

# 基于 M 壳层辐射的 Si K 边 X 射线吸收近边结构谱 实验研究

谭伯仲, 阳庆国\*, 刘冬兵, 毋健, 胡厚胜, 李牧, 李俊

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900

**摘要** 基于纳秒高功率激光辐照高原子序数靶材产生的等离子体 M 壳层 X 射线辐射, 利用椭圆柱面晶体谱仪进行薄膜单晶 Si 样品的 K 边 X 射线吸收近边结构谱(XANES)静态实验研究; 通过详细介绍实验方案, 分析椭圆柱面晶体谱仪的原理, 得到谱仪的位置-能量色散关系, 并对 Au、Lu、Yb、Dy、Ta、Co 这 6 种靶材产生的等离子体 X 射线光谱进行比较。结果表明: 通过比较这 6 种靶材产生的等离子体 X 射线光谱后发现, 在 Si 的 K 边(1839 eV)附近, Lu、Yb、Dy 靶材的激光等离子体 M 壳层辐射相对其他几种靶材具有较高的光谱亮度, 对应的 XANES 的信噪比较好; 实验获得的 XANES 与 FEFF9.0 软件计算结果基本符合, 验证了单发获得的静态实验数据是可靠的。

**关键词** 光谱学; X 射线吸收近边结构谱; 激光等离子体; 椭圆柱面晶体谱仪

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0330001

## Experimental Study on Si K-Edge X-Ray Absorption Near-Edge Structure with M-Shell Radiation

Tan Bozhong, Yang Qingguo, Liu Dongbing, Mu Jian, Hu Housheng, Li Mu, Li Jun

*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*

**Abstract** With M-shell X-ray radiation from plasma produced by nanosecond high power laser irradiating on high atomic number targets, the experimental study on Si K-edge X-ray absorption near-edge structure (XANES) is carried out with an elliptic cylinder crystal spectrometer. By describing the experiment setup in detail, and analyzing the principle of elliptic cylinder crystal spectrometer, the position-energy dispersion relation of the spectrometer is obtained, and the laser plasma X-ray spectra from six targets of Au, Lu, Yb, Dy, Ta, and Co are compared. The results show that by comparing the laser plasma X-ray spectra from six targets of Au, Lu, Yb, Dy, Ta and Co, we find that the M-shell radiations from Lu, Yb, and Dy are more brilliant than the others in the vicinity of Si K-edge (1839 eV), and the corresponding signal to noise of XANES is much better. The XANES obtained from experiment and calculation by FEFF9.0 software are in good agreement with each other, indicating that the static experimental result of single shot is reliable.

**Key words** spectroscopy; X-ray absorption near-edge structure; laser plasma; elliptic cylinder crystal spectrometer

**OCIS codes** 300.6560; 300.1030; 350.5400; 120.6200

## 1 引 言

X 射线吸收近边结构谱(XANES)是指材料在吸收边前 20 eV 到边后 50 eV 范围内吸收系数曲线的精细结构, 主要包括吸收边前、吸收边位置、吸收

边后的调制振荡等特征。根据 XANES 特征可以分析材料中原子的价态、未占据电子态、电荷转移、配位结构等微观信息。在过去的数十年中, 随着同步辐射装置的成熟与应用, XANES 技术在材料、化学、生物、地质、物理等领域发挥着越来越重要的作

收稿日期: 2017-09-21; 收到修改稿日期: 2017-10-25

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2014A0101001)、科学挑战专项项目(TZ2016001)、中国工程物理研究院规划发展项目(TCGH012404)

作者简介: 谭伯仲(1987—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事 X 射线成像与光谱诊断技术方面的研究。

