

双频激光回馈位移测量研究^{*}

毛 威[†] 张书练 张连清 朱 钧 李 岩

(清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

(2006 年 1 月 13 日收到, 2006 年 2 月 7 日收到修改稿)

提出了一种基于双频激光回馈效应的位移测量系统,并在理论和实验两方面进行了研究.实验中对激光器输出功率变化进行了探测,同时对两正交偏振光的光强变化进行了探测.研究发现当被测物体移动时,激光器输出功率受到调制,物体每移动半个光波长时,回馈信号为调制深度相等的两峰,系统分辨率提高了一倍,达到四分之一光波长.当物体运动方向改变时,两正交偏振光的光强变化顺序也随之改变,可以实现物体位移方向的判断.理论分析及模拟结果与实验结果相符合.研究表明该位移传感系统具有结构简单、分辨率高、可判向、测量范围大、可工作于强回馈区等优点.

关键词:激光回馈,位移传感,自混合干涉,双频激光器

PACC:4280,4225,0630,4262E

1. 引 言

激光回馈效应是指在激光应用系统中,激光器输出光被外部物体反射或散射后,其中一部分光回馈到激光器谐振腔,回馈光携带外部物体信息,与腔内光相互作用后,调制激光器的输出.由于激光回馈严重影响激光器输出特性,对于以激光器作为光源的应用系统而言,起初研究人员关注的是如何消除激光回馈对激光器造成的不利影响.但是随着研究的深入,1963年 King^[1]等在实验中发现外部一个可移动的反射镜每移动半个光波长的位移,激光功率变化一个条纹,类似于传统的双光束干涉现象.从此以后,研究人员从消除激光回馈转变到主动研究并利用激光回馈效应,取得了大量的研究成果.因回馈输出信号特点与传统的双光束干涉信号有相似之处,故又被称为自混合干涉^[2-7].

基于激光回馈的位移测量技术^[8]因为具有结构简单紧凑,光路系统只有一支激光器和一个外部反射物,灵敏度高等优点,从上世纪 80 年代开始兴起,并且主要研究集中于半导体激光器光回馈.但是难于对物体位移方向进行判断这一问题一直阻碍着该项技术的发展.1994年 Wang^[9]等研究发现在中等回

馈水平下,半导体激光器的光回馈信号为非对称的类锯齿波形状,锯齿波的偏斜方向代表着物体移动的方向.锯齿波在感观上容易判向但在硬件上不易于实现,系统分辨率也有限,仅为 $\lambda/2$.后来一些研究采用相位测量,提高了位移分辨率,但相位测量法的动态范围局限于 $\lambda/4$.并且由于迟滞、相干猝灭等现象限制了这些位移测量系统不能工作在强回馈区,而一些材料的加工表面(纳米表面)所能引起的光回馈正处于强回馈水平区.此外受半导体激光器相干长度限制这类系统^[10,11]测量范围很小.

本文提出一种基于双频激光回馈效应的位移传感系统,分辨率是普通回馈系统的两倍,达到四分之一光波长.利用双频激光回馈,两个正交偏振光可以很方便地在空间上实现分开探测,根据两偏振光的回馈信息可以实现位移方向的判断.同时该位移传感系统结构简单,可工作在强回馈区,测量范围很大.

2. 位移传感系统

双频激光回馈位移传感系统如图 1 所示.实验中使用的是半外腔结构的 632.8nm 波长的 He-Ne 激光器.凹面镜 M_1 和平面镜 M_2 构成激光器谐振腔,

^{*} 国家自然科学基金重点项目(批准号:60438010)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: maow03@mails.thu.edu.cn

反射率分别为 99.5% 和 99.0% ,腔长 L 为 155mm. 图 1 中 QC 为石英晶体 , 由于其双折射效应 , 使得一支普通的 He-Ne 激光器变成一支双折射双频激光器 , 其输出的两正交偏振光称之为 o 光和 e 光. θ 为石英晶体面法线与光轴线之间的夹角 , 通过改变该夹角可以调节双频激光器的输出频差.

