

基于多光束干涉的长程轮廓仪

李 晶^{1,2} 巩 岩¹ 廖家胜^{1,2} 张 巍¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为提高长程轮廓仪(LTP)面型检测的精度,提出一种使用波面型等光程多光束分束器的 LTP。该分束结构可将入射光束分成若干束等光强等光程的相干光。在理论上分析计算了傅里叶变换(FT)透镜焦平面上干涉条纹的位置和强度分布,探究了零级干涉主极大条纹宽度、振幅和±1级干涉主极大条纹振幅与多光束分束器各结构参数之间的关系。通过选取合适的参数设计了基于多光束干涉原理的新型分束器,并传统分束器进行了仿真实验比较,设计了测量系统中的准直镜和 FT 透镜,在 Zemax 软件中建立了完整的光学系统模型,并对该模型进行了实验验证。结果表明多光束干涉长程轮廓仪可以实现对被测表面斜率的测量,其在探测面上的干涉条纹宽度比传统双光束干涉窄,光强也更加集中,可以提高 LTP 的测量精度。

关键词 测量;长程轮廓仪;分束器;多光束干涉

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0323001

Long Trace Profiler Based on Multiple-Beam Interference

Li Jing^{1,2} Gong Yan¹ Liao Jiasheng^{1,2} Zhang Wei¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to improve the accuracy of surface testing by long trace profiler (LTP), a LTP with wavefront equal-optical-path multiple-beam splitter is proposed. This structure can separate the incident beam into several coherent beams with equal-intensity and zero optical path difference. The position and the intensity distributions of the interferential fringe on focal plane of the Fourier transform (FT) lens are analyzed in theory. The effects of parameters of multiple-beam splitter on the width and amplitude of zero grade interferential fringe and the amplitude of secondary maximum interferential fringe are discussed. A new beam splitter based on multiple-beam interference is designed by choosing appropriate parameters, and compared with traditional beam splitter by simulation. The collimator and FT lens in the measurement system are designed. The complete optical model is established in Zemax and verified by experiment. The results show that multiple-beam interference LTP can realize the measurement of the slope of the surface under test. The width of interferential fringe on the detecting plane is smaller than traditional double-beam interference, and the intensity is more concentrated. It can improve the accuracy of the LTP measurement.

Key words measurement; long trace profiler; beam splitter; multiple-beam interference

OCIS codes 120.6650; 230.5480; 340.6720; 220.4840

1 引言

长程轮廓仪(LTP)是检测同步辐射元件面型的

主要光学仪器,广泛应用在世界多个同步辐射实验室中^[1]。LTP 基于细光束干涉原理^[2-3],通过测量

收稿日期: 2013-08-20; **收到修改稿日期**: 2013-09-27

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(41104122)、科技部国际合作项目(2011DFR10010)

作者简介: 李 晶(1987—),女,博士研究生,主要从事光学检测装调方面的研究。E-mail: lijing871215@126.com

导师简介: 巩 岩(1968—),男,研究员,博士生导师,主要从事光机集成设计和系统装调技术方面的研究。

E-mail: gony@sklao.ac.cn

被测干涉条纹与参考干涉条纹位置的偏移得到被测表面的斜率,最终获得被测表面的面型数据。LTP 的结构最早由 Takacs 等^[4]在 1989 年提出,Irick^[5]提出了一个可以从干涉图样中获取斜率信息的数学模型,此后国内外研究人员进行了一系列降低误差技术和误差源分析方面的研究,同时为解决多种特殊测量问题开发了多种 LTP,包括标准商用型 LTP II^[6]、五棱镜 LTP (PPLTP)^[7]、在线测量 LTP (ISLTP)^[8]、垂直扫描 LTP (VSLTP)^[9]和 π 相位板 LTP^[10]等。LTP 中最重要的部分为双光束分束器 (BS),一般有两类:振幅型 BS 和波面型 BS。振幅型 BS 主要有 Von Bieren BS^[2]、平行平板、LTP II 零光程差 BS^[4]和等光程 BS^[11]等结构,基本原理是通过分振幅法将入射光分为两束相干光,在探测面上发生双光束干涉,在中央产生主极大亮条纹。波面型 BS 是 π 相位板^[10]及与其类似的结构,主要原理是将入射光波面分成两部分相位差为 π 的等光程相干光,在探测面中央产生暗条纹。在分束器中实现等光程可以避免在测量中由于光源波长或频率漂移造成的误差,对环境温度变化和扰动不敏感。