E-mail: tan0814@163.com

\* 通信联系人。E-mail: yungore@163.com

用<sup>[1-5]</sup>。在传统同步辐射装置上开展的 XANES 实验都是针对静态或准静态样品<sup>[6]</sup>,近年来,激光等离子体 X 射线源<sup>[7]</sup>、时间切片的同步辐射技术<sup>[8]</sup>、X 射线自由电子激光器<sup>[9]</sup>等具有超快时间分辨的 X 射线源迅速发展,使得 XANES 成为研究微观尺度下材料超快瞬态过程的重要诊断技术。

时间分辨 XANES 技术的主要难点之一是如何产生高亮度、平滑的宽谱 X 射线光源,技术途径之一是利用高功率脉冲激光与物质相互作用产生等离子体 X 射线源。激光等离子体 X 射线源的光谱成分主要有高温黑体辐射、热电子的轫致辐射,以及原子的壳层跃迁辐射。其中高功率激光与高原子序数靶材相互作用产生的 M 壳层跃迁辐射具有准连续、宽光谱特征,尤其是 4f—3d 跃迁相比 M 带其他跃迁具有更高的光谱亮度<sup>[10]</sup>,因此被认为是 XANES 光源较有竞争优势的技术路线。

目前,时间分辨 XANES 实验一般使用皮秒或亚皮秒超短脉冲激光装置辐照高原子序数靶材产生激光等离子体光源,该光源具有超快的时间分辨能力,已经成功用于研究极端条件下电子-晶格非平衡动力学、高压相变、温度和密度演化等瞬态过程。Dorchies 等<sup>[11]</sup>利用能量为 100 mJ、重复频率为 10 Hz 的小型超短脉冲激光装置产生了等离子体 X 射线源,其时间分辨约为 3 ps,累积约 100 发实验获得的 XANES 噪声水平小于 1%,表明该桌面式实验方案具有较好的稳定性和可重复性。Benuzzi-Mounaix 等<sup>[12]</sup>利用更为庞大的 LULI2000 激光装置输出单脉冲激光(能量 20 J,脉宽 3.5 ps),通过单发实验即可获得足够信噪比的 XANES;他们结合激光烧蚀、冲击加载等技术研究了 Al、SiO<sub>2</sub> 等材料的动力学过程<sup>[13]</sup>。

皮秒或亚皮秒时间分辨的 XANES 适合研究物质非平衡态的演化过程,但单发实验获取足够信噪比的 XANES 需要使用皮秒拍瓦级的大型激光装置。目前,长脉冲激光加载技术相对成熟,可以将物质维持在高温、高压的极端条件下数十纳秒<sup>[14-15]</sup>,因此在研究极端条件下物质的平衡态时,纳秒高功率激光脉冲产生的等离子体 X 射线源具有足够的时间分辨能力。纳秒高功率激光装置无需采用啁啾脉冲放大技术<sup>[16]</sup>,实现的成本和难度低于皮秒拍瓦级的激光装置。此外,纳秒高功率激光装置单脉冲激光的能量更高,有望进一步提高单发 XANES 的信噪比。

Si 是一种重要的半导体材料,在电子信息技术领域应用广泛,但大多数研究都集中在其载流子动

力学上,对其在高温、高压等极端条件下的特性及物理规律认识得极其有限。同时, Si 是地球上丰度较大的元素,它在地球内部压力下的物质特性对于理解地球物理具有重要意义。鉴于此,本文通过实验研究了纳秒高功率激光辐照 Au、Lu、Yb、Dy、Ta、Co 这 6 种靶材产生的等离子体光谱,通过比较光谱选择 Lu、Yb、Dy 作为 Si 的 K 边的背光靶材,基于单发静态实验获得了信噪比较好的 XANES。

