

# 激光等离子体 X 射线背光源诊断研究

王洪建<sup>1,3</sup> 肖沙里<sup>2</sup> 叶雁<sup>1</sup> 王海容<sup>1,2</sup> 李泽仁<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900

<sup>2</sup> 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030

<sup>3</sup> 重庆工商大学重庆市发展信息管理工程技术研究中心, 重庆 400067

**摘要** 为诊断激光驱动金属靶产生 X 射线背光源的性能, 利用椭圆聚焦特性, 研制了一种背光椭圆晶体谱仪。谱仪的色散分析元件为云母(002)晶体, 椭圆弯晶的焦距为 1350 mm, 离心率为 0.9586。激光束以 30°角斜入射背光薄靶, 且与椭圆弯晶长轴方向垂直。背光椭圆弯晶谱仪的布拉格入射角为 50°~67°, 衍射探测角为 100°~120°, 探测的波长为 0.14~0.16 nm, 采用 X 射线 CCD 相机接收信号。利用神光 II 激光装置 7# 和 8# 激光器同时聚焦轰击 10 μm 厚的 Cu 平面背光薄靶, CCD 成功获取了 Cu 等离子体 X 射线的类氦和 K $\alpha$  谱线。经解谱发现谱线有明显基底, 用最小二乘法差值去噪处理后, 实测谱线分辨率( $\lambda/\Delta\lambda$ )大于 700。

**关键词** 光谱学; 等离子体光谱学; 椭圆弯晶谱仪; 神光 II; 激光等离子体; X 射线背光源

**中图分类号** O536; O432 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0315001

## Diagnosis of X-Ray Backlighter Based on Laser Plasma

Wang Hongjian<sup>1,3</sup> Xiao Shali<sup>2</sup> Ye Yan<sup>1</sup> Wang Hairong<sup>1,2</sup> Li Zeren<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China

<sup>3</sup> Chongqing Engineering Technology Research Center for Information Management in Development, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China

**Abstract** To study the characteristics of X-ray backlighter generated by laser irradiating a foil, a backlit elliptically bent crystal spectrometer is developed based on the ellipse focusing theory. The elliptical mica (002) crystal is employed with 1350 mm focal length, 0.9586 eccentricity and 50°~67° Bragg angle. The laser is of 30° incident angle and perpendicular to long axis of elliptical mica. Diffraction detecting angle is 100°~120° and the wavelength is 0.14~0.16 nm. X-ray CCD is taken as the signal detector. The experiment is carried out on SG II where the 7# and 8# lasers irradiate 10 μm Cu foil simultaneously. CCD obtains the X-ray spectral information of the similar helium and K $\alpha$  spectra of Cu plasma X-ray. It is demonstrated by spectrum unfolding that spectral lines have obvious basement, and the spectral resolution is over 700 after difference denoising with the least square method.

**Key words** spectroscopy; plasma spectroscopy; elliptically bent crystal spectrometer; SG II; laser plasma; X-ray backlighter

**OCIS codes** 050.1940; 050.1970; 300.6560

## 1 引言

强激光加热驱动固体靶形成高温高密的等离子

体, 产生热电子和亚皮秒的 X 射线(大于 1 keV)。在激光脉冲中, 激光等离子体的密度由于没有时间扩散

**收稿日期**: 2013-08-28; **收到修改稿日期**: 2013-09-27

**基金项目**: 国家 863 计划(2012AA8041070B)、强场激光物理国家重点实验室开放项目、重庆市教委科学技术研究项目(KJ120710, KJTD20313)、重庆工商大学青年基金

**作者简介**: 王洪建(1976—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光学精密仪器、测试及控制等方面的研究。

E-mail: whj\_cqu@163.com

而陡然增加。共振吸收和真空加热吸收,使其强度  $I$  增加到  $I \propto \lambda^2 > 4 \times 10^{16} \text{ W} \cdot \mu\text{m}^2 / \text{cm}^2$  ( $\lambda$  为波长), 而拉曼加热机制也适合更高密度的等离子体<sup>[1-2]</sup>。在短脉冲激光与具有峰值密度梯度的等离子体相互作用中, 激光部分能量转移给超热电子。当这些高能电子穿透固体靶材料的冷区域, 使原子 K 壳层离化和辐射产生特征 X 射线, 电子速度受阻而以韧致辐射方式产生连续的 X 射线。仅在持续高能激光脉冲中产生的热电子, 才辐射类似激光脉冲的  $K\alpha$  线。因此, 这些等离子体是热电子和千电子伏特量级 X 射线的唯一来源, 并伴有独特的特征, 比如非常短的持续时间、近似点光源的尺寸<sup>[3-4]</sup>。因此, 超快动力学对于 X 射线探测是非常具有吸引力的, 比如诊断在原子系统中的内壳层电子产生过程<sup>[5]</sup>, 以及材料中的化学反应和相变过程。同时, 激光等离子体源是很有发展潜力的小尺度 X 射线辐射源, 如它的高空间相干性被用于不同的医疗成像。

