

中阶梯光栅衍射效率及杂散光检测系统设计

沈春洋^{1,2}, 崔继承^{1*}, 孙 慈¹, 王 玮^{1,2}, 陈建军^{1,2}, 李晓天¹

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. 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 中阶梯光栅具有刻线密度低、闪耀角度大、衍射级次高、光谱范围宽、色散率大、光谱分辨率高等一系列突出优点,近年来由于其优良的性能而倍受青睐。作为评价中阶梯光栅质量的衍射效率和杂散光系数直接体现了中阶梯光栅的光学性能,能够准确地进行中阶梯光栅衍射效率和杂散光系数的测量是光栅应用的前提。鉴于此,基于中阶梯光栅的衍射理论创造性地提出用一套系统对中阶梯光栅的衍射效率和杂散光系数进行检测,该系统引入双轨结构,具有结构简单新颖、一机多能等优点。通过理论分析和计算,确定了检测系统的结构参数,设计结果表明:该检测系统可用于测量 190~1 100 nm 光谱范围内的中阶梯光栅绝对衍射效率,同时也可用于测量 200~800 nm 光谱范围内的中阶梯光栅杂散光系数,实现了将衍射效率测量和杂散光测量集于一体的设计思想。

关键词 中阶梯光栅; 衍射效率; 杂散光; 光学设计

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2017)08-2603-07

引 言

光谱仪器是光谱分析的基本测试设备,它在各领域中的应用极为普遍。衍射光栅作为光谱仪器中最常用的分光元件,光栅的性能参数直接影响和制约着光谱仪器的性能质量。1949年,为了研究塞曼效应和同位素的超精细光谱结构以及精确测量复杂原子和分子的光谱波长, Harrison 提出了中阶梯光栅的概念,这种光栅由于其自身的光学特性和结构特点,具有很高的分辨率和色散率。使用中阶梯光栅作为主要分光元件的光谱仪器称为中阶梯光栅光谱仪,这类光谱仪具有体积小、重量轻、结构简单、分辨率高、宽波段、全波闪耀和瞬态光谱直读等诸多优点,有利于实现仪器的智能化和自动化。其中,中阶梯光栅的衍射效率和杂散光水平直接影响中阶梯光栅光谱仪的性能,也制约着中阶梯光栅光谱仪的发展,因此检测中阶梯光栅的衍射效率和杂散光水平是十分必要的^[1-3]。

在光栅衍射效率检测方面,国内外用于光栅衍射效率检测的设备基本都采用双单色仪结构,美国 Newport 公司、法国 Jobin-Yvon 公司和日本 Hitachi 公司等研制的全自动平面光栅衍射效率测试仪现已投入使用,可给出光栅衍射效率的

连续曲线,涵盖了被测光栅衍射效率的全部信息。国内从 20 世纪 80 年代开始研制光栅衍射效率测试仪,80 年代末浙江大学研制出一套可工作在 400~2 500 nm 波段范围内的连续扫描平面光栅衍射效率测试仪;90 年代苏州大学采用改进方案,在测量单色仪中采用二次衍射的方式,但改进后整个测量系统略显复杂^[4];目前,长春光机所总结以上设计经验,采用光、机、电、算相结合的方法已成功研制出平面光栅衍射效率测试仪和凹面光栅衍射效率测试仪;但对于中阶梯光栅衍射效率的检测目前国内尚处于空白阶段。

在光栅杂散光检测方面,国外对光栅杂散光的测量多是在背景杂光低的光谱仪系统中进行,美国 NIST, Newport, NASA 和大气研究中心都已研制出用于检测平面光栅杂散光的仪器,测量光栅杂散光水平均能达到 10^{-7} 量级以下^[5];国内目前没有专门用于检测光栅杂散光水平的仪器,1990 年浙江大学曾提出采用光学衰减法测量光栅杂散光,但后期未见更多应用方面的报道;长春光机所提出采用滤光片截止法测量光栅杂散光,但该装置测量光栅杂散光水平仅达到 10^{-4} 量级,很难反映高品质光栅杂散光分布的情况。

