

文章编号 1004-924X(2012)06-1225-08

## 凹面光栅衍射效率测试仪精度分析和优化

寇婕婷<sup>1,2\*</sup>, 吴娜<sup>1,2</sup>, 巴音贺希格<sup>1</sup>, 唐玉国<sup>1</sup>, 齐向东<sup>1</sup>, 于宏柱<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:**分析和优化了凹面光栅衍射效率自动测试仪的测量精度,以提高凹面光栅相对衍射效率测量结果的准确性。根据凹面光栅相对衍射效率测量原理,对凹面光栅出射光谱增宽、衍射光束截面变化、光源辐射亮度的控制和测量波长同步精度等影响测量准确性的因素进行分析,给出了必要的运算关系式。采用回归分析等数学方法,基于大量实验数据建立了测量结果的优化公式,并将该公式编入测量程序,实现了在测量结束的同时自动优化测量结果。实验表明,经过优化后的测量值更加准确,与相对衍射效率理论值的偏差均在 $\pm 2.5\%$ 以内,有效提高了仪器的测量精度。该方法操作简单,无需添加或改动仪器的任何部件,可满足仪器实时性强、测量准确的要求。

**关键词:**凹面光栅;衍射效率;精度分析;结果优化

**中图分类号:**O436.1;TH744.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122006.1225

## Precision analysis and optimization on diffraction efficiency instrument for concave gratings

KOU Jie-ting<sup>1,2\*</sup>, WU Na<sup>1,2</sup>, Bayanheshig<sup>1</sup>, TANG Yu-guo<sup>1</sup>,

QI Xiang-dong<sup>1</sup>, YU Hong-zhu<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 100039, China)

\* Corresponding author, E-mail: koujieting@163.com

**Abstract:** This paper analyzes the measuring results of a diffraction efficiency measuring instrument for concave gratings to improve the measuring accuracy of relative diffractive efficiency. According to the testing theory of diffraction efficiency of concave gratings, the effects of the spectral broadening of exit beam for the concave grating, section changing of diffraction beam, control of light source radiation luminance and the synchronization precision of testing wavelength on the measuring accuracy were analyzed, and several kinds of necessary equations were given. Based on regression analysis and a large number of experiment data, an optimization equation was established and programmed into a testing programming to correct automatically the test results. Experiments indicate that the tested re-

**收稿日期:**2011-12-10;**修订日期:**2012-03-04.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 60478043);“十一五”国家科技支撑计划重大项目(No. 2006BAK03A02);中国科学院重大科研装备研制资助项目(No. YZ200804);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20070523、20086013);吉林省重大科技攻关项目(No. 09ZDGG005);长春市应用技术研究计划资助项目(No. 08YJ07)。

sults are correct and more precise, and the difference between optimization value and theoretical one is less than  $\pm 2.5\%$ , which improves the testing precision effectively. This method is simpler operation, not to change the components of the instrument, and can satisfy the test requirements in strong real-time and higher precision.

**Key words:** concave grating; diffraction efficiency; precision analysis; result optimization

## 1 引言

凹面光栅同时具有色散和成像的功能,可以构成只有一个作用面的光谱仪器,利用全息技术制作的凹面光栅,具有像差校正的能力,同时还有低杂散光、无鬼线和高信噪比等优点,从而极大地推动了光谱仪器的小型化和轻型化<sup>[1-3]</sup>。随着科技的发展和众多前沿学科的交叉和融合,对光谱仪器微型化、集成化等提出了更高的要求,凹面光栅以其独特的优点越来越受到人们的广泛关注,其制造与检测技术水平则成为光谱仪器行业最为关注的课题之一<sup>[4-6]</sup>。衍射效率是凹面光栅最重要的技术指标,它直接决定光谱仪器的能量传输。凹面光栅的衍射效率可分为相对衍射效率和绝对衍射效率,在测量中通常指相对衍射效率,即在给定波长和衍射级次下,探测器接收到的凹面光栅的衍射光通量与一块同孔径的标准凹面反射镜的反射光通量之比。经过几代光栅工作者的不断努力,平面光栅衍射效率测试已经比较成熟,能够给出衍射效率相对于波长的连续曲线,可以反应包括光栅 Rayleigh 异常和共振异常等在内的衍射特性<sup>[7-8]</sup>,而对凹面光栅衍射效率的测试国内还鲜有报道,国外也只能给出分立波长的测试结果<sup>[9-10]</sup>。