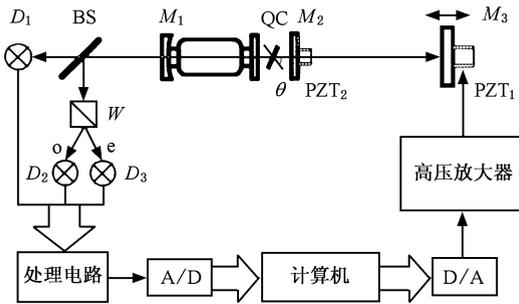


图 1 双频激光回馈位移传感系统结构图

一般为 80% 以上. 实验中我们采用平面镜 M_3 代替 , 其反射率为 88.0% . M_2 和 M_3 构成了外部回馈腔. 由于物体的运动 , 激光器的输出功率将受到调制. 实验中计算机控制 D/A 输出卡的输出电压以控制高压放大器的输出电压 , 从而来驱动压电陶瓷 PZT₁ 移动 , 模拟物体运动. 激光器输出光被分光镜 BS 分成强度相等的两束 , 其中一束光由探测器 D_1 探测 , 另一束光由沃拉斯顿棱镜 W 分光后分别由探测器 D_2 和 D_3 探测. 三路信号经信号处理电路后由 A/D 卡采集 , 直接送入计算机处理后显示测量结果.

3. 理论分析

两个正交偏振光在激光腔内的初始电场可以分别表示为 $E_{o0}(t)$ 和 $E_{e0}(t)$. 当光回馈时 , 光场可以分为两部分. 一是内腔传播场. 光束在激光器内腔往返一周后 , 两电场变为

$$\begin{pmatrix} E_o^1(t) \\ E_e^1(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_2 & 0 \\ 0 & r_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \exp[i2k_o L + (g_o - \alpha_o)L] & 0 \\ 0 & \exp[i2k_e L + (g_e - \alpha_e)L] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{o0}(t) \\ E_{e0}(t) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 r_1 和 r_2 分别是腔镜 M_1 和 M_2 的反射系数 , g_o 和 g_e 是 o 光和 e 光的线性增益 , α_o 和 α_e 是 o 光和 e 光的损耗 , k_o 和 k_e 分别是 o 光和 e 光的波数.

另一是外腔传播场. 光束在外部回馈腔往返一周后再耦合进内腔 , 这部分电场可写为

$$\begin{pmatrix} E_o^2(t) \\ E_e^2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_2 & 0 \\ 0 & t_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_3 & 0 \\ 0 & r_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_2 & 0 \\ 0 & t_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \exp[i2k_o(L+l) + (g_o - \alpha_o)L] & 0 \\ 0 & \exp[i2k_e(L+l) + (g_e - \alpha_e)L] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{o0}(t) \\ E_{e0}(t) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中 r_3 是回馈镜 M_3 的反射系数 , t_2 是腔镜 M_2 的透射系数.

交偏振双频激光器的振荡条件为

$$\begin{aligned} r_1 r_{\text{eff}}^o \cdot \exp(i2\pi\nu_o \tau_l) + (g_o - \alpha_o)L &= 1, \\ r_1 r_{\text{eff}}^e \cdot \exp(i2\pi\nu_e \tau_l) + (g_e - \alpha_e)L &= 1, \end{aligned} \quad (4)$$

这两部分光在激光器内腔叠加形成自混合干涉. 当系统稳定时 , 初始电矢量与回馈后的复合电矢量相等 , 增益与损耗平衡. 即

式中 r_{eff}^o 和 r_{eff}^e 分别是 o 光和 e 光的等效反射系数 , $\tau_l = 2L/c$ 是光束在内腔往返一周的时间 , c 是真空中光速.

$$\begin{pmatrix} E_o^1(t) \\ E_e^1(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_o^2(t) \\ E_e^2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{o0}(t) \\ E_{e0}(t) \end{pmatrix}. \quad (3)$$

根据三腔镜模型 , o , e 光的等效反射系数可分别表示为

由 (1) (2) 和 (3) 式可得光回馈条件下 , 正

$$\begin{aligned} r_{\text{eff}}^o &= r_2 [1 + \zeta \exp(i 2\pi\nu_o \tau_l)], \\ r_{\text{eff}}^e &= r_2 [1 + \zeta \exp(i 2\pi\nu_e \tau_l)], \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\tau_l = 2l/c$ 是光束在外部回馈腔往返一周所需的时间, $\zeta = (1 - r_2^2)(r_3/r_2)$ 代表激光回馈因子.