对于中阶梯这种衍射级次高度重叠的光栅,未见对其衍射效率和杂散光系数检测仪器的报道。鉴于此,本文基于检测一体化的思想,设计了一套用于中阶梯光栅衍射效率和杂

收稿日期: 2016-05-04, 修订日期: 2016-09-23

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项项目(2014YQ12035102)资助

作者简介: 沈春洋,女,1991年生,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所硕士研究生

e-mail: shency1991@163.com

* 通讯联系人 e-mail: jicheng_cui@163.com

散光系数检测的系统,利用双轨结构将中阶梯光栅衍射效率检测设备和杂散光系数检测设备结构优化融合,不仅提高检测效率,而且降低检测成本,具有结构新颖、通用性强的特点,为中阶梯光栅性能检测提供保障和依据。

1 基础理论

1.1 中阶梯光栅的原理

中阶梯光栅是一种特殊类型的衍射光栅,刻槽剖面形状是宽而深的直角,其刻线密度很小(一般小于 $100 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$),与普通衍射光栅相比,中阶梯光栅工作在高衍射级次(一般几十级到几百级)和大衍射角($50^\circ \sim 70^\circ$),因其特性介于阶梯光栅和小阶梯光栅之间而得名。如图 1 所示,在 Y-Z 平面内从中阶梯光栅的法线 N 量起, θ_B 为光栅法线 N 与刻划面法线 Z 的夹角,称为阶梯光栅闪耀角, α 为入射角, β 为衍射角, d 为光栅周期。

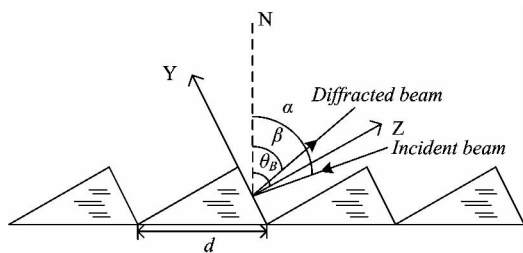


图 1 中阶梯光栅结构示意图

Fig 1 Structure diagram of the echelle

根据光栅方程

$$m\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta) \quad (1)$$

在准 Littrow 条件下($\alpha = \beta = \theta_B$), 光栅方程化为

$$m\lambda = 2d\sin\theta_B \quad (2)$$

对光栅方程微分得出光栅的角色散率表达式

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{2d\cos\theta_B} \quad (3)$$

光栅线色散率表达式

$$\frac{dl}{d\lambda} = f \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{mf}{2d\cos\theta_B} \quad (4)$$

光栅分辨率表达式

$$R = mN = \frac{2W\sin\theta_B}{\lambda} \quad (5)$$

其中, N 为光栅刻线总数, W 为光栅有效刻线宽度, f 为系统焦距。因为中阶梯光栅具有较大的衍射角, 由式(3)—式(5)可见其具有高角色散率、高线色散率和高分辨率的特性^[6]。

1.2 中阶梯光栅衍射效率

衍射效率是光栅最重要的技术指标之一, 在给定的光谱区域内, 光栅的衍射效率取决于光栅表面材料的反射特性和光栅的刻槽形状^[7]。光栅衍射效率可分为相对衍射效率和绝对衍射效率, 相对衍射效率即在给定波长和衍射级次下, 探测器接收到的光栅的衍射光通量与一块同孔径的标准反射镜的反射光通量之比, 可表示为

$$\eta_{\text{相对}} = \frac{E_{\text{光栅}}(\lambda, m)}{E_{\text{反射镜}}(\lambda)} \quad (6)$$

其中, $\eta_{\text{相对}}$ 为光栅的相对衍射效率, $E_{\text{光栅}}(\lambda, m)$ 为入射光波长 λ 的 m 级衍射光通量, $E_{\text{反射镜}}(\lambda)$ 为标准反射镜在入射光波长 λ 时的反射光通量。

绝对衍射效率即在给定波长和衍射级次下, 探测器接收到的光栅的衍射光通量与光栅的入射光通量之比, 可表示为

$$\eta_{\text{绝对}} = \frac{E_{\text{光栅}}(\lambda, m)}{E_0} \quad (7)$$

其中, $\eta_{\text{绝对}}$ 为光栅的绝对衍射效率, E_0 为入射光波长 λ 时的入射光通量。光栅相对衍射效率是衡量刻槽剖面形状衍射效能的一种量值, 因为光栅材料的反射率总是小于 1, 因而绝对衍射效率永远低于相对衍射效率。结合式(6), 式(7)可以改写为

$$\eta_{\text{绝对}} = \frac{E_{\text{光栅}}(\lambda, m)}{E_{\text{反射镜}}(\lambda)} \frac{E_{\text{反射镜}}(\lambda)}{E_0} = \eta_{\text{相对}} R(\lambda) \quad (8)$$

