

文章编号:1004-4213(2011)08-1196-5

极化 X 光谱诊断铝激光等离子体的电子密度

王洪建^{1,2}, 肖沙里², 施军²

(1 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)

(2 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘 要:为了准确诊断激光等离子体的电子密度,提出了一种基于极化光谱的类氦共振线与互组合线相对强度比诊断电子密度的方法. 该法考虑了激光等离子体发射的 X 射线存在极化的特性,用极化光谱理论对测量的类氦共振线和互组合线光谱相对强度比进行精密校正,再推导等离子体的电子密度. 在 2×10^4 J 激光装置上进行了实验,使用极化 PET(002)晶体谱仪测量了 Al 类氦离子光谱,利用光谱的极化特性推出 Al 等离子体的电子密度约为 $1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. 结果表明极化 X 光谱推导等离子体电子密度方法适合激光高温高密等离子体诊断.

关键词:电子密度;极化晶体谱仪;X 射线光谱;激光等离子体诊断

中图分类号:TH 744. 15;O434. 12

文献标识码:A

doi:10. 3788/gzxb20114008. 1196

0 引言

等离子体电子密度作为高温等离子体精密诊断的基本物态参量,是许多研究者积极研究的对象. 在惯性约束聚变诊断中,往往利用几条特征谱线来推算等离子体的电子温度、离子温度和电子密度,如 K、L 壳层电子跃迁产生的类氦线、类氢线因其离子结构简单且能够精确进行光谱计算而备受广泛关注. 目前常用的高温等离子体电子密度光谱测量法有:1)类氦离子共振线和互组合线相对强度比法^[1]; 2)类氢离子伴线相对强度比法^[2]; 3)类氢共振线偶极子分量的相对强度比法^[3]; 4)类氢离子谱线的 Stark 展宽法^[1,3].

Smith 等人^[1]在 1966 年第一次讨论了通过类氦离子的共振线 $w(1s^2 1S_0 - 1s2p^1 P_1)$ 和互组合线 $y(1s^2 1S_0 - 1s2p^3 P_1)$ 相对强度比测量电子密度的可能性. Kunze 等人^[4]在 1968 年首次在 θ 箍缩装置上通过电荷数 $Z=6$ 的类氦离子谱线实验测量了其电子密度 N_e 为 10^{16} cm^{-3} . Bradford^[5]详细阐述了用类氦离子发射的软 X 射线光谱进行诊断的原理. Aglitskii 等人^[6]对于激光等离子体详细的诊断理论和电荷数 $Z=12, 13$ 的实验结果作了大量研究. Boiko 等人^[7]对电荷数 $Z=12 \sim 19$ 的实验结果做了

讨论,给出了密度在一定范围内,强度比值与电子密度成线性关系.

由于离子与定向电子碰撞激发的辐射光是具有极化特性^[8],因此谱线在水平和垂直方向分布不一致,如类氦共振线极化明显,直接用类氦共振线与互组合线强度比诊断其电子密度存在一定差异,需对特征谱线强度进行极化校正处理. 本文提出基于 Al 极化光谱的类氦共振线与互组合线相对强度比进行电子密度诊断方法,并在中国工程物理研究院(中物院)激光聚变研究中心 2×10^4 J 激光装置上实验,利用极化晶体谱仪测量了高离化态离子光谱,经过极化修正,推导出激光等离子体的电子密度约为 $1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

1 基本算法

由 Saha-boltzman 方程可知,由配分函数

$$\mu = \sum_i g_i \exp(-\epsilon_i/kT) \quad (1)$$

继续推导,可得到等离子体局部瞬态热平衡(Local Thermal Equilibrium, LTE)条件下的特征谱线辐射强度

$$I_{ij} \propto \frac{g_i}{\mu} A_{ij} M \exp(-\epsilon_i/kT) \quad (2)$$

式中 A_{ij} 为能级 i 到 j 的自发辐射概率, M 为数密

基金项目:重庆市科委自然科学基金计划(No. 2010BB4250)、重庆工商大学博士启动基金(No. 2011-56-04)和国家自然科学基金(No. 11075226)资助

