

文章编号 1004-924X(2010)06-1303-06

椭圆弯晶谱仪波长分辨能力的改进

王瑞荣^{1,2}, 陈伟民¹, 王 伟²

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044 ;
2. 上海激光等离子体研究所 高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

摘要: 讨论了椭圆弯晶谱仪的波长分辨能力。在假设谱线的固有宽度可以忽略的情况下, 对两种实际影响椭圆弯晶谱仪波长分辨能力的主要因素, 即光源空间尺寸和非理想椭圆分光晶面进行了分析。分别对上述两种情况进行了数学建模和数值模拟仿真。定量地分析了非理想椭圆晶面和光源空间尺寸对椭圆弯晶 X 射线谱仪波长分辨本领的影响程度, 并给出了出射狭缝宽度与椭圆弯晶谱仪波长判读加宽的关系。从理论上论证了光源空间尺寸在限制谱仪的波长分辨能力方面仍然起关键主导作用; 结合椭圆分光晶体的结构参数, 合理地选择出射狭缝宽度, 可使谱仪达到足够好的光谱分辨率和信噪比。用搭建的实验平台进行了实验测试, 结果表明, 当出射狭缝宽度(2δ)为 10 mm 时, 实测的谱线半高全宽($\Delta\lambda$)为 3.1×10^{-3} nm; 2δ 为 4 mm 时, $\Delta\lambda$ 为 2.3×10^{-4} nm, 实测结果佐证了仿真结果的正确性。

关键词: 弯晶谱仪; 分辨能力; 狭缝宽度

中图分类号: TH744.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101806.1303

Improvement of spectral resolution power for an elliptically curved crystal spectrometer

WANG Rui-rong^{1,2}, CHEN Wei-min¹, WANG Wei²

(1. *Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China*; 2. *State Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China*)

Abstract: The wavelength resolution power of a elliptically curved crystal spectrometer is discussed. After the spectral line profile caused by itself is supposed to be neglected, two main factors effecting on the wavelength resolution power of the spectrometer are analyzed. The first one is mainly that the source center is not on the focus of the ellipsoid and the source size can not be ignored. The other one is that the X-ray is reflected from irregular crystal surface, and it is not an ideal ellipsoid. In order to improve the wavelength measuring precision of the spectrometer, two simulating models are established according to the above mentioned factors. Then the two models are analyzed and the relation between the wavelength resolution power and the exit aperture slit width is presented by digital calculation. Meanwhile, a number of experimental investigations on the wavelength-resolved characteristics of the diagnostic system are conducted under a variety of slit width conditions. The wavelength reso-

收稿日期: 2009-08-13; 修订日期: 2009-11-13.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目

lution power affected by the un-ideal crystal surface and the source size is quantitatively analyzed with the spectrometer successfully. The experiments show that obtained results are in agreement with the calculation data. When the exit aperture slit width(2δ) is 10 mm, the full width at half maximum($\Delta\lambda$) is 3.1×10^{-3} nm; the 2δ is 4 mm, and the $\Delta\lambda$ is 2.3×10^{-4} nm. These results prove the validity of simulated results.

Key words: curved crystal spectrometer; resolution power; slit width

1 引言

椭圆弯晶谱仪除具有无像差、背景辐射小、分辨率高和通光量可调等优点外,还有等光程和实像点等优势,非常有利于实现谱线波长的精确定标与时间分辨测量,因此,该谱仪目前被广泛应用于各种光谱诊断中,如激光等离子体^[1-2]、托卡马克等离子体^[3]、EBIT^[4-5]、ECR、同步辐射源等。波长分辨本领在光谱诊断中至关重要,一直是仪器研制者追求的目标之一。

