

一种应用于大视场形貌测量的宽带光干涉仪

周行¹, 王书敏¹, 徐舒成¹, 马剑秋¹, 雷李华², 高志山¹, 袁群^{1*}¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;²上海市计量测试技术研究院, 上海 201203

摘要 干涉测试是一种高精度的表面形貌无损测量方法。通常情况下, 单色光干涉测试以激光作为光源, 采用缩小成像方案测量表面形貌。宽带光干涉测试能够有效避免单色光干涉测试时的 2π 相位模糊问题, 常与显微成像技术相结合, 测量阶跃型结构的表面微观形貌。当阶跃型结构样品的横向尺寸较大时, 宽带光显微测试需要采用拼接手段, 降低了测量效率。本文提出了一种缩小成像的宽带光干涉仪, 该仪器可用于大尺寸阶跃型表面的形貌测量, 其工作波段为 480~750 nm, 采用 1 inch 探测器形成了 47.60 mm × 35.76 mm 的测量视场。系统组成包括照明准直镜、干涉腔和成像镜。照明准直镜采用科勒照明方案, 可以提供数值孔径 $NA=0.015$ 、视场直径 $\Phi=59.6$ mm 的均匀照明物方视场; 干涉腔集合了 Mirau 型等光程干涉与 Fizeau 型无中心遮拦的优势, 由倾斜 1.5° 的分光平板和倾斜 3° 的参考平板组成; 成像镜与准直镜形成双远心成像光路, 成像放大率为 $0.25\times$, 在宽谱段范围内的畸变校正达到 0.24% 。采用构建完成的宽带光干涉仪测试了 USAF1951 分辨率板, 系统分辨率可达 14 lp/mm; 测试了校准高度分别为 $7.805\ \mu\text{m}$ 和 $46.554\ \mu\text{m}$ 的台阶板, 对阶跃型结构测量的高度偏差优于 0.4% 。

关键词 测量; 形貌干涉测量; 宽带光; 大视场; 光学设计

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221377

1 引言

形貌检测是精密机械、集成电路、微光学器件等制造过程中的重要步骤^[1]。以内燃机喷油嘴、半导体硅片上的刻蚀图案、微光栅为典型代表的元器件^[2-3]表面存在阶跃型结构(以实现某些特殊功能), 对表面三维形貌高度的测量分辨率提出了纳米级要求。干涉测试是一种高精度的表面三维形貌无损测量方法, 与显微成像技术相结合可以实现微观形貌测量。显微物镜的放大倍率不同, 其横向分辨率通常从数微米至数百纳米变化, 视场覆盖约 $0.1\ \text{mm}\times 0.1\ \text{mm}$ 至约 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ 。当待测件的尺寸较大时, 需要借助拼接测试的方法完成三维形貌的测量^[4]。对于一些尺寸较大的待测件, 其阶跃型结构的横向尺度往往也较大, 对测量的横向分辨率要求降低, 不再局限于显微成像的方式, 可以采用缩小成像的方案实现大视场范围内的直接测量。

单色光干涉测试受限于 2π 相位模糊的问题, 仅能测量高度小于四分之一波长的阶跃型结构^[5]; 双波长、多波长等方案通过等效波长拓展了对阶跃型结构高度

的测量能力^[6-7], 但仍受限于等效波长对应的 2π 相位模糊问题, 无法实现对数十微米及以上阶跃型结构样品的测量; 宽带光干涉测试发挥了低相干信号对零光程位置准确定位的优势^[8-11], 有效避免了 2π 相位模糊的问题, 其高度测量能力由垂直扫描范围决定, 目前该方法主要与显微成像技术相结合^[12-14]用于表面微观形貌的测量。宽带光干涉与单色光干涉光路的区别主要在于干涉结构, 前者的结构形式必须要能实现零光程差干涉。现有的干涉结构主要有 Fizeau 型、Michelson 型、Mirau 型和 Linnik 型。Michelson 型结构是低倍率显微干涉的常用形式^[15], 在物镜和物面之间使用了分束棱镜, 当增大视场时分束棱镜的尺寸也需随之增大, 这将极大地增加系统的体积和重量; 在 Mirau 型干涉结构中^[16], 参考面尺寸大于等于物方视场, 而且参考面是成像光路中的中心遮拦, 随着物方视场增大, 过大的中心遮拦将极大地降低成像的调制传递函数(MTF); Linnik 型结构^[17-18]主要用于高倍率的显微干涉测量, 而且需要两个完全一致的物镜; Fizeau 型结构是单色光干涉中的常用结构, 其视场大小不受限制, 不存在中心遮拦, 但该结构中参考光和测试光的光程不匹配, 无法

收稿日期: 2022-10-31; 修回日期: 2022-11-15; 录用日期: 2022-11-21; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2005500)、国家自然科学基金(62175107, U1931120)、江苏省六大人才高峰项目(RJFW-019)、中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室基金(KLOMT190201)、上海在线检测与控制技术重点实验室基金(ZX2021102)

通信作者: *yuanqun@njjust.edu.cn

应用到宽带光干涉系统中。为了实现宽带光的大视场干涉,需要设计一种新型的干涉结构,使得干涉腔既可以实现零光程差,又能避免中心遮拦。

笔者针对阶跃型结构大视场三维形貌的宽带光干涉检测需求,选用靶面尺寸为 1 inch (1 inch=2.54 cm) 的探测器,设置 0.25× 的成像放大率目标,据此确定整个系统的视场、数值孔径(NA)、系统焦距等参数。综合考虑系统的干涉测量需求后,选择科勒照明系统、双远心成像结构及双平板倾斜的干涉形式,再选用合适的初始结构使用 Zemax 设计软件对系统进行设计。在系统搭建完成后,选择分辨率板、标准台阶对系统开展测试验证与评估。