但高电离态离子 X 射线谱非常复杂<sup>[6]</sup>, 其实验诊断工作比较困难, 影响了对其物理过程的深入了解和研究, 而实验中采用高收集效率和高分辨率的谱仪是一种有效的解决方法。比如约翰逊聚焦晶体谱仪因具有高收集效率的特点, 已被广泛使用, Heeter 等<sup>[7]</sup>用椭圆邻苯二甲酸氢钾 (RAP) 晶体谱仪在美国 Omega 装置上获得的光谱分辨率为 300~500, 高洁等<sup>[8]</sup>用椭圆季戊四醇 (PET) 晶体谱仪在神光 II 装置上测试波长为 0.2~2 nm 的 Au 靶 X 射线。本实验在神光 II 靶室上对激光等离子体辐射的 X 射线背光源做了测量, 选用云母 (002) 作为色散元件。

## 2 背光椭圆弯晶设计原理及背光靶设计

### 2.1 背光椭圆弯晶设计

在真空球形靶室内测试背光源的空间非常有限, 为了预留激光背光源的使用空间, 要求背光椭圆弯晶与入射激光在靶法线的同侧, 入射激光以  $30^\circ$  角斜入射背光薄靶, 长轴方向与入射激光方向的夹角约为  $90^\circ$ , 探测方向的 X 射线光子数相对较少<sup>[2]</sup>。

从椭圆几何性质可知, 椭圆一个焦点上光源发出的光线经椭圆弯晶衍射后必会聚焦到另一焦点上<sup>[9]</sup>, 如图 1 所示, 7# 和 8# 激光聚焦到 Cu 靶处, 即椭圆弯晶的 F1 焦点。而在另一焦点 F2 处设置一条狭缝, 通过狭缝的 X 射线辐射到探测器 CCD 上, 该 CCD 相机为  $1340 \text{ pixel} \times 100 \text{ pixel}$  的二维接收器件, 每个像素的面积为  $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 。背光椭圆弯晶诊断系统中  $\theta$  为布拉格角,  $\beta$  为谱线探测角,

几何关系如下:

$$\begin{cases} x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1 \\ c = \sqrt{a^2 - b^2} \\ e = c/a \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $a$  为椭圆弯晶长半轴,  $b$  为短半轴,  $c$  为半焦距,  $e$  为离心率。忽略弯晶折射效应, 其布拉格方程为

$$n\lambda = 2d\sin\theta, \quad (2)$$

式中  $n$  为衍射级次, 为正整数,  $\lambda$  是入射 X 射线波长, 用 (1) 式和 (2) 式, 得到谱线探测角  $\beta$  的函数为

$$\beta = \theta + \arccos \frac{\cos\theta}{e}. \quad (3)$$

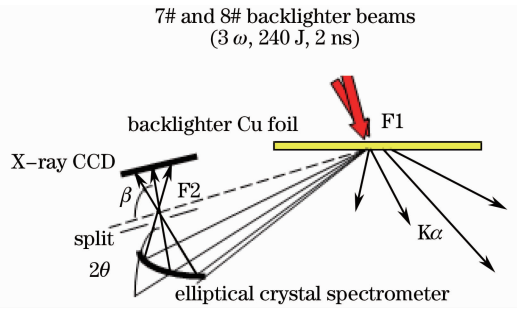


图 1 椭圆弯晶在神光 II 上的安装示意图  
Fig. 1 Schematic of the installation of elliptically bent crystal on SG II facility

根据镶嵌晶体模型, 以及云母的结构因子分量, 得到云母积分反射率计算公式为

$$R_m = \frac{\gamma_0 \phi \lambda^2}{16\pi\alpha} (F_1^2 + F_2^2) \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin 2\theta}. \quad (4)$$

