

刻线误差与面型误差对平面光栅光谱性能影响的二维快速傅里叶变换分析方法

李晓天^{1,2} 巴音贺希格¹ 齐向东¹ 于海利¹ 唐玉国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 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 光栅刻线误差与基底面型误差影响平面光栅衍射波前、分辨本领、鬼线、卫线及杂散光等光谱性能, 研究光栅性能指标与光栅刻线误差及基底加工误差之间的因果关系, 对提高光栅质量极为重要。根据光栅衍射中产生的源于刻线误差与面型误差的光程差, 推导出了在光栅锥面衍射情况下的光栅刻线误差、基底面型误差、入射角 θ 、衍射级次 m 与衍射波前关系的数学表达式, 得到构建非理想光栅衍射波前的理论模型。以理论模型为依据, 采用干涉仪测量光栅对称级次衍射波前, 实现在测量结果中对光栅刻线误差与基底面型误差的分离, 并基于二维快速傅里叶变换分析光栅衍射波前, 考察了刻线误差与面型误差对光栅性能指标的影响。借助此方法通过重构的光栅衍射波前, 分析光栅分辨本领、鬼线等光谱性能, 还可以反演光栅全表面刻线误差与面型误差的大小, 为光栅基底加工、光栅制造和使用技术提供理论依据。

关键词 光栅; 快速傅里叶变换; 衍射波前; 光栅指标; 光栅刻线误差

中图分类号 O433.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.1105001

Two-Dimensional Fast Fourier Transform Method of Analyzing the Influence of Plane Grating's Line Error and Surface Error on Grating's Spectral Performance

Li Xiaotian^{1,2} Bayanheshig¹ Qi Xiangdong¹ Yu Haili¹ Tang Yuguo¹

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

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

Abstract Plane grating's line error and surface error of substrate influence grating's spectral performance, such as diffraction wavefronts, resolving power, ghost lines, satellites, scattered light etc. It is extremely important to study the relationship among grating performance, line error and substrate's surface error. According to optical path difference caused by grating's line error and surface error, math equations, which contain the relationship among line error, surface error, angle of incidence θ , diffraction order m and diffraction wavefront under condition of cone diffraction, are deduced and mathematical model of reconstructing the diffraction wavefronts of non-ideal grating is acquired. Based on above model, grating's diffraction wavefronts of symmetric orders are measured by interferometer and the separation of grating line error and surface error of substrate are realized from measured results. Grating's diffraction wavefronts are analyzed by two-dimensional fast Fourier transform method and the influence of grating line error and surface error on grating performance is discussed. With the aid of aforesaid

收稿日期: 2012-05-15; 收到修改稿日期: 2012-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(60478034)、国家创新方法工作专项项目(2008IM040700)、国家重大科研装备研制项目(ZDY2008-1)、国家重大科学仪器设备开发专项项目(11YQ120023)和吉林省重大科技攻关项目(09ZDGG005)资助课题。

作者简介: 李晓天(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事光栅刻划机纳米定位监测及光栅检测技术等方面的研究。

E-mail: lixt_1981@163.com

导师简介: 唐玉国(1967—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光谱仪器及医用光谱技术等方面的研究。

E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

method, grating's resolving power, ghost lines, satellites, scattered light can be analyzed by reconstructing grating's diffraction wavefront, and grating's line error and surface error on the whole surface of grating can be deduced, both of which can provide a theoretical basis for grating's substrate processing, grating manufacture and application.

Key words gratings; fast Fourier transform; diffraction wavefront; grating specification; grating line error

OCIS codes 050.1950; 050.1960; 110.2650; 260.3160

1 引 言

平面衍射光栅(以下简称为光栅)是最常用的光栅类型,其制作方法主要分为机械刻划法^[1]和全息离子束刻蚀法^[2]。它在紫外至红外波段的各类光谱仪器中应用十分广泛^[3~6],其性能直接影响光谱检测能力^[7~9]。光栅的衍射波前是评价光栅质量的重要依据,通过分析衍射波前可对除衍射效率外的几乎所有光栅性能指标进行^[10,11]。因此,对影响光栅衍射波前的因素进行系统剖析,建立相关理论模型,完善分析方法,有利于光栅制造和应用技术的发展。

平面光栅衍射波前在理想情况下应为平面,但是由于光栅的基底缺陷和光栅制作过程中产生的误差,将导致光栅衍射波前偏离理想平面^[12]。Yokozeki 等^[13]指出衍射波前差主要由基底面型误差和刻线误差组成,并采用马赫-曾德尔干涉仪将光栅各衍射级次的衍射波前记录在感光板上,把不同衍射级次的感光板进行非相干叠加,以此抵消基底面型误差影响,获得光栅刻线误差,由于其前提是假定基底面型误差对各级次衍射波前影响相同,因此,采用该方法得到的刻线误差中实际上仍含有基底面型误差的影响。Jaroszewicz 等^[14]给出了入射光在光栅主截面内入射情况下的光栅衍射波前与基底面型误差和刻线误差的关系式,采用 Twyman-Green 干涉仪将光栅的对称衍射级次分时曝光在感光板上,此时感光板上即呈现出只含有刻线误差的衍射波前,弥补了 Yokozeki 的方法的不足。但是,文献^[14]给出的是图像结果,未对光栅刻线误差进行数字化定量提取和分析。实际上,利用衍射波前不仅可以提取基底面型误差和刻线误差,也可以分析光栅分辨本领和杂散光,对于机械刻划光栅而言,光栅衍射波前中还包含光栅的鬼线和卫线等信息。Stroke 等^[11,15]建立了采用傅里叶变换分析光栅衍射波前的方法,给出了光栅衍射谱光强分布模型,由此可以计算光栅卫线、鬼线和杂散光,并将卫线位置的计算结果与实测结果进行了对比分析。于海利等^[16]借鉴 Stroke 的方法实现了对光栅分辨本领的计算,并与实测结果进行了对照。本文则将 Zibgniew 和 Stroke 的方法相结合,通过理论推导,对光线沿光栅主截面入射的衍射波前关系式进行拓

