

一种纳米精度偏振干涉仪光学系统的研究

郭新军¹, 王 霖², 严家骅², 周自力²

(1. 北京理工大学 光电工程系, 北京 100081; 2. 长城计量测试研究所, 北京 100095)

摘要: 本干涉仪采用偏振测量和偏振接收装置。对干涉仪光路中激光的偏振态转换进行了详细的理论分析, 对偏振干涉仪以及双频干涉仪的研制具有借鉴意义。该装置的重复性试验表明干涉仪重复性在 30 nm 之内, 说明干涉仪的性能比较可靠。如果对环境条件进行严格的控制, 会得到更高的测量精度, 有望实现纳米精度测量。

关键词: 纳米测量; 偏振干涉仪; 光学细分

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)01-0021-04

Research on a kind of polarized interferometer's optical system for nanometer measurement

GUO Xin-jun¹, WANG Ji², YAN Jia-hua², ZHOU Zi-li²

(1. Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Changcheng Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The interferometer adopted polarized light measurement and polarized light receiver is presented. The transform of the polarized light is analyzed in detail, which can help the design of polarized interferometer and dual-frequency interferometer. The repeatitiveness test indicates that the interferometer's measurement accuracy of repeatitiveness is within 30 nm. The result shows that the interferometer is reliable. If the effects of the environmental factors on the measurement accuracy and the compensation for the enviromental changes are studied, the measurement accuracy will be nanometer level.

Keywords: Nanometer measurement; Polarized interferometer; Multiplication OPD

0 引言

国内外机械、材料、电子等工业的迅猛发展推动了纳米技术的兴起和发展, 至今它已成为倍受关注的研究领域之一。随着科学的发展, 它涉及到的内容越

来越广泛, 其中纳米测量技术是纳米科学的一个重要分支。现在亚微米到纳米精度的测量已经成为目前工业发展和科学发展中迫切需要解决的问题, 例如, 半导体工业中的高精度模板的制造和定位, 高精度传感器的标定, 纳米测量都有着重要意义。

收稿日期: 2003-06-24; 修订日期: 2003-08-10

作者简介: 郭新军(1974-), 男, 河南西平人, 工程师, 博士生, 主要从事红外、微光夜视系统的总体性能评价与仿真研究。

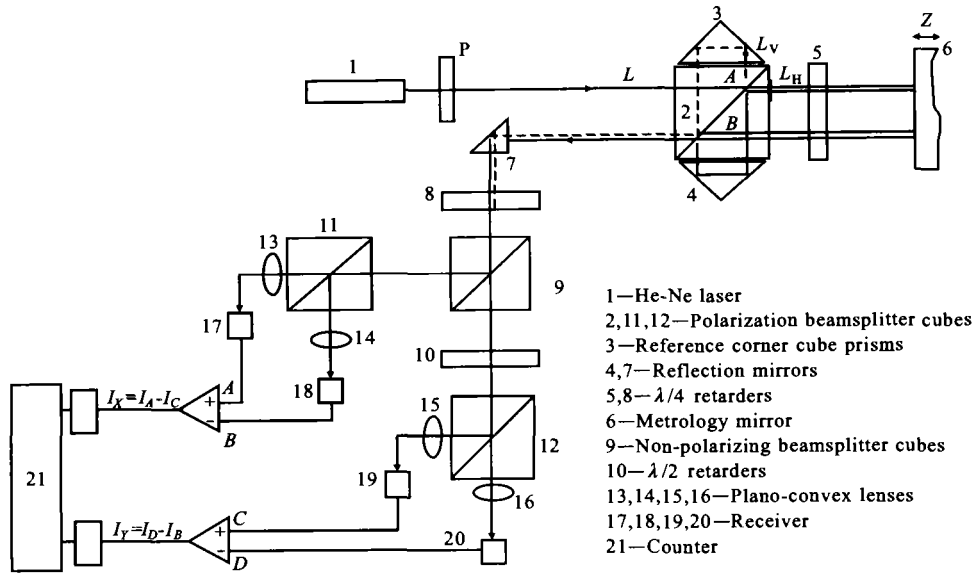


图 1 干涉仪系统光路图

Fig. 1 The laser beam paths of one of the interferometer beam-splitter assemblies