其中, $R(\lambda)$ 代表标准反射镜的反射率。绝对衍射效率能够帮助计算仪器的光输出能力, 对于仪器的性能评估具有指导性意义。在本检测系统中, 我们采用测量中阶梯光栅绝对衍射效率的方案。

1.3 中阶梯光栅杂散光

光栅杂散光一般指由光栅缺陷引起的主谱线之外的光, 它会降低光栅的衍射效率和光谱分辨率, 从而影响仪器的整体性能。光栅杂散光主要由光栅槽面的微观粗糙致使光学元件表面散射产生。对于中阶梯光栅而言, 表面粗糙主要来自于金刚石刻刀和刻划过程, 在整个刻划过程中, 由于金刚石刻刀刀尖角偏离、机械振动、基坯表面镀膜不均匀、刻划机本身的误差等原因引起光栅表面粗糙, 这些微观缺陷都会造成中阶梯光栅的杂散光背景^[8-10]。

2 检测系统设计

本系统用于检测中阶梯光栅的衍射效率及杂散光, 系统

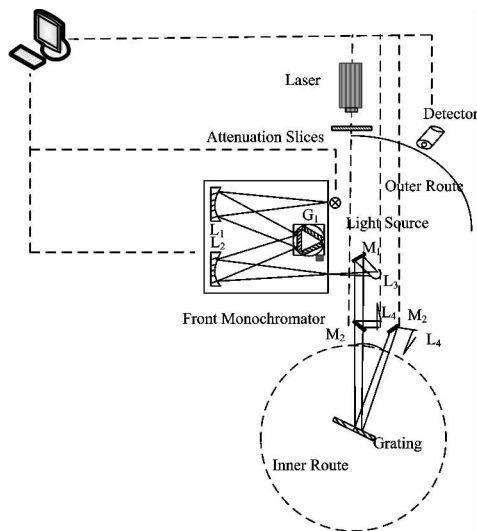


图 2 中阶梯光栅衍射效率及杂散光检测系统示意图

Fig 2 Schematic of detection system for echelle diffraction efficiency and stray light

架构采用双轨道模式,示意图如图2,内轨道用于中阶梯光栅衍射效率检测,外轨道用于中阶梯光栅杂散光水平检测,两条轨道共用一套检测光路,将衍射效率检测系统和杂散光检测系统架构优化整合,具有操作简单、切换方便等特点,实现一机多能,降低检测成本,节约检测时间,提高检测效率。

2.1 中阶梯光栅衍射效率检测系统设计

中阶梯光栅衍射效率检测系统总体光学设计如图3所示,由光源发出的复色光经前置单色仪色散分解为单色光进入准直系统。准直系统由凹面镜 L_3 和平面镜 M_1 组成,将前置单色仪的出射光经过聚焦、准直后变为一束平行光入射到中阶梯光栅上。后端接收系统由凹面镜 L_4 和两个平面镜 M_2 和 M_3 组成,将衍射光折转、聚焦到探测器的靶面上,最终由探测器接收。

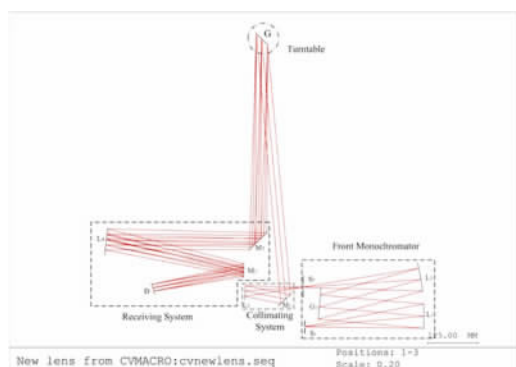


图3 总体光学系统设计

Fig 3 Design of general optical system

前置单色仪采用对称式C-T结构,该结构可避免二次衍射和多次衍射,像差小,结构装调方便,设计光路如图4所示。光栅 G_1 由刻线数分别为1800、1200和600 $\text{g} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的三块光栅相背构成三角形,使用时由光源发出的复色光通过入射狭缝 S_1 投射到准直物镜上 L_1 ,形成平行光束投射到光栅 G_1 上,经衍射后的光通过聚焦镜 L_2 成像在出射狭缝 S_2 处。通过切换和转动光栅,可以在出射狭缝处得到按波长顺