2010 年中科院长春光机所研制出了新的凹面光栅衍射效率自动测试仪,其测量精度的研究是仪器研制的重要组成部分。根据凹面光栅相对衍射效率测量原理<sup>[11]</sup>,需要满足 4 个基本条件才能保证仪器测量精度,即出射光谱增宽相等;衍射光束截面变化一致;测试凹面光栅和标准凹面反射镜时,光源的辐射亮度不变;被测凹面光栅和标准凹面反射镜相对入射波长的同步精度保持一致。鉴于此,本文详细分析了测试仪的各项基本条件。由于保证光源辐射亮度和波长同步精度的同时,光栅色散导致的出射光谱增宽和衍射光束

截面变化必然导致系统误差,造成测量结果的不准确。因此,本文采用回归算法对测量结果进行优化,以出射光谱增宽和衍射光束截面的变化为变量,在大量测量数据的基础上,建立了测量结果的回归优化公式,并将此公式编入测量程序,实现了在测量结束的同时自动优化测量结果。提出的方法不需对仪器部件做出任何改动,使测量结果更加真实可靠。

## 2 测量原理与仪器结构

### 2.1 凹面光栅相对衍射效率测量原理

根据凹面光栅相对衍射效率的定义,探测器接收到的凹面光栅衍射光通量和标准凹面反射镜反射光通量之比可以表示为<sup>[12-14]</sup>:

$$\eta(\lambda) = \frac{k_g(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_2'(\lambda) \eta'(\lambda) B(\lambda) \Omega_g a h \Delta\lambda_g}{k_r(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_2'(\lambda) r(\lambda) B(\lambda) \Omega_r a h \Delta\lambda_r} \quad (1)$$

其中,  $\eta(\lambda)$  代表凹面光栅相对衍射效率;  $\tau_1(\lambda)$  为前置单色仪的透过系数;  $\tau_2'(\lambda)$  为测量单色仪不计被测光栅的总透过系数;  $\eta'(\lambda)$  为被测凹面光栅的绝对衍射效率;  $B(\lambda)$  为光源的辐射亮度;  $\Omega_g$  为衍射光束立体角;  $a$  和  $h$  分别为狭缝的宽度和高度;  $\Delta\lambda_g$  为凹面光栅的出射光谱宽度;  $r(\lambda)$  为反射镜的反射率;  $\Omega_r$  为反射光束立体角;  $\Delta\lambda_r$  为反射镜的出射光谱宽度;  $k_g(\lambda)$  和  $k_r(\lambda)$  为同步精度因子。

为使凹面光栅相对衍射效率测量值  $\eta(\lambda)$  等于真正的  $\eta'(\lambda)/r(\lambda)$ , 由式(1)知,测试装置的原理性方案应满足以下条件:

- (1)  $\Delta\lambda_g = \Delta\lambda_r$ , 即出射光谱增宽相等。
- (2)  $\Omega_g = \Omega_r$ , 即衍射光束截面变化一致。
- (3) 测量光栅和反射镜时,  $B(\lambda)$  相同, 即光源的辐射亮度不变。
- (4) 测量光栅和反射镜时, 保证  $k_g(\lambda) = k_r(\lambda) = C$ ,  $C$  代表常数, 即波长同步精度保持一致。

### 2.2 仪器结构及参数

仪器结构如图 1 所示, 主要由光源、前置单色

仪、测量单色仪和探测系统组成,前置单色仪通过光纤将测量所需的单色光输入测量单色仪中。测量单色仪由光栅转台、入射光臂、出射光臂和探测器组成,光栅转台可以自动调整被测凹面光栅或标准凹面反射镜对应入射波长的位置;入射光臂固定,光纤输出端可在其上来回移动;出射光臂可绕光栅中心旋转,探测器安装在出射光臂上,可以沿着光臂移动,以适应不同规格凹面光栅衍射效率的测量。