## 2 基本原理

### 2.1 实验方案

实验在中国工程物理研究院流体物理研究所的千焦耳激光器上开展,实验布局如图 1 所示。千焦耳激光器输出的单脉冲激光经三倍频后聚焦打靶,靶材被激光加热到高温等离子体状态,并在靶的前向  $2\pi$  立体角内辐射 X 射线,入射激光与靶面垂直。激光聚焦后的高斯焦斑直径约为  $150\ \mu\text{m}$ ,激光聚焦打靶的功率密度约为  $10^{15}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。背光靶采用纯度大于 99.9% 的 Au、Lu、Yb、Dy、Ta、Co 平面靶,它们的厚度分别为 10, 100, 100, 100, 50, 50  $\mu\text{m}$ ,激光烧蚀深度远小于靶材的厚度,因此,在反射式背光源的几何布局下可以忽略靶材厚度对等离子体光谱的影响。等离子体的自辐射光谱和经样品吸收后的光谱由一台椭圆柱面弯晶谱仪测量,其色散元件采用石英晶体,晶面为  $(10\bar{1}0)$ ,  $2d$  为 0.8512 nm ( $d$  为晶面间距)。脉冲激光的靶点位于椭圆柱面晶体的左焦点,谱仪和激光靶点的相对位置通过特制的针尖精确定位,定位误差小于  $200\ \mu\text{m}$ 。谱仪前窗口封贴镀有 100 nm 厚 Al 的碳氢薄膜,用于阻挡可见光和滤除低能 X 射线。从靶点发出的 X 射线经过滤光片后进入谱仪,随后被椭圆柱面晶体衍射后在椭圆右焦点位置处重新聚焦为沿  $z$  轴方向的一条线。

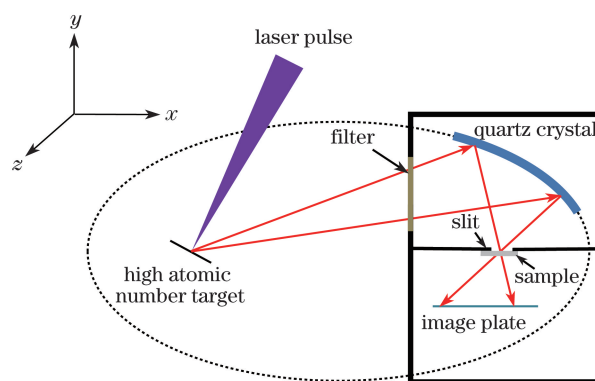


图 1 实验布局图

Fig. 1 Experimental setup

在右焦点处设置宽度为 5 mm( $x$ 轴方向)、长度为 20 mm( $z$ 轴方向)的狭缝,以屏蔽杂散 X 射线到达成像板(Fuji SR2025 型),从而有效地抑制 XANES 本底噪声。紧贴狭缝放置厚度为  $2\ \mu\text{m}$  的薄膜单晶 Si 样品, Si 薄膜仅覆盖了狭缝长度方向的一部分, X 射线穿过 Si 薄膜后形成吸收光谱,其他 X 射线通过未覆盖的狭缝形成等离子体自辐射光谱。这样就可以利用单台谱仪在同一发实验中同时获取经过样品的吸收光谱和用于参考的等离子体自辐射光谱。相对于 Levy 等<sup>[17]</sup>提出的双晶圆锥谱仪方案,椭圆柱面晶体谱仪方案的对准和调节难度较小,同时也避免了不同谱仪和不同测量角度导致的光谱测量差异。

### 2.2 椭圆柱面晶体谱仪的原理

椭圆柱面晶体谱仪的色散几何关系如图 2 所示。椭圆柱面方程为  $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$ , 其中  $a$  和  $b$  分别为椭圆的长轴和短轴, 焦距  $c = \sqrt{a^2 - b^2}$ 。根据图 2, 左焦点  $F_1(-c, 0, 0)$  发出的光线与椭圆柱面交点为  $P(a \cos \phi, b \sin \phi, z)$ ,  $\phi$  为入射光线  $F_1P$  在  $z=0$  平面上的投影矢量与  $x$  轴的夹角, 入射矢量  $\mathbf{n}_i$ 、法线方向矢量  $\mathbf{n}$  和反射矢量  $\mathbf{n}_r$  分别为

$$\mathbf{n}_i = \frac{[a \cos \phi + c, b \sin \phi, z]}{(a \cos \phi + c)^2 + (b \sin \phi)^2 + z^2}, \quad (1)$$

$$\mathbf{n} = \frac{[1, a \sin \phi / (b \cos \phi), 0]}{1 + (a \sin \phi)^2 / (b \cos \phi)^2}, \quad (2)$$

$$\mathbf{n}_r = \mathbf{n}_i - 2(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}. \quad (3)$$

