平面反射光栅衍射效率自动测试仪的设计与分析

王 芳^{1,2},齐向东¹,于宏柱¹,于海利^{1,2}

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 100039

摘 要 设计了一种快速自动测试平面反射光栅相对衍射效率的新型系统。它采用连续光源照明,运用双 联光栅光谱仪的结构型式,以N沟道增强型场效应管阵列(线阵 NMOS)作为光电接收器件。运用光栅光谱 仪的相关原理,对系统的测试原理进行了理论分析;并对光学系统进行了像质分析。分析得出,系统装置结 构紧凑,电子学系统简化;不存在保证两光栅光谱仪的波长扫描同步问题,具有很好的波长重复性,精度易 于保证;较之以往文献中的自动化方案制造成本降低,且操作简便,工作效率提高。研究结果表明:该测试 仪工作光谱范围为190~1100 nm,覆盖了大多数常用光栅的应用波长范围;且系统光谱分辨率小于3 nm, 完全满足设计要求,是一种经济可行的方案。

关键词 平面反射光栅;相对衍射效率;光栅光谱仪;线阵 NMOS;像差 中图分类号:TH744.1;TB96 文献标识码:A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)02-0556-05

引 言

平面衍射光栅是目前应用最为广泛的色散元件,是各种 光谱仪器的核心器件。衍射效率是光栅最重要的性能指标之 一,也是决定光谱仪器能量特性的基本因素。光栅衍射效率 通常有两种定义,即相对衍射效率与绝对衍射效率.前者定 义为单色入射光在给定光谱级次中的衍射光通量与同一单色 光经与光栅具有相同孔径的标准平面反射镜反射后的光通量 之比;后者定义为给定光谱级次中单色衍射光通量与入射光 通量之比;光栅光谱衍射效率曲线指的是光栅衍射效率对波 长的函数关系。

光栅衍射效率的检测至关重要,不仅从光栅的研制和生产的角度必须测试衍射效率随波长的变化,得出衍射效率曲线,以控制和改善光栅的质量。还由于存在着"伍德异常"(Wood anomaly)问题,更有必要对光栅进行实际检测,发现异常的所在,以便和光栅理论所预计的结果进行比较,促使光栅理论的发展和完善。国内,中国科学院长春光机所现在使用的光栅衍射效率测试设备是20世纪60年代自行研制的产品,属于手动装置,它承担了本所几乎所有光栅的衍射效率检验工作。该测试仪^[1,2]采用的是"线谱法",即用具有已知标准谱线的光源,经前置单色器输出若干条标准波长的谱线照明待测光栅和反射镜,逐点测试对应的效率值,连接成

效率曲线。这种方法虽然波长精度高,但是,由于可用的标 准谱线数量有限,只能测量分立波长的衍射效率。

在 20 世纪末,国内曾有过几篇关于平面光栅衍射效率 自动测试仪的报道。其中,浙江大学光学仪器系的林中 等^[3,4]于 1987年研制了一套工作波长范围为可见光和近红 外区域(0.4~2.5µm)、微机控制的连续扫描自动测试平面 反射光栅衍射效率的仪器。但是,由于此仪器对衍射光通量 和反射光通量的测量不同步,因而未能很好地解决实时测量 问题,并且还需要不断地移入移出反射镜、更换前置单色器 的光栅使之与待测光栅相同,操作不够方便。于是,1994年 苏州大学物理系的印建平^[5,6]基于浙江大学的设计思想,提 出了一种既能测试平面光栅相对衍射效率,还能测试绝对衍 射效率,采用二次衍射方法在测量单色器内构成色散相减双 单色仪系统的改进方案,前置分光光栅与待测光栅刻槽密度 可以不同。但是,存在沿信号通道和沿参考通道的光谱带宽 不相等、仪器常数测试与衍射效率测试时间间隔过长等问 题。长春光机所齐向东印采用一种全新的技术方案来研制全 自动光栅衍射效率检验仪,此方案突出的结构特点是省略了 前置单色器,测量所需单色光由被测光栅本身提供,参考通 道和信号通道的光路对称。解决了波长同步精度不易保证和 两单色仪色散率不匹配的难题,扩大了测量范围。但是整个 测试系统的像质不易保证,而且制造成本高,对于连续扫描 系统而言,这种结构也略显复杂。

收稿日期: 2007-10-13,修订日期: 2008-01-18

基金项目:国家"十一五 "科技支撑计划重大项目(2006BA K03A02)资助 作者简介:王 芳,女,1982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:wangfang19830125 @163.com

