

# 用极化晶体谱仪探测 X 射线极化度\*

施军<sup>1</sup>, 肖沙里<sup>1</sup>, 王洪建<sup>1</sup>, 唐昶环<sup>2</sup>, 钱家渝<sup>1</sup>

(1 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

(2 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**为了研究等离子体各向异性及确定高温等离子体中电子束的存在, 研制了 X 射线极化晶体谱仪, 探讨了极化光谱学的理论, 推演了 X 射线极化度的计算方法. 谱仪能够在两个相互垂直的方向分别对 X 射线进行探测, 垂直方向晶体分析器使用云母球面晶体, 水平方向为 PET 平面晶体, 摄谱元件采用成像板. 在激光聚变研究中心  $2 \times 10$  J 激光装置上进行了摄谱实验. 实验结果表明, PET 晶体分光效果理想, 获得了铝的类 He 共振线( $\alpha$ )、磁四级  $M_2$  跃迁  $x$  线、五组合跃迁  $y$  线以及禁戒谱线  $z$  线, 适合于研究 X 射线极化光谱学; 云母晶体得到铝的类 He 共振线, 其伴线光谱不明显. 分析了谱仪垂直方向信号微弱的原因, 提出了改进极化晶体谱仪的方案.

**关键词:**极化度; X 射线光谱; 晶体谱仪; 等离子体诊断

**中图分类号:** O536

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)02-396-5

## 0 引言

由定向电子碰撞激发的 X 射线会产生线性极化辐射, 因此高温等离子体中电子束的出现可以通过对辐射极化度的分析来确定; 电子温度、密度、能量布居等方面的信息也可依据极化度而分析<sup>[1-4]</sup>. 目前相关研究成果并不显著, 由等离子体发射的极化光谱特性并没有被普遍用于 X 射线诊断光谱学. 由高电荷离子产生的 X 射线相对于低电荷离子更易受电磁场的影响, 分析其光谱学更具有适用性. 高温等离子体极化光谱学提供了关于等离子体极化的各向异性信息, 特别是等离子体极化 X 射线光谱学为研究等离子体各向异性提供了新的强有力的工具<sup>[5-7]</sup>. 它可以用来诊断不同密度的等离子体, 从低密度的天体物理等离子体到高密度的 Z 箍等离子体. 目前对等离子体特征的研究还没有收集到足够多的重要信息供我们分析, 在极化状态下, 方向互相垂直的两类谱线的强度包含有等离子体特性的有用信息, 大多数晶体谱仪都是基于谱线的强度分布和谱线的轮廓形状<sup>[8-9]</sup>来研究等离子体. X 射线极化光谱仪是太空和实验室等离子体诊断的一种重要仪器, 通常利用电子束离子阱 (Electron Beam Ion Trap, EBIT) 装置进行极化诊断及理论模型检验的研究工作, EBIT 能够产生高电荷离子用于原子结构及电子-离子的相互作用研究, 极化 X 射线在电子束产生的 X 射线源中可以得到最优化值. 高放电的离子由单能电子束激励, 这种源对于测试理论和研究等离

子体极化光谱仪是非常理想的. 在美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室利用 EBIT 设备测量电子碰撞电离、激发、再复合等已经获得了一定的研究成果<sup>[10-11]</sup>, 上海 EBIT 设备目前正在建设中, 研制的极化光谱仪是检测其性能的重要仪器. 本文研制了 X 射线极化晶体谱仪, 探讨了极化光谱学的理论, 推演了 X 射线极化度的计算方法; 分析了谱仪垂直方向信号微弱的原因, 提出了改进极化晶体谱仪的方案.

