

# Mirau 型干涉显微物镜干涉平板装配误差容限分析

胡捷, 袁群, 于颢彪, 王帅, 孙一峰, 高志山\*

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 针对 Mirau 型干涉显微物镜中干涉平板的装配误差问题, 建立了参考板倾斜时的干涉光强表征模型, 通过对光瞳面内测试光束和参考光束的分割, 求解参考板倾斜时干涉光强的积分表达形式, 通过数值计算定量分析参考板倾斜度对干涉条纹包络、对比度的影响, 并采用宽带光八步移相算法进行三维形貌复原, 据此确定参考板倾斜误差的容限。设计了  $50\times$  Mirau 型干涉显微物镜的参考板倾斜验证结构, 通过实验测量了标准台阶板, 验证了仿真分析模型的准确性, 确定了  $50\times$  干涉显微物镜中参考板倾斜误差容限为  $1.5^\circ$ 。

**关键词** 显微; 干涉显微物镜; 色散; 倾斜; 装配误差; 误差容限

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0904001

## Assembly Error Tolerance of Interferometer Plate in Mirau Interference-Microscope Objective

Hu Jie, Yuan Qun, Yu Haobiao, Wang Shuai, Sun Yifeng, Gao Zhishan\*

*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China*

**Abstract** To analyze the assembly error of the interferometer plate in the Mirau interference-microscope objective, we create a characterization model of interference light intensity of a tilted reference plate. By dividing the test beam and reference beam in the pupil plane, the integral expression of the interference light intensity is obtained when the reference plate is tilted. The influence of the tilted reference plate on the envelope and contrast of interference fringes is quantitatively analyzed by numerical simulation. Then, the tilt error tolerance of the interferometer plate is determined by the results of three-dimensional morphology reconstruction using an eight-step phase-shifting algorithm for broadband light. An experimental verification structure consisting of a Mirau interference-microscope  $50\times$  objective is fabricated and a standard step is experimentally measured to verify the accuracy of the simulation model. Results show that the tilt angle of the interferometer plate in a Mirau interference-microscope  $50\times$  objective should be constrained to be less than  $1.5^\circ$ .

**Key words** microscopy; interference-microscope objective; dispersion; tilt; assembly error; error tolerance

**OCIS codes** 180.3170; 260.3160; 230.2035

## 1 引言

白光显微干涉技术因具有快速、非接触、高精度等优点, 多年来受到研究人员的广泛关注<sup>[1]</sup>。白光干涉仪使用宽带光源照明, 光源光谱宽度一般为几十到几百纳米。在干涉显微物镜的设计过程中, 会针对所使用的宽带光源对色差进行良好的校正。但在干涉臂装配过程中, 会不可避免地存在装配误差, 使得参考臂和测试臂不对称, 从而引入色散<sup>[2]</sup>。准

确分析并有效地控制干涉显微物镜中色散的影响, 对于采用白光显微干涉术复原三维形貌十分重要<sup>[3-4]</sup>。

根据干涉腔结构的不同, 干涉显微物镜可分为 Michelson 型、Mirau 型、Linnik 型 3 种结构形式。在 Michelson 型和 Linnik 型干涉显微物镜中, 色散主要来源于不对称的分光棱镜<sup>[5]</sup>, 据此, Pfortner 等<sup>[6]</sup>和 Pavlicek 等<sup>[7]</sup>通过在参考臂中插入一定厚度的色散介质层的方式引入色散, 分别对 Michelson 型和 Linnik

收稿日期: 2019-03-07; 修回日期: 2019-04-09; 录用日期: 2019-04-28

基金项目: 国家重大仪器专项(2013YQ150829)、中央高校基本科研业务专项(30917011107, 30918014115-004)

\* E-mail: zhishgao@njjust.edu.cn

型白光干涉系统中因色散引起的干涉条纹偏差进行研究,但这些研究并没有考虑数值孔径的影响。Pikálek 等<sup>[8]</sup>通过非理想的楔形补偿器引入色散,通过实验比较了各种白光算法对标准台阶板的高度解算误差,发现将相干包络和相位信息相结合的白光算法存在“鬼步”现象,但未对此进行理论分析。

本文围绕 Mirau 型干涉显微物镜干涉臂装配时存在的装配误差问题,研究由参考板装配倾斜量引入的色散,分析参考板倾斜时干涉光强变化对条纹分布及对比度的影响,并进一步分析其对三维形貌复原的影响;以复原误差作为判据,分析装配误差的容限,为 Mirau 型干涉显微物镜的装配提供技术数据支撑。

