

# 2 $\mu\text{m}$ 激光外差干涉系统中大口径 $f-\theta$ 扫描系统的光学设计

王春晖<sup>1</sup> 季一勤<sup>2</sup> 高 龙<sup>1</sup> 李彦超<sup>1</sup> 曲 杨<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

<sup>2</sup>天津津航技术物理研究所天津市薄膜光学重点实验室, 天津 300192)

**摘要** 透射式激光外差干涉系统能精确测量待测物的内部折射率分布和厚度信息。设计了应用于干涉系统中的混合光学扫描结构,它由微机电系统(MEMS)振镜和  $f-\theta$  透镜系统组成。 $f-\theta$  透镜组由 3 片不同材料的透镜构成,透镜系统对 2  $\mu\text{m}$  激光波长有约 40% 的透射率,可扫描 300 mm<sup>2</sup> 的范围。利用 Zemax 软件从衍射光斑、畸变系数、光束发散角 3 个方面对  $f-\theta$  透镜模型进行了优化设计。优化结果表明, $f-\theta$  透镜出射扫描光束垂直于待测物体表面,系统焦距为 434 mm,畸变像差小于 0.5%。最后给出了  $f-\theta$  透镜的设计实物图,并通过 He-Ne 激光给出了扫描结果示意图,达到了预期的设计指标。

**关键词** 光学设计;外差干涉仪; $f-\theta$  透镜;扫描系统;畸变系数

**中图分类号** O439;TH744.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1216002

## Optical Design of Large Working Area $f-\theta$ Scanning Lens for 2 $\mu\text{m}$ Laser Heterodyne Interferometry System

Wang Chunhui<sup>1</sup> Ji Yiqin<sup>2</sup> Gao Long<sup>1</sup> Li Yanchao<sup>1</sup> Qu Yang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

<sup>2</sup>Tianjin Key Laboratory of Optical Thin Films, Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300192, China)

**Abstract** The inner refractive index distribution and absolute thickness of sample can be accurately measured by transmitted laser heterodyne interferometer. The combined optical scanning configuration composed of micro-electro-mechanical system (MEMS) mirror and  $f-\theta$  lens is proposed, which is applied for the transmitted laser heterodyne interferometer system. The  $f-\theta$  lens set is composed of three lenses with different materials, and has an approximately 40% transmission coefficient and a scanning area of 300 mm<sup>2</sup>. The  $f-\theta$  lens model is optimized from the aspects of diffraction spot, distortion coefficient and beam divergence angle. The optimization results show that the series beam out of  $f-\theta$  lens is perpendicular to the sample surface, and the system has a focal length of 434 mm and a distortion coefficient of 0.5%. The configuration for  $f-\theta$  lens is presented. The result of optical scanning on the first surface of  $f-\theta$  lens is introduced by He-Ne laser, which meets the requirements of the design target.

**Key words** optical design; heterodyne interferometer;  $f-\theta$  lens; scanning system; distortion coefficient

**OCIS codes** 220.3620; 220.4830; 120.3180; 060.2840

## 1 引 言

激光外差干涉是一种具有测量精度高、速度快、灵敏度高等优点的无损光学检测技术,在半导体硅

片检测、光学玻璃生产、超光滑表面检测中得到广泛的应用<sup>[1~6]</sup>。在激光外差干涉系统中,测量扫描光束和待测样品的作用方式可分为全反射式光路<sup>[1~5]</sup>

收稿日期: 2011-06-20; 收到修改稿日期: 2011-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(61078063)资助课题。

作者简介: 王春晖(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事近红外光学方面的研究。

E-mail: wangchunhui02@sohu.com

和透射式光路<sup>[6]</sup>。全反射式光路是指测量扫描光束被待测样品前表面反射后,经过数据处理得到该表面的物理信息,包括粗糙度分布状态、表面相对厚度起伏等信息。透射式光路是指激光扫描光束完全透射过透明样品后,经过数据处理得到样品的表面粗糙度、表面厚度起伏、绝对厚度分布状态以及样品内部的折射率分布情况等。以上两种光学系统中对样品的扫描大多是采用步进电机驱动样品对样品表面测量的被动扫描方式<sup>[1,2,4,6]</sup>,该扫描方式简单易行,光路容易调节,但是由于步进电机的使用,引入了外部的振动误差,降低了系统的测量精度。相对于被动扫描方式来讲,主动扫描方式中待测样品保持静止,通过产生多束扫描光束来达到对样品的扫描测量。目前主动扫描主要采用两种方式,一种是利用多面体棱镜的连续转动来产生扫描光束<sup>[5]</sup>,但是这种方式仅限于扫描光束在样品表面是单方向运动的情形;另外一种是采用声光器件来产生不同方向上的扫描光束<sup>[3]</sup>,这种扫描方式虽然可以实现主动扫描的目的,但是在最终获取样品的物理信息过程中,会引入比较大的像差误差,包括畸变、场曲等误差<sup>[7]</sup>。

