

# 大倍率干涉显微物镜的光学系统设计

孟 涵, 万新军, 董一帆, 解树平, 宾博逸

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

**摘要** 干涉显微物镜是干涉测量显微镜的关键部件,在微纳表面三维形貌测量中应用广泛。设计了一款无限远共轭大倍率 Mirau 干涉显微物镜,其放大倍率为  $50\times$ ,数值孔径为 0.5。基于系统长工作距的特性,干涉物镜采用反远距物镜结构。根据二级光谱理论,分析了干涉物镜的二级色差校正,合理选择了玻璃材料和初始结构。利用光学设计软件 Code-V 进行系统优化设计,设计结果表明,光学系统全视场范围内在  $800\text{ lp/mm}$  处的调制传递函数大于 0.3,其他各项指标满足设计要求。通过非序列模式建模对所设计的干涉物镜进行光线追迹,仿真分析得到清晰的牛顿环干涉图,结果验证了设计的合理性。

**关键词** 光学设计; Mirau 干涉显微物镜; 长工作距; 二级光谱; 干涉图

**中图分类号** O435; TN202 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.112205

## Design of Optical System for Large Magnification Interference Microscope Objective

Meng Han, Wan Xinjun, Dong Yifan, Xie Shuping, Bin Boyi

*College of Optical-Electrical Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*

**Abstract** Interference microscope objective is a key component of interferometric microscopy, which is widely used in the measurement of three-dimensional topography of micro-nano-surface. In this paper, an infinite conjugate large magnification Mirau interference microscope objective is designed, with the magnification ratio of up to  $50\times$  and the numerical aperture of 0.5. Based on the characteristics of the long working distance of the system, the interference objective lens adopts the retrofocus objective structure. According to the second-order spectral theory, the secondary spectral aberration correction of the interference objective is analyzed, and the glass materials and lens initial structure are selected rationally. The optical system is optimized by utilizing the optical design software Code-V. The design results show that the modulation transfer function at  $800\text{ lp/mm}$  is more than 0.3 in the whole field of view of the optical system, and other indexes all meet the design requirements. By non-sequential modeling, optical tracing of the designed interference objective is carried out, the clear Newton ring interferogram is obtained by simulation and analysis. Which proves the rationality of the design.

**Key words** optical design; Mirau interference microscope objective; long working distance; secondary spectrum; interferogram

**OCIS codes** 220.3620; 080.3630; 120.3180

## 1 引言

显微物镜是光学显微镜中最重要的部件。世界上著名的镜头制造公司如德国莱卡和蔡司、日本尼康等

**收稿日期:** 2017-06-21; **收到修改稿日期:** 2017-07-03

**基金项目:** 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ170004)、国家自然科学基金(61505107)

**作者简介:** 孟 涵(1990—),女,硕士研究生,主要从事光学设计及仪器光学等方面的研究。

E-mail: mhan1105@163.com

**导师简介:** 万新军(1981—),男,博士,讲师,主要从事先进成像及精密检测系统等方面的研究。

E-mail: xinjun.wan@usst.edu.cn

都已具有成熟的镜头设计和生产工艺。现代显微物镜设计制造向着高数值孔径(NA)、大视场方向发展,其中共轭距离为无限远的显微物镜应用广泛。这类物镜由于镜筒透镜和前置透镜之间是平行光束,具有间距自由、装配调整方便以及可任意加用滤光片和棱镜等一系列优点。