## 2 原 理

搭载 Mirau 型干涉显微物镜的白光干涉仪工作原理如图 1 所示。宽带光源的出射光束经科勒照明系统及分光镜后,入射到干涉显微物镜的光瞳面,

经过 Mirau 型干涉显微物镜的分光板后被分为参考光束和测试光束,二者再分别经干涉显微物镜参考板与待测样品表面反射后,依次经过物镜系统和成像系统,在探测器上形成干涉图。物面上某一物点发出的光经过光瞳面后入射到探测器靶面的某一像点,所以探测器靶面某一像点接收到的干涉光强为经过干涉显微物镜光瞳面且在物镜立体角内的所有干涉光束光强的非相干叠加<sup>[9]</sup>。理想情况下,随着干涉显微物镜在  $z$  方向上的扫描,对于干涉物镜任一扫描位置  $z$ ,白光干涉光强的交流分量  $I$  可表示为

$$I = \int_{k_1}^{k_2} \int_0^{\omega_0} G(k) \cos[2k(z-h)\cos\psi] \sin\psi \cos\psi d\psi dk, \quad (1)$$

式中: $G(k)$  为光源光谱分布; $k, k_1, k_2$  分别为宽带光源光谱的波数,以及最小和最大波数; $\psi$  为入射光束的入射角; $h$  为物面某点的初始高度值; $\omega_0 = \arcsin NA$  为最大孔径角,其中  $NA$  为数值孔径。

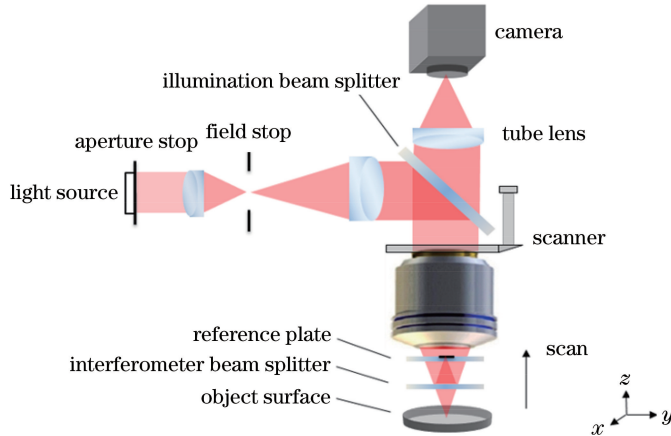


图 1 白光干涉仪及 Mirau 型干涉显微物镜的干涉成像光路

Fig. 1 Interferometric imaging optical path of white light interferometer and Mirau interference-microscope objective

Mirau 型干涉显微物镜的干涉臂由分光板和参考板组成。在测试臂中,分光板倾斜引入的光程变化极小;在参考臂中,分光板倾斜对光线走向的影响可以等效为参考板倾斜的影响。因此,将干涉臂的装配误差都等效为参考板的倾斜度。在干涉光路中,待测样品和参考板关于分光板镜像,待测样品的倾斜与参考板的倾斜等效。载频干涉条纹也源于待测样品与参考板之间的相对倾斜度。因此,本实验在建立模型时仅考虑了参考板倾斜的情况。简化模型的光路结构如图 2 所示。图 2(a)为 Mirau 型干涉显微物镜经过光瞳面中心点  $O$  的某一剖面的光路图,为便于分析,将参考板关于分光板作镜像处理

(仅表示参考面,忽略参考板的厚度)。 $\theta$  为参考面的倾斜角,光锥  $AEB$  为物面对应的测试光束出射区域,光锥  $CED$  为倾斜角  $\theta$  的参考面所对应的参考光束出射区域。物点  $E$  返回的测试光束经过光瞳面内的线区域  $AB$ ,参考面上对应参考点返回的参考光束经过光瞳面内的线区域  $CD$ ,两者不完全重合,发生切割,即图 2(a)的重叠部分  $BC$ 。探测器靶面像点在此剖面内接收到的干涉光强为经过光瞳面重叠区域  $BC$  的所有干涉光束光强的非相干叠加。如重叠区域  $BC$  对应的干涉光出射光锥  $BEO$  所示,干涉光束左侧会聚角  $\angle BEO = \omega_0 = \arcsin NA$ ,右侧会聚角  $\angle CEO = \omega_0 - 2\theta$ 。

