

罗兰全息光栅线密度误差分析与控制

崔锦江¹ 孔鹏² 王帆¹ 檀慧明^{1*}

(¹中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163)
(²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 分析了罗兰光栅帕邢-龙格结构中光栅线密度误差对波长精度的影响。提出一种利用参考光栅在线检测罗兰全息光栅干涉场条纹密度的方法。将具有标准线密度的参考光栅放置在干涉场内曝光位置,通过检验曝光光束的自准直衍射光与空间滤波器中针孔位置的重合度来判断干涉场条纹密度误差。推导了干涉场条纹密度误差与曝光光束自准直衍射光偏移量的解析表达式,发现干涉场条纹密度误差与曝光光束自准直衍射光偏移量、罗兰光栅曲率半径和曝光光束波长有关。以曲率半径 750.2 mm 的罗兰光栅为例,当采用 441.6 nm 激光建立光路时,利用此方法可将干涉场条纹密度误差调整至 0.035 groove/mm 以内。

关键词 全息术;光谱仪;衍射光栅;罗兰圆;帕邢-龙格结构;线密度误差

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.020901

Analysis and Control of Groove Density Error for the Rowland Holographic Grating

Cui Jinjiang¹ Kong Peng² Wang Fan¹ Tan Huiming¹

(¹ Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China)
(² Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract The relation between groove density error of the Rowland grating and wavelength accuracy for the Paschen-Runge mount is analyzed. An *in-situ* detection method for interference fringe density of the exposure field with which Rowland grating is made is proposed. A reference grating with expected groove density is put into the exposure field where the photoresist grating is exposed. The interference fringe density error of the exposure field is detected through the deviation between recording beam and its collimating diffracted light. The expression of interference fringe density error and deviation of recording beam's collimating diffracted light is deduced. It is discovered that the interference fringe density error is related to the deviation of recording beam's collimating diffraction light, grating curvature radius and exposure wavelength, but not the grating groove density. Taking a Rowland grating with 750.2 mm curvature radius for example, when the exposure wavelength is 441.6 nm, the interference fringe density error can be limited to 0.035 groove/mm.

Key words holography; spectrometer; diffraction grating; Rowland circle; Paschen-Runge mount; groove density error

OCIS codes 090.1970; 090.2890; 050.1950; 300.2140; 300.6190

1 引言

罗兰光栅是一类古老但至今仍发挥巨大作用的凹面光栅,在光谱分析、光通信等诸多领域有着重要应

收稿日期: 2012-08-06; **收到修改稿日期**: 2012-10-06; **网络出版日期**: 2013-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(60478034,61007063)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120023)、国家创新方法工作专项(2008IM040700)、中国科学院知识创新项目(100132H100)和江苏省自然科学基金(BK2012188)资助课题。

作者简介: 崔锦江(1981—),女,博士,助理研究员,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: cuijjciomp@yahoo.com.cn

* **通信联系人**。E-mail: tanhm@sibet.ac.cn

用^[1~4]。它是各类光电直读光谱仪及金属分析仪的核心元件。光电直读光谱分析具有样品处理简单、分析精度高、分析速度快、多元素同时测定的特点,因此被广泛应用于冶金、铸造、机械、金属加工、汽车制造、有色、航空航天、兵器和化工等诸多领域的生产过程控制及成品检验等^[5]。

目前,绝大多数光电直读光谱仪都采用帕邢-龙格成像系统,即入缝和出缝均固定安置于罗兰圆上,这种成像系统能够同时安置多个出射狭缝,便于对各个波长的光谱同时进行分析测量^[6]。

国内现有光电直读光谱仪产品“空心化”问题严重,其中所使用的凹面光栅均依赖进口。要改变这种现状,在现有的仪器结构中自主研发光栅取代进口光栅不失为一种快捷经济的方法。这就要求自主研发光栅结构参数与进口光栅一致,其中最重要的参数是光栅线密度,它直接影响谱线的成像位置。另外,经测试,国外光栅未经刻蚀,为梯形光栅。我们已具备大曲率半径凹面全息光栅的离子束刻蚀能力,可将梯形光栅转化为闪耀光栅,有望在衍射效率上超越国外光栅^[7]。

