

文章编号 1674-2915(2010)06-0566-06

真空紫外波段光栅二级衍射效率测量装置

曲 艺

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 利用光栅二级衍射会影响反射样品光谱反射率结果的原理, 通过计算不同光谱反射率获得了光栅二级衍射效率。介绍了测量二级衍射效率的实验装置, 该装置采用双光路单色仪结构, 使用已知光谱辐亮度氘灯作为光源, 探测器为光电倍增管, 通过水杨酸钠膜将紫外光转为可见光。以波长 161 nm 为例, 测量了 5 块反射镜样片, 计算得到光栅二级衍射效率为 $0.00611 \times (1 \pm 0.0777)$ 。分析表明, 该方法采用的测试装置简单, 系统不确定度为 14.08%, 可以实现真空紫外波段光栅二级光谱衍射效率的连续测量。

关键词: 光栅效率; 二级衍射效率; 真空紫外

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

Measuring instrument for second-order diffraction efficiency of grating in vacuum ultraviolet

Q Yi

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A method for measuring the second-order diffraction efficiency of a grating in the vacuum ultraviolet region is introduced on the basis of the theory that the sample reflectance is influenced by the second-order diffraction efficiency of the grating. The measuring instrument by using a double path monochromator is also described, which takes a deuterium lamp as the light source, a R6095 photomultiplier as the detector, and transforms the violet light into a visible light by a sodium salicylate scintillator film. By using the instrument, the second-order diffraction efficiency of the grating is measured from 120 to 165 nm continuously. Obtained results show that the second-order diffraction efficiency at 161 nm is $0.00611 \times (1 \pm 0.0777)$, and the uncertainty of the system is 14.08%.

Key words: grating efficiency; second-order diffraction; vacuum ultraviolet

1 引言

衍射效率是光栅最重要的一项基本性能指标^[1], 它不仅决定着仪器的光谱能量特性, 而且最终限制着光栅光谱仪器的有效工作波段。因此, 测试光栅的光谱衍射效率曲线, 无论对完善光栅理论, 研究 Wood 反常效应, 还是设计光谱仪器及提高光栅制作质量^[2]都有着重要的意义。

关于光栅衍射效率的理论计算, 人们已提出了许多新的概念与方法^[3-5], 但实验测量真空紫外波段光栅的二级衍射效率仍面临许多新问题。比如, 测试环境需要在真空环境下进行, 若系统过于复杂^[6-9], 则会加大成本; 又绝大多数材料在真空紫外波段都是完全吸收的, 可用的材料非常有限^[10-12], 另外, 避免光源与光学元件在真空环境下的衰减也是问题^[13-15]。在文献[16]中, Richard 等人提到利用同步辐射来测量真空紫外波段光栅的二级衍射效率, 实现了在 46 nm 处光栅二级衍射效率测量, 精度为 6%。但是该方法涉及到的同步辐射光源并不易获得, 而且测量波长单一; 同时由于同步辐射线无法同时充满光栅, 还需要引入扫描装置, 使得测量装置结构更加复杂。本

文提出了利用光栅二级光谱影响反射样品光谱反射率结果的原理来获得真空紫外波段光栅二级光谱衍射效率的方法。该方法使用的测量仪器结构简单, 可以同时获得一段波长范围内的光栅二级衍射效率, 仪器测量不确定度为 14.08%。

2 测量系统的构成及工作原理

2.1 测量系统结构

光栅二级光谱效率测试装置如图 1 所示。该装置使用 30 W 氙灯光源, 窗口为 MgF₂ 材料, 可以通过 120 ~ 380 nm 波段紫外光, 超环面反射镜将入射光反射至单色仪入缝处, 照亮光栅, 衍射光汇聚至出缝后, 经过柱面反射镜组准直, 变为平行光。光阑用于控制光斑尺寸, 经过透射/反射式调制扇, 透射光进入样品室, 反射光进入参考光路探测器。主光路探测器可在平面内转动, 接收样品的反射光, 它与参考光路探测器结构相同。光电倍增管表面镀有水杨酸钠膜, 将紫外光转为可见光。由于工作波段覆盖了真空紫外-近紫外波段, 整个系统需要密封在真空环境中。引入参考光路的主要目的是消除由于紫外光源衰减造成的测量误差, 提高测量精度。