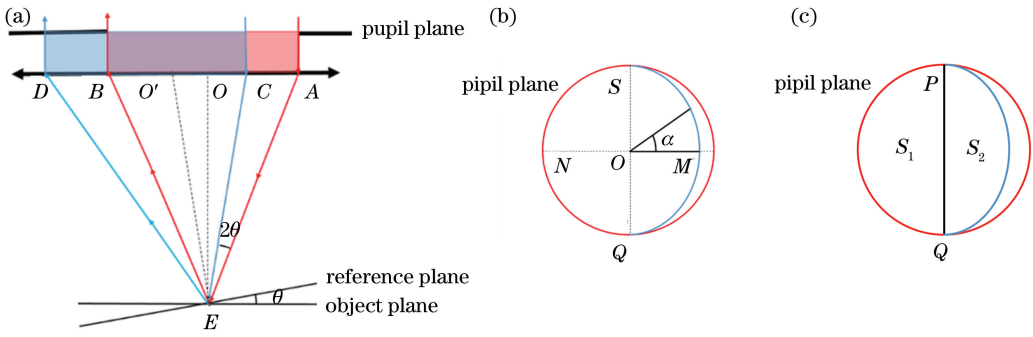


图2 参考板倾斜时干涉显微物镜的等效光路。(a)干涉显微物镜剖面光路图；(b)干涉显微物镜光瞳面俯视图；(c)光瞳面内S区域划分

Fig. 2 Equivalent optical path of interference-microscope objective with tilted reference plate. (a) Sectional optical path of interference-microscope objective; (b) top view of pupil plane in interference-microscope objective; (c) division of S region in pupil plane

将所有剖面对应的重叠线区域BC叠加,则光瞳面内重叠的面区域为图2(b)中区域S,S内任一旋转角度 $\alpha$ 都对应于图2(a)所示的某一剖面。需要注意的是,参考面的倾斜角度 $\theta$ 随着旋转角度 $\alpha$ 的变化而变化,参考面的倾角 $\theta$ 与旋转角度 $\alpha$ 的几何关系如图3所示。平面EJHG为参考面,平面FGHI为物面, $\angle EGF = \theta_0$ 为最大倾角, $\angle EKF = \theta$ 为旋转角度 $\alpha$ 所对应的参考面倾斜角。若令 $|GE| = 1$ ,则可得:

$$\theta = \arccos\left(\frac{\cos \theta_0}{\cos \alpha \sqrt{\cos^2 \theta_0 \tan^2 \alpha + 1}}\right), \quad \alpha \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right). \quad (2)$$

很显然,当 $\alpha = 0^\circ$ 时, $\theta = \theta_0$ ,对应于图2(b)中剖面MON的情形。当 $\alpha = 90^\circ$ 时,参考面的倾斜角 $\theta = 0^\circ$ ,对应于图2(b)中剖面POQ的情形。

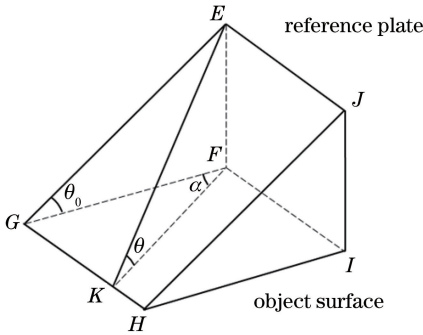


图3 参考板倾角 $\theta$ 与旋转角度 $\alpha$ 的关系

Fig. 3 Relationship between tilt of reference plate  $\theta$  and rotation angle  $\alpha$

根据双光束干涉理论,经过S区域的任意一条光线的干涉光路都可视为劈尖等厚干涉光路,如图4所示,其中参考光相对于参考板的出射角为 $i$ ,测试光相对于物面的出射角为 $\beta$ ,参考板和分光板的

折射率均为 $n$ ,参考板与分光板的厚度均为 $d$ ,AE点到物面的垂直距离为 $z-h$ 。为便于分析,将分光板的厚度加在物面下面,测试光束的A段为空气中的光程,并未从参考板内部穿过。以A点作为参考光和测试光光程计算的起点,以C点和P点作为光程计算的终点。