本文对传统双光束分束器进行改进,提出使用波面型等光程多光束分束器,可提高探测器上干涉条纹中心的探测精度,从而提升 LTP 面型检测精度。新的分束器基于多缝多光束干涉原理,将入射光束分为多束等光程的相干光。与已有的双光束分束结构相比,其优势是:不仅满足等光程条件,同时能使干涉主极大条纹的宽度更窄。此外,它实现了分束结构的一体化,减少光在系统中的折反射次数,使得光路更加简单,有利于 LTP 结构装调和减小体积。本文介绍了 LTP 的工作原理,然后从理论上推导多光束干涉在傅里叶变换 (FT) 透镜焦平面的光波振幅分布,进行相应的数值模拟实验,结果表明波面型等光程多光束分束器具有更高的面型检测精度。此外,利用 Zemax 仿真建立基于多光束干涉的 LTP 模型,并进行实验验证,进一步证明了以多缝结构作为波面型等光程多光束分束器的可行性。

2 多光束干涉 LTP

2.1 工作原理

LTP 面型测量的基本光学原理是 $f-\theta$ 转化关系^[12-13],如图 1 所示。平面波从半反半透镜上方入射,被测面与参考面夹角为 θ ,光束反射后,角度变化为 2θ ,参考光束与测量光束均以平行光入射到 FT 透镜,在焦平面探测器上形成两个像,距离为 d ,

它们有如下关系:

$$\tan 2\theta = \frac{d}{f}. \quad (1)$$

由于 θ 很小,可以近似认为 $\tan 2\theta \approx 2\theta$,则

$$\theta = \frac{d}{2f}. \quad (2)$$

由此得到被测表面相对参考面的斜率,通过对斜率进行积分,最终得到被测表面的面型。由 (2) 式可知,面型测量精度取决于 d 的测量精度。参考光束和测量光束所成的像越明锐, d 的测量精度越高,被测面面型的测量精度也将相应提高。

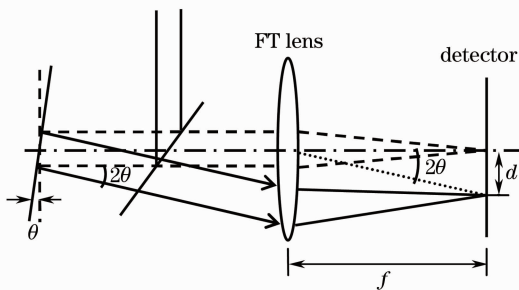


图 1 LTP 光学原理

Fig. 1 Optical principle of LTP

多光束干涉 LTP 测量原理如图 2 所示,光源发出线偏振光,经过保偏光纤、准直镜和分束器 (BS) 后,光束被分成多束相干光,进入 $1/2$ 波片,当波片的光轴与线偏振光的振动方向夹角为 α 时,线偏振光的振动方向较入射时改变 2α 。然后光束进入偏振分光棱镜 (PBS),p 光在 PBS 中透射进入 $1/4$ 波片,经五棱镜 P1 转向,由被测表面 (SUT) 反射,再次经过 $1/4$ 波片,此时偏振方向改变 90° ,再经 PBS 反射进入 FT 透镜,在位于其焦平面的 CCD 上产生多光束干涉条纹;s 光在 PBS 中反射进入 $1/4$ 波片,经参考平面反射,再次经过 $1/4$ 波片,此时偏振方向

