

文章编号: 0253-2239(2009)07-1973-04

基于双光栅的马赫-曾德尔干涉仪的初步研制

邓 琳 逯丹凤 祁志美 夏善红

(中国科学院电子学研究所传感技术国家重点实验室, 北京 100190)

摘要 设计和初步制备了基于双光栅的等臂和不等臂马赫-曾德尔干涉仪, 两个衍射光栅分别用作光束分裂器和光束复合器。来自激光器的平行光束透过第一光栅后产生多束衍射光, 等臂干涉仪使用两个平面反射镜反射两束对称衍射光至第二光栅的同一位置并产生完全重合的衍射条纹, 即每束衍射光包含两个成分。利用光探测器监测任一束重合的衍射光束, 该光束两成分之间的相位差随时间的变化就能够被准确测定。而不等臂干涉仪仅使用一个反射镜反射某一束衍射光并使之与零级光束透过第二光栅后产生完全重合的衍射条纹。通过使用一个厚度为 50 μm 的玻璃片来改变相位差, 对不等臂干涉仪的干涉效果进行了测试, 得到了与理论值相符的实验结果。

关键词 相干光学; 马赫-曾德尔干涉仪; 衍射光栅; 动态测试

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092907.1973

Mach-Zehnder Interferometers Based on Double Gratings

Deng Lin Lu Danfeng Qi Zhimei Xia Shanhong

(*State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract Balanced and unbalanced Mach-Zehnder interferometers were developed using two photoresist gratings fabricated on slide glass substrate. One grating served as the beam splitter and the other as the beam recombiner. A laser beam was incident on the first grating to produce multiple diffracted beams. The balanced interferometer used two mirrors to reflect two symmetrical diffracted beams onto the second grating, making the two patterns diffracted by the second grating completely superposed. The phase difference between the two components of one of the superposed beams was measured with a photodetector. For the unbalanced interferometer, only one diffracted beam was reflected upon the second grating, producing a diffraction pattern that completely overlaps with that from the zeroth-order beam. Performance of the unbalanced interferometer was investigated by using a 50 μm -thick glass plate to induce the phase difference.

Key words coherence optics; Mach-Zehnder interferometer; diffractive grating; dynamic measurement

1 引 言

光学干涉仪具有灵敏度高、测量准确、抗电磁干扰、安全可靠、制作方便等优点, 在物理学、计量科学、光谱测量技术以及现实生活中都有着广泛的应用。其中马赫-曾德尔干涉仪是一种常见的用于测量样品折射率、气体密度变化、温度变化和监测光学

表面质量的仪器^[1~8]。常规马赫-曾德尔干涉仪使用分光棱镜把入射光分成一束敏感光和一束参照光。与此不同, 基于光栅的马赫-曾德尔干涉仪可将入射光分成强度按一定规律分布的多束衍射光以供选择。

迄今为止, 基于光栅的干涉仪主要通过观测相应的空间干涉条纹来对物体的表面形貌和应力进行

收稿日期: 2008-10-23; **收到修改稿日期:** 2008-11-20

基金项目: 国家 973 计划(2009CB320300)资助项目。

作者简介: 邓琳(1984—), 女, 硕士研究生, 主要从事集成光学和光波导传感器等方面的研究。

E-mail: nanjiguang_2000@163.com

导师简介: 祁志美(1967—), 男, 博士, 研究员, 主要从事集成光学传感器、纳米敏感材料、MOEMS 技术等方面的研究。

E-mail: zhimei-qi@mail.ie.ac.cn

分析,或者用于二维成像、全息光栅的制备等。Hershey 等^[4]利用光栅干涉仪制备了大面积全息光栅;Xu^[5]提出了一种双光栅空间干涉技术并利用该技术进行了表面台阶高度的测量;2006 年 Lee 等^[9]开发了两种具有高空间分辨率的光栅干涉仪,并利用这两种干涉仪分析了纤维薄片的机械特性;Hsu 等^[10]使用外差式光栅干涉仪测量了一维和二维空间的位移。这些干涉仪的干涉条纹分布需要利用昂贵的高分辨 CCD 相机进行观察,成本高且不适合记录被测量随时间连续快速的变化过程。本文提出的基于双光栅的时间分辨型马赫-曾德尔干涉仪使用廉价易得的硅光探测器测量干涉信号,能够实时监测连续变化的物理或生化反应过程,制作简便、成本低,具有广阔的应用前景。