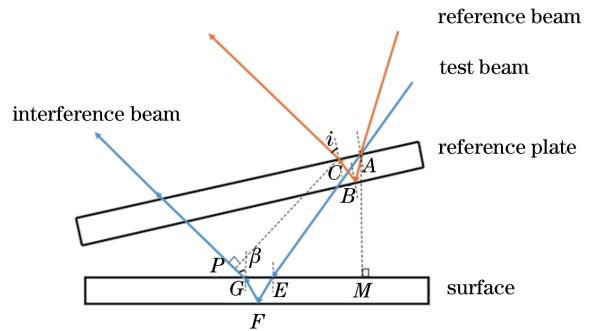


图4 参考板倾斜时干涉光路图

Fig. 4 Interferometric optical path with tilted reference plate

发生干涉的参考光与测试光之间的光程差分为两部分:1)空气中的光程差, $\Delta_a = 2(z-h)\cos \beta$ 。在实际加工装配过程中,参考板的倾角 $\theta$ 较小,且空气中的光程差并不会引入色散,因此为了简化,可认为参考板上参考光任一入射点到物面的垂直距离均为 $z-h$ 。2)色散介质中的光程差为 $\Delta_d = 2d\cos i' - 2d\cos \beta'$ 。其中, $i'$ 和 $\beta'$ 分别为参考光和测试光的折射角。因此,当参考板和分光板的折射率 $n$ 、厚度 $d$ ,以及参考板倾斜角 $\theta$ 一定时, $\Delta_d$ 仅与参考光相对于参考板的出射角 $i$ 和测试光相对于物面的出射角 $\beta$ 有关。根据干涉光出射方向的不同,将整个S区域分为区域 $S_1$ 和 $S_2$ 两部分,如图2(c)所示。

在 $S_1$ 部分,参考板上的光线入射角 $i = \beta - \theta$ ,在该区域内,双光束干涉光强可表示为

$$I_1 = \cos\{k[L_2 - L_1 + 2(z - h)\cos\beta]\}, \quad (3)$$

式中： $L_1 = 2d/\cos\{\arcsin[\sin(\beta - \theta)/n]\}$ ，为  $S_1$  部分所对应的参考板中的光程； $L_2 = 2d/\cos[\arcsin(\sin\beta/n)]$ ，为  $S_1$  部分所对应的分光板中的光程。

在  $S_2$  部分，参考板上的光线入射角为  $i = \beta + \theta$ 。在该区域内，双光束干涉光强可表示为

$$I_2 = \cos\{k[L_2 - L'_1 + 2(z - h)\cos\beta]\}, \quad (4)$$

式中： $L'_1 = 2d/\cos\{\arcsin[\sin(\beta + \theta)/n]\}$ ，为  $S_2$  部

分对应的参考板中的光程。

探测器靶面上任一像素点所接收到的干涉光强不仅是不同波数的单色光干涉信号的非相干叠加，同时也是所有经过  $S$  区域的干涉信号的非相干叠加。故当参考板的倾斜角为  $\theta$  时，在某一扫描位置  $z$  处，干涉光强可以表示为双光束干涉光强  $I_1$  和  $I_2$  在白光光源波长范围和  $S$  区域面积上的多重积分，即

$$I = 2 \left\{ \int_{k_1}^{k_2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\omega_0} S(k) \cos\{k[L_2 - L_1 + 2(z - h)\cos\beta]\} \sin\beta \cos\beta d\beta d\alpha dk + \int_{k_1}^{k_2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\omega_0 - 2\theta} G(k) \cos\{k[L_2 - L'_1 + 2(z - h)\cos\beta]\} \sin\beta \cos\beta d\beta d\alpha dk \right\}. \quad (5)$$

### 3 仿真分析与实验验证

#### 3.1 仿真分析

本节将分析不同的参考面倾斜量对干涉光强分布和白光干涉三维形貌复原的影响。首先，生成白光干涉条纹。为了使仿真结果更接近实际情况，需要考虑白光光源的光谱分布等实际情况。系统使用的光源为白光 LED 灯，使用 OCEAN OPTICS USB4000 型光谱仪对白光 LED 灯的光谱分布进行测量，测得的光谱分布如图 5 所示。利用 Sellmeier 色散方程<sup>[10]</sup>对参考板的材料折射率  $n(k)$  进行计算。

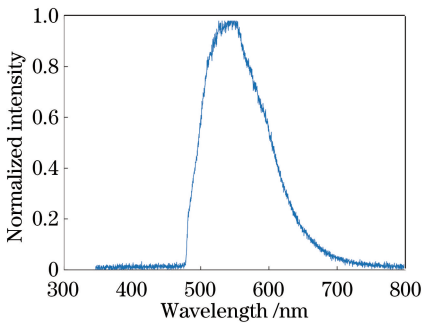


图 5 LED 光源光谱分布

Fig. 5 Spectral distribution of LED light source

商用 Mirau 干涉显微物镜的放大系数一般为  $10\times$ 、 $20\times$ 、 $50\times$ ，其对应的数值孔径  $NA$  分别为  $0.3$ 、 $0.4$ 、 $0.55$ 。 $50\times$  干涉显微物镜因放大倍率较大、像差不易校正，其干涉条纹受参考板倾斜度的影响最大。因此，主要针对  $NA = 0.55$  的  $50\times$  干涉显微物镜的参考板倾斜时的干涉条纹进行仿真分析。参

考板的倾斜角分别为  $0^\circ$ 、 $0.5^\circ$ 、 $1^\circ$ 、 $1.5^\circ$ 、 $2^\circ$  时，将光谱分布曲线  $S(k)$  和  $n(k)$  代入(5)式，得到的白光干涉条纹及条纹包络如图 6 所示。