1 纳米级偏振干涉仪的光学系统及测量原理

干涉仪采用单模稳频氦-氖激光器发出的线偏振光作为光源,由固定的分光组件和可动的反射器组成。分光组件包括偏振分光棱镜、角锥棱镜和 λ/4 波片。可动反射器是固定在工作台上的平面反射镜。整个系统光路如图 1 所示^[1,2]。

要使干涉仪达到高精度,首先要获得高分辨率。主要采用两种方法:(1)通过电路对干涉信号进行细分,采用 10 位的 AD 转换器,在电路部分能够实现 1 024 倍的细分;(2)对测量光程进行倍增,实现光学细分,为此对测量光路部分进行了四倍增(如图 1 所示),对于 632.8 nm 的激光波长实现了 0.2 nm 的分辨率。

激光器出射的激光经起偏器 P,线偏振光的偏振方向可由起偏器透光轴的方位决定。为分析计算先设定坐标系,光传播方向为 Z 轴,平行于纸面且垂直 Z 方向为 X 轴,与 Z 和 X 轴正交的方向为 Y 轴。起偏器透光轴的方位角为 α(透光轴与 X 轴的夹角)。

经 P 后光电矢量为:

$$E = E_0 \sin \alpha t \quad (1)$$

由偏振分光镜的特性可知,E 被偏振分光棱镜 2 分为沿 X、Y 轴方向振动的两线偏振光 E₁(图 1 中用

|表示)和 E₂(图 1 中用 · 表示):

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= E_X = E_0 \cos \alpha \sin \alpha t \\ E_2 &= E_Y = E_0 \sin \alpha \sin \alpha t \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

沿 X 方向振动的透射光 E₁ 作为测量光束,沿 Y 方向振动的反射光 E₂ 作为参考光束。设 λ/4 波片 5 的方位角为 θ(指波片快轴和 X 轴的夹角),当 θ=45° 时,测量光束被平面反射镜反射前后,往返四次通过 λ/4 波片 5,振动方向旋转了 180°,出射测量光仍为 X 方向振动的线偏振光,由于测量光两次通过测量平面镜,实现了四倍光学细分。参考光束被角锥棱镜反射一次,振动方向为 Y 方向不变。采用琼斯矩阵对上述过程中参考光束 E_r 和测量光束 E_m 偏振态的分析,可以得到入射到反射镜 7 时 E_r 和 E_m 为^[3,4]:

$$\left. \begin{aligned} E_m &= -E_X = -E_0 \cos \alpha \sin(\omega t + \varphi_1) \\ E_r &= E_Y = E_0 \sin \alpha \sin(\omega t + \varphi_2) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由于参考镜和测量镜的光程不同,产生了相位差 Δφ=φ₁-φ₂。

对于 λ/4 波片 8 采用图 2 所示的坐标系,参考光束 E_r 和测量光束 E_m 在波片 8 快慢轴的分量分别为:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= -E_0 \cos 45^\circ \cos \alpha \sin(\omega t + \varphi_1) \\ y_1 &= -E_0 \sin 45^\circ \cos \alpha \sin(\omega t + \varphi_1) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

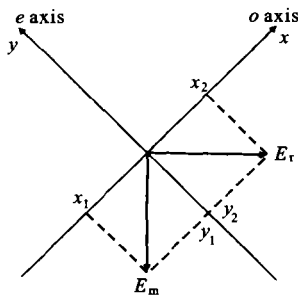


图 2 $\lambda/4$ 波片
Fig. 2 $\lambda/4$ retarder

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= E_0 \cos 45^\circ \sin \alpha \sin(\omega t + \varphi_2) \\ y_2 &= -E_0 \sin 45^\circ \sin \alpha \sin(\omega t + \varphi_2) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

通过 $\lambda/4$ 波片 8 后, 分别为:

$$\left. \begin{aligned} x'_1 &= \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos \alpha \sin(\omega t + \varphi'_1 - \pi) \\ y'_1 &= \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos \alpha \sin(\omega t + \varphi'_1 - \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} x'_2 &= \frac{E_0}{\sqrt{2}} \sin \alpha \sin(\omega t + \varphi'_2) \\ y'_2 &= \frac{E_0}{\sqrt{2}} \sin \alpha \sin(\omega t + \varphi'_2 - \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