罗兰光栅制作可采用两种光路形式,一种是平面波曝光^[8,9],利用准直光学系统将点光源发出的球面波转化为平面波,这种光路调节较为困难^[10],光学系统中的缺陷对所制作光栅的技术指标影响较大;另一种是球面波曝光^[11~13],直接利用空间滤波器发出的球面激光束干涉曝光,制作出的光栅表面质量好。本文就第二种制作光路中罗兰光栅线密度的误差控制进行讨论。

在曝光光路调整过程中,必然存在干涉场条纹密度误差,进而造成光栅线密度误差。众所周知,利用光学干涉方法是进行光栅线密度高精度测量的有效手段^[9,14~16],但文献中的相关论述多是针对平面全息光栅。鉴于此,本文针对球面波制作罗兰全息光栅,提出一种利用光学衍射方法精确控制罗兰光栅线密度的方法,通过曝光光束经参考光栅自准直衍射光的偏移量检验干涉场条纹密度误差。结合一个计算实例,给出此方法的误差控制精度。

2 线密度误差分析

在图1所示的罗兰全息光栅的制作结构和使用结构示意图中,以光栅中心顶点 O 为坐标系原点建立直角坐标系,过 O 点的光栅表面法线为 X 轴,垂直于光栅刻线的方向为 Y 轴,则 XOY 平面为光栅的色散平面(也称子午面)。 A 点为子午面内的入缝中心点,位于罗兰圆上。由 A 点发出的光束以入射角 α 照射在光栅上,衍射后不同波长的光分别成像在罗兰圆上 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 ,衍射角分别为 β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 。两个点光源 C 、 D 亦放置于子午面内,对称分布在光栅法线两侧的罗兰圆上,两侧记录光束分别以角度 θ 照射在光栅基底上。所有角度遵守以下符号规则:向 Y 轴投影,若在 Y 轴正方向则角度为正,否则为负。

令光栅常数为 σ ,波长 λ 光束的 m 级衍射光以衍射角 β_k 成像在罗兰圆上,则光栅方程可以写作

$$\sigma(\sin \alpha - \sin \beta_k) = m\lambda. \quad (1)$$

等号两侧分别对光栅常数和波长取微分可得

$$d\sigma(\sin \alpha - \sin \beta_k) = m d\lambda. \quad (2)$$

令光栅线密度为 g ,与光栅常数 σ 满足关系 $\sigma = 1/g$,所以

$$d\sigma = -\frac{1}{g^2} dg. \quad (3)$$

由(2)式和(3)式可得

$$d\lambda = -\frac{\sin \alpha - \sin \beta_k}{mg^2} dg. \quad (4)$$

(4)式即为波长 λ 处的波长误差与光栅线密度误差的制约关系。

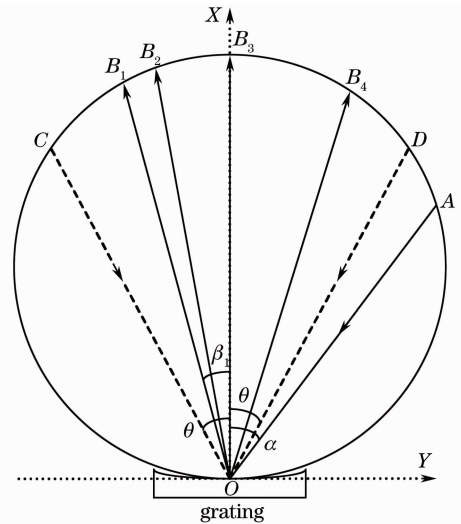


图1 罗兰全息光栅的帕邢-龙格结构
Fig. 1 Paschen-Runge mount of the Rowland holographic grating

以一款分析仪器领域中应用十分广泛的火花只读光谱仪为例,所用凹面光栅线密度为 2400 groove/mm,曲率半径为 750.2 mm,入射角 $\alpha = 40^\circ$,四种典型波长 $\lambda_1 = 149.2$ nm、 $\lambda_2 = 178.3$ nm、 $\lambda_3 = 267.7$ nm、 $\lambda_4 = 396.1$ nm 的衍射角分别为 $\beta_1 = -16.5^\circ$ 、 $\beta_2 = -12.4^\circ$ 、 $\beta_3 = -0.02^\circ$ 、 $\beta_4 = 17.9^\circ$,如图 1 所示。