当参考板的倾斜角  $\theta_0 = 0^\circ$ ，即参考板与分光板平行时，由于参考板的厚度和材料均与分光板相同，此时 Mirau 型干涉显微物镜未引入色散，如图 6(a) 所示，干涉条纹与相干包络均对称分布，且干涉条纹峰值位置与包络峰值位置重合。当参考板倾斜角  $\theta_0 \neq 0^\circ$  时，从图 6(b)~(e) 可以看出，Mirau 型干涉显微物镜中存在色散，干涉条纹的光强峰值位置和相干包络的峰值位置不重合，干涉条纹和相干包络不对称。随着参考板倾斜角  $\theta_0$  的增大，引入的色散也随之增大，干涉条纹对比度降低，相干包络的偏移越来越明显，干涉条纹及其相干包络的不对称性也越来越明显。

为了定量分析参考板的倾斜度对三维形貌复原的影响，利用宽带光八步移相算法<sup>[11]</sup>计算不同倾斜角度下的白光干涉条纹表面各点的零光程位置，最后逐点重构其表面形貌。假定在如图 7(a) 所示的原始形貌中，设置光源中心波长为  $576 \text{ nm}$ ，采样步距为  $72 \text{ nm}$ ，采样步数为  $60$ 。将由(5)式仿真得到的模拟光强转换为  $0 \sim 255$  的数字信号，即可得到每个像素点的干涉信号。图 7(b) 所示为参考板倾斜角  $\theta_0$  为  $0^\circ$ 、 $0.5^\circ$ 、 $1^\circ$ 、 $1.5^\circ$ 、 $2^\circ$  时算法复原出的仿真形貌与原始形貌的偏差值。参考板的倾斜会在参考波前和测试波前引入像散，干涉时两者可以相互抵消，因此不会对最终的形貌测量造成较大的影响。从仿真结果来看，参考板倾斜  $0^\circ \sim 1.5^\circ$  时，测量误差变化

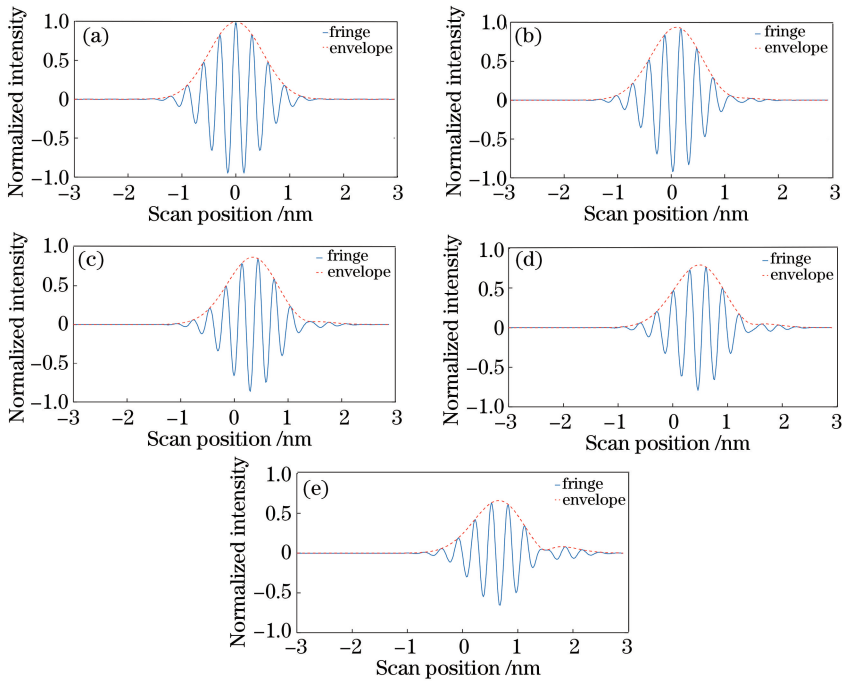


图 6 不同倾斜角度下的干涉条纹。(a)  $\theta_0=0^\circ$ ;(b)  $\theta_0=0.5^\circ$ ;(c)  $\theta_0=1^\circ$ ;(d)  $\theta_0=1.5^\circ$ ;(e)  $\theta_0=2^\circ$

Fig. 6 Interference fringes under different tilts. (a)  $\theta_0=0^\circ$ ; (b)  $\theta_0=0.5^\circ$ ; (c)  $\theta_0=1^\circ$ ; (d)  $\theta_0=1.5^\circ$ ; (e)  $\theta_0=2^\circ$