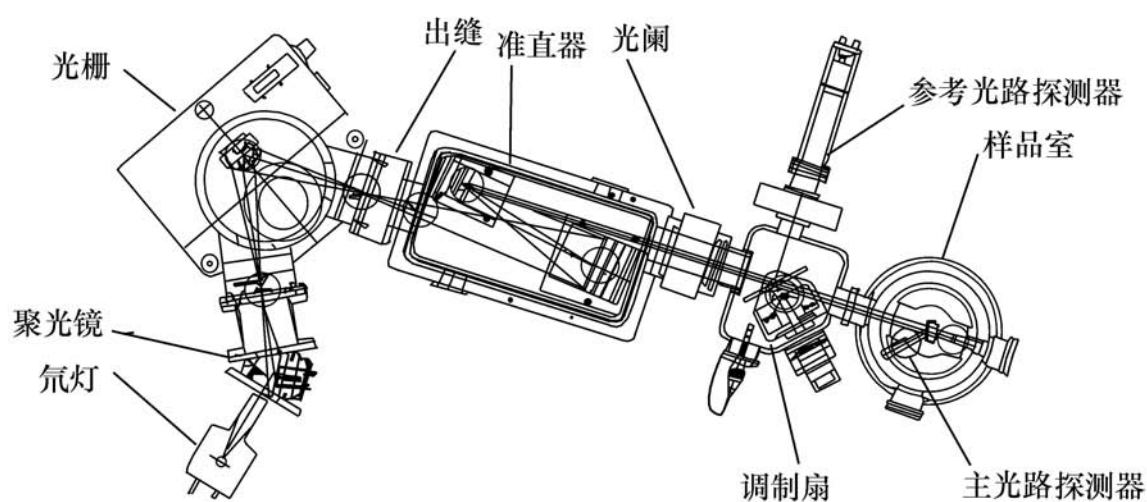


图 1 光栅二级光谱效率测试装置

Fig 1 Sketch of measuring instrument for grating second-order diffraction efficiency

2.2 工作原理

首先探测光路中没有样品时的信号 $I_0(\lambda)$,

同时记录参考光路信号 $I_0(\lambda)$ 。

$$I_0(\lambda) = L(\lambda) \left(\frac{D}{f}\right)^2 S(\lambda) \cdot$$

$$D_{\text{Eff}_1}(\lambda) R_{\text{es}}(\lambda) d \quad (1)$$

式中 $L(\lambda)$ 为光源在波长 λ 处的光谱辐亮度, $(D/f)^2$ 为系统相对孔径平方, S 为入缝面积, $\eta(\lambda)$ 为系统光谱传递效率, $D_{\text{Eff}_1}(\lambda)$ 为光栅一级衍射效率, $R_{\text{es}}(\lambda)$ 为探测器在波长 λ 处的响应度。

然后在光路中加入反射样品, $I_{\text{R}}(\lambda)$ 为经样品反射后的信号, 其中包含样品的反射率信息。

$$I_{\text{R}}(\lambda) = L(\lambda) \left(\frac{D}{f}\right)^2 S(\lambda) \eta(\lambda) D_{\text{Eff}_1}(\lambda) R_{\text{es}}(\lambda) R(\lambda) d, \quad (2)$$