2 结构形式与光路方案

首先分析所需的干涉腔结构。图 1(a) 所示为 Mirau 型干涉结构,该干涉结构由两个平行且与系统同轴的平板构成。面 1、面 2、面 4 均镀制增透膜;区域 5 为面 4 的中央部分,该部分镀制高反膜作为干涉系统的参考面,其大小须大于等于物方视场;面 3 镀制半透半反膜,目的是实现分光,获得参考光束和测试光束。

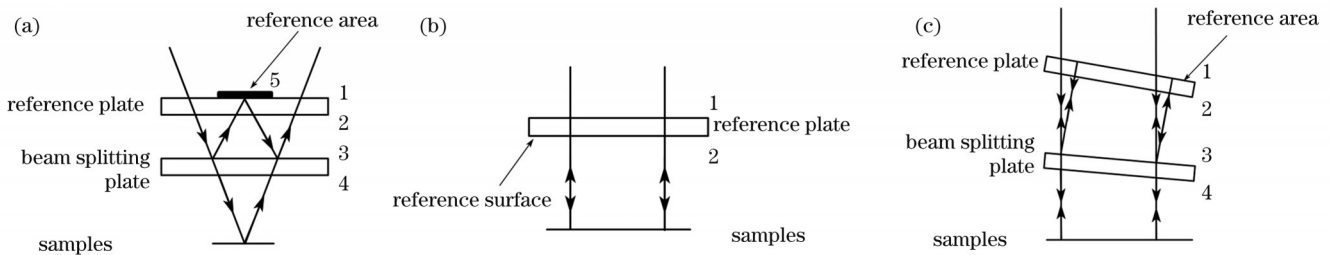


图 1 干涉结构图。(a) Mirau 型干涉结构; (b) Fizeau 型干涉结构; (c) 集 Mirau 型和 Fizeau 型于一体的干涉腔结构

Fig. 1 Interference structures diagrams. (a) Mirau interference structure; (b) Fizeau interference structure; (c) interference cavity structure combining Mireau and Fizeau types

接着分析所需的干涉成像光路。双远心光路相比传统光路有三个优点:无视差,大景深,低失真。无视差确保了大范围垂直扫描过程中像大小的一致性;大景深保证了物体在最佳焦点之外时,系统具有高对比度;低失真保障了极低的干涉条纹畸变,能够提高系统测量的准确性。科勒照明系统相较于传统的照明结构能够实现更高的照明均匀性,而且可以通过视场光阑和孔径光阑实现对系统视场大小及照明孔径角的控制。

系统整体采用双远心成像光路及科勒照明,整体光路如图 2 所示。本系统主要由照明部分、准直镜、成像镜、干涉腔组成。照明部分与准直镜、干涉腔配合,能够为系统提供具有一定孔径角的均匀照明;准直镜和成像镜共同组成了系统的成像部分,以实现 0.25× 放大倍率的缩小成像;干涉腔是使系统产生干涉的结构。上述这些模块通过分光镜实现组合,构建完成大视场宽带光干涉仪。

当物镜倍率降低时,即视场增大时,参考面区域也需要随之增大。参考面是成像光路中的中心遮拦,其增大会导致系统 MTF 中频部分陡然下降,因此该干涉结构无法实现大视场成像。图 1(b) 所示为 Fizeau 型干涉结构。在 Fizeau 型干涉结构中,面 1 为增透面,面 2 为半透半反面,面 2 既作为系统的分光平面,又作为参考平面。由于将整个面作为参考平面, Fizeau 型结构不存在中心遮拦的问题,但其是不等光程结构,只能使用相干长度较长的光源,不适合宽光谱干涉测量。根据 Mirau 型和 Fizeau 型结构的特征,笔者设计了一种结合上述两种结构优势的干涉腔结构,如图 1(c) 所示。在该结构中,面 2 和面 4 为增透面,面 1 镀制了半透半反膜并作为系统的参考面,面 3 也镀制了半透半反膜并作为系统的分光面。该结构既采用了 Mirau 结构中的双平板结构形式,实现了等光程干涉,又保留了 Fizeau 结构中将整个表面作为参考平面的特性,避免了中心遮拦的问题。同时,为了避免多次反射造成的杂散光,参考平板和分光平板均进行了一定角度的倾斜。参考平板相对于光轴的倾斜角是分光平板倾斜角的两倍,以保证杂散光偏离光轴而被光阑阻挡。

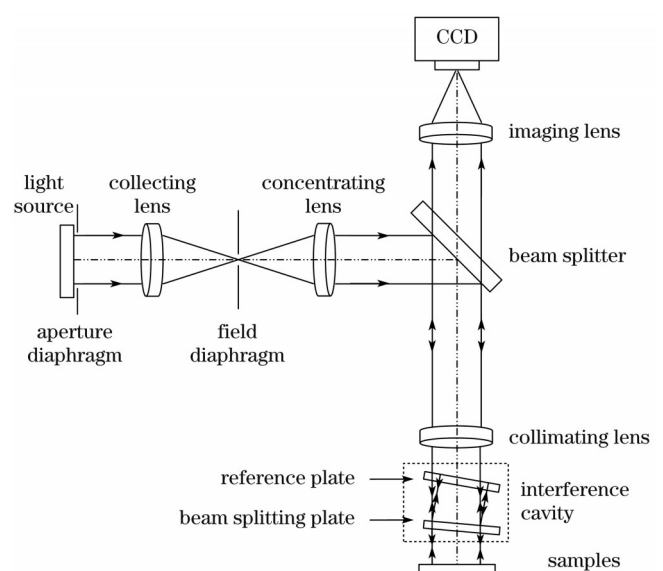


图 2 大视场宽带光干涉系统的光路结构

Fig. 2 Optical structure of large field-of-view broadband optical interferometer system