不大。当  $\theta_0=0^\circ$  时,复原出的仿真形貌与原始形貌相比,最大相对误差为 0.12 nm;当  $\theta_0=2^\circ$  时,测得的高度偏差值明显大于其他倾斜角度所对应的偏差值,其最大测量偏差达到 0.48 nm,为  $\theta_0=0^\circ$  时高度复原偏差的 4 倍。这是因为  $\theta_0=2^\circ$  时引入的色散较大,干涉条纹包络形状发生改变,失对称性严重,使

得宽带光八步移相算法产生一定的复原误差。随着参考板倾斜角度的增大,色散带来的影响逐渐增大,形貌复原误差也不断增大。综合考虑对比度和复原误差,可将  $\theta_0=1.5^\circ$  作为参考板倾斜的误差容限,在此倾斜范围内,认为参考板倾斜对白光干涉仪微观形貌复原的影响可被忽略。

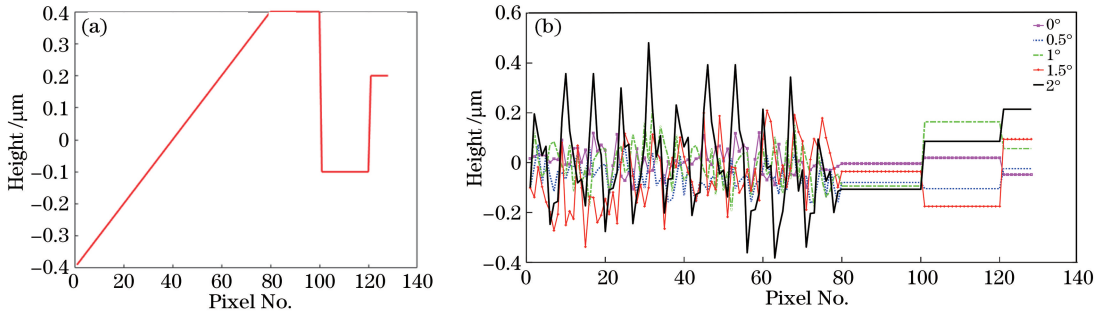


图 7 形貌复原结果对比。(a)原始形貌;(b)不同倾斜角度下的复原误差

Fig. 7 Comparison of morphology reconstruction results. (a) Primary morphology;

(b) reconstruction errors under different tilts

### 3.2 实验验证

为了更好地验证数值仿真的结论,采用自主研发的白光显微干涉仪进行实验验证,实验方法和实验器材的参数与数值仿真设定的条件基本吻合。干涉显微物镜选用自主设计的  $50\times$  Mirau 型干涉显微物镜。为了消除厚度差的影响,选用两片厚度和材料均相同的参考板和分光板,通过控制参考板下支撑圆环的倾斜来改变参考板的倾斜度,所加工的

支撑圆环的倾斜角依次为  $0, 0.5^\circ, 1^\circ, 1.5^\circ, 2^\circ$ 。采用 Bruker 标准台阶板作为被测样品,如图 8(a)所示,其标称高度为  $(90.5 \pm 2.8)$  nm。使用商用轮廓仪 (Veeco NT9100,  $10\times$  干涉显微物镜,  $1\times$  视场) 测量其台阶高度,结果如图 8(b)所示。为了尽量避免干涉条纹受到振动和气流的影响,将整个系统放置在气浮平台上作隔振处理,并在恒温、安静的环境下进行实验。

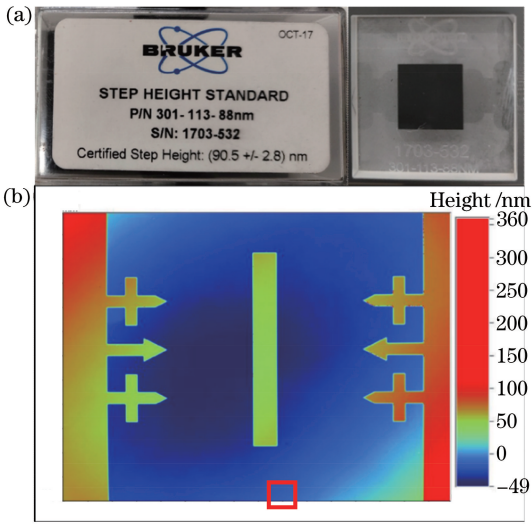


图 8 台阶板测量结果。(a)标准台阶板信息;(b) Veeco NT9100 轮廓仪对标准台阶板的测量结果

Fig. 8 Measured results of step. (a) Information of standard step; (b) measured results of standard step by Veeco NT9100 profilometer