序排列的光谱。

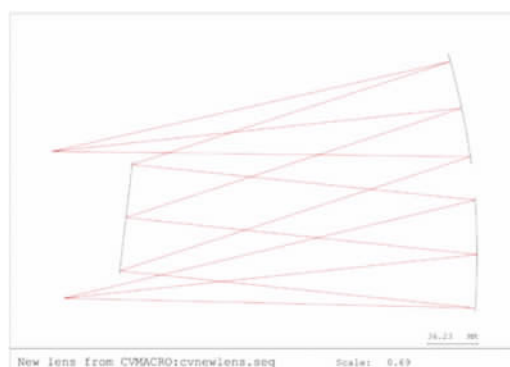


图4 前置单色仪光学设计图

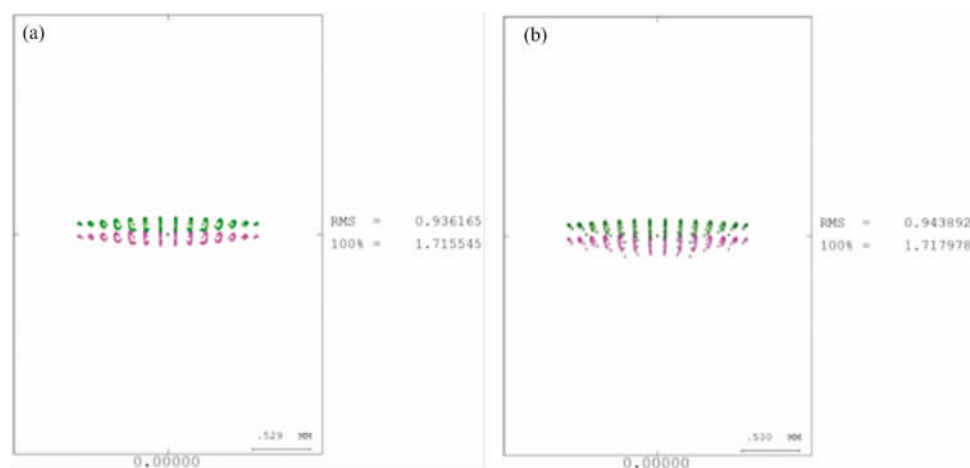
Fig 4 Optical design of the front monochromator

该单色仪在190~1100 nm波长范围内光谱分辨率优于0.2 nm,在不同波长处点列图分布如下,图5(a)和(b)为使用刻线数1800 $\text{g} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的光栅在190, 190.2, 400和400.2 nm处点列图,图5(c)和(d)为使用刻线数600 $\text{g} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的光栅在600, 600.2, 1100和1100.2 nm处点列图。

由以上点列图可见该前置单色仪在190~1100 nm光谱范围内分辨率优于0.2 nm,可以满足中阶梯光栅衍射效率检测光谱分辨率0.2 nm的分光条件,可为后端检测系统提供稳定可靠的单色光源。

根据中阶梯光栅衍射级次高,闪耀角度大的特点,在检测中阶梯光栅各级次衍射效率时将相邻级次的衍射光有效分离是非常关键的,这将直接影响检测系统的分辨率和检测结果的准确性。

以刻线数54 $\text{g} \cdot \text{mm}^{-1}$ 、闪耀角度 46° 的中阶梯光栅为例,在检测光谱范围内当入射光波长为190.3 nm时,根据式(1)可计算出相应的衍射级次为140级,用光学设计软件模拟该光路如图6所示,可清楚地看出该光学系统可将139级、140级、141级的衍射光分离,各级次衍射光斑如图7(a)~(c)所示。