式中  $\phi$  是单位体积内的晶胞数,  $\alpha$  是光学常数,  $\gamma_0$  是经典电子半径,  $F_1$  和  $F_2$  是云母晶体的结构因子分量。晶体材料不同, 其基本参数也不同, 直接影响其对入射 X 射线的衍射强度。由 Henke 等<sup>[10]</sup>的研究可知常温下云母晶体材料的积分反射系数 ( $R$ ) 和峰值衍射率 ( $P$ ) 都较小 (见图 2), 即获得谱线峰值的衍射光子数量较少, 强度分布曲线包络的面积较小, 射线衍射强度较低。实验中, 云母晶体对 X 射线的衍射效率虽然不高, 但其具有多阶衍射能力, 常用于波长为 0.2~2 nm 的 X 射线诊断中。

### 2.2 背光靶的研制

吸收激光能量与表面等离子体冕区吸收激光能量的机制密切相关, 从产生 X 射线的几种机制上看, 激光加载产生 X 光的转换效率较低, 比如 Cu 的 8 keV 射线转换效率常常不超过 1%<sup>[4]</sup>, 反映出吸收激光能量比较低, 产生超热电子的数量少, 从而引发碰撞激发原子的概率低, 故 X 射线的产额低。一些研究人员从改进材料入手, 研究增强吸收激光能量的效率, 并得到了部分规律, 如 Tata 研究所的

Rajeev 等<sup>[11]</sup>对激光与粗糙 Cu 靶、纳米球靶、天鹅绒靶的研究结果表明天鹅绒靶吸收激光能量效率和 X

射线产额较高。

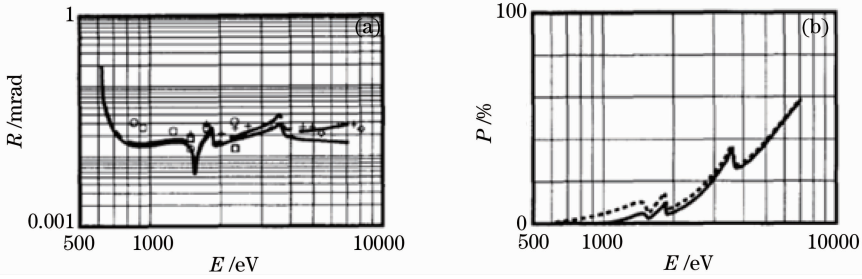


图 2 云母晶体的(a)积分反射系数和(b)峰值衍射率

Fig. 2 (a) Integral reflection coefficient and (b) peak diffraction efficiency of mica crystal

与印度 Tata 研究所探测 X 射线不同,本文实验以背光靶后辐射 X 射线作为光源,故选择最佳靶厚度至关重要,既不能让激光直接击穿,又不能完全拦截 X 射线使其只在靶后辐射。熊勇<sup>[12]</sup>用激光分别驱动 3、10、30、100 μm 厚的铜靶,发现 30 μm 厚靶的 K 线光子产额及转换效率最高,分别是  $9.61 \times 10^9$  和  $1.97 \times 10^{-5}$ 。本文实验利用 SG II 激光装置 7 号和 8 号激光驱动<sup>[13]</sup>,其光束能量均为 260 J,脉宽为 1 ns,能量密度约为  $1.0 \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>,3 倍频波长  $\lambda_0$  为 0.35 μm,归一化振幅因子  $a_0 = \frac{eE_0}{mc^2 k} = 8.5 \times 10^{-10} \lambda_0 (\mu\text{m}) \cdot$

$\sqrt{I_0 (\text{W}/\text{cm}^2)} = 0.003$ 。经过粒子云网格算法(PIC)仿真发现超热电子运行到 8 μm 趋于饱和,如图 3 所示。为了保留超热电子与原子的碰撞路径,选用的背光靶厚度需略大于 8 μm,在对 X 射线转化率没有严格要求下,实验选用 10 μm 厚的 Cu 平面薄靶。为了便于实验安装,该靶组件还设计了 50 μm 厚的 CH 膜隔离层以及两个定位铜孔。

