

文章编号: 0258-7025(2008)04-0587-05

利用平晶谱仪测量谱线波长的新方法

赵 阳^{1,2} 杨家敏² 张继彦² 刘劲松¹ 袁 孝¹ 韦敏习² 胡智民² 甘新式²

(¹ 华中科技大学光电子科学与工程学院 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)
(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 为了满足激光等离子体 X 射线波长测量的需要,在辅助光阑法的基础上,从理论上提出了一种用平面晶体谱仪确定波长的新方法。发展了改进的辅助光阑法来确定晶体面与记录面的交线到第一条辅助光阑的距离,并且利用某一条谱线的曲率得到记录面与晶体表面的夹角。这两个参量在一般的辅助光阑法中需借用参考谱线得到,而采用新的方法可在不使用任何参考谱线的情况下得到所有光谱线的波长。实际使用中通过增大光阑间的间距,根据不同的波长范围调节晶体与记录面的相对位置,可使波长的测量精度达 1×10^{-3} nm。

关键词 测量;平晶谱仪;谱线曲率;辅助光阑法;激光等离子体

中图分类号 TH 744 文献标识码 A

Novel Method of the Wavelength Determination of Spectral Lines with Planar Crystal Spectrometer

Zhao Yang^{1,2} Yang Jiamin² Zhang Jiyan² Liu Jinsong¹

Yuan Xiao¹ Wei Minxi² Hu Zhimin² Gan Xinshi²

¹Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Institute of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

²Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract For the need of X-ray wavelength determination of laser plasma, based on the auxiliary diaphragm method, a novel method was presented for the wavelength determination of the X-ray spectral lines measured with planar crystal spectrometer in theory. We develop an improved method to determine the distance from the crossing line of crystal and recording plane to the first auxiliary diaphragm, and curvature of spectral line is used to determine the angle between crystal and recording plane. In normal auxiliary diaphragm method, reference line is used to determine the two parameters. However, we can obtain wavelengths for all recording spectral lines without any reference lines by using this method. In practical use, the precision of wavelength determination can achieve 1×10^{-3} nm by increasing the distance between two diaphragms and adjusting the relative position between crystal and recording plane.

Key words measurement; planar crystal spectrometer; curvature of spectral line; auxiliary diaphragm; laser plasma

1 引 言

晶体谱仪分为平面晶体谱仪和弯晶谱仪^[1],平晶谱仪由于结构简单、易操作等优点,已成为激光等离子体^[2,3]研究中常用的诊断设备之一,它配合

CCD,胶片,X射线光条纹相机等已能满足不同的实验要求^[4~6]。在X射线光谱分析^[7]中,要确切知道谱线波长与谱线位置的关系,必须对晶体谱仪进行标定。通常采用参考谱线法^[8,9]作为平晶谱仪波长标定的一般方法。参考谱线法要求用已知的三条谱

收稿日期:2007-08-12;收到修改稿日期:2007-11-28

基金项目:高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室基金(9140C6804020704)资助项目。

作者简介:赵 阳(1981—),男,河南人,博士研究生,主要从事高温等离子体 X 射线光谱学方面的研究。

E-mail:edwardszy@tom.com

导师简介:杨家敏(1970—),男,重庆人,研究员,主要从事高温高密度等离子体方面的研究。

E-mail:yjm70018@my-public.sc.cninfo.net

线的波长作为参考,得到光谱图中其他谱线的波长。实际应用时在测量等离子体中加入示踪元素,但由于等离子体的复杂环境,如线移、斯塔克(Stark)展宽等效应,会造成发射谱的移动和加宽,此外示踪元素还会影响等离子体的特征,影响测量结果。辅助光阑法^[10]通过测量阴影的间距来确定波长,但由于实验中要求晶体与记录面之间的夹角和晶体面与记录面的交线到第一条光阑的距离是已知的,且必须通过参考谱线法得到,给实验带来不便。

本文在辅助光阑法的基础上,通过改进的辅助光阑法^[11]确定晶体面与记录面的交线到第一条光阑的距离,直接利用光谱图中谱线的曲率确定晶体与记录面之间的夹角,建立了一种新的确定波长的方法。该方法省去了复杂的谱仪几何参量测量过程,提高了谱仪实验测量的适用性。

