

文章编号 1004-924X(2009)08-1783-07

# 紫外平面刻划光栅杂散光数值分析及测试

巴音贺希格<sup>1</sup>, 李 燕<sup>1,2</sup>, 吴 娜<sup>1,2</sup>, 于海利<sup>1,2</sup>, 张善文<sup>1,2</sup>, 齐向东<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 杂散光是光栅的重要技术指标,它直接影响光栅的信噪比,紫外波段的杂散光对光谱分析尤为不利。为了考察平面刻划光栅用于光谱仪器时产生的杂散光,采用标量衍射理论数值分析了杂散光产生的原因。数值模拟结果表明,紫外平面刻划光栅刻槽周期随机误差以及刻槽深度随机误差是杂散光的主要来源,而光栅杂散光对光栅表面小尺度随机粗糙度并不敏感。提出了平面光栅光谱仪出射狭缝相对宽度的概念,数值分析了仪器出射狭缝高度及出射狭缝相对宽度与杂散光强度的关系,从而分别为在光栅制作工艺中从根源上降低光栅杂散光以及在光栅应用过程中从使用方法上降低光栅杂散光提供了理论依据。最后,为了与采用滤光片法测得的光栅杂散光实验值进行比较,给出了理论求解杂散光总强度的求和公式,并对4个不同波长的杂散光进行了多次测量。结果表明,当刻槽周期随机误差、刻槽深度随机误差和表面随机粗糙度分别取0.8 nm、0.5 nm和1.2 nm时,理论值和实验值的相对误差可控制在13%左右。

**关键词:** 衍射光栅;杂散光;数值分析

**中图分类号:** O436.1; TH744.1 **文献标识码:** A

## Numerical analysis and measurement of stray light from UV ruled gratings

Bayanheshig<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1,2</sup>, WU Na<sup>1,2</sup>, YU Hai-li<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Shan-wen<sup>1,2</sup>, QI Xiang-dong<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*  
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** As one of important technical specifications of diffraction gratings, stray light directly affects Signal Noise Ratios (SNRs) of spectrometers; especially in spectrum analysis at UV spectral bands. In order to search the stray light from applications of ruled gratings in the spectrometers, this paper analyzes forming causes of the stray light in theory based on a scalar diffraction equation. The numerical simulation indicates that the random errors in the spacing of grating grooves and the random errors in the groove depths for UV ruled gratings are the main sources of the stray light, moreover, the small-scale random surface roughness affects the stray light slightly. Otherwise, it presents a con-

**收稿日期:** 2008-09-24; **修订日期:** 2008-10-23.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No. 60478043); 中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项资金”资助项目 (No. O72031G070); “十一五”国家科技支撑计划重大项目 (No. 2006BAK03A02); 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20070523)

cept of a relative width for the exit slit and establishes the relation between the height and relative width of exit slit and the intensity of the stray light, which provides a theoretical reference for reducing the stray light in the process of fabricating gratings essentially and repressing the stray light in practical applications. Finally, in order to compare theory results with experimental results measured by a filter method, an equation to solve the total stray light is presented to measure the stray light of four wavelengths by a UV spectrophotometer. It proves that the maximal relative error between theory results and experimental results is about 13%, when random errors in the groove periods, random errors in the groove depths and random surface roughness are 0.8 nm, 0.5 nm and 1.2 nm respectively.

