

文章编号 1004-924X(2019)08-1727-10

空间分离式外差二自由度平面光栅干涉仪

邢 旭, 常 笛, 胡鹏程*, 谭久彬

(哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所 &

超精密仪器技术及智能化工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学), 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了实现平面二自由度位移测量, 设计并搭建了空间分离式外差二自由度平面光栅干涉仪, 并对所设计的光栅干涉仪的光学结构、测量原理、面内旋转安装误差补偿等进行了研究。基于平面光栅衍射特性和空间分离式外差光栅干涉结构设计并搭建了具有对称性的测头光路, 结合实际光学器件的特点, 利用琼斯矩阵分析了二自由度测量原理与显著降低周期非线性误差的特性。通过实验测定了光栅面内旋转安装误差以便于应用旋转矩阵对测量数据进行解耦。随后利用矩形和圆形轨迹分别验证了两测量轴在各自和同时运动的情况下, 所设计的平面光栅干涉仪的测量能力。实验结果表明, 在解耦补偿 0.350° 的光栅实际面内旋转安装误差的前提下, 该空间分离式外差二自由度平面光栅干涉仪能够实现压电位移台 $30\ \mu\text{m}$ 内的位移测量, 主要由机械振动等因素引起的误差不超过 $0.15\ \mu\text{m}$ 。本研究将空间分离式外差光栅干涉仪的测量维度拓展到了平面二自由度。

关键词: 光栅干涉; 空间分离外差干涉; 二自由度; 位移测量

中图分类号: TP744.3; TH822 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192708.1727

Spatially separated heterodyne grating interferometer for in-plane displacement measurement

XING Xu, CHANG Di, HU Peng-cheng*, TAN Jiu-bin

(Center of Ultra-precision Optoelectronic Instrument Engineering, Key Lab of Ultra-precision Intelligent Instrumentation (Harbin Institute of Technology), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: hupc@hit.edu.cn

Abstract: To measure two Degree-Of-Freedom (DOF) in-plane displacement, a spatially separated heterodyne grating interferometer was designed and built. The optical configuration, measurement principle, and in-plane rotary assembling error of this instrument were investigated. Based on the diffraction of the planar grating and the spatially separated heterodyne grating interferometry, a symmetrical double-diffracted optical configuration was designed and analyzed. The measurement principle and the elimination of periodic nonlinear errors were modeled and studied using Jones matrices for the components. In-plane rotary assembling errors around the z -axis were measured to decouple the measurement results for the x - and y -axes using a two-dimensional rotation matrix. Then, the square and circular paths of the grating were driven to evaluate the functionality of the

收稿日期: 2019-03-11; 修订日期: 2019-04-03.

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(No. 2017ZX02101006-005); 国家自然科学基金资助项目(No. 51675138)

proposed interferometer. The experimental results indicate that the proposed interferometer is capable of measuring the in-plane displacements of a nanopositioning stage within the range of 30 μm after compensation for the 0.350° rotary assembling error. The error attributed to mechanical vibration is less than 0.15 μm . In this investigation, 2-DOF in-plane measurement was demonstrated using a spatially separated heterodyne grating interferometer.

Key words: grating interferometry; spatially separated heterodyne interferometry; two degree of freedom; displacement measurement

1 引言

近年来,集成电路制造工艺正以“超越摩尔定律(More Moore)”的速度快速发展,半导体制程已经逐渐减小至十纳米以下^[1],这对超精密位移测量提出了愈加苛刻的要求,例如达到亚纳米甚至皮米量级的分辨力、环境鲁棒性好、多自由度测量等。平面光刻工艺作为半导体制造中最常用的技术之一,其先决条件是在晶圆表面上构建微结构^[2]。因此,无论是对光刻机掩模台还是工件台来说,平面二自由度的测量和定位都是必不可少的。

在实现纳米级位移测量的各种方案中,激光干涉仪和光栅干涉仪以其高精度和大量程的优点得到了广泛的关注^[3-7]。与激光干涉仪相比,光栅干涉仪采用栅距作为测量基准,对由温度、湿度和气压等环境参数导致的空气折射率变化并不敏感,更适用于变化的测量环境。在光栅干涉的基础之上,外差光栅干涉技术兼具光栅抗环境扰动和外差干涉信噪比高等优点,可以进一步降低测量噪声^[8]。然而,双频激光共轴入射的外差光栅干涉仪仍然受到外差干涉引起的周期非线性误差的影响^[9-10]。在实际应用中,需要对这一纳米量级的误差予以补偿或者消除。为了从原理上消除由光学混叠引起的周期非线性误差,我们在先前的研究中提出了空间分离式光栅干涉仪^[11],设计了一种垂直入射的二次衍射式外差光栅干涉仪的光学结构,并分析了其角度容差特性^[12-13]。德国 PTB 的 J. Guan 等人提出了一种斜入射的差分式外差光栅干涉仪结构,同样验证了它消除非线性误差的特性^[14],但斜入射式的光学结构不利于扩展到二自由度测量。

另一方面,光栅干涉仪的光学结构也使它便于扩展到多自由度测量。实现平面二自由度测量的一种简单方案是利用两个一维光栅各自对其中

一个自由度进行测量。尽管这种方法对光栅的要求并不高,但两光栅刻线区域的相互限制以及安装误差大大影响了这种方案的实际效果。与之相比,基于平面光栅的二自由度光栅干涉仪无需两套独立的干涉光路,可以在单一测头光路中实现面内二自由度测量,具有结构紧凑,充分利用光栅刻划区域,利于整体布局等优点。因此,目前常见的二自由度光栅干涉方案大多基于平面光栅实现^[15-16]。

为了满足日益增长的高精度、多自由度测量需求,实现高精度的平面二自由度测量,本文融合平面光栅干涉结构和空间分离式外差光栅干涉原理,设计了一种二次衍射的空间分离式外差平面光栅干涉仪。和斜入射的光学结构相比,垂直入射的光栅干涉仪更易于在单一测头光路中实现多自由度拓展。实验证明,所提出的空间分离式外差光栅干涉仪能够实现平面二自由度测量。

