

文章编号 1004-924X(2014)10-2674-09

光栅刻划刀架系统的运行精度对光栅光谱性能的影响

杨 超^{1,2*}, 于海利¹, 冯树龙¹, 李晓天¹, 齐向东¹, 姜 珊^{1,2}, 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. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要:采用菲涅耳-基尔霍夫衍射理论建立了存在刻线弯曲和刻线位置误差的光栅衍射谱成像数学模型,分析了上述误差对光栅光谱性能的影响。针对刻划刀架系统运行不稳定问题,设计了一套光学测量结构,并提出了刻划刀架系统的机械改进方案:采用双侧柔性铰链式结构代替原有的鞍型滑块与刻划刀架的固定连接方式。最后,进行了刻划刀架系统运行稳定性测试和光栅刻划实验。刻划刀架运行稳定性测试实验表明:改进后的刻划刀架系统运行稳定性比改进前有显著改善,位移曲线重复性误差 PV 值由 127 nm 降低到 13 nm,降低了约 89%。光栅刻划实验表明,刻划刀架系统改进后,光栅光谱性能有明显的改善,光栅杂散光得到了有效抑制。得到的实验结果与仿真分析结果较为一致,为提高机械刻划光栅质量提供了理论及技术保障。

关 键 词:刻划刀架;刻划光栅;刻线弯曲;刻线位置误差;光栅光谱

中图分类号:O436.1;TN305.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142210.2674

Influence of running accuracy of ruling carriage system on grating spectrum performance

YANG Chao^{1,2*}, YU Hai-li¹, FENG Shu-long¹, LI Xiao-tian¹,
QI Xiang-dong¹, JIANG Shan^{1,2}, TANG Yu-guo¹

(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)

* Corresponding author, E-mail: yangchaoby@gmail.com

Abstract: A grating diffractive spectral imaging model with ruling line bend and ruling line position errors was established based on the Fresnel-Kirchhoff diffraction theory, and the effect of these errors mentioned above on grating spectral properties was analyzed. For the instability of ruling carriage system, an optical measuring system was designed, and a mechanical improvement for the ruling carriage system was proposed. It was implemented by adopting a bilateral flexible hinge structure to replace the fixed linking method of original saddle slider pattern and ruling carriage system. Finally, The experiments on the stability test of ruling carriage system and the grating ruling test were performed. The

收稿日期:2013-11-20; **修订日期:**2014-01-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60478034);国家创新方法工作专项资助项目(No. 2008IM040700);国家重大科研装备研制项目(No. ZDY2008-1);国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 11YQ120023);吉林省重大科技攻关项目(No. 09ZDGG005);国家 973 项目资助(No. 2014CB049500)

experiment on the stability test of ruling carriage system shows that running stability of the improved score tool holder system is improved significantly as compared to that before improvement, and the displacement curve repeatability error (PV value) has reduced from 127 nm to 13 nm, decreased about 89%. Moreover, the grating ruling experiment shows that the grating spectrum performance after improving ruling carriage system has improved greatly, and the stray light has been effectively suppressed. These results obtained are in agreement with that of simulation, and provides theory and technological bases for improving grating ruling quality.

Key words: ruling carriage; machine-ruling grating; grating line curve; location error of grating line; grating spectrum