**Key words:** diffraction grating; stray light; numerical analysis

## 1 引言

衍射光栅是光谱仪器的核心元件,其杂散光水平直接影响光谱仪器的性能。尽管有不少研究工作致力于光栅杂散光的分析与研究,但对光栅杂散光的评价至今仍未形成统一的方法。现在常用的方法基本上可以划分为三大类别。一是依靠实验设备间接测量和判断光栅杂散光,其实实验测量的方法较多,但在原理上差别并不大,如光电测量法<sup>[1]</sup>、光学衰减法<sup>[2]</sup>和微通道板法<sup>[3]</sup>等。这些方法的优点在于注重实际应用,缺点是不能直接得知光栅的杂散光水平,测得的是包括仪器杂散背景在内的光栅杂散光。当仪器测得的杂散光较高时,就间接认为光栅的杂散光也较高,反之亦然。二是基于光栅电磁场理论<sup>[4]</sup>计算光栅本身的杂散光,通常是把光栅杂散光与粗糙表面散射场问题联系起来进行数值求解。例如,讨论周期粗糙表面和随机粗糙表面的粗糙度对散射场的影响<sup>[5-6]</sup>,运用电磁场理论求解积分方程分析粗糙面的散射场<sup>[7-8]</sup>,研究近似 Kirchhoff 理论<sup>[9-10]</sup>和扰动理论<sup>[11-12]</sup>等。这些理论方法的优点在于可以考察杂散光的偏振特性,缺点是与实际应用以及光谱仪器的联系不够紧密。三是由标量衍射理论计算杂散光,优点在于理论推导过程相对简单,数值计算中较少遇到收敛性和稳定性等问题,缺点是不能考虑杂散光的偏振特性。但是,对杂散光分析而言,偏振特性的重要性是很有限的<sup>[13]</sup>。因此,基于标量衍射理论分析光栅杂散光仍是很有应用价值的有效方法之一。

鉴于此,本文拟采用标量理论方法分析平面光栅(以下简称光栅)杂散光问题,基于光栅在光

谱仪器中的应用条件,由标量理论计算和分析影响光栅杂散光的基本因素。这样做主要出于以下两点考虑:第一,光栅杂散光水平直接影响的是光谱仪器的信噪比,在光谱仪器环境下分析光栅杂散光也是合理的。第二,引入光谱仪器出射狭缝相对宽度的概念,可以分析光谱仪器出射狭缝高度和相对宽度与杂散光的关系,目的是为光谱仪器设计者提供降低杂散光方法的理论依据,以纠正过去那种一旦光谱仪器杂散光过高就归咎于光栅质量的片面认识。另外,选用仪器内部消光措施较好的国产 T6 新世纪紫外可见分光光度计,通过截止滤光片滤除某一波长光强的方法来测试以此波长为中心波长的杂散光,并给出理论求解杂散光总强度求和公式,以便与实验测量结果进行比较研究。

## 2 基础理论

从 Fresnel-Kirchhoff 衍射方程出发,可以推导出计算理想光栅杂散光的表达式。如果在光栅理想槽形上分别叠加刻槽周期(槽距)随机误差、刻槽深度随机误差、小尺度表面粗糙度等 3 种随机误差,就可得到基于标量衍射理论的上述 3 种误差引起的杂散光相对强度表达式<sup>[13]</sup>。

### 2.1 理想光栅的杂散光

理想光栅没有任何缺陷,但是,由于光栅衍射光强度以  $\sin^2(\lambda)$  函数分布,两主极大(主峰)之间必然有许多次极大(次峰),这些次峰对主峰而言就是杂散光。杂散光相对强度  $S(\lambda, \lambda_M)$  是进入光谱仪器出射狭缝的次峰光通量  $\phi_\lambda$  与 1 级主峰通量  $\phi_{\lambda_M}$  之比,可表示为:

$$S(\lambda, \lambda_M) = \frac{\lambda_w}{N\lambda_M} \frac{\sin^2 \pi \left( \frac{\lambda - \lambda_B}{\lambda_M} \right)}{\sin^2 \pi \left( 1 - \frac{\lambda_B}{\lambda_M} \right)} \frac{1}{1 - \cos \left( 2\pi \frac{\lambda}{\lambda_M} \right)}, \quad (1)$$

式中,  $\lambda_M$  为衍射单色光(中心波长)的主峰波长,  $\lambda_w = sd/f$  为光谱仪器的输出带宽( $s$  为出缝宽度,  $d$  为光栅周期,  $f$  为成像镜焦距),  $\lambda$  为考察范围内的次峰波长,  $\lambda_B$  是被测光栅的闪耀波长,  $N$  是光栅总刻线条数。