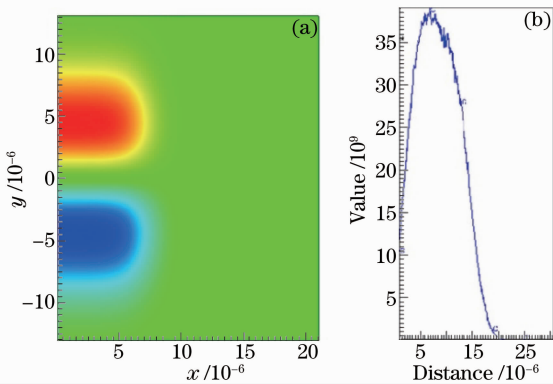


图 3 激光驱动 Cu 平面靶高能电子电场

Fig. 3 High energy electrons field of laser driving flat Cu target

### 3 实验数据及分析

#### 3.1 实验

神光 II 装置的南北向分别有 4 路激光放大链,每路激光放大链终端输出激光净口径为  $\phi 230$  nm,具有两种脉宽(1 ns,100 ps)、三种波长(1.053 μm,0.53 μm,0.35 μm)的输出能力,装置终端输出能量达 6 kJ(脉宽为 1 ns,波长为 1.053 μm)。第 9 路激光存在二倍频和三倍频两种能量方式,其中三倍频能量为 300~1200 J,脉宽为 0.2~1.0 ns<sup>[14]</sup>。第 9 路激光器能量较强,将预留作为加载激光,故选用 7 号和 8 号激光器作为背光源驱动激光光源。

实验的色散元件为云母(002)椭圆晶体分析器,其晶格常数为 1.984 nm,具有多阶衍射能力,满足(2)式条件的 X 射线会发生掠入衍射,在探测器上能获得对应的波长  $\lambda$ 。由于云母晶体的厚度约为 0.2 mm,无法自身形成理想的椭圆半径,需要平整地固定在椭圆基底上,才能保证 X 射线的自聚焦。所以,椭圆基底非常关键,其设计工艺及机加工精度尤为重要。椭圆弯晶基底选用高强度的不锈钢,设计参数  $2c=1350$  mm, $e=0.9586$ 。采用微米级精度的数控机床加工打磨,使粘贴晶体的椭圆金属表面粗糙度  $R_a$  为 1.6。将云母晶体薄片(125 mm × 10 mm × 0.2 mm)经特殊工艺弯曲后,用环氧树脂粘接剂平整粘贴在椭圆基底上,不得含有气孔,否则将影响 X 射线衍射性能。

该椭圆弯晶谱仪安装在 SG II 激光装置上,根据(2)式推导,衍射级次  $n=11$ ,衍射布拉格角  $\theta$  为  $50^\circ \sim 67^\circ$ ,7 号和 8 号激光的聚焦点位于椭圆弯晶 F1 焦点的平面 Cu 薄靶上;长轴方向与靶夹角约成  $30^\circ$ ,CCD 探测波长  $\lambda$  范围为 0.14~0.16 nm。按照设计要求,该椭圆弯晶光谱分辨率( $\lambda/\Delta\lambda$ )不低于 700,主要特征 X 射线的半峰全宽(FWHM)为

10 pm。在 CCD 探测器前选用 7  $\mu\text{m}$  Be 膜以及 20  $\mu\text{m}$  Al 膜, 抵挡低能 X 射线和可见光。通过 SG II 7 # 和 8 # 路激光器打靶实验, 得到 Cu 等离子体 X 射线如图 4 所示。

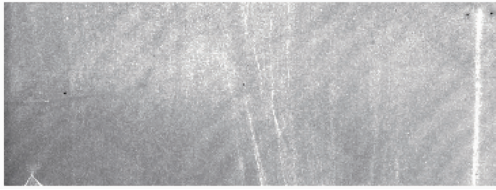


图 4 空间分辨光谱的照片

Fig. 4 Photo for spatial resolved spectrum

### 3.2 实验结果分析

Cu 的  $K\alpha$  和  $H\alpha$  的波长分别是 0.15406 nm 和 0.1425 nm, 根据这两条特征谱线和几何结构, 设计 Matlab 程序, 将图 4 标记为波长与相对强度之间的

关系, 获得主要峰值像素点对应波长, 如图 5 及表 1 所示。图 5 和表 1 中反映的是 7750~8850 eV 波长的类氢、类氦和  $K\alpha$  线。但是特征谱线对应的位置存在一定误差, 可能与探测角发散分布有关, 导致类氢的两条谱线差异明显。由于 CCD 获取的谱线有本底噪声, 采用最小二乘法差值处理, 得到了 Cu 类氢  $H\alpha$  和类氦  $He\alpha$  线(8701 eV 和 8344 eV), 显然 Cu 的 K 壳层发射谱中类氦线相对较强。