展,建立应用更为广泛的锥面衍射下^[17,18]的刻线误差、基底面型误差与光栅任意衍射级次衍射波前及光谱性能指标之间的内在联系,采用 Zygo 干涉仪对光栅刻线误差和基底面型误差进行数字化定量提取,实现光栅任意级次衍射波前反演;采用基于二维快速傅里叶变换的分析方法,考察刻线误差和基底面型误差对光栅各衍射级次衍射波前及光栅光谱性能指标的影响,完善光栅衍射特性分析方法。光栅刻线误差的提取及其对光栅性能影响的研究,对光栅刻划机运行精度的提高具有直接的参考意义。

2 平面光栅面型误差、刻线误差与光栅衍射波前关系的理论模型

假定一束波长为 λ 的单色平行光入射至平面反射光栅表面,入射方式为锥面衍射,入射角和衍射角分别为 θ_1 和 θ_2 ,入射光线和衍射光线与光栅主截面夹角分别为 φ_1 和 φ_2 ,光栅常数为 d 。为讨论方便,先假定光线沿光栅主截面入射,此时 φ_1 和 φ_2 等于零。

考虑光栅无刻线误差但存在基底面型误差时的情况。如图 1 所示,光栅刻线方向为与纸面垂直的 z 轴方向,当光栅第 p 条刻线上的任意点 i 与光栅理想表面存在深度误差 $h(x_p, y_p, z_{pi})$ 时,则入射光和衍射光在该点产生的总光程差 δ_{bpi} 为

$$\delta_{bpi} = \delta_{b1} + \delta_{b2} = h(x_p, y_p, z_{pi})(\cos \theta_1 + \cos \theta_2). \quad (1)$$

当光栅无基底面型误差但存在刻线误差时,如图 2 所示,当光栅第 p 条刻线上的任意点 i 的实际

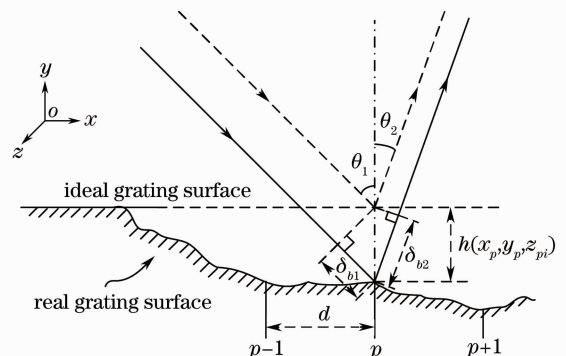


图 1 面型误差引起的光程差示意图

Fig. 1 Optical path difference induced by surface error

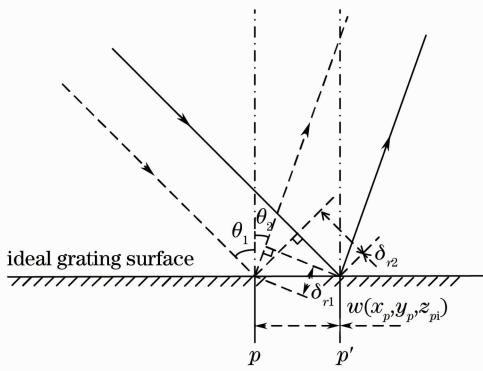


图2 刻线误差引起的光程差示意图

Fig.2 Optical path difference induced by line error

位置 p' 偏离理想刻线位置 p 的距离为 $w(x_p, y_p, z_{pi})$, 则入射光和衍射光在该点所产生的光程差总和 δ_{rpi} 为

$$\delta_{rpi} = \delta_{r1} + \delta_{r2} = w(x_p, y_p, z_{pi})(\sin \theta_1 + \sin \theta_2). \quad (2)$$

当 φ_1 和 φ_2 不为零时, 即锥面衍射情况下, 通过几何关系推导可知, 基底面型误差产生的光程差与(1)式相同, 而由刻线误差产生的光程差变为

$$\delta_{rpi} = w(x_p, y_p, z_{pi})(\sin \theta_1 \cos \varphi_1 + \sin \theta_2 \cos \varphi_2). \quad (3)$$

设光栅衍射级次为 m , 光栅使用波长为 λ , 则由锥面衍射的光栅方程可知

$$d(\sin \theta_1 \cos \varphi_1 + \sin \theta_2 \cos \varphi_2) = m\lambda. \quad (4)$$

联立(1)、(3)和(4)式可得, 在锥面衍射情况下, 当光栅第 p 条刻线的任意点 i 同时存在基底面型误差、刻线误差时, 则在该点产生的光程差 δ_{pi} 为

$$\delta_{pi} = \delta_{bpi} + \delta_{rpi} = h(x_p, y_p, z_{pi})(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) + w(x_p, y_p, z_{pi})m\lambda/d. \quad (5)$$

根据(5)式可知, 采用干涉仪测得的第 m 级的光栅衍射波前光程差 $\Delta(m)$ 为

$$\Delta(m) = \mathbf{H}(\cos \theta_{1m} + \cos \theta_{2m}) + \mathbf{W}m\lambda/d, \quad (6)$$

式中 \mathbf{H} 和 \mathbf{W} 分别为光栅全表面的基底面型误差和刻线误差数值化矩阵。 \mathbf{H} 、 \mathbf{W} 和 $\Delta(m)$ 的矩阵维数为

$a \times b$, a 和 b 的数值大小与衍射波前测量干涉仪的空间分辨率有关。 θ_{1m} 和 θ_{2m} 分别为第 m 级光栅入射角和衍射角。

采用干涉仪测量平面反射光栅衍射波前时, 大多采用单色光入射角与光栅衍射角绝对值相等的光路结构^[14,16]。此时, 由干涉仪测得第 m 级光栅衍射波前光程差为

$$\Delta(m) = 2\mathbf{H}\cos \theta_{1m} + \mathbf{W}m\lambda/d, \quad (7)$$

由(7)式知, 光栅基底面型误差所引起的衍射波前光程差在对称衍射级次上是相等的, 而光栅刻线间距误差在对称衍射级次上大小相等但符号相反。此外, 根据干涉仪及平面反射光栅衍射原理, 可知干涉仪测得的零级光栅衍射波前即为光栅基底面型误差的2倍, 这与(7)式相符。