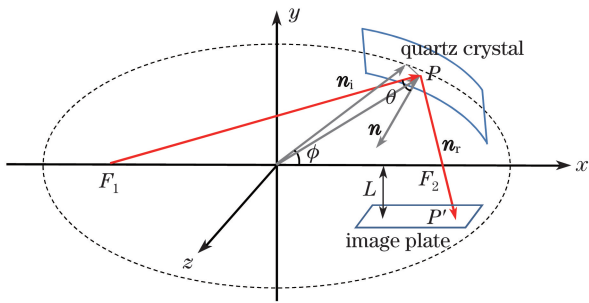


图 2 椭圆柱面晶体谱仪的色散几何关系  
Fig. 2 Dispersion geometry relationship of elliptic cylinder crystal spectrometer

椭圆柱面晶体反射的 X 射线的波长  $\lambda$  和入射角度  $\theta$  满足布拉格关系:  $\lambda = 2d \cos \theta$ , 其中  $d = 0.4256\ \text{nm}$  为石英 ( $10\bar{1}0$ ) 晶面间距, X 射线的能量  $E(\text{eV}) = 1239.8(\text{nm})/\lambda(\text{nm})$ 。入射角  $\theta$  可以通过  $\mathbf{n}_i$  和  $\mathbf{n}_r$  计算得到:

$$\theta = \frac{1}{2} \arccos(-\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_r). \quad (4)$$

反射光线与成像板交点  $P'$  的位置坐标的  $x$  轴

分量为

$$x = a \cos \phi - (L + b \sin \phi) \mathbf{n}_r(x) / \mathbf{n}_r(y), \quad (5)$$

式中  $\mathbf{n}_r(x)$  和  $\mathbf{n}_r(y)$  分别为反射矢量  $\mathbf{n}_r$  的  $x$  轴和  $y$  轴方向分量,  $L$  为成像板到  $y=0$  平面的距离。因此能量  $E$  和位置坐标  $x$  都是变量  $\phi$  和  $z$  的函数。对于给定的  $\phi$  和  $z$ , 可以计算出对应的  $E$  和  $x$ , 从而绘制出椭圆柱面晶体谱仪的位置-能量色散曲线。实验中所用椭圆柱面晶体谱仪的几何参数为:  $a = 128.7\ \text{mm}$ ,  $b = 81\ \text{mm}$ ,  $L = 43.75\ \text{mm}$ 。图 3 所示为数值计算得到的  $z=0, 5, 10, 20\ \text{mm}$  时对应的色散曲线。与子午面  $z=0\ \text{mm}$  的色散曲线相比,  $z=5, 10, 20\ \text{mm}$  时, 能量差别约为  $0.6, 1.7, 7.4\ \text{eV}$ 。在  $z$  轴方向, 椭圆柱面晶体的实际使用宽度小于  $5\ \text{mm}$ , 如此狭窄的区域内的色散曲线与  $z=0\ \text{mm}$  平面的基本一致, 因此处理数据时可以忽略椭圆柱面  $z$  轴方向的宽度效应。从扫描成像板的图像中可以得到像素点的相对位置坐标, 成像板像素点的绝对位置坐标可以通过 Si 的 K 边的相对位置坐标和能量进行标定, 然后根据上述色散曲线对实验数据进行解谱。