由(4)式计算各波长处波长误差与线密度误差的关系曲线,如图 2 所示。从图中可以看出,光栅线密度误差对出射波长影响很大。并且,在相同的线密度误差下,不同波长处的谱线偏移方向和偏移量均不同。因此依靠旋转光栅的方法无法进行调整,必须在制作光栅时对线密度误差进行严格控制。

3 线密度误差控制

图 3 所示为罗兰光栅曝光光路结构示意图,两相干点光源 C 、 D 对称放置于参考光栅表面法线两侧的罗兰圆上, θ 为两光源中心主光线 CO 和 DO 与参考光栅法线的夹角,也就是形成干涉场的干涉半角。

根据光波干涉基本原理,干涉场中参考光栅中心处干涉条纹周期为

$$\sigma_0 = \frac{\lambda_0}{2\sin\theta}, \quad (5)$$

式中 λ_0 为曝光光束波长。令参考光栅的光栅常数为 σ ,光线 CO 经参考光栅的 -1 级自准直衍射光的衍射角为 φ ,根据光栅方程有

$$\sin\theta + \sin\varphi = \lambda_0/\sigma. \quad (6)$$

若干涉场条纹周期与参考光栅的光栅常数相同,即 $\sigma_0 = \sigma$,则

$$\sin\theta + \sin\varphi = 2\sin\theta, \quad (7)$$

即有 $\varphi = \theta$ 。也就是说,当干涉场条纹周期与参考光栅的光栅常数相等时,曝光光束的 -1 级自准直衍射光将原路返回光源点位置。利用此方法即可检验干涉场条纹周期同参考光栅的光栅常数之间的偏差。

当干涉场周期 σ_0 与参考光栅的光栅常数 σ 不相等时,光线 CO 的 -1 级衍射光的衍射角 $\varphi \neq \theta$,光线 DO 亦如此。令此时入射光线 CO 与衍射光线 OC' 之间的夹角为 $\delta = \theta - \varphi$ 。曝光光路为对称光路,即左右曝光光束以相同入射角照射光栅基底,此时左右两曝光光束的 0 级光均成像在彼此的出射位置, -1 级衍射光的成像位置偏移量均写作 Δ 。由于 δ 很小, δ 与 -1 级衍射光偏移量 Δ 的关系可以写作

$$\delta \approx \frac{\Delta}{R\cos\theta}, \quad (8)$$

式中 R 为罗兰圆直径,同时也是光栅曲率半径。根据光栅方程有

$$\sin\theta + \sin\varphi = \lambda_0 g. \quad (9)$$

干涉场条纹密度 g_0 为

$$g_0 = \frac{1}{\sigma_0} = \frac{2\sin\theta}{\lambda_0}. \quad (10)$$

令干涉场条纹密度误差为 $\epsilon = g_0 - g$,则(9)式和(10)式可得

$$\epsilon = \frac{\sin\theta - \sin\varphi}{\lambda_0}. \quad (11)$$

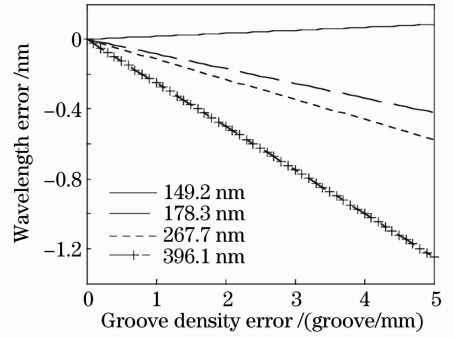


图 2 波长误差与刻线密度误差的关系

Fig. 2 Wavelength error versus groove density error

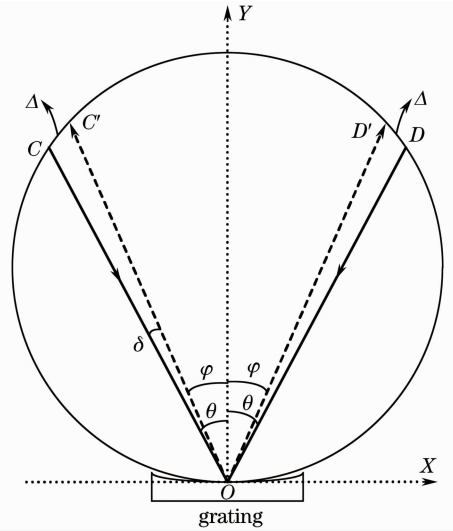


图 3 罗兰光栅曝光光路结构示意图

Fig. 3 Exposure geometry of the Rowland grating

由和差化积公式将(11)式变形可得

$$\epsilon = \frac{2}{\lambda_0} \sin \frac{\theta - \varphi}{2} \cos \frac{\theta + \varphi}{2}, \quad (12)$$