若采用光栅衍射波前测量干涉仪对光栅对称级次衍射波前进行测量, 得到光栅 $\pm m$ 对称衍射波前数值化矩阵 $\Delta(m)$ 和 $\Delta(-m)$, 并已知光栅常数 d 、干涉仪波长 λ , 根据(7)式有

$$\begin{cases} \mathbf{W} = \frac{[\Delta(m) - \Delta(-m)]d}{2m\lambda} \\ \mathbf{H} = \frac{\Delta(m) + \Delta(-m)}{4\cos \theta_{1m}} \end{cases}, \quad (8)$$

式中 θ_{1m} 可由光栅方程求得。

根据(6)式和(8)式, 即可求得基底面型误差矩阵 \mathbf{H} 、刻线误差矩阵 \mathbf{W} 和光栅锥面衍射下任意衍射级次和入射角(衍射角可以不等于入射角)的衍射波前。

3 光栅衍射波前及其光谱性能的二维快速傅里叶变换分析方法

3.1 利用二维快速傅里叶变换计算光栅衍射谱光强分布

假设光栅为平面闪耀光栅, 衍射谱角坐标分别为 u, v , 光栅衍射波前沿坐标 x, z 的归一化坐标分别为 η ($|\eta| \leq 1$), ξ ($|\xi| \leq 1$), η 和 u 的方向为光栅的色散方向, 则光栅衍射谱的复振幅分布^[9]为

$$E(u, v) = D \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 E_0(\eta, \xi) \exp[ik\Delta(\eta, \xi)] \exp[i(u\eta + v\xi)] d\eta d\xi, \quad (9)$$

式中 D 为与 η, ξ 无关的常量, $\Delta(\eta, \xi)$ 为光栅在光瞳中的波前差。

对于均匀闪耀的平面衍射光栅, 通常其衍射波前各点的复振幅幅值相等, 即 $E_0(\eta, \xi) = 1$ 。因此, 可得均匀闪耀的平面衍射光栅的衍射谱复振幅归一化式为

$$A(u, v) = \frac{D \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \exp[ik\Delta(\eta, \xi)] \exp[i(u\eta + v\xi)] d\eta d\xi}{D \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 d\eta d\xi} = \frac{1}{4} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \exp[ik\Delta(\eta, \xi)] \exp[i(u\eta + v\xi)] d\eta d\xi. \quad (10)$$

由(10)式可得离散波前误差的衍射谱分布 $A(u, v)$ 和强度 I 计算式分别为

$$\begin{cases} A(u, v) = \frac{f_{\text{FFT}} \{ f_{\text{FFT}} \{ \exp[ik\Delta(m)] \}^T \}^T}{ab} = \frac{f_{\text{FFT}^2} \{ \exp[ik\Delta(m)] \}}{ab}, \\ I = A(u, v)A^*(u, v) \end{cases}, \quad (11)$$

式中 f_{FFT} 为快速傅里叶变换, f_{FFT^2} 为二维快速傅里叶变换, $\Delta(m)$ 为光栅的第 m 级波前误差矩阵, 维数为 $a \times b$, $*$ 表示共轭。若已知光栅波前误差矩阵 $\Delta(m)$ 或基底面型误差矩阵 H 和刻线误差矩阵 W , 由(7)式和(11)式即可计算光栅衍射谱光强分布。

3.2 光栅分辨本领、卫线、鬼线和杂散光求解方法

设 Δu 为(11)式所求解衍射谱分布的第一极小半角宽度, 依据瑞利判据, 可得衍射光栅实际分辨本领与理想分辨本领比值 R_r 为

$$R_r = \frac{\pi}{\Delta u} \times 100\%. \quad (12)$$

根据 Stroke 等^[9] 对光栅杂散光的定义, 当 $\Delta(m)$ 较小时, 根据(11)式及能量守恒定律, 若光栅第 m 级衍射波前均方根(RMS)值为 $\Delta_{\text{rms}}(m)$, 则光栅杂散光能量与第 m 级光栅衍射总能量之比 R_s 为

$$R_s = \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \Delta_{\text{rms}}(m)^2. \quad (13)$$

若已知光栅基底面型误差和刻线误差, 根据(7)、(8)式和(11)~(13)式, 即可求得光栅分辨本领、鬼线、卫线和杂散光。其中光栅卫线和鬼线可根据光栅衍射谱光强分布图直接求出。

光栅鬼线强度和位置也可根据(9)式进行计算:

$$\begin{cases} G_n = \left[J_n \left(\frac{2\pi m \epsilon}{d} \right) \right]^2, \\ \Delta u = \frac{W_g \pi}{P} \end{cases}, \quad (14)$$

式中 J_n 是 n 阶贝塞尔函数^[11], W_g 为光栅宽度, P 为栅距误差周期长度, ϵ 为周期误差的谐波振幅。

为验证本文所述的光栅衍射谱法与光栅指标计算公式的一致性, 对光栅鬼线的衍射谱图直接计算法和采用(14)式的方法进行比照。假设基底面型误差为零, 刻线误差呈正弦变化, 幅值为 60 nm, 周期为光栅宽度 W 的 1/200。若光栅刻线密度为 79 line/mm, 衍射级次 m 为 49, 则由(11)式可计算出光栅衍射谱光强分布如图 3 所示, u 和 v 是衍射谱角坐标, u 沿着光栅色散方向, z 轴的大小代表衍射谱光强值。该衍