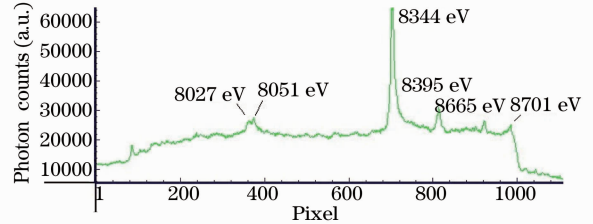


图 5 云母晶体光谱强度分布

Fig. 5 Mica crystal spectrum intensity distribution

表 1 Cu 谱线波长及相对误差

Table 1 Wavelengths of Cu spectra and comparison errors

Label	Transition	Theory $\lambda$ /eV (Ref [12-13])	Present measurement $\lambda$ /eV	Comparison error /eV	$\theta$ /( $^\circ$ )
$H\alpha$	$2p_{1/2}$	8701	8702	-1	52.33
$H\alpha$	$2p_{3/2}$	8665	8635	30	52.90
$He\alpha$	$2p^3P_1$	8395	8511	-116	54.03
$He\alpha$	$2p^1P_1$	8344	8390	-46	55.18
$K\alpha_1$	$2p_{3/2} - 1s_{1/2}$	8051	8047	4	58.86
$K\alpha_2$	$2p_{1/2} - 1s_{1/2}$	8027	8031	-4	59.05

经过解谱对应发现  $K\alpha_1$  和  $K\alpha_2$  没有完全分开, 经过进一步放大, 如图 6 所示, 发现  $K\alpha_1$  和  $K\alpha_2$  对应的峰值光子数分别达到 4623 和 3163, 推出  $K\alpha_1$  与  $K\alpha_2$  线的强度之比  $I_{\alpha_1}/I_{\alpha_2} \approx 1.5$ , 而 Tian 等<sup>[15]</sup> 在上海光学与精密机械研究所拍瓦激光装置轰击 Cu 纳米靶产生的两条 Cu  $K\alpha$  线之比为 2。田野用石英椭圆弯晶测量了波长为 0.153~0.155 nm 的 X 射线, 用 25  $\mu\text{m}$  厚的 Be 膜进行过滤, 过滤掉低于 1 keV 能量的 X 射线。实验采用更薄(7  $\mu\text{m}$ ) 的 Be 膜和 CH 膜, Be 的衰减系数是  $1.65 \text{ cm}^{-1}$ , 按照  $I = I_0 \exp(-\mu x)$  推断出金属膜衰减了 0.9988。此外由于云母晶体经过位错处理后<sup>[16]</sup>, 初步估算 X 射线峰值衍射率在 8 keV 时, X 射线从产生到探测, 大约只有 50% 被记录下来, 加上激光转换成超热电子的转化率在  $10^{-5}$  量级。实验产生 X 射线的转化率与 Babonneau 等<sup>[4]</sup> 的 Cu 靶转换率基本一致, 都低于气体靶的转化率<sup>[3]</sup>。对主要类氢、类氦、 $K\alpha$  谱线解谱、跃迁过程和误差如表 1 所示, 其  $He\alpha$  谱线的空间分辨率( $\lambda/\Delta\lambda$ ) 最高, 达到了 739, 而  $K\alpha$  线存在

旁瓣, 未计算空间分辨率。

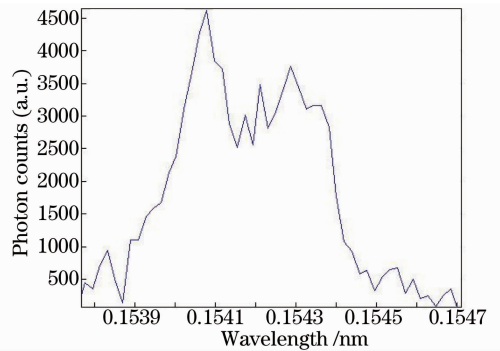


图 6 Cu  $K\alpha_1$  和  $K\alpha_2$  线的局部光谱

Fig. 6  $K\alpha_1$  and  $K\alpha_2$  local spectra of Cu

## 4 结 论

强激光加载可以重复调制, 其驱动靶产生 X 射线是一种很有应用前景的成像射线源。通过理论模拟, 选定 10  $\mu\text{m}$  厚的 Cu 平面薄靶作为背光靶, 在 SG II 激光装置上用 7 # 和 8 # 两路激光器同时加载, 用云母(002)椭圆晶体谱仪配置的 CCD 相机成

功获取了 Cu 等离子体 X 射线。结果表明该谱仪谱分辨率( $\lambda/\Delta\lambda$ ) 达了 700, 满足设计要求。但由于背光源有限空间布置, 云母晶体对 X 射线的衍射级次为 11 阶, 积分衍射效率较低, 需要对实验光路、晶体材料等设计改进, 提高激光等离子体 X 射线的空间分辨率等光源性能, 以便探索冲击波对材料的相变响应机理。此外, 如果能够在 SG II 激光装置靶室内安装极化谱仪, 则可展开神光激光等离子体 X 射线源各向异性参数研究。