在波长色散中,晶体谱仪的分辨本领一般定义为谱线的波长(λ)与其半高全宽($\Delta\lambda$)的比值^[6],即: $R=\lambda/\Delta\lambda$,其中 $\Delta\lambda$ 是由光的波动性和色散元件的物理性质所决定的分辨极限。在这种情况下,波长相差为 $\Delta\lambda$ 的两条谱线刚好可以分开,也就是说,其中的一条谱线的强度最大值刚好落在另一条谱线强度的最小值上时,两条谱线刚好可以分开^[7]。对于布拉格衍射晶体,决定晶体性能的参数主要包括晶体扭摆曲线的半高全宽(W),峰值衍射效率(ρ),以及积分衍射系数(R_ρ)。晶体扭摆曲线的半高全宽是描述 X 光谱线晶体加宽的重要参量,它表明即使是单一入射光线,经过晶体衍射后在记录面上也不是一条单一的线,而是围绕布拉格衍射角的一个角分布。因此,影响波长分辨本领的主要因素是布拉格角和色散角^[7]。对应于一定的色散角,布拉格角越大,分辨本领越高;对于一定的布拉格角,色散角越小分辨本领就越高。由于特定实验条件的限制,布拉格角的提高是有限的,所以为了提高分辨本领,就要尽可能地降低色散角。但色散角与很多因素有关。在椭圆弯晶谱仪中除有谱仪外在的因素所引起的谱线展宽(例如自然展宽、多普勒展宽、场致展宽、碰撞展宽等),还有晶体谱仪内在的

因素所引起的谱线展宽(如由于晶体的衍射特性和分光晶体结构本身的缺陷引起的展宽、晶体的晶格常数随着温度的变化引起的展宽、探测器的空间分辨本领引起的展宽、还有晶体和光源空间尺寸引起的几何像差所引起的展宽,等等)。本文主要研究分光晶体结构本身的缺陷以及光源空间尺寸对谱仪波长分辨本领的影响。

2 建模

椭圆弯晶谱仪的工作原理以及几何结构^[8-10]是以椭圆焦点上的光源射出的光线必汇聚于另一焦点上为基础的。由此可见,发光源空间尺寸和分光晶体缺陷对椭圆弯晶 X 射线谱仪性能指标的影响通过在另一焦点上光线离散程度来体现。讨论分光晶体缺陷和光源的空间尺寸对波长分辨能力影响的方法有很多。本文选择分类建模仿真法对主要影响因素进行建模和分析、讨论。

2.1 结构光系统

描述晶体反射面的椭圆参数方程为:

$$\begin{cases} x = a \cos \alpha - c \\ y = b \sin \alpha \end{cases}, \quad (1)$$

其中 a, b 分别为椭圆的长短轴, $c = \sqrt{a^2 - b^2}$, α 是椭圆中心和椭圆上任意点的连线与 x 轴夹角;坐标原点为理想情况下分光晶体反射光线的汇聚点。假设关于坐标原点对称的狭缝半宽度为 $|\delta|$,探测距离(成像面相对汇聚点)为 r ,探测角为 β , $OP = \delta$,如图 1 所示,则椭圆上任意一点 $Q(a \cos \alpha - c, b \sin \alpha)$,狭缝边缘点 $P(\delta, 0)$,以及探测器成像面上的线坐标 $S(r \tan \beta + \delta, -r)$ 三点共线时,有

$$\sin \alpha = (-f_2 \pm \sqrt{f_2^2 - 4f_1 f_3}) / 2f_1, \quad (2)$$

其中: $f_1 = f_0^2 + a^2$; $f_2 = 2f_0(\delta + c)$; $f_3 = (\delta + c)^2 - a^2$; $f_0 = b \times \tan \beta$ 。

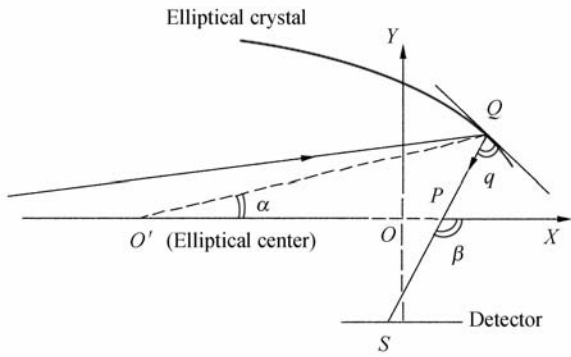


图 1 椭圆型分光晶体反射示意图

Fig. 1 Reflection of an elliptically crystal

2.2 光源尺度对分辨本领的影响

光源对分辨本领的影响可以认为是光源的空间尺寸不能忽略,即焦点上的光源不可以近似为理想的点光源发光。换一句话说就是未通过椭圆前焦点的光线由理想椭圆型晶体柱面反射,因而在探测器上除通过汇聚点的光线外,还有经过出射狭缝边缘光线投射到探测器成像面上同一点来影响波长的判读精度,如图 2 所示。