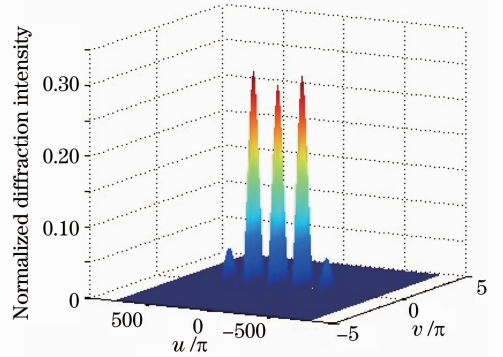


图 3 具有鬼线的光栅衍射光强分布
Fig. 3 Intensity distribution of grating with ghost line

射谱光强在光栅色散方向的分布如图 4 所示。由图 4 可知, 光栅的 1 级、2 级和 3 级鬼线的角谱位置和强度分别为 $(199.9, 0.30530)$, $(399.8, 0.04925)$ 和 $(599.7, 0.00321)$; 根据(14)式计算出上述光栅 (ϵ 为 60 nm) 的 1 级、2 级和 3 级鬼线的角谱位置和强度分别为 $(200.0, 0.30461)$, $(400.0, 0.04928)$ 和 $(600.0, 0.00320)$ 。采用本文衍射谱法和(14)式计算的前 2 级鬼线位置和强度最大相对误差分别为 0.31% 和 0.05%。

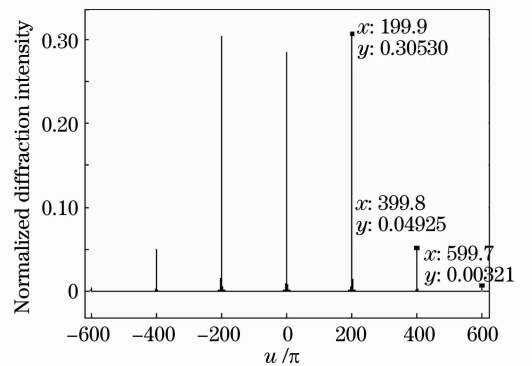


图 4 光栅衍射光强沿色散方向分布
Fig. 4 Intensity distribution of grating with ghost line in dispersive direction

4 实验验证及分析

4.1 光栅刻线误差和基底面型误差分离实验

采用测试波长为 632.8 nm、RMS 误差重复性为 $\lambda/10000(2\sigma)$ 的 Zygo 干涉仪对一块光栅尺寸为 $38\text{ mm} \times 56\text{ mm}$ 且刻线密度为 79 line/mm 的光栅衍射波前进行测试(为研究方便,本文选取面型误差和刻线误差较大的光栅为研究对象)。用(8)式分别

表 1 79 line/mm 刻划光栅基底面型误差和刻线误差计算结果

Table 1 Result of substrate surface error and line error of grating with 79 line/mm

		$\pm 3\text{rd order}$	$\pm 4\text{th order}$	$\pm 5\text{th order}$	Mean value	Relative error /%
H	PV / λ	0.15396	0.15343	0.14795	0.15178	4.1
	RMS / λ	0.02531	0.02472	0.02446	0.02483	3.5
$W\lambda/d$	PV / λ	0.01805	0.01788	0.01780	0.01791	1.4
	RMS / λ	0.00461	0.00467	0.00463	0.00463	1.3

Zygo 干涉仪测得的该光栅 ± 3 级衍射波前分别见图 5 和图 6 所示,其中 W_{in} 和 W_{wn} 分别代表归一化的光栅衍射波前长度和宽度。

图 7 和图 8 给出了根据(8)式和 ± 3 级衍射波前对应的数值化波前矩阵计算得到的基底面型误差

计算了 Zygo 干涉仪测得的光栅 ± 3 、 ± 4 和 ± 5 级衍射波前中的基底面型误差 H 和包含刻线误差信息的 $W\lambda/d$,二者单位均为波长 λ (为描述方便,如无特殊说明,下文均采用 $W\lambda/d$ 来表征刻线误差)。基底面型和刻线误差的三次测量峰谷(PV)值和 RMS 值相对误差均不大于 4.1%(见表 1)。