3 系统基本参数的确定

系统采用靶面尺寸为 1 inch 的 CCD 作为探测器,设置放大倍率为 $0.25\times$,有效视场为 $47.60\text{ mm}\times 35.76\text{ mm}$,目标是实现 $72\text{ }\mu\text{m}$ 的测量分辨率。值得注意的是,干涉系统中成像分辨率与可测形貌的分辨率并不匹配。以瑞利判据为例,两艾里斑能够恰好分辨时,其叠加部分的最低光强为 0.74 倍艾里斑的最大光强,对比度仅为 0.15。成像的极限分辨将导致干涉图中难以分辨条纹级次的问题,无法准确复原形貌,因此,阶跃型结构的周期通常对应 3~5 个艾里斑半径才能满足测量需求^[19]。同时,考虑到实际系统因像差通常无法达到设计分辨率,笔者选择使用 3 个艾里斑对应可测形貌的分辨率。此时系统以瑞利判据为标准的成像分辨率为 $24\text{ }\mu\text{m}$,即系统中的像点刚好能够分辨开的最小距离 $\delta y'$ 为 $24\text{ }\mu\text{m}$ 。而 $\delta y'\approx 0.61\lambda/NA$,系统光源采用的是中心波长 λ 为 576 nm 的宽带光,光谱范围为 $480\sim 750\text{ nm}$,则系统的 NA 至少为 $NA=0.61\lambda/\delta y'=0.015$ 。由于 $2NA=D/f'$ (D 为准直镜入瞳直径, f' 为准直镜的焦距),需要根据 NA 确定合适的有效口径和系统焦距。过大的口径会使得系统的体积和质量过大,而过小的

口径则会导致系统装配困难。依据干涉显微系统中常采用焦距为 100、200、400 mm 的成像镜,确定本系统中准直镜的焦距为 400 mm,成像镜的焦距为 100 mm,准直镜的入瞳直径为 $D=2f'\times NA=12\text{ mm}$ 。在照明系统中,面光源的口径 D_0 为 3.5 mm,发散角 $u_0/2$ 为 29° ,需要实现的照明尺寸 D_3 为 59.6 mm,物方孔径角 $u_3/2$ 为 0.86° ,准直镜焦距 f_3 为 400 mm。

图 3 为照明系统的共轭关系图。由共轭关系可得

$$\tan \frac{u_0}{2} = \frac{D_1}{2f_1}, \quad (1)$$

$$\tan \frac{u_1}{2} = \frac{D_0}{2f_1} = \frac{D_2}{2f_2}, \quad (2)$$

$$\tan \frac{u_2}{2} = \frac{D_1}{2f_2} = \frac{D_3}{2f_3}, \quad (3)$$

$$\tan \frac{u_3}{2} = \frac{D_2}{2f_3}, \quad (4)$$

于是有

$$\tan \frac{u_3}{2} = \frac{f_2 D_0}{f_1 2f_3}, \quad (5)$$

$$D_3 = 2 \frac{f_1}{f_2} f_3 \tan \frac{u_0}{2}. \quad (6)$$

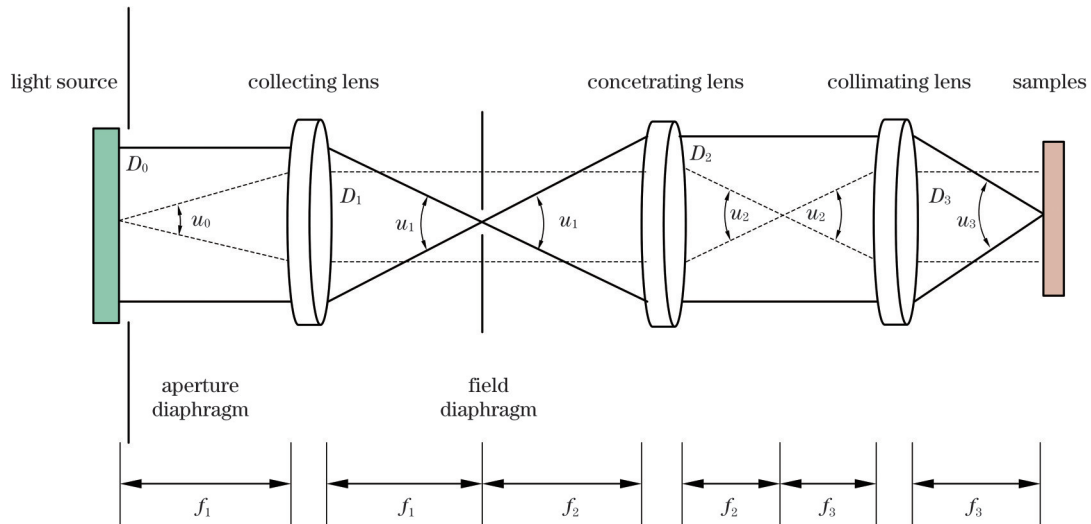


图 3 照明部分的共轭关系图

Fig. 3 Conjugation diagram of illumination module

在 D_0 、 f_3 、 $u_0/2$ 确定的情况下,实现的照明区域 D_3 及照明孔径角 $u_3/2$ 由 f_1 和 f_2 的比值确定,而设计的照明范围及孔径角应比实际所需的数值要大,于是有

$$\frac{D_3}{2f_3 \tan \frac{u_0}{2}} < \frac{f_1}{f_2} < \frac{D_0}{2f_3 \tan \frac{u_3}{2}}. \quad (7)$$

从而可得 $0.1344 < f_1/f_2 < 0.291$ 。考虑到瞳的大小及像差校正,最终确定 $f_1/f_2=0.25$, $f_1=30\text{ mm}$, $f_2=120\text{ mm}$ 。

4 设计思路及设计结果

4.1 准直镜设计与结果

准直镜不仅是系统照明的一部分还是成像的一部分,需优先设计。由于成像是双远心系统,以物面作为物方,准直镜出射平行光,因此在设计时可设置为无焦像空间,对系统出射波前进行评价或加入近轴透镜对点列图进行评价。在设计时,需要将由两块分别具有 1.5° 和 3° 倾斜角度的分光板和参考板组成的干涉腔结构与准直镜进行联合像差优化设计。设计完成的准直镜结构如图 4 所示。图 5 为准直镜的