## 1 极化理论

由碰撞激发产生的 X 射线强度和极化度依赖于相对离子或电子运动速率方向的观测角. 假定离子与单能电子在  $z$  轴方向碰撞, 在与  $z$  轴成  $90^\circ$  方向进行观测, 平行于  $z$  轴方向的电子矢量  $E_{\parallel}$  的强度为  $I_{\parallel}$ , 垂直方向电子矢量  $E_{\perp}$  的强度为  $I_{\perp}$ , 电子矢量极化态示意图见图 1, 晶体对电子矢量的衍射见图 2. 经受激跃迁的极化度可定义为

$$P = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}} \quad (1)$$

总的观测强度为

$$I(90^\circ) = I_{\parallel} + I_{\perp} \quad (2)$$

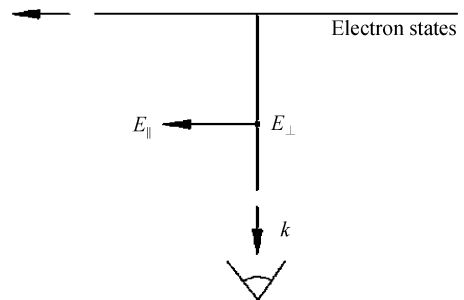


图 1 电子矢量极化态  
Fig. 1 Polarization states

\* 国家自然科学基金(10576041)资助

Tel: 023-65105287 Email: gysj\_001234@163.com

收稿日期: 2007-09-07

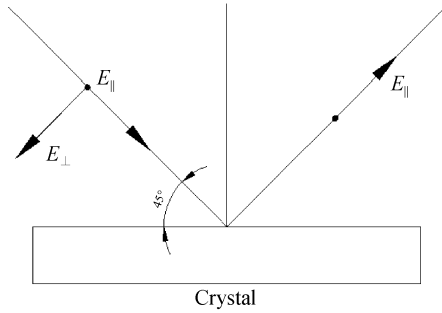


图 2 晶体对电子矢量不同极化态的衍射  
Fig. 2 Crystal selects polarization state

极化光谱仪采用分光晶体获取需要的单能 X 射线,其积分衍射效率由晶体类型决定,利用谱仪观测的 X 射线强度为<sup>[12]</sup>

$$I_{\text{obs}} = R_{\parallel} I_{\parallel} + R_{\perp} I_{\perp} \quad (3)$$

$R_{\parallel}$ 、 $R_{\perp}$  分别是极化 X 射线垂直及平行于衍射面的晶体积分衍射率. 通常而言  $R_{\parallel} \neq R_{\perp}$ , 因此可以利用双晶体极化谱仪确定  $I_{\parallel}$  及  $I_{\perp}$  来探测 X 射线的极化度.  $R_{\perp}$  与  $R_{\parallel}$  的比值  $R$  主要由布喇格角  $\theta$  决定, 对镶嵌晶体而言  $R$  为  $\cos^2(2\theta)$ , 完美晶体  $R$  为  $\cos(2\theta)$ , 实际使用的晶体  $R$  值介于两者之间<sup>[13]</sup>.

## 2 极化度计算

采用类 He 离子研究电子与电子相互作用主要是因为类 He 离子是最简单的多电子系统. 铝的类 He 谱线有共振线 ( $\omega$ ), 其跃迁状态为  $1s2p \ ^1P_1 - 1s^2 \ ^1S_0$ , 磁四级  $M_2$  跃迁 ( $1s2p \ ^3P_2 - 1s^2 \ ^1S_0$ )  $x$  线, 互组合跃迁 ( $1s2p \ ^3P_1 - 1s^2 \ ^1S_0$ )  $y$  线及禁戒谱线 ( $1s2p \ ^3S_1 - 1s^2 \ ^1S_0$ )  $z$  线. 计算极化度需要知道两个互相垂直方向的晶体获取谱线的强度, 同时也要已知一条参考谱线的极化度. 水平方向晶体 (以 1 标记) 获取的其中两条谱线强度比为

$$\left( \frac{I^a}{I^b} \right)_1 = \frac{I_{\parallel}^a + R_1 I_{\perp}^a}{I_{\parallel}^b + R_1 I_{\perp}^b} \quad (4)$$