H 和刻线误差 $W\lambda/d$,其中 G_{in} 和 G_{wn} 分别代表归一化的光栅长度和宽度,光栅宽度方向为光栅的色散方向。

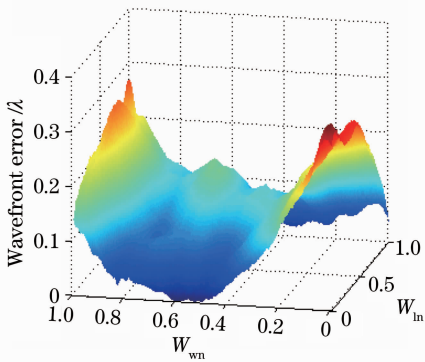


图 5 79 line/mm 光栅 +3 级衍射波前差

Fig. 5 +3rd order's diffraction wavefront error of grating with 79 line/mm

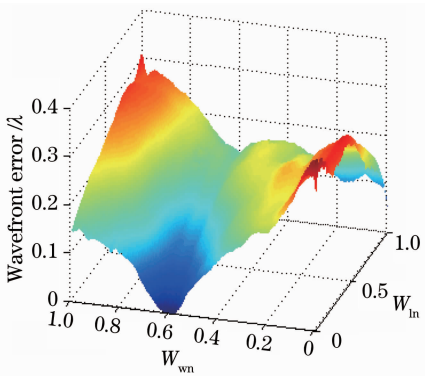


图 6 79 line/mm 光栅 -3 级衍射波前差

Fig. 6 -3rd order's diffraction wavefront error of grating with 79 line/mm

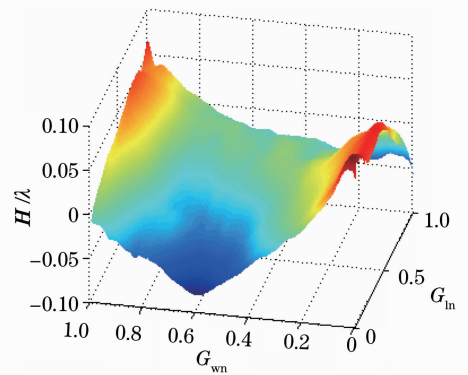


图 7 79 line/mm 光栅面型误差 H

Fig. 7 Surface error H of grating with 79 line/mm

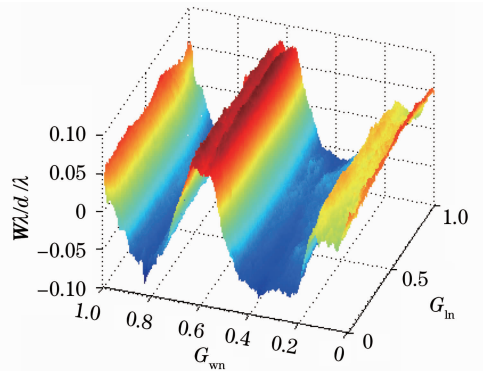


图 8 79 line/mm 光栅刻线误差 $W\lambda/d$

Fig. 8 Line error $W\lambda/d$ of grating with 79 line/mm

由图 8 可知,该光栅的刻线误差具有明显的变间距缺陷,即在光栅刻划过程中光栅相邻两条刻线的间距在不断发生变化,其产生原因可能是温度、湿度^[10]和大气压强等环境条件或光栅刻划机械结

构累积误差。根据图 8 对应的数值化矩阵 $W\lambda/d$, 可求得刻线误差矩阵 W , W 的每一行和列的数值变化分别反映了光栅刻线形状和刻线间距变化, 从而可实现对光栅刻线形状和刻线变间距缺陷的统计平均值计算。图 9 考察了光栅归一化宽度的两端和中部的典型刻线形状以及光栅平均刻线形状, 该光栅各阶段的刻线形状呈弯曲状且重复性不好, 平均刻线形状弯曲 PV 值约为 27 nm, 各刻线形状 PV 值的变化量约为 64 nm。图 10 给出了光栅归一化宽度的两端、中部的典型刻线变间距形状和光栅平均刻线变间距形状, 该光栅的刻线间距变化的 PV 值约为 183 nm。

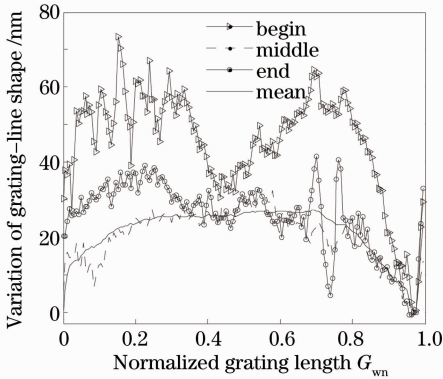


图 9 光栅刻线形状变化曲线

Fig. 9 Changing curves of grating's line shape

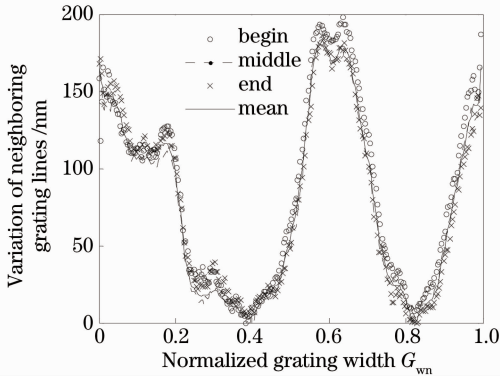


图 10 光栅刻线间距变化曲线

Fig. 10 Changing curves of grating's line distance

4.2 刻线误差和基底面型误差对光栅光谱性能影响分析

为了分析光栅刻线误差对光栅性能的影响, 先假设基底面型误差为零, 各刻线形状相同且与图 9 中平均刻线形状一致, 光栅相邻刻线间距不变, 用 (11) 式对该刻线误差导致的衍射波前差 PV 值为 0.4λ 的光栅衍射波前与理想光栅衍射波前进行比较。图 11 和图 12 分别给出了理想光栅和刻线弯曲光栅衍射谱光强分布的等高线图, 理想光栅在光栅

色散和非色散方向的衍射谱分布情况相同, 但刻线弯曲光栅在光栅色散和非色散方向明显不同, 在光栅非色散方向光谱性能发生显著改变。

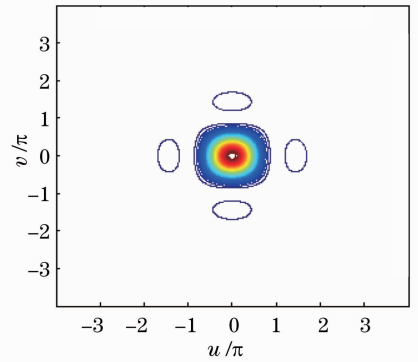


图 11 理想光栅衍射谱光强等高线图

Fig. 11 Contour graph of ideal grating's diffraction intensity distribution

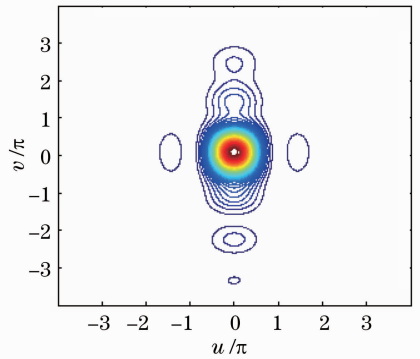


图 12 刻线弯曲光栅衍射谱光强等高线图

Fig. 12 Contour graph of bended-line grating's diffraction intensity distribution

图 13 考察了刻线弯曲光栅与理想光栅衍射谱分布区别, 图中实线代表理想光栅在色散和非色散方向的衍射光强角谱分布, 短虚线和长虚线分别代表刻线弯曲光栅在光栅色散方向(角频率 u 方向)和