则样品反射率 $R(\lambda)$ 为:

$$R(\lambda) = \frac{I_{\text{R}}(\lambda)}{I_0(\lambda)}. \quad (3)$$

为避免光栅高级衍射光谱对 $R(\lambda)$ 测量结果的影响, 通常在光路中加入短波段截止滤光片。若不加入滤光片, 则波长 λ_1 处的测量结果会受到波长为 λ_2 ($\lambda_1 = 2\lambda_2$) 的高级光谱的影响。此时上述测量过程中的 $I_0(\lambda)$ 与 $I_{\text{R}}(\lambda)$ 分别为:

$$I_0(\lambda_1) = L(\lambda_1) \left(\frac{D}{f}\right)^2 S(\lambda_1) D_{\text{Eff}_1}(\lambda_1) R_{\text{es}}(\lambda_1) d_1 + L(\lambda_2) \left(\frac{D}{f}\right)^2 S(\lambda_2) D_{\text{Eff}_2}(\lambda_2) R_{\text{es}}(\lambda_2) d_2, \quad (4)$$

$$I_{\text{R}}(\lambda_1) = L(\lambda_1) \left(\frac{D}{f}\right)^2 S(\lambda_1) D_{\text{Eff}_1}(\lambda_1) R_{\text{es}}(\lambda_1) d_1 R(\lambda_1) + L(\lambda_2) \left(\frac{D}{f}\right)^2 S(\lambda_2) D_{\text{Eff}_2}(\lambda_2) R_{\text{es}}(\lambda_2) d_2 R(\lambda_2). \quad (5)$$

受到光栅高级光谱衍射效率影响的样品光谱反射率 $R(\lambda_1)$ 为:

$$R(\lambda_1) = \frac{I_{\text{R}}(\lambda_1)}{I_0(\lambda_1)} = \frac{L(\lambda_2) \left(\frac{D}{f}\right)^2 S(\lambda_2) D_{\text{Eff}_2}(\lambda_2) R_{\text{es}}(\lambda_2) d_2 R(\lambda_2)}{L(\lambda_1) \left(\frac{D}{f}\right)^2 S(\lambda_1) D_{\text{Eff}_1}(\lambda_1) R_{\text{es}}(\lambda_1) d_1 + L(\lambda_2) \left(\frac{D}{f}\right)^2 S(\lambda_2) D_{\text{Eff}_2}(\lambda_2) R_{\text{es}}(\lambda_2) d_2}. \quad (6)$$

光栅在波长 λ_2 处的二级效率 $D_{\text{Eff}_2}(\lambda_2)$ 为:

$$D_{\text{Eff}_2}(\lambda_2) = \frac{L(\lambda_1) \left(\frac{D}{f}\right)^2 S(\lambda_1) R_{\text{es}}(\lambda_1) d_1}{L(\lambda_2) \left(\frac{D}{f}\right)^2 S(\lambda_2) R_{\text{es}}(\lambda_2) d_2} \cdot \frac{R(\lambda_1) - R(\lambda_2)}{R(\lambda_1) - R(\lambda_2)} \cdot D_{\text{Eff}_1}(\lambda_1). \quad (7)$$

紫外探测器为表面镀有水杨酸钠的光电倍增管, 由于水杨酸钠在 120 ~ 330 nm 的量子效率近似相等^[17, 18], 因此在该波段范围内, 探测器响应 $R_{\text{es}}(\lambda)$ 相同。式(7)中氘灯光源的光谱辐亮度 $L(\lambda)$, 系统光谱传递效率 $\eta(\lambda)$, 光栅一级光谱衍射效率 $D_{\text{Eff}_1}(\lambda)$ 为已知数据, 带宽 $d_1/d_2 = 2$ 。利用反射样品在波长 λ_1 处的标准反射率 $R(\lambda_1)$ 和光栅二级衍射光谱影响的反射率 $R(\lambda_1)$, 就可以计算出真空紫外波段光栅的二级光谱衍射效