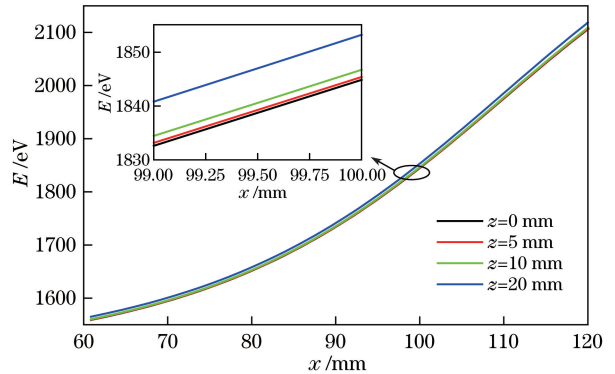


图 3 不同  $z$  值时椭圆柱面晶体谱仪的色散曲线  
Fig. 3 Dispersion curves of elliptic cylinder crystal spectrometer with different  $z$  values

椭圆柱面晶体谱仪的能谱分辨率主要由光源几何尺寸、晶体摇摆曲线、晶体面型误差、成像板像素尺寸等因素决定, 其中光源焦斑直径约为  $150\ \mu\text{m}$ , 成像板像素尺寸为  $25\ \mu\text{m}$ , 通过理论计算可以得到它们对能谱分辨率的影响分别约为  $1\ \text{eV}$  和  $0.33\ \text{eV}$ 。晶体摇摆曲线和面型误差对能谱分辨率的影响难以进行精确的理论计算。在实验中测量的 Si 的发射谱如图 4 所示。由图 4 可知, 选择 Si 的类 Li 线对谱仪的能谱分辨率进行分析, 谱线的上升沿 ( $10\% \sim 90\%$ ) 对应的能量差为  $3\ \text{eV}$ 。由于上升沿由谱线特征和谱仪的能谱分辨率共同决定, 因此实验中的椭圆柱面谱仪的能谱分辨率优于  $3\ \text{eV}$ 。

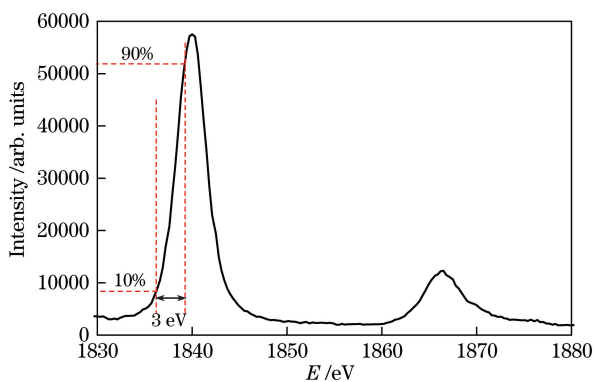


图4 实验获得的 Si 的发射谱

Fig. 4 Experimental Si emission spectrum

### 3 实验结果分析

为了定量比较不同靶材产生的等离子体光谱,实验中保持基本相同的实验布局(几何位置、滤光片设置)、激光参数(脉宽为 1 ns,能量约为 300 J,波长为 351 nm)、成像板扫描设置(像素尺寸为 25  $\mu\text{m}$ 、光电倍增管增益为 1000),获取 Au、Lu、Yb、Dy、Ta、Co 共 6 种靶材产生的等离子体光谱。对成像板图像数据沿  $x$  轴方向选取 100 个临近像素进行平均,以提高信噪比,然后根据上述得到的色散曲线进行解谱,获得的等离子体光谱如图 5 所示。