2 理论方法

2.1 辅助光阑法

辅助光阑法确定波长的原理如图 1 所示,在晶体表面上加 3 条等间距的平行线,该平行细线由原

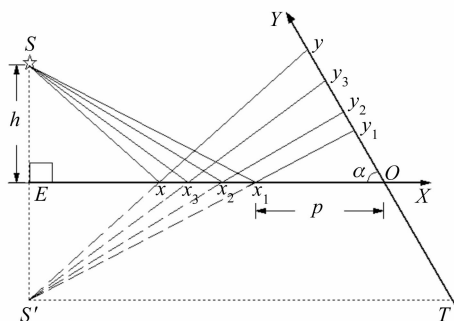


图 1 辅助光阑法标定波长示意图

Fig. 1 Schematic of wavelength measurements by auxiliary diaphragm

子序数 Z 较高的物质构成,目的是使细线不被 X 射线光透射,如果谱线中存在连续谱,会在接收面上形成暗线。通过测量暗线之间的距离可以确定光源 S 到晶体的距离 h 和光源的像 S' 到接收面的距离 f 。

图 1 中 x_1, x_2, x_3 分别为晶体上的三条细线的坐标, y_1, y_2, y_3 分别为记录面上暗影的坐标,其中 $x_2 - x_1 = x_3 - x_2 = \Delta x, y_2 - y_1 = \Delta y_1, y_3 - y_2 = \Delta y_2, y - y_1 = \Delta y, S'T \parallel EX$ 。确定波长的公式为^[6]

$$\lambda = 2d \sin \left\{ \operatorname{arccot} \left[\frac{p(\Delta y_2 - \Delta y_1) + 2\Delta x \Delta y_2}{\Delta y_1(\Delta y_2 - \Delta y_1) + \Delta y_1(\Delta y_2 + \Delta y_1)} \frac{1}{\sin \alpha} - \cot \alpha \right] \right\}, \quad (1)$$

式中 d 为晶体晶胞之间的距离,是晶体的固有属性, p 为 x_1 到 O 的距离, α 为晶体与记录面的夹角。 p, α 无法直接测量,要采用参考谱线法来测定。

2.2 确定参量

在辅助光阑法中很难用直接测量的方法得到晶体面与记录面的交线到第一条辅助光阑的距离,因此提出了一种改进的辅助光阑法,如图 2 所示。将光阑放置在晶体的衍射表面,根据实际情况调整光阑宽度,以便在清晰观测到光阑阴影像的同时,又不

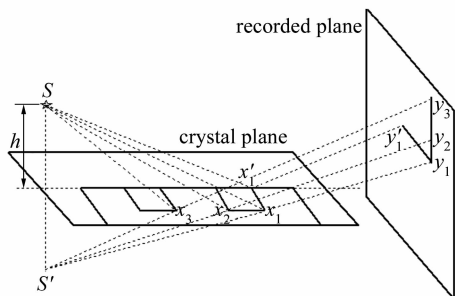


图 2 改进的辅助光阑法标定波长示意图

Fig. 2 Schematic of wavelength measurements by improved auxiliary diaphragm

影响光谱测量。假设光阑的锯齿宽度 $x_1 x'_1 = l$, 在记录面上对应的像宽度 $y_1 y'_1 = L$, 对于任意的一条谱线的 y 值, b 为 x_1 到 y_1 的距离, w 为 S' 到 y_1 的距离, 令 $\Delta y = y - y_1$, 则

$$\frac{l}{L} = \frac{S'x_1}{S'y_1} = 1 - \frac{x_1 y_1}{S'y_1} = 1 - \frac{b}{w}, \quad (2)$$

即

$$b = w \left(1 - \frac{l}{L} \right), \quad (3)$$

由辅助光阑法已知

$$w = \frac{\Delta y_1(\Delta y_1 + \Delta y_2)}{\Delta y_2 - \Delta y_1}, \quad (4)$$

$$b = \frac{p \Delta y_1(\Delta y_1 + \Delta y_2)}{p(\Delta y_2 - \Delta y_1) + 2\Delta x \Delta y_2}, \quad (5)$$

由(3)~(5)式可以求出

$$p = \frac{2(L-l)\Delta x \Delta y_2}{l(\Delta y_2 - \Delta y_1)}, \quad (6)$$

这样 p 值就可通过光阑的像来直接计算出,而不通过直接测量或参考谱线法确定。由此得到确定波长的表达式

$$\lambda = 2d \sin \left\{ \arccot \left[\frac{2L \Delta x \Delta y_2}{\Delta y (\Delta y_2 - \Delta y_1) + \Delta y_1 (\Delta y_2 + \Delta y_1)} \frac{1}{l} \frac{1}{\sin \alpha} - \cot \alpha \right] \right\}, \quad (7)$$