1 引言

光栅是一种分光元件,常应用于各类光谱仪器中^[1-5],其光谱性能直接影响光谱仪的光谱解析能力。机械刻划机是制作光栅的基本设备,机械刻划光栅质量受光栅刻划机机械加工误差及装调误差等^[6-7]因素的影响,常出现刻划刀尖实际运动轨迹与理想轨迹(即直线)之间存在偏差,简称为刻划刀架系统的运行稳定性问题,这是目前国内外光栅刻划机研究学者关注的主要问题之一。刻划刀架系统主要由石英导轨、刻划刀架组件及驱动结构组件等组成。Bobcock^[8]等将刻划刀架系统的双导向导轨结构改进为单导向导轨结构,大大降低了机械装调难度;Harrison^[9]等人在此基础上,对导向导轨的厚度进行了合理设计,将 MIT-C 机中导向导轨的厚度由 50 mm 改进为 100 mm,降低了光栅刻线弯曲。为了降低地面振动对光栅刻线位置误差的影响,Harrison^[10-11]等改进了导向导轨底座的固定位置,将原有的与地面直接固定方式更改为与刻划机主机座固定。为了进一步降低光栅刻线位置误差,他们还对刻划刀架系统机械结构进行了改进设计,当外界存在分度方向的位移误差输入时,传递至金刚石刻刀的位置误差量会大幅度降低。此外,Harrison 等改进了刻划刀架与外界驱动力的连接方式,将外界驱动力对刻划刀架进行直接驱动方式更改为间接驱动方式,改进后的结构通过滚珠轴承削弱了外界瞬时扭矩对刻划刀架系统运行稳定性的影响,机械改进前后结构的刻划刀架与导向导轨位移变化量的 PV 值由 0.1 个干涉条纹降低至 0.05 个干涉条纹,改进后的结构明显优于原结构。实

际上,刻划刀架系统稳定性是刻线位置误差和光栅刻线弯曲误差^[12]的主要来源之一,上述两种误差将直接影响光栅光谱性能。

鉴于此,本文通过菲涅耳-基尔霍夫衍射理论^[13]分析了刻线弯曲和刻线位置误差对光栅光谱性能的影响,建立了傅里叶变换理论模型,分析了上述两种刻线误差对光栅性能的影响。同时,根据分析结果对长春光机所 2 号光栅刻划机的刻划刀架系统进行了机械结构改进,并设计了一套激光干涉仪测量光路,对机械改进前后结构进行了测量分析。最终进行了光栅刻划实验,对机械改进前后刻划的光栅光谱性能进行对比分析。完善了光栅的光谱分析理论并提高了机械刻划光栅质量。

2 非理想平面光栅傅里叶变换的理论基础及分析

2.1 理论基础

理想平面光栅的反射函数(等效透射函数)^[14]可表示为:

$$t(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_m \exp(-i2\pi mx/d), \quad (1)$$

其中: c_m 是傅里叶级数展开常数, m 为衍射级次, x 轴为光栅子午方向, d 为光栅常数, $2\pi x/d$ 为光栅相位。

为了计算方便,假设平面光栅同时存在刻线弯曲和刻线位置误差,则此时含有刻线位置误差 $g(x)$ 和等间距刻线弯曲 $f(y)$ ^[15] 的平面光栅的相位可表示为:

$$\varphi = 2\pi[x + g(x) + f(y)]/d, \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} g(x) = \sum_i b_i x^i, i = 0, 1, 2, \dots \\ f(y) = \sum_j c_j y^j, j = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)和式(3)代入到式(1)中,可得光栅的反射函数(等效透射函数):

$$t(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_m \exp\{-i2\pi m[x + g(x) + f(y)]/d\}, \quad (4)$$

入射至光栅表面的单色平面波函数为:

$$E(x, y) = E_0 \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)]$$

$$f_x = \frac{\sin(\alpha_0)}{\lambda}, f_y = \frac{\sin(\beta_0)}{\lambda}. \quad (5)$$