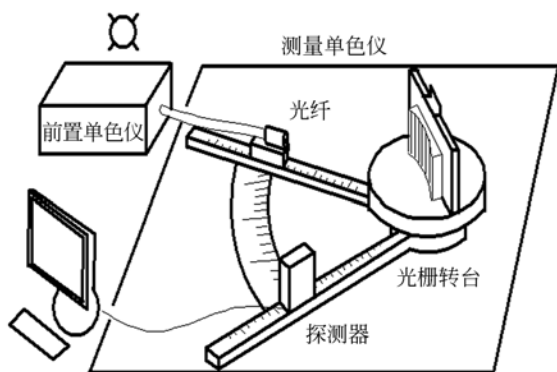


图1 仪器结构示意图

Fig. 1 Schematic of the instrument

仪器的主要结构参数如下:

光纤芯直径为 0.44 mm,被测凹面光栅面积为 15 mm×15 mm~110 mm×110 mm,被测凹面光栅曲率半径为 130~640 mm,前置单色仪的分光光栅为 1200 l/mm,反射镜焦距为 100 mm,出入臂夹角为 45°,光谱带宽为 6 nm。

### 3 测量精度分析

测量时,由于被测凹面光栅对入射光有色散作用,使得出射光束光谱宽度发生变化;同时,仪器自动调整被测凹面光栅对应入射波长的位置时,衍射光束截面也随之变化;由于反射镜不具有色散功能,不存在上述问题。因此,需要对上述条件进行详细分析。

#### 3.1 出射光谱增宽分析

结合仪器的结构参数,在测量单色仪中,根据光栅方程得出波长  $\lambda$  与光栅转角  $\delta$  的对应关系式:

$$\lambda = \frac{2d}{m} \cos \frac{A}{2} \sin \delta, \quad (2)$$

式中, $d$  是被测光栅常数; $m$  是光谱级次,取+1级; $A$  代表入臂和出臂的夹角; $\delta = \theta - \frac{A}{2}$ ,  $\theta$  为被测凹面光栅的衍射角。

由线色散的定义和前置单色仪的光谱带宽  $\Delta\lambda$  可以得出,在测量单色仪中凹面光栅色散形成的光谱宽度  $\Delta\tau_w$  为:

$$\Delta\tau_w = L_B \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \lambda} \cdot \Delta\lambda = \frac{L_B \cdot \Delta\lambda}{\sqrt{\left[2d \cos \frac{A}{2}\right]^2 - \lambda^2}}, \quad (3)$$

式中, $L_B$  是被测凹面光栅的出臂长度, $\lambda$  为入射波长。

#### 3.2 衍射光束截面变化分析

设衍射光束截面变化因子为  $k(\delta)$ ,令  $k(\delta) = \Delta S_g / \Delta S_r$ ,其中  $\Delta S_g$  代表被测凹面光栅的衍射光束截面积, $\Delta S_r$  代表标准凹面反射镜反射光束截面积。根据仪器结构,并且分析测量过程可得:

$$k(\delta) = \frac{\Delta S_g}{\Delta S_r} = \frac{\cos(A - \delta)}{\cos \frac{A}{2}}. \quad (4)$$

联合式(2),可得衍射光束截面变化因子  $k(\delta)$  随入射波长  $\lambda$ 、被测凹面光栅常数  $d$  变化的关系式:

$$k(\delta) = \frac{\cos \left[ \frac{A}{2} - \arcsin \left( \frac{\lambda}{2d \cos \frac{A}{2}} \right) \right]}{\cos \frac{A}{2}}. \quad (5)$$

