interactions with applications to advanced fusion concepts. 12th International Conference on Laser Interaction and Related Plasma Phenomena, Oasak, Japan, 1995, April 24~ 28
- 7 B. Luther-Davies, E. G. Gamalii, Y. Wang *et al.*. Matter in ultrastrong laser fields. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1992, **22**(4): 289~ 325
- 8 S. G. Prestou, M. Zepf, A. Sanpera *et al.*. Generation of high harmonics on the sprite CPA laser system. *RAL Annual Report*, 1994~ 1995
- 9 R. C. Elton. X-ray Laser. 1990 by Academic Press, Inc.
- 10 K. Eidmann, T. Kishimoto. Absolutely measured X-ray spectra from laser plasmas with targets of different elements. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(7): 377~ 378

## X-ray Emission from fs Laser Interaction with Solid Targets

Liu Yaqing Zhang Lingqing Song Xiangyang Yang Xiaodong  
 Fan Pinzhong Han Shensheng Zhang Zhengquan Xu Zhizhan  
 (Laboratory of High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and  
 Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** X-ray sources at high repetition rate were obtained in the experiments of the ultra-short pulsed laser ( $< 60$  fs) interaction with different target elements. The wavelength range was from 1 to 15 nm. With the energy of the incident laser increasing, the intensities of X-rays emitted from different elements are enhanced. The element which has the highest emission of L band is different with that in the experiments of long-pulse lasers interaction with targets. A pinhole transmission grating and X-ray CCD were used as detectors in our experiments.

**Key words** X-ray CCD, X-rays, pinhole transmission grating