为分析方便,令 $\beta_0 = 0$,即光束沿光栅法平面入射,此时:

$$E(x, y) = E_0 \exp[i2\pi x \sin(\alpha_0)/\lambda]. \quad (6)$$

根据式(4)、(6)及菲涅耳-基尔霍夫衍射原理,得到距光栅表面距离为 $z(z=r)$ 处的衍射光复振幅分布为:

$$U_1(x, y, z) = t(x, y) E(x, y) h(x, y, z), \quad (7)$$

其中, $h(x, y, z)$ 为脉冲响应函数。

$$h(x, y, z) = \exp(ikr)/(i\lambda r), \quad (8)$$

$$k = 2\pi/\lambda, r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (9)$$

若在 z 处加一个焦距为 f_0 的理想透镜,则在焦距处的衍射光复振幅和光强分布为:

$$\begin{cases} U_2(x_2, y_2, z_2) = h(x, y, z) U_1(x, y, z) \\ \exp[-ik(x^2 + y^2)/2f_0] \\ I = U_2 U_2^* \end{cases} \quad (10)$$

将笛卡尔坐标转换为角谱坐标,根据转换关系:

$$\begin{cases} u = x W_G \cos(\alpha_d)/\lambda f_0 \\ v = y L_G \cos(\alpha_d)/\lambda f_0 \end{cases}, \quad (11)$$

其中: W_G 和 L_G 分别为光栅的宽度和长度, α_d 为光栅的衍射角。

若已知刻线弯曲和刻线位置误差函数,根据式(7)~(11),即可分析非理想光栅在焦平面上在给定衍射级次 m 时的光栅衍射光强分布情况,进而得到上述刻线误差对光栅光谱性能的影响。

2.2 刻线弯曲和刻线位置误差对光栅光谱性能的影响分析

图 1 所示为光栅刻划机刻划的并归一化的光栅刻线弯曲形状。图 2(a)所示为光束正入射($\alpha_0 = 0$)至光栅表面时,理想光栅的 +10 级衍射光强等值线图,横坐标(u 轴)为光栅子午方向,纵坐标

(v 轴)为光栅弧矢方向。设光栅波前差分别为 2λ 和 4λ ,根据公式(10)计算相同入射条件下, +10 级衍射光强等值线图,如图 2(b)和图 2(c)所示。大部分能量以较小的展宽量分布在 v 轴正向的零点附近位置,小部分能量以较大的展宽量分布在 v 轴负向位置,这是由于该光栅的刻线斜率为正

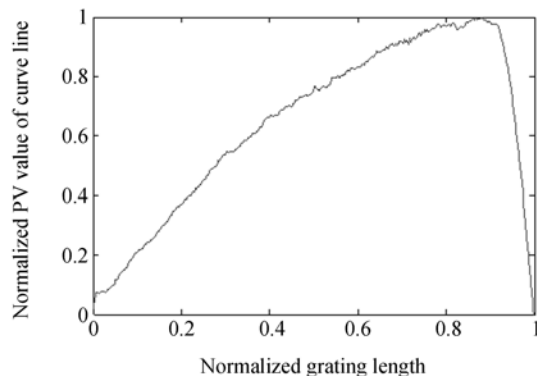
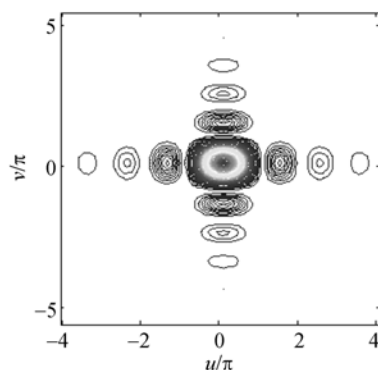