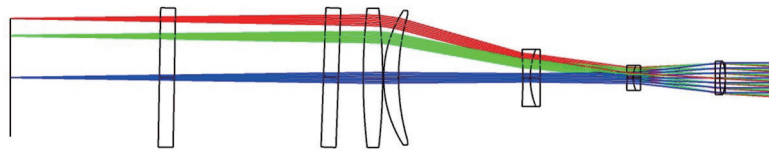


图 4 准直镜结构图

Fig. 4 Structure diagram of collimator

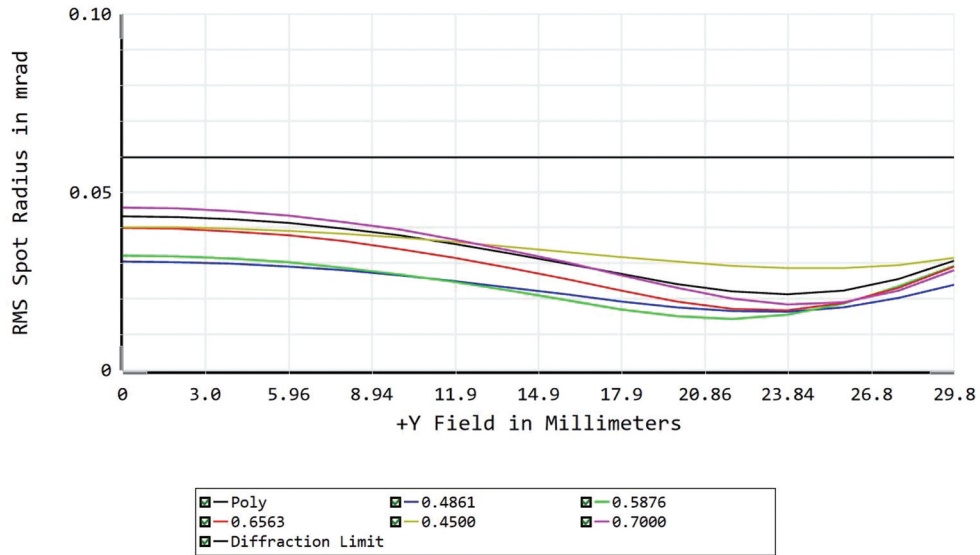


图 5 准直镜全视场点列图

Fig. 5 Spot diagram of collimating lens

角像差半径均值随视场的变化,物方的对角线视场为 ±29.8 mm。

4.2 照明部分设计与结果

照明部分主要由光源、集光镜、聚光镜、视场光阑、孔径光阑组成。孔径光阑可用于调节照明的孔径角大

小,其最大尺寸为 3.5 mm,当调整至 3 mm 时,可以实现 NA 为 0.015 的照明。视场光阑可用于调节成像区域的大小,其最大尺寸为 20 mm,当调整至 17.88 mm 时,可以实现视场直径为 59.6 mm 的照明。照明部分的结构图如图 6 所示。

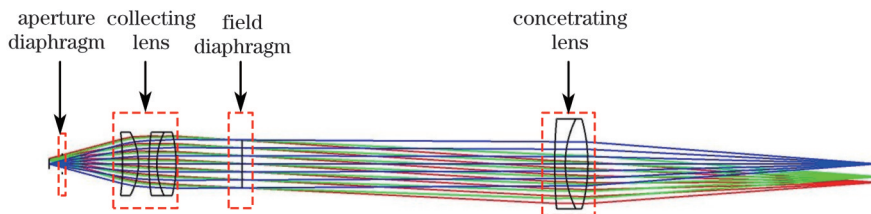


图 6 照明部分结构图

Fig. 6 Structure diagram of illumination module

4.3 成像镜部分

成像镜、准直镜与分束镜构成了系统的成像部分,

因此需要将这三部分进行组合设计。成像镜的结构图如图 7 所示。

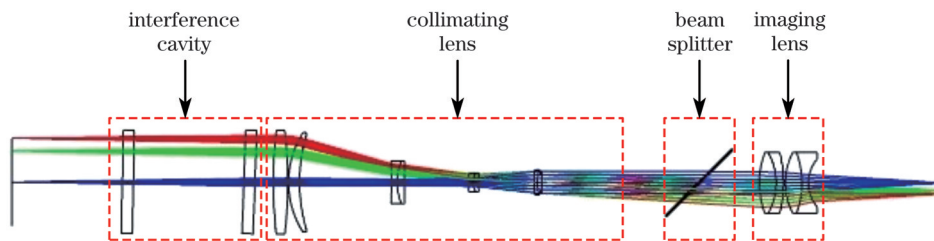


图 7 成像镜结构图

Fig. 7 Structure diagram of the imaging lens

本系统适用于大尺寸阶跃型结构样品的精密测量,畸变误差会导致干涉条纹形变,对测量结果影响较大,因此需要严格控制系统的畸变。优化后,本系统的最大畸变为 0.24%。系统的畸变情况如图 8 所示。

本系统采用氟化钙等非常规色散材料,实现了 480~750 nm 内复消色差设计,最终使得全视场、全波段的光斑半径均值均控制在衍射极限内。系统的光斑半径分布情况如图 9 所示。

系统优化设计后的调制传递函数如图 10 所示。在 42 lp/mm 处的调制传递函数值在 0.5 以上,且曲线平滑,给系统的加工和装调留有较大余量。

5 测试结果

最终搭建完成后的系统如图 11 所示。该系统处理干涉条纹的算法为高精度短相干光三维形貌快速测量算法^[20],扫描步长设置为 72 nm,扫描范围由样品阶跃结构的高度决定。