由于两偏振光共享增益介质, 回馈存在时两偏振光之间存在强烈的模竞争, 一种偏振态的光的增益增加必然导致另一偏振态的光的增益减少, 因此 $\Delta g_o = -\Delta g_e$, 其中 Δg_o 和 Δg_e 分别为 o, e 光在存在光回馈时单位长度内的增益的变化. 因为 ζ 很小, 将(5)式代入(4)式求解可得

$$\Delta g_o = -\Delta g_e = -\zeta \cos(4\pi\nu l/c) L. \quad (6)$$

又因为激光强度的变化比例于 Δg_o 和 Δg_e , 两正交偏振光的输出强度可表示为

$$\begin{aligned} I_o &= I_{o0} [1 + \zeta' \cos(4\pi\nu l/c)] \\ I_e &= I_{e0} [1 - \zeta' \cos(4\pi\nu l/c)]. \end{aligned} \quad (7)$$

式中 I_{o0} 和 I_{e0} 是无光回馈时 o, e 光的初始光强, ζ' 是激光回馈因子.

当双频激光器工作于强回馈水平区时, 由于强

烈的模竞争, 一个周期内 o, e 光交替振荡. 当 $I_o > I_e$ 时 o 光振荡; 反之当 $I_o < I_e$ 时 e 光振荡. 当 o, e 光初始光强相等时, 它们具有相同的调制深度. 此时由振荡条件可知一个周期内它们振荡的时间也相等.

激光器输出功率可表示为两偏振光光强之和, 即

$$I = I_o + I_e. \quad (8)$$

4. 系统性能分析

在加上外部反射物体以前, 驱动 PZT₂ 微调激光器内腔, 使得两正交偏振光的初始光强相等, 即 $I_{o0} = I_{e0}$. 连上回馈环路, 通过电脑对 D/A 输出卡输出电压的控制来控制高压放大器, 其输出的高压驱动 PZT₁, 使得外部回馈腔产生位移变化. 光强调制信号通过探测器和数据处理电路后, 由数据采集卡采集送入电脑, 得到在 D/A 输出卡电压变化的情况下的回馈曲线, 如图 2 所示.

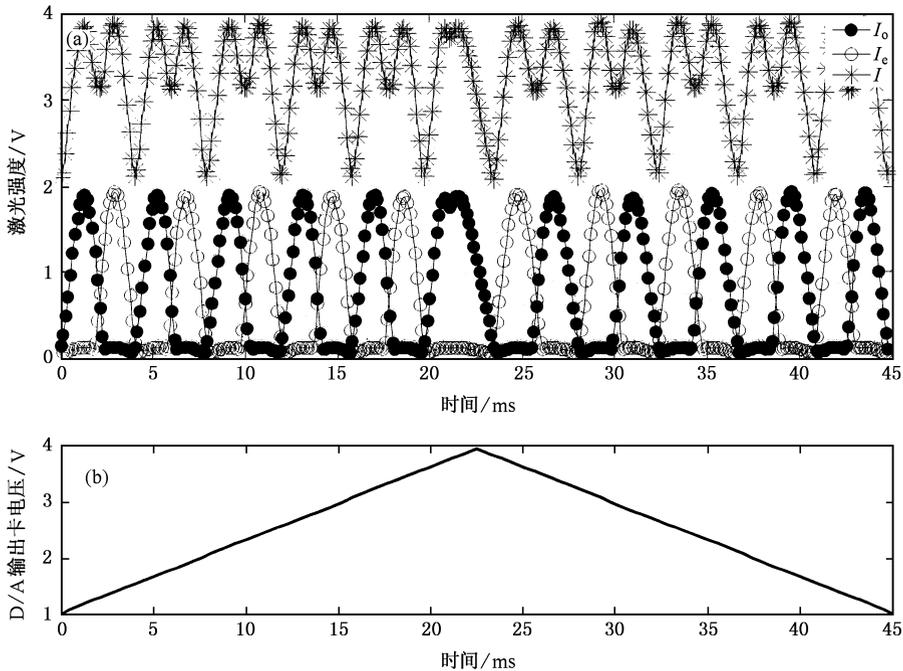


图 2 实验结果 (a) 激光总光强及 o, e 光光强调制信号 (b) 位移驱动信号

图 2(a) 中, 横轴代表时间, 单位为 ms, 纵轴代表激光功率变化, 单位为 V. 星形线代表激光总光强的变化, 沿纵轴向上平移了 2V, 实点线代表 o 光光强的变化, 圈点线代表 e 光光强的变化. 图 2(b) 与图 2(a) 同时获得, 横轴相同, 其纵轴代表位移驱动信号

D/A 输出卡电压的变化, 单位为 V. D/A 输出卡电压每变化 0.57V, 压电陶瓷变化半个波长的位移. 在 22.5ms 时压电陶瓷驱动电压减小, 物体反方向运动. 由于实验系统采用的压电陶瓷 PZT 具有一定的非线性, 物体反向运动时实验曲线具有一定的非对

称性.