由于共振线及其伴线波长差别很小, 故可以假定  $R = R_{\perp} / R_{\parallel}$  在  $a, b$  两谱线波长范围内为一定值. 同样可以得到由垂直方向晶体 (以 2 标记) 获取的两条谱线强度比为

$$\left( \frac{I^a}{I^b} \right)_2 = \frac{I_{\parallel}^a + R_2 I_{\perp}^a}{I_{\parallel}^b + R_2 I_{\perp}^b} \quad (5)$$

根据式 (1)、(4)、(5) 就可到  $a, b$  线极化度  $P_a$ 、 $P_b$  的关系式

$$P_a = \frac{\left( \frac{I^a}{I^b} \right)_1 \left[ 1 + R_1 \frac{1 - P_b}{1 + P_b} \right] (R_2 + 1)}{\left( \frac{I^a}{I^b} \right)_1 \left[ 1 + R_1 \frac{1 - P_b}{1 + P_b} \right] (R_2 - 1)} \rightarrow$$

$$\leftarrow \frac{\left( \frac{I^a}{I^b} \right)_2 \left[ 1 + R_2 \frac{1 - P_b}{1 + P_b} \right] (R_1 + 1)}{\left( \frac{I^a}{I^b} \right)_2 \left[ 1 + R_2 \frac{1 - P_b}{1 + P_b} \right] (R_1 - 1)} \quad (6)$$

如果  $b$  线极化度已知, 根据式 (6) 可以计算出  $a$  线的极化度. 假设  $b$  线没有极化, 即  $P_b = 0$ , 那么  $P_a$  就完全由谱线强度比决定, 通常任何一条类 He 线的极化度都是未知的.  $P_x$  与  $P_z$  有以下相互关系<sup>[15]</sup>

$$P_z = \frac{3k \sqrt{\frac{14}{5}} P_x}{3\sqrt{2} - P_x \left[ \sqrt{2} + k \sqrt{\frac{14}{5}} \right]} \quad (7)$$

式中系数  $k$  由式 (8) 得出

$$k = \sqrt{\frac{7}{20} \frac{\beta_r \sigma_{\text{total}}(^3P_2)}{\sigma_{\text{total}}(^3S_1) + \sigma_{\text{total}}(^3P_0) + \beta_r \sigma_{\text{total}}(^3P_2)}} \quad (8)$$

$\beta_r$  表示  $^3P_2$  退激发至  $^3S_1$  的衰变分支比,  $\sigma_{\text{total}}$  表示各能级总的激发截面积, 单位为  $\text{cm}^2$ .  $\sigma_{\text{total}}(^3P_2) / [\sigma_{\text{total}}(^3S_1) + \sigma_{\text{total}}(^3P_0) + \sigma_{\text{total}}(^3P_2)]$  保持为一恒量 (0.645), 因此  $k$  只由  $\beta_r$  决定. 由于  $z$  线的极化度比较低, 通常在 0.1 以下, 故在数据处理时可以假定  $P_z$  的初值为 0, 则利用式 (6) 计算出  $P_x$  的值, 然后将  $P_x$  数据代入式 (7) 得出  $P_z$  的值, 再继续循环, 利用迭代法可以将  $P_x$  值计算出来,  $P_z$  的实际值也可迭代算出. 最后  $\omega$  线、 $y$  线的极化度均可由式 (7) 得到.