实验中实际得到的谱并不是直线,而是弯曲的一段弧,并且随波长的不同弯曲的程度也不同。

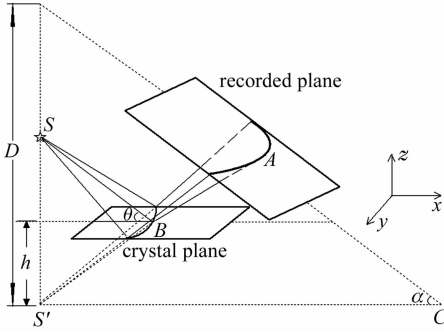


图 3 利用谱线的曲率计算 α 角的示意图

Fig. 3 Schematic of α measurements by curvature of spectral line

图 3 中,圆锥侧面与记录平面的交线即为谱线,不同的圆锥张角代表不同的反射角,若 $AB = k$,以 S' 点为坐标原点, A 点坐标为 $(x, y, z) = (k \cos \theta + h \cot \theta, 0, k \sin \theta + h)$, θ 为 SB 与晶体平面的夹角, T 点坐标为 $(x, y, z) = (k(\sin \theta \cot \alpha + \cos \theta) + h(\cot \alpha + \cot \theta), 0, 0)$, 记录平面的方程可以表示为

$$z + \tan \alpha x = k(\sin \theta + \cos \theta \tan \alpha) + h(1 + \cot \theta \tan \alpha) = D, \quad (8)$$

圆锥的方程为

$$z^2 = (x^2 + y^2) \tan^2 \theta \quad (z > 0), \quad (9)$$

联立(8),(9)式,得到

$$(\tan^2 \theta - \tan^2 \alpha) x^2 + 2D \tan \alpha x + \tan^2 \theta y^2 = D^2, \quad (10)$$

在记录平面上建立新的坐标轴 (X, Y) , 做换算 $X = x / \cos \alpha, Y = y$ 得到

$$(\tan^2 \theta \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) X^2 + 2D \sin \alpha X + \tan^2 \theta Y^2 = D^2, \quad (11)$$

从(11)式可以看出,当 $\alpha > \theta$ 时,曲线为双曲线;当 $\alpha = \theta$ 时,曲线为抛物线;当 $\alpha < \theta$ 时,曲线为椭圆。而实际在成像面上得到的图像是包含这些曲线端点的一段弧,将曲线方程化为

$$Y^2 = \left(\frac{\sin^2 \alpha}{\tan^2 \theta} - \cos^2 \alpha \right) X^2 - \frac{2D \sin \alpha}{\tan^2 \theta} X + \frac{D^2}{\tan^2 \theta}. \quad (12)$$

从图 3 中某条谱线上读出一系列点的坐标(Y 为相对于对称点的坐标),将这些点用最小二乘法拟合

$$Y^2 = AX^2 + BX + C, \quad (13)$$

得到 A, B, C 值后,代入(12)式,比较得到

$$A = \frac{\sin^2 \alpha}{\tan^2 \theta} - \cos^2 \alpha, \quad B = -\frac{2D \sin \alpha}{\tan^2 \theta}, \quad (14)$$

$$C = \frac{D^2}{\tan^2 \theta},$$

由此得到

$$\alpha = \arccos \sqrt{\left(\frac{B^2}{4C} - A \right)}, \quad (15)$$

最后把拟合得到的 A, B, C 代入(15)式得到 α 值。在此求解过程中只用到了由记录面读出的坐标点,不需要其他的测量值。

3 应用实例

3.1 典型谱仪

采用 PET(季戊四醇(001))晶体作为分光晶体, $2d = 0.8742$ nm。取光源到晶体的距离 $h = 50$ mm,光源相对于晶体的像到记录面的距离 $f = 150$ mm,晶体与记录面的夹角 $\alpha = 49^\circ$ 。辅助光阑的几何参量为 $\Delta x = 10$ mm, $l = 10$ mm,晶体面与记录面的交线到第一条辅助光阑的距离 $p = 75$ mm。由 $f, \alpha, h, p, \Delta x$ 可以得到 $\Delta y_1 = 9.3539$ mm; $\Delta y_2 = 11.157$ mm; 由 f, l, p, α 可以得到 $L = 16.061$ mm。由(7)式得到

$$\Delta y = \frac{2L \Delta x \Delta y_2}{l \sin \alpha (\cot \theta + \cot \alpha)} - \frac{\Delta y_1 (\Delta y_2 + \Delta y_1)}{\Delta y_2 - \Delta y_1} = \frac{261}{\cos \theta + 0.87} - 88.5, \quad (16)$$