$f-\theta$  透镜具有像高与视场角成线性关系的特点,已被广泛应用于诸如激光扫描系统、激光打标、光刻、光学精细加工、激光防伪和生物扫描仪等精密仪器领域<sup>[7~12]</sup>。然而在以上这些应用中扫描光束和待测物之间的作用方式是单方向的。这种方式拉长了整个光学系统的长度,引入了系统的畸变像差。以外,世界主要生产商 LINOS, CVI 等所生产的  $f-\theta$  透镜的工作波长都是基于可见光波段的。而且,目前的  $f-\theta$  扫描透镜仅仅考虑光束在空间扫描点的聚焦成像质量,光束的方向性问题并没有在研究范围之内。为了解决上述问题,本文针对激光外差干涉系统设计了  $f-\theta$  透镜和微机电系统(MEMS)振镜相结合的混合扫描系统,通过该系统可以实现对直径为 300 mm 的透明红外光学材料进行均匀扫描,达到抑制畸变像差的目的,从而提高了系统的测量精度。

## 2 干涉仪系统中扫描系统的原理

激光外差干涉系统的扫描系统如图 1 所示。直径为 1 mm 的激光光束照射在振动的 MEMS 振镜上, MEMS 振镜中的有效反射单元处于  $f-\theta$  透镜组的系统焦点位置,这样从 MEMS 振镜反射出的扫描

光束经过  $f-\theta$  透镜组的传播后,以完全平行的光束透射进待测样品,最后经过高反射率的反射镜反射后沿原光路返回。通过比较测试光信号和参考光信号之间的相位差,即可得出有关待测物的物理参数。

作为激光外差干涉系统中的扫描系统,必须精确设计  $f-\theta$  透镜使其满足以下要求:1) 从  $f-\theta$  透镜出射的扫描光束必须严格与待测样品垂直,这样才能保证扫描光束沿原光路返回;2) 从  $f-\theta$  透镜出射的扫描光束必须是等间距、等速地在待测物体上均匀运动,这样才能更真实地反映出待测物体的物理参数信息,并且有利于后续的数据采集和处理。

图 1 中的  $f-\theta$  透镜组可以等效成一个透镜,当光束从 MEMS 振镜处反射进入  $f-\theta$  透镜后,在像平面上的像高为

$$y = f \tan \theta, \quad (1)$$

式中  $f$  是  $f-\theta$  透镜组的系统焦距,  $\theta$  是入射光束的视场角,  $\theta = 2\phi_0 \sin \omega t$ ,  $\omega$  为 MEMS 振镜的振动频率,  $\phi_0$  为 MEMS 振镜的最大空间扫描角度。由图 2 可以看出,当视场角比较小时,像高与视场角基本成线性关系。但是当视场角超过某一角度后,像高和视场角就偏离线性关系,这样就不满足匀速线性扫描的要求。另外,从扫描光束在待测物体表面上的运动速度考虑,对于未经优化的透镜来说,扫描光束在待测物上的运动速度和运动间隔可以通过对(1)式两边的时间变量和方位角变量分别求导得出:

$$v = 2\phi_0 f \omega \cos \omega t \sec^2(2\phi_0 \sin \omega t), \quad (2)$$

$$p = f \sec^2 \theta. \quad (3)$$

从(2),(3)式可以看出,当采用单个透镜来实现垂直扫描时,扫描光束在样品上的运动速度是个变量,并且各个扫描光束之间并不是等间距分布的,因此必须经过优化设计来使扫描光束的运动速度和扫描光束步长保持恒定。