2 平面光栅干涉仪的结构与测量原理

本文设计的二自由度外差平面光栅干涉仪主要由分光调制的外差光源和空间分离的光栅测头两部分组成。

分光调制的外差光源示意图如图 1 所示。一束激光由单频激光器发射,进入分光比为 50 : 50 的非偏振分光镜(Beam Splitter, BS)后被分成两部分,再经过平面镜(M)调整方向后,分别由两个调制频率不同的声光调制器(AOM₁ 和 AOM₂)调制到 f_1 和 f_2 (不妨设 $f_1 < f_2$)。调制后的两光束分别各自经过一个偏振片(P₁ 和 P₂),其振动方向均被调整为和水平方向呈 α 角。 α 用于调节参考光束和测量光束的光强分布。此时,两束光的琼斯矩阵均可以归一化表示为:

$$\mathbf{E}_{\text{source}} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}. \quad (1)$$

最后,两束光分别经过光纤耦合器(FC₁和FC₂)耦合进入保偏光纤(Fiber₁和Fiber₂)并被传输至光栅干涉仪测头光路中。尽管光纤的耦合效率会带来光强损耗,提高了对干涉仪光源功率的需求,光纤传输式的光学结构仍然具有以下优势:可以将发热的光源远离光路,减小热漂移;便于光机结构的安装与调整;易于准直光路并具有较高的准直容差等。因此,光纤传输式的光学结构在光栅干涉领域得到了较为广泛的应用。

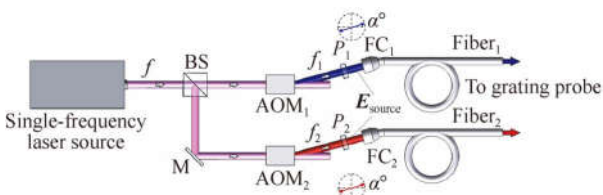
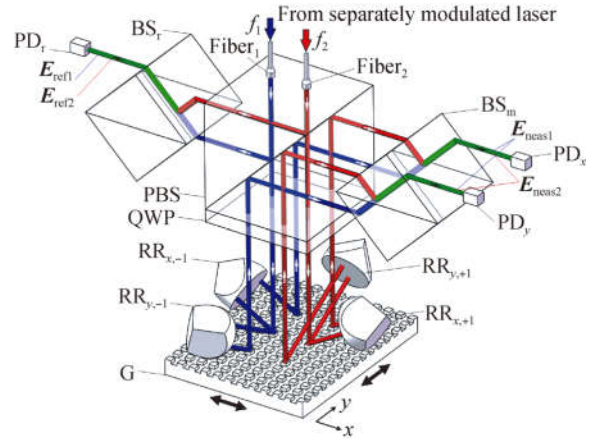


图 1 分光调制的外差光源示意图

Fig. 1 Schematic of separately modulated heterodyne laser

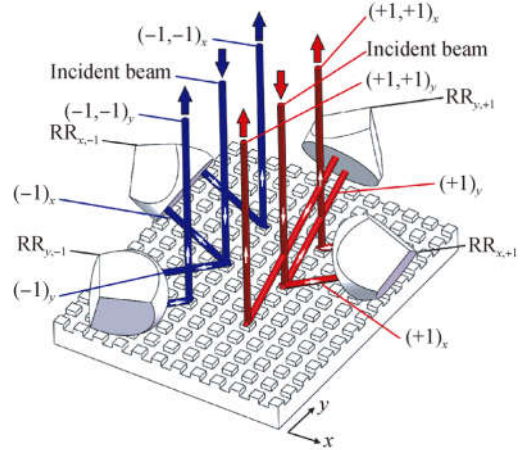
和传统的同轴共光路外差光源相比,两束不同频率的光束在分别调制的光源中独立产生,互不干扰,是空间分离式外差干涉仪避免偏振混叠现象的关键环节之一。但空间分离的干涉仪需要两光束最终合光以产生干涉信号,这大大提高了光机设计和光束调节的难度。尤其是合光造成的角度失配会大大减弱干涉信号强度,降低信噪比并进一步影响位移测量精度。此外,应用这种由光纤传输的分光调制外差光源时,其参考光路必须由干涉镜组中合光获取,以防止由于光纤移动等因素引起的两光束相位漂移对测量结果造成的影响。

空间分离式二自由度平面光栅干涉仪的测头结构如图 2 所示,主要由一个偏振分光镜(Polarized Beam Splitter, PBS),一个四分之一波片(Quarter Wave Plate, QWP),两个呈 45°角放置的非偏振分光镜(BS)和 4 个角锥棱镜(RR)构成。此外,图中还绘制出了被测的平面光栅(G)和相应的 3 个光电探测器(Photodetector, PD)。图中,起合光作用的 BS 按照其产生的参考或测量光束标识为 BS_r和 BS_m;用于接收参考信号、x 方向和 y 方向干涉信号的光电探测器分别以角标 PD_r,PD_x和 PD_y加以区分;4 个角锥棱镜同样在角标中标明了其作用的衍射光束的方向和级次。



(a) 光学结构图

(a) Optical configuration



(b) 二次衍射结构的细节图

(b) Detailed information of double-diffraction

图 2 空间分离式二自由度平面光栅测头结构

Fig. 2 Schematic of 2-DOF spatially separated grating probe

由图 2 可以看出,尽管两个频率分量的光束在空间上存在着一定的距离,但它们在合光之前所经过的光学元件的种类、数量和次序完全一致。根据琼斯矩阵的特性,在形成最终的干涉光束之前,两光束的偏振状态可以用同一琼斯矩阵表达。因此,这里尽量利用相同的琼斯矩阵进行描述以简化叙述。

考虑实际 PBS 透射和反射特性的琼斯矩阵为:

$$J_{\text{PBT}} = \begin{bmatrix} t_p & 0 \\ 0 & t_s \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$J_{\text{PBSR}} = \begin{bmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中: t_p , r_p , t_s 和 r_s 分别对应 PBS 对于 p 偏振光

和 s 偏振光的透射率和反射率。

类似地,作为合光镜组的非偏振分光棱镜 BS_m 和 BS_r 也具有相同的琼斯矩阵形式,不妨设为 J_{BSR} 和 J_{BST} ,其中各参数的具体数值应在光束斜入射情况下估计或计算。调制引起的微小频差对以上各具体数值的影响在分析中可以忽略不计。