当接收面记录了 Al 等离子体的 $\text{He}\alpha$ 线时, $\lambda = 0.776$ nm,对应的 $\theta = 62.58^\circ$,此时记录面的曲线方程为

$$Y^2 = -0.2771X^2 - 95.89X + 14070, \quad (17)$$

在实际应用时,从最小二乘法拟合得到(17)式再得到 α 角,再利用(7)式计算得到谱线的波长。

3.2 波长的不确定度

由布拉格(Bragg)公式得到确定波长的不确定度为

$$\Delta \lambda = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \right| = |2d \cos \theta \Delta \theta|, \quad (18)$$

由(7)式可知 θ 角的不确定度主要来自 $\alpha, \Delta x, \Delta y, \Delta y_1, \Delta y_2, l, \theta$ 角不确定度为

$$\Delta\theta =$$

$$\sqrt{\left|\frac{\partial\theta}{\partial\alpha}\Delta\alpha\right|^2 + \left|\frac{\partial\theta}{\partial(\Delta x)}\Delta(\Delta x)\right|^2 + \left|\frac{\partial\theta}{\partial(\Delta y)}\Delta(\Delta y)\right|^2 + \left|\frac{\partial\theta}{\partial(\Delta y_1)}\Delta(\Delta y_1)\right|^2 + \left|\frac{\partial\theta}{\partial(\Delta y_2)}\Delta(\Delta y_2)\right|^2 + \left|\frac{\partial\theta}{\partial L}\Delta L\right|^2 + \left|\frac{\partial\theta}{\partial l}\Delta l\right|^2}, \quad (19)$$

参考典型谱仪的结构参量为 $\alpha = 49^\circ$, $\Delta x = 10$ mm, $\Delta y_1 = 9.3539$ mm, $\Delta y_2 = 11.157$ mm, $l = 10$ mm, $L = 16.061$ mm, Δy 由(16)式计算得到。考虑到实际情况,取长度测量的精度为 $10 \mu\text{m}$, α 角的精度为

$$\Delta\alpha = \sqrt{\left|\frac{\partial\alpha}{\partial A}\Delta A\right|^2 + \left|\frac{\partial\alpha}{\partial B}\Delta B\right|^2 + \left|\frac{\partial\alpha}{\partial C}\Delta C\right|^2}, \quad (20)$$

$\Delta A, \Delta B, \Delta C$ 的不确定度由最小二乘法拟合过程中读数的不确定度产生。测量记录面的曲线坐标时,取固定 X 处的 Y 值为测量值, X 取值间隔为 0.1 mm, Y 的测量不确定度为 $10 \mu\text{m}$, 考虑到实际应用中,记录平面的宽度有限,不可能完全包含曲线

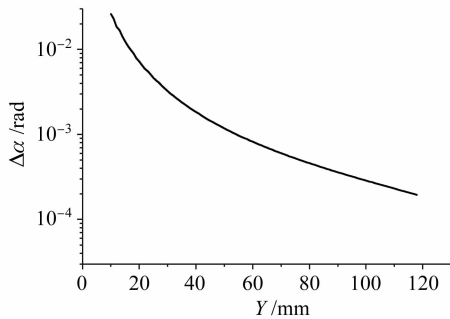


图 4 α 角的精度随 Y 的变化曲线

Fig. 4 Accuracy of α measurements versus different Y

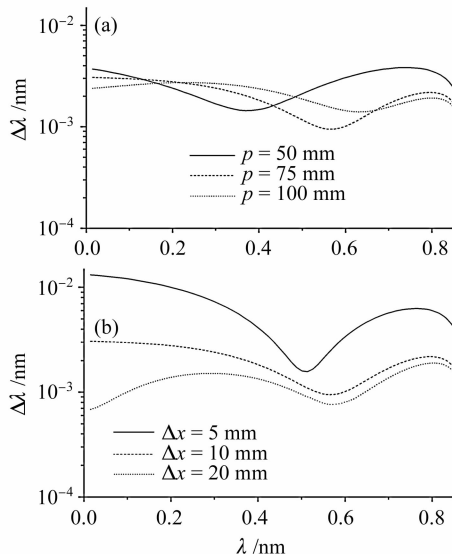


图 5 波长测量精度随波长变化的曲线

Fig. 5 Accuracy of wavelength measurements versus wavelength. (a) $\Delta x = 10$ mm; (b) $p = 75$ mm

的所有部分, Y 值的取值范围直接影响到拟合得到的 α 角精度。例如取 Al 的 He α 线时, $\theta = 62.58^\circ$, 可以得到 α 角的精度与 Y 的取值范围的关系, 如图 4。