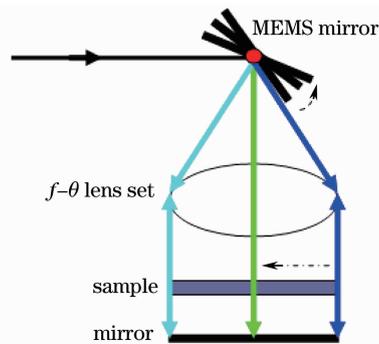


图 1 扫描系统原理图

Fig. 1 Principle of optical scanning system

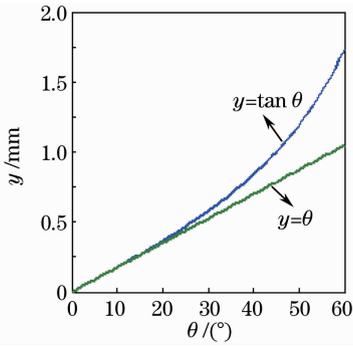


图2 视场角与像高的关系

Fig. 2 Relation between field angle and image height

### 3 f-θ 透镜的设计过程

#### 3.1 设计思想和指标

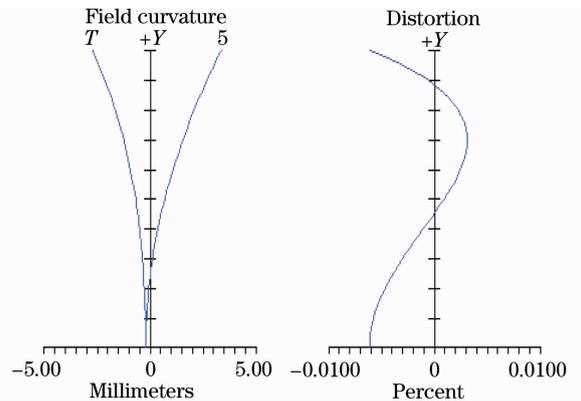
$f-\theta$  透镜组的优点在于像高和视场角成线性关系,该特点很好地解决了干涉系统中均匀线性扫描待测物从而准确获得待测物物理量信息的问题。采用三片式的透镜组合方式设计  $f-\theta$  透镜组,由于外差干涉系统中的扫描光束直径为 1 mm,因此处于透镜组前焦点位置的光阑直径也为 1 mm。干涉系统中的 300 mm×300 mm 的待测物体决定了  $f-\theta$  透镜组的像高尺寸,MEMS 振镜的最大空间扫描角度决定了  $f-\theta$  透镜组的视场角范围,根据像高和视场角的关系,可知  $f-\theta$  透镜组的系统焦距等于 434 mm,系统的光源波长为近红外的 2050 nm 波段。根据以上参数设计初始的  $f-\theta$  透镜组,该透镜组是一个 3 片式的透镜组,材料分别是 SF14,SF14 和 BK7,这些材料对 2050 nm 的光有很高的透射率,满足系统的工作要求。

在采用 Zemax 软件设计  $f-\theta$  透镜组的过程中,优化过程是一个很关键的步骤。由于本扫描系统是应用在外差干涉仪系统中,因此,应同时满足以下 5 点要求:1) 从  $f-\theta$  透镜组出射的光束要尽量与像平面垂直,这样才能保证扫描出射光束在经过玻璃样品的透射和高反射镜的反射后,依然能沿原光路传

播;2) 由于该外差干涉系统最终要对待测样品进行扫描测量,因此,应尽量保证振镜在振动过程中扫描光束在待测样品上是均匀分布的;3) 扫描光束在待测样品上的运动是匀速的;4) 扫描光束在待测样品上形成的光斑要在艾里斑衍射极限以内;5)  $f-\theta$  透镜组的畸变像差和像散像差需满足一定的要求。对于上述 5 点基本要求,分别通过在设计过程中添加不同的优化函数来解决。

#### 3.2 优化过程

首先通过添加 RAIN 操作数来保证从  $f-\theta$  透镜组出射的扫描光束与像平面垂直。然后通过操作数 RAIN 和 SINE 建立  $f-\theta$  透镜系统中光源的视场角度函数,该视场角度函数就是 MEMS 振镜的空间扫描角度随扫描时间的函数关系。再次通过使用操作数 REAZ,在归一化视场里建立振镜的扫描角度函数。最后通过操作数 DISC 来计算  $f-\theta$  透镜系统的归一化畸变参数。图 3 所示为系统的畸变像差曲线分布图。 $f-\theta$  透镜中的畸变像差是像差的主要来源,由图 3 可以看出,虽然最大像散值有 6 mm 左右,但是系统最大畸变像差却小于 0.5%,这符合对于  $f-\theta$  透镜系统的要求。具体的  $f-\theta$  透镜参数如表 1 所示,它是一个由 3 片镜子组成的透镜组,模型图如图 4 所示。

图3  $f-\theta$  透镜系统畸变像差曲线图Fig. 3 Distortion and curvature of  $f-\theta$  lens表1  $f-\theta$  透镜组的尺寸Table 1 Specifications of  $f-\theta$  lens set