公式(6)、(7)表示了二个旋向相反的圆偏振光。两者合成后是一个与测量平面镜位移量 d 有关的旋转着的线偏振光。

为简化计算, 代入 $\alpha = 45^\circ$, 即 $\cos \alpha = \frac{\sqrt{2}}{2}$, $\sin \alpha = \frac{\sqrt{2}}{2}$, 所以:

$$\left. \begin{aligned} x &= x'_1 + x'_2 = -E_0 \sin \frac{\varphi'_1 - \varphi'_2}{2} \cos\left(\omega t + \frac{\varphi'_1 + \varphi'_2}{2}\right) \\ y &= y'_1 + y'_2 = E_0 \cos \frac{\varphi'_1 - \varphi'_2}{2} \cos\left(\omega t + \frac{\varphi'_1 + \varphi'_2}{2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 E_0 为振幅, 其方位角为 $\Delta\varphi' = \frac{\varphi'_1 - \varphi'_2}{2}$, $\varphi'_1 - \varphi'_2$ 表示参考光束与测量光束的相位差。当测量平面镜 6 移动距离 d 时:

$$\Delta\varphi' = \frac{\varphi'_1 - \varphi'_2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{8\pi d}{\lambda} = \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (9)$$

式中 λ 为激光波长。

因此, $d = \frac{\lambda}{4}$ 时, $\Delta\varphi' = \pi$, 即测量平面镜每位移 $\lambda/4$ 波长时合成光束转过 180° 。采用合适的读出电路测出旋转角即可得到位移距离。

本干涉系统偏振接收部分采用与测量部分同一类型的偏振分光棱镜以及光电二极管 19、20 接收, 考察进入接收器 19、20 的 A、B 两信号的 I_A, I_B 。

$$\left. \begin{aligned} I_A &= (E_0 \cos \Delta\varphi')^2 \\ I_B &= [E_0 \cos(\Delta\varphi' - 90^\circ)]^2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

取 $I_0 = E_0^2$, 则:

$$\left. \begin{aligned} I_A &= \frac{E_0^2}{2} (1 + \cos 2\Delta\varphi') = \frac{I_0}{2} \left[1 + \cos \frac{4\pi d}{\lambda} \right] \\ I_B &= \frac{E_0^2}{2} [1 + \cos(2\Delta\varphi' - \pi)] = \\ &= \frac{I_0}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda} - \pi\right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

经消偏振分光棱镜 9 透射的线偏振光再通过一个 $\lambda/2$ 波片 10, $\lambda/2$ 波片用来改变光束振动方向。

转动 $\lambda/2$ 波片 10, 使它的快轴的方位角为 22.5° , 即得到与入射光矢量位相差 45° 的线偏振光, 该偏振光被偏振分光棱镜 12 分别反射透射到接收器 19、20 上, 同理可计算进入接收器 19、20 的 C、D 两信号光的振动强度 I_C, I_D :

$$\left. \begin{aligned} I_C &= \frac{I_0}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda} - \frac{\pi}{2}\right) \right] \\ I_D &= \frac{I_0}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda} - \pi - \frac{3\pi}{2}\right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

为了消去电信号中的直流分量, 应用电子差分技术使 A 信号减去 C 信号得 I_1 信号, D 信号减去 B 信号得 I_2 信号。由上式可得:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I_A - I_C = 2K_2 \cos \frac{8\pi d}{\lambda} \\ I_2 &= I_D - I_B = 2K_4 \sin \frac{8\pi d}{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

