

文章编号 1004-924X(2004)06-0560-06

数字化白光扫描干涉仪的研究

张以谟, 井文才, 张红霞, 李海峰, 李朝辉

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电子技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 研究并设计实现了微形貌测量白光扫描干涉仪系统和光纤偏振耦合点监测白光扫描干涉仪系统。前者采用 Mirau 相移干涉形式, 用压电陶瓷传感器 PZT 作移项器, 主要用于微形貌测量, 精度可达 nm 量级。后者采用光路补偿白光 Michelson 干涉形式, 用格兰棱镜对偏振态进行调整控制, 用移动参考臂来补偿由于耦合点所造成的光程差, 光纤寄生偏振耦合测试仪的空间分辨率达到 50 mm, 测量范围达到 1 km, 探测灵敏度不小于 -80 dB(耦合模式与主模式的功率比)。

关键词: 白光干涉仪; 扫描模式; 微形貌测量; 偏振耦合点位置测量

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

Computerized white light scanning interferometer and the application

ZHANG Yi mo, JING Wen cai, ZHANG Hong-xia, LI Hai feng, LI Zhao hui

(The Key Laboratory of Optoelectronic Technologic Science, EMC, The College of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University; Tianjin 300072, China)

Abstract: The instrumentation principles and designing of two kinds of white light scanning interferometer systems are studied. One, based on the two-beam Mirau phase-shifting interferometer and the PZT used as a phase shifter, is developed to measure the micro-profile with nanometer accuracy. The other, employing Michelson interferometer for light path compensation, with the polarization states adjusted and controlled by rotating a Glan prism, and by varying reference arm to compensate the difference of light path induced by polarization coupling point, is developed to measure the position of polarization coupling pointing optical fiber. The results are that the spatial resolution of autoecious Polarization coupling measuring apparatus is 50mm, the measure range is 1km, and the detection sensitivity is better than -80 dB.

Key words: white light interferometer; scanning fashion; Micro profile testing; position of polarization coupling point measurement

1 历史背景

1675 年, 牛顿作牛顿环实验, 这是一种光的干涉现象, 但牛顿仍用光的微粒说解释。1801

年, 托马斯·杨提出杨氏干涉实验, 1881 年, A. A. Michelson 首次 Michelson 干涉仪, 灵敏度极高。1899 年, C. Fabry 和 A. Perot 设计了 Fabry-Perot 干涉仪。1948 年 D. Gabor 提出现代全息照相术前身的波阵面再现原理等。几百年的时间, 干涉

收稿日期: 2004-10-22; 修订日期: 2004-11-18.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60377031)和天津市科委基金(No. 023602411)支持

仪都是以“白光作为光源”,要求干涉仪光程长度严格匹配。干涉条纹零级的位置与波长无关,便于定位干涉零级,其在科学和技术的发展过程中发挥了巨大作用。

1960 年后期,梅曼(T. H. Maiman)制成红宝石激光器,4 个月后, Ali Javan 等制成氦氖激光器。以后出现了以激光为源的干涉仪,使得干涉仪在物理量的测量种类和测量精度都得到提高。如天文图像合成干涉仪^[1],重力测量干涉仪^[2],飞行器推力测量干涉仪^[3],耳医学检测干涉仪^[4],用于光学检测的 Zygo 干涉仪等。激光干涉仪对于科学技术的进步的作用极大。干涉计量是以激光作为光源。激光有长的相干长度,易于得到干涉条纹,但是也易由寄生反射产生伪干涉条纹,发生误判。对光学零级的表面光洁度要求高,以减少杂散光。

1960 年 Bell 实验室的研究人员发明了电荷耦合器件 (CCD)。1945 年底,美国工程师莫克利和埃克特设计传统意义上的第一台电子计算机。1976 年, Steve Jobs 和 Steve Wozniak 研制出苹果一代个人计算机 Apple I。白光干涉计量与现代电子,计算机和软件相结合,便成为数字化白光干涉仪。其主要衍射光栅干涉仪^[5],白光散射平板干涉仪^[6]等。白光干涉仪结合精密机械扫描系统便形成白光扫描干涉仪。如垂直扫描干涉仪^[7],频率扫描干涉仪^[8]等。本文针对光纤技术的需要开展了光纤端面微形貌纳米检测白光扫描干涉仪^[9],以及光纤偏振耦合点位置检测白光扫描干涉仪^[10]。