率。

3 测量结果与分析

首先, 测量样品的标准反射率值, 由于 MgF_2 材料的截止波长为 105 nm, 因此, 当测量机构扫描至 220 nm 时, 光路移入一片长波通滤光片, 该滤光片可将 210 nm 以下的短波全部滤除, 因此

光路中无二级光谱影响, 可测得样品的标准反射率值。接下来测量受光栅二级光谱影响的反射率, 它与上述过程区别在于, 当测量机构扫描至 220 nm 时, 不加入长波通滤光片, 此时, 反射率测量结果大于 210 nm 时会受二级光谱的影响。举例

来说, 当扫描机构至 320 nm 时, 此时 160 nm 的二级衍射光也同样在光路中传输, 探测器同时接收到 320 nm 与 160 nm 的辐射, 因此, 样品在 320 nm 的反射率测量值与标准值会有差异。

图 2 中所示为反射样品的标准反射率曲线,

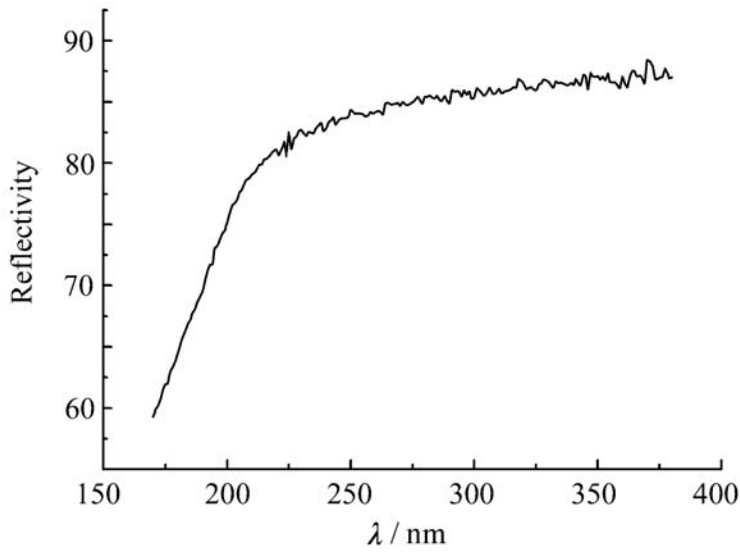


图 2 样品的标准反射率

Fig. 2 Standard reflectivity of sample

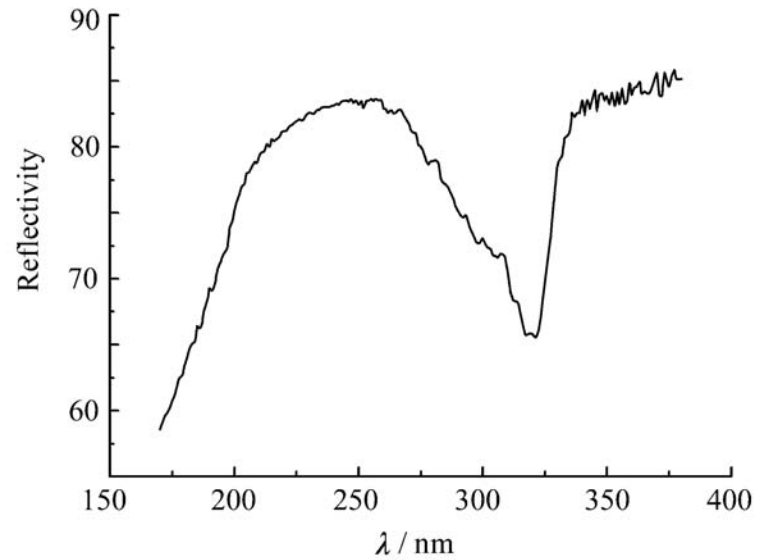


图 3 样品受光栅二级衍射影响的反射率

Fig. 3 Reflectivity influenced by second-order diffraction of grating

图 3 中所示为受光栅二级光谱影响的反射率曲线。从图中可以看到在 220 ~ 380 nm 波段, 反射率由于受到光栅高级衍射效率的影响存在差别。

以波长 $\lambda_1 = 322 \text{ nm}$ 与 $\lambda_2 = 161 \text{ nm}$ 为例, 系统参数见表 1, 氘灯数据来自德国标准组织 PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), 其光谱辐亮度曲线见图 4, 在 161 nm, 光谱辐亮度不确定度为 14%。测量了 5 块反射镜样品, 样品为铝 + 氟化镁, 基底材料为 K9。在 120 ~ 380 nm 具有不同的光谱反射率, 测量精度在 1% 以内。测量的反射率值与光栅效率测量结果见表 2, 系统不确定度计算结果见表 3。