考虑不同偏振态衍射效率的光栅琼斯矩阵可以表示为:

$$J_G = \begin{bmatrix} \sqrt{\eta_p} & 0 \\ 0 & \sqrt{\eta_s} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 η_p 和 η_s 分别为 p 光和 s 光对应级次的衍射效率^[4]。根据平面光栅的衍射特性,两个衍射方向上对于 p 光和 s 光的衍射效率也是有差异的, J_G 用来代表平面光栅对两个方向的各个相应级次衍射光的琼斯矩阵,而不同方向、级次和入射角的具体衍射效率数值在此不做更细致的区分。

非理想的角锥棱镜也会一定程度上改变光束的偏振态。因此,代表 4 个角锥棱镜特性的琼斯矩阵可以表示为:

$$J_{RR} = \begin{bmatrix} rr_{11} & rr_{12} \\ rr_{21} & rr_{22} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 4 个参数的具体数值是由光束入射角度和对角锥各个全反射面之间的顺序确定的^[17]。

快轴方向呈 45° 放置的 QWP 的琼斯矩阵为:

$$J_{QWP} = \begin{bmatrix} \frac{1+i}{2} & \frac{1-i}{2} \\ \frac{1-i}{2} & \frac{1+i}{2} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

此外,设保偏光纤的耦合效率表示为 c_{PM} ;光束在 BS 表面按 45° 入射角发生折射时进入棱镜的透射效率为 t_{g45} ,在另一端射出棱镜时的透射效率为 t_{a45} 。

根据以上基于实际器件特性对琼斯矩阵的预设,参考图 2(a)中的光路结构,下文将描述并分析所提出的平面光栅干涉仪测头的光路结构与特点。

来自分光调制外差光源的两束光经过保偏光纤传输,垂直入射至 PBS。在偏振分光面上,两束入射光被分为 s 偏振和 p 偏振两部分。其中,两束 s 偏振态的反射光束对称地进入参考光束的合光棱镜 BS_r 。首先,它们经过 45° 角的“空气-玻璃”分界面折射,从两侧斜入射到分光面的同一点分光并重新组合,得到对称的两束合光的干涉光

束,再经过 45° 角的“玻璃-空气”分界面出射。利用光电探测器接收其中一束干涉光束即可得到参考信号。

依次经过保偏光纤 \rightarrow PBS(反射) \rightarrow 合光镜组 BS_r ,参考光束中具有不同频率分量的两个光矢量可以分别表示为(忽略初位相的影响):

$$E_{ref1} = t_{a45} J_{BST} t_{g45} J_{PBSR} c_{PM} \cdot E_{source} \exp(-i \cdot 2\pi f_1 t), \quad (7)$$

$$E_{ref2} = t_{a45} J_{BSR} t_{g45} J_{PBSR} c_{PM} \cdot E_{source} \exp(-i \cdot 2\pi f_2 t). \quad (8)$$

因此,根据式(7)和式(8),经过光矢量叠加计算得到的参考光束光强可以表示为:

$$I_{ref} = |E_{ref1} + E_{ref2}|^2 \approx A_{ref} \{1 + \cos[2\pi(f_2 - f_1)t]\}, \quad (9)$$

式中 A_{ref} 为参考光束振幅。

在 PBS 分光面的另一侧,透射的 p 偏振分量经过 QWP 变为圆偏振光,随后垂直入射平面光栅发生衍射。根据平面光栅的衍射特性,每一束垂直入射光产生的衍射光束中,都包含有沿光栅刻线两个方向上的 4 束 ± 1 级衍射光。按照同时包含 ± 1 级次衍射光和 f_1, f_2 两频率分量的条件,可以分别挑选出在 x 方向和 y 方向上的两对衍射光实现二自由度的光栅干涉。图 2(b)对衍射光束的级次选择和空间传播方向进行了更为具体的描述。在图 2(b)中,所选择的 4 束衍射光的方向和级次对应表示为 $(+1)_x, (-1)_x, (+1)_y$ 和 $(-1)_y$ 。4 个角锥棱镜对应放置在所选的 4 束衍射光的空间光路上,用于产生平行返回的光束作为二次衍射的入射光。这 4 路入射光斜入射光栅表面,在 4 个不同的位置发生二次衍射以避免混叠。和第一次衍射类似,根据平面光栅衍射特性,在每个斜入射二次衍射中,所产生的衍射光有且仅有一束垂直光栅表面出射并回到光学镜组中。例如,对于 $(+1)_x$ 光束,其二次衍射后的各级衍射光中,只有沿 x 方向的 $+1$ 级衍射光是垂直出射的,这一光束在图 2(b)中被标识为 $(+1, +1)_x$ 。垂直出射的二次衍射光束再次经过 QWP 转换为 p 偏振光,并在 PBS 的分光表面反射,进入合光镜组 BS_m 形成两束共光路的测量光束。

依次经过保偏光纤 \rightarrow PBS(透射) \rightarrow QWP \rightarrow 光栅衍射 \rightarrow RR \rightarrow 光栅二次衍射 \rightarrow QWP \rightarrow PBS(反射) \rightarrow 合光镜组 BS_m ,这两束测量光束的光矢量相对于参考光束则较为复杂:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{meas1}} &= t_{\text{a15}} \mathbf{J}_{\text{BS T}} t_{\text{g15}} \mathbf{J}_{\text{PBS R}} \mathbf{J}_{\text{QWP}} \cdot \\ &\quad \mathbf{J}_{\text{G}} \mathbf{J}_{\text{RR}} \mathbf{J}_{\text{G}} \mathbf{J}_{\text{QWP}} \mathbf{J}_{\text{PBS T}} \mathbf{Q}_{\text{PM}} \cdot \\ \mathbf{E}_{\text{source}} &\exp[-i \cdot 2\pi(f_1 - 2\Delta f)t], \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{meas2}} &= t_{\text{a15}} \mathbf{J}_{\text{BS R}} t_{\text{g15}} \mathbf{J}_{\text{PBS R}} \mathbf{J}_{\text{QWP}} \cdot \\ &\quad \mathbf{J}_{\text{G}} \mathbf{J}_{\text{RR}} \mathbf{J}_{\text{G}} \mathbf{J}_{\text{QWP}} \mathbf{J}_{\text{PBS T}} \mathbf{Q}_{\text{PM}} \cdot \\ \mathbf{E}_{\text{source}} &\exp[-i \cdot 2\pi(f_2 + 2\Delta f)t], \quad (11) \end{aligned}$$