式中 $\theta - \varphi = \delta$, 且由于 δ 为小量, 可作如下近似:

$$\sin \frac{\theta - \varphi}{2} \approx \frac{\delta}{2}. \quad (13)$$

由于 $\theta \approx \varphi$, 所以(12)式中还可作如下近似:

$$\cos \frac{\theta + \varphi}{2} \approx \cos \theta. \quad (14)$$

此时, (12)式可以写为

$$\epsilon \approx \frac{\delta}{\lambda_0} \cos \theta. \quad (15)$$

由(8)式与(15)式可得

$$\epsilon \approx \frac{\Delta}{R\lambda_0}. \quad (16)$$

根据(16)式可由曝光光束-1级准直衍射光在光源点处的偏离量 Δ 直接求得干涉场的条纹密度误差。从(16)式还可以看出, 干涉场条纹密度误差还与光栅曲率半径 R 和曝光所用激光波长 λ_0 有关。由于曝光时采用的是对称光路结构, 因此干涉场的条纹密度误差即是曝光后制得的罗兰光栅线密度相对参考光栅的误差。

仍以上述火花只读光谱仪用罗兰光栅为例, 光栅线密度为 2400 groove/mm, 曲率半径为 750.2 mm, 曝光时采用的激光波长为 441.6 nm, 图 4 给出的是不同光束偏移量 Δ 对应的光栅线密度误差。

从图 4 中可以看出罗兰光栅线密度误差 ϵ 与光线偏移量 Δ 近似呈线性关系。这种方法的判读精度主要取决于曝光光束-1级自准直衍射光束的宽度。曝光光路中点光源实际为直径 5 μm 的针孔, 激光光束经聚焦镜头会聚于针孔处, 从针孔出射的激光束为准球面光波。根据凹面光栅成像原理, 当物点位于罗兰圆上时, 像亦在罗兰圆上。因为罗兰光栅存在较大的像散, 所以在光路中观察到针孔的衍射像为一竖直的细长亮线。利用几何光线追迹方法得到 5 μm 针孔的光谱像, 如图 5 所示, 进行光线追迹时所使用的罗兰光栅直径为 63.5 mm。调整光路使该谱线与针孔重合, 谱线中心处的宽度为 23 μm , 因此与针孔的对准误差不会超过 11.5 μm , 由(16)式计算知光栅线密度误差不超过 0.035 groove/mm。再由(4)式可计算出此时 396.1 nm 处的波长误差为 -0.0087 nm。

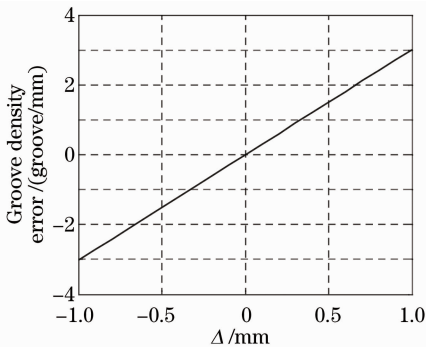


图 4 罗兰光栅线密度误差

Fig. 4 Groove density error of the Rowland grating

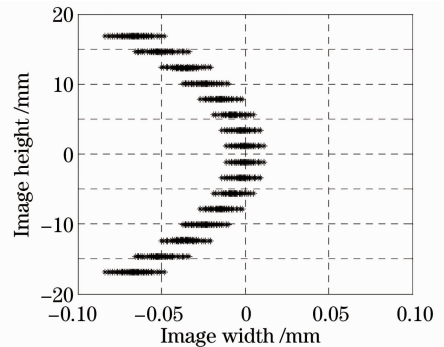


图 5 5 μm 针孔的光谱像点列图

Fig. 5 Spot diagram of spectral image for 5 μm diameter pin hole

4 结 论

从理论上计算了罗兰光栅的帕邢-龙格结构中光栅线密度误差对波长精度的影响, 结果显示线密度误差会使不同波长处的谱线产生不等量的偏移, 且偏移方向亦不同, 因此在制作罗兰全息光栅时必须对线密度误差进行严格控制。

