

文章编号:1001-5078(2007)09-0879-03

# 一种基于激光自混合干涉的光纤压力传感器

朱 钧, 赵 燕, 饶 星

(清华大学精密仪器测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:**文中理论和实验研究了一种基于激光自混和干涉技术的光纤压力传感器,阐述了其设计理论和实现方法,建立了光纤压力传感器模型,实验研究了应力与激光自混和干涉输出的对应关系;实验结果表明所设计的光纤压力传感器的原理是正确和可行的。

**关键词:**激光自混和干涉;光纤压力传感器

**中图分类号:**TN253

**文献标识码:**A

## A Novel Fiber Pressure Sensor Based on Laser Self-mixing Interference

ZHU Jun, ZHAO Yan, RAO Xing

(State Key Lab of Precision Measurement Technology & Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A novel fiber optical pressure sensor based on optical feedback technology is put forward in this dissertation. The design method and experiment system are introduced. A model of a fiber pressure sensor is formed, and the result of the experiment is discussed.

**Key words:** laser self-mixing interference; fiber pressure sensor

### 1 引 言

光纤传感器是随着光纤技术发展起来的一种新型传感器技术,是光纤技术的一个主要分支。其基本原理是利用物理或化学效应来调制光纤的传输特性,通过测量光纤的传输特性以达到测量物理量和化学量的目的。目前光纤传感技术可以探测一百多种物理量。因为光纤传感器具有灵敏度高、应用范围广、抗干扰、体积小等优点,所以光纤传感器在军事、安全、医疗等方面具有广泛的应用前途。典型的有光纤角度传感器(光纤陀螺)、温度传感器、压力传感器、加速度传感器<sup>[1-2]</sup>。

所谓激光自混和干涉效应是指在激光应用系统中,激光器输出的激光被外部物体反射或散射后,其中一部分光反射回激光器谐振腔(我们称从激光器腔外回来的激光为回馈光),回馈光携带外部物体信息,与腔内光相混合后,激光器的输出功率随回馈光的位相和强弱的改变而改变。因激光自混和干涉输出信号特点与传统的双光束干涉信号有相似之

处,又称之为激光回馈效应(laser feedback)<sup>[3-4]</sup>。最简单的激光自混和干涉现象可以通过一个激光器和一个反射镜来实现,如图1所示。图中M1,M2为激光器的腔镜,M3为腔外反射镜。通过移动腔外反射镜的位置,最终可以改变激光器的输出光功率。若激光自混和干涉引起的光功率的变化为 $\Delta I$ ,腔外反射镜的移动位移为 $L_E$ ,那么两者的关系可以简单表示为:

$$\Delta I = \beta \cos(2kL_E)$$

其中, $k = 2\pi/\lambda$ ,为波矢量; $\lambda$ 为激光器的工作波长; $\beta$ 为比例因子。

研究人员很早就发现激光器外部光回馈能严重地影响激光器的输出特性,最初的研究一直是着眼

**基金项目:**清华大学精密仪器测试技术与仪器国家重点实验室青年基金;航天创新基金。

**作者简介:**朱 钧(1971-),男,讲师,清华大学精密系教师,从事激光技术和显示技术的研究。E-mail: zhujun\_16@263.net

**收稿日期:**2007-04-04

于消除这种光回馈不利的影响,大量的研究成果体现在激光光谱特性和反馈光之间的关系上。随着研究的深入,研究人员开始利用激光自混和干涉效应。激光自混和干涉效应具有三个重要特征:①移动外部反射镜产生的光强调制与传统的光干涉仪产生的调制十分相似,光强的亮暗变化对应于  $\lambda/4$  的光程差,所以激光自混和干涉效应具有较高的测量精度;②强度的调制深度也和传统的干涉装置相似;③外部反射镜的反射率可以影响激光器的输出。这三个特征奠定了激光自混和干涉效应的应用基础。

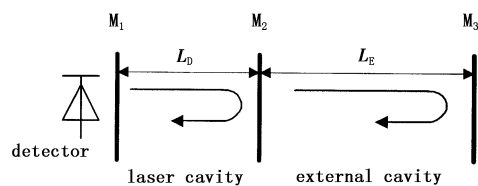


图1 自混合干涉示意图

Fig.1 self-mixing interference

本文提出了一种基于激光自混和干涉的光纤传感系统,着重研究一种基于激光自混和干涉的光纤应力传感器,并实验研究了这种传感器的可行性。通过本研究可以促使激光自混和干涉技术的小型化以及新型光纤传感器的出现。

## 2 原理

### 2.1 基于激光自混和干涉光纤传感器的工作原理

在普通的干涉型光纤传感器中,回馈光是有害的,会对干涉条纹产生强烈的影响。所以经常采用光隔离器来消除回馈光的影响。本文所述的光纤传感器则充分利用激光自混和干涉效应来实现物理量的测量。

基于激光自混和干涉光纤传感器的基本原理如下:①改变光纤的物理环境,也就改变了光纤的光学传输特性;②若通过光纤传导激光器的回馈光,物理环境的变化也就改变了回馈光的相位或反射率,最终体现在激光器输出功率的改变;③通过测量激光器的输出功率,可以测量物理量的变化情况。