对 USAF1951 标准分辨率板进行测试,该分辨率板的尺寸为 76 mm×76 mm。系统的实际成像尺寸为

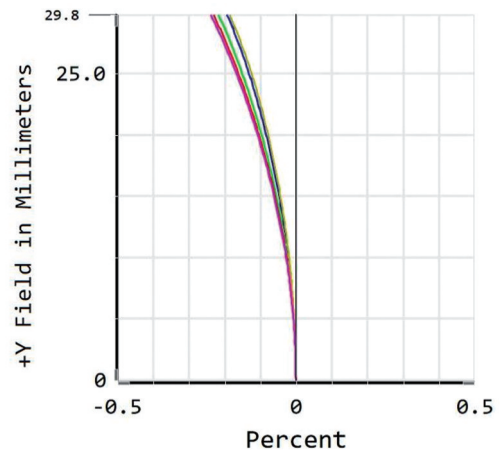


图 8 成像部分畸变图

Fig. 8 Distortion of the imaging section

47.60 mm×35.76 mm,成像分辨率优于 25 μm (group 5-3),形貌检测分辨率优于 72 μm (group 3-6),测试结果如图 12 所示。

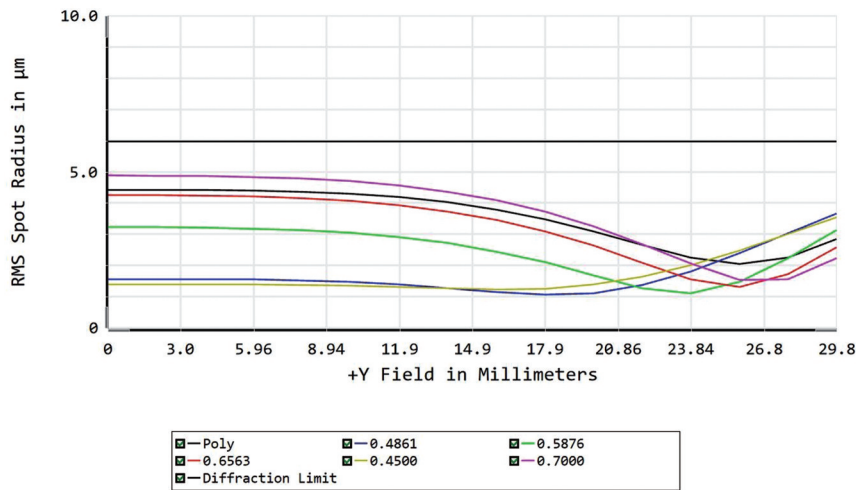


图 9 成像部分点列图

Fig. 9 Spot diagram of the imaging section

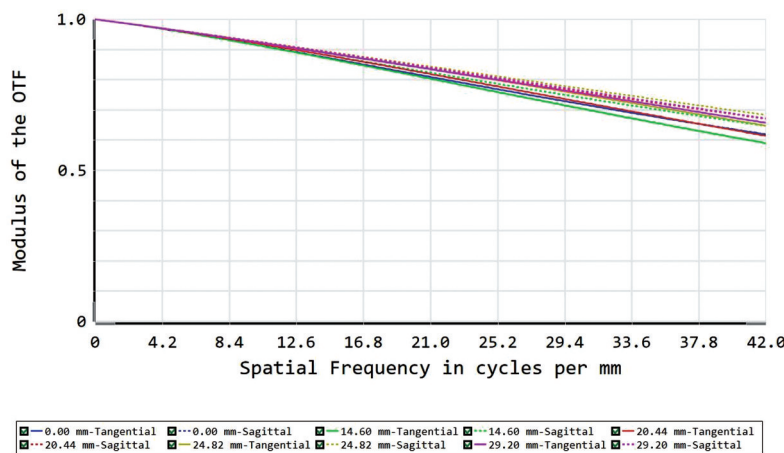


图 10 成像部分的调制传递函数

Fig. 10 MTF of the imaging section

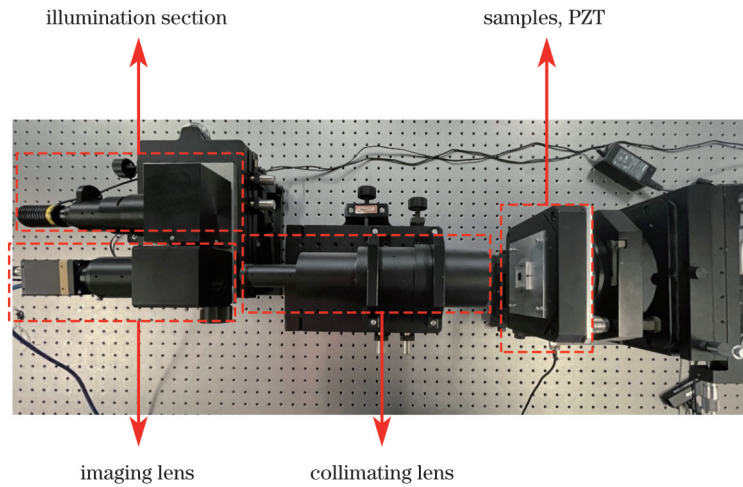


图 11 宽带光干涉仪系统图

Fig. 11 System diagram of broadband optical interferometer

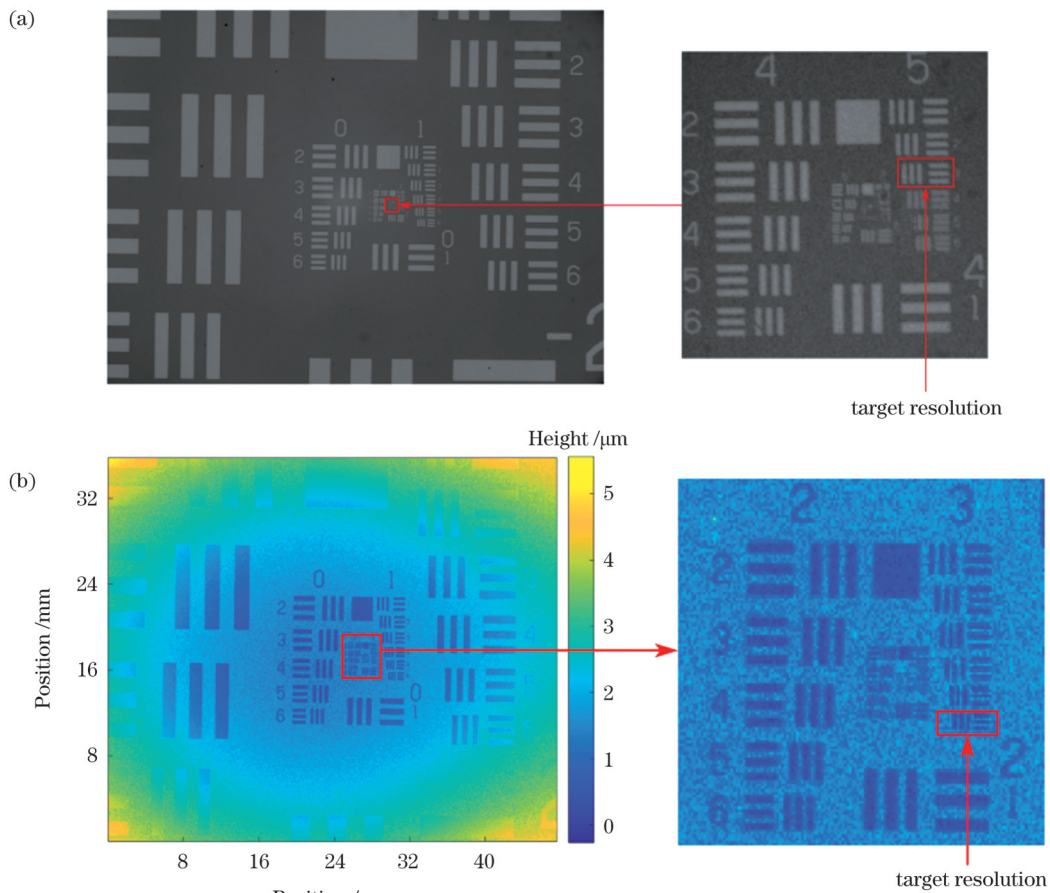


图 12 分辨率板测试结果。(a) 分辨率测试结果图；(b) 三维形貌图

Fig. 12 Test result of the resolution board. (a) Resolution test results graph; (b) three-dimensional morphology