Item	Surface	Radius of curvature /mm	Material	Center thickness /mm	Edge thickness /mm
Lens 1	Front surface	-241	SF14	31.15	25.72
	Rear surface	-197.70			
Lens 2	Front surface	-1472.30	SF14	19.87	5.00
	Rear surface	-510.50			
Lens 3	Front surface	1432.20	BK7	24.16	5.00
	Rear surface	-1260.83			

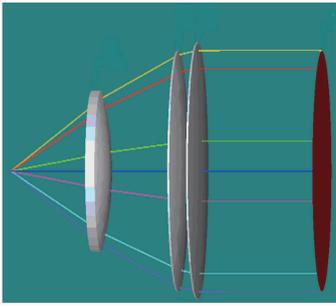


图 4  $f-\theta$  透镜三维模型

Fig. 4 Three-dimensional model of  $f-\theta$  lens

## 4 实验结果

为了验证  $f-\theta$  透镜是否达到预期的设计目标,搭建了如图 5 所示的实验装置,主要由 MEMS 振镜、 $f-\theta$  透镜、高反射率平面镜组成。MEMS 振镜可以由外部信号驱动在空间二维方向上振动,其在横向和纵向的最大扫描角度分别为  $17^\circ$  和  $25^\circ$ 。 $f-\theta$  透镜系统的焦距为 412 mm,具有 300 mm 的输出口径。高反镜的直径为 300 mm,其到  $f-\theta$  透镜的距离为 260 mm。由于  $f-\theta$  透镜的设计工作波长是人眼不可见的 2050 nm,因此可借助 He-Ne 激光作为辅助光源来调节系统光路。对于单个透镜,焦距和透镜的物理参数的关系为

$$\frac{1}{f'} = [n(\lambda) - 1] \left\{ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{\delta[n(\lambda) - 1]}{nr_1r_2} \right\}, \quad (4)$$

式中  $r_1, r_2$  为某一面镜子前后面的曲率半径,  $n(\lambda)$  表示输入光波长为  $\lambda$  时透镜材料对应的折射率,  $\delta$  为透镜的中心厚度。由(4)式可知,当输入的工作波长不同时,  $f-\theta$  透镜系统的焦距也不同。利用 He-Ne 激光和(4)式找到了 2050 nm 光所对应的  $f-\theta$  透镜组的焦点位置,当 MEMS 振镜扫描时,得到了  $f-\theta$  透镜第一面上的空间扫描结果,如图 6 所示。图中由于入射光和振镜的俯仰角度的问题,扫描光斑有一些偏移。

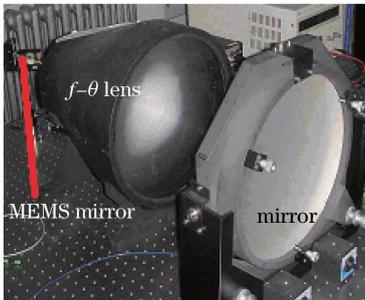


图 5 扫描系统实验装置

Fig. 5 Experiment setup for optical scanning system

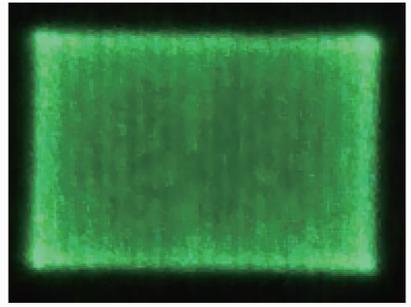


图 6 扫描结果示意图(第一面)

Fig. 6 Scanning results on the first surface of  $f-\theta$  lens

系统中所用的  $f-\theta$  透镜是一个 3 片式的组合结构,透镜材料分别是 BK7 和 SF14。这些材料对红外波长有较高的透射率,但是 SF14 是一种很容易潮解的玻璃材料,因此在制作镜子的过程中,在其表面镀了一层防潮解膜,这样就降低了透射率。进行了实验测量,结果如图 7 所示,系统的平均透射率仅为 39.8%。该透射率较低,为了满足后续干涉系统正常工作的要求,必须使入射激光功率足够强。在实际干涉系统中所采用的光源功率维持在 200 mW 左右。