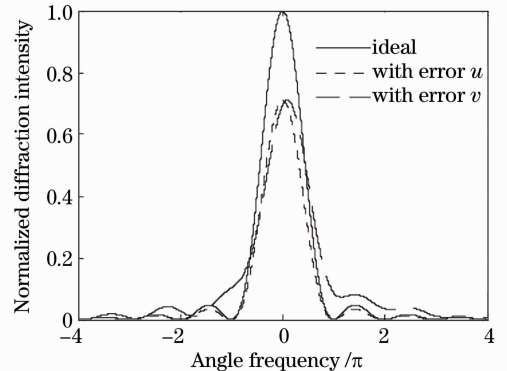


图 13 理想和刻线弯曲光栅衍射谱比较

Fig. 13 Contrast between ideal and bended-line grating's diffraction intensity distribution

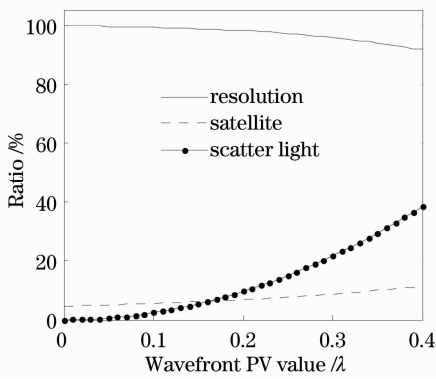


图 14 刻线弯曲光栅指标变化曲线

Fig. 14 Changing curves of bended-line grating's specifications

非色散方向(角频率 ν 方向)的衍射谱光强分布,刻线弯曲使光栅色散方向衍射谱相对于理想光栅衍射谱而言形状不变但幅值发生整体成比例压缩,二者衍射谱各次极大与主极大光强比值相对误差小于 10^{-5} ,因此光栅刻线弯曲对光栅色散方向的分辨本领、卫线、鬼线和杂散光的影响很小。

结合图 12 和图 13 可知,刻线弯曲使光栅非色散方向衍射谱分布发生改变,因此影响着光栅非色散方向的衍射谱指标。图 14 考察了只含有光栅刻线弯曲误差的衍射波前差 PV 值从 0 逐渐变化至 0.4λ 时,光栅非色散方向的分辨本领、卫线和杂散光变化规律,该刻线形状误差导致了光栅非色散方向的衍射谱分辨本领下降,卫线和杂散光强度增大。

由于光栅衍射谱分布的对称性,当光栅各刻线均为直线,但相邻刻线间距变化时,其对光栅色散和非色散方向衍射谱的影响与光栅只存在刻线形状弯曲的情况刚好相反,即刻线间距误差只影响光栅色散方向的光谱性能,而对光栅非色散方向无影响。因此,若光栅刻线存在较大变间距特性,将使光栅色散方向的光栅性能指标变差,严重时光栅将无法正常使用。由于光栅刻划过程中产生的刻线形状不重复会使光栅产生局部的刻线变间距,因此光栅刻线形状不重复和由环境条件造成的刻线变间距特性都会使光栅光谱性能指标降低。此外,根据上述分析可知,当光栅基底面型在光栅色散方向存在整体或局部的高低起伏变化时,同样会降低光栅指标。

为讨论方便,不考虑理想衍射波前对光栅指标的影响。由于卫线来源于衍射波前在光栅色散方向存在低频的高低起伏,因此当基底面型在光栅色散方向存在低频起伏或当刻线误差存在低频变间距特性时,均会导致卫线强度增大;当衍射波前在色散方

向存在周期性的高低起伏时将导致鬼线的产生,其产生根源是光栅刻线间距的周期性变化;对杂散光而言,光栅刻线形状不重复、刻线变间距和基底面型在色散方向存在整体或局部的高低起伏,均会产生光栅色散方向的杂散光。当在光栅衍射谱中同时存在卫线、鬼线和杂散光时,若衍射波前差形状不变但幅值增大,将导致卫线、鬼线和杂散光增大。再结合(7)式可知,随着衍射级次的增加,基底面型误差对光栅卫线和杂散光的影响降低,而刻线误差对卫线、鬼线和杂散光的影响增大。因此,使用在高衍射级次的光栅对刻线误差要求更为严格。

光栅分辨本领的影响因素较复杂,本文分析了在色散方向上存在正弦、线性和弧形波前差(图 15)且波前差 PV 值从 0.02λ 变化至 λ 的光栅实际与理想分辨本领比率变化曲线(图 16)。由图 16 可知,弧形和线性波前差对光栅分辨本领影响较大,而正弦波前差对分辨本领影响较小。由于线性波前差和弧形波前差往往由光栅基底造成,因此在制作高分辨本领光栅时,应尽量避免选用带有上述两种波前差的光栅基底。

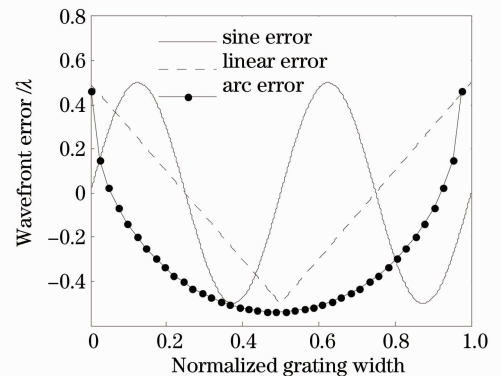


图 15 正弦、线性和弧形波前差

Fig. 15 Sine, linear and arc wavefront error

4.3 任意级衍射波前重构及其与实测衍射波前光谱性能对比分析

在实现对基底面型误差 H 和刻线误差 W 提取以后,根据(7)式即可对光栅锥面衍射下的任意入射角和衍射级次的衍射波前进行重构。对重构衍射波前和实测衍射波前进行分析,可进一步验证面型误差和刻线误差与衍射波前关系的正确性,同时可考察光栅各衍射级次的光谱衍射特性。根据(7)式,用表 1 中数据所对应的,由 ± 3 级、 ± 4 级和 ± 5 级衍射波前根据(8)式得到的 H 和 $W\lambda/d$ 的三次测量值对该光栅的 -16 级至 $+16$ 级衍射波前进行重构,将重构的衍射波前 PV 值和 RMS 值与 Zygo 干涉仪实