国际上,平面光栅衍射效率的测试设备与我国传统的测 试仪器类似^[1,8],也是采用双单色仪结构,由前置单色器为 测量单色器提供测试用的单色光,由接收器接收最后的光通 量。目前,光栅衍射效率检测的流行趋势是给出衍射效率相 对于波长的连续曲线,能够反映出光栅的反常现象,可以使 光栅用户对光栅有一个非常直观的印象。但由于光栅衍射效 率检测设备的用户很少,国际国内相关研究较少,且均无产 品出售,因此,从科研和生产的实际需要出发,在较短的时 间内自行研制出结构紧凑,精度易于实现的全自动光栅衍射 效率检测仪是比较经济的途径。

光栅效率测试仪是研制生产高质量光栅的关键设备。为 了与国际通用的监测方法相统一,必须研制具有连续扫描功 能的自动测试仪,这也是建立光栅行业标准的必要条件。我 们设计了一种新型式的精确自动测试平面反射光栅相对衍射 效率的仪器。它采用连续光源照明,运用双联光栅光谱仪的 结构型式,以线阵 NMOS 作为接收器件。整个仪器结构紧 凑,电子学系统简化,精度易于保证,较之以往文献中的自 动化方案制造成本降低,操作简便,工作效率提高。

1 测试仪的设计与分析

1.1 光学系统设计

我们设计的衍射效率测量装置光路结构如图 1 所示。该 测试仪可以研究衍射光栅在整个近紫外到近红外区域的衍射 效率。它由测量单色仪和后置分光计组成,采用连续光源照 明。3 个不同波段的光源可替换,用球面反射镜聚焦到测量 单色仪的入射狭缝上,此单色仪是 C-T 水平型式,由步进电 机驱动测量光栅转座。从单色仪出射的辐射通过狭缝 5 入射 到后置分光计 中,这台分光计也是 C-T 装置型式,它的入 射狭缝与测量单色仪的出射狭缝 5 重合,衍射光栅部件 9 是 可以更换的,一套 3 块光栅可以覆盖整个被研究的光谱区 域。由线阵 NMOS 接收光栅衍射光的辐射通量和标准平面 反射镜反射光的辐射通量,由 USB 接口输入计算机,计算出 它们在各个相应波长下的比值,得出光栅的衍射效率曲线。

当测量偏振光时,在入射狭缝4的前面安装偏振镜3。 利用带有高反射膜系的镀铝反射镜作为标准反射镜。



Fig 1 Structure of optical path

:测试单色仪; :后置分光计;1:光源;4,5:狭缝;2,6,7:球 面反射镜;8:待测光栅;9:不动光栅;10:线阵 NMOS 接收器;3: 偏振镜

仪器的主要技术指标:

(1) 实现光栅衍射效率的连续扫描自动测试,同时也可 以进行单波长测试; (2)工作波段:190~1100 nm; (3)测试速度: 15 块光栅/小时; (4)波长分辨率: 3 nm;

- (5) 衍射效率的重复性误差: 4%;
- (6)衍射效率值精度: ±5%。

2.2 测试原理

测试系统采用双联光栅光谱仪结构,对于连续光谱,利 用光谱仪器出射光束的光通量的关系式^[9],由分光计输出在 区间内的衍射光通量为 ()

$$\Phi(\) = (\ /4) A^2 \ (\) \ (\) B(\) sh \tag{1}$$

式中,():测试仪器系统不计待测光栅的其他所有光学元件的总透过系数;():待测光栅的绝对衍射效率;放置平面反射镜时为反射镜的反射率 r(); B():在 区间内光源光谱亮度的平均密度; A:成像物镜的实际相对孔径; s和 h:光电接收器件单个像元的宽度和高度; :单个像元接收的光谱带宽。

本系统应用线阵 NMOS 作为探测器,直接测得的是仪器输出的不同波长的光对应的光电压 U(),满足下式

$$U() = kS() \Phi()$$
(2)

测试光栅时

 $U_{g}() = (/4) A^{2} kS() () () B() sh_{g} (3)$ 放置平面反射镜时

 $U_r() = (/4)A^2kS()()r()B()sh$, (4) 其中, k 是与系统有关的比例系数, S()为 NMCS 探测器的 光谱灵敏度,它表示单位辐射通量在探测器上产生的光电压 的大小, g_r , 为分别放置待测光栅和平面反射镜时单个 像元对应的光谱宽度。