第一作者:王洪建(1976—),男,助理研究员,博士,主要研究方向为光学精密仪器、测试及控制等. Email:whj_cqu@163.com

导 师:肖沙里(1953—),男,教授,主要研究方向为光学精密仪器、测试及控制等. Email:xiaoshali@cqu.edu.cn

收稿日期:2011-03-09; **修回日期:**2011-05-12

度, g_i 为统计权重, k 为玻尔兹曼常量, T 为离子温度, ϵ_i 为总能量, 表示 i 态的退化程度. 从式(2)可以看出, 所关心的几条谱线上能级之间达到了瞬态平衡状态, 而不要求等离子体不同离化度、不同能级的电子之间都达到平衡状态, 就能进行离子温度、电子密度的诊断. 比如用类氦共振线与互组合线强度比推算电子密度的算法, 其谱线强度比率 α 为

$$\alpha = \frac{I_w}{I_y} = \sigma + 4(\sigma + 1) \frac{C(2^3; 2^1)}{A(2^3 P_1, 1^1 S_0)} + 4\sigma \frac{C(2^3; i) N_e}{A(2^3 P_1, 1^1 S_0)} \quad (3)$$

式中, I_w 和 I_y 分别是共振线和互组合线的谱线强度, 比例系数 σ 表示为

$$\sigma = \frac{C(1^1 S, 2^1 S) + C(1^1 S, 2^1 P)}{C(1^1 S, 2^3 S) + C(1^1 S, 2^3 P)} \quad (4)$$

式中 $C(m, n) = [\nu\sigma(m, n)]$, 表示 $m-n$ 层碰撞跃迁之比, C 是一个近似公式^[6], $A(1^1 S_0 - 2^3 P_1)$ 是互组合线跃迁概率. 假设离化平衡和考虑从 $n=3$ 和 4 的层叠跃迁, $\alpha(N_e)$ 的综合数值被 Vinogradov 等人^[9] 在 $Z=10 \sim 19$ 范围内的类氦离子诊断中得到, 其电子密度 N_e 在 $10^{19} \sim 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ 范围内, 计算表明迭代处理不会在本质上影响 $\alpha(N_e)$ 的线性特征和改变包含直线部分的斜率. 因为使用薄膜动力学测量电子密度 N_e 满足 $1.5 \leq \alpha \leq 30 \sim 50$ 条件. 在 $\alpha \leq 5$ 时, 用上面的两式和改进的驰豫常量, 能得到电子密度 N_e 的合理估计^[10]. 对于 Na X 到 K X VIII 的类氦离子, 基于 N_e 的比率 α 用图 1 表示, 因温度对 α 的影响非常弱而被忽略.

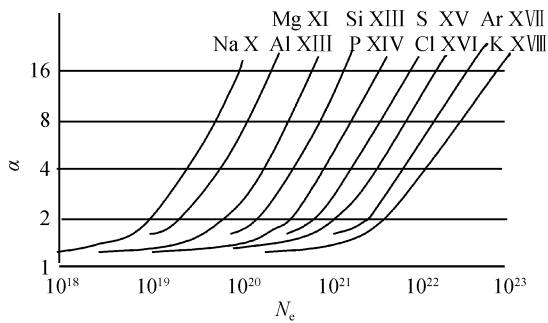


图 1 在高等等离子体中 α 与 N_e 的关系示意图

Fig. 1 Dependences of α on N_e in a dense plasma

当电子密度在 $10^{18} \text{ cm}^{-3} \leq N_e \leq 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的范围内, 假定能级 $2^3 P_j$ 和 $2^3 S_1$ 满足 Boltzmann 平衡式和处理过程: 能级 $2^1 P_1$ 和 $2^3 P_1$ 的辐射衰减、 $2^1 S_0 \rightleftharpoons 2^1 P_1$ 和 $2^3 L_j \rightarrow 2^1 L^1$ 的碰撞跃迁、以及多能级的自离化^[9], 然后 α 变为

$$\alpha = \sigma + \frac{N_e [(\sigma + 1) C(2^3; 2^1) + \sigma C(2^3; i)]}{0.25 A(2^3 P_1; 1^1 S_0)} \quad (5)$$

式中

$$\sigma = \frac{C(1^1 S_0; 2^1 S_0) + C(1^1 S_0; 2^1 P_1)}{C(1^1 S_0; 2^3 S_1) + \sum_{j=0}^2 C(1^1 S_0; 2^3 P_j)}$$

式中 $C(2^3; 2^1)$ 和 $C(2^3; i)$ 是从多级态来的辐射和自离化的跃迁平均比率(超过多级态).

在 $N_e > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 范围内, 三级能级因为电子碰撞离化衰减, 而且多能级向单能级跃迁, 由此导致比率 α 上升. 当 $\alpha > 1.5$ 后, Na X 到 K X VIII 的类氦共振线与互组合线强度比率 α 与 N_e 近似成正比.