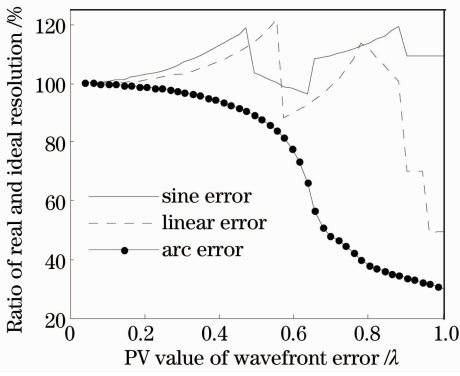


图 16 分辨本领随波前差 PV 值变化曲线
Fig. 16 Resolution ratio changing with PV value of wavefront error

测衍射波前比较,结果如图 17 和图 18 所示,实测衍射波前和重构衍射波前 PV 值和均方值相对误差均不大于 7.8%。

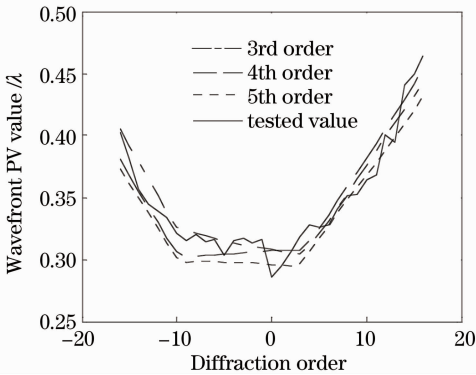


图 17 实测与重构衍射波前 PV 值比较
Fig. 17 Contrast of PV value of tested and reconstructed wavefronts

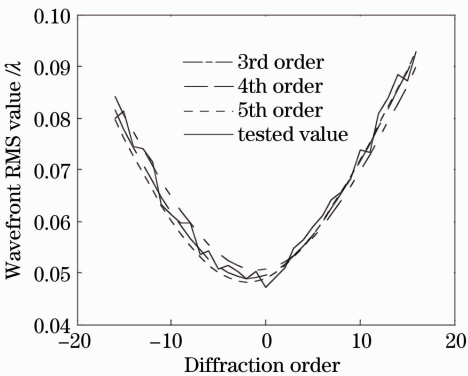


图 18 实测与重构衍射波前 RMS 值比较
Fig. 18 Contrast of rms value of tested and reconstructed wavefronts

根据(7)式和(11)式,可对重构衍射波前和 Zygo 干涉仪实测衍射波前的光栅衍射谱分布及光栅分辨本领、卫线和杂散光等指标进行对照分析。图 19 和图 20 分别给出了实测与重构的+7 级和-16 级衍射

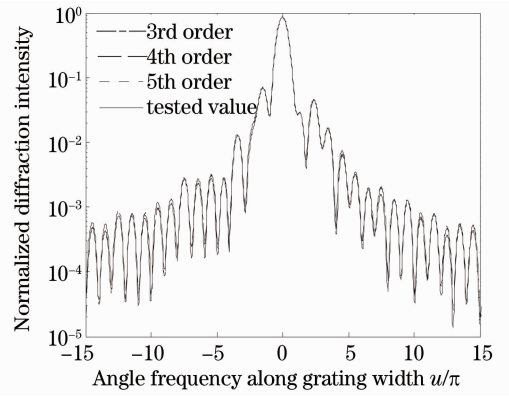


图 19 实测与重构的+7 级波前衍射光强分布
Fig. 19 Contrast of intensity distribution of tested and reconstructed wavefronts of +7 order

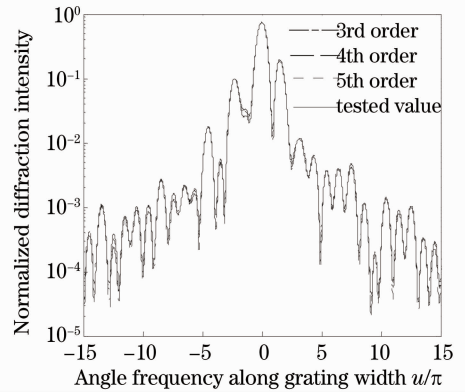


图 20 实测与重构的-16 级波前衍射光强分布
Fig. 20 Contrast of intensity distribution of tested and reconstructed wavefronts of -16 order

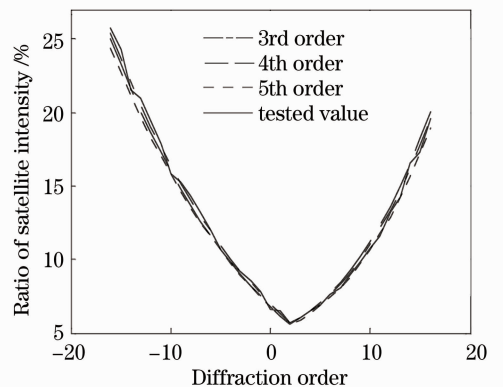


图 21 实测与重构波前的卫线强度曲线
Fig. 21 Satellite curves of tested and reconstructed wavefronts

波前在光栅色散方向的衍射光强分布情况,两图重构波前与实测波前计算结果的归一化相关系数^[19]大于 99.9%,主谱强度相对误差小于 3.5%。图 21 给出了根据实测波前与根据表 1 数据重构的-16 级至+16