2 微形貌纳米检测白光扫描干涉仪

2.1 微形貌纳米检测白光扫描干涉仪结构

目前已有的三维形貌检测技术很多,如电子扫描隧道显微镜(ESTM)、光子扫描隧道显微镜(PSTM)、原子力显微镜(AFM)^[11]。其测量方法是逐点扫描测量,对面型需要逐点测量面上每个测试点,测量时间长,不适合对大批量产品检测。

微形貌纳米检测白光扫描干涉仪采用 Mirau 相移干涉。相移干涉是指在参考或测量光中引进已知相移量,认为改变两相干光束的相对相位,从干涉场中任一点在不同相移量下的光强值求解该点相位。本干涉仪采用垂直扫描工作模式,用压

电陶瓷传感器 PZT 带动干涉物镜移动。由于光源有一定谱宽,相干长度很短,并且当干涉仪的两个路径的长度接近匹配时,可以得到很好对比度的条纹。

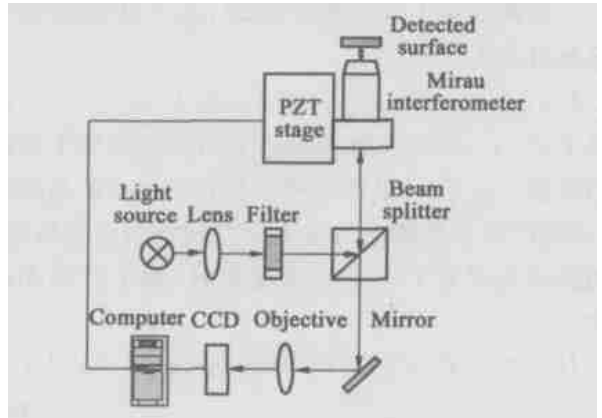


图 1(a) 干涉仪系统结构

Fig. 1(a) Structure of mirau phase shifting interferometer

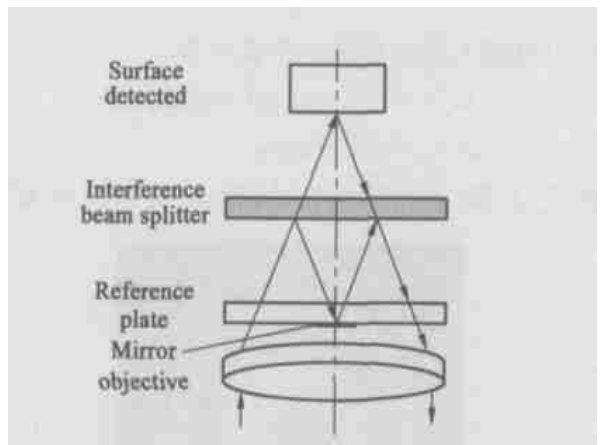


图 1(b) Mirau 干涉显微镜结构

Fig. 1(b) Structure scheme of mirau interferometer

图 1 为白光扫描干涉仪系统简图。包括光源、相移干涉系统、干涉图像采集处理系统,其系统结构如图 1(a)所示,采用的 Mirau 干涉结构如图 1(b)所示。由 Mirau 干涉物镜得到被测量面的干涉图像,在经过成像系统及 CCD、图像采集卡在计算机中获得被测量面形貌。在测量过程中,由 PZT 驱动干涉系统作定步长的位移,每次位移都可获得一幅干涉图像,最后由计算机对位移过程中获得干涉图像进行处理即可得到被测量面的形貌特征。光束经显微物镜后透过参考板,然后由分光板上的半反半透膜分成两束,一束透过分光

板投射到被测面上, 反射后经分光板和参考板回到显微镜。另一束被分光板反射到参考板上表面中心的反射区域, 反射后回到分光板并再次被反射, 透过参考板回到显微镜, 两束光又在显微物镜处相遇从而发生干涉。

2.2 相移干涉中相位提取算法

当两束相干光发生干涉时, 在干涉场的光能分布可以表示为:

$$I(x, y) = I_a(x, y)[1 + A \cos(\varphi(x, y))] \quad (1)$$

其中 $I_a(x, y)$ 和 A 分别表示平均光能量和干涉调制系数。 $\varphi(x, y)$ 是与被测面位置 (x, y) 有关的相位函数, 表示被测面与参考面之间的相对相位差。当参考光束有了一个相位变化时, 则干涉场光强为