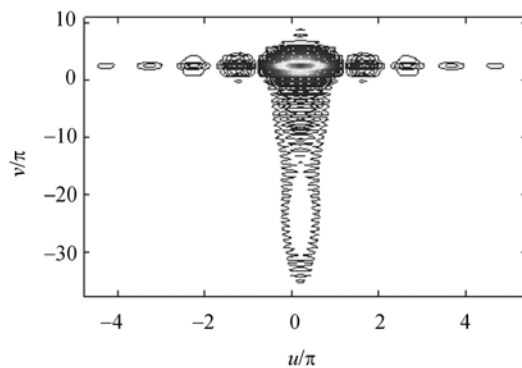
图 1 光栅刻线弯曲形状

Fig. 1 Profile curves of grating line



(a) 理想光栅光强衍射谱

(a) Ideal grating intensity diffraction spectrum



(b) 波前差为 2λ

(b) 2λ wavefront

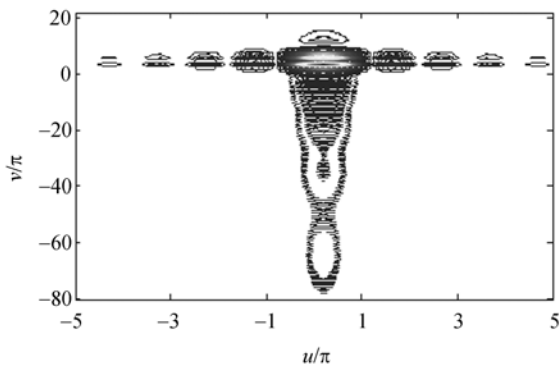
(c) 波前差为 4λ (c) 4λ wavefront

图 2 刻线弯曲光栅光强分布等值线图

Fig. 2 Contour graph of curved-line grating's diffraction intensity distribution

的部分占总光栅刻线长度的 80% 以上,刻线斜率为正的部分光栅使衍射光强在 v 轴正向发生展宽,刻线斜率为负的部分恰恰相反。

相比于理想光栅,刻线弯曲光栅衍射光强在弧矢方向发生明显展宽,且波前差越大在弧矢方向能量分布越多,展宽范围越大;而刻线弯曲光栅光谱性能与理想光栅相比,在光栅子午方向没有明显变化。

图 3 为 $v = \pm 2\pi, -4\pi$ 时的刻线弯曲光栅(衍射波前差为 4λ)与理想光栅在光栅子午方向的归一化衍射光强曲线对照图,图 3(a)和图 3(b)的 v 值分别为 $-10\pi \sim 10\pi$ 和 $70\pi \sim 100\pi$ 。由图 3 可知,刻线弯曲光栅和理想光栅在子午方向的衍射光强曲线较为一致,且刻线弯曲光栅各次极大与理想光栅衍射谱相应次极大的比值相对误差小于 0.06%,分辨本领相对误差小于 0.004%。考虑到实际光栅的衍射波前差一般不大于 2λ ,因此光

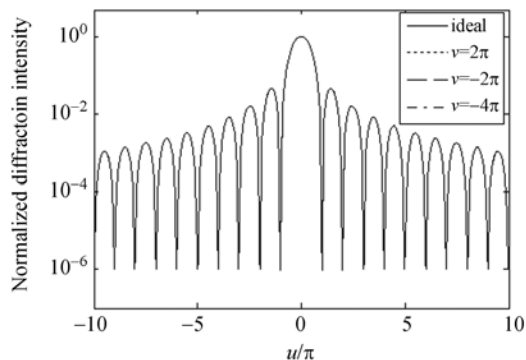
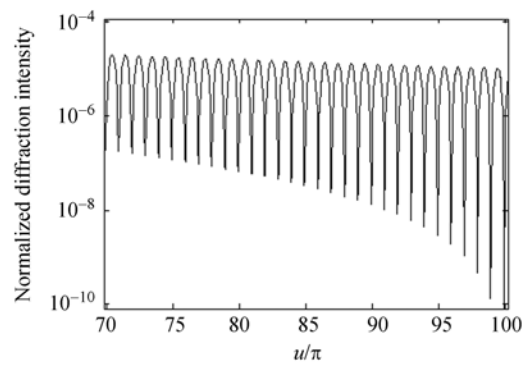
(a) $-10\pi \sim 10\pi$ (b) $70\pi \sim 100\pi$

图 3 光栅子午方向衍射光强实际值与理想值比较

Fig. 3 Comparison between real and ideal diffraction intensity distributions in meridional direction