#### 3.3 光源辐射亮度控制

根据连续测量光谱范围的要求,选择氙灯和钨灯作为测量光源,可以相互切换。为保证测量光源辐射亮度的稳定性,氙灯选择日本 Hamamatsu 生产的高稳定性水冷氙灯 L6312,窗口材料为紫外玻璃,工作波段为 185~400 nm;钨灯工作光谱为 400~800 nm,选用德国 OSRAM 64233 6V10W 钨灯光源;配用电源选用美国安捷伦 N5745 可编程线性直流稳压稳流电源,开机预热 30 min 后,稳定性可优于  $\pm 0.02\% \text{ h}^{-1}$ ,满足测量要求。影响光源辐射亮度稳定性的因素除了光源电压或电流的波动外,还有环境温度、电路元件的老化及外界杂光等。因此,将仪器放置于恒温室  $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$  中,可以避免环境温度变化带来的影响;同时,仪器采用一体封闭的外壳,内壁均匀涂黑漆,可以有效抑制外界杂光;确保在测量过程中光源辐射亮度控制在规定指标内。

### 3.4 波长同步精度分析

波长同步精度指在进行连续测量时,测量单色仪中被测凹面光栅或标准凹面反射镜相对前置单色仪输出波长的同步扫描精度。测量时,首先由前置单色仪输出测量波长,测量单色仪根据输出波长调整转台到相应位置,记录测量数据,然后换下一波长,重新调整光栅转台,记录数据,重复上述步骤直到测量完成。这一测量过程避免了两单色仪相对同一波长扫描时的同步控制,仪器的波长同步精度只由前置单色仪决定,与测量单色仪无关,即测量光栅或反射镜时  $k_g(\lambda) = k_r(\lambda)$ 。而转台的波长扫描精度由涡轮蜗杆控制,其转动比为 180,步进电机的步进角度为  $1.8^\circ$ ,转台转动  $1^\circ$  对应的步进脉冲为 100,步进电机驱动电路采用 64 倍电细分,转台转过  $1^\circ$  对应的细分脉冲为 6 400,结合式 (2) 和被测凹面光栅参数,可以算出最小分辨波长均小于 0.01 nm,满足扫描精度的要求。

## 4 结果优化

在稳定光源辐射亮度和保证波长同步精度的同时,光栅色散导致的出射光谱增宽和衍射光束截面变化必然引入系统误差,因此,需要对此系统误差进行修正。

### 4.1 优化算法

回归分析是讨论多个变量之间与实验结果的数学表示。方法是从一组变量出发,确定这些变量之间的数学表达式——回归方程或经验公式<sup>[15-16]</sup>。

通过实验获得  $n$  组数据:  $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}; y_i)$   $i = 1, 2, \dots, n$ , 根据分析可以得到如下的结构形式:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_m \end{bmatrix}. \quad (6)$$

设  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_m$  分别是系数  $\beta$  的最小二乘估计,则回归方程可以写为:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \cdots + \hat{\beta}_m x_m. \quad (7)$$

根据最小二乘法,

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_{i1} - \cdots - \hat{\beta}_m x_{im})^2 = \min$$

方程组对应的矩阵解为:  $\hat{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}$ , 其中

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}, \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}. \quad (8)$$

### 4.2 测量数据的汇总与处理

分别以 III 型(通常称为平像场凹面光栅)、IV 型凹面光栅为被测光栅,使用本效率仪测得其相对衍射效率值  $\eta(\lambda)$ , 当被测凹面光栅一定时,  $k(\delta)$  和  $\Delta\omega$  均随入射波长变化,  $M$  是对应波长的相对衍射效率理论值, 对应数据如表 1、表 2 所示。

IV 型 40 mm × 45 mm, 1200 l/mm, 入臂 200 mm, 出臂 188 mm, 入出臂夹角  $61.6^\circ$  的凹面光栅在 200~400 nm 测量波长内的测量数据如表 1 所示。

III 型 30 mm × 30 mm, 490 l/mm, 入臂 77.36 mm, 入射角  $6.65^\circ$  的凹面光栅在 200~400 nm 测量波长内的测量数据如表 2 所示。