## 3 极化谱仪设计

研制的极化光谱仪原理如图 3. 由大功率激光

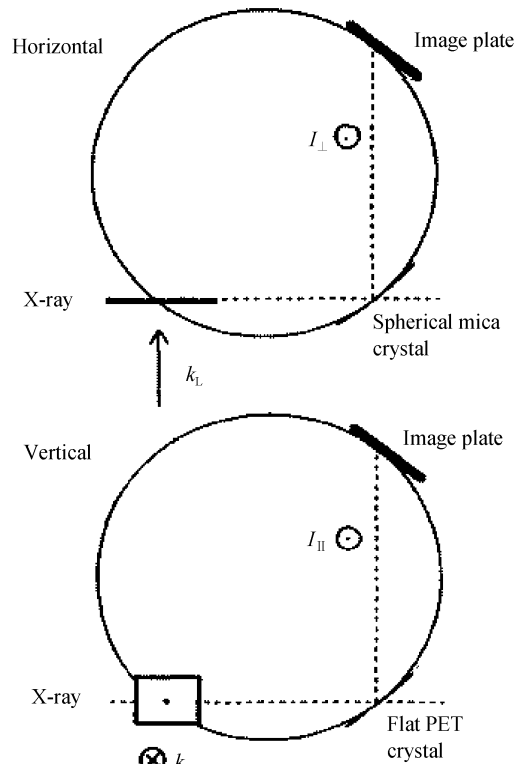


图 3 极化光谱仪原理

Fig. 3 Principle of polarization spectrometer

照射铝平面靶激发 X 射线,在极化谱仪垂直及水平方向分别用云母球面晶体、PET 平面晶体对 X 射线衍射,同时在光谱仪两个互相垂直的出射方向用 IP 接收信号. 铝的类 He 共振线( $w$ )波长为 0.7757 nm,云母晶体  $2d$  值为 1.984 nm,PET 晶体  $2d$  值为 0.8742 nm,由布喇格公式

$$n\lambda = 2d\sin(\theta) \tag{9}$$

计算时云母取二阶( $n=2$ ),得出云母晶体时布喇格角 $\theta=51.44^\circ$ ,采用PET晶体时 $n$ 取1, $\theta=62.54^\circ$ ,布喇格角 $\theta$ 为入射 X 射线与晶体反射面之间的夹角.由文献[14]可以查出,云母与 PET 晶体的  $R$  值( $R_{\perp}/R_{\parallel}$ )分别为 0.502 及 0.516,其特性类似于完美晶体.按照理论分析的两处信号可得到谱线极化的相关信息.

### 4 实验

#### 4.1 实验过程

实验测试在中国工程物理研究院  $2\times 10$  J 激光装置上进行.激光装置的调试及打靶要求文献[16]有详细描述.晶体极化谱仪安装在靶室外东北方向,将厚度为 100  $\mu\text{m}$ 、纯度为 99.99% 的铝平面靶北偏东  $45^\circ$  方向放置,三倍频激光由北向东入射,激光束与靶面法线夹角约为  $22.5^\circ$ ,入射激光波长为 0.35  $\mu\text{m}$ ,激光能量为 6~8 J,激光脉宽为 800 ps,焦斑直径约 120  $\mu\text{m}$ ,靶面功率密度为  $1.13\times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>.激光点聚焦打靶,产生高温等离子体,形成 X 射线光源.极化谱仪在水平及垂直两个方向衍射 X 射线,铝平面靶材与晶体中心光程长约 800 mm.摄谱器件为 IP,晶体中心与 IP 光程长约 100 mm.采用两块 IP 在水平及垂直方向分别对不同晶体的 X 射线衍射信号进行接收.实验装置中晶体安放位置见图 4.