$$I(x, y) = I_a(x, y)[1 + A \cos(\varphi(x, y) + \alpha)] \quad (2)$$

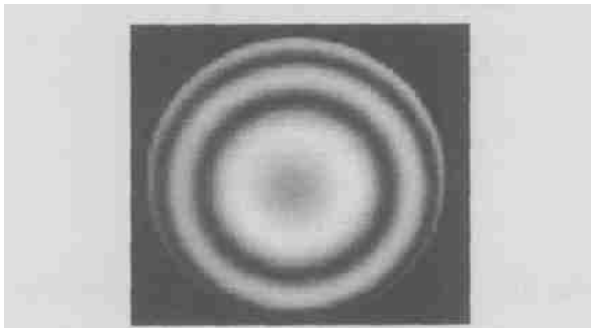
展开后, 对于固定的位置 (x, y) 的光照强度为定值时, 设

$$\begin{aligned} a_0 &= I_a(x, y), & a_2 &= I_a(x, y)A \cos(\varphi(x, y)), \\ a_2 &= -I_a(x, y)A \sin(\varphi(x, y)), \end{aligned} \quad (3)$$

则可以将干涉场光强分布表示为

$$\begin{aligned} I(x, y) &= a_0 + a_1 \cos(\alpha) + a_2 \sin(\alpha), \\ \tan(\varphi(x, y)) &= -a_2/a_1, \end{aligned} \quad (4)$$

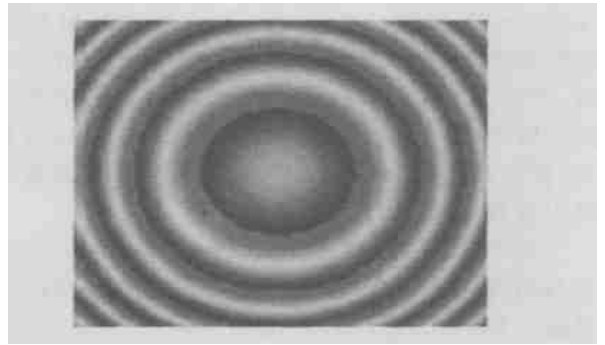
由式(4)知, 当已知步长时, 有 a_0, a_1, a_2 3 个未知



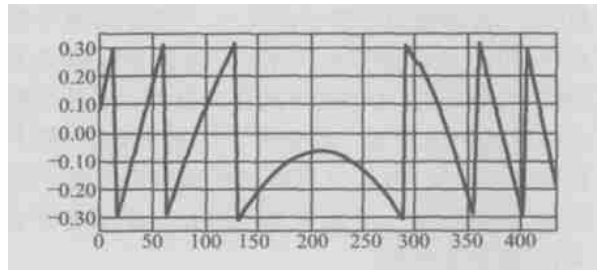
(a) 被测样品的相干光干涉条纹
(a) Coherent fringes of a sample



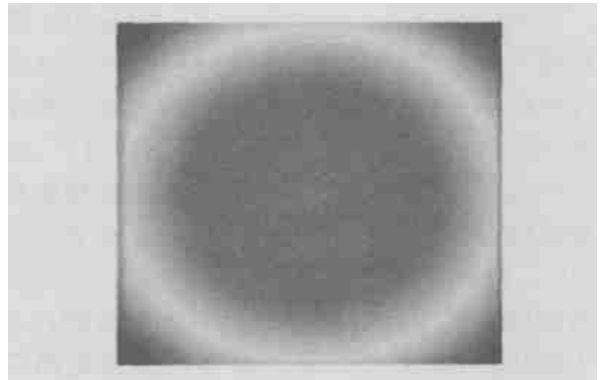
(b) 被测样品的位相图
(b) The phase pattern of a sample



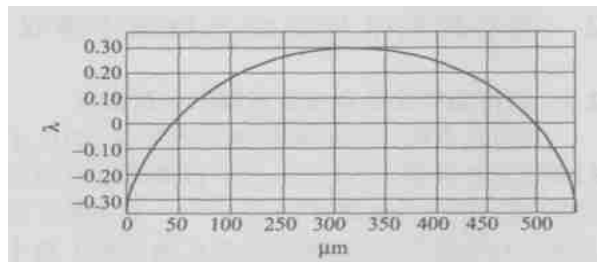
(c) 被测样品白光干涉图
(c) White light interfere phase ambiguities



(d) x -截面轮廓(解包裹前)
(d) White light interfere 2π phase steps (Before Unwrapping)



(e) 被测样品白光干涉位相复原
(e) The phase reversion



(f) x -截面轮廓(解包裹后)
(f) Removing phase ambiguities (Unwrapping)