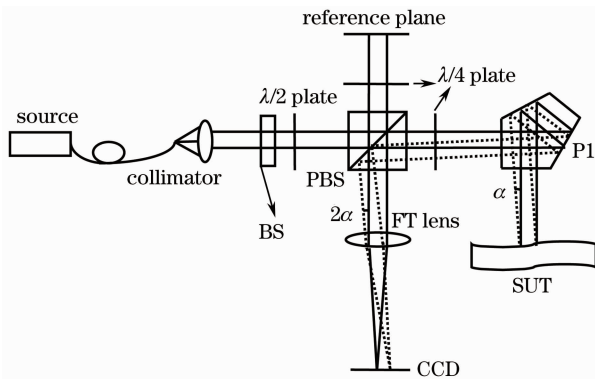


图 2 多光束干涉 LTP 测量原理

Fig. 2 Measurement principle of multiple-beam interference LTP

也改变 90° ，再经 PBS 透射进入 FT 透镜，在位于其焦平面的 CCD 上产生另一套多光束干涉条纹。利用 $f-\theta$ 原理，通过测量两套条纹之间的距离，得出被测面的面型斜率。通过引入 $1/2$ 波片、 $1/4$ 波片和 PBS，减少了系统内的杂散光，并使测量光路与参考光路相互独立。此外，通过调节 $1/2$ 波片光轴与入射光振动方向的夹角，可以调节入射被测表面和参考平面的光强分布。

2.2 多光束分束器

使用多光束干涉代替传统双光束干涉，将双光

束分束器替换为一个多缝分束结构，仍可以实现相干光等光程分束，此时在 CCD 上形成的干涉条纹强度将更加集中，可以提高参考干涉条纹与测量干涉条纹间距的测量精度，进而提高被测表面面型测量精度。多光束分束器的光学原理简化如图 3 所示，虚线框内为多缝分束结构，单缝宽为 a ，缝间距为 d ，其中阴影部分不透光，多缝条数为 N ，FT 透镜的焦距为 f 。准直的平行光入射多缝，忽略系统中 PBS、五角棱镜和波片的误差，多缝在远场形成的干涉条纹被 FT 透镜成像在 CCD 像面上。

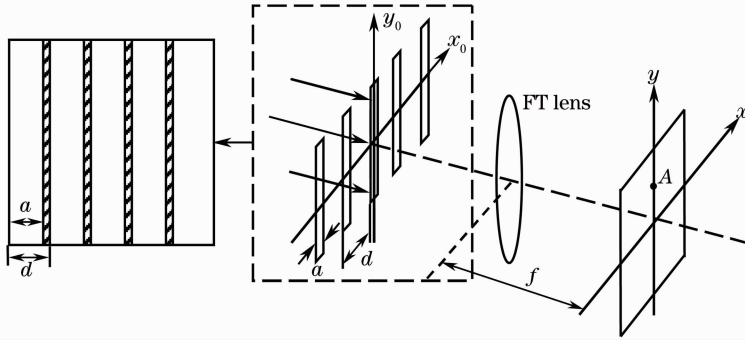


图 3 多光束分束器原理

Fig. 3 Principle of multiple-beam BS

由于狭缝的宽度相对长度极小，仅考虑 x 方向的衍射和干涉，单位振幅的平面波入射多缝后在像面上 A 点的光场复振幅表示为

$$\begin{aligned} \tilde{E}(A) = C \int_{Nd} \exp\left(\frac{-ikxx_0}{f}\right) dx_0 = C \left[\int_{-a/2}^{a/2} \exp\left(\frac{-ikxx_0}{f}\right) dx_0 + \int_{d-a/2}^{d+a/2} \exp\left(\frac{-ikxx_0}{f}\right) dx_0 + \dots + \right. \\ \left. \int_{(N-1)d-a/2}^{(N-1)d+a/2} \exp\left(\frac{-ikxx_0}{f}\right) dx_0 \right] = Ca \exp[-i(N-1)\varphi/2] \frac{\sin \alpha}{\alpha} \frac{\sin(N\varphi/2)}{\sin(\varphi/2)}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $C = -\frac{i}{\lambda f} \exp\left[ik\left(f + \frac{x^2 + y^2}{2f}\right)\right]$ ， $\alpha = \frac{ka}{2f}x$ ， $\varphi = \frac{kd}{f}x$ 。则 A 点的光强可以表示为

$$I(A) = \left(\frac{1}{\lambda f}\right)^2 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha}\right)^2 \left[\frac{\sin(N\varphi/2)}{\sin(\varphi/2)}\right]^2. \quad (4)$$