提出一种基于参考光栅的罗兰全息光栅曝光光路调整方法。将具有标准线密度的参考光栅放置在干涉场内曝光位置,通过检验曝光光束的自准直衍射光与空间滤波器中针孔位置的重合度来判断干涉场条纹密度误差。给出了干涉场条纹密度误差与曝光光束自准直衍射光偏移量的解析表达式。以曲率半径750.2 mm的罗兰光栅为例,理论计算表明,利用此方法可将干涉场条纹密度误差调整至0.035 groove/mm以内。

参 考 文 献

- 1 E. G. Churin, P. Bayvel, A. Stavdas *et al.*. Optimization of Rowland circle mounts for grating demultiplexers and narrow-band spectrographs[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(14): 1084~1086
- 2 J. Brouckaert, W. Bogaerts, P. Dumon *et al.*. Planar concave grating demultiplexer fabricated on a nanophotonic silicon-on-insulator platform[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(5): 1269~1275
- 3 T. H. Kim, H. J. Kong, T. H. Kim *et al.*. Design and fabrication of a 900 ~ 1700 nm hyper-spectral imaging spectrometer[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(3): 355~361
- 4 Jia Hui, Yao Yong. Characteristics of typical optical systems with diffractive gratings of micro-spectrometers and improvement of spectrometer's resolution[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(8): 1653~1656
贾 辉,姚 勇. 微小型光栅光谱仪光学系统的特点与光谱分辨率的提高[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(8): 1653~1656
- 5 Ma Chongxian, Wu Cheng. Analysis of metallic materials[J]. *Chinese J. Analysis Laboratory*, 2006, **25**(12): 103~122
马冲先,吴 诚. 金属材料分析[J]. *分析实验室*, 2006, **25**(12): 103~122
- 6 C. Palmer. Second-order imaging properties of circular field spectrographs[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(10): 1451~1454
- 7 Tan Xin, Li Wenhao, Bayanheshig *et al.*. Fabrication of ultraviolet holographic blazed grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(7): 1536~1542
谭 鑫,李文昊,巴音贺希格 等. 紫外全息闪耀光栅的制作[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(7): 1536~1542
- 8 Bayanheshig, Shao Xianxiu, Cui Jicheng *et al.*. Off-axis parabolic/Lloyd mirror interferometric systems for manufacturing plane holographic gratings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(1): 56~63
巴音贺希格,邵先秀,崔继承 等. 制作平面全息光栅的离轴抛物镜/洛埃镜干涉系统[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(1): 56~63
- 9 Han Jian, Bayanheshig, Li Wenhao *et al.*. Method of adjusting the groove density spatial frequency multiplication of plane holographic grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1005003
韩 建,巴音贺希格,李文昊 等. 平面全息光栅刻线密度的倍频式调整方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1005003
- 10 Li Qi, Xia Zhiwei, Yao Rui *et al.*. Analysis of a terahertz array imaging system using optical design software[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0411001
李 琦,夏志伟,姚 睿 等. 基于光学设计软件的太赫兹面阵成像系统性能分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0411001
- 11 B. J. Brown, I. J. Wilson. Holographic grating aberration correction for a Rowland circle mount II [J]. *Opt. Acta*, 1981, **28**(12): 1601~1610
- 12 R. Grange. Aberration-reduced holographic spherical gratings for Rowland circle spectrographs[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(19): 3744~3749
- 13 Kong Peng, Bayanheshig, Li Wenhao *et al.*. Optimization of Rowland circle mounts for broad-band spectrographs[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0409003
孔 鹏,巴音贺希格,李文昊 等. 宽波段全息罗兰光栅的优化[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0409003
- 14 Yang Houmin. A new method for accurate determining the grooves of the plane holographic grating during manufacturing [J]. *Optics Mechanism*, 1989, (5): 1~6
杨厚民. 平面全息光栅制作过程中精确判断线槽的新方法[J]. *光学机械*, 1989, (5): 1~6
- 15 C. G. Chen, P. T. Konkola, R. K. Heilmann *et al.*. Image metrology and system controls for scanning beam interference lithography[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2001, **19**(6): 2335~2341
- 16 M. L. Schattenburg, H. I. Smith. The critical role of metrology in nanotechnology[C]. *SPIE*, 2001, **4608**: 116~124