干涉测量显微镜是用来测量精密加工零件表面粗糙度和微纳光刻特征三维轮廓的仪器<sup>[1-2]</sup>。干涉显微镜与传统显微镜的区别在于,干涉显微镜需要在显微物镜中加入干涉结构,能够获得待测表面与参考表面的干涉图,通过一定的软件算法对其进行分析解包,从而获取待测表面的三维形貌信息<sup>[3-4]</sup>。根据分开光束的方法不同,有不同类型的显微物镜。常见的有迈克耳孙、Mirau 和 Linnik 三种形式<sup>[5-6]</sup>,其中,Mirau 型结构干涉显微物镜的放大倍率一般在  $10\times$  到  $50\times$  之间,因抗干扰能力强、结构紧凑而得到了广泛的应用。目前,国内外在干涉显微物镜方面普遍采用尼康公司生产的产品,Zygo 公司也有自主设计的干涉显微物镜<sup>[7]</sup>。国内天津大学、南京理工大学也开展了干涉显微物镜的设计,主要是针对低倍率干涉显微物镜的设计试制研究。显微物镜光学设计中,一般数值孔径越大,或者倍率越高,二级光谱像差的校正难度越大<sup>[8]</sup>,所以,在提高分辨率的同时,如何克服二级光谱的影响,是高倍率干涉显微物镜设计中需要研究和解决的问题。

针对以上问题,本文介绍了一款大倍率无限远共轭干涉显微物镜的设计,包括光学特性参数的确定、物镜结构的选取和设计优化、像质评价和干涉图仿真。本结构中采用了三胶合透镜,通过选择特殊光学材料如萤石( $\text{CaF}_2$ )、氟冕玻璃等组合抑制二级光谱像差<sup>[9-11]</sup>,最终在设计波段全视场范围内截止频率处的调制传递函数(MTF)均能达到 0.3 以上。

## 2 Mirau 干涉成像结构

Mirau 干涉成像原理结构示意图如图 1 所示<sup>[12]</sup>。Mirau 型结构近似共光路干涉,在显微物镜和样品之间放置两块平行平板,分光平板表面镀有分光膜,参考平板中央圆域镀有高反膜。从显微物镜出射的光通过参考平板后入射到分光平板表面,光束在此被分成两束,一束反射到参考平板上,被中央的高反膜反射形成参考光路,另一束透过分光平板后入射到待测件表面返回,形成测试光路,两束光分别从参考面和待测面返回后形成干涉,其中测试光携带待测表面面型信息。通过分析干涉图可以得到测试光的波前信息,从而还原待测表面形貌。

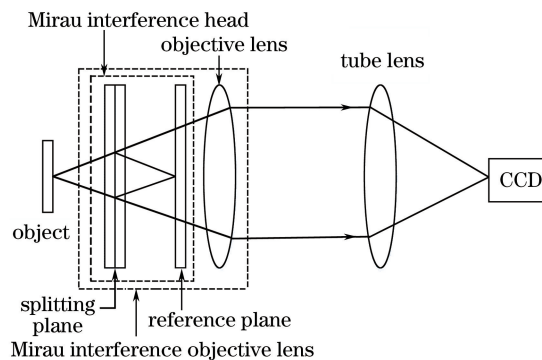


图 1 Mirau 干涉成像原理结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of Mirau interference imaging principle

## 3 干涉物镜初始结构的选定

显微物镜的工作距是透镜组的第一面到被测面的距离,而干涉物镜的工作距是干涉分光部分的第一面到被测面的距离。对于零光程差的 Mirau 干涉结构,参考面和被测面关于分束面对称,这时干涉物镜的工作距小于核心物镜工作距的  $1/2$ ,因此核心物镜必须是长工作距物镜。

长工作距物镜结构的原理图如图 2 所示。可以把长工作距物镜结构简化为正负两个透镜组,负透镜组在前,焦距为  $f'_1$ ,正透镜组在后,焦距为  $f'_2$ 。当平行光通过负透镜组发散之后被正透镜组会聚在物镜焦点上,此时后工作距  $l$  大于透镜组的后焦距  $f'$ 。

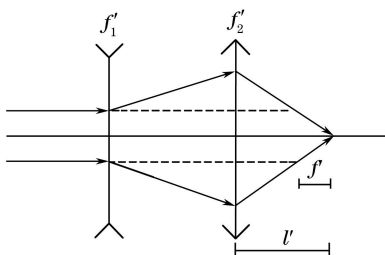


图 2 长工作距物镜结构原理图

Fig. 2 Structure principle of objective with long working distance

## 4 光学系统的设计

### 4.1 设计指标及系统参数

无限远共轭干涉显微物镜的放大率为

$$\beta = -\frac{f'_2}{f'_1}, \quad (1)$$

式中  $f'_1$  为干涉物镜焦距,  $f'_2$  为镜筒透镜焦距。设计时取  $f'_2 = 200$  mm。根据系统的尺寸和结构要求可知物镜焦距为 4 mm。