2 极化 X 光谱诊断电子密度算法

由于离子与定向电子碰撞激发的 X 射线是极化的, 仅当掠入射角为布儒斯特(45°)时, 光谱分量才能独立分开, 其余角度均为水平和垂直方向的合成光, 因探测角度不同, 其谱线强度也不同. 对于与电子束成 θ 角的辐射的极化度定义为^[11]

$$P(\theta) = \frac{I_\pi - I_\sigma}{I_\pi + I_\sigma} \quad (6)$$

式中, I_π 、 I_σ 分别是平行和垂直方向的光谱分量强度.

此外, 晶体衍射的光谱强度还与晶体积分反射率、峰值衍射率等有关^[8]. 由于都采用同种晶体作为色散元件, 可观察到的类氦共振线和互组合线光谱强度为

$$I_w^{\text{obs}} = (R_\pi I_\pi + R_\sigma I_\sigma)_w \quad (7)$$

和

$$I_y^{\text{obs}} = (R_\pi I_\pi + R_\sigma I_\sigma)_y \quad (8)$$

I_π 和 I_σ 可以用正交布置在 H 和 V 方向的成像板、胶片等探测器测量获得的 I_H 和 I_V 推算出

$$\begin{cases} I_\pi = \frac{I_V - I_H \cos 2\theta}{1 - \cos^2 2\theta} \\ I_\sigma = \frac{I_H - I_V \cos 2\theta}{1 - \cos^2 2\theta} \end{cases} \quad (9)$$

式中, θ 为 X 射线发生衍射条件的布喇格角.

忽略式(3)的后两项, 于是得到共振线和互组合线的相对强度比为

$$\alpha = \frac{I_w}{I_y} = \frac{(R_\pi I_\pi + R_\sigma I_\sigma)_w}{(R_\pi I_\pi + R_\sigma I_\sigma)_y} = \frac{\left(\frac{R_\pi}{R_\sigma} I_\pi + I_\sigma\right)_w}{\left(\frac{R_\pi}{R_\sigma} I_\pi + I_\sigma\right)_y} = \frac{(R I_\pi + I_\sigma)_w}{(R I_\pi + I_\sigma)_y} \quad (10)$$

式中 R_π 和 R_σ 分别是同种晶体在水平和垂直方向的积分反射率, $R(R_\pi/R_\sigma)$ 是衍射晶体的积分反射率, 与入射电子的能量有关, 图 2 显示 PET(002) 晶体两方向的积分反射率之比^[12], 在 2 000 eV 时, 比值接近零.

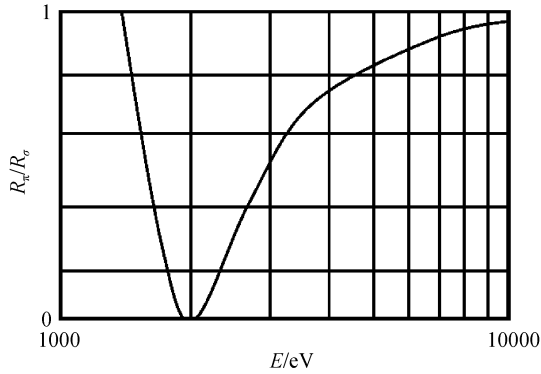


图2 PET(002)晶体正交布喇格反射系数
Fig. 2 Bragg reflection for PET(002) nature crystal

3 实验及结果分析

3.1 实验

实验在中物院激光聚变研究中心 2×10 J 激光装置上进行,该装置输出两束基频(波长 $1.053 \mu\text{m}$)激光,单束激光最大能量为 10 J. 将激光束聚焦于真空靶室内的固体平面 Al 靶表面,产生高温高密激光等离子体,形成高剥离态热等离子体光源. 靶的纯度为 99.99%, 焦斑直径为 $\varphi 200 \mu\text{m}$, 激光脉宽约为 $800 \text{ ps}^{[13]}$.

双晶极化谱仪诊断方案如图 3, 即在与入射电子垂直面内正交布置两片晶体分析器, 结构较灵活. 在基于极化光谱原理诊断等离子体电子密度时, 避免晶体的传输率、晶格反射率等的影响, 使用相同材料、相同结构的晶体分析器. 即要求每个方向的测量都严格按照几何光学的原理, 可采用平面晶体^[14]、椭圆弯晶^[15]或者球面弯晶^[16].