按照 ISO 25178-70—2014 规定的宽槽结构的 $\omega/3$ 测试方法,对高度为 $7.805\ \mu\text{m}$ 和 $46.554\ \mu\text{m}$ 的标准台阶板进行测试,测试图如图 13、14 所示。测试结果分别为 $7.833\ \mu\text{m}$ 和 $46.552\ \mu\text{m}$,高度偏差为 0.359% 和 0.004% ,均优于 0.4% 。对标准台阶板进行 10 次重复测量,测量结果的均方根误差(RMSE)分别为 $5.8\ \text{nm}$ 和 $10.4\ \text{nm}$ 。

6 结 论

针对现有干涉检测系统难以高效测量大尺寸阶跃型结构三维形貌的问题,笔者从基本的光路选型出发,确定了双远心及科勒照明的光学结构形式,采用了集 Mirau 型等光程干涉与 Fizeau 型无中心遮拦优势于一体的融合型干涉腔结构形式。使用 Zemax 软件对系

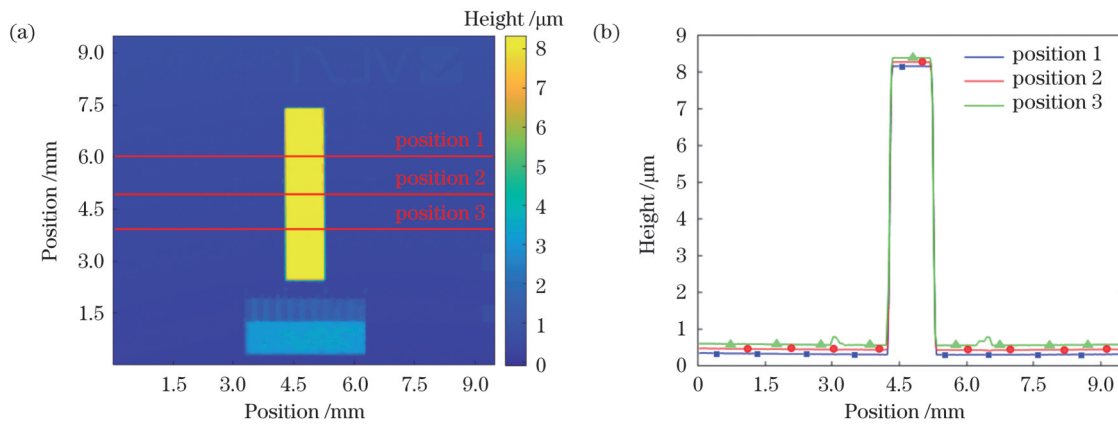


图 13 7.805 μm 标准台阶板样品的测试结果。(a)二维形貌图;(b) X 向轮廓线图

Fig. 13 Test result of 7.805 μm standard step plate sample. (a) Two-dimensional morphology; (b) X -directional contour line

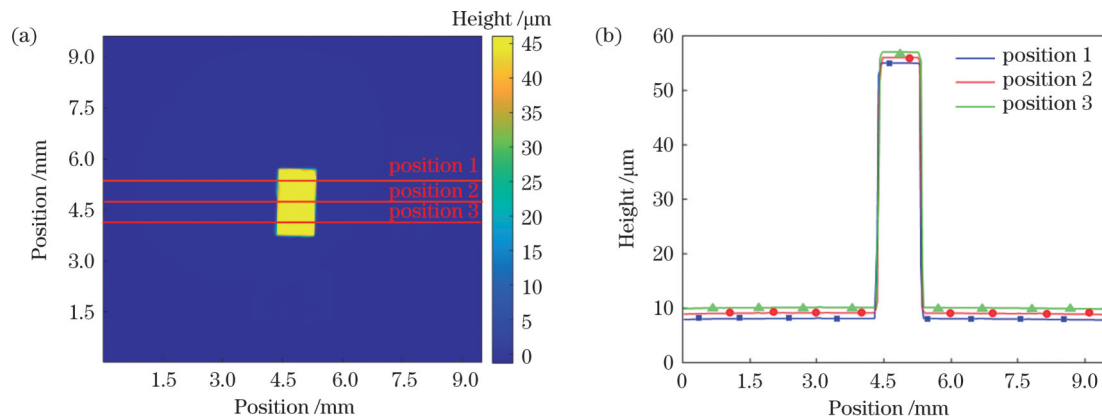


图 14 46.554 μm 标准台阶板样品的测试结果。(a)二维形貌图;(b) X 向轮廓线图

Fig. 14 Test result of 46.554 μm standard step plate sample. (a) Two-dimensional morphology; (b) X -directional contour line

