

《空间软 X 射线-极紫外波段光学仪器检测方法》专题导读

陈波

中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

通常的软 X 射线-极紫外波段是指 1~50 nm 这段光谱,该波段因其光子能量较高,但又无足够的能量穿过大气,在地面无法进行有效的观测研究。因此,在卫星技术不成熟的年代,人类无法对来自太阳、地球以及宇宙空间其它星体的软 X 射线-极紫外波段辐射进行观测。近 20 年来,随着空间技术的发展以及光学技术水平的不断提高,越来越多的高水平的光学仪器发射到近地和深空轨道上,对地面目标、空间目标以及深空目标进行多谱段、多种形式的观测和研究,在科学研究、空间应用和军事领域发挥着越来越重要的作用。尤其是软 X 射线-极紫外波段空间光谱和成像仪器,近年来发展迅猛,以其波段上的优势和空间探测的特点在科学研究和应用领域发挥了极其重要的作用。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所自 20 世纪 80 年代开始软 X 射线-极紫外波段光学研究以来,开展了多项该波段光源、光学元件、探测器以及辐射计量等基础技术研究工作。在基础技术研究基础上,还开展了该波段光谱仪器和成像仪器的研究和研制工作,在科学研究和空间探测中发挥了重要作用。

本期报导了 4 篇关于极紫外-可见光波段光学技术检测方法的论文,就极紫外波段光谱仪器定标、极紫外波段光学元件检测、极紫外波段成像仪器检测和原位光学测量技术进行研究,论文研究内容概述和意义如下:

《极紫外单色仪波长定标》一文给出了一种对极紫外波段单色仪进行定标的新方法。即利用极紫外波段空心阴极光源产生的 HeII30.4 nm 和 HeI58.4 nm 两条谱线对 McPheson 单色仪较长波段进行定标,利用标定过的极紫外波段多层膜反射镜对 McPheson 单色仪较短的波段进行定标,标定过的多层膜反射镜的峰值反射率波长位置为 13.9 nm。用 McPheson 单色仪分别测出上述 3 条标准谱线的波长位置,根据 McPheson 单色仪测量时的光栅位置读数以及所测光谱辐射的波长位置拟合出光栅方程,实现对 McPheson 单色仪测量的波长精度定标。用此方法对 McPheson 单色仪进行了极紫外波段波长定标,波长定标准确度为 0.08 nm,测量重复性为 ± 0.04 nm。研究结果对极紫外波段辐射测量技术研究和空间仪器辐射定标有重要意义。

《13.9 和 19.6 nm 正入射 Mo/Si 多层膜反射镜的反射率测量》一文介绍了一种新研制的小型软 X 射线-极紫外波段反射率计,用此小型反射率计可以对软 X 射线-极紫外波段光学元件的反射率和透过率进行测量,为软 X 射线-极紫外波段多层膜反射镜反射率测量提供了一种新的测量途径。对 13.9 和 19.6 nm 波段的多层膜反射镜反射率分别进行了测量,测量结果为:13.9 nm 多层膜反射镜的峰值反射率 41.9%,半高宽度 0.56 nm。19.6 nm 多层膜反射镜峰值反射率 22.6%,半高宽度 1.70 nm。反射率测量重复性好于 1%,波长测量精度为 0.08 nm。

《极紫外太阳望远镜分辨率检测》一文介绍了一种极紫外波段太阳望远镜间接检测方法。即利用可见光波段检测结果,间接推断出望远镜在极紫外波段的角分辨率。将可见光照明的分辨率板置于平行光管的焦点处,由平行光管产生的平行光束入射到待测极紫外太阳望远镜中,由极紫外太阳望远镜将平行光管产生的平行光成像到焦面上的 CCD 相机的感光面上。望远镜可见光检测结果为 1.22,据此计算出望远镜在极紫外波段角分辨率为 0.32。研究结果对极紫外波段空间成像仪器性能检测方法研究有重要意义。