其中 Δf 用于表示光栅在 x 和 y 方向上运动所产生的光学多普勒频移,可以表示为:

$$\Delta f_k = \frac{|k|v}{d}, \quad (12)$$

其中: k 为衍射级次($k = \pm 1$), d 为光栅常数, v 为光栅在 x 或 y 方向上的运动速度。

与上文类似,式(10)和式(11)经过光矢量叠加计算得到的 x 或 y 方向上测量光束光强可以表示为:

$$\begin{aligned} I_{\text{meas}} &= |\mathbf{E}_{\text{meas1}} + \mathbf{E}_{\text{meas2}}|^2 \approx \\ A_{\text{meas}} &\left\{ 1 + \cos \left[2\pi(f_2 - f_1 + 4\Delta f)t + \frac{\pi}{2} \right] \right\}. \quad (13) \end{aligned}$$

同样, A_{meas} 为测量光束的光强系数。通过调节公式(1)中所提及的偏振方向夹角 α 可以调整参考光束和测量光束的光强系数 A_{ref} 和 A_{meas} , 在保证参考光束光强足够的前提下,提高测量光束的光强,而进一步提升测量信号的信噪比。

最终测量得到的位移 Δs 是由参考信号和对应 x 或 y 方向的测量信号的相位差 $\Delta\varphi$ 计算得到的,即:

$$\Delta s = \frac{d}{8\pi} \cdot \Delta\varphi = \frac{d}{4} \cdot \Delta f \cdot t, \quad (14)$$

其中 Δs , $\Delta\varphi$ 和 Δf 一样都代表着 x 和 y 两个方向的量。式(14)的系数同时也说明了所提出的空间分离式平面光栅干涉仪在两个方向上的二次衍射结构实现了光学四细分。

和传统共光路的外差光栅干涉结构相比,尽管实际 PBS 的琼斯矩阵如式(2)和式(3)所述存在偏振泄露,但它们对空间分离结构的影响仅仅在于改变光强系数,而不会产生 f_1 和 f_2 两频率分量的光学混叠。

和参考文献[12]中提出的用于单自由度测量的测头结构相比,所提出的光栅干涉镜组延续了它显著降低周期非线性误差和高准直容差的特性^[12-13]。此外由于单自由度和二自由度的测量镜组中均包含有由 PBS 和 QWP 组成的偏振镜组、由 BS_m 和 BS_r 组成的合光镜组,这部分共同结构可以作为一个通用于一维、二维、甚至三维测量

中的模块单元,有利于构建面向多自由度光栅干涉测量的光学结构。另一方面,所提出的光栅干涉镜组通过角锥棱镜的合理空间装配设计得到了更为对称且集中的二次衍射光斑位置。二次衍射结构能够将光栅偏摆引起的合光角度失配转化为位置失配,缓解对干涉信号强度的影响;集中的二次衍射光斑位置可以尽量减小光栅偏摆造成的光路变化;对称的光路设计有助于消除镜组热漂移造成的误差,且由于实际装配误差引起的光路非对称不会对测量结果造成明显影响。

3 二自由度平面位移测量实验

根据图 1 所示的分光调制外差光源和图 2 所示的空间分离式平面光栅干涉测头结构,本文搭建了实际光路并进行实验。实验选用的光源为 Sacher Lasertechnik Group 的 TEC500 型半导体激光器,能够提供功率为 30 mW,波长为 780 nm 的单频激光。光源发出的单频激光由两个 AA Opto Electronic 公司 MT80 型声光调制器进行调制,其调制频率分别为 80 MHz 和 85 MHz,分别对应上文分析中的 f_1 和 f_2 。实验所使用的定制平面光栅在 x 和 y 两个方向上的栅距均为 1 μm ,刻划区域为 125 mm \times 125 mm。光栅由 Physik Instrumente GmbH 公司 P-733.3DD 型三维纳米位移台驱动,该位移台能够在 x 和 y 方向上产生范围为 30 μm 、分辨力为 0.1 nm 的位移。该位移台内置有电容传感器,可以通过其软件控制界面获取数据作为比对。参考和测量的干涉信号由 FEMTO Messtechnik GmbH 公司 HCA-S-200M-SI 型光电探测器采集,并传输至自制的信号处理卡解算得到位移信息。

3.1 空间分离结构抑制非线性误差

首先,利用 Keysight 9010A 信号分析仪直接对测量信号频谱进行采集,以 x 轴为例绘制曲线如图 3 所示。可以看出,利用两个 AOM 分别调制的外差光源具有良好的干涉频谱,分光调制的外差光源并未引入其他明显的频率分量,即调制后的外差光源不会引入非外差频率,因此不会导致周期非线性误差。应当指出的是,根据公式(12)计算得到, $\mu\text{m/s}$ 量级的运动引起的光学多普勒频移仅仅为 Hz 量级,因此较难区分光栅静止和运动时的谱峰区别。在之前的研究工作中^[12],我们已利用运动速度为 m/s 级的直线导轨

对比验证了一维测量的空间分离式外差光栅结构消除周期非线性误差的作用。图 4 为光栅在丝杠导轨的驱动下以 16 mm/s 的速度匀速运动时,利用信号分析仪采集得到的共光路和空间分离外差光栅干涉仪测量信号的频谱。可以看出,共光路结构的外差光栅干涉仪在中心频率为 5 MHz 和 $5\text{ MHz} \pm 32\text{ kHz}$ 处存在 3 个明显的谱峰;而空间分离结构的外差光栅干涉仪仅在运动所产生的 $5\text{ MHz} + 32\text{ kHz}$ 处存在明显的谱峰。