栅等间距刻线弯曲对光栅杂散光和分辨本领等光栅光谱性能指标的影响较小。

由于光栅衍射谱分布的对称性,当光栅刻线只存在间距变化,不存在刻线弯曲时,其对光栅子午和弧矢方向的光栅光谱性能影响与刻线弯曲光栅恰好相反。即光栅刻线位置误差主要影响光栅子午方向光谱性能,对弧矢方向影响较小。

3 刻划刀架系统改进设计

由上述分析可知,光栅刻线弯曲和刻线位置误差分别主要影响着弧矢和子午方向的光栅光谱性能,而光栅刻划机刻划刀架系统是导致上述两种误差的重要来源,因此本文对刻划刀架系统进行了改进设计和实验分析。

3.1 刻划刀架系统改进前结构

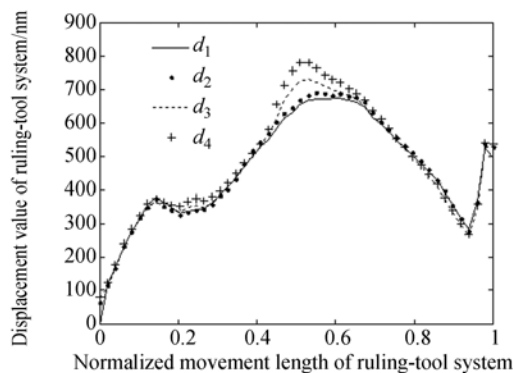
改进前的光栅刻划刀架系统结构如图 4 所示,主要由鞍型滑块、弹性滑脚、承重滑脚、刚性滑脚、导向滑脚、封闭弹簧以及刻划刀架等组成。鞍型滑块骑于石英导轨上,刀架侧采用 3 个刚性滑脚,与其另一侧带有 3 个有弹簧封闭力的弹性滑脚共同作用,使鞍型滑块与石英导轨两侧面接触。

该结构中鞍型滑块与刻划刀架固定连接,为非线性弹性系统。由于鞍型滑块运动过程中会受石英导轨面型误差、推拉杆运动过程位移偏差以及石英导轨变形等影响产生扭转和偏移。当鞍型滑块相对于石英导轨发生如图 5 所示偏移时,设偏移量为 d_1 。由于鞍型滑块与刻划刀架刚性连接,此时鞍型滑块顶部滑脚 G 为支点使刻划刀架

反射镜固定在石英导轨上,作为参考反射镜。采用双频激光干涉仪对测量反射镜在 y 轴方向的位移稳定性进行单点测量,以此反映刀架安装板和石英导轨之间的位移变化^[18]。若采用该光路结构对改进前的刻划刀架系统进行测量,只需将测量反射镜直接固定在鞍型滑块的刀架侧。

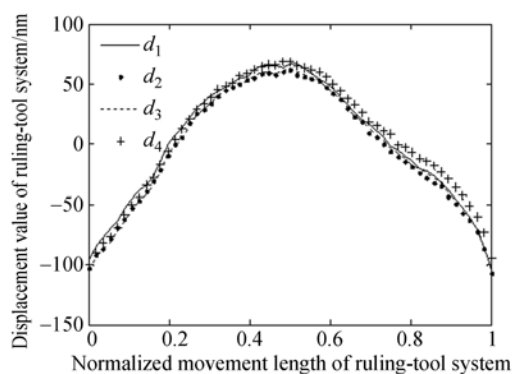
4 实验验证

首先,对改进前和改进后的刻划刀架系统进行稳定性情况进行测试。图 9 所示为刻划刀架系统改进前后 4 次测量位移变化的叠加曲线。可以看出刀架系统改进前位移曲线重复性误差 PV 值约为 127 nm,平均值约为 16.4 nm;改进后位移