## 2.2 光栅周期随机误差引入的杂散光

假设每一个光栅槽形相对于理想光栅槽形存在位置误差, 相邻两槽之间的均方差为  $\sigma_d^2$ , 并设  $b = \sigma_d^2/2d^2$ , 由此引入的杂散光相对强度为:

$$S(\lambda, \lambda_M) = \frac{\lambda_w}{N\lambda_M} \frac{\sin^2 \pi \left( \frac{\lambda - \lambda_B}{\lambda_M} \right) \left[ 1 + Nb \left( 2\pi \frac{\lambda}{\lambda_M} \right)^2 \right]}{\sin^2 \pi \left( 1 - \frac{\lambda_B}{\lambda_M} \right) \left[ 1 - \cos \left( 2\pi \frac{\lambda}{\lambda_M} \right) \right]}, \quad (2)$$

## 2.3 光栅槽深随机误差引入的杂散光

若光栅在刻划过程中伴随有随机槽深误差, 其均方差为  $\sigma_h^2$ , 其中  $h$  表示光栅槽深, 由此引入的杂散光相对强度为:

$$S(\lambda, \lambda_M) = \frac{\pi^2 \lambda_w \sigma_h^2}{\lambda_M^3} \left( 4 - \frac{\lambda^2}{d^2} \right)^2 \frac{\sin^2 \pi \left( \frac{\lambda - \lambda_B}{\lambda_M} \right)}{\sin^2 \pi \left( 1 - \frac{\lambda_B}{\lambda_M} \right)}, \quad (3)$$

## 2.4 随机表面粗糙度引入的杂散光

表面粗糙度是光栅工作表面的随机缺陷, 设  $\alpha$  为粗糙度自相关函数,  $\sigma_\gamma$  为缺陷出现的位置偏差,  $(\alpha\delta_\gamma)^2$  为粗糙度均方差, 由此引入的杂散光相对强度为:

$$S(\lambda, \lambda_M) = \frac{\pi^3 \lambda_w q}{f d \lambda_M^4} \left( 4 - \frac{\lambda^2}{d^2} \right)^2 \frac{(\alpha\delta_\gamma)^2}{\sin^2 \pi \left( 1 - \frac{\lambda_B}{\lambda_M} \right)}, \quad (4)$$

式中,  $q$  为光谱仪器出射狭缝高度。

## 3 光栅杂散光的数值分析

在进行数值计算时, 考察范围  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_M$  取 30 nm, 即以 -15 nm 作为计算起始点, 15 nm 作为计算终止点。光栅的刻线密度为 1 200 g/mm, 闪耀波长为 213.8 nm, 光栅刻线总数  $N$  为 48 000

线(光栅刻划面积 40 mm×40 mm)。如未作专门说明, 成像镜焦距  $f = 75$  cm, 仪器出缝宽度  $s = 0.5$  mm, 出缝高度  $q = 8$  mm, 输出带宽  $\lambda_w = 0.56$  nm, 粗糙度自相关函数  $\alpha = 10$ 。

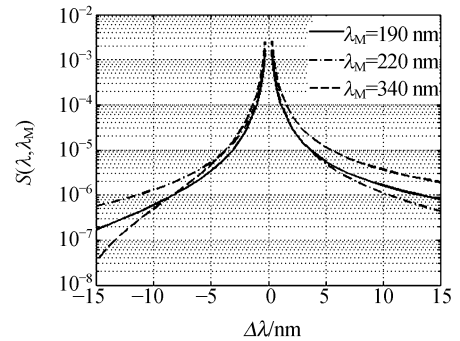


图1 理想光栅杂散光曲线

Fig.1 Curve of stray light of ideal grating( $\sigma_d = \sigma_n = \sigma_r = 0$ )