这样,光栅的相对衍射效率可由二光电压的比值求得

 $() = \frac{U_{e}()}{U_{r}()} = \frac{(/4)A^{2}kS()())()B()sh_{e}}{(/4)A^{2}kS()()r()B()sh_{e}} (5)$ 在测量过程中,(),A,S(),k可认为是不变的,单个像元的尺寸 s和 h 恒定。为使测量值()等于真正的()/r(), 要令式中余下的因子对应相等,讨论如下。

(1) 光源的不稳定

这导致在分别测光栅和平面反射镜时,光源光谱亮度的 平均密度 *B()*不同。在光源本身特性稳定的情况下,引起光 源不稳定的主要因素一是由于光源电压的波动,而是周围环 境温度的变化。由于系统在恒温环境中工作,因而后者的影 响可忽略。而对于前者,利用微机系统的数据处理可对光源 的不稳定性进行一定程度的补偿。

(2) 接收光通量的像元对应的光谱宽度

两台光谱仪, 焦距不等, 色散也不等, 对于焦距为 f 的 单色仪, 波长差为 的两成分在空间分开的角度为 , 相 应地在焦平面上被分开的距离为 /, 则有

$$= l/f \tag{6}$$

根据光栅方程 $d(\sin i + \sin) = m$, 单色仪的线色散率 D_1

$$D_{\rm l} = \frac{l}{d\cos s} = \frac{fm}{d\cos s} \tag{7}$$

式中 *m* 为衍射级次, *d* 为光栅常数, 为波长差为 的两成 分对同一衍射级次 *m* 的衍射角的平均值。 下面,分别以下标1,2, 代表测量单色仪、后置分光 计和整个系统的相应参数。于是,由(6)和(7)式可得

$$_{1} = \frac{D_{n}}{f_{1}} \quad , \quad _{2} = \frac{D_{p}}{f_{2}} \tag{8}$$

由于测量单色仪的出缝与后置分光计的入缝重合,因此, 将传递成后置分光计相应入射光在空间分开的角度 *i*₂,则 整个系统的 为

$$+ _{2} = _{1} + _{2}$$
 (9)

 $d_2 \cos 2$

综上各式可得整个系统的线色散率
$$D_1$$

 $D_1 = \frac{f_2}{\int f_2} = \left(\frac{D_n}{f_1} + \frac{D_p}{f_2}\right) \cdot \frac{f_2}{f_2} = \left(\frac{m_1}{d_1 \cos_1} + \frac{m_2}{d_2 \cos_2}\right) f_2$ (10)

令 $m_1 = m_2 = 1$, 在波长 处, 单个像元对应的 为

在测试反射镜时 $D_n = 0$,所以有

 $=\frac{N}{D_{l}}$

558

$$r = \frac{s}{D_{12}} = \frac{s}{\frac{f_2}{d_2 \cos 2}}, \quad g = \frac{s}{D_1} = \frac{s}{\frac{f_2}{d_2 \cos 2}}, \quad (12)$$

由此可得测试光栅和反射镜时,单个像元对应的光谱宽 度的关系

_。 < , 且 。随待测光栅的线密度和光波长的不同而变化

系统原理上无法消除此项引入的测量误差。解决方案 是:在编制系统的接收及数据处理软件时,将(12)式考虑在 内。令测试光栅和平面反射镜时,接收光通量的数个像元对 应的光谱带宽相等,由

$$= m \quad r = n \quad g \tag{14}$$

求出各自占有的像元个数 m 和 n, 然后对总像元个数 m 和 n 上的光通量进行积分求和, 从而接收通量的数各像元对应的 光谱带宽相同, 消除了测量误差。

2 光学系统的像差分析

整个准直、聚焦成像系统均采用球面反射镜,所以系统 色差为零。场曲是从狭缝的高度方向考虑的,会使长狭缝两 端点清晰的聚焦位置偏离接收平面,我们应用的狭缝和像元 的高度较小,所以场曲可以忽略[10]。

在离轴的情况下,系统最主要的像差是彗差、像散和球 差。

(1) 彗差

彗差表示轴外物点、宽光束经光学系统成像后失对称的 情况。系统采用 C-T 装置型式,它的优点之一是入射光束和 衍射后光束的彗差是相消的。我们选定消彗差为零的波长为 工作光谱范围的中心波长,则光谱范围两端的剩余彗差可比 同类对称式装置减小。任意波长的垂轴彗差为

$$TA_{\rm c} = \frac{3 H_1 W^2}{32 f^2} \left[\frac{\cos^3 i}{\cos^3} - \frac{\cos^3 n}{\cos^3} \right] \cos^2$$
(15)