对于显微系统而言,按照瑞利判据

$$\delta = \frac{0.61\lambda}{NA}, \quad (2)$$

式中  $\delta$  表示显微物镜能够分辨物体之间的最小距离,  $\lambda$  为波长。设计的中心波长为  $0.55 \mu\text{m}$ ,  $NA = 0.5$ , 则  $\delta = 0.671$ , 计算出显微物镜的截止频率为 745 lp/mm。

综上,干涉物镜的基本设计参数为:焦距  $f' = 4$  mm,  $NA = 0.5$ , 视场角为  $4^\circ$ , 波长为  $480 \sim 630$  nm, 后工作距不小于 3.4 mm, 总长不大于 43 mm, MTF 在 800 lp/mm 处大于 0.3。

### 4.2 参考面直径的选取

对于无像差系统,高斯像面上的像点拥有最大的光强度;光学系统有像差时,衍射图样中心点亮斑的光强度比理想成像时下降,后者与前者的强度比称为斯特列尔比( $R_s$ )。根据斯特列尔判据<sup>[13]</sup>,对于小像差系统,要求  $R_s \geq 0.8$ 。由于 Mirau 物镜参考面会遮挡成像光路,因此需要选取合适的直径大小。Mirau 物镜干涉分光图如图 3 所示,参考平面到分束平面的距离  $L_1$  和分束平面到待侧面的距离  $L_2$  相等。参考平面的直径为  $D$ ,其造成的遮拦光束的孔径角为  $\theta_1$ ,则  $\tan \theta_1 = D/(4L_1)$ 。 $\theta_0$  是物镜的最大孔径角,即  $NA = \sin \theta_0$ ,所以入射到分束板的应该是  $\theta_1 \sim \theta_0$  范围内的光束。中心遮拦系数  $\epsilon = \sin \theta_1 / \sin \theta_0$ 。

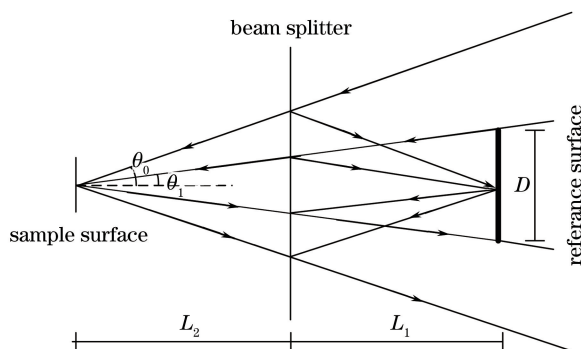


图 3 Mirau 物镜干涉分光图

Fig. 3 Interference beam splitting scheme of Mirau objective

根据设计要求,焦距为 4 mm,视场角为  $4^\circ$ ,则参考平面最小直径为 0.28 mm。由于参考平面的直径越小对系统的影响越小,选定参考面直径为 0.5 mm,此时,  $\epsilon$  为 0.11,  $R_s$  为

$$R_s = (1 - \epsilon^2)^2 \approx 0.97, \quad (3)$$

满足小像差系统要求。

### 4.3 二级光谱像差校正

普通低数值孔径物镜在进行玻璃选择时,通常选用双胶合透镜以实现消色差,而高倍率物镜为了实现消二级色差的设计要求,需要优化材料选择,并用到三胶合透镜。根据二级光谱理论<sup>[14-16]</sup>,对于最常用的三色光 F、D、C,玻璃材料的色散参数:阿贝数  $V$  和相对部分色散  $P$  可由下式表示

$$V_D = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}, \quad P_D = \frac{n_F - n_D}{n_F - n_C}, \quad (4)$$