图1分别给出了刻线密度为 1 200 g/mm、闪耀波长为 213.8 nm 的理想光栅在 190 nm、220 nm 和 340 nm 处的杂散光。由图看出, 在仪器输出带宽  $\lambda_w$  边缘的杂散光为  $10^{-3}$  量级, 而且可以得到三点规律性的结果: 第一, 杂散光的总体变化趋势是距离中心波长  $\lambda_M$  越远, 杂散光越小; 第二, 在相同条件下, 光栅杂散光水平与中心波长  $\lambda_M$  不呈线性关系; 第三, 当中心波长  $\lambda_M$  接近闪耀波长  $\lambda_B$  时,  $\lambda_M$  两边的杂散光曲线基本对称分布, 当中心波长  $\lambda_M$  远离闪耀波长  $\lambda_B$  时,  $\lambda_M$  两边的杂散光曲线不对称分布, 而且在  $\Delta\lambda$  相同的前提下,  $\lambda < \lambda_M$  的杂散光小于  $\lambda > \lambda_M$  的杂散光。

任何光栅都不可能是理想光栅, 工艺误差不可避免, 只有误差的大小之分。光栅刻线密度为 1 200 g/mm, 即光栅周期为 833.33 nm。当闪耀波长为 213.8 nm 时, 若三角槽形光栅槽顶角为  $110^\circ$ , 则光栅槽深为 101.02 nm。对刻划光栅而言, 都会不同程度地存在周期随机误差  $\sigma_d$ 、槽深随机误差  $\sigma_h$  以及随机表面粗糙度  $\sigma_\gamma$  等 3 种主要小尺度缺陷, 从而导致光栅的杂散光。分析这 3 种误差的影响, 对光栅制造工艺中如何抑制杂散光有理论指导意义。

图 2、3、4 表明, 第一, 光栅周期随机误差越大, 杂散光越大, 这说明光栅刻划机分度系统的精度对光栅杂散光影响较大; 第二, 光栅槽深随机误差越大, 杂散光也越大, 而光栅刻划机的刻划系统精度、刻划力大小、刻划速度快慢以及铝膜均匀性

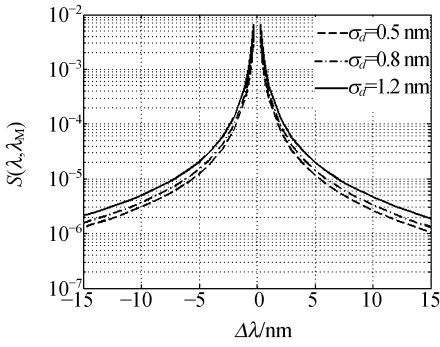


图 2 杂散光随刻槽周期随机误差变化曲线

Fig. 2 Curves of stray light with random errors in spacing of grating grooves ( $\lambda_M = 220 \text{ nm}$ ,  $\sigma_h = 0.5 \text{ nm}$ ,  $\sigma_\gamma = 1.2 \text{ nm}$ )

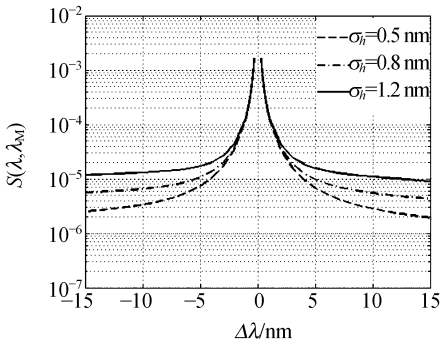


图 3 杂散光随刻槽深度随机误差变化曲线

Fig. 3 Curves of stray light with random errors in groove depths ( $\lambda_M = 220 \text{ nm}$ ,  $\sigma_d = 0.8 \text{ nm}$ ,  $\sigma_\gamma = 1.2 \text{ nm}$ )

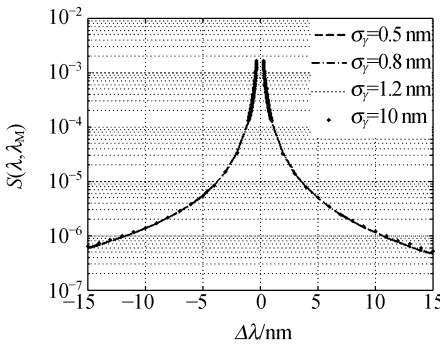


图 4 杂散光随光栅表面随机粗糙度变化曲线

Fig. 4 Curves of stray light with small-scale random surface roughness ( $\lambda_M = 220 \text{ nm}$ ,  $\sigma_d = 0.8 \text{ nm}$ ,  $\sigma_h = 0.5 \text{ nm}$ )