图 2 白光干涉位相提取算法示意图

Fig. 2 The scheme for White light interfere phase algorithm

量, 故需要得到三幅干涉场强度图才可确定被测面的相位分布。在三次测量中, 可以设三次的相位分别为 $\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4$, 三次测量的光强分别为 I_1, I_2, I_3 , 由式(4)还可得:

$$\tan \varphi(x, y) = - (I_2 - I_3) / (I_1 - I_2), \quad (5)$$

这就是最基本的三步相移算法公式^[12]。在实际测量中, 为提高计算精度, 常采用多步长算法。设 N 次的干涉光强分别为 I_1, I_2, \dots, I_N , 则

$$\varphi = - \tan^{-1} [(\sum_{i=1}^N I_i \sin \alpha_i) / (\sum_{i=1}^N I_i \cos \alpha_i)], \quad (6)$$

式中, $\alpha_i = 2\pi i / N, i = 1, 2, \dots, N$ 。则得到它的高度值为:

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{2} \times \frac{\varphi(x, y)}{2\pi} = \frac{\lambda}{4\pi} \times \varphi(x, y), \quad (7)$$

此处的位相如图 2(c) 所示, 其 x - 方向截面轮廓如图 2(d) 所示(去包裹前), 进行位相恢复计算(去包裹后), 取得样品位相复原及其 x - 方向截面轮廓如图 2(e) 和(f) 所示。

2.3 实验结果

采用 Zeiss 的 40 nm 高度平台为测试对象,

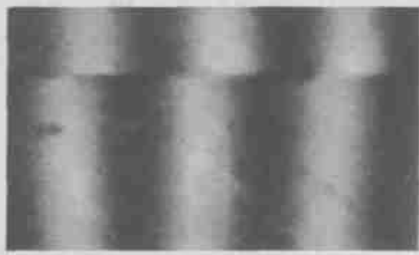


图 3 干涉图像

Fig. 3 Int erferogram

用本系统进行实际测量。干涉图象经过计算机采集显示结果如图 3 所示。以式(7)中的 $N = 6$ 的六步算法进行计算, 三次测量结果分别为: 40.6 nm、41.2 nm、39.5 nm。可以得出实验室研制的微形貌干涉检测系统的测量精度小于 2 nm。

3 光纤偏振耦合点位置检测白光扫描干涉仪

3.1 仪器原理

仪器的原理是利用“白光”干涉法测量光纤的空间分布寄生偏振耦合点的位置。工作波长为 1300 nm。

仪器结构如图 4 所示: 由光源系统、光纤绕组、准直扩束、偏振控制、干涉系统和数据处理等部分组成。在光束进入干涉系统之前, 须进行准直扩束和偏振控制。最后根据探测器得到的信号进行数据处理, 算出偏振耦合点的位置。光源采用超辐射发光二极管 (SLD), 其发出的光经起偏后注入光纤。若光纤中存在偏振耦合点, 便产生一个寄生耦合偏振态。由光纤输出后用一个偏振态控制装置来判断控制输出波列的偏振态。最后输入 Michleson 干涉仪的只有一种偏振态, 经分束棱镜分光后, 用移动干涉仪动镜来补偿光程差, 探测器依次测得干涉图数据, 输入计算中进行数据处理, 得到寄生偏振耦合点的位置和偏振抑制比。