从表 1、表 2 的数据可以看出, 由于光谱增宽  $\Delta\omega$  和衍射光束截面变化  $k(\delta)$  的影响, 凹面光栅相对衍射效率测量值比对应的理论值偏低。其原因是仪器结构参数固定, 在测量光栅时, 出射光谱增宽和衍射光束截面变化造成衍射光通量未能全部进入探测器, 部分损失; 而测量反射镜时, 不存在光谱增宽和衍射光束截面变化的影响, 反射光通量没有损失。因此引入系统误差。

表 1 IV 型凹面光栅数据列表

Tab. 1 List of data of concave grating for type IV

$\lambda/\text{nm}$	$\eta(\lambda)$	$k(\delta)$	$\Delta\omega/\text{mm}$	$M$	$\lambda/\text{nm}$	$\eta(\lambda)$	$k(\delta)$	$\Delta\omega/\text{mm}$	$M$
200	0.405 4	1.073 4	1.060 9	0.461 1	320	0.385 9	1.107 9	1.077 8	0.430 1
220	0.389 2	1.079 7	1.063 2	0.441 2	340	0.449 1	1.112 9	1.081 5	0.470 2
240	0.426 9	1.085 7	1.065 6	0.481 1	360	0.245 7	1.117 7	1.085 4	0.450 1
260	0.470 6	1.091 6	1.068 3	0.521 1	380	0.243	1.122 3	1.089 6	0.447 1
280	0.497 2	1.097 2	1.071 2	0.531	400	0.383 3	1.126 7	1.094 1	0.430 7
300	0.454 8	1.102 7	1.074 4	0.486 6					

表 2 III 型凹面光栅数据列表

Tab.2 List of data of concave grating for type III

$\lambda/\text{nm}$	$\eta(\lambda)$	$k(\delta)$	$\Delta w/\text{mm}$	$M$	$\lambda/\text{nm}$	$\eta(\lambda)$	$k(\delta)$	$\Delta w/\text{mm}$	$M$
200	0.240 5	1.016 5	0.161 8	0.324 4	320	0.313 3	1.025 1	0.162 1	0.336 6
220	0.290 4	1.018	0.161 8	0.350 2	340	0.309 9	1.026 4	0.162 2	0.318
240	0.336 6	1.019 5	0.161 9	0.387 8	360	0.28	1.027 7	0.162 3	0.271 7
260	0.313 5	1.020 9	0.161 9	0.367 9	380	0.258	1.029	0.162 3	0.268 5
280	0.314	1.022 3	0.162	0.361 1	400	0.228 3	1.030 3	0.162 4	0.239 5
300	0.323 7	1.023 7	0.162 1	0.370 2					

4.3 测量结果优化

回归算法的实施步骤如图 2 所示,在稳定光源辐射亮度和保证波长同步精度的同时,以出射光谱增宽和衍射光束截面变化为变量,结合表 1、表 2 的实验数据,依据回归分析的数学思想,建立

如下的回归优化方程式:

$$\hat{M} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \eta(\lambda) \times \frac{1}{k(\delta)} + \hat{\beta}_2 \frac{\Delta w}{45} \times 100\% \quad (9)$$

$$\hat{M} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \eta(\lambda) \times \frac{1}{k(\delta)} + \hat{\beta}_2 \frac{\Delta w}{30} \times 100\% \quad (10)$$