像面明暗条纹的位置由(4)式中的单缝衍射因子 $(\sin \alpha/\alpha)^2$ 和多缝衍射因子 $[\sin(N\varphi/2)/\sin(\varphi/2)]^2$ 决定，多缝衍射是衍射和干涉的共同效果，当 $\varphi = 2m\pi$ 时，干涉因子取极大值 N ，此时由(4)式可知光强是单缝衍射主极大光强的 N^2 倍。

对于传统双光束分束器，单位振幅的平面波被分为光强同为 $1/2$ 、振动方向相同的两束相干光，此时 A 点的光强表示为

$$I'(A) = \left(\frac{1}{\lambda f}\right)^2 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha}\right)^2 (1 + \cos \varphi'), \quad (5)$$

式中 φ' 为两束光波的相位差。对于双光束等光程干

涉， $\varphi' = 2m\pi$ ，此时 A 点光强为单缝衍射主极大光强的 2 倍；对于相差 π 相位的双光束干涉， $\varphi' = (2m+1)\pi$ ，此时 A 点光强为零，但在 A 点两侧存在两个主极大，主极大光强小于双光束等光程干涉的主极大光强。可见使用传统双光束分束器时，像面干涉图案主极大的光强小于多光束干涉的主极大光强。

选定单缝宽度为 0.2 mm ，假设入射光强为 1，比较单缝衍射、双光束等光程干涉、 π 相位差双光束干涉和 $N=5$ 、 $d=1.2a$ 时多光束干涉的光强分布，CCD 像面的光强分布如图 4 所示。由图 4 可以看出：等光程双光束干涉的光强相比衍射光强更加集中；相差 π 相位的双光束干涉在中心存在暗条纹，但条纹宽度仍较大；多光束干涉像面的主极大光强较两种双光束分束结构更强，条纹宽度更加细锐。

在 Matlab 软件中基于傅里叶变换以及图像处理算法对 LTP 几种分束结构的干涉条纹进行了数

值仿真,为模拟激光光源,被分割光束采用高斯光束。仿真像面图案如图 5 所示,可知多光束分束器的干涉条纹较其他几种分束结构,条纹更窄,能量更集中,因此可获得更高的分辨率。

设 $\sin \theta \approx x/f$, 则多缝衍射中干涉主极大的角宽度为

$$2\Delta\theta = \frac{2\lambda}{Nd \cos \theta}. \quad (6)$$

由(6)式可以看出多缝条数 N 越多,主极大的角宽度越小。在两个主极大之间有 $N-1$ 个极小,极小的角宽度为 $\Delta\theta$ 。多缝衍射中衍射中央主极大的角宽度可以表示为

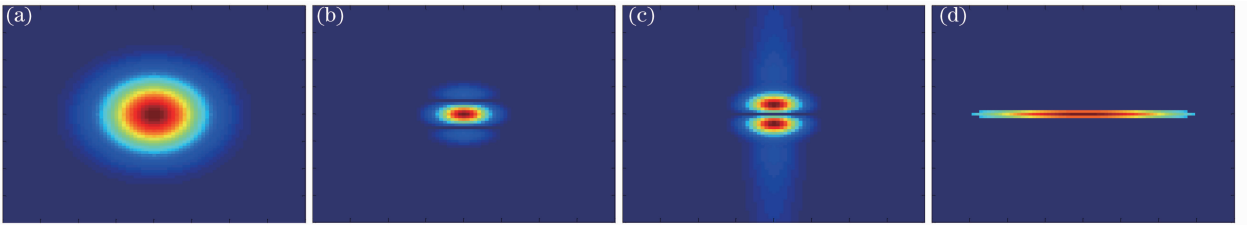


图 5 (a)单缝衍射,(b)等光程双光束干涉,(c)相差 π 相位的双光束干涉和(d)多光束干涉图

Fig. 5 Images of (a) single slit diffraction, (b) double-beam interference with equal optical path, (c) double-beam interference with π phase shift and (d) multiple-beam interference

由(6)式和(7)式可知:由于 $Nd > a$, 在一个衍射主极大中包含若干个干涉主极大,假设衍射主极大包含 k 个干涉主极大,忽略衍射主极大边缘小于 $N-1$ 个的多缝衍射极小宽度,则有如下关系:

$$k \frac{2\lambda}{Nd \cos \theta} + (k-1) \frac{(N-1)\lambda}{Nd \cos \theta} \approx \frac{2\lambda}{a \cos \theta}. \quad (8)$$