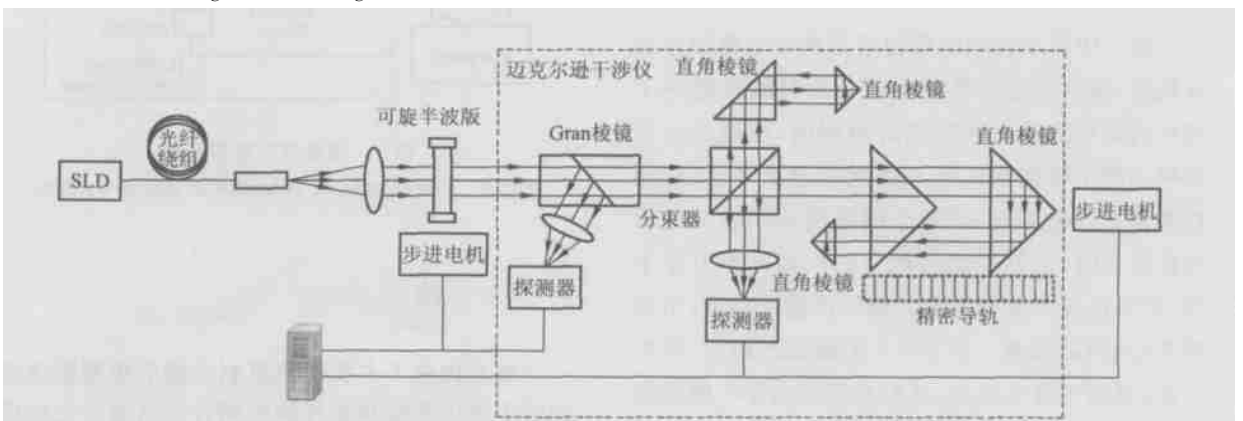


图 4 光纤寄生偏振耦合测试仪

Fig. 4 Optical Fiber autoecious polarization coupling tester

3.2 耦合点的干涉图形成

超辐射发光二极管 (SLD) 光源有高的功率输出和低的相干性, 即短的相干长度有助于消除系统中背向反射、背向散射或偏振耦合等引起的各种寄生波之间的干涉, 同样抑制克尔非线性效应。光源的相干长度 L_c 正比于 $\lambda^2 / \Delta\lambda$, 这就要求光源具有一定的光谱宽度 ($\Delta\lambda$)。当存在偏振耦合点时, 该偏振耦合点的光能耦合进光纤形成正交偏振的低功率波列。由于双折射效应, 两种波列以不同的速度传播^[11], 在光纤输出端的光程差为

$$\delta = \Delta n_b \times l, \quad (8)$$

其中, Δn_b 为双折射系数差, l 为耦合点与光纤端之间的光纤长度。把与主轴夹角为 45° 的偏振器放在光纤的输出端, 使两种波列在相同的偏振状态下出射。如果两个波列的光程差 $\Delta n_b \cdot l$ 大于相干长度 L_c , 则这两个波列不发生干涉。再把这两个波列送入一个扫描的 Michelson 干涉仪中, 当光程匹配时, 干涉条纹对比度约等于 1。当光程差大于相干长度时则对比度消失。但是, 当光程差再度补偿了 2 个输入波列之间的光程时, 干涉条纹对比度又重新出现, 如图 5 所示。

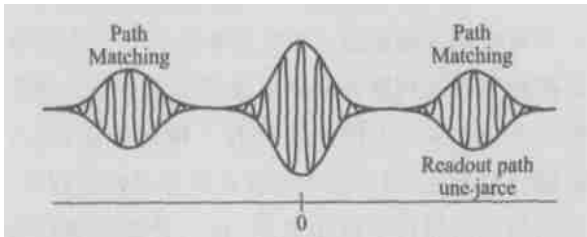


图 5 单个耦合点的干涉图

Fig. 5 Interferogram of single polarization coupling point

图 5 中所示的中间的包络是两个主偏振态的自相关, 两边的包络是在干涉仪的时间延迟等于光纤内部模式的时间延迟时得到的, 也就是互相关峰。两个偏振模式进入迈克尔逊干涉仪后, 通过两臂光程的调整, 使两个偏振模式如图 6 所示的位置 1 时, 主偏振态与耦合的次偏振态发生干涉, 产生次极大干涉条纹。继续调整干涉臂, 干涉消失, 当到达位置 2 时, 两个主偏振态相遇, 发生干涉, 得到主极大条纹, 这时光程差为零。继续移动到位置 3, 还可以再得到次极大条纹。所以可以得到主偏振态和次偏振态的光程差。从而可以根据公式 (8) 计算得到 l , 知道耦合点的位置。

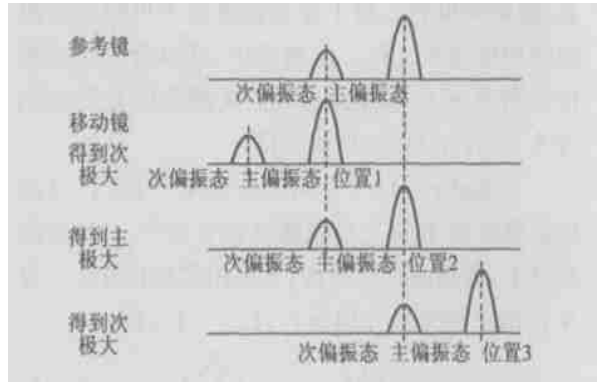


图 6 两个偏振态分别发生干涉
Fig. 6 Interference of two polarization waves

3.3 偏振态控制装置

要使这两个振动方向相互垂直的线偏光干涉效果最佳, 通常的方法是利用偏振器把两个正交偏振态的调整到同一方向, 使它们的振动方向相同。如图 7 所示, 偏振态控制装置是用一个步进电机驱动的可旋半波片, 探测器和格兰棱镜组成, 以实现偏振态的精确调整。把偏振器的透光轴与从光纤输出的两个偏振态的线偏光精确对准到。使用一个半波片, 旋转后进入格兰偏振棱镜, 通过旋转波片来旋转偏振态, 在格兰偏振棱镜后用探测器接收, 根据得到的最大光强和最小光强来确定两个偏振态的方向。