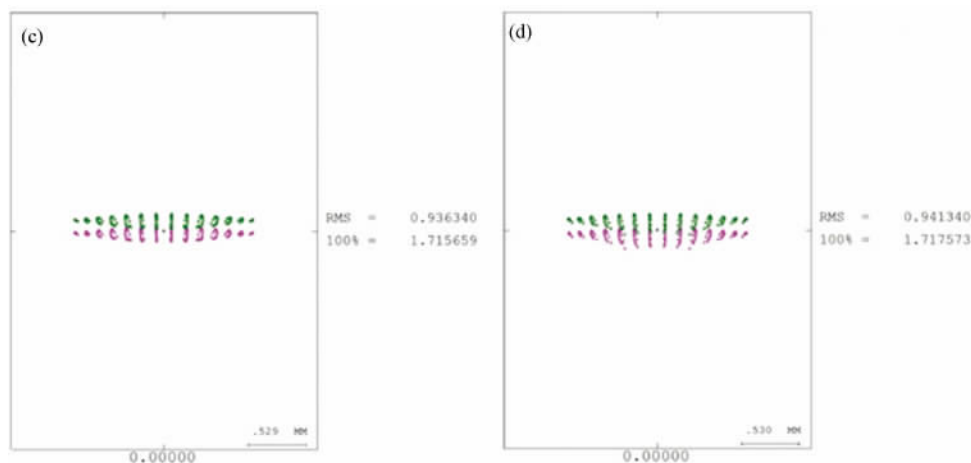


图 5 (a)前置单色仪在 190 和 190.2 nm 处点列图; (b)前置单色仪在 400 和 400.2 nm 处点列图;

(c)前置单色仪在 600 和 600.2 nm 处点列图; (d)前置单色仪在 1 100 和 1 100.2 nm 处点列图

Fig 5 (a) Spot diagram of the front monochromator at 190 and 190.2 nm; (b) Spot diagram of the front monochromator at 400 and 400.2 nm; (c) Spot diagram of the front monochromator at 600 and 600.2 nm; (d) Spot diagram of the front monochromator at 1 100 and 1 100.2 nm

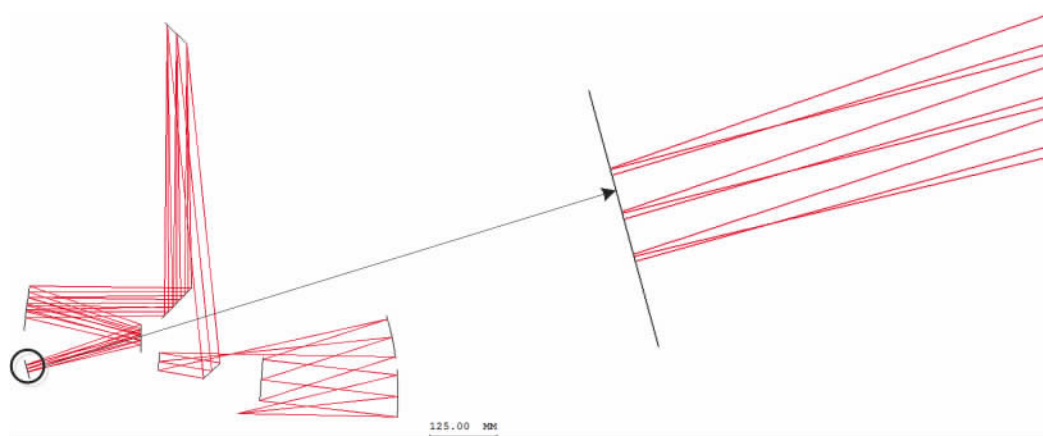


图 6 入射光波长 190.3 nm 时 139 级、140 级、141 级衍射光路图

Fig 6 139th order, 140th order, 141th order diffraction light path diagram at 190.3 nm

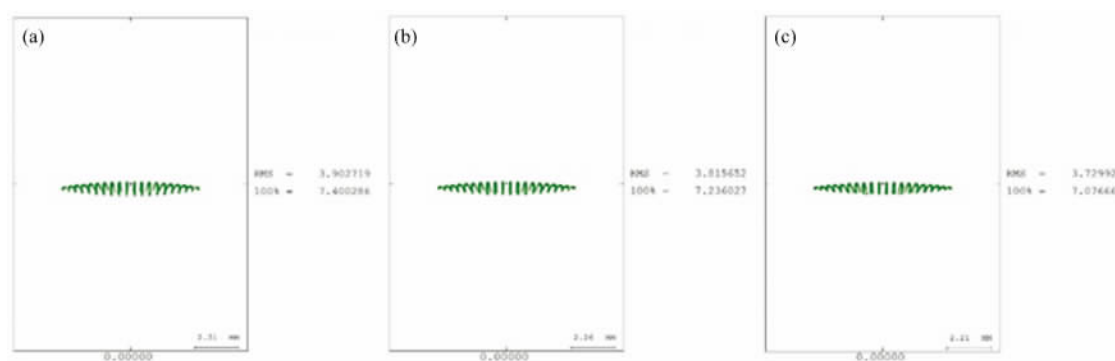


图 7 入射光波长 190.3 nm 时衍射光斑

(a): 139 级; (b): 140 级; (c): 141 级

Fig 7 Diffraction spot at 190.3 nm

(a): 139th order; (b): 140th order; (c): 141th order

在检测光谱范围内当入射光波长为 $1\,110.09\text{ nm}$ 时, 根据式(1)可计算出相应的衍射级次为 24 级, 用光学设计软件模拟该光路如图 8 所示, 可清楚的看出该光学系统可将 23 级、24 级、25 级的衍射光分离, 各级次衍射光斑如图 9(a)—(c)所示。