由(8)式可得

$$k = \frac{2Nd}{(N+1)a} + \frac{N-1}{N+1} \approx \frac{2d}{a} + 1. \quad (9)$$

k 越小越有利于探测多缝衍射主极大,因此实验多缝中单缝宽度 a 应接近多缝周期 d 。分别选择 $d = 1.2a$ 、 $d = 2a$ 和 $d = 3a$, 像面条纹的光强分布如图 6 所示。可以看出随着 d/a 取值变大,多光束零级干涉主极大条纹变窄,但是 ± 1 级干涉主极大条纹的强度越来越大,其位置也更靠近零级干涉主极大,造成零级干涉主极大与 ± 1 级干涉主极大越来越难分辨,影响条纹中心的探测精度。此外,如果测量中参考条纹和测量条纹 ± 1 级干涉主极大重叠,还容易造成零级干涉主极大识别的混淆。由于多缝周期的增加,零级主极大条纹宽度减小并不十分显著,考虑干涉次极大对测量的影响,选择多缝结构的周期 $d = 1.2a$ 。

$$2\Delta\theta' = \frac{2\lambda}{a \cos \theta}. \quad (7)$$

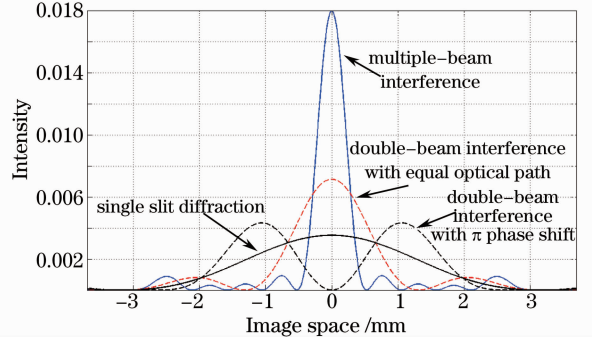


图 4 像面光强分布

Fig. 4 Intensity distributions on image plane

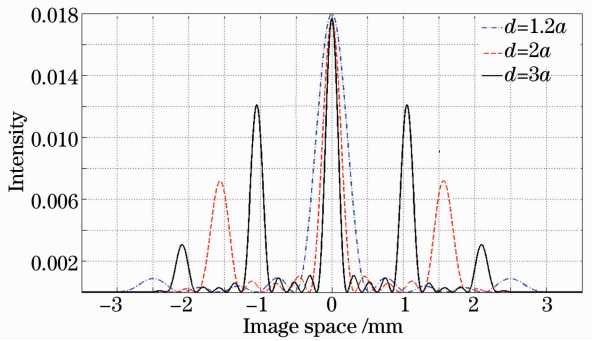


图 6 像面条纹的光强分布

Fig. 6 Intensity distributions of fringes on image plane

3 光学系统建模分析

在 Zemax 中建立多光束干涉 LTP 的非序混合光学模型,如图 7 所示。选取 550 nm 可见光光源,为了简化系统,准直镜和 FT 透镜均设计为单片非球面透镜,设计参数如表 1 所示,设计结果如图 8 所示。其中图 8(a)、(b)分别为准直镜的点列图与场曲畸变图,图 8(c)、(d)分别为 FT 透镜的点列图与场曲畸变图,可以看出二者点斑均小于衍射极限,畸变均小于 0.002%,满足多光束干涉 LTP 测量精度的需求。将被测面沿纸面轴向转动 1° , CCD 像面上

所成的像如图 9(a)所示,可见测量光路多光束干涉主极大与参考光路多光束干涉主极大分开一定距离。图 9(b)为沿 x 轴向的光强曲线,可以看出参考条纹和测量条纹有明显的两个光强峰值,通过精确定位峰值在像面的位置可以计算出参考条纹与被测条纹的距离,根据 LTP 工作原理利用这个距离大小即可计算出被测面的斜率。