面的随机针孔并不是引起杂散光的主要原因。

这些结论表明,从抑制光栅杂散光角度考虑,仅仅注重光栅表面质量并不是最佳途径,确保光栅槽距、槽深的同一性十分关键。

图 5 对光栅的各种随机缺陷与杂散光的关系做了对比,  $\lambda_M$  取 220 nm。可以看出,等量的不同误差引入的杂散光程度和规律有明显区别,在平均效果上光栅周期随机误差和槽深随机误差引入的杂散光基本相当,从杂散光曲线下方的面积大小不难理解这一点。另一方面,仅仅从杂散光水平的角度考虑,刻划光栅不及全息光栅,因为全息光栅在原理上是不存在周期误差的<sup>[14]</sup>。刻划光栅杂散光有可能比同样规格的全息光栅杂散光高出一倍。

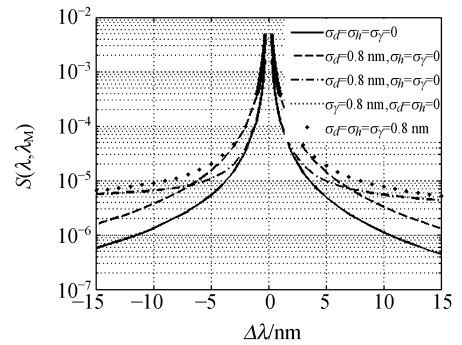


图 5 杂散光随不同种类随机误差变化曲线

Fig. 5 Curves of stray light with different random errors

然而,等量的光栅表面随机粗糙度却没有引入额外的杂散光,杂散光曲线与理想光栅基本重合。这说明,过分强调光栅表面针孔的影响没有太大必要。

图 6、7、8 考察了出缝高度  $q$ 、出缝宽度  $s$ 、成像镜焦距  $f$  与杂散光强度的关系。可以看出,在

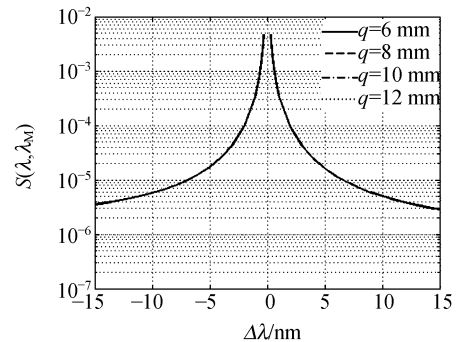


图 6 杂散光随出射狭缝高度变化曲线

Fig. 6 Curves of stray light with heights of exit slit ( $\lambda_M = 220 \text{ nm}$ ,  $\sigma_d = 0.8 \text{ nm}$ ,  $\sigma_h = 0.5 \text{ nm}$ ,  $\sigma_\gamma = 1.2 \text{ nm}$ )

等都会引入槽深随机误差;第三,杂散光对光栅随机表面粗糙度的大小并不敏感,这也说明光栅表

光栅不变的情况下, 光谱仪器出缝宽度越大杂散光越大, 成像镜焦距越大杂散光却越小, 出缝高度则对光栅杂散光影响不大。

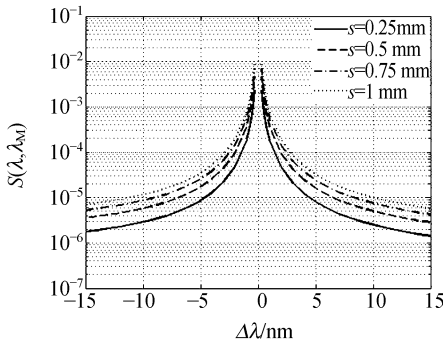


图 7 杂散光随出射狭缝宽度变化曲线

Fig. 7 Curves of stray light with widths of exit slit ( $\lambda_M = 220 \text{ nm}$ ,  $\sigma_d = 0.8 \text{ nm}$ ,  $\sigma_h = 0.5 \text{ nm}$ ,  $\sigma_\gamma = 1.2 \text{ nm}$ )