其中, *i*₀和 ₀为消彗差为零的波长光束的入射角和衍射角, *H*₁为准直物镜到光栅的垂直距离, *f*为准直物镜的焦距, *W* 为衍射光栅的色散孔径。

(2)像散

像散由轴外点细光束引起,当入射光为平行光束时,通 过子午平面和弧矢平面的光线聚焦不在一点上。像散导致光 谱线不清晰或谱线轮廓增宽。

在我们选用的 C-T 装置型式中,由于垂直面为子午面, 水平面为弧矢面,光谱线在子午平面内,弧矢焦线平行于子 午平面,故像散对谱线增宽的影响很小。

(3)球差

仪器的物体是狭缝,球差的存在会使光谱线扩散,使边缘不清晰。球差越大,则谱线轮廓扩散越大,谱线宽度越大。 谱线宽度的增大会直接影响仪器的分辨率 R。我们只能采用 控制相对孔径的办法来使球差小于像差容限以满足系统分辨 率的要求。

根据波像差与几何像差的关系^[11],可得球差引起的弥 散斑半宽度为

$$= TA_{=1} = \left(- \frac{R}{r} \frac{\partial W_{040}}{\partial} \right)_{=1}$$
(16)

式中 R 为成像物镜到像面的距离, r 为成像物镜的半口径, 为归一化的光瞳口径, Wuu 为球差的波像差系数。

3 仪器分辨率

(13)

a.

仪器的分辨率是指仪器对所测波长紧密相邻谱线的分辨 能力,分辨率越高,则所测衍射效率与波长对应光学越准 确,影响分辨率的因素很多,最主要有以下几个方面。

首先,给出计算时用到的一些系统相关参数,如表1所示。

Table 1 S	ystem parameter
Primary wavelength	= 0. 6 µm
Slit size	$a \times b = 0.2 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$
NMOS pixel size	$s \times h = 50 \ \mu m \ \times 2.5 \ mm$
Test grating caliber	W 110 mm
Focus of spherical mirror	6 $f_1 = 550 \text{ mm}$
Focus of spherical mirror	$f_2 = 90 \text{ mm}$
Rear spectrometer grating	g $1/d = 600 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$

由(10~12)式可见,测量单色仪中放置待测光栅比放置 平面反射镜时的线色散率大,这里我们取放置平面反射镜时 系统的线色散来计算整个系统的光谱分辨,即

$$\frac{dl}{d} = \frac{f_2}{d_2 \cos 2} \frac{d}{dl} = 17.86 \text{ nm} \cdot \text{mm}^{-1}$$
(17)

(1)衍射极限

按照瑞利准则,光栅衍射宽度为光束通过狭缝以后必定 产生衍射作用,此时狭缝的宽度为

a衍射 = 2
$$\frac{f}{D}$$
 (18)

其中, f 为系统焦距, D为光阑孔径值, 这里我们取后置分光 计中参数。由衍射极限决定的分辨极限 ,称为理论分辨极 限, 为

$$= \frac{\alpha_{\rm first}}{2} \frac{\rm d}{\rm d}l \qquad 0.04 \text{ nm} \qquad (19)$$

(2)像差

即

由于测试系统属于非共轴光学系统,像差计算复杂,我 们用 ZEMAX 光学设计软件对光学系统进行了像差分析,由 得到像差系数得出可以不考虑彗差、像散对系统分辨率的影 响。而球差像差系数 W₀₄₀ = - 6.11,由此得到的弥散斑半 宽度 *a*_r = 50.76 µm,它引入的光谱宽度为

(3) 入射狭缝和多通道探测器像元的有限宽度

谱线的几何宽度就是理想光学系统入射狭缝像的宽度,

$$a = a \frac{f_{-1}}{f_1} \cdot \frac{f_2}{f_2} = 0.2 \text{ nm}$$
 (21)

多通道探测器像元宽度 *s* = 50 μm,则由它们的有限几何 宽度引入的光谱宽度为

$$\pi = \frac{1}{2} (a + s) \frac{d}{dl} = 0.223 \text{ nm}$$
 (22)