表 1 准直镜和 FT 透镜设计参数

Table 1 Design parameters of collimator and FT lens

Lens	Wavefront / nm	Focal length / mm	F number	Field / (°)
Collimator	550	200	20	1
FT lens	550	1000	30	1

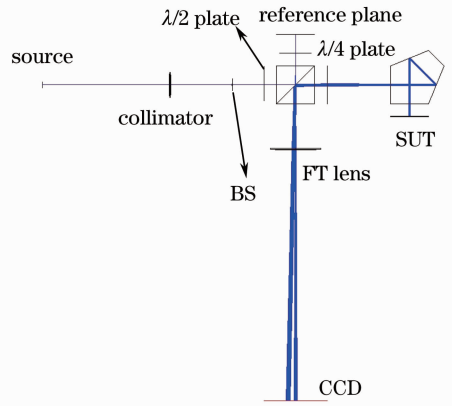


图 7 多光束干涉 LTP 的光学模型

Fig. 7 Optical model of multiple-beam interference LTP

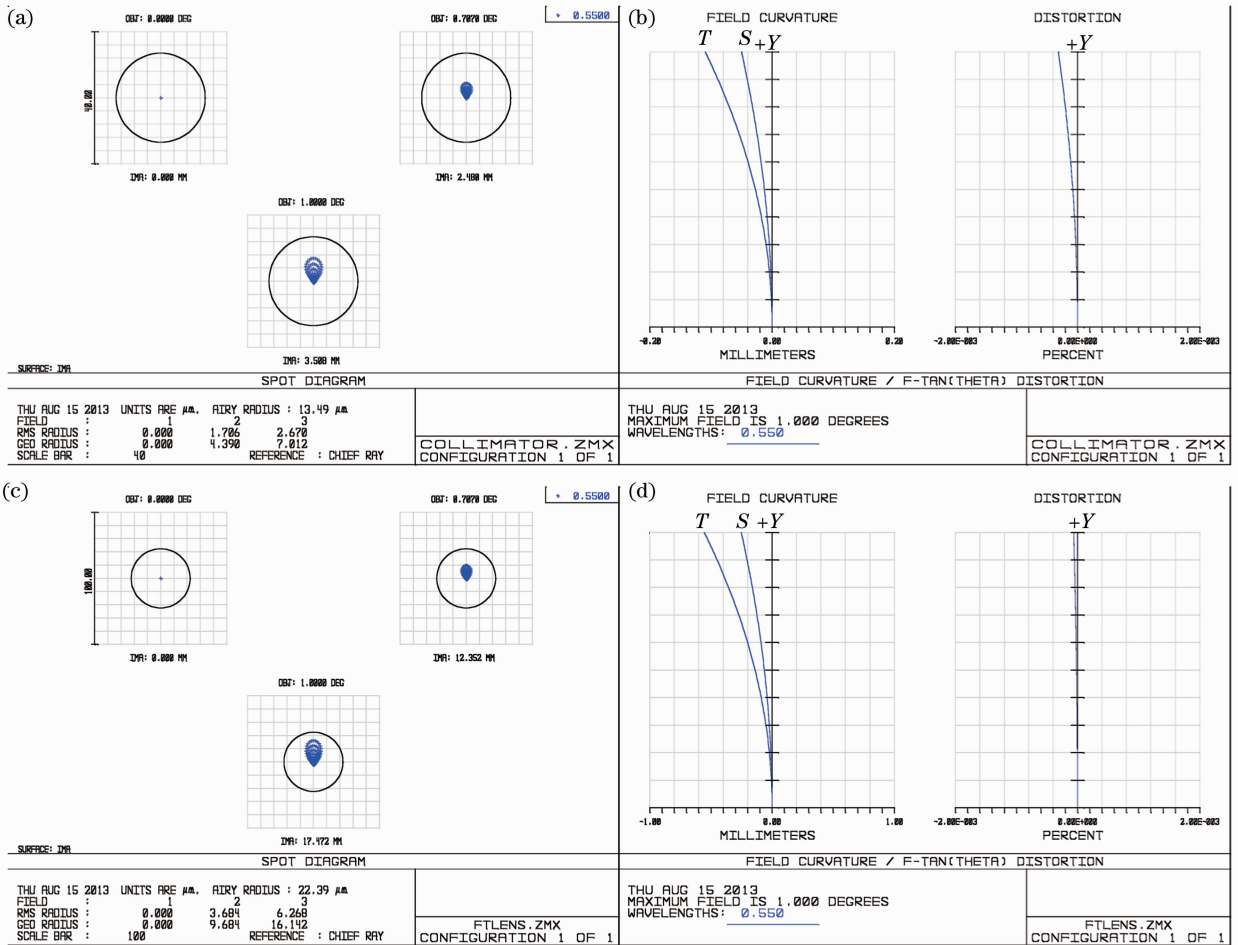


图 8 (a)准直镜点列图; (b)准直镜场曲畸变图; (c) FT 透镜点列图; (d) FT 透镜场曲畸变图

Fig. 8 (a) Spot diagram of collimator; (b) field curvature and distortion of collimator; (c) spot diagram of FT lens; (d) field curvature and distortion of FT lens