2 双光栅马赫-曾德尔干涉仪结构原理

该干涉仪所使用的光栅是利用镍掩模板经标准光刻工艺在玻璃基板上制作的周期为 $5\ \mu\text{m}$ 的光刻胶光栅。图 1(a)是由数码相机拍摄的由四个光栅组成的阵列,每个光栅面积为 $5\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}$ 。图 1(b)是使用光学显微镜观察到的放大 400 倍的光栅表面形貌,从图中可看出光栅条纹非常均匀。图 1(c)是分别使用中心波长为 $532\ \text{nm}$ 和 $633\ \text{nm}$ 的激光器照射光栅时得到的衍射图案。本文使用 $\lambda=633\ \text{nm}$ 的 He-Ne 激光器作为光栅干涉仪的光源,其光波的相干长度

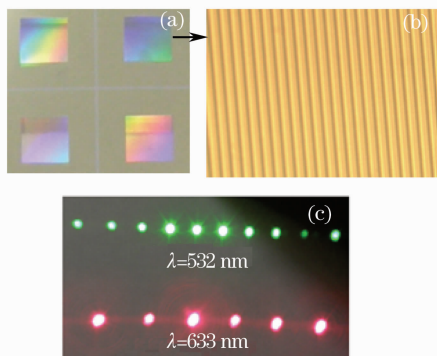


图 1 光栅形貌及其衍射特性。(a) CCD 相机拍摄的光栅照片;(b) 显微镜下的光栅表面形貌;(c) 两种不同波长激光照射时光栅的衍射光斑

Fig. 1 Morphology and diffraction patterns of the gratings. (a) photo of the grating taken by a CCD camera; (b) surface morphology of the grating observed by using a microscope; (c) diffraction patterns of the grating

在几十厘米的量级,因此在数厘米范围内改变干涉仪的光程都可得到明显的干涉条纹,同时使用硅光电二极管来探测干涉信号。

图 2(a)和(b)分别是基于双光栅的等臂式和不等臂式马赫-曾德尔干涉仪结构图。两平面光栅在两种结构中都平行排列。

在图 2(a)的等臂式干涉仪结构中,两个平行排列的反射镜放置于两光栅之间并垂直于光栅平面。激光器发出的平行光入射到第一个光栅上产生多束透射衍射光,将零级衍射光束遮挡。选取两束对称的衍射光 $+A$ 和 $-A$,使它们经反射镜反射后照射到第二个光栅的同一位置,并使其中一束光通过样品池。之后这两束光在第二个光栅的同一位置再次发生衍射,将产生完全重合的衍射光斑。其中每一束光都包含了来自 $+A$ 和 $-A$ 两束反射光的成分,它们都是时间分辨的相干光束。如果在样品池内放入待测物质,相干光的相位差随着待测物质浓度、折射率等参数的改变而变化,这一相位差变化可以利用光探测器很容易地测得。等臂式结构的优点是抗外界干扰(如环境温度变化等)的能力较强,而且可以保证所选的两束对称衍射光强度完全相等,但是它对调试精度要求较高,如何保证两束反射光以相同的反射角照射到第二个光栅的同一位置是较难控制的。

为了操作上的简便,本文制作并初步研究了不等臂双光栅干涉仪的性能。图 2(b)显示了不等臂式干涉仪的结构,利用一个反射镜反射来自前一光栅的任意一束非零级衍射光束 A 到第二光栅,并与零级衍射光束在第二光栅的照射位置重迭。通过调节反射镜位置使反射光束经第二光栅产生的透射衍射光斑与零级衍射光束经第二光栅产生的透射衍射

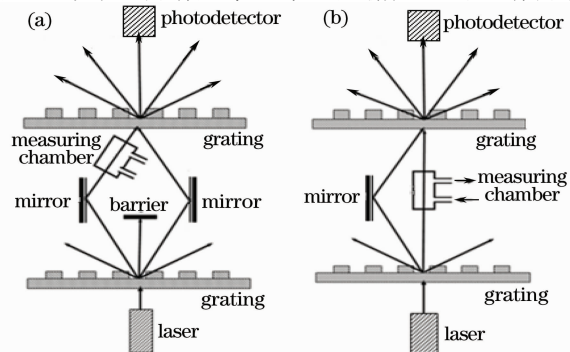


图 2 等臂(a)和不等臂(b)双光栅马赫-曾德尔干涉仪结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of (a) balanced; (b) unbalanced double-grating Mach-Zehnder interferometers