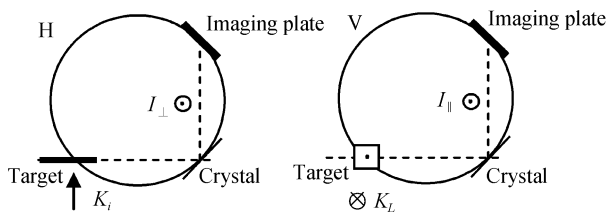


图3 双晶极化谱仪诊断方案
Fig. 3 Schematic diagnosis of the two crystal spectrometers

在极化谱仪箱体的水平和垂直方向分别安装 PET(002) 晶体(弯晶、平面)作为色散晶体, 成像板作为 X 射线探测器, 其有效面积均为 $30 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$. 受 2×10 J 激光装置接口数量和位置的限制, 该极化谱仪一个通道布置在激光装置靶室内, 另一通道在靶室外, 两通道的光程长分别为 310 mm 和 980 mm. 当激光靶室内的真空度优于 $4.0 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 时, 用单束激光轰击 Al 靶, 完成三次有效实验, 实验激光驱动的能量分别为 6.78 J、5.75 J 和 6.39 J, 在 H(水平)光程 980 nm 和 V(垂直)光程 310 nm 方向分别获取 Al 离子光谱原始图像如图 4.

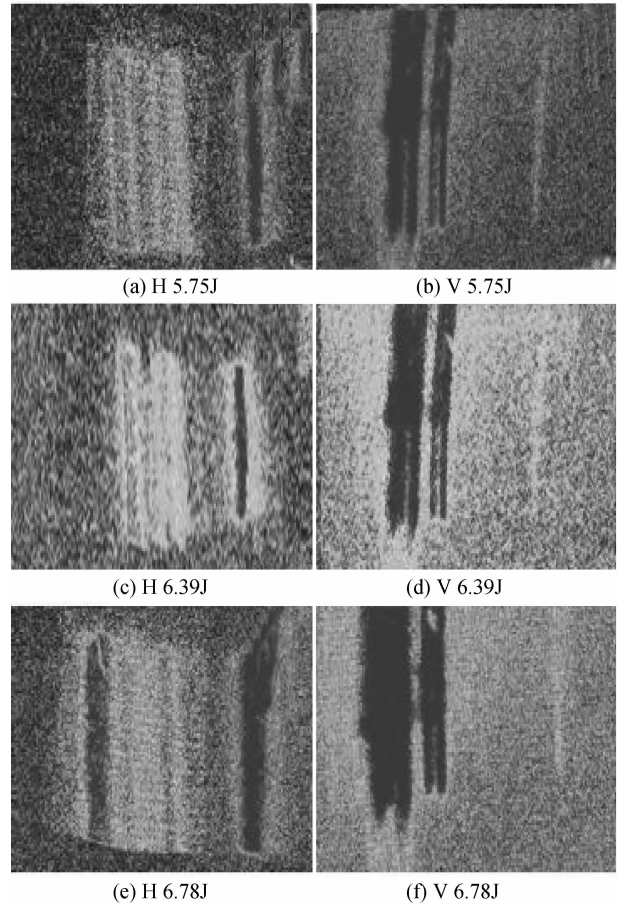


图4 激光 Al 靶谱线强度分布
Fig. 4 Crystal-spectrometer spectra of Al target in laser-produced plasmas

3.2 实验结果分析

经对图 4 谱线标识处理得到图 5, 反映了在不同激光能量辐照下线谱强度与波长的关系. 其中, Al 类氦共振线 w 的波长为 0.7748 nm , 按布喇格条件, X 射线在晶体上的掠入射衍射角为 62.6° . 实验获得了类氦共振线、互组合线的水平和垂直方向光谱强度 (I_{wH} 、 I_{wV} 、 I_{yH} 、 I_{yV}). 由于两通道光程不等, 忽略方位角的影响, 按因电子层叠跃迁而弱极化的禁戒线 z 强度进行归一化处理^[13], 获得校正后的相对强度 (I'_{wH} 、 I'_{wV} 、 I'_{yH} 、 I'_{yV}). 然后利用式(9)得到其对应的分量相对值 ($I'_{w\pi}$ 、 $I'_{w\sigma}$ 、 $I'_{y\pi}$ 、 $I'_{y\sigma}$). 从文献[12]可以查表得到 PET(002) 晶体的积分反射率 $R_{\text{PET}} = R_x/R_0 = 0.778$, 最后运用式(10)相对强度比计算得到 α 值分别为 3.025 4、2.890 2 和 3.049 3, 平均值为 2.988 3. 根据表 1 所示的类氦共振线-互组合线强度比与密度关系, 因三次激光能量差异不大, 推导出 Al 激光等离子体电子密度约为 $1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. 该值与激光等离子体电子速度分布函数计算的密度 ($8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) 在数量级上相同^[8], 故表明用该激光等离子体极化晶体谱仪所测谱线推导的电子密度