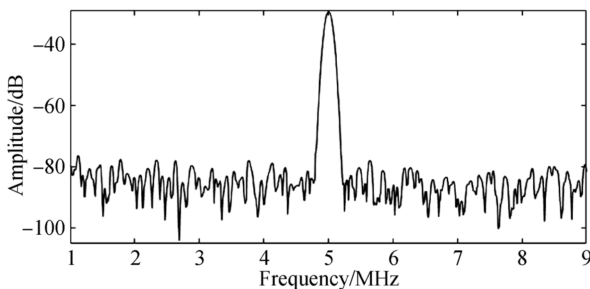


图 3 x 轴测量信号频谱特性

Fig. 3 Frequency spectrum of measurement signal in x -axis

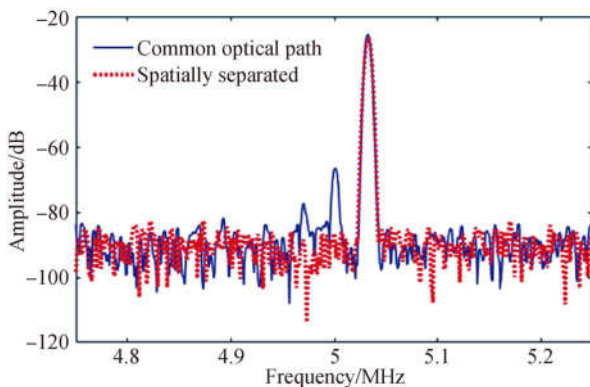


图 4 空间分离与共光路外差光栅干涉仪测量信号频谱

Fig. 4 Frequency spectra of spatially separated and common-optical-path heterodyne grating interferometers

图 4 能够充分说明空间分离式结构对于光栅干涉仪偏振混叠引起的周期非线性误差的消除作用。由于所提出的平面光栅干涉仪的两个测量轴的干涉原理与图 4 所采用的实验方案一致,所以说明所提出的平面光栅干涉仪结构同样延续了显著降低周期非线性误差这一特性。

在此应当指出的是,空间分离结构能够有效消除外差光栅干涉中的偏振混叠现象,从而显著抑制周期非线性误差,但镜组中的鬼影反射仍然是导致周期非线性误差的一个因素。因此,在镜组设计和装调过程中,仍然要注意避免鬼影反射

造成的影响。例如,在装配时将棱镜旋转一个小角度^[18],能够在不明显影响其分光性能的前提下使鬼影虚反射光束偏离主光轴。

3.2 测量分辨力与测量噪声特性

由于光栅在 x 和 y 两方向上的栅距一致,光路结构一致,所以其理论分辨力指标一致,空间分离抑制周期非线性误差的特性一致,噪声特性也是没有明显差异的。故此,本节以 x 测量轴为例,说明所提出的光栅干涉仪的测量分辨力、测量噪声与抑制周期非线性误差的特性。

所提出的平面光栅干涉仪的理论分辨力为栅距基准除以细分数。实验所采用的信号处理板卡应用的是 16 位模数转换器,但考虑实际电路的噪声,模数转换器向下取整的峰峰值分辨力为 11 位,对应的电子细分倍数为 2 048;再结合光学细分分数 4,因此得到理论分辨力指标为:

$$1\ 000\ \text{nm} \div 2\ 048 \div 4 = 0.122\ \text{nm}. \quad (15)$$

图 5 所示为纳米位移台无运动指令下进行测量得到的位移曲线局部放大图。从图中可以看出,所提出的平面光栅干涉仪所记录的最小位移增量在 0.122 nm 以下,表明其位移分辨力指标能够达到 0.122 nm。

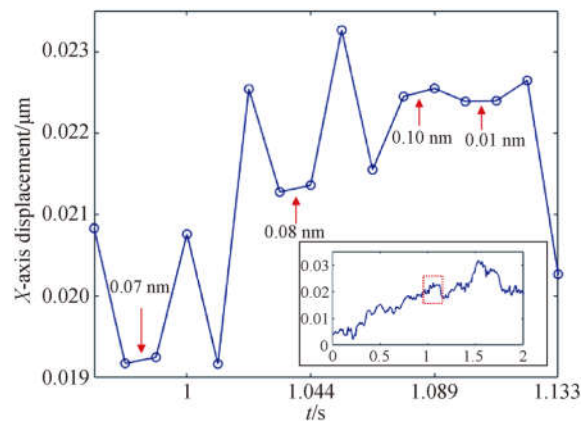


图 5 位移曲线局部放大图

Fig. 5 Partial enlargement of resolution measured curve

对图 5 所示的时域位移曲线进行频域分析,可以获知其噪声特性,如图 6 所示。从频谱图中可以看出,在位移台无运动指令,即理论上应处于静止的情况下,其位置漂移主要由 10 Hz 以下的低频扰动引起。这也为下文中对于测量误差来源的确定与分析提供了依据。

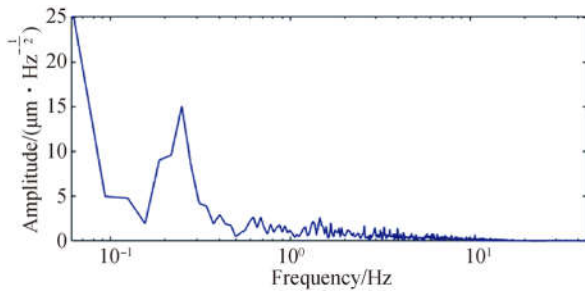


图 6 时域位移测量曲线的频谱特性

Fig. 6 Frequency spectrum of measured displacement curve

3.3 光栅面内旋转安装误差的标定与补偿

对于测量 x 和 y 方向运动的平面光栅干涉仪而言,绕 z 轴的旋转安装误差将引起两个自由度被测位移的耦合,影响测量结果。因此在进行测量实验之前,需要预先对光栅安装在平面内的准直容差角进行测量并根据所测角度通过解耦算法对结果予以补偿,以分离出两个自由度的位移。

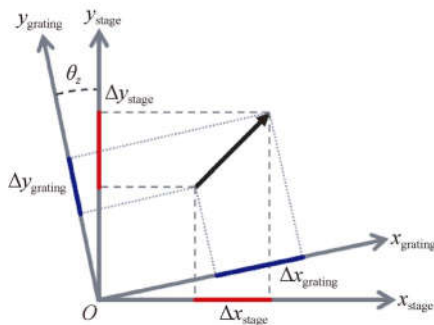


图 7 光栅绕 z 轴旋转安装误差的解耦

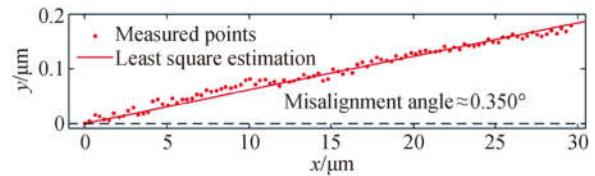
Fig. 7 Decoupling of assembling error around z -axis