式中  $n_F$ 、 $n_D$ 、 $n_C$  分别为在三色光 F、D、C 处玻璃的折射率  $V_D$ 、 $P_D$  分别为在光 D 处玻璃的阿贝数。两种材料组合透镜中 D 光相对于 F 光的二级色差可以表示为

$$\Delta L'_{FCD} = -f' \frac{P_1 - P_2}{V_1 - V_2}, \quad (5)$$

式中  $P_1$  和  $P_2$  为两种玻璃的相对色散,  $V_1$  和  $V_2$  为两种材料对应的阿贝数,  $f'$  为系统的焦距。

由(5)式可知,对于一定焦距的光学系统,二级光谱色差的大小与系统结构参数无关,完全由玻璃的色散特性决定。所以校正二级光谱色差,要尽量选择阿贝数相差较大、部分色散相同或相近的玻璃。

本设计中选择 HLA51(成都光明玻璃)和  $\text{CaF}_2$  为三胶合玻璃的材料组合,以实现复消色差优化。这两种玻璃材料的相对部分色散仅相差 0.0004,阿贝数相差 39.7,其参数对比如表 1 所示。

表 1 玻璃参数对比表

Table 1 Parameters comparison of the glasses

Parameter	$\text{CaF}_2$	HLA51
$n_D$	1.43385	1.69680
$V_D$	95.2	55.5
$n_F$	1.43702	1.70552
$n_C$	1.43246	1.69297
$P_D$	0.6952	0.6948

此时,系统的二级光谱像差可近似表示为

$$\Delta L'_{FCD} = 1 \times 10^{-5} f' \approx 0.04 \mu\text{m}, \quad (6)$$

根据(6)式可知,可以选择这两种玻璃材料组合来消除二级光谱色差。

基于上述玻璃材料组合的三胶合透镜,构建干涉显微物镜的初始结构,考虑到物镜总光焦度为 0.25,初始结构共有 5 组透镜,在光焦度分布上采用“一十十”的分配原则,初始设计时采取匀化光焦度的设计原则。采用 Code-V 软件对光学系统设计进行优化,在默认评价函数的基础上加入边界条件,包括对系统总长、后工作距、场曲、三阶球差、轴向色差等的特殊约束,根据优化过程中的评价函数值的变化,实时增减透镜片数和修正优化目标函数,进而完成光学系统设计。

## 5 设计结果及像质评价

通过以上光学结构的设计、玻璃材料的合理选择以及像差优化校正过程,最终结果达到了本设计的目标要求。图 4~图 8 给出了设计结果。光学系统结构图如图 4 所示,物镜由 5 组 12 片透镜组合而成,其中有一组三胶合透镜,两组双胶合透镜,一个弯月形透镜,一个平凹透镜,这样的透镜组合经济性较好,同时能比较好地消除色差,并满足设计需要。第 5 片所用光学材料为特殊光学材料  $\text{CaF}_2$ ;第 4、6 两片的玻璃材料为 HLA51,其余玻璃均采用使用频率较高的国产成都光明玻璃。所设计的干涉显微物镜总长为 43 mm,工作距为 3.4 mm,结构紧凑。

利用 Code-V 光学软件对光学系统的 MTF、点列图、光线像差、场曲和畸变等重要光学参数进行分析。图 5 为物镜的 MTF 曲线,图 6 为光学系统像面上的点列图,由图 5 和图 6 可知,该系统能够获得良好的成像质量。各视场子午和弧矢方向的 MTF 曲线在截止频率 800 lp/mm 处均达到 0.3 以上,并接近衍射极限。由图 6 可以看出,成像点弥散斑半径的均方根(RMS)在边缘视场的最大值为 0.66  $\mu\text{m}$ ,小于物镜能够分