4 实验验证

搭建基于多光束分束结构的 LTP 光路,如图 10

所示。光源使用 Thorlab 公司的 He-Ne 激光器,波长为 632.8 nm,出射光为束腰尺寸为 0.68 mm 的线偏

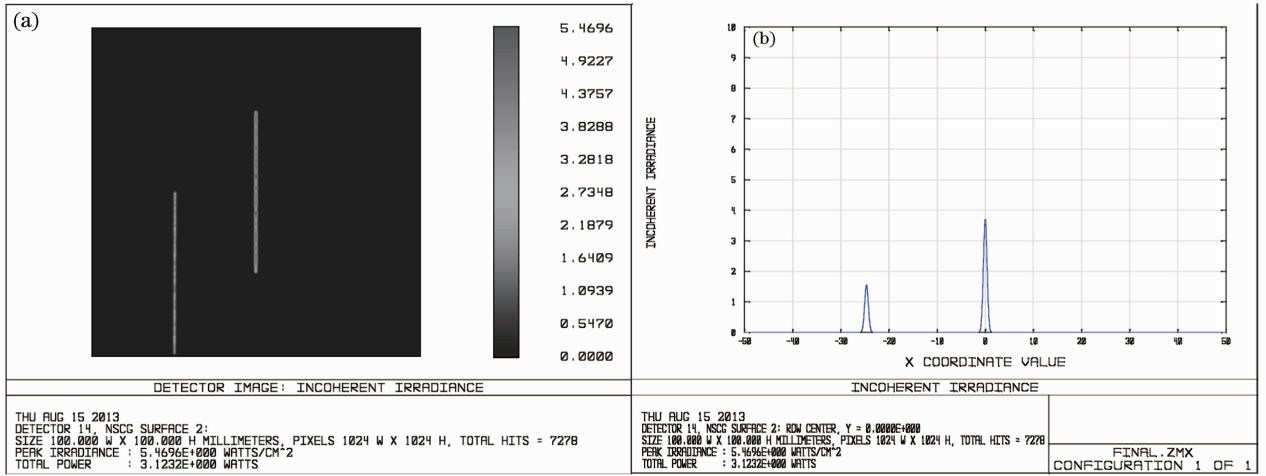


图 9 (a) CCD 像面成像; (b) 光强曲线

Fig. 9 (a) Image on CCD image plane; (b) curve of intensity



图 10 实验装置图

Fig. 10 Experimental equipment

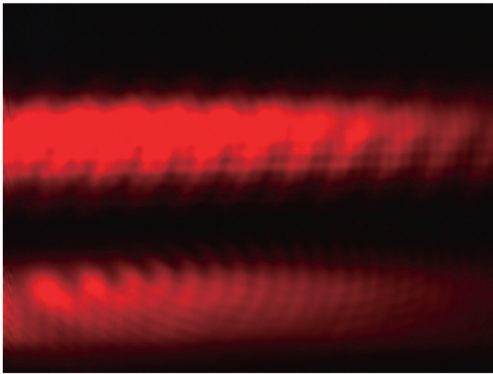


图 11 CCD 像面图

Fig. 11 Image obtained by CCD

振光。依次经过光阑、准直镜、可调节狭缝、多光束分束器和五角棱镜,光束转向 90° 入射 $1/2$ 波片,在 PBS 中分光,其中 p 光透射进入 $1/4$ 波片被被测表面反射,实验中选取的被测表面为一个倾斜一定角度的平面反射镜; s 光反射进入另一 $1/4$ 波片被参考面反射。二者均经过 FT 透镜,在 CCD 上成像,产生参考干涉条纹和被测干涉条纹,如图 11 所示,