2.2 中阶梯光栅杂散光检测系统设计

中阶梯光栅杂散光检测系统整体设计如图 10 所示, 测量光谱范围 $200\sim 800\text{ nm}$, 分辨率优于 0.5 nm 。光源为激光器, 为避免激光器能量过强对检测系统造成损害, 在其后设置衰减片减弱进入后端检测系统的能量, 同时可增大接收光强范围。测试中阶梯光栅上多点的杂散光, 使波长为 λ 的光偏离 Littrow 角入射, 计算 $m-1$ 级、 m 级、 $m+1$ 级的相对位置, 并令探测器沿轨道以一定的步距角运动, 连续扫描接收相邻级次间的衍射光能量, 根据能量积分原理计算杂散光强度。

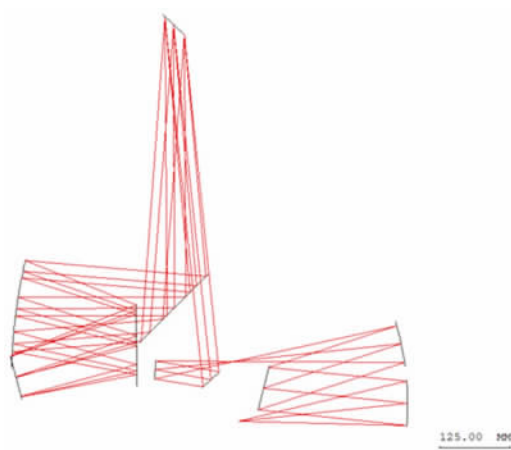


图 8 入射光波长 $1\,110.09\text{ nm}$ 时 23 级、24 级、25 级衍射光路图

Fig 8 23th order, 24th order, 25th order diffraction light path diagram at $1\,110.09\text{ nm}$