### 参 考 文 献

- 1 C G Serbanescu, J A Chakera, R Fedosejevs. Efficient  $K\alpha$  X-ray source from submillijoule femtosecond laser pulses operated at kilohertz repetition rate[J]. Rev Scient Instrum, 2007, 78(10): 103502.
- 2 L M Chen, P Forget, S Fourmaux, *et al.*. Study of hard X-ray emission from intense femtosecond Ti:sapphire laser-solid target interactions[J]. Phys Plasmas, 2004, 11: 4439.
- 3 C A Back, J Grun, C Decker, *et al.*. Efficient multi-keV underdense laser-produced plasma radiators[J]. Phys Rev Lett, 2001, 87(27): 275003.
- 4 D Babonneau, M Primout, F Girard, *et al.*. Efficient multi-keV X-ray sources from laser-exploded metallic thin foils[J]. Phys Plasmas, 2008, 15: 092702.
- 5 B Westover, C D Chen, P K Patel, *et al.*. Fast electron temperature and conversion efficiency measurements in laser-irradiated foil targets using a bremsstrahlung X-ray detector[J]. Phys Plasmas, 2011, 18: 063101.
- 6 F Girard, J P Jadaud, M Naudy, *et al.*. Multi-keV X-ray conversion efficiencies of laser-preexploded titanium foils [J]. Phys Plasmas, 2005, 12: 092705.
- 7 R F Heeter, J A Emig, K B Fournier, *et al.*. X-ray spectroscopy with elliptical crystals and face-on framing cameras[J]. Rev Sci Instrum, 2004, 75(10): 3762–3764.
- 8 Gao Jie, Zhong Xianxin, Xiong Xiancai, *et al.*. Elliptical crystal spectrometer designed for laser-produced plasma X-ray [J].

- Chinese J Lasers, 2005, 32(2): 180–183.
- 高 洁, 钟先信, 熊先才, 等. 激光等离子体 X 射线椭圆弯晶谱仪的设计[J]. 中国激光, 2005, 32(2): 180–183.
- 9 Wang Hongjian, Xiao shali, Shi Jun, *et al.*. Elliptical crystal spectrometer researched for Z-pinch plasma X-ray by using Au-wire arrays[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(3): 685–688.
- 王洪建, 肖沙里, 施 军, 等. 金丝 Z 缩等离子体 X 射线椭圆弯晶谱仪研究[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 685–688.
- 10 B L Henke, Gullikson E M, Davis J C. X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at  $e=50$ –30000 eV,  $z=1$ –92[J]. At Data and Nucl Data Tables, 1993, 54(2): 181–342.
- 11 P P Rajeev, S Banerjee, A S Sandhu, *et al.*. Role of surface roughness in hard-X-ray emission from femtosecond-laser-produced copper plasmas [J]. Phys Rev A, 2002, 65 (5): 052903.
- 12 Xiong Yong. Conversion Efficiency from Ultra-Strong Laser to Suprathermal Electrons Base on  $K\alpha$  X-ray[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2008.
- 熊 勇. 基于  $K\alpha$  射线超短超强激光超热电子转换研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2008.
- 13 Zhang Junyong, Sun Meizhi, Zhang Yanli, *et al.*. Inverse problem of frequency conversion at SG-II final optical assemble [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0916003.
- 张军勇, 孙美智, 张艳丽, 等. 神光 II 终端光学组件的频率变换逆问题研究[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0916003.
- 14 Zhu Jianqiang. Shengguang II: high power laser facility [J]. Chinese Journal of Nature, 2006, 28(5): 271–273.
- 朱健强. 中国的神光——神光 II 高功率激光实验装置[J]. 自然杂志, 2006, 28(5): 271–273.
- 15 Ye Tian, Wentao Wang, Cheng Wang, *et al.*. Experimental study of K-shell X-ray emission generated from nanowire target irradiated by relativistic laser pulses[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(3): 033501.
- 16 Wang Hongjian, Li Zeren, Xiao Shali, *et al.*. Influence on X-ray diffraction by crystal's surface dislocation treatment[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s115001.
- 王洪建, 李泽仁, 肖沙里, 等. 晶体位错处理对 X 射线衍射性能的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s115001.

栏目编辑: 史 敏