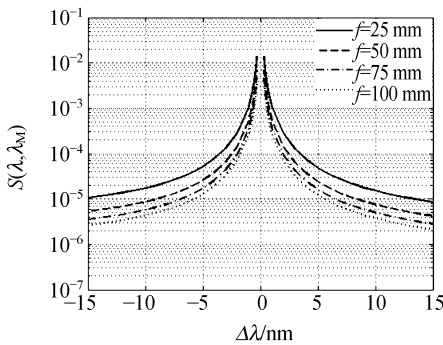


图 8 杂散光随仪器焦距变化曲线

Fig. 8 Curves of stray light with focal lengths ( $\lambda_M = 220 \text{ nm}$ ,  $\sigma_d = 0.8 \text{ nm}$ ,  $\sigma_h = 0.5 \text{ nm}$ ,  $\sigma_\gamma = 1.2 \text{ nm}$ )

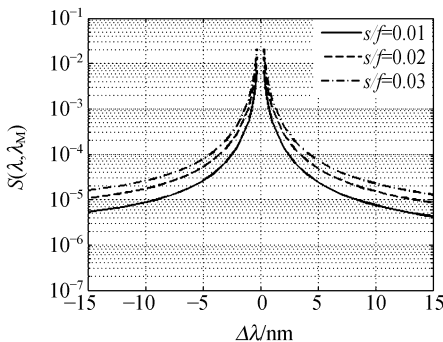


图 9 杂散光随出射狭缝相对宽度变化曲线

Fig. 9 Curves of stray light with relative widths of exit slit ( $\lambda_M = 220 \text{ nm}$ ,  $\sigma_d = 0.8 \text{ nm}$ ,  $\sigma_h = 0.5 \text{ nm}$ ,  $\sigma_\gamma = 1.2 \text{ nm}$ )

因此, 光谱仪器的杂散光不仅与光栅参数和品质有关, 而且还与光谱仪器出缝宽度以及成像镜焦

距有关。从杂散光的数量级来看, 后者的影响是不能够忽视的。从图 9 可知, 出缝宽度  $s$  和成像镜焦距  $f$  的比值  $s/f$  是一个很关键的物理量, 不妨称其为平面光栅光谱仪出射狭缝的相对宽度, 它的大小直接影响着光谱仪器的杂散光水平。在设计光谱仪器时应对此予以注意。

#### 4 光栅杂散光的测试

本文采用通过截止滤光片滤除光谱仪出缝处某一波长光强的方法来测试以此波长为中心波长的杂散光, 即选用仪器内部消光措施较好的国产 T6 新世纪紫外可见分光光度计, 旋转光栅转座使某一波长的光通过仪器出缝, 再将对应这一波长的截止滤光片置于出缝, 接收器记录的就是此波长处的杂散光强度。为了与实验值进行比较, 通过对杂散光曲线下方的面积进行求和, 可得理论求解杂散光总强度的计算公式:

$$S_T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 [S_j(\lambda_i, \lambda_M) + S_j(\lambda_{i-1}, \lambda_M)] \quad (5)$$

$|\lambda_i - \lambda_{i-1}|$ ,

式中,  $i=1, 2, 3, \dots, n$  为步长数,  $\lambda_i, \lambda_{i-1}$  为相邻两个波长位置,  $j=1, 2, 3, 4$  表示 4 种杂散光,  $S_j(\lambda_i, \lambda_M)$  表示  $\lambda_i$  处中心波长  $\lambda_M$  的第  $j$  种杂散光强度值。