光斑完全重合。在此情况下,来自第二光栅的每一级透射衍射光束包含两个成分,因此是干涉光束。

3 实验结果

使用一个厚度为 50 μm 的玻璃片代替样品池对双光栅干涉仪的特性进行了初步研究。首先把玻璃片固定在旋转的测角仪上,然后旋转玻璃片以改变光的入射角,其实质是改变了干涉光束中两成分之间的光程差。为了减小环境因素的影响,整个实验在精密的充气减震光学平台上进行。采用图 2 (b)所示的不等臂式结构,来自第一光栅的 1 级衍射光束被反射镜反射,并使零级衍射光束垂直透过玻璃片,即入射角 $i=0^\circ$ 。当入射角 i 改变时,根据图 3 中各参量之间的几何关系,并利用折射定律可计算出干涉光束中两成分间的相位差为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi t}{\lambda} \left\{ 1 + \frac{n - \cos[\arcsin(\sin i/n)]}{\cos[\arcsin(\sin i/n)]} - n \right\}, \tag{1}$$

其中 λ 为入射光的波长(0.633 μm), t 为玻璃片厚度(50 μm), n 为玻璃片的折射率(1.51)。

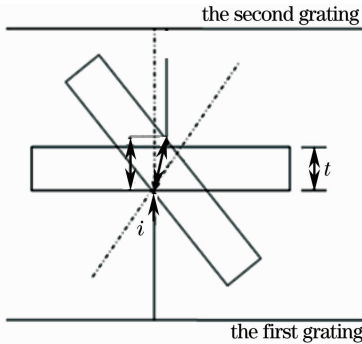


图 3 用于改变光程的旋转玻璃片方法示意图
Fig. 3 Schematic diagram of modulating the optical path length by rotating the glass plate

当干涉光束中两成分间的相位差 $\Delta\varphi$ 给定后,干涉光强度 I 可表示为

$$I = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} (1 + \gamma \cos \Delta\varphi), \tag{2}$$

其中 I_{\max} 和 I_{\min} 为实验测得的干涉光强度的最大值和最小值, γ 为干涉仪的消光比,

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \tag{3}$$

在等臂结构的干涉仪中,两束相干光强度相等,理想情况下 $\gamma=1$ 。理论计算出的归一化干涉光强度随入射角的变化如图 4(a)所示。实验中,旋转玻璃片的同时使用光电二极管监测垂直于光栅方向的那束干涉光强度的变化,这里通过数据采集卡将光电二极管与 PC 相连来获得测量数据。当入射角从 $i=0^\circ$ 转动至

$i=27.2^\circ$ 时,测得的干涉条纹如图 4(b)所示。对比图 4(a)和图 4(b)可以发现虽然实验中采用的是不等臂式干涉仪,且从图 1(c)中也可以看出第一个光栅的零级衍射光与一级衍射光的光强度是有差别的,但得到的实验结果说明它们依然可以形成很有用的干涉,并且测得的干涉条纹与根据等臂式干涉仪计算得到的理论值符合得较好。然而图 4(b)中测得的干涉条纹其归一化光强度的最小值并未到零,由式(3)可以计算出它的消光比为 $\gamma=0.41$,这一误差产生的原因应该是干涉仪的不等臂结构所致,同时也说明了如果采用等臂式的结构并且改进调节的精度,这类干涉仪的消光比将大大提高。

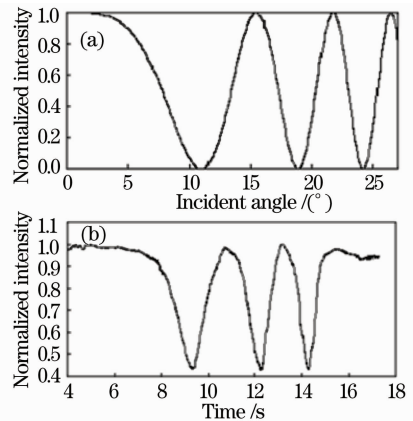


图 4 时间干涉条纹。(a)理论计算;(b)实验测得

Fig. 4 Interference pattern. (a) theoretically; (b) measured

如果将玻璃片换成装有液体的样品池,通过改变液体的折射率相信可以获得同样成功的实验结果。图 5 是当样品池中液体的折射率变化时理论上干涉光强度的变化图,具体的操作正在进一步研究中。根据实验室现有的条件,这类干涉仪也可以使用微机械加工(MEMS 技术)将光栅和反射镜等元件制作在同一基板上,制备成小型化便携式的双光栅马赫-曾德尔干涉仪。