如图 7 所示,位移台坐标系为 $x_{stage}-O-y_{stage}$,光栅坐标系为 $x_{grating}-O-y_{grating}$ 。二自由度的运动是按照位移台坐标轴的方向产生的,但作为测量基准的光栅刻线则是沿光栅坐标系两个方向延伸的。设两坐标系间的准直误差角为 θ_z ,由图中的位移矢量在两坐标系下的投影及几何关系可以推导得出,平面旋转矩阵适用于旋转安装误差的校正和两自由度位移的解耦,公式如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{stage} \\ \Delta y_{stage} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{grating} \\ \Delta y_{grating} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

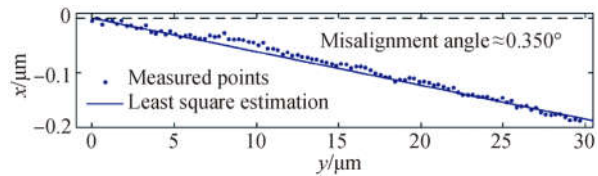
如图 8 所示,位移台分别在 x 方向和 y 方向上产生一个位移为 $30 \mu\text{m}$ 的运动。在理想情况下,当不存在旋转装配误差时,在某方向上的运动不会对另一方向上的测量值产生显著影响。但实

际测量得到的位移曲线显示,随着位移台沿某一方向的运动,另一方向上能够测量到最大值约为 $0.2 \mu\text{m}$ 的线性增长,说明了旋转安装误差的存在。对采集到的位移数据进行最小二乘拟合,求得准直误差角约为 0.350° 。



(a) 沿 x 方向运动

(a) Movement in x -direction



(b) 沿 y 方向运动

(b) Movement in y -direction

图 8 光栅绕 z 轴旋转安装误差的测量

Fig. 8 Measurement of assembling error around z -axis

3.4 光栅二自由度运动的测量

在补偿旋转安装误差的基础之上,这里选择两个有代表性的轨迹进行实验,以验证所设计的二自由度平面光栅干涉仪能够实现两个方向上的位移测量。

首先,利用压电位移台驱动光栅沿边长为 $30 \mu\text{m}$ 的正方形轨迹运动,测得的位移曲线绘制在图 9 中(彩图见期刊电子版)。图中黑色曲线为位移台驱动产生的理想位移曲线,红色曲线为所提出的平面光栅干涉仪测量得到的位移数据。以原点作为起点,光栅首先沿 y 方向以 $1.25 \mu\text{m/s}$ 的速度运动 $30 \mu\text{m}$,然后运动轨迹三次右转 90° 形成正方形,并最终回到原点。图 9(b)和 9(c)分别描绘了 x 和 y 两个方向上的位移分量和误差。可以看出,理想运动路径和实际测量轨迹之间的偏差在 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 以内,且在光栅运动过程当中的偏差较静止状态更大。

在经过旋转安装误差补偿之后,光栅在正方形轨迹的各个边上运动时,两方向的位移也是互相独立的。所以,为了进一步测试所设计的平面光栅干涉仪,这里选择两方向耦合的圆形轨迹进一步测试,利用位移台驱动光栅进行直径为 $30 \mu\text{m}$ 的圆周轨迹平移运动。将起始点设置在坐