统进行设计,获得了宽带光大视场干涉仪系统。该系统的工作波段为 480~750 nm,采用 1 inch 探测器,实现了 0.25 \times 的成像放大倍率以及 47.60 mm \times 35.76 mm 的测量视场,在宽谱段范围内畸变校正达到 0.24%。采用构建完成的宽带光干涉仪测试了 USAF1951 分辨率板以及校准高度分别为 7.805 μm 和 46.554 μm 的台阶板。测试结果表明:系统测量分辨率可达 14 lp/mm,对阶跃型结构测量的高度偏差优于 0.4%。该大视场宽带光干涉仪在保留极高垂直分辨率的同时,实现了更大视场测量,而且可以测量阶跃型结构,避免了传统干涉仪在检测大尺寸阶跃型结构样品时使用拼接手段带来的测量效率低下的问题,在精密机械、集成电路、微光学器件的精密测量中具有较广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 高志山,袁群,孙一峰,等.微结构显微光学无损检测方法[J].光子学报,2022,51(8):0851501.
Gao Z S, Yuan Q, Sun Y F, et al. Non-destructive test methods of microstructures by optical microscopy[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(8):0851501.
- [2] 梁宇鑫,李智慧,范诗佳,等.氮化硅低损耗光栅耦合器的设计与制备[J].光通信技术,2022,46(4):68-72.
Liang Y X, Li Z H, Fan S J, et al. Design and fabrication of the
- [3] 半月安.基于新型特种少模光纤光栅的矢量模式转换的研究[D].北京:北京交通大学,2021.
Mi Y A. Investigation of vector mode conversion based on novel special few mode fiber gratings[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [4] 路文文,郭景阳,陈善勇.鸥翼型非球面元件的白光干涉拼接测量[J].光学学报,2022,42(9):0912001.
Lu W W, Guo J Y, Chen S Y. White light interferometry stitching measurement of gull-wing aspheric optics[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(9):0912001.
- [5] 胡平,艾琳,邱梓妍,等.金属增材制造构件的激光超声无损检测研究进展[J].中国激光,2022,49(14):1402803.
Hu P, Ai L, Qiu Z Y, et al. Laser ultrasonic nondestructive testing on metal additive manufacturing components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(14):1402803.
- [6] 刘乾,黄小津,李璐璐,等.双波长干涉显微镜波长的双约束标定[J].光学精密工程,2021,29(4):656-664.
Liu Q, Huang X J, Li L L, et al. Wavelength calibration with dual constraints for dual-wavelength interference microscope[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(4):656-664.
- [7] 季文,袁群,高志山,等.基于多波长干涉技术的拼接镜共相检测[J].光学学报,2021,41(16):1612003.
Ji W, Yuan Q, Gao Z S, et al. Co-phasing detecting for segmented mirror based on multiple wavelength interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16):1612003.
- [8] 张超,袁群,张佳乐,等.白光显微干涉三维形貌测量中的移相误差校正方法[J].红外与激光工程,2022,51(7):20220050.
Zhang C, Yuan Q, Zhang J L, et al. Calibration method of the

- phase-shifting error for the topography measurement utilizing white light interferometric microscopy[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(7): 20220050.
- [9] 毕书贤, 段明亮, 宗毅, 等. 高精度动态白光干涉测量方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(5): 0512002.
Bi S X, Duan M L, Zong Y, et al. High-precision dynamic white-light interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(5): 0512002.
- [10] 崔长彩, 杨成, 李子清, 等. 蓝宝石衬底表面形貌检测和评价系统[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(11): 2556-2566.
Cui C C, Yang C, Li Z Q, et al. Measuring and evaluating system for surface morphology of sapphire substrates[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(11): 2556-2566.
- [11] Zhou Y F, Cai H, Zhong L, et al. Eliminating the influence of source spectrum of white light scanning interferometry through time-delay estimation algorithm[J]. *Optics Communications*, 2017, 391: 1-8.
- [12] 王泽锋, 刘小明, 侯静. 基于超连续谱白光干涉仪的宽波段光子晶体光纤色散测量[J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1496-1500.
Wang Z F, Liu X M, Hou J. Broadband dispersion measurement of photonic crystal fiber based on supercontinuum white light interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(6): 1496-1500.
- [13] de Groot P J, Biegen J F. A new class of wide-field objectives for 3D interference microscopy[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9525: 95250N.
- [14] Biegen, James, Colonna de Lega, Xavier, et al. Wide-field interference microscopy for areal topography of precision engineered surface[C/OL]//American Society for Precision Engineering. 2014, 59: 163-166. <https://www.researchgate.net/publication/265545570>.
- [15] 翁倩文. 基于 Michelson 结构的线型白光光谱显微干涉系统的开发与应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
Weng Q W. Development and application research of Michelson line-type white-light spectral microscopic interferometer[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [16] 陈卉. $20\times$ Mirau 型白光干涉显微物镜的设计[J]. *激光与红外*, 2022, 52(9): 1402-1406.
Chen H. Design of $20\times$ Mirau type white light interference microscope objectives lens[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(9): 1402-1406.
- [17] 罗备. 基于 AOTF 的 Linnik 型显微干涉测量系统与方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
Luo B. Study on the Linnik microscopic interferometric system and method based on AOTF[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [18] 郭彤, 周勇, 李明惠, 等. 基于 Linnik 型白光显微干涉光谱测量方法[J]. *纳米技术与精密工程*, 2017, 15(5): 360-365.
Guo T, Zhou Y, Li M H, et al. White light microscopic spectral interferometric measuring method based on Linnik type[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2017, 15(5): 360-365.
- [19] Geometrical product specifications (GPS): surface texture: areal: part 603: nominal characteristics of non-contact (phase-shifting interferometric microscopy) instruments: ISO: 25178-603[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2013.
- [20] 袁群, 孙一峰, 高志山, 等. 高精度短相干光三维形貌快速测量算法: CN109751971A[P]. 2019-05-14.
Yuan Q, Sun Y F, Gao Z S, et al. Highly accurate short coherent optical 3D topography fast measurement algorithm: CN109751971 A[P]. 2019-05-14.