(4) 光学零件制造不完整和各个部件以及整个仪器的装 校误差

参考文献

- [1] ZHU Shao-ji, ZHOU Hai-xing, BAO Xue-cheng, et al(祝绍算, 邹海兴, 包学诚, 等). Diffraction Grating(衍射光栅). Beijing: China Machine Press(北京: 机械工业出版社), 1986. 365.
- [2] ZOU Yan(邹 艳). Optical Instruments(光学仪器), 1993, 15(3): 5.
- [3] GONG Jian, SHEN Derhong, LIN Zhong(龚 健, 沈德洪, 林 中). Optical Instruments(光学仪器), 1989, 11: 17.
- [4] LIN Zhong, HU Long-fei(林 中, 胡龙飞). Chinese Journal of Scientific Instrument (仪器仪表学报), 1988, 9(3): 227.
- [5] YIN Jian-ping(印建平). Journal of Suzhou University(Natural Science)(苏州大学学报 ·自然科学版), 1991, 7(1): 75.
- [6] YIN Jian-ping(印建平). Chinese Journal of Scientific Instrument(仪器仪表学报), 1995, 16(3): 329.
- [7] QI Xiang-dong(齐向东). Optical Mechanical Electrical Information(光机电信息), 1997, 14(11): 22.
- [8] Loewen Erwin G, Popov Ecgeny. Diffraction Gratings and Applications. New York: Marcel Dekker, INC., 1997. 413.
- [9] Steckman Gregory J, Havermeyer Frank. Proceeding of SPIE, 2006, 6136(02): 1.
- [10] Tapacob . (塔拉索夫). Optical Spectrometer(光谱仪器). BAO Xue-cheng, SANG Sheng-quan, ZHU Shao-ji(包学诚,桑胜泉, 祝绍箕,译). Beijing: China Machine Press(北京:机械工业出版社), 1985. 223.
- [11] Wyant James C. Optical Testing and Testing Instrumentation. New York: Academic Press, 1992. 9.
- [12] WU Guo-an(吴国安). Design of Optical Spectrometer(光谱仪器设计). Beijing: Science Press(北京:科学出版社), 1978. 155.

设由于仪器的制造缺陷和各种装校误差引起的散射斑半 宽度对应的光谱带宽

(5) 仪器的机械和电子部件的惰性

设由仪器的机械和电子部件的惰性引起的谱线变宽对应 得光谱带宽为

$$fmt = 0.05 \text{ nm}$$
 (24)

当所有这些数值都考虑到时,系统的实际分辨极限 可以用下式求得

可见完全满足了系统分辨率小于 3 nm 的要求,并且由 于待测光栅为整个系统的孔径光阑,测试的光栅越小,则系 统的像差也就越小,系统的分辨率也会随之提高。

4 结 论

设计的新型平面反射光栅相对衍射效率自动测试仪,整 个仪器结构紧凑,不存在保证两光栅光谱仪的波长扫描同步 问题,精度易于保证。通过理论分析,光学系统的像差分析, 以及分辨率分析,可见系统像质易于保证,光谱分辨率小于 3 nm,完全满足设计要求。与已有文献中的自动化方案相比 制造成本降低,操作简便,工作效率提高,是一种经济可行 的方案。

Design and Analysis of Automatic Measurement Instrument for Diffraction Efficiency of Plane Reflection Grating

WANG Fang^{1, 2}, QI Xiang-dong¹, YU Hong-zhu¹, YU Hai-li^{1, 2}

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

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract A new-style system that automatically measures the diffraction efficiency of plane reflection grating was designed. The continuous illuminant was adopted for illumination, the duplex grating spectrograph structure was applied, and the linear array NMOS was the receiving component. Wielding relevant principle of the grating spectrograph, theoretical analysis principle was carried out for the testing system. Integrating the aberration theory of geometrical optics, the image quality of this optics system was analyzed. Analysis indicated that the systematic device structure is compact, and electronics system is simplified. The system does not have the problem about wavelength sweep synchronization of the two grating spectrographs, and its wavelength repeatability is very good. So the precision is easy to guarantee. Compared with the former automated scheme, the production cost is reduced, moreover it is easy to operate, and the working efficiency is enhanced. The study showed that this automatic meassurement instrument system features a spectral range of 190-1 100 nm and resolution is less than 3 nm, which entirely satisfies the design request. It is an economical and feasible plan.

Keywords Plane reflection grating; Relative diffraction efficiency; Grating spectrograph; Linear array NMOS; Optical aberration

(Received Oct. 13, 2007; accepted Jan. 18, 2008)