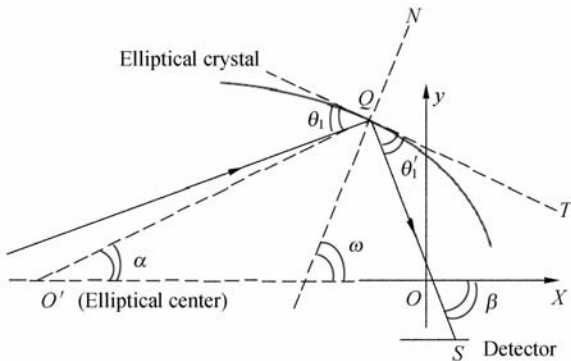


图 2 非理想点光源理想晶面反射光线示意图

Fig. 2 Beam reflection of un-ideal dot source

在图 2 中, T 为 Q 点的切线, N 为法线,由法线斜率与切线斜率的关系,以及式(1),可得:

$$\tan \omega = -\frac{dx}{dy} = \frac{a}{b} \tan \alpha, \quad (3)$$

而

$$\theta_1' = \omega + \beta - 90^\circ, \quad (4)$$

如果椭圆型晶体柱面是处于理想的反射面,光线在 Q 点衍射后经 P 到达 S , 并设 Q 点的布拉格衍射角为 θ_1' , 根据布拉格公式,有:

$$\sin \theta_1' = m\lambda_1 / 2d, \quad (5)$$

式中 m 为衍射级次, λ_1 为衍射波长, d 为晶格常

数。

至此,由式(2)~(5),可得到: $(m\lambda_1 / 2d) = T_1(\beta, \delta)$, 其中 $T_1(\beta, \delta)$ 为无量纲函数。当 $\delta = 0$ 时,可得理想状态下的波长 $\lambda = (2d/m) T_0(\beta)$ 。又设光源的空间尺寸对测量谱线产生的波长判读加宽为 $\Delta\lambda_{\text{source}}$, 则有:

$$\Delta\lambda_{\text{source}} = \lambda_1 - \lambda = (2d/m) [T_1(\beta, \delta) - T_0(\beta)]. \quad (6)$$

2.3 非理想椭圆晶面对分辨本领的影响

假定经晶体衍射光射线是由椭圆前焦点上一点发出的,但由于分光晶面的各种缺陷,除汇聚点(椭圆另一焦点)的射线外,探测器成像面上任意 S 点上的光强度仍有来自包括狭缝边缘的射线,如图 3 所示。

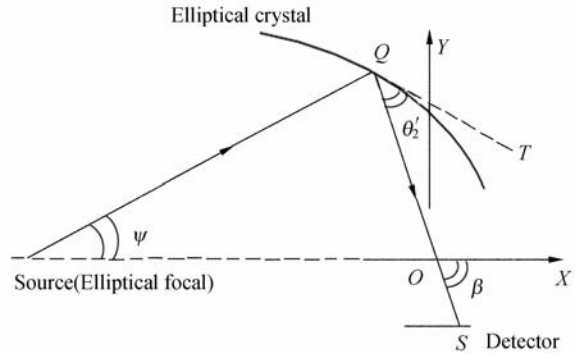


图 3 非理想椭圆晶面反射光线示意图

Fig. 3 Beam reflection of un-ideal elliptical crystal

在图 3 中,令晶体衍射前光线与椭圆中心线之间的夹角为 ψ , 则有

$$\theta_2' = \frac{\psi + \beta}{2}, \quad (7)$$

$$\tan \psi = \frac{b \sin \alpha}{(a \cos \alpha + c)}, \quad (8)$$

由式(7)和式(8),并采用前一节处理的同样方法,可得: $(m\lambda_2 / 2d) = T_2(\beta, \delta)$, 并令由非理想椭圆分光晶面产生的测量谱线波长判读加宽为 $\Delta\lambda_{\text{crystal}}$, 则有

$$\Delta\lambda_{\text{crystal}} = \lambda_2 - \lambda = (2d/m) [T_2(\beta, \delta) - T_0(\beta)]. \quad (9)$$

3 仿真与分析

综合上面的理论基础,对椭圆弯晶谱仪内在的因素即分光晶体的缺陷以及光源的空间尺寸对谱仪分辨本领的影响进行了仿真。具体参数的选取如表 1 所示:

表 1 椭圆晶体谱仪光学系统的仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of optical system in elliptical crystal spectrometer

a/mm	b/mm	c/mm	r/mm	e	m
513.28	168.02	485	19.6	0.945	1

将表中选定的参数代入式(6)和(9)中,进而分别对其进行模拟仿真。式(6)模拟结果如图 4 所示,它表示发光源的空间尺寸(或者说离焦和像差)对诊断谱线波长的影响。式(9)模拟结果如图 5 所示,它表示晶体固有衍射分布以及椭圆型分光晶体的加工制作等方面的缺陷对诊断谱线波长的影响情况。

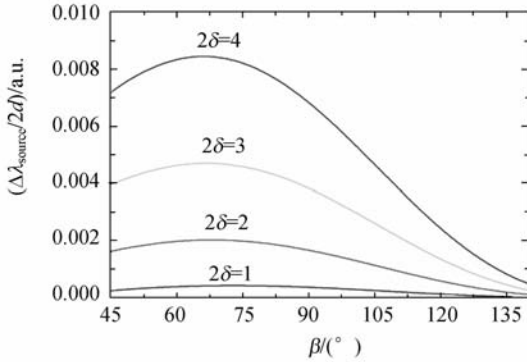


图 4 非理想点光源对波长判读影响

Fig. 4 Wavelength errors through un-ideal dot source

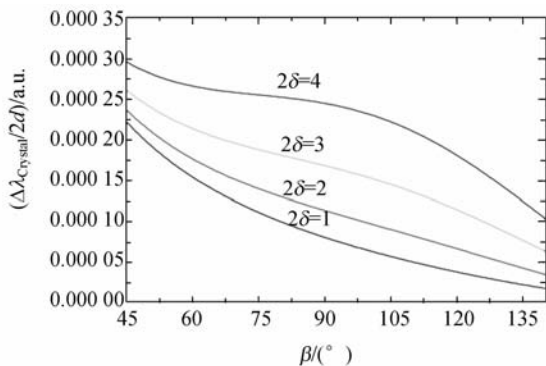


图 5 非理想椭圆晶面对波长判读影响

Fig. 5 Wavelength errors through un-ideal elliptical crystal analyzer

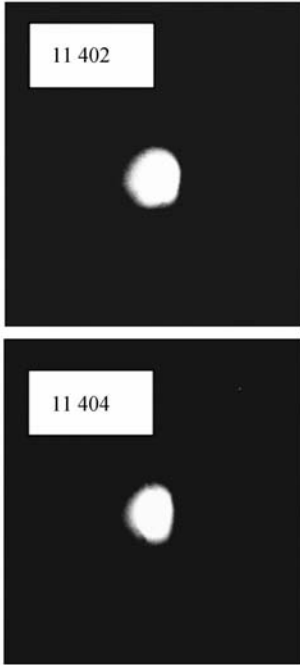
从图 4 和图 5 可以看出,不论是非理想点光源,还是非理想椭圆型分光晶面都会对波长判读精度产生影响,影响程度有赖于出射狭缝宽度,当出射狭缝宽度($2|\delta|$)发生改变时,波长判读精度

也随之变化,且波长判读加宽对出射狭缝宽度特别敏感。从图 4 中还可以看出波长最大值弥散位置几乎不随出射狭缝宽度变化而改变。另外,在出射狭缝宽度一定的条件下,非理想点光源对波长判读加宽的影响程度要远远大于非理想椭圆型分光晶面的作用。因此,光源空间尺寸仍然是影响椭圆弯晶 X 射线体谱仪波长分辨本领的主要因素,而要提高谱仪的光谱分辨率,主要须抑制光源空间尺寸对波长判读精度产生的影响。另外,还要尽量想办法来减少出射狭缝宽度。出射狭缝越窄,椭圆弯晶谱仪的波长判读加宽越小,但相应地对谱仪的光路准直精度要求也越高。