将具有不同倾斜量的支撑圆环装配于干涉显微

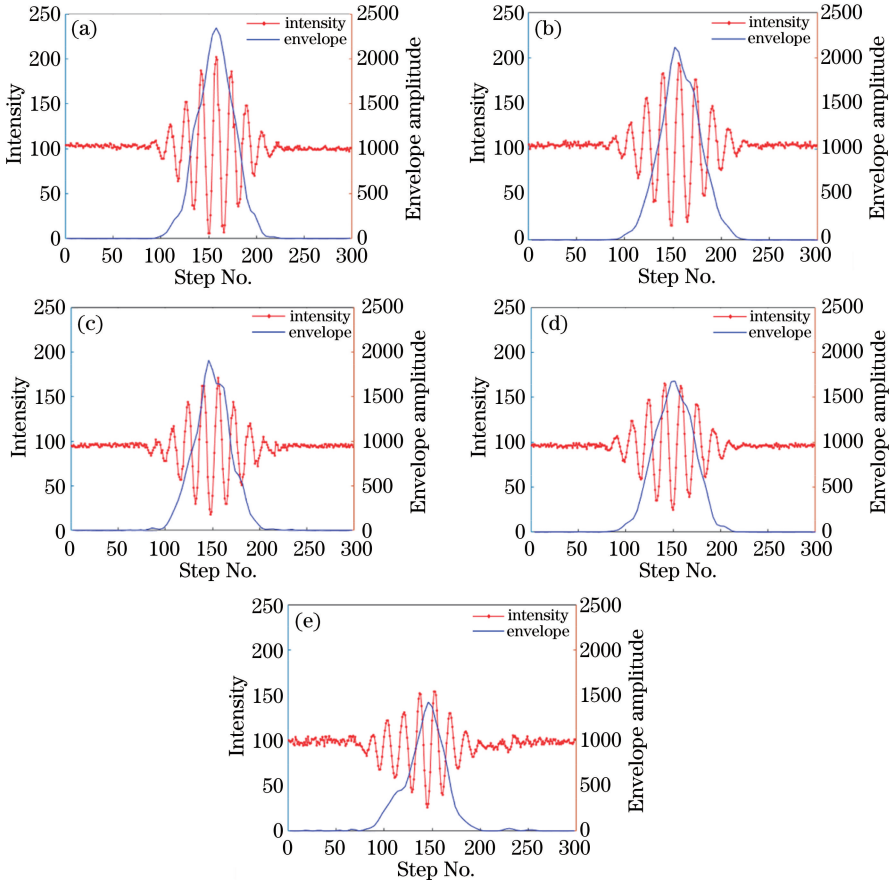


图 9 不同的参考板倾斜度所对应的干涉条纹及包络幅值。(a)  $\theta_0 = 0^\circ$ ; (b)  $\theta_0 = 0.5^\circ$ ; (c)  $\theta_0 = 1^\circ$ ; (d)  $\theta_0 = 1.5^\circ$ ; (e)  $\theta_0 = 2^\circ$

Fig. 9 Interference fringes and envelope amplitudes corresponding to different tilts of reference plate.

(a)  $\theta_0 = 0^\circ$ ; (b)  $\theta_0 = 0.5^\circ$ ; (c)  $\theta_0 = 1^\circ$ ; (d)  $\theta_0 = 1.5^\circ$ ; (e)  $\theta_0 = 2^\circ$

物镜中,使用计算机控制 CCD 和压电陶瓷微位移器,在设置压电陶瓷微位移器的步进长度和步数后进行图像采集。为了观察干涉条纹的形状,记录 CCD 上某一像素点每隔 20 nm 采样得到的光强信号,不同的参考板倾斜度所对应的干涉条纹如图 9 的点线所示,通过傅里叶变换法提取干涉条纹包络的幅值曲线。利用傅里叶变换法提取干涉条纹包络时,选取  $(1.04 \sim 2.49) \times 10^{-2} \text{ nm}^{-1}$  波数范围的矩形窗口,对频域信号进行处理,所提取的幅值曲线如图 9 中的实线所示。

对图 9 所示的干涉信号条纹和相干包络的形状进行分析,发现:当参考板倾斜角为  $0^\circ$  时,干涉条纹接近理想白光干涉信号,此时干涉条纹的峰值位置与相干包络的峰值位置重合,干涉条纹和相干包络基本上关于零级条纹对称;随着倾斜角不断增大,在相同数值孔径的情况下,干涉条纹和相干包络的峰值位置逐渐远离理想零光程差位置,干涉信号对比度逐渐降低,干涉条纹和相干包络的失对称性越来越明显;当倾斜角  $\theta_0 = 2^\circ$  时,干涉条纹和相干包络的