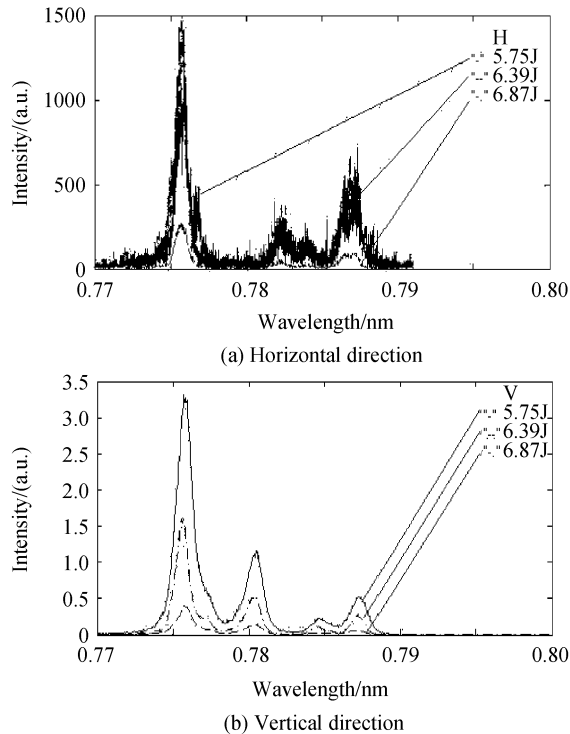


图 5 Al 类氢谱线强度分布图

Fig. 5 Typical spectra from the polarization spectrometers

表 1 不同激光能量下的 Al 离子类氢 w,y 光谱总强度比

Table 1 Intensity ratio of lines w, y at different laser energy

Intensity ratio	Experiments		
	6.78J	5.75J	6.39J
$\alpha = \frac{I_w}{I_y} = \frac{(RI_\pi + I_\sigma)_w}{(RI_\pi + I_\sigma)_y}$	3.025 4	2.890 2	3.049 3
$\alpha_H = (I_w/I_y)_H$	3.801 1	3.599 0	4.846 2
$\alpha_V = (I_w/I_y)_V$	2.965 9	2.876 7	2.774 2

值与理论值基本吻合。

按基本算法式(3),水平或垂直方向的光谱分别按照类氢共振线-互组合线强度比,其比率 α 范围从 2.774 2~4.846 2,平均值为 3.314 2,推算的电子密度约为 $2.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。此外也不难发现极化算法并非两方向光谱比均值,而与其极化程度有关。而基于极化光谱算法诊断的光谱强度比值波动范围远远小于基本算法推算结果,所以用极化光谱算法推算的结果更可靠。

4 结论

激光等离子体电子密度参量是高温高密等离子体诊断中非常重要的物态参量。由于激光等离子体内部存在各向异性,本文提出了基于极化光谱的类氢共振线与互组合线相对强度比电子密度诊断方法。通过极化晶体谱仪,实验了获得两通道的极化光谱信号,诊断出 Al 激光等离子体电子密度为 $1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$,与理论计算一致,比使用基本算法结果更可靠。实验结果表明:该极化 X 光谱算法适合激