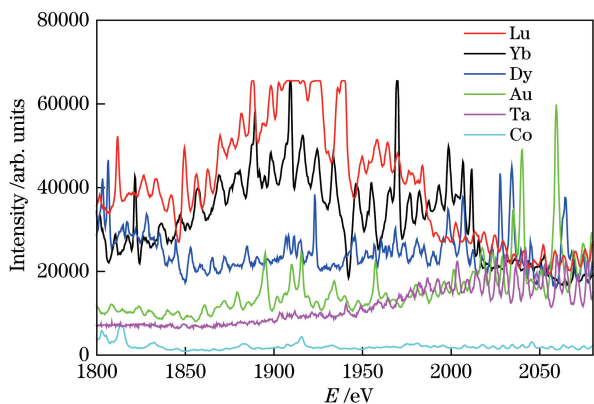


图5 纳秒高功率激光辐照 Au、Lu、Yb、Dy、Ta、Co 靶材产生的等离子体光谱

Fig. 5 Plasma spectra produced by nanosecond high power laser irradiating on six targets of Au, Lu, Yb, Dy, Ta, and Co

由图 5 可知, Lu、Yb 在 1800~2000 eV 能段内具有很强的亮度,尤其是 Lu 的亮度在成像板上形成的信号峰值已经饱和,主要是 Lu、Yb 等离子体的 4f—3d 跃迁产生的高亮度 M 带辐射<sup>[18]</sup>,因此 Lu、Yb 比较适合用作 Si 的 K 边 XANES 的背光靶材。Dy 在 1800~2100 eV 能段内主要是 4d—3p 跃迁产生 M 带辐射<sup>[19]</sup>,且 M 带辐射主要在 1500~1700 eV

能段内,因此 Dy 在 1850~2000 eV 能段内的光谱亮度比 Lu、Yb 弱,更适合用作 Al 的 K 边 XANES 背光靶材。

Au、Ta 在 1800~1950 eV 能段内主要是韧致辐射和黑体辐射,在大于 1950 eV 能段内光谱亮度的增加主要源于 Au 的 4p—3d 跃迁和 Ta 的 4f—3d 跃迁<sup>[10,20]</sup>。Co 原子序数( $Z$ )太小,在 1800~2100 eV 能段内没有跃迁线谱,均为韧致辐射和黑体辐射。在实验中使用的激光参数下,激光辐照靶材产生的等离子体温度较低(约为 300 eV),根据黑体辐射的普朗克定律可知,在 1800~2100 eV 能段内黑体辐射亮度较低;由于激光功率密度较小,产生的超热电子较少,故而韧致辐射亮度也较低。因此,黑体辐射和韧致辐射比 Lu、Yb、Dy 的 M 带辐射光谱亮度低一个量级。由图 5 还可以看出:随着 Co( $Z=27$ )、Ta( $Z=73$ )、Au( $Z=79$ ) 原子序数的增加,光谱亮度也逐渐增加,主要是因为高原子序数金属的电子密度更大,韧致辐射的贡献也更大;Co、Ta、Au 的韧致辐射和黑体辐射光谱亮度虽然很低,但是较为光滑平坦,在更高能量的激光装置上,亮度足够的韧致辐射和黑体辐射有望成为时间分辨 XANES 更好的光源。

椭圆柱面晶体获得的等离子体自辐射光谱和吸收光谱图像位于同一块成像板上,并且空间色散基本保持一致。设等离子体自辐射光谱强度为  $I_0$ ,吸收光谱强度为  $I_1$ ,则吸收系数正比于  $-\lg(I_1/I_0)$ 。图 6(a)所示为典型的成像板扫描图像,靶材为 Yb,图像下半部分为等离子体自辐射光谱,上半部分为 Si 薄膜吸收后的光谱。由图 6(a)可知,吸收边后的光谱明显降低。对实验数据进行处理得到 Si 的 K 边 XANES,用 Athena 软件对获得的 XANES 进行本底移除、噪声滤波、幅度归一化等处理,以便于进行比较。由于 Au、Ta、Co 这 3 种背光靶材获得的 XANES 的信噪比极差,难以获得有用的信息,因此仅给出 Lu、Yb、Dy 这 3 种背光靶材获得的 Si 的 K 边 XANES,如图 6(b)所示,其中 A 为白峰, B 为波谷, C 为波峰。为了与实验数据进行对比,使用基于从头算实空间多重散射理论的 FEFF9.0 软件<sup>[21]</sup>计算绝对零度、零压下金刚石结构 Si 的 XANES。由图 6(b)可知,实验和理论的 XANES 定性较为一致,都包含了白峰 A、波谷 B、波峰 C 等特征,且对应的能量位置基本相同,这些特征的幅度、形状、对应能量位置略有差异,原因可能是单发实验获得的 XANES 信噪比不够好。