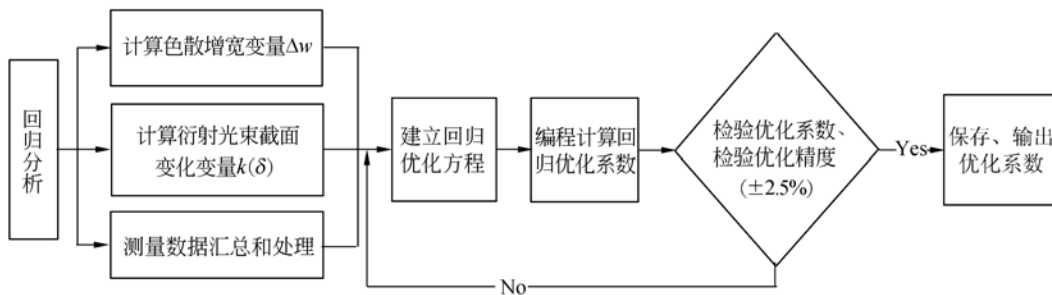


图 2 回归分析的流程图

Fig.4 Flowchart of regression analysis

根据式(8)、(9)解得 IV 型凹面光栅的优化系

数为  $\hat{\beta}_{IV} = \begin{bmatrix} 1.140 3 \\ 0.884 5 \\ -42.587 \end{bmatrix}$ ;同理,解得 III 型凹面光栅

的优化系数为  $\hat{\beta}_{III} = \begin{bmatrix} 33.901 \\ 0.602 6 \\ -623.04 \end{bmatrix}$ 。最后,将式

(3)、(5)、(8)、(9)、(10)同时编入凹面光栅衍射效率测试仪测量程序中,可以在测量结束的同时,自动修正色散增宽和衍射光束截面变化的影响。

5 结果对比

分别选用 III 型、IV 型两款凹面光栅为被测光栅,使用本效率仪在不同波段范围内分别测得

两款光栅的相对衍射效率值  $\eta(\lambda)$ ;分别记录该两款凹面光栅刻线密度、入射波长等参数,生成对应的  $k(\delta)$ 与  $\Delta w$ 值,根据优化系数  $\hat{\beta}$ 直接获得优化值  $M_0$ ;利用原子力显微镜测得该两款凹面光栅的槽型轮廓剖面图,从中截取一个周期单元,用自动扫描识别软件对其横纵坐标进行扫描取值,进而拟合出实际槽型函数;用编程的方法将拟合函数嵌入到计算凹面光栅衍射效率的主程序里<sup>[8,17]</sup>,得出该两款凹面光栅的衍射效率理论值,除以标准凹面反射镜的反射率,即可获得该两款凹面光栅相对衍射效率的理论值  $M$ 。将两款凹面光栅的衍射效率测量值、优化值和理论值三者进行比较,结果如图 3、图 4 所示。

从图 3、图 4 的对比结果可以发现,经过优化

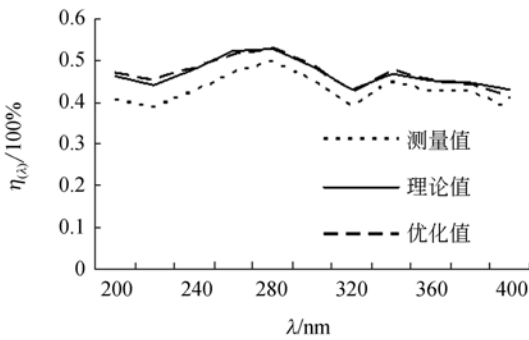


图 3 IV 型凹面光栅测试数据结果对比

Fig. 3 Contrast of testing results for type IV

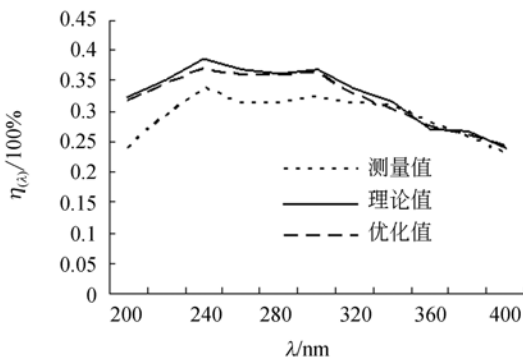


图 4 III 型凹面光栅测试数据结果对比

Fig. 3 Contrast of testing results for type III

## 参考文献:

- [1] 孔鹏, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 双光栅平场全息凹面光栅光谱仪的优化设计[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0205001  
KONG P, BAYANHESHIG, LI W H, *et al.*. Optimization of double-grating flat-field holographic concave grating spectrographs [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0205001. (in Chinese)
- [2] 卢启鹏, 马磊, 彭忠琦. 变包含角平面光栅单色器扫描转角精度的检测[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1548-1553.  
LU Q P, MA L, PENG ZH Q. Rotation angle-accuracy measurement of scanning mechanism in variable included angle plane grating monochromator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1548-1553. (in Chinese)
- [3] 王玲芳, 温志渝, 向贤毅. 近红外微型光谱仪光学系统设计与模拟[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29