(a) 改进前

(a) Before correction



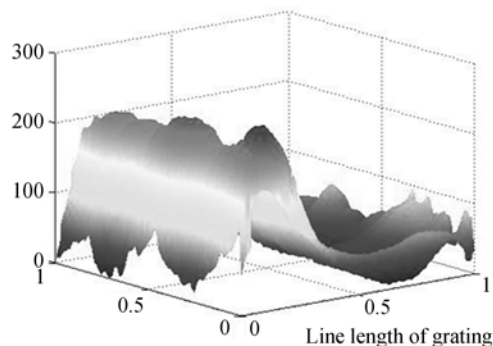
(b) 改进后

(b) After correction

图 9 刻划刀架系统改进前后鞍型滑块与石英导轨之间的位移曲线图

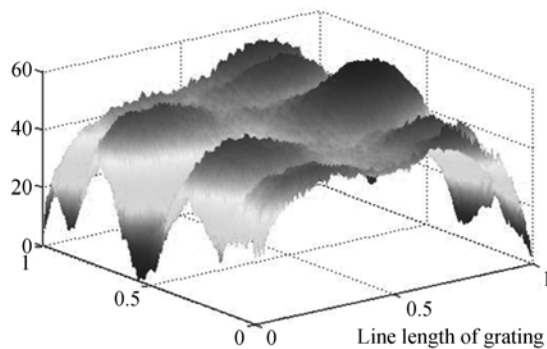
Fig. 9 Displacement curves between rail and saddle slider of saddle slider system before and after modifications

曲线重复性误差 PV 值约为 13 nm,平均值约 5 nm。相比于改进前,位移曲线重复性误差 PV 值降低了 89%,平均值降低了约 70%。



(a) 改进前

(a) Before correction



(b) 改进后

(b) After correction

图 10 改进前后刻划刀架系统对应的光栅刻线形状

Fig. 10 Grating line shapes of saddle slider system before and after corrections

其次,采用改进前后的刻划刀架系统分别进行了 600 line/mm 光栅刻划实验。图 10(a)、(b)分别为采用 ZYGO 干涉仪得到的光栅刻线形状,横坐标为光栅刻线长度。由图 10(a)可知,改进前后刻划刀架系统对应的光栅刻线重复性误差 PV 值分别为 126.44 和 39.8 nm,平均值分别为 30.9 nm 和 9.6 nm。相比于改进前刻划刀架系统而言,改进后刻划刀架系统对应的位移曲线重复性误差 PV 值降低了 68.5%,平均值降低了约 69%。图 11 和 12 所示为采用 532 nm 激光器分别照射改进前后刻划刀架系统对应光栅,得到的光栅-2 和-3 级衍射光和两个级次之间杂散光的分布情况,改进后刻划刀架系统所刻划光栅的

杂散光情况与改进前相比有明显降低。



图 11 刀架系统改进前的光栅衍射光

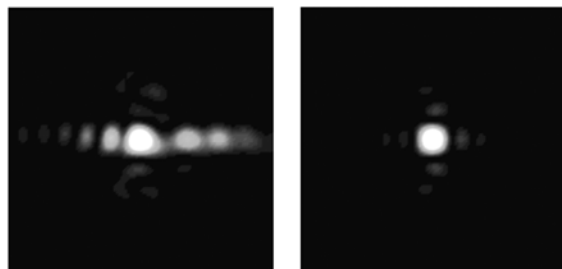
Fig. 11 Grating diffraction light before modification



图 12 刀架系统改进后的光栅衍射光

Fig. 12 Grating diffraction light after modification

最后,为了验证刻划刀架系统改进前后对光栅光谱性能的影响,采用非理想平面光栅傅里叶变换理论对刻划刀架系统改进前后的光栅刻线形状进行分析。设光栅衍射级次 $m=+3$,将图 10(a)和图 10(b)的刻线形状分别代入式(10),通过计算得到刻划刀架系统改进前后光栅光强分布图(见图 13),横坐标代表子午方向。由图 13(a)可知,刻划刀架系统改进前的光栅能量在子午方向