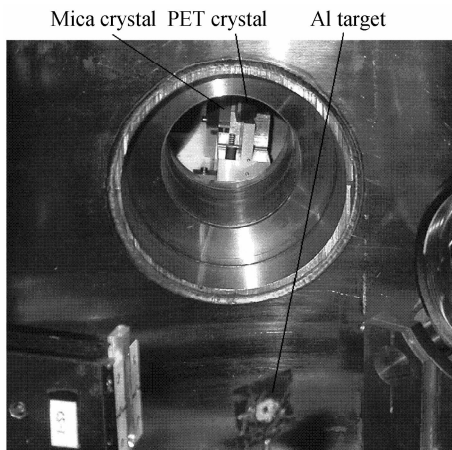


图 4 谱仪内部的配置  
Fig. 4 Crystals collocation for measurement

IP 获取的铝激光等离子体 X 射线的光谱照片

见图 5,图中左边谱线由 PET 平面晶体获取,右边谱线由云母球面晶体获取.由图 5 看出,PET 晶体获取的谱线强度理想,磁四级  $M_2$  跃迁  $x$  线、互组合跃迁  $y$  线、禁戒谱线  $z$  线均清晰可见,能够用于极化度的计算分析.云母晶体获取的谱线也比较清晰,但强度较低,铝的类 He 共振线明显,其伴线在实验中没有观测到.

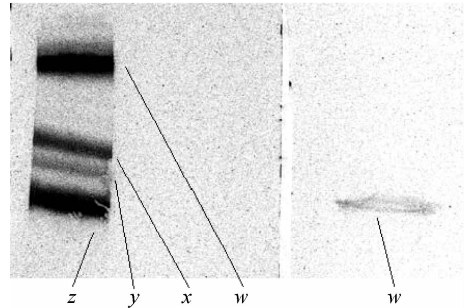
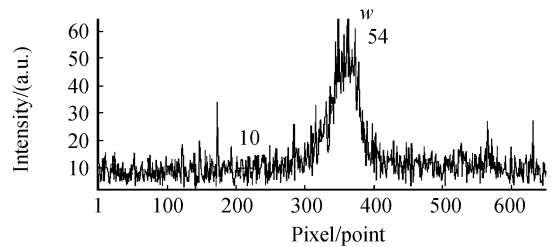


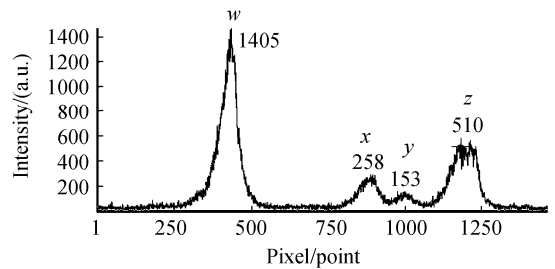
图 5 在 Al 靶上获取的极化光谱  
Fig. 5 Polarization spectra of Al target ions

#### 4.2 实验结果分析

由云母球面晶体、PET 平面晶体获取谱线的强度分布如图 6.比较图 6(a)、(b)两处图样可看出,PET 晶体获取的光谱强度较高,类 He 共振线及其伴线能清晰分辨出来.利用 WinView32 软件对图谱进行数据处理,得到沿 X 方向的截面图,图 6 反映的是像素位置与光子数之间的关系,横轴表示像素位置,与谱线波长对应;纵轴表示谱线强度.对图 6 利用 Microcal Origin(6.0)进行寻峰处理,得到谱线峰值的像素位置.铝的类 He 共振线( $w$ )波长为 0.7757 nm,即是图 6 中谱线最大峰值处.在图 6(a)谱线不存在其他峰值,只得到共振线的数据,谱



(a)Spherical Mica crystal( $\lambda_w=0.7757\text{nm}$ )



(b)Flat PET crystal( $\lambda_w=0.7757\text{nm},\lambda_x=0.7794\text{nm},\lambda_y=0.7806\text{nm},\lambda_z=0.7820\text{nm}$ )

图 6 云母球面晶体和 PET 晶体获取的谱线强度分布  
Fig. 6 Spectrum intensity of spherical Mica crystal and flat PET crystal

线强度较弱. PET 晶体能够得到磁四级  $M_2$  跃迁  $x$  线、互组合跃迁  $y$  线、禁戒谱线  $z$  的强度数据. 分析原因可知:1) 云母晶体  $2d$  值为 1.984 nm, 由布喇格公式  $n\lambda = 2d \sin \theta$  计算  $n$  只能取 2, 此时衍射效率较低; PET 晶体  $2d$  值为 0.8742 nm, 其 1 阶衍射效率最强; 2) 打靶的激光功率比较低, 功率密度约为  $1 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ ; 3) IP 与 X 射线源光程长较大(约 900 mm); 4) IP 探测 X 射线效率比较低(比 X 射线 CCD 低一个数量级), 对微弱光源不敏感. 由于极化度的计算需要知道各谱线的强度比, 因此根据这次的实验数据还不能得到极化度结果, 必须对谱仪结构进行设计变更或者变换分光晶体以进一步实验研究.