实验所用 CCD 像面尺寸为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$, 单位像素尺寸为 $4.65 \mu\text{m}$ 。从图中可以看出参考和被测干涉条纹主极大明亮细锐,明显分开一定距离,经过进一步计算可以得出被测表面相对参考面的表面斜率。

5 结 论

提出了一种基于多光束干涉的 LTP 分束结构,在理论上计算了多光束干涉在 FT 透镜焦平面上的光强分布,并探究了多光束分束器的周期和单缝宽度对干涉条纹宽度和 ± 1 级干涉主极大光强的影响。在保证干涉条纹宽度尽量小的前提下,为使得 ± 1 级干涉主极大光强相对零级干涉主极大较弱,选取多光束分束器中多缝的周期为单缝宽度的 1.2 倍。设计了系统中准直镜和 FT 透镜的参数,二者的畸变均小于 0.002% ,满足系统测量需求。在 Zemax 中建立了完整的多光束干涉 LTP 模型,并搭建了实验光路,仿真和实验结果表明该结构可以实现对被测面斜率的测量。多光束分束结构在实现等光程的同时,相比传统等光程双光束分束器和 π 相位双光束分束器提高了像面上干涉主极大的光强,并减小了干涉条纹的宽度。根据 LTP 的工作原理,这种分束结构可以提高 LTP 测量精度。

参 考 文 献

- 1 Haixian Ye, Liming Yang. Accuracy and analysis of long-radius measurement with long trace profiler [J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(10): 102301.
- 2 K Von Bieren. Pencil beam interferometer for aspheric optical surfaces [C]. SPIE, 1982, 343: 101-108.
- 3 K Von Bieren. Interferometry of wave fronts reflected off conical surfaces [J]. Appl Opt, 1983, 22(14): 2109-2114.

- 4 P Z Takacs, S N Qian. Surface Profiling Interferometer [P]. US Patent 4884697, 1989-12-05.
- 5 S C Irick. Determining surface profile from sequential interference patterns from a long tracer profiler [J]. Rev Sci Instrum, 1992, 63(1): 1432—1435.
- 6 P Z Takacs, E L Church, C J Bresloff, *et al.*. Improvements in the accuracy and repeatability of long trace profiler measurements [J]. Appl Opt, 1999, 38(25): 5468—5479.
- 7 S N Qian, W Jark, P Z Takacs. The penta-prism LTP: a long-trace-profiler with stationary optical head and moving penta-prism [J]. Rev Sci Instrum, 1995, 66(3): 2562—2569.
- 8 S N Qian, W Jark, P Z Takacs, *et al.*. *In situ* surface profiler for high heat load mirror measurement [J]. Opt Eng, 1995, 34(2): 396—402.
- 9 Haizhang Li, Peter Z Takacs, Tom Oversluizen. Vertical scanning long trace profiler: a tool for metrology of X-ray mirrors [C]. SPIE, 1997, 3152: 180—187.
- 10 Yang Zhao, Zhi Li, Dacheng Li, *et al.*. Principle of π -phase plate long trace profiler for synchrotron radiation optics [J]. Opt Commun, 2001, 200(1-6): 23—26.
- 11 Shinan Qian, Peter Z Takacs. Equal optical path beam splitter for a pencil beam interferometer and shearing interferometer [J]. Opt Eng, 2003, 42(4): 929—934.
- 12 Li Shun, Gong Yan, Zhang Wei, *et al.*. Design of co-path scanning long trace profiler for measurement of X-ray space optical elements [C]. SPIE, 2010, 7544: 754421.
- 13 Li Shun, Gong Yan. Error analysis and correction during measurement of tube-shaped super-smooth mirrors using long trace profiler [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1112001. 李 顺, 巩 岩. 长程轮廓仪用于筒状超光滑表面测量的误差分析及校正[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1112001.

栏目编辑：史 敏