表 1 给出的是 1 200 g/mm 紫外可见平面刻划光栅 4 个不同波长处的杂散光测量值与理论计算值 ( $\sigma_d = 0.8 \text{ nm}$ ,  $\sigma_h = 0.5 \text{ nm}$ ,  $\sigma_\gamma = 1.2 \text{ nm}$ ), 可以看出, 测量结果的重复性较好, 而且理论计算结果与测量结果吻合较好。当仪器内部不做特殊消光处理时, 通常根据经验推断认为光栅杂散光约占仪器杂散光的 70%~80%。由于在实验中对紫外可见分光光度计内部进行了改进, 仪器背景光得到了较好抑制, 因此, 在做数值分析时将理论值和实验值的相对误差设在 15% 左右比较合理, 也可以根据测试仪器情况设定其它值。其实, 对于给定的仪器而言, 其内部背景光程度基本保持不变, 而且出射狭缝的相对宽度也可以不变。这样, 本文给出的杂散光分析方法就有了应用层面上的意义。具体的步骤是: 第一, 计算出给定仪器条件下理想光栅的杂散光强度, 再对某一规格优

质光栅杂散光进行实际测量,理论值和实验值存在一定量值的误差(其中已包括了仪器各种杂散背景的影响),这个误差值就成为了参照标准;第二,将待测光栅置入仪器测量其杂散光强度,超出参照标准的部分就是源于光栅周期随机误差和槽

深随机误差的杂散光,并可依此反演出  $\sigma_d$  和  $\sigma_h$  的大小,为改进光栅制造工艺提供依据;第三,选取优质光栅作为分光元件,根据实验测量和理论计算结果,可以优化设计光谱仪器出射狭缝宽度和成像镜焦距,这也相当于输出带宽的优化设计。

表 1 1 200 g/mm 紫外可见平面刻划光栅的杂散光测量值与理论计算值

Tab.1 Theory and experimental results of stray light from UV ruled grating with 1 200 groove/mm

$$(\sigma_d = 0.8 \text{ nm}, \sigma_h = 0.5 \text{ nm}, \sigma_y = 1.2 \text{ nm})$$

波长	六次测量值						平均测量值	理论值	相对误差
220 nm	0.000 15	0.000 21	0.000 19	0.000 17	0.000 25	0.000 20	0.000 195	0.000 173	12.7%
293 nm	0.000 23	0.000 21	0.000 28	0.000 24	0.000 25	0.000 27	0.000 247	0.000228	8.3%
340 nm	0.000 25	0.000 30	0.000 33	0.000 27	0.000 31	0.000 28	0.000 290	0.000 256	13.3%
635 nm	0.000 45	0.000 51	0.000 48	0.000 50	0.000 47	0.000 52	0.000 488	0.000 433	12.7%

## 5 结 论

杂散光直接影响光栅的信噪比,紫外波段的杂散光对光谱分析尤为不利。本文采用基于标量衍射理论的光栅杂散光数值分析及实验测试方法得到了一些有实用意义的结论:第一,紫外平面刻划光栅周期随机误差以及槽深随机误差是杂散光的主要来源,在工艺上确保光栅槽距、槽深的同一性十分关键;第二,杂散光对光栅表面小尺度随机

粗糙度并不敏感,由此可知光栅表面的小尺度针孔并不是造成光栅杂散光的主要原因;第三,光谱仪器的杂散光不仅与光栅参数和品质有关,而且与光谱仪器出射狭缝的相对宽度有关,亦即与输出带宽有关,在光谱仪器优化设计阶段就应考虑如何抑制杂散光的问题;第四,采用本文给出的方法可以反演光栅周期随机误差  $\sigma_d$  和槽深随机误差  $\sigma_h$  的大小,为有针对性地改进光栅制造工艺提供值得借鉴的理论依据。

## 参考文献:

- [1] HUTLEY M C. *Diffraction Gratings* [M]. London: Academic Press, 1982.
- [2] 沈德洪,曾广杰. 平面衍射光栅的杂散光及其测量 [J]. 计量学报, 1990, 11(1): 7-12.  
SHEN D H, ZENG G J. The stray light measurement of diffraction gratings [J]. *ACTA Metrological Sinica*, 1990, 11(1): 7-12. (in Chinese)
- [3] KUZNETSOV I G, WILKINSON E. Grating efficiencies comparison study: calculation versus metrology for various types of high groove density gratings at VUV-UV wavelengths [J]. *SPIE*, 2004, 5178: 267-277.
- [4] 巴音贺希格,朱洪春. 软 X 射线掠入射金属光栅闪耀特性的校正傅立叶展开投影微分理论分析 [J].