《基于虚拟锁相的原位光学测量技术》一文介绍了一种基于虚拟锁相技术的高精度光学测量方法,该方法可以在普通的 PC 机上构建虚拟的锁相放大器,对源于光电倍增管探测器和 PbS 探测器的微弱光电信号进行高精度测量,进而对经过高能质子和电子辐照过的光学样品的透过率、反射率和散射等光学性能进行原位光学性能检测。对所研制的原位光学测量系统的性能进行了检测,测量结果表明:200~860 nm 和 860~2 500 nm 两个波段的光学测量重复性分别为 0.12% 和 0.54%,测量结果与通用的检测设备 Lambda950 的测量结果相差 0.95%。该种测量方法有较大的测量动态范围,能有效地抑制杂光和电子学噪声对测量精度的影响,适合对微弱光电信号的测量和处理,可以提高测量精度。研究结果将应用于软 X 射线-极紫外波段高精度测量中,对提高该波段测量水平很有意义。

文章编号 1004-924X(2008)09-1660-06

极紫外单色仪波长定标

董宁宁^{1,2},李敏^{1,2},刘震^{1,2},尼启良¹,陈波¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

摘要:给出了一种新的极紫外(EUV)单色仪定标方法。通过测量标准气体 He 空阴极光源的 30.38 和 58.43 nm 两条发

收稿日期:2008-06-05;修订日期:2008-07-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40774098;No. 60677043)

射光谱和标定过的中心波长为 13.90 nm 的 Mo/Si 多层膜反射镜的反射率峰值位置,对 Mcpherson247 型 EUV 单色仪进行波长定标,将所定的标准点在单色仪的运动轨迹上做了相应的标识,并用 Origin 软件进行处理,利用一元二次方程得出拟合曲线。对标定结果做了分析,得出了在 12~60 nm 波段内,用激光等离子体光源软 X 射线反射率计测量多层膜反射镜反射峰值位置时,测量准确度为 0.08 nm,测量重复性为 ± 0.04 nm。测量误差主要来源是光源的不稳定性和机械转动误差。

关键词: EUV 单色仪;定标;多层膜反射镜;准确度;重复性

中图分类号: TH744.1;O434.2 **文献标识码:** A

Wavelength calibration of extreme ultraviolet monochromator

DONG Ning-ning^{1,2}, LI Min^{1,2}, LIU Zhen^{1,2}, NI Qi-liang¹, CHEN Bo¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A new calibration method for Extreme Ultraviolet (EUV) monochromator was presented. By measuring the 30.38 nm and 58.43 nm lines of a standard He hollow cathode source and the reflectivity peak of a calibrated Mo/Si multilayer mirror with central wavelength of 13.90 nm, the wavelengths of Mcpherson247 EUV monochromator were calibrated. Then, the standard points on the track of monochromator was fitted to get parabolic curve by Origin. After analysing calibrated results, it shows that the measuring accuracy is 0.08 nm and the repeatability is ± 0.04 nm, when the reflectivity peak of the multilayer mirror is measured using soft X-ray reflectometer with laser-produced plasma source at 12~60 nm. The main sources of measurement errors are the instability of the light source and the rotation error of the mechanism.

Key words: Extreme Ultraviolet (EUV) monochromator; calibration; multilayer mirror; accuracy; repeatability

1 引言

近年来,随着对天文学、空间天体物理、等离子体物理、材料科学及分子生物学等相关学科的深入研究,极紫外和软 X 射线光学的研究和利用已经成为国际上的前沿科学领域。软 X 射线多层膜反射镜,由于其具有高的反射率和窄的带宽而在天文学、显微成像、同步辐射、投影光刻、软 X 射线激光应用等方面起着重要作用,而这些应用大都要求软 X 射线反射镜的反射峰值处在特定波长。由于制作工艺复杂,反射镜的反射特性可能会与理论设计值有很大不同,为此非常有必要对反射镜的反射特性进行实验标定。单色仪是一种常用的分光仪器,它可以产生单色光、进行光谱分析和光谱特性的研究^[1]。若要使用单色仪对

多层膜反射镜的反射率及其峰值位置进行准确的测量,首先应对单色仪进行定标。

本实验室之前对 Mcpherson247 单色仪定标所采用的是以光栅方程为理论依据,通过测量空阴极光源的 30.38、53.70 和 58.43 nm 3 条发射光谱进行定标^[2]的方法。但由于波长扫描器与单色仪之间连接杠杆脱扣而发生丢数,该单色仪需重新定标。又由于波长扫描器与单色仪在光栅方程中的对应关系已变得不准,故须选用其它方法进行定标。多次实验验证表明,仅通过测量 He 空阴极光源的发射光谱定标,结果只在 > 30 nm 波段的测量较为准确,而对于 < 30 nm 的波段误差较大,所以本次实验除了用空阴极光源发射光谱标定两点外,还要在 < 30 nm 的波段找到另一标准点。本文介绍了一种新的定标方法:通过测量标准气体 He 空阴极光源的 30.38 和 58.43 nm