4 实验验证

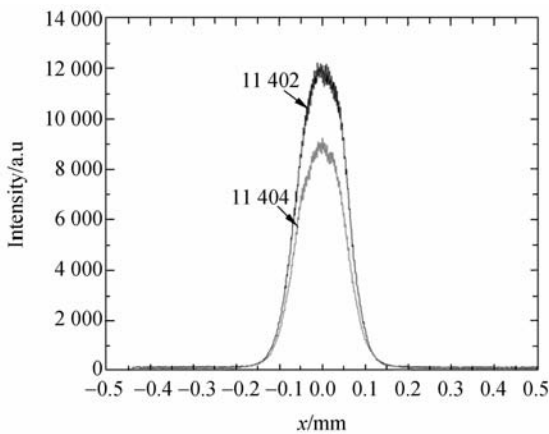
为了论证通过实验手段控制分光晶体的缺陷,以及发光源的空间尺寸对谱仪分辨本领影响的可行性,以及佐证理论模拟计算分析所得出的结论,在“神光 II”高功率激光装置上搭建了实验考核平台。本实验采用激光倍频($\lambda=0.532 \mu\text{m}$)能量大约 1200 J,脉宽为 2.1 ns,聚焦光斑 ϕ 为 1 mm,实验靶为铝(Al)靶,分光晶体为石英($2d=0.852 \text{ nm}$),谱仪诊断方向与入射激光轴(靶面法线方向)正下方成 42° ,诊断系统采用美国 PI 公司的 1024×1024 面阵软 X 射线 CCD 相机记录,像素的大小为 $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$ 。在实验中,分别控制出射狭缝宽度(2δ)为 2, 4, 8, 10 mm 等多个工作宽度,并在其它条件基本不变的前提下观测谱线形状,从而证实出射狭缝宽度对波长判读精度的权重影响。在发光源空间尺寸近似一致的情况下,实验分别获得了不同 2δ 值时的 X 射线能谱。图 6(a)分别为打靶编号 11 402 和 11 404 发次产生的发光源的针孔相机成像;图 6(b)为图 6(a)中 X 射线平均光强度的空间分布,从中可发现 11 402 和 11 404 发次产生的激光等离子体 X 射线发光源空间大小几乎相同。图 7 表示 11 402 发次当 $2\delta=10 \text{ mm}$ 时,用椭圆弯晶谱仪测量的实验谱图,从图中可计算得到实测谱线宽度 $\Delta\lambda=3.1 \times 10^{-3} \text{ nm}$ 。图 8 表示 11 404 发次当 $2\delta=4 \text{ mm}$ 时,椭圆弯晶谱仪测量的实验谱线, $\Delta\lambda=$

2.3×10^{-4} nm。根据图 7 和图 8 所示的实验结果,并进行逐一比对,发现图 8 有较好的信噪比,且每条谱线相对较窄。实验结果与数值计算数据一致。



(a) 针孔相机对 X 射线源成像

(a) X-ray source size measured by a pinhole camera



(b) 图(a)中 X 射线平均光强度的空间分布

(b) Spatial distribution of averaged lineout from (a)