辨的最小距离  $0.67 \mu\text{m}$ , 可以完好成像。图 7 为系统的光线像差曲线, 可以看出, 整个视场范围内的一阶二阶像差都得到了较好校正。由图 8 可以看出, 该光学系统的色球差得到了严格校正, 二级光谱小于  $2 \mu\text{m}$ , 全孔径范围内边缘视场处的场曲最大值不大于  $1 \mu\text{m}$ , 最大畸变量在  $0.2\%$  以内, 场曲和畸变都得到了较好校正, 以上结果均满足显微系统的指标要求。

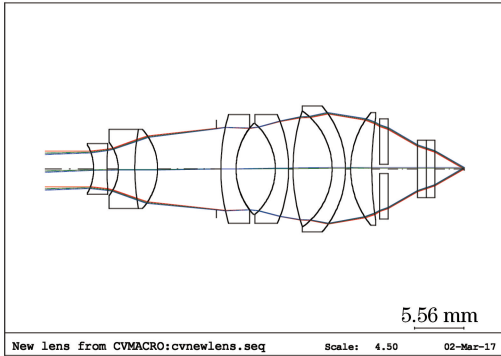


图 4 光学系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of the optical system

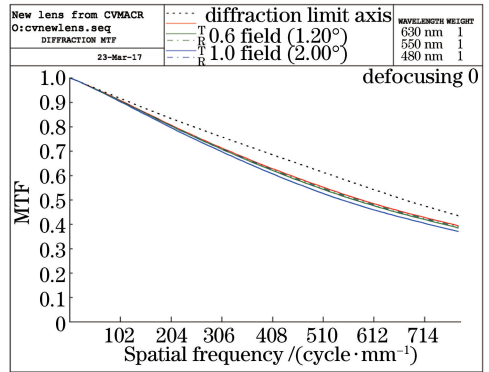


图 5 MTF 曲线

Fig. 5 Curves of MTF

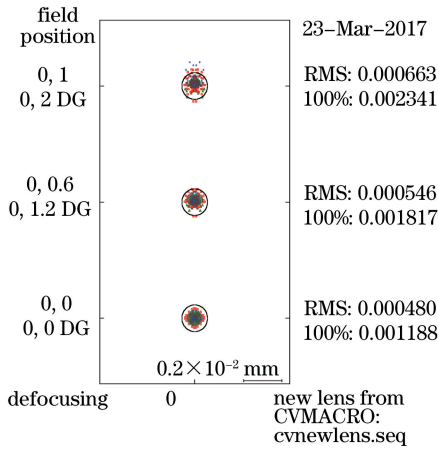


图 6 点列图分布

Fig. 6 Spot diagram distribution

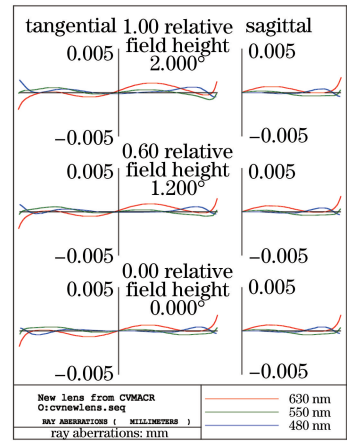


图 7 光线像差曲线

Fig. 7 Ray aberration curves

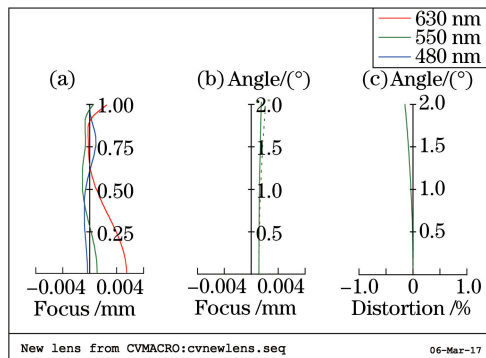


图 8 (a)色球差;(b)像散和场曲;(c)畸变

Fig. 8 (a) Spherochromatism; (b) astigmatism and field curvature; (c) distortion

## 6 公差分析

评价一个光学系统的好坏,除了分析系统的像差外,还要对系统的公差进行评估。利用 Code-V 中的公

差分析功能,对设计好的系统各项公差 MTF 随公差变化情况进行分析,对于显微物镜等对像质要求较高的光学系统,仅仅依靠调整空气间隔来补偿加工和装调误差是不够的,还需要考虑选择合适的补偿器来补偿同心度误差。通过灵敏度分析,系统的加工公差和装调公差如表 2 所示。