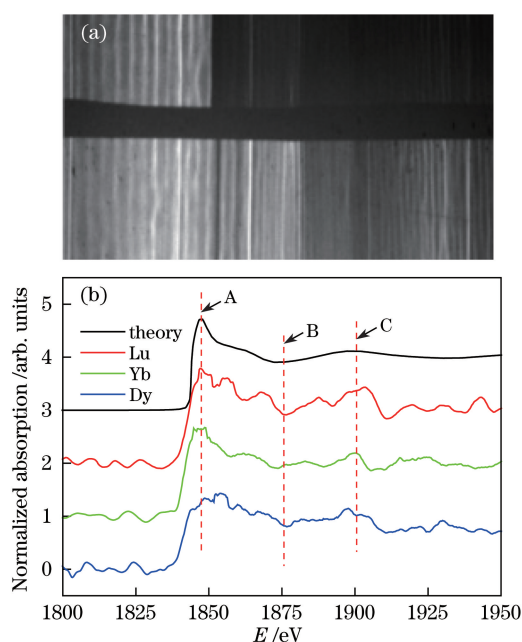


图 6 (a)典型的成像板扫描图像;(b) Lu、Yb、Dy 作为背光靶材获得的 Si 的 K 边 XANES

Fig. 6 (a) Typical scanning image of imaging plate with Yb target; (b) Si K-edge XANES obtained with targets of Lu, Yb, and Dy targets

## 4 结 论

基于纳秒高功率激光辐照高原子序数靶材产生的等离子体 M 壳层 X 射线源,利用椭圆柱面晶体谱仪研究了薄膜单晶 Si 的 K 边 XANES。通过比较 Au、Lu、Yb、Dy、Ta、Co 这 6 种靶材产生的等离子体光谱发现:在 Si 的 K 边附近,由于 M 壳层的辐射, Lu、Yb、Dy 具有较高的光谱亮度,对应的 XANES 信噪比较好; Au、Ta、Co 在 1800~2000 eV 能段内主要是韧致辐射和黑体辐射,光谱亮度低, XANES 信噪比差,但是光谱较为均匀、平坦,在更高能量的激光装置上有望获得高信噪比的 XANES。实验获得的 XANES 与 FEFF9.0 软件的计算结果较为一致,表明单发静态实验数据是可靠的。下一步研究工作是利用 Lu、Yb、Dy 作为背光靶材,结合高同步精度的激光加载手段,通过单发实验获得动高压下 Si 的 K 边 XANES。