图 6 铝等离子体辐射 X 射线源

Fig. 6 Image of plasma X-ray source

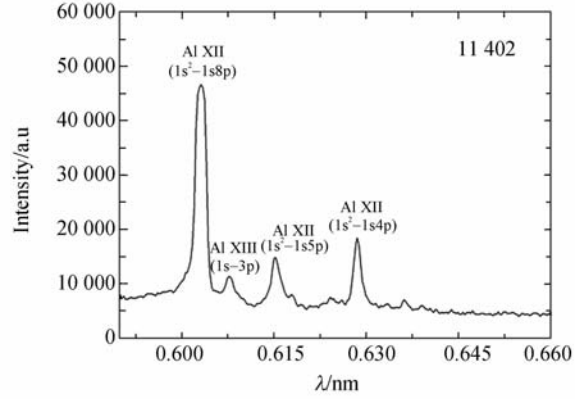


图 7 2δ 为 10 mm 时椭圆晶体测量的谱线

Fig. 7 Spectrum measured with elliptical analyzer at 2δ in 10 mm

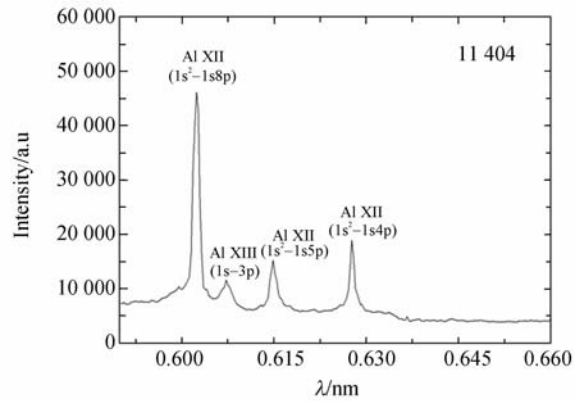


图 8 2δ 为 4 mm 时椭圆晶体测量的谱线

Fig. 8 Spectrum measured with elliptical analyzer at 2δ in 4 mm

5 结 论

本文对椭圆弯晶谱仪内在因素即分光晶体的缺陷以及光源的空间尺寸对谱仪波长分辨本领的影响进行了研究。通过本文的研究与分析,可以得出光源的空间尺寸对光谱分辨能力的影响程度要比分光晶体缺陷大得多,所以谱仪要有好的光谱分辨本领,关键在使用中尽量减少发光源的离焦程度。其次,结合椭圆型分光晶体的结构参数,合理地选择出射狭缝宽度参数(2δ)值,可得到足够好的光谱分辨本领和信噪比,并能进一步地完善和充实椭圆型弯曲晶体谱仪的性能参数。

参考文献:

- [1] ANDERSON S G, HEETER R F, BOOTH R, *et al.*. Broadband high-resolution elliptical crystal x-ray spectrometer for high energy density physics experiments [J]. *Rev. Sci. Instrum.* 2006, 77: 063115-1-5.
- [2] 王瑞荣, 陈伟民. 椭圆型晶体谱仪谱测量的解谱 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 274-279.
WANG R R, CHEN W M. Unfolded study on spectra by elliptical crystal spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 274-279. (in Chinese)
- [3] BARTIROMO R, GIANNELLA R, SPICELLA M L, *et al.*. Time resolving bent crystal spectrometer for tokamak plasma diagnostic [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1984, 225: 378-384.
- [4] 肖沙里, 施军, 雷小明, 等. 氟化锂椭圆弯晶分析器的特性及应用 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(6): 824-828.
XIAO SH L, SHI J, LEI X M, *et al.*. Characteristics and application of elliptical curved LiF crystal analyzer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 824-828. (in Chinese)
- [5] BEIERSDORFER P, HENDERSON J R, KNAPP D A, *et al.*. High-resolution x-ray spectrometer for an electron beam ion trap [J]. *Rev. Sci. Instrum.* 1990, 61(9): 2338-2342.
- [6] ZSCHORNACK G, MULLER G, MUSIOL G. Geometrical aberrations in curved bragg crystal spectrometer [J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1982, 200: 481-490.
- [7] 王瑞荣. “窗式”X 射线晶体谱仪关键技术研究 [D]. 重庆大学, 2009: 60-61.
WANG R R. *Research on key technologies of a window-type x-ray crystal spectrograph* [D]. Dissertation of Chongqing University, 2009: 60-61. (in Chinese)
- [8] 王瑞荣, 陈伟民, 董佳钦, 等. 高分辨 X 射线晶体谱仪及其在激光等离子体中的应用 [J]. *光学学报*, 2008, 28(6): 1220 - 1224.
WANG R R, CHEN W M, DONG J Q, *et al.*. High-resolution x-ray crystal spectrometer and its application in laser plasmas [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28 (6): 1220-1224. (in Chinese)
- [9] 熊先才, 钟先信, 肖沙里, 等. 双通道椭圆弯晶谱仪的传递效率 [J]. *光学精密工程*, 2002, 10 (6): 592-596.
XIONG X C, ZHONG X X, XIAO SH L, *et al.*. Transmission efficiency of dual-channel elliptical crystal spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(6): 592-596. (in Chinese)
- [10] HENKE B L, YAMADA H T, TANAKA T J, *et al.*. Pulsed plasma source spectrometry in the 80-8 000 ev X-ray region [J]. *Rev. Sci. Instrum.* 1983, 54(10): 1311-1315.

作者简介:



王瑞荣(1964—), 男, 江西吉安人, 副研究员, 1991 年于北京师范大学获得学士学位, 1999 年于核工业西南物理研究院获得硕士学位, 2009 年于重庆大学获得博士学位, 主要从事高能 X 射线的诊断及诊断技术研究。E-mail: Wangrr59@citiz.net



王伟(1975—), 男, 河南开封人, 副研究员, 1995 年于复旦大学获得学士学位, 2001 年于中国工程物理研究院获得硕士学位, 2006 年于复旦大学获得博士学位, 主要从事激光等离子体物理的研究。E-mail: wei_wang@fudan.edu.cn



陈伟民(1955—), 男, 云南昆明人, 教授, 博士生导师, 1981 年于浙江大学获得学士学位, 1985 年、2000 年于重庆大学分别获得硕士、博士学位, 主要从事光纤传感器及智能结构技术的研究。E-mail: Wmchen@cqu.edu.cn