从图 4 中可以看出, α 角的精度随 Y 的取值范围增大而提高。当 $Y > 55$ mm 时, α 角的精度为 10^{-3} rad 以下, 得到 α 角的精度后, 结合(18), (19)式, 可以得到 $\Delta\lambda$ 与 λ 的关系, 如图 5 所示。

在本方法中辅助光阑的参量值 Δx 和 p 与波长测量的精度密切相关, 从图 5(a) 可见在不同的波长范围内, 通过合理选择 p 值可以提高波长测量精度; 而从图 5(b) 可见 Δx 越大, 波长测量精度越高。所以在光谱仪设计时要合理地选择光阑的几何参量以提高波长测量精度, 用这种新的波长标定法确定波长的精度可控制在 1×10^{-3} nm 以下, 能够适用于激光等离子体谱线波长的实验测量。

4 结 论

从理论上提出了一种利用平面晶体谱仪测量谱线波长的新方法, 发展了改进的辅助光阑法确定晶体面与记录面的交线到第一条辅助光阑的距离, 并且利用某一条谱线的曲率来得到记录面与晶体表面的夹角。在实验室高温高密度等离子体中由于光源的尺寸, 能级的加宽所带来的谱线展宽是影响谱线分辨率的主要因素, 所以该方法确定的波长测量精度 1×10^{-3} nm 可满足要求。在下一步的工作中会重新设计现有的晶体谱仪, 把提出的理论方法运用到实验中。

参 考 文 献

- Wang Yan, Yang Guohong, Yang Jiamin *et al.*. Transmission crystal spectrometer and related theoretical calculation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10):1507~1511
汪 艳, 杨国洪, 杨家敏 等. 透射晶体谱仪及其理论计算[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10):1507~1511
- Fang Zhiheng, Wang Chen, Wang Wei *et al.*. An experimental design of the laser plasma channeling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):39~42
方智恒, 王 琛, 王 伟 等. 一种进行激光等离子体通道实验的设计[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):39~42
- Li Geyun, Jia Huaiting, Wang Chengcheng *et al.*. Outputability analysis of high-intensity third harmonic generation system for ICF driver [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):903~909

- 李格宇, 贾怀庭, 王成程 等. 惯性约束核聚变驱动器高强度三倍频系统输出能力分析[J]. 中国激光, 2006, **33**(7):903~909
- 4 L. Aschke, S. Depierreux, K. G. Estabrook *et al.*. Towards an experimental benchmark for aluminum X-ray spectra [J]. *J. QS & RT*, 2000, **65**(2):23~30
- 5 U. Andiel, K. Eidmann, K. Witte *et al.*. Comparative study of time-resolved K-shell spectra from aluminum plasma generated by ultrashort pulses at 395 and 790 nm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(2):198~200
- 6 Zhang Jiyun, Yang Jiamin, Zhang Zhijian *et al.*. Time-resolved diagnosis of the electron temperature of laser-produced aluminum plasma [J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2004, **16**(9):1153~1156
- 张继彦, 杨家敏, 郑志坚 等. Al 激光等离子体电子温度的时间分辨诊断[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(9):1153~1156
- 7 J. D. Kilkenny, R. W. Lee, M. H. Key *et al.*. X-ray spectroscopic diagnosis of laser-produced plasmas, with emphasis on line broadening [J]. *Phys. Rev. A*, 1980, **22**(6):2746~2760
- 8 Fan Pinzhong, Zhang Zhengquan. Dispersion curve and wavelength determination in flat-crystal X-ray spectrograph [J]. *Chinese J. Lasers*, 1991, **A18**(2):88~93
- 范品忠, 张正泉. X射线晶体谱仪色散曲线和波长的确定[J]. 中国激光, 1991, **A18**(2):88~93
- 9 Chengchuan Chang, Pinzhong Fan, Shicheng Zhao *et al.*. Classification of cobalt Co X VII-Co X X V spectra excited in a laser-produced plasma [J]. *Physica Scripta*, 1987, **35**(6):798~804
- 10 Liu Zhi, Li Ruxin, Jia Tianqing *et al.*. New planar crystal X-ray spectrometer with independent wavelength calibration ability [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2):167~170
- 刘 智, 李儒新, 贾天卿 等. 平晶谱仪谱线波长的直接标定[J]. 中国激光, 2003, **30**(2):167~170
- 11 Wei Minxi. Preliminarily quantitative measurements of crystal X-ray spectrometer [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006. 26~31
- 韦敏习. 晶体谱仪定量化的初步实验研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2006. 26~31