(a)改进前

(b)改进后

(a) Before correction

(b) After correction

图 13 刻划刀架系统改进前后计算光强分布图

Fig. 13 Counting grating light intensity distributions of saddle slider system before and after corrections

发生明显展宽,且出现较明显的光栅杂散光。由图 13(b)可知,刻划刀架系统改进后的光栅能量在子午方向有了明显提高,大部分能量集中在主衍射级次附近,光栅光谱性能有了明显的改善。

综上所述,刻划刀架系统运行稳定性实验和光栅刻划实验均表明,改进后刻划刀架系统在很大程度上提高了刻划系统运行稳定性,减小了刻线位置误差。此外,光栅刻划实验得到的光栅主衍射级次间的光栅杂散光分布情况(见图 11 和图 12)和采用非理想平面光栅傅里叶变换理论所得到的光栅衍射光强分析结果较为一致,即改进后的光栅刻划系统对应的光栅杂散光等光栅光谱性能与刻划刀架系统改进前相比有显著改善。

5 结 论

本文采用菲涅耳-基尔霍夫衍射理论建立了非理想光栅衍射谱成像数学模型,分析了刻线弯曲和刻线位置误差对光栅光谱性能的影响。同时设计了一套刻划刀架系统光学测量结构,并提出了刻划刀架系统的机械改进方案——采用双侧柔性铰链式结构代替原有的鞍型滑块与刻划刀架的固定连接方式,得出如下结论:(1)采用非理想光栅衍射谱成像数学模型对光栅性能分析表明,光栅子午方向的光谱性能主要取决于光栅刻线位置误差,光栅刻线弯曲误差对其影响较小;(2)刻划刀架运行稳定性测试实验验证了改进后的刻划刀架系统的运行稳定性有显著改善,改进后的刻划刀架系统的运行稳定性位移曲线重复性误差 PV 值由 127 nm 降低到 13 nm,降低了约 89%;(3)光栅刻划实验表明,刻划刀架系统改进后,光栅的光谱性能有明显的改善,有效抑制了光栅杂散光,该实验结果与光栅光谱性能的理论分析结果较为一致。以上理论及研究结果为提高机械刻划光栅质量提供了理论及技术保障。

参考文献:

- [1] 徐国权,熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. 中国光学,2013,6(3):306-317.
XU G Q, XIONG D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering [J]. Chi-

nese Optics, 2013, 6(3):306-317. (in Chinese)

- [2] 谭震宇,张峰,陈长鸣,等. 650 nm 聚合物阵列波导光栅波分复用器设计[J]. 中国光学,2012,5(1):71-76.
TAN ZH Y, ZHANG F, CHEN CH M, et al.. Design of wavelength division multiplexer of polymer