两条发射光谱和标定过的中心波长为 13.90 nm Mo/Si 多层膜反射镜的反射率峰值位置,对 Mcpherson247 型 EUV 单色仪进行波长定标。对标定结果做了分析,结果表明,在 12~60 nm 波段内,用激光等离子体光源软 X 射线反射率计测量多层膜反射镜反射峰值位置时,测量准确度为 0.08 nm,测量重复性为 ± 0.04 nm。

2 实验装置

2.1 EUV 单色仪

本次实验标定的单色仪是 Mcpherson247 动狭缝掠入射单色仪,其只有一个光学元件即凹面光栅作为分光和聚光元件,这既提高了光谱分辨率和波段范围,又增加了到达探测器的能量,提高了探测系统的信噪比。工作波段为 1~120 nm。入缝、出缝和光栅同在罗兰圆上,入射角是 87° 。凹面光栅的曲率半径为 2 217.6 mm,刻划密度为 600 l/mm,刻划面积为 30 mm \times 50 mm,闪耀角为 2.07° 。由其工作原理可知,入射狭缝和出射狭缝位于直径为 R 的圆周上,即罗兰圆上。通过改变出臂长度 r_b 的大小,在单色仪的出射狭缝处就可以得到相应波长 λ 的单色光,光栅方程^[2-3]如下:

$$\lambda = d[1 - (r_a/R)^2]^{1/2} - d[1 - (r_b/R)^2]^{1/2}, \quad (1)$$

其中, r_a 是入臂长度; r_b 是出臂长度; R 是凹面光栅的曲率半径; d 是光栅的刻线密度; λ 是波长。

2.2 EUV 波段内空阴极光源

空阴极光源是一种具有高稳定性的气体放电光源,工作气体一般为 He、Ne、Ar 等。本次实验用的空阴极光源由筒状阳极、空阴极和差分室组成。阴极和阳极之间用聚四氟乙烯绝缘;采用双

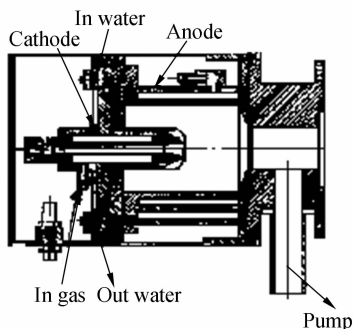


图 1 空阴极光源结构图

Fig. 1 Structural diagram of hollow cathode source

壁水冷方式制冷;空阴极由铜钨合金锥形阴极帽和铜阴极座组成,有利于导电和散热;为了解决真空过渡问题,光源与仪器间附加了一级差分泵系统,这样在光源前不需加任何窗口就能解决低真空到高真空的过渡,同时也有效地利用了光源的辐射^[4],结构简图如图 1 所示。由美国 NIST^[5]给出的几种气体的光谱可知:在 12~60 nm 波段内对单色仪进行波长标定,He 是最合适的工作气体,所以本次实验的工作气体选用的是 He,如图 2。但是从图中可以看出 He 的发射光谱在 >30 nm 波段有两个较强的谱线,且相距较远, <30 nm 波段没有较强的谱线,所以有必要在 12~30 nm 波段找到一条较强的发射谱线。

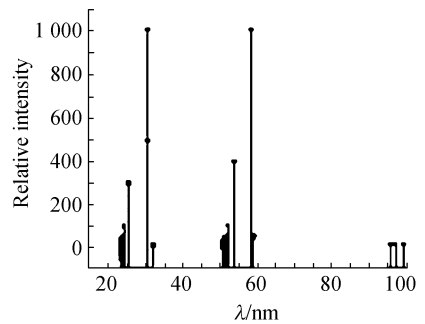


图 2 He 的发射光谱

Fig. 2 Spectrum of He gas

用工作气体是 He 的空阴极光源定时实验条件是,入射狭缝和出射狭缝宽度均为 0.1 mm,高度为 1 mm。此波段的探测器选用的是通道电子倍增器^[6-7]。由于空阴极光源的光谱辐射强度比较弱,探测器应工作在计数模式下,暗计数为 20 个数。探测器工作电压为负 2 500 V,输出信号放大倍数为 5 倍,空阴极光源与单色仪连接处差分口的直径为 0.8 mm,光源电压为 1 500 V,电流为 0.4 A,系统工作时的真空度大约 4.5×10^{-2} Pa。