后的测量值更加准确, 未经优化的测量值虽然总体上可以反映效率曲线, 但数值上存在偏差。对于 IV 型凹面光栅, 在波长为 200 nm 处实测值偏差最大可达 -5.57%; 对于 III 型凹面光栅, 在波长 200~300 nm 之间效率曲线偏差比较明显, 最大可达 -8.39%; 而经过优化的测量值与理论值偏差较小, 差值均在 ±2.5% 以内, 满足仪器测量精度的要求。

## 6 结 论

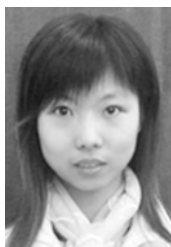
衍射效率是凹面光栅最重要的技术指标, 能否准确测量凹面光栅的衍射效率在一定程度上制约着凹面光栅的发展。本文依据凹面光栅衍射效率测量原理, 对影响仪器测量精度的 4 个基本条件进行了分析, 在保证光源辐射亮度和波长同步精度的基础上, 对测量结果进行优化, 使得仪器测量精度有效提高, 实现了凹面光栅衍射效率的准确测量。而且, 优化公式可以编入测量程序, 在测量结束后对测量结果进行自动修正, 不必对仪器部件做出任何改动, 使仪器操作简单、实时性强。另外, 对影响测量结果的 4 个主要因素进行了分析, 用来指导人工操作, 避免引入额外的测量误差。

(6): 1721-1725.

- WANG L F, WEN Z Y, XIANG X Y. Design and simulation of the NIR micro-spectrometer optical system [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(6): 1721-1725. (in Chinese)
- [4] 唐玉国, 陈少杰, 巴音贺希格, 等. 中阶梯光栅光谱仪谱图还原与波长标定[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2130-2136.  
TANG Y G, CHEN SH J, BAYANHESHIG, *et al.*. Spectral reducing of cross-dispersed echelle spectrograph and its wavelength calibration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2130-2136. (in Chinese)
- [5] 皮道锐, 黄元中, 张大伟, 等. 宽光谱平像场全息凹面光栅的优化研究[J]. 物理学报, 2010, 59(2): 1009-1016.  
PI D R, HUANG Y SH, ZHANG D W, *et al.*. Optimization of the flat-field holographic concave grating in wide spectral range [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(2): 1009-1016. (in Chinese)