标(0,15 μm),并分别将 x 和 y 方向的运动设置为按照余弦和正弦函数变化。

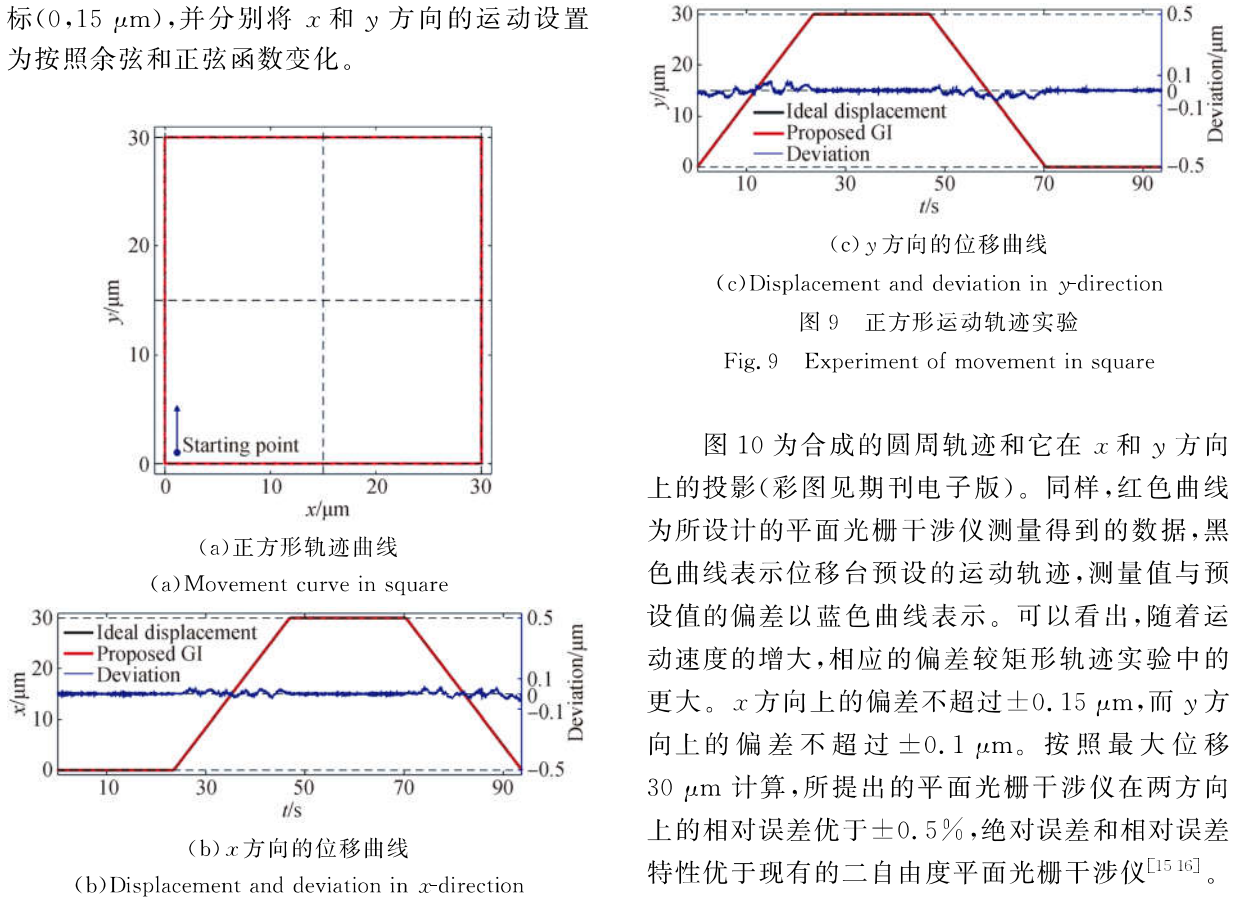


图 9 正方形运动轨迹实验

Fig. 9 Experiment of movement in square

图 10 为合成的圆周轨迹和它在 x 和 y 方向上的投影(彩图见期刊电子版)。同样,红色曲线为所设计的平面光栅干涉仪测量得到的数据,黑色曲线表示位移台预设的运动轨迹,测量值与预设值的偏差以蓝色曲线表示。可以看出,随着运动速度的增大,相应的偏差较矩形轨迹实验中的更大。x 方向上的偏差不超过±0.15 μm,而 y 方向上的偏差不超过±0.1 μm。按照最大位移 30 μm 计算,所提出的平面光栅干涉仪在两方向上的相对误差优于±0.5%,绝对误差和相对误差特性优于现有的二自由度平面光栅干涉仪^[15-16]。

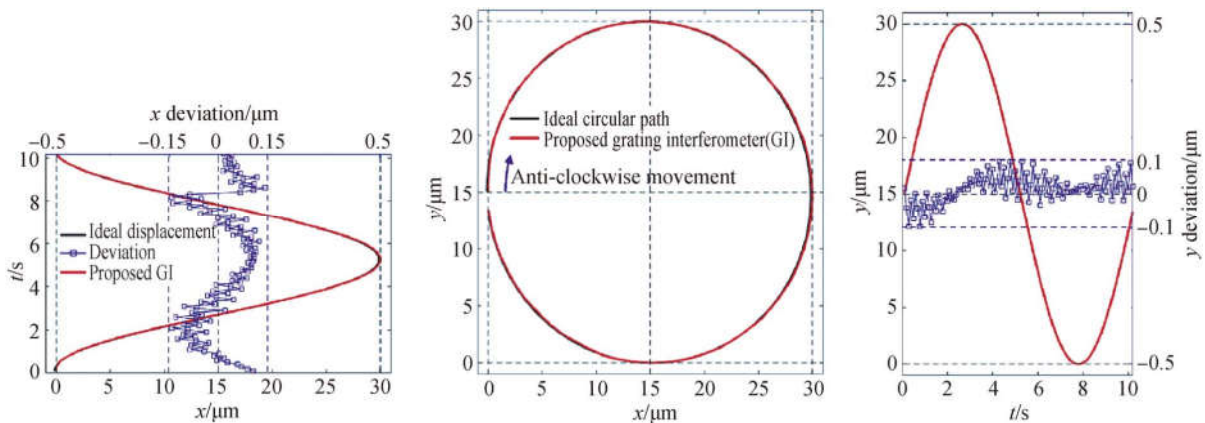


图 10 圆形运动轨迹实验

Fig. 10 Experiment of movement in circle

实验中,百纳米级偏差的原因可以归结为环境扰动以及微动平台铰链机构在较重负载下的偏摆。由于所用的光栅及其机械装配结构质量约为 1.5 kg,重心约在 40 mm 高的位置,尽管如此大的负载并不会对位移台的柔性铰链机构造成不可逆的破坏,但却使它较易受到外界环境振动的干

扰,且中心位置的提高进一步加剧了这种影响。以 x 轴为例,图 11 所示为在位移台无运动指令的“静止”状态下,由光栅干涉仪测得的漂移曲线。从曲线可以看出,外界环境振动的影响会导致光栅在±40 nm 内的漂移。在图 6 的频谱分析中也体现出了低频振动的影响。

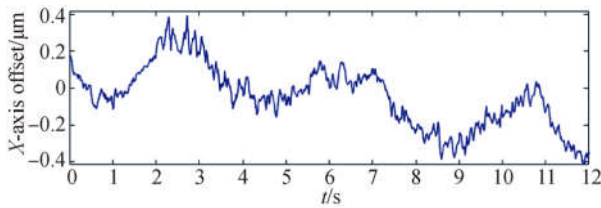


图 11 环境干扰引起的漂移曲线(X轴)

Fig. 11 X-axis offset caused by environmental vibration

在验证所提出的平面光栅干涉仪能够同时测量 x 和 y 两方向上的位移后,本文进行了重复性实验进一步体现其测量能力。令纳米位移台在 x 和 y 两测量方向上各做 10 次运动,位移均为 $30\ \mu\text{m}$ 。由光栅干涉仪测量得到的实测数据、10 次测量数据平均值以及由 Bessel 公式计算得到的标准差如表 1 所示。

表 1 重复性实验结果

Tab. 1 Result of repeatability experiments (μm)

测量次数	x 轴	y 轴	测量次数	x 轴	y 轴
1	29.999	30.001	6	30.021	30.002
2	30.009	29.979	7	30.001	30.016
3	29.979	29.994	8	29.995	30.000
4	29.988	29.982	9	30.013	30.015
5	30.021	29.988	10	30.030	29.985
算术平均值	30.003	29.998	标准差	0.019	0.011

参考文献:

- [1] BADAROGLU M, NG K, SALMANI M, *et al.*. More Moore landscape for system readiness-ITRS2.0 requirements[C]// *Proceedings of 2014 IEEE 32nd International Conference on Computer Design (IC-CD)*, October 19-22, 2014, Seoul, South Korea. New York, USA: IEEE, 2014: 147-152.
- [2] SCHIFT H. Nanoimprint lithography: 2D or not 2D? A review[J]. *Applied Physics A*, 2015, 121(2): 415-435.
- [3] 尹志生,李友如,李佩玥,等. 高精度六维激光测量系统误差补偿算法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(8): 1275-1281.
YIN ZH SH, LI Y R, LI P Y, *et al.*. Research on error compensation algorithm for high precision 6-DOF laser measurement system [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(8): 1275-1281. (in Chinese)
- [4] 王磊杰,张鸣,朱煜,等. 超精密外差利特罗式光栅干涉仪位移测量系统[J]. *光学精密工程*, 2017,

当测量不确定度取 $k=3$ 时,所提出的平面光栅干涉仪在 x 轴和 y 轴上的测量不确定度分别为 $\pm 0.057\ \mu\text{m}$ 和 $\pm 0.033\ \mu\text{m}$ 。

4 结 论

本文设计并验证了一种空间分离式外差二自由度平面光栅干涉仪。该光栅干涉仪基于平面光栅衍射特性和空间分离式外差干涉结构,能够同时测量光栅平面二自由度位移且具有消除周期非线性误差的特性。在此基础上,角锥棱镜二次衍射结构能够提高光学细分数并增强测头的角度容差。实验表明,所提出的空间分离式外差二自由度平面光栅干涉仪的分辨力优于 $0.122\ \text{nm}$ 。在补偿 0.350° 的旋转安装误差之后,所设计的平面光栅干涉仪在对位移台 x 和 y 方向上 $30\ \mu\text{m}$ 的位移进行测量时,主要由机械振动引起的实时测量误差不超过 $0.15\ \mu\text{m}$,且测量重复性优于 $\pm 57\ \text{nm}$ 。

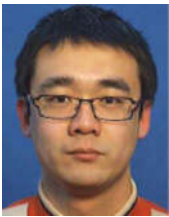
为了进一步提高测量系统的精度和稳定性,需要开展的后续工作包括:优化光源功率分配,提高干涉信号强度以提升信噪比;结合减重设计小型化光路结构,采用动测头、固定光栅的装配方案以减小振动影响等。

25(12): 2975-2985.

- WANG L J, ZHANG M, ZHU Y, *et al.*. A displacement measurement system for ultra-precision heterodyne Littrow grating interferometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(12): 2975-2985. (in Chinese)
- [5] 王静. 掩模台三自由度光栅干涉测量模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
WANG J. *Research on 3-DOF Grating Interference Measurement Model of Mask Table* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [6] 金涛,刘景林,杨卫,等. 线性位移台直线度高精密外差干涉测量装置[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(7): 1570-1577.
JIN T, LIU J L, YANG W, *et al.*. High-precision straightness interferometer for linear moving stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(7): 1570-1577. (in Chinese)
- [7] 夏豪杰,胡梦雯,张欣. 单频激光干涉仪正交信号的高精度处理[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(9): 2309-2316.

- XIA H J, HU M W, ZHANG X. High precision processing of quadrature signals for homodyne interferometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(9): 2309-2316. (in Chinese)
- [8] LEE J Y, CHEN H Y, HSU C C, *et al.*. Optical heterodyne grating interferometry for displacement measurement with subnanometric resolution [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 137(1): 185-191.
- [9] YOKOYAMA S, HORI Y, YOKOYAMA T, *et al.*. A heterodyne interferometer constructed in an integrated optics and its metrological evaluation of a picometre-order periodic error[J]. *Precision Engineering*, 2018, 54: 206-211.
- [10] FU H J, JI R D, HU P C, *et al.*. Measurement method for nonlinearity in heterodyne laser interferometers based on double-channel quadrature demodulation[J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 2768.
- [11] 谭久彬, 胡鹏程, 邢旭. 抗光学混叠的双频激光光栅干涉二维测量方法及系统: CN201310616950. 2 [P]. 2014-02-26.
TAN J B, HU P C H, XING X. Method and system for 2-DOF anti-optical-mixing heterodyne grating interferometry : 201310616950. 2 [P]. 2014-02-26. (in Chinese)
- [12] XING X, CHANG D, HU P C, *et al.*. Spatially separated heterodyne grating interferometer for eliminating periodic nonlinear errors[J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 31384-31393.
- [13] CHANG D, XING X, HU P C, *et al.*. Double-diffracted spatially separated heterodyne grating interferometer and analysis on its alignment tolerance[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(2): 263.
- [14] GUAN J, KÖCHERT P, WEICHERT C, *et al.*. A differential interferometric heterodyne encoder with 30 picometer periodic nonlinearity and subnanometer stability [J]. *Precision Engineering*, 2017, 50: 114-118.
- [15] HSIEH H L, CHEN J C, LERONDEL G, *et al.*. Two-dimensional displacement measurement by quasi-common-optical-path heterodyne grating interferometer[J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9771-9782.
- [16] LI X H, SHI Y P, XIAO X, *et al.*. Design and testing of a compact optical prism module for multi-degree-of-freedom grating interferometry application [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(12): 2495.
- [17] 王春海, 吉贵军, 胡小唐, 等. 角锥棱镜的偏振效应 [J]. *光学学报*, 1993, 13(6): 540-545.
WANG CH H, JI G J, HU X T, *et al.*. Polarization effect of cube-corner reflectors[J]. *Acta Optica Sinica*, 1993, 13(6): 540-545. (in Chinese)
- [18] 高卫华, 王肇圻, 母国光. 提高人眼波前传感器信噪比的实验研究 [J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(1): 58-61.
GAO W H, WANG ZH Q, MU G G. Experimental study of wavefront sensors for increasing signal-to-noise ratios [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(1): 58-61. (in Chinese)

作者简介:



邢旭(1989—),男,辽宁沈阳人,博士研究生,2011年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事超精密激光光栅干涉技术方面的研究。E-mail: dalucifer@outlook.com

导师简介:



谭久彬(1955—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,博士生导师,中国工程院院士,1982年、1987年、1991年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事超精密测量技术与仪器工程、光机电一体化工程等方面的研究。E-mail: jbtan@hit.edu.cn

通讯作者:



胡鹏程(1979—),男,江苏东台人,博士,教授,博士生导师,2001年、2003年、2008年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事快速超精密激光干涉测量技术与仪器工程、精密激光测距技术方面的研究。E-mail: hupe@hit.edu.cn