- arrayed waveguide grating at 650 nm[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 71-76. (in Chinese)
- [3] 陈泳屹, 秦莉, 王立军, 等. 金属光栅的非对称透射现象研究[J]. *发光学报*, 2013, 34(8): 1040-1045.
CHEN Y Y, QIN L, WANG L J, *et al.*. Numerical study on the unsymmetrical transmission phenomenon in metal gratings [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(8): 1040-1045. (in Chinese)
- [4] 郑改革, 詹煜, 曹焜, 等. 亚波长金属光栅结构的制备与矢量衍射理论分析[J]. *发光学报*, 2013, 34(7): 935-939.
ZHENG G G, ZHAN Y, CAO K, *et al.*. Fabrication of subwavelength metal Grating and analysis with vector diffraction theory [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(7): 935-939. (in Chinese)
- [5] 张祥伟, 宁永强, 秦摇莉, 等. 利用亚波长矩形金属光栅稳定 980 nm 高功率垂直腔面发射激光器偏振[J]. *发光学报*, 2013, 34(19): 1188-1193.
ZHANG X W, NING Y Q, QIN Y L, *et al.*. Stable polarization control of 980 nm high-power vertical-cavity surface-emitting laser using sub-wavelength rectangular-metal-gratings[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34 (19): 1188-1193. (in Chinese)
- [6] 蔡锦达, 王英, 颜廷萌, 等. 衍射光栅刻划机的闭环控制系统[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2416-2423.
CAI J D, WANG Y, YAN T M, *et al.*. Close-loop control system for diffraction grating ruling machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20 (11): 2416-2423. (in Chinese)
- [7] 时轮, 郝德阜, 齐向东. 高精度衍射光栅刻划机的最新技术进展[J]. *仪器仪表学报*, 2001, 22, (4): 438-439.
SHI L, HAO D F, QI X D. State-of-the-art of the High-precision Diffraction Grating Ruling Engine [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, 22, (4): 438-439. (in Chinese)
- [8] HAROLD D, BABCOCK H W B. The ruling of diffraction gratings at the mount wilson observatory [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1951, 11(41): 776-786.
- [9] GEORGE R H. Techniques for ruling improved large diffraction gratings final report [C]. *Massachusetts Institute of Technology*, 1971, 1-14.
- [10] GEORGE R, HARRISONAND G W S. Interferometric control of grating ruling with continuous carriage advance [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1955, 45 (2): 112-120.
- [11] GEORGE R H. The production of diffraction gratings development of the ruling art [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1949, 39 (6): 413-425.
- [12] YOKOZEKI S, SAWA S. Interferometric testing of grating using moire method [J]. *Jap. J. Appl. Phys.* 1975, 14(1): 465-470.
- [13] 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]. 中国科学院大学(长春光学精密机械与物理研究所), 2004.
BAYINHESHIG. *The study on the dispersion theory, design, manufacture, and efficiency test of diffraction gratings* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [14] 巴音贺希格, 高键翔, 齐向东, 等. 9.77 μm 激光器零级耦合输出选频振荡光栅的设计和研制[J]. *中国激光*, 2005, 32(3): 301-305.
BAYINHESHIG, GAO J X, QI X D, *et al.*. Design and manufacture for select frequency oscillation grating in the zero-order coupling output of 9.77 μm laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(3): 301-305. (in Chinese)
- [15] 李晓天, 巴音贺希格, 齐向东, 等. 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[J]. *光学学报*, 2012, 32 (11): 1105001.
LI X T, BAYINHESHIG, QI X D, *et al.*. Two-dimensional fast Fourier transform method of analyzing the influence of plane grating's line error and surface error [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32 (11): 1105001. (in Chinese)
- [16] 李星海, 丁亚林, 惠守文, 等. 单轴柔性铰链柔度系数试验装置的设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19 (7): 1152-1159.
LI H X, DING Y L, HUI SH W, *et al.*. Design of compliance factor experiment setup for single-axis flexure hinge [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19 (7): 1152-1159. (in Chinese)

- [17] 刘德忠, 费仁元, 许意华, 等. 柔性铰链微位移放大机构工作性能仿真[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(4): 595-597.

LIU D ZH, FEI R Y, XU Y H, *et al.*. Simulation on flexible hinge amplifier performance [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2003, 22(4): 595-597. (in Chinese)

- [18] 于海利. 基于双频激光干涉仪测量的大行程纳米

定位技术及其应用研究[D]. 中国科学院大学(长春光学精密机械与物理研究所), 2011.

YU H L. *Research a Large Stroke Nan-Positioning Technology and Application based on Dual-Frequency Laser Interferometer*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)

作者简介:



杨超(1986—), 女, 吉林长春人, 博士研究生, 主要从事衍射光栅刻划机纳米定位系统的研究。E-mail: yangchaoby@gmail.com

导师简介:



唐玉国(1967—), 男, 吉林人, 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

(版权所有 未经许可 不得转载)