表 2 公差分配表

Table 2 Tolerance distribution

Item	Value
Surface irregular / $\lambda$	0.2-0.5
Thickness /mm	0.02-0.03
Airspace /mm	0.01-0.02
Tilt /( $^{\circ}$ )	0.2-0.4
Decenter & roll /mm	0.01-0.02
Refractive index	0.0003-0.0005
Abbe number	0.003-0.005
Fringe power / $\lambda$	2-5

在进行公差分配时,通常进行比较宽松的初始设定,并在此基础上根据灵敏度分析结果,实时地调整某一项或几项公差,力求使得公差尽可能大,以便于加工装调,减少制造组装过程中的成本,提高物镜制造的经济性。通过设置合理的补偿方案,可得到如图 9 所示的公差分析结果。

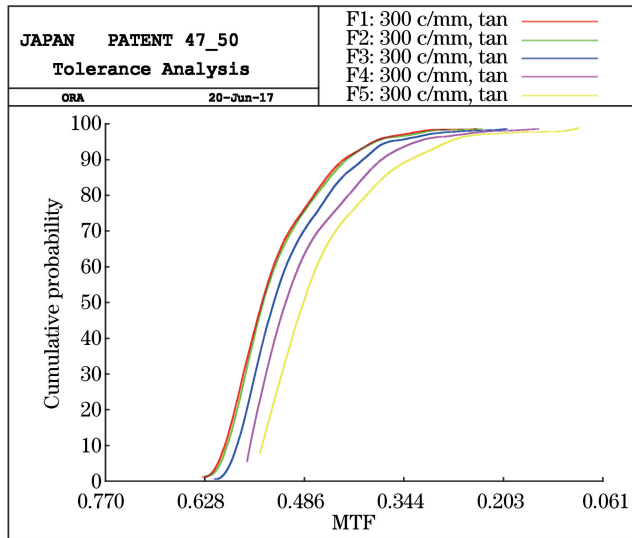


图 9 公差分析曲线

Fig. 9 Curves of tolerance analysis

## 7 干涉图分析

干涉显微物镜的主要功能是能够实现干涉图的获取,所设计的非序列建模仿真图如图 10 所示。仿真模型中将像面进行人为微小的离焦,对光路光线追迹、仿真得到牛顿环干涉图如图 11 所示,结果验证了所设计干涉物镜光学系统的可行性。

## 8 结 论

大倍率干涉物镜光学系统是干涉测量显微镜的关键部件。本研究对数值孔径为 0.5,视场为  $4^{\circ}$ ,波长在 480~630 nm 范围的  $50\times$  干涉显微物镜进行优化设计,选用长工作距的物镜结构,并对其进行详细的二级光谱校正分析,最终优化设计的光学系统工作距为 3.4 mm,总长度为 43 mm。该系统体积小,结构紧凑,光学成像质量接近衍射极限,干涉图分析结果验证了设计的可行性。