## 5 结论

探测 X 射线极化度需要获取两个互相垂直方向的谱线强度数据. 实验中极化光谱仪在水平及垂直两个方向利用不同得分光晶体都获得了谱线信号, 其中水平方向的 PET 晶体完全符合设计要求, 能够得到铝的类 He 共振线( $\tau$ )、磁四级  $M_2$  跃迁  $x$  线、互组合跃迁  $y$  线以及禁戒谱线  $z$  线, 其强度也达到预期目标, 适合于研究 X 射线极化光谱学. 因为云母晶体取二阶时衍射效率比较低, 由云母晶体获取的谱线强度较弱, 垂直方向只得到了铝的类 He 共振线数据, 其伴线没有探测到. 因此需要对极化谱仪进行设计变更, 主要有以下方面: 1) 减小 X 射线光源到检测器件的光程长, 即将谱仪的探测机构安置在  $2 \times 10 \text{ J}$  激光装置内部, 可以将光程长减小到原来的三分之一, 即 300 mm 左右; 2) 将云母晶体变换为  $\alpha$ -石英晶体( $2d = 0.8512 \text{ nm}$ ), 以提高晶体衍射效率; 3) 采用 X 射线 CCD 代替 IP, 提高检测效率.

### 参考文献

- [1] REGAN S P, DELETTREZ J A, EPSTEIN R, *et al.* Characterization of direct-drive-implosion core conditions on OMEGA with time-resolved Ar K-shell spectroscopy [J]. *Physics of Plasmas*, 2002, **9**(4):1357-1365.
- [2] WEINHEIMER J, AHMAD I, HERZOG O, *et al.* High-resolution X-ray crystal spectrometer/polarimeter at torus experiment for technology oriented research-94 [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, **72**(6):2566-2574.
- [3] PEACOCK N J, BARNESLEY R, O' MULLANE M G, *et al.* Ionization balance in EBIT and tokamak plasmas [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, **72**(1):1250-1255.
- [4] TAKACS E, MEYER E S, GILLASPY J D, *et al.* Polarization measurements on a magnetic quadrupole line in Ne-like barium [J]. *Physical Review A*, 1996, **54**(2):1342-1350.
- [5] TCHEN T. 2D Laue focusing of X-ray radiation by a double-crystal system [J]. *Technical Physics*, 2002, **47**(6):666-672.
- [6] KANTSYREV V, BAUER B, SHLYAPTSEVA A, *et al.* Advanced X-ray and extreme ultraviolet diagnostics and first applications to X-pinch plasma experiments at the Nevada Terawatt Facility [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, **72**(1):663-666.
- [7] KIEFFER J C, MATTE J P, CHAKER M, *et al.* X-ray-line polarization spectroscopy in laser-produced plasmas [J]. *Physical Review E*, 1993, **48**(6):4648-4658.
- [8] XIONG Xian-cai, ZHONG Xian-xin, DUAN Shao-guang, *et al.* Reflectivity characteristics of dispersion crystal KAP for soft X-ray [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1):73-75.  
熊先才, 钟先信, 段绍光, 等. 软 X 射线分光晶体 KAP 的反射率特性 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(1):73-75.
- [9] XIONG Xian-cai, ZHONG Xian-xin, XIAO Sha-li, *et al.* Bent crystal spectrometer for X-ray space and time resolved measurements [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5):722-725.  
熊先才, 钟先信, 肖沙里, 等. 用于 X 射线时空分辨测量的弯晶谱仪 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(5):722-725.
- [10] BEIERSDORFER P, MARRS R E, HENDERSON J R, *et al.* High-resolution X-ray spectrometer for an electron beam ion trap [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1990, **61**(9):2338-2342.
- [11] SHLYAPTSEVA A S, FEDIN D A, HAMASHA S M, *et al.* X-ray spectroscopy and spectropolarimetry of high energy density plasma complemented by LLNL electron beam ion trap experiments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, **74**(3):1947-1950.
- [12] BEIERSDORFER P, VOGEL D A, REED K J, *et al.* Measurement and interpretation of the polarization of the X-ray line emission of heliumlike Fe XXV excited by an electron beam [J]. *Physical Review A*, 1996, **53**(6):3974-3981.
- [13] BEIERSDORFER P, CRESPO LOPEZ-URRUTIA J, DECAUX V, *et al.* Polarization spectroscopy of x-ray transitions from beam-excited highly charged ions [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, **68**(1):1073-1076.
- [14] HENKE B L, GULLIKSON E M, DAVIS J C. X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at  $E = 50 - 30\,000 \text{ eV}$ ,  $Z = 1 - 92$  [J]. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1993, **54**(2):181-342.
- [15] BEIERSDORFER P, BROWN G, UTTER S, *et al.* Polarization of K-shell X-ray transitions of  $\text{Ti}^{19+}$  and  $\text{Ti}^{20+}$  excited by an electron beam [J]. *Physical Review A*, 1999, **60**(5):4256-4259.
- [16] MIAO Wen-yong, CHEN Jin-xiu, HU Xin, *et al.* Research on coupling of an X-ray mirror to an X-ray framing camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4):750-753.  
缪文勇, 成金秀, 胡昕, 等. X 光分幅相机一平面镜配接方法研究 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(4):750-753.