2.3 激光等离子体光源软 X 射线反射率计

反射率计由激光等离子体光源、掠入射光栅单色仪、样品室、真空系统、样品台、光电探测系统和计算机控制系统等几个部分组成,如图 3 所示。用此系统定时实验条件是单色仪的入射狭缝和出射狭缝的宽度均为 0.15 mm,高度为 2 mm,此波段的探测器选用的是 AXUV-100 系列 Si 光电二极管^[9]。系统噪声为 0.05 V,输出信号放大倍数为 25 倍,工作时的真空度大约为 2.6 Pa。利用

此套装置,通过扫描波长可以测量多层膜反射镜在某一正入射角的反射率随波长变化的曲线,从曲线图中可读出其反射峰值位置,这是本次实验关心的一个重点问题。

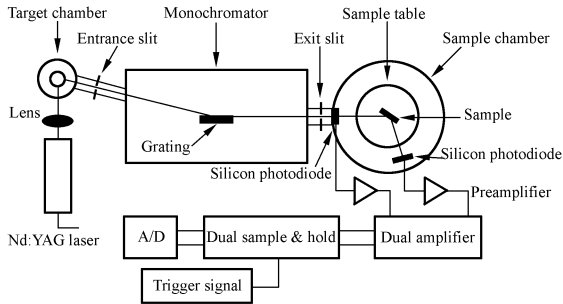


图3 软X射线反射率计的结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of soft X-ray reflectometer

测量多层膜时,先将样品移出光路,记录下探测器测量的入射光信号 I_R ,并记录下暗噪声 I_{Z1} ,为了消除光源暗噪声对测量结果的影响,用 $I_R - I_{Z1}$ 作为入射光信号;然后将被测样品移入光路,记录下探测器测量到的经样品反射后的反射信号 I_S ,同样记录下暗噪声 I_{Z2} ,用 $I_S - I_{Z2}$ 作为反射光信号。在某一特定波长的反射率可由式(2)计算而得:

$$R(\lambda) = \frac{I_S(\lambda) - I_{Z2}(\lambda)}{I_R(\lambda) - I_{Z1}(\lambda)} \quad (2)$$

表1 实验测量数据

Tab. 1 Measured data of this experiment

定标方法 及光谱位置	空阴极光源 He I 58.43 nm	空阴极光源 He I 30.38 nm	Mo/Si 多层膜反射镜 中心波长为 13.90 nm
第一次	58.392	30.390	13.758
测量的中心 波长(nm)	58.387	30.395	13.827
第二次	58.413	30.385	13.923
第三次	58.40	30.39	13.84
平均值			

3.2.2 中心波长为 13.9 nm 的 Mo/Si 多层膜反射镜反射峰值位置的测量

(1) 定标前的准备工作

调节可见光的光路并调节探测器的高度以确定探测器的零点位置,粘贴样品并确定样品台零度入射点。当反射光和入射光重合时,把此时样品台的位置设为 180° ,将样品室密封好,真空度达到 2.6 Pa 时开时测量。为了获得稳定性和重

3 定标过程

3.1 理论计算

实验前,先用光栅方程计算出所选 3 点的理论值,以确定光谱响应的大致区域。将各已知值代入光栅方程中,得出 3 个波长对应的 r_b 的理论值分别为 312.83、436.75 和 592.94 mm。

3.2 实验定标过程

3.2.1 谱线 He II 30.38 nm 和 He I 58.43 nm 的测量

首先,把扫描波长读数定位到出射狭缝位置大约在 592.94 mm 处,并找到光谱辐射强度最强时出射狭缝的位置,开动波长扫描器将出射狭缝向 >58.43 nm 方向移动,观察辐射强度,直到找到辐射强度等于此时的暗计数 20 个数为止,记下此时的波长扫描器读数 594.11 mm,扫描间隔为 0.03 mm,直到测量到出射狭缝 <58.43 nm 方向上辐射强度等于暗计数 20 个数为止,此时波长扫描器读数为 592.58 mm。其次,再测量两次 58.43 nm 的光谱分布来验证其校正情况。然后按照上述方法测量 3 次 30.38 nm 的发射光谱。实验结果见表 1。