光学 精密工程, 2007, 15(1): 1-8.

- BAYANHESHIG, ZHU H CH. The analysis of the metal grating blaze characteristics under grazing incidence in the soft x-ray region by the projection differential theory with correct Fourier [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 1-8. (in Chinese)
- [5] BECKMANN P, SPIZZICHINO A. *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surface* [M]. Macmillan: Pergamon Press, 1963.
- [6] KODIS R D. A note on the theory of scattering from an irregular rough surface [J]. *IEEE*, 1966, AP-14: 77-82.
- [7] MAYSTRE D. Electromagnetic scattering from perfectly conducting rough surfaces in the resonance region [J]. *IEEE*, 1983, 31(6): 885-895.
- [8] MAYSTRE D. "Integral methods" in electromag-

- netic theory of gratings[J]. *Topics in Current Physics*, 1980,22:885-895.
- [9] RICHARD J W, JOHN A D. Reconstruction of rough-surface profiles with the kirchhoff approximation [J]. *Opt. Soc. Am. A*, 1991, 8(12):1892-1897.
- [10] GUO L X, WANG Y H, WU ZH S. Study on the shadowing effect for optical wave scattering from randomly rough surface[J]. *Chinese Optic Letters*, 2004,2(7):431-439.
- [11] NICHOLLS D P. Shape deformation in rough surface scattering: cancellations, conditioning and convergence[J]. *Opt. Soc. Am. A*, 2004, 21(4): 590-605.
- [12] NICHOLLS D P. Shape deformation in rough-surface scattering: improved algorithms[J]. *Opt. Soc. Am. A*, 2004, 21(4):606-621.
- [13] SHARPE M R, IRISH D. Stray light in diffraction grating monochromators [J]. *Optic Acta*, 1978,25(9):861-893.
- [14] 巴音贺希格,张浩泰,李文昊. 凹球面基底离心式涂胶的数学模型及实验验证[J]. *光学精密工程*, 2008,16(2):229-234.
- BAYANHESHIG, ZHANG H T, LI W H. Mathematic model and experiment verification of spin-coating on concave spherical substrate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(2):229-234. (in Chinese)

#### 作者简介:



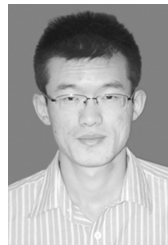
巴音贺希格(1962—),男,内蒙古鄂尔多斯人,理学博士,研究员,博士生导师,主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术研究。E-mail: bayin888@sina.com



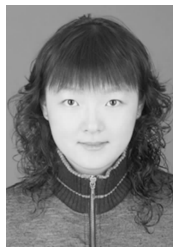
于海利(1984—),男,吉林梅河口人,博士研究生,主要从事衍射光栅测试技术及纳米定位技术研究。E-mail: yuhaili@163.com



李燕(1982—),女,山东济宁人,硕士研究生,主要从事衍射光栅理论及杂散光测试技术研究。E-mail: sabaca20000@163.com



张善文(1980—),男,吉林通化人,博士研究生,主要从事光栅积分理论及光栅刻划工艺研究。E-mail: zhshwen007@sina.com



吴娜(1983—),女,吉林长春人,硕士研究生,主要从事光栅测试技术研究。E-mail: snoopywool18@hotmail.com



齐向东(1965—),男,吉林辽源人,研究员,主要从事光栅刻划机研究及衍射光栅研制。E-mail: chinagrating@263.net