## Measurement of Polarization of X-ray with Polarization Spectrometer

SHI Jun<sup>1</sup>, XIAO Sha-li<sup>1</sup>, WANG Hong-jian<sup>1</sup>, TANG Chang-huan<sup>2</sup>, QIAN jia-yu<sup>1</sup>

(1 *The Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System, Ministry of Education,*

*Chongqing University, Chongqing 400030, China)*

(2 *Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)*

Received date: 2007-09-07

**Abstract:** For the research on anisotropy of plasma and ascertainment the presence of electron beams in high-temperature plasmas, a X-ray polarization spectrometer was designed. The theory of the polarization spectroscopy was investigated and the ways of polarization calculation were presented. The polarization spectrometer could measure X-ray lines radiated by plasma in the directions of vertical and horizontal. In the vertical configuration the plane of dispersion of the crystal is spherical Mica and in the horizontal configuration the plane of dispersion of the crystal is flat PET. The X-ray spectra emitted from the planar aluminum target was photographed by using the polarization spectrometer with two image plates at the  $2 \times 10$  J facilities in Research Center of Laser Fusion. The experimental result shows that the resonance line  $\omega$ , the magnetic quadrupole  $M_2$  line, the intercombination line  $\gamma$  and the forbidden line  $z$  of He-like Al are obtained with PET crystal in the direction of horizontal. So the PET crystal is suitable for diagnosing soft X-ray spectroscopy. The resonance line  $\omega$  of He-like Al was obtained with Mica crystal and its satellite lines were vanished. At the same time the reasons were analyzed and the X-ray line polarization spectrometer was planned to redesign in order to detect the EBIT device.

**Key words:** Polarization; X-ray spectrum; Crystal spectrometer; Plasma diagnosis



**SHI Jun** was born in 1972. He received his B. S. degree from Chongqing University in 1994. Now he is presently pursuing the Ph. D. degree at College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, and his current research interests focus on X-ray crystal spectrometer and optics engineering.