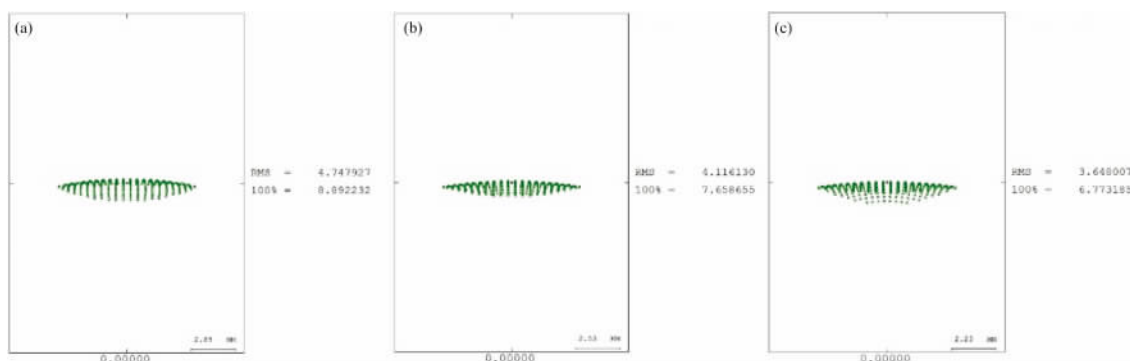


图 9 入射光波长 $1\,110.09\text{ nm}$ 时衍射光斑

(a): 23 级; (b): 24 级; (c): 25 级

Fig 9 Diffraction spot at $1\,110.09\text{ nm}$

(a): 23th order; (b): 24th order; (c): 25th order

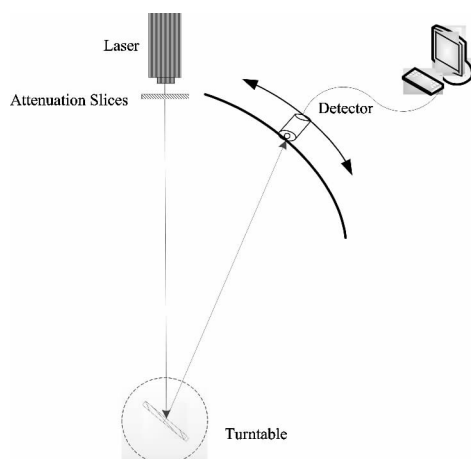


图 10 中阶梯光栅杂散光检测系统示意图

Fig 10 The schematic of detection system for echelle stray light

在本文中我们定义光栅杂散光: 在中阶梯光栅色散方向上, 连续扫描入射光波长的 $m-1$ 级、 m 级、 $m+1$ 级之间的衍射光, 采用能量积分法接收待测光栅的出射光通量(即通过对出射光斑进行扫描和线性叠加实现出射光测量), 理想情况下衍射光强呈高斯分布, 实际上各衍射级次间出现了不规则的光强分布, 如图 11 所示, 我们认为此不规则分布的光强能量积分和与 m 级衍射光强能量积分的比值为待测光栅的 m 级相对杂散光系数, 可表示为

$$\eta_{\text{杂散光}} = \frac{\int_{\theta_0}^{\theta_1} E'(\lambda, m) d\theta + \int_{\theta_2}^{\theta_3} E'(\lambda, m) d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} E(\lambda, m) d\theta} \quad (9)$$

其中, $E'(\lambda, m)$ 为波长 λ 的 m 级衍射光与其相邻级次衍射光之间的光强(即 m 级的杂散光强度), $E(\lambda, m)$ 为波长 λ 的 m 级衍射光强度, θ_0 , θ_1 , θ_2 和 θ_3 为相邻三个衍射级次间的极小值。

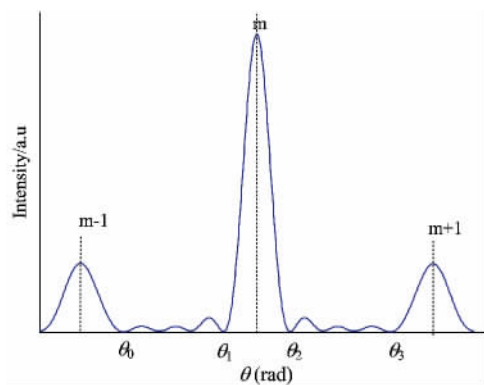


图 11 杂散光示意图

Fig 11 The schematic of stray light

根据多缝夫琅和费衍射可推导出 m 级衍射光强 E 和相邻两个极小值之间的角距离 $\Delta\theta$ 分别为

$$E = E_0 \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} a \sin\theta\right)}{\frac{\pi}{\lambda} a \sin\theta} \right]^2 \left[\frac{\sin\left(\frac{N\pi}{\lambda} d \sin\theta\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin\theta\right)} \right]^2 \quad (10)$$

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{Nd \cos\theta} = \frac{\lambda}{Nd \sqrt{1 - \left(\frac{m\lambda}{d}\right)^2}} \quad (11)$$

其中, E_0 为入射光强度, N, d, a 是与待测光栅基础参数相关的常量, θ 是与衍射级次相关的变量。则待测中阶梯光栅的 m 级相对杂散光系数, 可表示为

$$\eta_{\text{杂散光}} = \frac{\int_{\theta_0}^{\theta_1} E'(\lambda, m) d\theta + \int_{\theta_2}^{\theta_3} E'(\lambda, m) d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} E_0 \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} a \sin\theta\right)}{\frac{\pi}{\lambda} a \sin\theta} \right]^2 \left[\frac{\sin\left(\frac{N\pi}{\lambda} d \sin\theta\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin\theta\right)} \right]^2 d\theta} \quad (12)$$

其中,

$$\theta_0 = \arcsin \frac{(m-1)\lambda}{d} + \frac{\lambda}{2Nd \sqrt{1 - \left[\frac{(m-1)\lambda}{d}\right]^2}} \quad (13)$$

$$\theta_1 = \arcsin \frac{m\lambda}{d} - \frac{\lambda}{2Nd \sqrt{1 - \left(\frac{m\lambda}{d}\right)^2}} \quad (14)$$

$$\theta_2 = \arcsin \frac{m\lambda}{d} + \frac{\lambda}{2Nd \sqrt{1 - \left(\frac{m\lambda}{d}\right)^2}} \quad (15)$$

$$\theta_3 = \arcsin \frac{(m+1)\lambda}{d} - \frac{\lambda}{2Nd \sqrt{1 - \left[\frac{(m+1)\lambda}{d}\right]^2}} \quad (16)$$