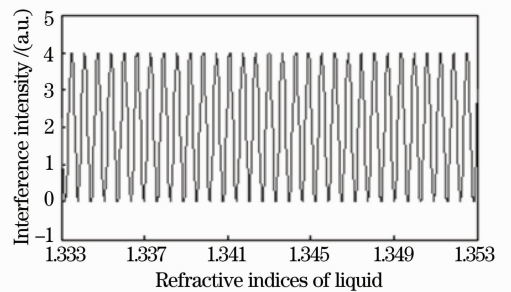


图 5 干涉光强度随液体折射率变化的示意图

Fig. 5 Oscillation of the interference signal versus refractive indices of liquid

4 结 论

设计了新型的基于双衍射光栅的等臂和不等臂马赫-曾德尔干涉仪,通过使用两个自制的周期为 $5\ \mu\text{m}$ 的光刻胶光栅,这类干涉仪得以实现。在利用一个厚度为 $50\ \mu\text{m}$ 的玻璃片来改变干涉光两成分之间相位差的实验中,不等臂式干涉仪的性能得到了验证,获得了与理论值相符的实验结果。这类干涉仪具有结构简单、抗电磁干扰、成本低等优点,可实时监测一个随时间变化的物理或化学过程,在精确测量液体折射率、气体浓度以及薄膜光学厚度方面有较大的应用潜力。

参 考 文 献

- 1 Ping Hua, B. Jonathan Luff, Geoffrey R. Quigley *et al.*. Integrated optical dual Mach-Zehnder interferometer sensor [J]. *Sensors and Actuators B*, 2002, **87**(2): 250~257
- 2 J. A. Qi, W. O. Wong, C. W. Leung *et al.*. Temperature field measurement of a premixed butane/air slot laminar flame jet with Mach-Zehnder interferometry [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, **28**(14-15): 1806~1812
- 3 F. Prieto, B. Sepu'lveda, A. Calle *et al.*. Integrated Mach-Zehnder interferometer based on ARROW structures for biosensor applications [J]. *Sensors and Actuators B*, 2003, **92**(1-2): 151~158
- 4 Robert R., Hershey, Emmett N. Leith. Grating interferometers for producing large holographic gratings [J]. *Applied Optics*, 1990, **29**(7): 937~943
- 5 Yande Xu. Two-grating interferometer for measurement of a step-surface altitude difference [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **246**(1-3): 9~14
- 6 Lu Jianmo, Wang Weinan, Li Yanhe *et al.*. Modeling of fiber radio link using Mach-Zehnder modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 159~165
路建模,王伟男,李艳和等.应用马赫-曾德尔调制器的光微波链路 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 159~165
- 7 Chen Weimin, Wu Jun, Tan Jing *et al.*. Locating technology for twin Mach-Zehnder distributed optical fiber sensing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2128~2132
陈伟民,吴俊,谭靖等.双马赫-曾德尔分布式光纤传感系统定位技术 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2128~2132
- 8 Hong Jianxun, Chen Jianping, Li Xinwan *et al.*. Performance improvement on the measurement of Electro-Optic coefficients of poled polymers using the optical fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *Chinese. J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1271~1274
洪建勋,陈建平,李新碗等.基于马赫-曾德尔干涉仪的聚合物电光系数测量方法的性能改善 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1271~1274
- 9 J. R. Lee, Jerome Molimard, Alain Vautrin *et al.*. Diffraction grating interferometers for mechanical characterisations of advanced fabric laminates [J]. *Optics & Laser Technology*, 2006, **38**(1): 51~66
- 10 Cheng Chih hsu, Chyan Chyi Wu, Ju-Yi Lee *et al.*. Reflection type heterodyne grating interferometry for in-plane displacement measurement [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(9): 2582~2589