公式(13)得到的是最后送入电路部分进行条纹计数的二个没有直流的分量, 对“0”轴对称的互相正交的两个计数信号, 有利于电子细分。

光路采用了一对高精度的角锥棱镜 3 和 4 作反

射器,参考光束与测量光束不按原路返回,各波阵面保持严格平行,防止了回光现象,有利于激光稳频。

在实际结构中,接收部分的光路短,而且整个系统密封,通过对偏振分光棱镜、 $\lambda/4$ 波片、 $\lambda/2$ 波片的调节,可以按预定的要求控制光的偏振态。由于采用偏振分光技术和四路偏振接收技术,光能量得到有效的利用而且又消除了有害的杂光背景,干涉条纹清晰,对比度好;对应于特定波长 632.8 nm 选择 $\lambda/4$ 波片、 $\lambda/2$ 波片,恰恰又起到了选频和滤波的作用,这也是干涉条纹清晰度、对比度好的又一原因。

由公式(11)、(12)可知,四路偏振接收的信号,彼此相差为 0° 、 180° 、 90° 、 270° 。和一般单频干涉仪中采用的以差分信号为基础的消直流方法不同,这里的四个电信号来自同一干涉光束的相同部分,光信号受干涉系统本身与外界的影响一致,位相相反的两个光信号成对合成的两个相差 90° 信号,经差动合成的两相差 90° 信号共模抑制比较好。

鉴于以上特点,本干涉仪适用于高精度测量和精密定位。由干涉仪测量镜采用平面镜,所以它可作为高精度三坐标测量系统中的干涉定位部分。

2 实验及数据分析

通过偏振干涉仪自身的重复性实验,对干涉仪的精度进行验证。测试是在实验室条件下进行的,没有采取严格的控温和防震措施,也没有屏蔽气流措施。

调节传感器电压,先按从小到大的顺序记录干涉仪的正向读数和传感器电压,然后按从大到小的顺序记录干涉仪的反向读数,测试结果及数据处理见表 1、表 2(测试时间为 2002 年 6 月 10 日;测试地点为长城计量测试研究所纳米及光学实验室;实验室温度为 $20 \pm 1^\circ\text{C}$)。

从数据处理结果可以看出,重复性实验偏差比较小,数据中最大差值在 30 nm 以内。

3 结论

以上实验都未进行环境误差补偿。通过偏振干涉仪的自身重复性实验可以看出:偏振干涉仪自身的偏差比较小,重复测量精度在 30 nm 之内,说明所研

表 1 激光干涉仪重复性试验数据一

Tab. 1 Laser interferometer for repetitiveness test data 1

Output voltage of sensor/V	Advance displacement/nm	Countermark displacement/nm	Difference between them /nm
0.925	-2.85	4.98	7.83
2.011	10 948.88	10 936.51	12.37
3.000	20 917.54	20 913.54	4
4.000	31 010.23	31 003.29	6.94
5.006	41 159.39	41 153.56	5.83
6.008	51 275.96	51 272.68	3.28
6.996	61 254.13	61 248.32	5.81
7.996	71 348.85	71 340.06	8.79

表 2 激光干涉仪重复性试验数据二

Tab. 2 Laser interferometer for repetitiveness test data 2

Output voltage of sensor/V	Advance displacement/nm	Countermark displacement/nm	Difference between them/nm
0.900	2.14	-16.19	18.33
2.000	10 922.19	10 922.53	-0.34
3.000	20 891.54	20 894.01	-2.47
4.000	30 990.12	30 993.20	-3.08
5.006	41 137.43	41 138.73	-1.3
6.008	51 258.13	51 254.23	3.9
6.996	61 236.05	61 228.59	7.46
7.996	71 339.95	71 332.66	7.29

制的这套偏振纳米干涉仪测量系统具有良好的环境适应性和较高的测量精度。如果对环境条件进行严格的控制,会得到更高的测量精度。

参考文献:

- [1] 严家骅. 纳米校准技术研究[R]. 北京:长城计量测试研究所, 2000.
- [2] Downs M J, Nunn J W. Verification of the sub-nanometric of an NPL differential plane mirror interferometer with a capacitance probe[J]. Meas Sci Technol, 1998,9(7-9):1437-1440.
- [3] 阎吉祥,魏光辉. 矩阵光学[M]. 北京:兵器工业出版社,1995.
- [4] 新谷隆一,范爱英,康昌鹤. 偏振光[M]. 北京:原子能出版社, 1994.
- [5] 钱瑞海,孟迎军. 半导体激光干涉仪在微振动测量中的应用[J]. 红外与激光工程,1999,28(2):37-39.