复性较好的极紫外辐射,减少光源不稳定性对测量结果的影响,可采用多次测量平均统计方式获取一个数据点,并在测量前不时地转动靶以找到一个相对稳定的打靶位置再进行测量。

(2) 定标过程

首先参照测量 He I 58.43 nm 谱线的方法,把扫描波长读数定位到出射狭缝位置大约在 312.83 mm 处,并将样品台与探测器置于反射位

置,然后小角度的调节样品台和探测器的位置,找到光谱辐射强度最强时出射狭缝的位置,从波长扫描器读数 319.53 mm 的位置开始测量,扫描间隔是 0.13 mm,直到测量到波长扫描器读数 306.58 mm 为止;然后测量入射位置时的谱线;将反射和入射的数据代入 Origin,利用式 2 画出其反射率随波长变化的曲线;最后再测量两次中心波长为 13.90 nm 的 Mo/Si 多层膜反射镜反射入射对应的谱线来验证其校正情况。实验结果见表 1。

3.3 定标结果检验及分析

将测量点数据输入 Origin,做一元二次方程(公式 3)曲线拟合,得到单色仪波长-出射狭缝位置定标曲线,如图 4 所示。

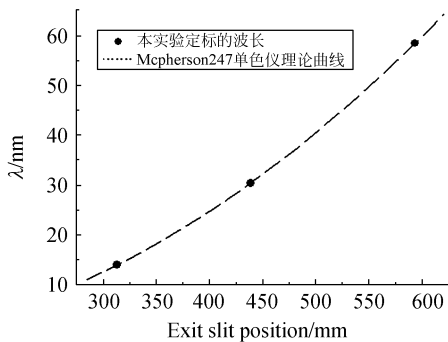


图 4 单色仪波长-出射狭缝位置定标曲线

Fig. 4 Calibration curves of monochromator wavelength and exit slit position

$$y = A + B_1x + B_2x^2, \quad (3)$$

式中, y 表示波长; x 表示出射狭缝的位置; $A = -2.23$, $B_1 = -4.98 \times 10^{-3}$, $B_2 = 1.81 \times 10^{-4}$, 均为常数。

用定标后的 EUV 单色仪测量定标过的中心波长为 18.70 nm 的 Mo/Si 多层膜反射镜的反射峰值位置,测量结果如表 2。由表 2 可以看出,在 12~60 nm 波段内,用激光等离子体光源软 X 射线反射率计测量多层膜反射镜反射峰值位置时,测量准确度为 0.08 nm,测量重复性为 ± 0.04 nm。实验中产生的误差源于以下两个方面:光源的不稳定性是单色仪本身的固有误差,不能消除只能适当的减小,可采用多次测量平均统计方式获取一个数据点并在测量前不时地转动靶以找到一个相对稳定的打靶位置的方法来减小;另一个导致定标产生误差的主要因素是机械转动误差:多层膜样品平移、转动装置的机械误差主要是指 3 次测量曲线并不是在完全相同入射角下获得的,入射角的变化是由两个探测器位置交替时机械转动误差引起的,波长扫描装置的机械误差(波长扫描器杠杆转动一圈,相应出射狭缝的移动距离为 1.27 mm,并且杠杆每转动 100 圈,出射狭缝的移动距离误差为 0.01 mm,对应的波长变化是 0.02 nm)对定标精度也会有一定的影响。另外 Mo/Si 多层膜反射镜本身的固有特性对测量结果也有一定的影响。

表 2 18.70nm 多层膜反射镜测量数据及计算的技术参数

Tab. 2 Measured data of multilayer mirror in 18.70 nm and each statistic result of technique parameter

多层膜反射镜名称	实验条件	测量的中心波长(nm)	测量准确度(nm)	测量重复性(nm)
中心波长为 18.70 nm 的 Mo/Si 多层膜反射镜	入射狭缝和出射狭缝高度	第一次	18.747	0.08
	均为 2 mm,宽度均为 0.15	第二次	18.770	
	mm,波长扫描器的移动间	第三次	18.820	
	隔是 0.03 mm	平均值	18.78	