4.1. 系统仿真分析

根据双频激光回馈理论,以及实验中使用的参

数,考虑模竞争,对强回馈水平时双频激光回馈信号进行仿真计算,得到激光总光强 I 及两偏振光光强 I_o 和 I_e 在光回馈情况下的调制曲线,如图 3 所示.

图3所示是激光强度变化与D/A输出卡电压变

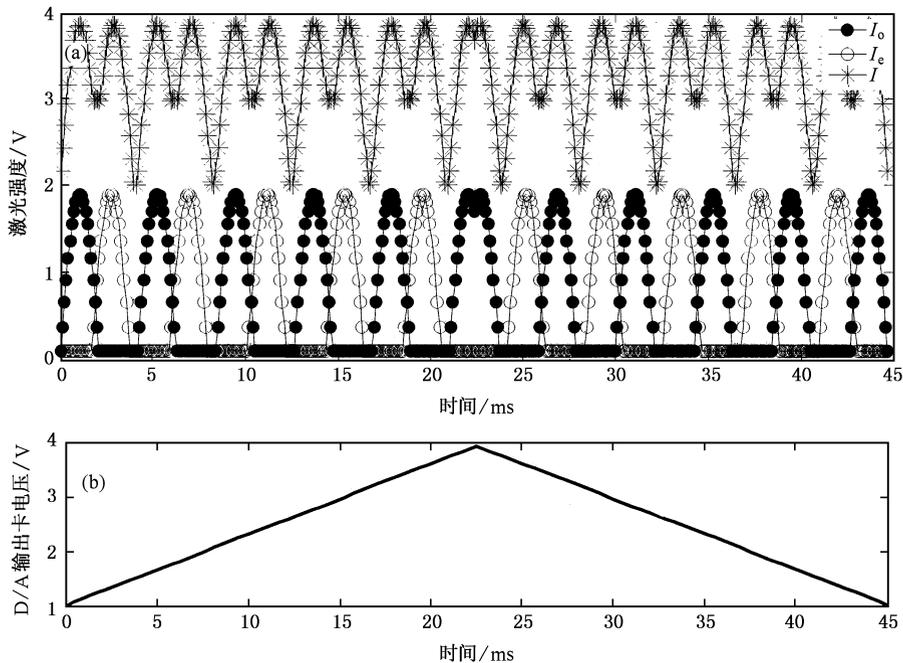


图3 模拟结果 (a)激光总光强及 o, e 光光强调制信号 (b)位移驱动信号

化关系的模拟图,激光总光强 I 及两偏振光光强 I_o 和 I_e 变化规律分别如图中星形线、实点线和圈点线所示.与图 2 相比,模拟结果与实验结果基本符合.

4.2. 系统分辨率分析

由图 2(a)可知,在外腔变化半个波长位移时, o, e 光交替振荡,激光器功率波动两次,且波动幅值相等,回馈条纹发生了倍频.则激光器输出功率每次波动条纹对应外腔变化四分之一一个波长的位移.相比普通回馈系统分辨率提高了一倍,对于系统使用的双频 He-Ne 激光器,系统可测位移的分辨率达 158.2nm.

4.3. 系统判向分析

由图 2 可知,当 D/A 输出卡电压增加和减小时,一个周期内 o, e 光交替振荡的次序是不同的.当 D/A 输出卡电压增加即外腔位移减小时,如图 2(a)所示, o 光先振荡四分之一波长的位移,然后 e 光再振荡.在 o, e 等光强点之前 $I_o > I_e$,在等光强点之后 $I_o < I_e$.当 D/A 输出卡电压减小即外腔位移增加时,正

好相反, e 光先振荡四分之一波长的位移,然后 o 光再振荡.在 o, e 等光强点之前 $I_o < I_e$,在等光强点之后 $I_o > I_e$.通过探测 o, e 光光强变化,可以很容易实现对外腔物体位移的方向进行判断.