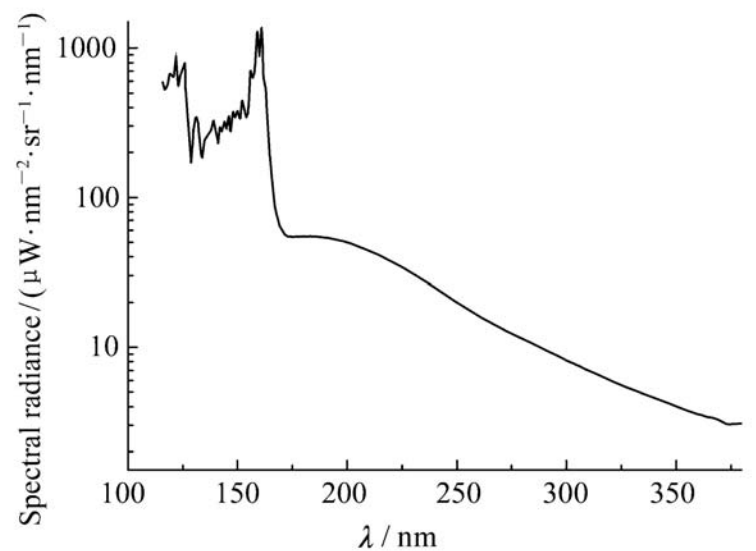


图 4 氘灯光谱辐亮度

Fig. 4 Spectral radiance of deuterium lamp

表 1 系统参数

Tab. 1 Parameters of system

波长 / nm	氘灯光谱辐亮度 / ($\mu\text{W} \cdot \text{nm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$)	系统传输效率	一级衍射效率
322	5.786	0.636	0.15
161	1.373	0.422	

表2 光栅效率测量结果

Tab.2 Measuring results of grating efficiency

测量样品	$R(161)$	$R(322)$	$R(322)$	二级衍射效率/%
1	0.802	0.852	0.814	0.604
2	0.591	0.862	0.657	0.592
3	0.73	0.855	0.758	0.66
4	0.781	0.835	0.795	0.545
5	0.59	0.856	0.65	0.654
平均值				0.611
标准方差				0.047 5
相对标准方差				7.77

表3 系统不确定度

Tab.3 Indeterminacy of system

不确定度项	%
氙灯	14
主探测器	1
参考探测器	1
光栅一级效率	0.5
计算结果	14.08

4 结 论

本文利用光栅二级光谱影响反射样品光谱反射率结果的原理,获得了真空紫外波段光栅二级光谱衍射效率。该方法使用的测试装置简单,可以同时获得一段波长范围内的光栅二级光谱效率。文中以161 nm为例,计算得到所测量光栅的二级衍射效率为 $0.00611 \times (1 \pm 0.0777)$,其不确定度为14.08%,认为其主要原因是所使用的光源氙灯辐亮度值不确定度较大。

参考文献:

- [1] PALMER C. *Diffraction Grating Handbook*[M]. New York: Thermo RGL, 2002.
- [2] 周哲海. 平面波导凹面衍射光栅的设计[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(6): 993-998.
ZHOU ZH H. Design of planar waveguide concave diffraction gratings[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6): 993-998. (in Chinese)
- [3] VASNETSOV M V, BAZHENOV V Y, SLUSSARENKO S S, *et al.*. Coupled-wave analysis of second-order Bragg diffraction. I. Reflection-type phase gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 2009, 26(4): 684-690.
- [4] BRUNOT O P, REITIC F. Accurate calculation of diffraction grating efficiencies[J]. *SPIE*, 1993, 1919: 236-247.
- [5] KUZNETSOV I G, WILKINSON E, CONTENT D A, *et al.*. Grating efficiencies comparison study calculations versus metrology for various types of high groove density gratings at VUV-UV wavelengths[J]. *SPIE*, 2004, 5178: 267-276.
- [6] 齐文宗, 刘颖, 李福田. 铝质紫外闪耀光栅衍射效率的模拟计算及其与实验结果的对比[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(1): 16-18.
QI W Z, LIU Y, LI F T. Comparison of calculated and measured diffractive efficiencies of UV aluminum blazed gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(1): 16-18. (in Chinese)
- [7] OSTERMANS S, ROTTMAN G J. Photometric calibration of the first three spectroscopic orders of an extreme-ultraviolet spectrometer by use of synchrotron radiation[J]. *Appl. Opt.*, 1994, 33(19): 4193-4200.
- [8] McPherson A, ROUZE N, WESTERVELD W B, *et al.*. Calibration of a VUV spectrometer-detector system using synchrotron radiation[J]. *Appl. Opt.*, 1986, 25(2): 298-310.
- [9] CARUSO A J, MOUNT G H, WOODGATE B E. Absolute S- and P-plane polarization efficiencies for high frequency holographic gratings in the VUV[J]. *Appl. Opt.*, 1981, 20(10): 1764-1776.

- [10] LAPORTE P, SUBTIL J L, COURBON M, *et al.*. Vacuum-ultraviolet refractive index of LiF and MgF₂ in the temperature range 80 ~300 K[J]. *J. Opt. Soc. Am*, 1983, 73(8) : 1062-1069.
- [11] LIEBMAN P A, ENTINE G. Radiance of deuterium arc lamps[J]. *Appl. Opt.*, 1969, 8(7) : 1502-1502.
- [12] CANFIELD L R, HASS G, WAYLONIS J E. Further studies on MgF₂-overcoated aluminum mirrors with highest reflectance in the vacuum ultraviolet[J]. *Appl. Opt.*, 1966, 5(1) : 45-49.
- [13] ALBYN K, BURNS H D. Interaction of vacuum ultraviolet radiation with molecular deposits[J]. *SPIE*, 2006, 6291: 62910H1.
- [14] HERZIG H, FLEETWOOD C M, TOFT A R. Variability in the vacuum-ultraviolet transmittance of magnesium fluoride windows[J]. *Appl. Opt.*, 1992, 31(1) : 110-114.
- [15] REFT C S, BECHER J, KERNELL R L. Proton-induced degradation of VUV transmission of LiF and MgF₂ [J]. *Appl. Opt.*, 1980, 19(24) : 4156-4158.
- [16] KENDRICK R L, McPherson A, ROUZE N, *et al.*. Comparison of methods for determining the second-order detection efficiency of a VUV spectrometer[J]. *Appl. Opt.*, 1987, 26(10) : 2029-2041.
- [17] JAMES A R, SAMSON B S. *Techniques of Vacuum Ultraviolet Spectroscopy*[M]. Nebraska: Pied Publications, 1967.
- [18] KRISTIANPOLLER N, KNAPP R A. Some optical properties of sodium salicylate films[J]. *Appl. Opt.*, 1964, 3(8) : 915-918.

作者简介: 曲 艺(1978—), 男, 吉林长春人, 副研究员, 主要从事紫外光学仪器设计与标定方面的研究。

E-mail: quyi972@sohu.com