失对称性最为明显,与仿真部分的结论一致。

进一步分析参考板倾斜度对算法复原精度的影响。在  $50 \times$  干涉显微物镜视场范围内 ( $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ ), 利用宽带光八步移相算法在不同参考板倾斜度下对标准台阶左下角[如图 8(b)框选区域所示]进行台阶高度的测量, 采样步距为  $72 \text{ nm}$ , 采样步数为 60, 计算结果如表 1 所示。

表 1 不同倾斜度的标准台阶板高度测量值

Table 1 Measured height values of standard step under different tilts

$\theta_0 / (^{\circ})$	Measured height value / nm
0	$90.58 \pm 3.28$
0.5	$90.65 \pm 3.41$
1	$90.72 \pm 3.56$
1.5	$90.78 \pm 3.82$
2	$91.02 \pm 4.86$

由表 1 的结果可知: 当参考板倾斜角为  $0^{\circ}$  时, 宽带光八步移相算法的台阶板高度测量结果与台阶板标称值基本吻合; 当数值孔径一定时, 随着参考板倾斜角的增大, 台阶高度测量值与标称值的偏差也逐渐增大, 当参考板倾斜角为  $0^{\circ}$ 、 $0.5^{\circ}$ 、 $1^{\circ}$ 、 $1.5^{\circ}$  时, 两者偏差较小, 当倾角为  $2^{\circ}$  时, 两者偏差明显大于其他倾斜角度所对应的偏差值。实验采用的白光干涉仪测量精度优于  $0.2 \text{ nm}$ , 与参考板倾斜  $0^{\circ} \sim 1.5^{\circ}$  时的偏差值基本一致。除了干涉条纹色散导致复原精度降低外, 干涉信号在对比度较低时更易受到随机噪声的干扰, 也会导致复原精度降低。综合上述考虑, 并与仿真结果相结合, 选择  $1.5^{\circ}$  作为参考板倾斜的误差容限。

## 4 结 论

干涉平板是 Mirau 型干涉显微物镜的核心组件, 其装配误差将对白光干涉显微术复原微观形貌产生影响。通过建立参考板倾斜下干涉光强的表征模型, 定量分析了倾斜度对白光干涉条纹及相干包络形状的影响。研究发现, 参考板倾斜将严重降低干涉信号的对比度, 且倾斜度越大, 干涉条纹及相干包络的失对称性越明显。设计了  $50 \times$  Mirau 型干涉显微物镜的参考板倾斜验证结构, 利用其对标准台阶板的实测结果, 验证了仿真分析模型的准确性。从仿真分析和实验验证两方面确定了  $50 \times$  干涉显微物镜中参考板的倾斜误差容限为  $1.5^{\circ}$ 。本研究的结果可为 Mirau 型干涉显微物镜的加工装配提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] Harasaki A, Wyant J C. Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(13): 2101-2106.
- [2] Luo S J, Sasaki O, Chen Z Y, *et al.* Utilization of complex-valued signals in a white-light scanning interferometer for accurate measurement of a surface profile [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(15): 4419-4425.
- [3] Deng Q Y, Tang Y, Zhou Y, *et al.* High-resolution surface topography measurement based on frequency-domain analysis in white light interferometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0604001. 邓钦元, 唐燕, 周毅, 等. 基于白光干涉频域分析的高精度表面形貌测量 [J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0604001.
- [4] Li C S, Shen W D, Zhang Y G, *et al.* Measurement of group delay dispersion of dispersive mirror based on white-light interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1031003. 李承帅, 沈伟东, 章岳光, 等. 基于白光干涉测量色散补偿薄膜的群延迟色散 [J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1031003.
- [5] Farr K B. Beamsplitter cube for white light interferometry [J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(10): 2191-2196.
- [6] Pfortner A, Schwider J. Dispersion error in white-light Linnik interferometers and its implications for evaluation procedures [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(34): 6223-6228.
- [7] Pavlíček P, Soubusta J. Measurement of the influence of dispersion on white-light interferometry [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(4): 766-770.
- [8] Pikálek T, Fořt T, Buchta Z. Detection techniques in low-coherence interferometry and their impact on overall measurement accuracy [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(36): 8463-8470.
- [9] de Groot P, de Lega X C. Signal modeling for low-coherence height-scanning interference microscopy [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(25): 4821-4830.
- [10] Ghosh G. Sellmeier coefficients and dispersion of thermo-optic coefficients for some optical glasses [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(7): 1540-1546.
- [11] Han Z G, Chen L. Eight-step phase shifting algorithm for broadband light interferometry insensitive to envelop variation and phase shifting error [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1236-1242. 韩志刚, 陈磊. 对包络变化及移相误差不敏感的宽带光八步移相算法 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1236-1242.