Broadband Optical Interferometer for Topography Measurement with Large Field-of-View

Zhou Xing¹, Wang Shumin¹, Xu Shucheng¹, Ma Jianqiu¹, Lei Lihua², Gao Zhishan¹, Yuan Qun^{1*}

¹*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;*

²*Shanghai Institute of Metrology and Testing Technology, Shanghai 201203, China*

Abstract

Objective Morphological inspection is a significant step in the manufacturing process of precision machinery, integrated circuits, micro-optical devices, *etc.* Typical representatives are internal combustion engine fuel injectors, etched patterns on semiconductor silicon wafers, and micro-gratings. The presence of step-type structures on the surface of these components achieves certain special functions, which place nanometer-level requirements on the high measurement resolution of surface 3D morphology. Interferometric testing is a high-precision non-destructive measurement method for surface 3D morphology, which is combined with microscopic imaging technology to achieve microscopic morphology measurements. Depending on the magnification of the microscope, the lateral resolution varies from a few microns to hundreds of nanometers, and the field-of-view covers $\sim 0.1\text{ mm}\times 0.1\text{ mm}$ to $\sim 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$. When the size of the part to be measured is large, the three-dimensional morphology measurement should be completed using stitching test. For some larger size parts to be measured, the lateral scale of the step-type structure is often larger, and the lateral resolution requirement of the measurement is reduced, which is no longer limited to the microscopic imaging method, and the reduced imaging scheme can be used to achieve direct measurement in a large field-of-view range. The goal of this study is to design and build a broadband optical interferometer with a large field-of-view to meet the inspection needs of large-size and step-type structure samples.

Methods For the detection needs of special samples, this study selects a 1 inch detector and sets an imaging magnification target of $0.25\times$. According to this setting, we determine the field-of-view, numerical aperture, system focal length, and other system parameters of the entire system. After comprehensive consideration of the system's interferometric needs, this study uses the Köhler illumination system, double telecentric imaging structure, and sets a double flat tilted form of interference, which retains the characteristics of the Mirau-type structure with an equal light range and achieves a similar unobstructed effect as the Fizeau structure [Fig. 1 (c)]. Subsequently, we select the appropriate initial structure using Zemax for the system design. After the system is built, the

resolution plate and standard stage are selected for test verification and evaluation of the system.

Results and Discussions The large-field broadband optical interferometer designed and built in this study operates in the 480–750 nm band and uses a 1 inch detector to form a measurement field-of-view of 47.60 mm×35.76 mm. This system consists of an illumination collimator, an interferometric cavity, and an imaging lens. The illumination collimator adopts the Köhler illumination, providing a uniform illumination object field-of-view with $NA=0.015$ and $\Phi=59.6$ mm; the interferometer cavity retains the advantages of the Mirau-type equal-range interference and the Fizeau-type no-center-obstruction feature, and consists of a spectroscopic plate tilted at 1.5° and a reference plate tilted at 3° (Fig. 2); the imaging lens and collimator form a double telecentric imaging optical path with an imaging magnification of $0.25\times$, and the aberration correction reaches 0.24% in the wide spectral range (Fig. 8). The completed broadband optical interferometer was used to test the USAF 1951 resolution plate with a system resolution of up to 14 lp/mm (Fig. 12), and step plates with calibration heights of $7.805\ \mu\text{m}$ and $46.554\ \mu\text{m}$ were tested with the results of $7.833\ \mu\text{m}$ and $46.552\ \mu\text{m}$, respectively. The height deviation for the step-type structure measurement was better than 0.4% (Figs. 13–14).

Conclusions To address the problem that the existing interferometric inspection system is difficult to meet the efficient measurement of three-dimensional morphology of large-size step-type structures, this study begins with the basic optical path selection, then determines the optical structure form of double telecentric and Köhler illumination, and adopts a new interferometric cavity structure form that retains the advantages of the Mirau-type equal-range interference and the Fizeau-type no-center-obstruction feature. After designing the system using Zemax, the broadband optical interferometer system with a large field-of-view was obtained. The interferometer works in the wavelength range of 480–750 nm and uses a 1 inch detector to achieve an imaging magnification of $0.25\times$, a measurement field-of-view of 47.60 mm×35.76 mm, and an aberration correction of 0.24% over a wide spectral range. The completed broadband optical interferometer was used to test the USAF 1951 resolution plate, consisting of two step plates whose calibration heights were $7.805\ \mu\text{m}$ and $46.554\ \mu\text{m}$. The test results show that the system's measurement resolution can up to 14 lp/mm, and the height deviation of the step-type structure measurement is better than 0.4%. This broadband optical interferometer can achieve both larger field-of-view measurement and step-type structure measurements while retaining very high vertical resolution. It avoids the problem of low measurement efficiency caused by stitching when using the traditional interferometer to detect large-size step-type structure samples, which has a greater application prospect in the precision measurement of precision machinery, integrated circuits, and micro-optical devices.

Key words measurement; morphological interferometry; broadband light; large field-of-view; optical design