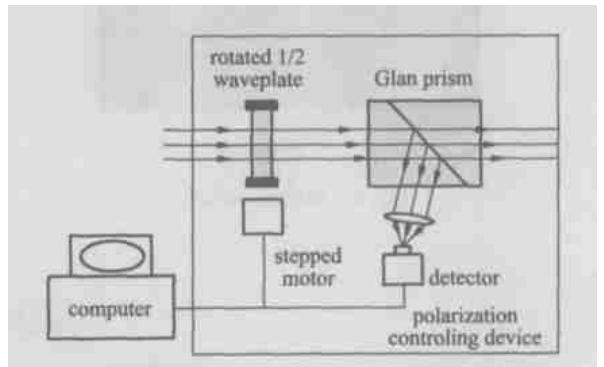


图 7 偏振控制装置结构
Fig. 7 The scheme of polarization control system

4 结 论

本文讨论了本实验室研制的微形貌测量白光扫描干涉仪系统和光纤偏振耦合点监测白光扫描干涉仪原理及设计特点。前者采用 Mirau 相移干涉形式, 用压电陶瓷传感器 PZT 作移项器, 主要

用于微形貌测量,精度可达 nm 量级。后者采用光路补偿白光 Michelson 干涉形式,用格兰棱镜对偏振态进行调整控制,用移动参考臂来补偿由于耦合点所造成的光程差。光纤寄生偏振耦合测

试仪的空间分辨率达到 50 mm,测量范围达到 1 km,探测灵敏度不小于-80 dB(耦合模式与主模式的功率比)。

参考文献:

- [1] ARMSTRONG J T, MOZURKEWICH D, RICKARD L J, *et al.* *Astrophys. J.*, 1998, 496: 550-571.
- [2] COURTY J M. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 90, 083601.
- [3] CHOUERI E Y. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1996, 33(1): 96-100.
- [4] GOODE R, BALL G, NISHIHARA S, *et al.* *Am J Otol*, 1996, 17: 813-822.
- [5] ROSS I N. *Appl. Opt.*, 2001, 40(34), 6153-6156.
- [6] MICHAEL B. *Appl. Opt.*, 2002, 41(4): 669-677.
- [7] HARASAKI A. *Appl. Opt.*, 2000, 39(13): 2108-2115.
- [8] HINCHLIFFE. *Phys. Rev.*, 1997, D55: 5520-5540.
- [9] HARASAKI A, WYANT J C. *Appl. Opt.*, 2000, 39: 2101-2106.
- [10] JING W, ZHANG Y, ZHOU G, *et al.* *Opt. Express*, 2002, 10: 685-690.
- [11] WICKRAMASINGHE H K. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1990, 8: 353-358.
- [12] MARTIN P. Fiber Optic Gyros: 15th Anniversary Conference, *SPIE*, 1991, 1585: 173-178.
- [13] WYANT J C. *Phase Shift Interferometry*, 2000, 9: 11-14.

作者简介:张以谟(1933-),天津市人。1955年天津大学本科毕业,1958年研究生毕业(当时无学位制度)。现为天津大学教授。84年被批准为博士生导师,为天津大学“光学工程”学科带头人,87年被评为国家级重点学科。92年被批准为博士后流动站。95年为国家教委“光电子工程开放实验室”主任。本人获人事部颁发“有突出贡献中青年科技专家”,天津市颁发“光电子技术与仪器授衔专家”。“天津市特等劳动模范”等称号。曾兼任天津市高级职称评委会副主任,国务院学位委员会仪器仪表评审组成员,863光电子主题专家组成员等。现任中国光学学会常务理事,光电技术专委会主任,973计划信息领域咨询组副组长等。专长:应用光学与光学设计,光电仪器设计,光学信息处理、计算机光互连与光交换等。发表论文约300余篇,半数以上被Ei收录,SCI收录约40余篇。主编“应用光学”及参编著作4种。在本领域中完成科研项目41项。已培养博士近50人,硕士约百人。