4.4. 系统测量范围分析

对于双频激光回馈而言, o, e 光两光调制曲线之间存在一个位相差 δ ,当频差大于激光增益介质均匀展宽的线宽时,该位相差由频差和外腔参数 $\delta = 4\pi\Delta\nu l/c$ 决定,当频差较小时,模竞争较大时,该位相差由模竞争决定^[12].本系统工作于强回馈水平区, o, e 光之间模竞争非常强烈,位相差不受外腔位移影响,不会由于外腔位移变化而引起计数误差.实验得到的 o, e 光之间的位相差约为 π .

另一方面,对于激光回馈位移测量系统而言,系统测量范围都受激光器相干长度的影响,一般为激光器相干长度的一半.目前大量研究的半导体激光器回馈的位移测量系统,由于半导体激光器相干长度很小仅为几米,系统最大测量范围受到严重限制.对于我们的双频 He-Ne 激光器而言,相干性很好,输

出模式线宽一般可达 10kHz,其对应的相干长度为 30km.因此理论上双频激光回馈位移测量系统具有非常大的动态测量范围.

5. 结 论

基于双频激光回馈理论研究和实验探讨,提出了一种基于双频激光回馈效应的位移传感系统.理

论分析及模拟结果与实验结果相符合.研究表明双频激光回馈位移传感系统具有以下特点:1)与传统的双频激光干涉仪相比,系统结构简单紧凑,成本低;2)与基于半导体激光器回馈特性的位移测量系统相比,系统分辨率提高了一倍,达到四分之一光波长;3)系统可实现对位移方向进行判断的功能,且简单易用硬件实现;4)系统理论测量范围大;5)系统可对具有高反射率表面的物体的位移进行测量.

- [1] King P G R , Steward G J 1963 *New Sci.* **17** 180 (in Chinese) 刘 刚、张书练、徐亭等 2005 *物理学报* **54** 4701]
- [2] Lang R , Kobayashi K 1980 *IEEE J. Quantum Electron* **QE-16** 347
- [3] Liu G , Zhang S , Zhu J , Li Y 2004 *Chin. Phys.* **13** 855
- [4] Huan H , Wang M , Guo D *et al* 2004 *Appl. Phys. B-Lasers Opt.* **79** 325
- [5] Yu Y , Ye H , Yao J 2003 *J. Opt. A-Pure Appl. Opt.* **5** 117
- [6] Mao W , Zhang S , Tan Y 2005 *Optics and Precision Engineering* **13** 613
- [7] Liu G , Zhang S L , Xu T *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4701
- [8] Giulian G , Norgia M , Donati S *et al* 2002 *J. Opt. A : Pure Appl. Opt.* **4** S283
- [9] Wang W M , Grattan K T V , Palmer A W , Boyle W J O 1994 *J. Lightwave Technol* **12** 1577
- [10] Silvano D , Giuliani G , Merlo S *et al* 1995 *IEEE J. Quantum Electron* **31** 113
- [11] Sabina M , Silvano D 1997 *IEEE J. Quantum Electron* **33** 527
- [12] Fei L , Zhang S 2004 *Opt. Express* **12** 6100

Study on displacement measurement with optical feedback of dual frequency laser^{*}

Mao Wei Zhang Shu-Lian Zhang Lian-Qing Zhu Jun Li Yan

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments , Department of Precision Instruments , Tsinghua University , Beijing 100084 , China)

(Received 13 January 2006 ; revised manuscript received 7 February 2006)

Abstract

A novel displacement measurement with optical feedback of dual frequency laser has been put forward , which has been investigated both theoretically and experimentally . Intensities of the laser and the two orthogonally polarized modes are detected . It is found that the laser output power will be modulated when the object moves . When the displacement of the object is half wavelength , the signal of optical feedback has two peaks with the same depth of modulation . So the resolution of displacement sensor can be doubled . It is also found that when the object changes its moving direction , the order of intensity variation of the two modes will be changed . It can be used to judge the direction of the displacement . The simulation results are in good agreement with the experimental results . It is indicated that the sensor has advantages of simplicity , high resolution , direction identification capability , large measurement range , operation in high optical feedback regime , and so on .

Keywords : optical feedback , displacement sensor , self-mixing interference , dual frequency laser

PACC : 4280 , 4225 , 0630 , 4262E