根据导轨上探测器接收的 $m-1$ 级、 m 级、 $m+1$ 级之间的衍射光强度, 采用能量积分法, 将测得结果积分, 经过数据处理通过上位机显示出来, 变换测量待测中阶梯光栅的不同位置, 综合评价光栅的性能。

3 结 论

从中阶梯光栅的性质出发, 针对中阶梯光栅的衍射特点, 设计了一套可用于中阶梯光栅衍射效率和杂散光水平的检测系统。该系统的主要特点为: (1) 前置单色仪采用对称式 C-T 结构, 可提供波长 190~1 100 nm 范围内的单色光, 光谱分辨率优于 0.2 nm, 整体检测系统可满足 190~1 100 nm 光谱范围内中阶梯光栅各级次的绝对衍射效率的测量; (2) 利用能量积分法可测量中阶梯光栅在 200~800 nm 光谱范围内的各级次杂散光系数; (3) 引入双轨结构将中阶梯光栅的衍射效率测量和杂散光测量相结合, 提高了检测效率。该系统具有结构新颖, 测试简单、通用性强等特点, 对中阶梯光栅的质量评价具有指导性的意义, 也为未来检测仪器的发展提供新方向。

References

- [1] Benedikt Guldemann, Atul Deep, Ramon Vink, CEAS Space J, 2015, 7(4): 433.
- [2] LIU Hai-tao, HUANG Yuan-shen, LI Bai-cheng, et al(刘海涛, 黄元申, 李柏承, 等). Optical Instruments(光学仪器), 2013, 35(3): 46.
- [3] FENG Fan, DUAN Fa-jie, BO En, et al(冯帆, 段发阶, 伯恩, 等). Opto-Electronic Engineering(光电工程), 2014, 41(7): 20.
- [4] DING Wei-tao, HUANG Yuan-shen, ZHANG Da-wei, et al(丁卫涛, 黄元申, 张大伟, 等). Opto-Electronic Engineering(光电工程), 2013, 40(9): 68.
- [5] Lavigne Jean-Francois, Doucet Michel, Wang Min, et al. Proceedings of SPIE, 2010, 7735.
- [6] Dmitriy L Voronov, Leonid I Goray, Tony Warwick, et al. Optics Express, 2015, 23(4): 4771.
- [7] HE Xu, CHENG Xian-kai(何煦, 成贤楷). Chinese Journal of Scientific Instrument(仪器仪表学报), 2015, 36(9): 2057.
- [8] ZHAI Shan-shan, YANG Jin, Bayanheshig, et al(翟珊珊, 杨晋, 巴音贺希格, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2014, 34(4): 1124.
- [9] YANG Jin, YIN Lu, YAO Xue-feng, et al(杨晋, 尹禄, 姚雪峰, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2015, 35(8): 0812001.
- [10] LIU Yang, FANG Yong-hua, WU Jun, et al(刘洋, 方勇华, 吴军, 等). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2015, 44(4): 1164.

A Detection System Design of Echelle Diffraction Efficiency and Stray Coefficient

SHEN Chun-yang^{1, 2}, CUI Ji-cheng^{1*}, SUN Ci¹, WANG Wei^{1, 2}, CHEN Jian-jun^{1, 2}, LI Xiao-tian¹

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Echelle, which is highly appreciated due to its excellent properties in recent years, has the advantages of low groove density, wide blaze angle, high diffraction grades, wide spectral range, high dispersion ratio, and high spectral resolution. Diffraction efficiency and stray light coefficient which can express the quality of the echelle directly reflect the optical properties of the echelle. Thus, accurate measuring of the diffraction efficiency and stray light coefficient is the precondition for grating applications. Therefore, based on the diffraction theory of echelle, the paper creatively puts forward a thought of using one system measuring echelle diffraction efficiency and stray light coefficient. The system introduces a double-rail structure, possessing the advantages of simple and novel structure, multiple functions in one machine. Through theoretical analysis and calculation, the structural parameters of the detection system are determined. The results indicate that the system can be used to measure echelle diffraction efficiency with the spectral range from 190 to 1 100 nm, and the system can also be used to measure echelle stray light with the spectral range from 200 to 800 nm, achieving the purpose for measurement of diffraction efficiency and stray light in one system.

Keywords Echelle; Diffraction efficiency; Stray light; Optical design

(Received May 4, 2016; accepted Sep. 23, 2016)

* Corresponding author