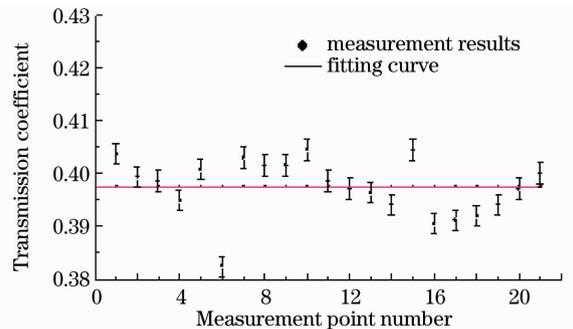


图 7  $f-\theta$  透镜组的透射率曲线

Fig. 7 Transmission curves of  $f-\theta$  lens set

## 5 结 论

提出了将 MEMS 振镜和  $f-\theta$  透镜相结合的混合光学扫描结构,并将其应用到透射式激光外差干涉系统中。根据 MEMS 振镜的最大空间扫描角度和待测样品的尺寸,设计了扫描范围为  $300 \text{ mm}^2$ ,最优工作波长为 2050 nm,透镜系统焦距为 434 mm 的 3 片式  $f-\theta$  透镜组。为了满足激光外差系统的高精度测量要求,从畸变参数、衍射极限光斑尺寸、光束发散角 3 个方面对  $f-\theta$  透镜组进行了优化,从而提高了整个扫描系统的出射光束质量,使整个激光外差干涉系统获得更好的光学测量精度和分辨率,从而更真实地反映出待测物的表面及内部信息。和常见的  $f-\theta$  透镜相比,该透镜组的工作波长处于近

红外波段外,空间扫描出射光束完全平行于系统光轴。这种集 MEMS 振镜和  $f\text{-}\theta$  透镜组于一体的混合光学扫描结构被应用在激光外差干涉测量系统中,对提高激光外差干涉系统的测量精度和更加真实地反映待测物表面的面形起伏有实际意义。

### 参 考 文 献

- 1 M. A. Arain, N. A. Riza. Fiber-coupled in-line heterodyne optical interferometer for minimally invasive sensing [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(8): 2449~2454
- 2 Liu Zhaodong, Yu Lina, Han Zhigang *et al.*. Measurement of the wavefront collimation of a large aperture near-infrared interferometer using a scanning pentaprism system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1082~1087  
刘兆栋, 于丽娜, 韩志刚 等. 五棱镜扫描法检测大口径近红外干涉仪准直波前[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1082~1087
- 3 Wang Meng, Liu Tiegeng, Wang Bo *et al.*. Research on laser physical and chemical modification of metal complex[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3155~3161  
王 萌, 刘铁根, 王 博 等. 金属络合物激光物化改性研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3155~3161
- 4 Song Nanhai, Meng Yonggang, Lin Jing. Flying-height measurement with a symmetrical common-path heterodyne interferometry method[J]. *IEEE Trans. Magn.*, 2010, **46**(3): 928~932
- 5 B. K. A. Ngoi, K. Venkatakrishnan, B. Tan. Laser scanning heterodyne-interferometer for micro-components [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **173**(1-6): 291~301
- 6 K. H. Chen, W. Y. Chang, J. H. Chen. Measurement of the pretilt angle and the cell gap of nematic liquid crystal cells by heterodyne interferometry [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(16): 14143~14149
- 7 Ge Baozhen, Li Xiaojie, Qiu Shi. Camera lens distortion correction based on coplanar point direct liner transformation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 488~494  
葛宝臻, 李晓洁, 邱 实. 基于共面点直接线性变换的摄像机畸变校正[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 488~494
- 8 Y. U. Nam, M. S. Cheon, J. H. Ha *et al.*. Improved common-path fast-scanning heterodyne interferometer system as potential dense-plasma diagnostics [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(10): 3417~3419
- 9 Ji Yiqun, Shen Weimin. Optical design of large working area F-Theta lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1539~1542  
季轶群, 沈为民. 大工作面 F-Theta 镜头的光学设计[J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 1539~1542
- 10 C. M. Wen, K. W. Yuan, P. T. Chou *et al.*. An f-theta lens design for bio-medical system: laser scanning microarray reader [J]. *Opt. Quantm. Electron.*, 2006, **37**(13-15): 1367~1376
- 11 D. J. Johnson. Micromirror for laser-beam scanning for robotics and other applications [C]. 2nd International Conference on Autonomous and Agents, 2004. 408~412
- 12 Ji Rongyi, Zhao Changming, Chen Guo. Analysis and calculation of scan trace of laser scanning rotation mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0408003  
纪荣伟, 赵长明, 陈 国. 激光扫描转镜扫描轨迹的分析计算[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0408003

栏目编辑: 谢 婧