## 参 考 文 献

- [1] Peng M S, Li D E. Coordination and local structure of Na in silicate minerals and glasses[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2001, 21(2): 165-168.  
彭明生, 李迪恩. 矿物和玻璃中 NaK-边的同步辐射 XANES 研究[J]. *矿物学报*, 2001, 21(2): 165-168.
- [2] Tang J, Liu Z L, Ren P, *et al.* Structural characterization of Mn doped SiC magnetic thin films[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(7): 4774-4780.  
唐军, 刘忠良, 任鹏, 等. Mn 掺杂 SiC 磁性薄膜的结构表征[J]. *物理学报*, 2010, 59(7): 4774-4780.
- [3] Ankudinov A L, Ravel B, Rehr J J, *et al.* Real-space multiple-scattering calculation and interpretation of X-ray-absorption near-edge structure[J]. *Physical Review B*, 1998, 58(12): 7565-7576.
- [4] Bunker G, Stern E A. Experimental study of multiple scattering in X-ray-absorption near-edge structure[J]. *Physical Review Letters*, 1984, 52(22): 1990-1993.
- [5] Lytle F W, Gregor R B, Panson A J. Discussion of X-ray-absorption near-edge structure: Application to Cu in the high- $T_c$  superconductors  $\text{La}_{1.8}\text{Sr}_{0.2}\text{CuO}_4$  and  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  [J]. *Physical Review B*, 1988, 37(4): 1550-1562.
- [6] Lee P L, Beno M A, Jennings G, *et al.* An energy dispersive X-ray absorption spectroscopy beamline, X6A, at NSLS[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1994, 65(1): 1-6.
- [7] Zhao Y, Yang J M, Yang G H, *et al.* K-shell photoabsorption edge of strongly coupled matter driven by laser-converted radiation[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(15): 155003.
- [8] Bressler C, Milne C, Pham V T, *et al.* Femtosecond XANES study of the light-induced spin crossover dynamics in an iron(II) complex[J]. *Science*, 2009, 323(5913): 489-492.
- [9] Harmand M, Ravano A, Mazevet S, *et al.* X-ray absorption spectroscopy of iron at multimegabar pressures in laser shock experiments[J]. *Physical Review B*, 2016, 92(2): 024108.
- [10] Bauche-Arnoult C, Bauche J, Luc-Koenig E, *et al.* Dielectronic recombination process in laser-produced tantalum plasmas[J]. *Physical Review A*, 1989, 39(3): 1053-1065.
- [11] Dorchies F, Fedorov N, Lecherbourg L, *et al.* Experimental station for laser-based picosecond time-resolved X-ray absorption near-edge spectroscopy[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(7): 073106.
- [12] Benuzzi-Mounaix A, Dorchies F, Recoules V, *et al.* Electronic structure investigation of highly compressed aluminum with K edge absorption spectroscopy[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(16): 165006.
- [13] Denoed A, Mazevet S, Guyot F, *et al.* High-pressure structural changes in liquid silica[J]. *Physical Review E*, 2016, 94(3): 031201.
- [14] Yuan D, Gao X, Li B H, *et al.* Evolution process of laser induced plasma shielding shock wave[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(7): 071403.

- 袁迪, 高勋, 李百慧, 等. 激光诱导等离子体屏蔽冲击波演化过程[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 071403.
- [15] Han F M, Xu S Z, Song W L, *et al.* Study of nanosecond laser ablation on aluminum and stainless steel targets[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(2): 0203005.
- 韩丰明, 徐世珍, 宋文亮, 等. 纳秒激光对铝合金和不锈钢的烧蚀特性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0203005.
- [16] Wang B P, Su J Q, Zeng X M, *et al.* Theoretical and experimental study on parametric fluorescence pulse width[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0519001.
- 王波鹏, 粟敬钦, 曾小明, 等. 参量荧光脉宽的理论及实验研究[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0519001.
- [17] Levy A, Dorchie F, Fourment C, *et al.* Double conical crystal X-ray spectrometer for high resolution ultrafast X-ray absorption near-edge spectroscopy of Al K edge[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(6): 063107.
- [18] Denoeud A, Benuzzi-Mounaix A, Ravasio A, *et al.* Metallization of warm dense SiO<sub>2</sub> studied by XANES spectroscopy[J]. Physical Review Letters, 2014, 113(11): 116404.
- [19] Harmand M, Dorchie F, Peyrusse O, *et al.* Broad M-band multi-keV X-ray emission from plasmas created by short laser pulses[J]. Physics of Plasmas, 2009, 16(6): 063301.
- [20] Gauthier J C, Monier P, Audebert P, *et al.* X-ray spectroscopy of high-Z materials[J]. Laser and Particle Beams, 1986, 4(3/4): 421-425.
- [21] Rehr J J, Albers R C. Theoretical approaches to X-ray absorption fine structure[J]. Reviews of Modern Physics, 2000, 72(3): 621-654.