4 结 论

本文提出了一种 EUV 单色仪波长标定的新方法,即通过测量标准气体 He 空阴极光源的 30.38 和 58.43 nm 两条发射光谱和标定过的中心波长为 13.90 nm 的 Mo/Si 多层膜反射镜的反射率峰值位置,对 Mcpherson247 型 EUV 单色仪

进行波长定标。

实验结果表明,在 12~60 nm 波段内,用激光等离子体光源软 X 射线反射率计测量多层膜反射镜反射峰值位置时,测量准确度为 0.08 nm,测量重复性为 ± 0.04 nm。定标误差的来源主要是光源的不稳定性和机械转动误差。

为了更加准确地测量多层膜反射镜的反射率峰值位置,下一步的工作将是提高光源稳定性和

机械转动精度,具体分析光源稳定性对测量结果的影响,改进测量装置,研制一个带观察窗口的高精度多层膜样品平移和转动机构,提高测量精度。

利用定标后的 EUV 单色仪可以更加准确地测量出软 X 射线多层膜反射镜的反射峰值位置,这项工作给天文学、同步辐射、软 X 射线激光应用等方面的研究奠定了基础。

5 致 谢

参加本文工作的研究人员,除作者外还有马月英高级工程师、王晓光工程师,以及博士生范鲜红、王丽辉,硕士生李旭等。在此对他们的辛勤工作表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 黄曙江. 单色仪测波长中的不确定度分析[J]. 计量与测试技术, 2006, 33(8): 12-13.
HUANG SH J. Analyze two method that the single-color survey the wavelength[J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2006, 33(8): 12-13. (in Chinese)
- [2] 王丽辉, 李敏, 王孝坤, 等. 用空阴极光源标定极紫外-软 X 射线单色仪[J]. 光学技术, 2007, 32(3): 370-372.
WANG L H, LI M, WANG X K, *et al.*. Wavelength calibration of EUV and soft X-ray monochromator measured by hollow cathode source[J]. *Optical Technique*, 2007, 32(3): 370-372. (in Chinese)
- [3] 李全臣, 蒋月娟. 光谱仪器原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.
LI Q CH, JIANG Y J. *Principle of Spectral Instrument* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1997. (in Chinese)
- [4] 陈波, 尼启良, 曹健林, 等. 软 X 射线-真空紫外波段光谱光源研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 3(25): 360-364.
CHEN B, NI Q L, CAO J L, *et al.*. Development of soft X-ray and vacuum ultraviolet spectrum sources[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, 3(25): 360-364. (in Chinese)
- [5] SANSONETTI J E, MARTIN W C, YOUNG S L. *Handbook of Basic Atomic Spectroscopic Data* [M]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2004.
- [6] 尼启良, 齐立红, 陈波. 使用气体靶激光等离子体光源的软 X 射线反射率计[J]. 光学精密工程, 2004, 12(6): 576-580.
NI Q L, QI L H, CHEN B. Soft X-ray reflectometer based on laser-produced plasma source with a gas-jet target[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6): 576-580. (in Chinese)
- [7] 端木庆铎, 李野, 卢耀华, 等. 硅微通道板电子倍增器[J]. 电子学报, 2001, 29(12): 1680-1682.
DUANMU Q D, LI Y, LU Y H, *et al.*. Electron multiplier of Si microchannel plate[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2001, 29(12): 1680-1682. (in Chinese)
- [8] 陈波, 尼启良, 曹继红. 激光等离子体光源软 X 射线反射率计[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 3(25): 453-455.
CHEN B, NI Q L, CAO J H. Soft X-ray reflectometer with laser produced plasma source[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, 3(25): 453-455. (in Chinese)
- [9] 曹继红, 尼启良, 陈波. 用 Si 光电二极管标定软 X 射线探测器[J]. 光学精密工程, 2004, 12(1): 118-121.
CAO J H, NI Q L, CHEN B. Calibration of soft X-ray detector[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 118-121. (in Chinese)

作者简介: 董宁宁(1981—), 女, 吉林长春人, 助理工程师, 主要从事短波光学研究。E-mail: xiaosiyao@sina.com.cn

陈波(1961—), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要从事短波光学的研究。E-mail: chenb@ciomp.ac.cn.