光等离子体电子密度诊断。

参考文献

- [1] SMITH C C, PEACOCK N J. Electron density measurements using the Stark-broadened line wings of hydrogenic ions in laser-produced plasmas[J]. *Journal of Physics B*, 1978, **11** (15): 2749-2763.
- [2] AGLITSKII E V, BOIKO V A, ZAKHAROV S M, *et al.* Observation in laser plasmas and identification of dielectronic satellites of spectral lines of hydrogen- and helium-like ions of elements in the Na-V range[J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1974, **4**(4): 500-513.
- [3] ILYUKHIN A A, KRAMIDA A E, PEREGUDOV G V, *et al.* Determination of plasma electron densities from the intensity ratio of resonance and intercombination lines of helium-like ions[J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1981, **11**(1): 34-36.
- [4] KUNZE H J, GABRIEL A, GRIEM H R. Measurement of collisional rate coefficients for heliumlike carbon ions in a plasma[J]. *Physical Review*, 1968, **165**(1): 267-276.
- [5] BRADFORD J W. A study of diagnostic X-ray lines in heliumlike neon using an electron beam ion trap [D]. Livermore: University of California • Livermore, 1993.
- [6] AGLITSKII E V, BOIKO V A, KROKHIN O N, *et al.* Observation of ions of $\sim 30 - 50$ charge in a laser plasma[J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1975, **4**(9): 1152-1153.
- [7] BOIKO V A, KROKHIN O N, PIKUZ S A. Measurement of the intensity of the $2 - 10 \text{ \AA}$ radiation emitted by laser plasmas generated from targets with nuclear charges $Z=12 - 23$ and determination of the plasma electron temperature[J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1975, **4**(10): 1212-1215.
- [8] KIEFFER J C, MATTE J P, CHAKER M, *et al.* X-ray-line polarization spectroscopy in laser-produced plasmas [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1993, **48**(6): 4648-4658.
- [9] VINOGRADOV A V, SKOBELEV I Y, YUKOV E A. Determination of plasma density from spectra of heliumlike ions[J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1975, **5**(6): 630-633.
- [10] BELY-DUBAU F, FAUCHER P, STEENMAN-CLARK L, *et al.* Dielectronic satellite spectra for highly-charged helium-like ions. VII - Calcium spectra; Theory and comparison with SMM observations [J]. *Royal Astronomical Society, Monthly Notices*, 1982, **201**: 1155-1169.
- [11] INAL M K. Linear polarization of the $2p^5 3s \rightarrow 2p^6$ lines following the inner-shell photoionization of sodiumlike ions [J]. *Physical Review A*, 2005, **72**(4): 2720-2728.
- [12] HENKE B L, GULLIKSON E M, DAVIS J C. X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $e=50-30000 \text{ eV}$, $z=1-92$ [J]. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1993, **54**(2): 181-342.
- [13] WANG Hong-jian, XIAO Sha-li, SHI Jun, *et al.* X-ray polarization spectroscopy for diagnosis of laser-produced plasmas[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1710-1713. 王洪建, 肖沙里, 施军, 等. 激光等离子体 X 射线极化光谱诊断[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1710-1713.
- [14] TAKASHI I, MASAHIKO I, Masato K, *et al.* Performance of a reflection-type polarizer by use of muscovite mica crystal in the soft X-ray region of 1 keV[J]. *Rev Sci Instrum*, 2005, **76**(2): 023104-023107.
- [15] WANG Hong-jian, XIAO Sha-li, SHI Jun, *et al.* Elliptical crystal spectrometer for gas-puff-pinch plasma X-Ray [J].

Acta Photonica Sinica, 2009, **38**(5): 1212-1215.

王洪建, 肖沙里, 施军, 等. 喷气箍缩等离子体 X 射线椭圆
弯晶谱仪研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(5): 1212-1215.

[16] FINSHELKOVENKO T A, PIKUZ S A, HAMMER D A.

Use of spherically bent crystals to diagnose wire array z
pinches[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, **75**
(10): 3681-3683.

Diagnosis of Electron Density by Polarized X-ray Lines for Al Laser-produced Plasmas

WANG Hong-jian^{1,2}, XIAO Sha-li², SHI Jun²

(1 *Chongqing Engineering Technology Research Center for Information Management in Development*,
Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

(2 *Key Laboratory of Opto-electronic Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University*,
Chongqing 400030, China)

Abstract: In order to accurately diagnose the electron density of laser-produced plasma, the method of relative intensity ratio of helium-like resonance to combination lines was proposed based on the polarization spectrum. It took into account polarization characteristics of the X-ray in laser-produced plasma, modified the real intensity ratios of the resonance to intercombination lines of He-like ions, then derived the density of plasma. The experiment was carried out at the 2×10 J laser facility at Laser Fusion Research Center of, China Academy of Engineering Physics (CAEP). X-ray spectra emitted from the aluminum plasmas were recorded by polarized PET(002) crystal spectrometer. By correcting two Al helium-like spectra, it was calculated that the electron density was about $1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. The experimental results showed that the arithmetic was adapted to diagnose laser-produced high temperature high-density plasmas.

Key words: Electron density; Polarized crystal spectrometer; X-ray diagnosis; Laser-produced plasma