- [6] 寇婕婷,巴音贺希格,唐玉国,等. 平面光栅效率仪测量过程分析与结果修正[J]. 光学学报,2011,已录用.  
KOU J T, BAYANHESHIG, TANG Y G, *et al.*. Analysis of testing process and result revising on the instrument for plane grating diffraction efficiency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, paper adopted. (in Chinese)
- [7] 张善文,巴音贺希格. 宽波段金属光栅设计中闪耀波长对光栅异常的补偿效应[J]. 光学精密工程, 2009,17(5):990-1000.  
ZHANG SH W, BAYANHESHIG. Compensating effect of blazed wavelength to grating anomalies in design of broadband metallic diffraction gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(5):990-1000. (in Chinese)
- [8] 巴音贺希格,朱洪春. 基于槽型函数拟合的刻划光栅衍射特性分析方法[J]. 物理学报,2007,56(7):3893-3899.  
BAYANHESHIG, ZHU H CH. Analytical method of the diffraction characteristic of ruled grating based on profile fitting function [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007,56(7):3893-3899. (in Chinese)
- [9] ZIMMER F, HEBERER A, SANDNER TH, *et al.*. Investigation and characterization of high-efficient NIR-scanning gratings used in NIR-micro-spectrometer [J]. *SPIE*, 2007, 6466: 646605.
- [10] NAOYUKI TAMURA, GRAHAM J. MURRAY, RAY M. SHARPLES, *et al.*. Measurement of throughput variation across a large format volume-phase holographic grating [J]. *Optics Express*, 2008,13(11):4125-4133.
- [11] 巴音贺希格. 衍射光栅色散理论与光栅设计、制作和检验方法研究[D]. 北京:中国科学院, 2004.  
BAYANHESHIG. *The Study On the Dispersion Theory, Design, Manufacture, and Efficiency Test of Diffraction Gratings*[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [12] 吴国安. 光谱仪器设计[M]. 北京:科学出版社, 1978.  
WU G A. *Design of Optical Spectrometer*[M]. Beijing, Science Press, 1978. (in Chinese)
- [13] 李全臣,蒋月娟. 光谱仪器原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,1999.  
LI Q CH, JIANG Y J. *The Theory of Spectrometer*[M]. Beijing, Beijing Institute of Technology Press, 1999. (in Chinese)
- [14] 王生怀,陈育荣,王淑珍,等. 三维精密位移系统的设计[J]. 光学精密工程,2010,18(1):175-182.  
WANG SH H, CHEN Y R, WANG SH ZH. Design of 3D precision displacement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):175-182. (in Chinese)
- [15] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社,1999.  
FEI Y T. *Error Theory and Data Processing* [M]. Beijing: China Machine Press, 1999. (in Chinese)
- [16] 凌树森. 实验数据的统计处理和误差分析—回归分析[J]. 理化检验物理分册,2001,37(6):271-276.  
LING S S. The statistical treatment and error analysis of experiment data—regression analysis[J]. *Physical Testing*, 2001,37(6):271-276. (in Chinese)
- [17] 朱洪春,巴音贺希格. 紫外刻划光栅母版及二代版衍射特性的模拟和分析[J]. 光学学报,2007,27(7):1151-1155.  
ZHU H CH, BAYANHESHIG. Analysis and simulation of diffraction characteristics of the ultraviolet ruled grating master and the second duplicate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007,27(7):1151-1155. (in Chinese)

## 作者简介:



寇婕婷(1983—),女,黑龙江齐齐哈尔人,博士,主要从事光谱仪器研发及光栅检验方面的研究。E-mail: koujieting@163.com



吴娜(1983—),女,吉林长春人,博士,主要从事光栅测试方面的研究。E-mail: snoopywool18@hotmail.com



巴音贺希格(1962—),男,内蒙古鄂尔多斯人,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



于宏柱(1976—),男,吉林长春人,助理研究员,主要从事电子学设计方面的研究。E-mail: yhz\_jl@sina.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

导师简介:



唐玉国(1967—),男,吉林蛟河人,理学博士,研究员,博士生导师,主要从事光谱仪器及医用光谱技术研究。E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

(本栏目编辑:曹 金)

## ● 下期预告

# 毛细管成像法精确测量微量液体的折射率

李 强,孙丽存,韩广辉,李 宇,普小云

(云南大学 物理科学技术学院 物理系,云南 昆明 650091)

介绍了一种用玻璃毛细管成像法精确测量微量液体折射率的新方法及测量装置。这种方法以充入透明液体的毛细管构成柱透镜,基于共轴球面光学系统的成像原理,对光学成像系统的放大率进行单一参数的测量,进而计算出待测液体的折射率。用此方法测量了纯水、乙醇、乙二醇、丙三醇的折射率,各种待测样品的需要量小于 0.002 ml,本试验装置的测量准确度与目前商用阿贝折射仪( $\pm 0.0002$ )相当。同时还测量了不同浓度的乙二醇水溶液的折射率,并对测量的数据点进行了曲线拟合,与阿贝折射仪测量结果和理论公式计算结果所拟合曲线吻合完好。该方法具有待测液体用量极少、操作方便和折射率测量精度高的特点。此方法在微量液体折射率的精确测量和快速测量方面具有较好地应用前景。