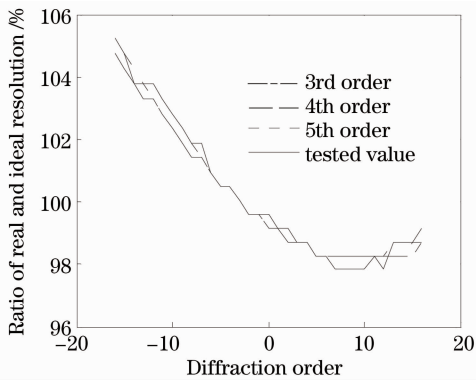


图 22 实测与重构波前的分辨本领曲线

Fig. 22 Resolution ratio curves of tested and reconstructed wavefronts

级衍射波前计算得到的最大卫星线强度与主谱强度之比随各衍射级次变化的曲线,实测波前与三次重构波前计算结果最大相对误差为 6.1%。由(13)式可知,杂散光与衍射波前的 RMS 值的平方近似呈正比关系,由实测与重构波前计算的杂散光随着衍射级次的变化趋势与图 18 相同,即在零级左右最小,级次越高杂散光越强。图 22 给出了由(12)式算得的实测与重构波前分辨本领比率,实测与重构衍射波前分辨本领计算相对误差小于 0.5%。

5 结 论

对光栅锥面衍射情况下的刻线误差、基底面型误差与光栅衍射波前关系进行了分析,提出了任意衍射级次光栅衍射波前反演分析方法,并实现了光栅基底面型误差和刻线误差的分离。得出如下结论:1)光栅衍射波前差主要由刻线误差和基底面型误差造成,用提取的刻线误差和基底面型误差可实现对光栅锥面衍射条件下任意入射角、任意衍射级次和使用波长的光栅衍射波前反演和光栅光谱性能指标分析;2)基底面型误差对光栅杂散光和其他低衍射级次的光栅指标影响较大,高精度光栅应选用高面型质量的基底;3)对于机械刻划光栅而言,光栅刻线形状的不重复性和刻线变间距特性等刻线误差是影响光栅质量的重要原因。由于刻线误差对光栅指标的影响随着衍射级次增加而增大,因此,刻划高衍射级次和高刻线密度光栅时,对刻划机的运行精度和环境条件(温度、湿度和气压等)要求更为严格,良好的外界环境条件是高精度光栅刻划的必要保障。Zygo 干涉仪只能对光栅衍射波前低频成份进行测量,但是若将本文方法移植到以双频激光干涉仪为测量反馈元件的闭环控制式光栅刻划机中,则

有可能实现衍射波前高频信息的实时采集,并在线分析光栅的性能指标。

参 考 文 献

- 1 T. Kita, T. Harada. Ruling engine using a piezoelectric device for large and high-groove density gratings [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(10): 1399~1405
- 2 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
- 3 T. Jitsunol, S. Motokoshi, T. Okamoto *et al.*. Development of 91 cm size gratings and mirrors for LEFX laser system[J]. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2008, **112**(3): 032002
- 4 Yu Lei, Qu Yi, Lin Guanyu *et al.*. Design and study of an optical system for a far ultraviolet imaging spectrograph in 120~180 nm carried by satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112011
于磊, 曲艺, 林冠宇等. 120~180 nm 星载远紫外电离层成像光谱仪光学系统设计与研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112011
- 5 D. Nevejsans, E. Neefs, E. V. Ransbeeck *et al.*. Compact high-resolution spaceborne echelle grating spectrometer with acousto-optical tunable filter based order sorting for the infrared domain from 2.2 to 4.3 μm [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(21): 5191~5206
- 6 Deng Lin, Lu Danfeng, Qi Zhimei *et al.*. Mach-Zehnder interferometers based on double gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1973~1976
邓琳, 逯丹凤, 祁志美等. 基于双光栅的马赫-曾德尔干涉仪的初步研制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1973~1976
- 7 Bayanheshig, Li Yan, Wu Na *et al.*. Numerical analysis and measurement of stray light from UV ruled gratings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(8): 1784~1788
巴音贺希格, 李燕, 吴娜等. 紫外平面刻划光栅杂散光数值分析及测试[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(8): 1784~1788
- 8 T. N. Woods, R. T. Wrigley III, G. J. Rottman *et al.*. Scattered-light properties of diffraction gratings[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(19): 4273~4285
- 9 T. Suzuki, H. Kubo, T. Yamashita *et al.*. High-resolution multi grating spectrometer for high quality deep UV light source production[C]. *SPIE*, 2001, **4346**: 1254~1261
- 10 E. G. Loewen, E. Popov. *Diffraction Gratings and Applications* [M]. New York: Marcel Dekker, 1997. 428~432
- 11 G. W. Stroke, S. Flugge. *Handbuch der Physik*[M]. Berlin: Springer, 1967. 445~574
- 12 M. C. hutley. *Diffraction Grating* [M]. London: Academic Press, 1982. 42~73
- 13 S. Yokozeki, S. Sawa. Interferometric testing of grating using moire method [J]. *Jan. J. Appl. Phys.*, 1975, **14**(5): 465~470
- 14 Z. Jaroszewicz. Interferometric testing of the spacing error of a plane diffraction grating [J]. *Opt. Commun.*, 1986, **60**(6): 345~349
- 15 G. W. Stroke. Attainment of high-resolution gratings by ruling under interferometric control [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1961, **51**(12): 1321~1339
- 16 Yu Haili, Qi Xiangdong, Bayanheshig *et al.*. Solving resolution of diffraction gratings using coefficients of Zernike polynomials [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(1): 264~267

- 于海利, 齐向东, 巴音贺希格 等. 利用泽尼克系数求取衍射光栅的分辨本领[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, **32**(1): 264~267
- 17 M. G. Moharam, T. K. Gaylord. Three-dimensional vector coupled-wave analysis of planar-grating diffraction [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, **73**(9): 1105~1112
- 18 Bayanheshi. The second kind angular dispersion and the analysis of characteristics of diffraction grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(7): 2118~2121
- 巴音贺希格. 衍射光栅的第二类角色散及其特性分析[J]. 物理学报, 2004, **53**(7): 2118~2121
- 19 Ding Deqiang, Ke Xizheng. Research on generalized mathematic radiation model for white LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2536~2540
- 丁德强, 柯熙政. 一种通用白光 LED 数学发光模型研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2536~2540

栏目编辑: 李文喆