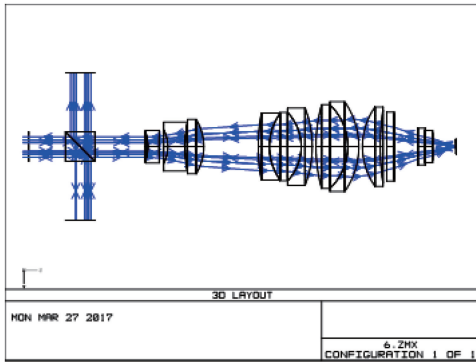


图 10 非序列建模仿真图

Fig. 10 Non-sequential modeling simulation scheme

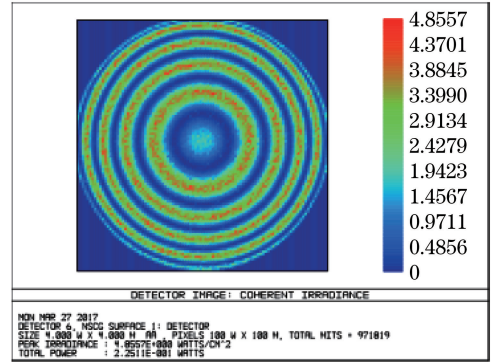


图 11 干涉图

Fig. 11 Interferogram

## 参 考 文 献

- [1] Zhai Chuanmeng. Measurement of Mirau interference microscope on micro-optical surface parameters[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.  
翟传蒙. 基于 Mirau 干涉显微镜的微光学表面参数测量研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [2] Shi D, Qin J, Hung Y Y. Automated measurement of 3-D shapes by a dual-beam digital speckle interferometric technique[C]. SPIE, 1991, 1554A: 680-689.
- [3] Guo Yuan, Mao Qi, Chen Xiaotian, *et al.* Study of a fast windowed Fourier filtering method for interference fringes [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0612008.  
郭媛, 毛琦, 陈小天, 等. 干涉条纹快速加窗傅里叶滤波方法的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0612008.
- [4] Zhang Zhihui, Wang Huaying, Liu Zuoqiang, *et al.* Phase unwrapping algorithms based on fast Fourier transform[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(12): 120902.  
张志会, 王华英, 刘佐强, 等. 基于快速傅里叶变换的相位解包裹算法[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(12): 120902.
- [5] Li Minjue. Design and experimental study of partial coherent interference microscopic[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.  
李闽珏. 部分相干干涉显微镜的设计与实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [6] Jiang Yi. Progress in fiber optic white-light interferometry[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1413-1420.  
江毅. 光纤白光干涉测量术新进展[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1413-1420.
- [7] Zhang Hongxia. Research of nanometer white-light phase-shifting interferometry and instrumentation used of micro-surface topography measurement[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.  
张红霞. 用于微表面形貌检测的纳米级白光相移干涉研究及仪器化[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [8] Wang Meiqin, Wang Zhonghou, Bai Jiaguang. Removing secondary spectrum in wide spectrum optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(3): 360-364.  
王美钦, 王忠厚, 白加光. 宽谱段光学系统消二级光谱的设计[J]. 应用光学, 2010, 31(3): 360-364.
- [9] Liu Yingqi. Study on apochromatism of wide spectral optical system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.  
刘莹奇. 宽光谱光学系统复消色差研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [10] He Yuzhuo, Zhang Yi. Correction analysis of secondary spectrum optical system in periscope photographic window[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2015, 37(1): 97-100.  
赫玉琢, 张屹. 潜望镜照相窗口光学系统二级光谱校正分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2015, 37(1): 97-100.
- [11] Mercado R I. Correction of secondary and higher-order spectrum using special materials[C]. SPIE, 1991, 1535: 184-197.
- [12] Guo Tong, Hu Chunguang, Hu Xiaodong, *et al.* Measuring nanoscale motions of microdevices using a Mirau interferometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(10): 1542-1545.

郭彤, 胡春光, 胡晓东, 等. 利用 Mirau 显微干涉仪测量微器件的纳米级运动[J]. 光子学报, 2005, 34(10): 1542-1545.

- [13] Zhang Hongxia, Zang Yimo, Jing Wencai, *et al.* Research on central obscuration in Mirau phase-shifting interferometry[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2004, 15(10): 1218-1221.

张红霞, 张以谟, 井文才, 等. Mirau 相移干涉术中的中心遮拦研究[J]. 光电子 • 激光, 2004, 15(10): 1218-1221.

- [14] Kingslake R. Lens design fundamentals[M]. Beijing: China Machine Press, 1985: 109-121.

金斯莱克. 透镜设计基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985: 109-121.

- [15] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 123-125.

郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 123-125.

- [16] Zhang Yimo. Applied optics[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1988: 315-327.

张以谟. 应用光学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988: 315-327.