光纤传感器从光纤作用角度可分为非功能型传感器和功能型传感器。非功能型传感器中光纤仅起到传光的作用,而功能型传感器中光纤既起到传光的作用又起到传感的作用。目前开发的高精度、高分辨率及结构小型化的传感器多以功能型传感器为主。本文设计的一种基于激光自混和干涉技术的光纤压力传感器就属于功能型传感器。

该传感器结合了激光自混和干涉技术精度高、

结构简单、要求低等优点与光纤固有的柔性、敏感性、传光性等优点,有利于实现小型化的传感系统。理论上这种基于激光自混和干涉的光纤传感系统可以替代干涉系统应用在大部分干涉型光纤传感器中。期望进一步完善激光自混和干涉技术的理论研究,并为光纤传感器的发展提供一种全新的思路。

### 2.2 基于激光自混和干涉光纤压力传感器

光纤压力传感器是利用压力使光纤变形,其传输特性发生变化的性质做成的光电传感器。本文设计的自混合激光干涉光纤压力传感器由激光器、光纤、探测器三部分组成。光纤末端镀反射率为 70% 的反射膜。其基本原理是:激光器发出的光耦合到光纤,并结合光纤末端的镀膜端面反射返回到激光器并与激光器谐振腔中的光混合相干,如图 2 所示。如光纤上有压力信号存在,返回的光信号的光程将发生变化,光电探测器的输出也将发生变化。通过检测这一信号,就可以得到要测的压力信号。

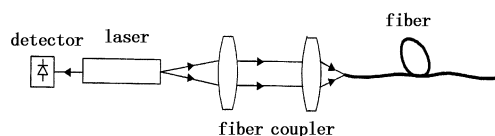


图2 自混合相干光纤压力传感器示意图

Fig.2 self-mixing interference fiber pressure sensor

## 3 实验装置

实验装置如图 3 所示。采用由海特公司设计和生产的光纤输出的 1310nm 激光器,利用精密光纤耦合调节架将空间传播的激光耦合入光纤,而光纤一端镀增透膜,一端镀 70% 反射膜,经高反膜反射回激光器腔内的光引起了激光自混和干涉效应,将与激光器封装在一起的 PD 的光电探测器电路直接引入数据采集系统。数据采集系统采用 NI 的 PCI-6013 采集卡,能探测到模拟输入信号  $4\mu\text{V}$  范围内的变化,能提供高质量的测量精确度。通过 NI-DAQ 驱动软件将数据采集卡与电脑中的 LabVIEW 紧密集成,可以实时观测数据。

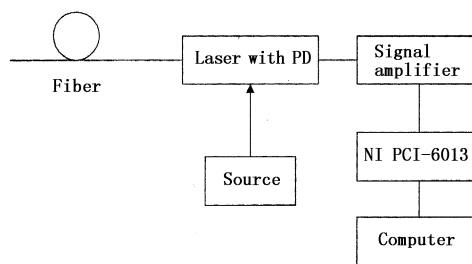


图3 实验装置图

Fig.3 experiment arrangement

#### 4 实验结果以及理论分析

实验现象:对光纤施加单方向压力(通过千分尺施加,并可以进行应变的读数),先找到一个最大值点,记录此时读数;继续加压出现最小值,记录读数;当继续加压重新出现最大值,记录读数,实验数据如表1所示(千分尺读数单位为 $10^{-5}\text{m}$ )。我们可以知道两个最大值之间经历了光相位变化的一个周期,图4为实验示意图,这是实验得出的结论。

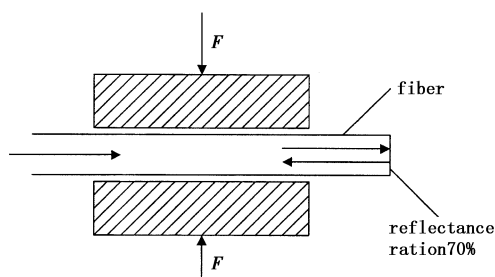


图4 光纤压力传感器示意图

Fig.4 schematic of fiber pressure sensor

当光纤只受横向压力时,其应力为<sup>[2]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P \\ -P \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

相应的应变则为:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P(1-\mu)/E \\ -P(1-\mu)/E \\ 2\mu P/E \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由此可以求出相位的相对变化:

$$\frac{\Delta\varphi}{P \cdot L} = \frac{nk_0}{E} \cdot 2\mu + \frac{k_0 n^3}{2E} [(1-\mu)P_{11} + (1-3\mu)P_{12}] \quad (3)$$

其中, $n$ 为材料折射率; $E$ 为杨氏模量; $\mu$ 为泊松系数; $\delta_1, \delta_2$ 分别为施加光纤的横向应力; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 分别为光纤发生的横向应变; $\varepsilon_3$ 为光纤发生的纵向应变, $\varepsilon_3 = \Delta L/L$ ;  $P_{11}, P_{12}$ 分别为光纤材料的弹性光学系数; $k_0$ 为光在真空中的传播系数, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 。

光纤的物理参数如表2所示。

表1 实验数据

Tab.1 experiment date

输出读数	千分尺读数
3.68V MAX	21.6
3.60V MIN	20.2
3.69V MAX	19

表2 光纤的物理参数

Tab.2 fiber parameter

$P_{11}/P_{12}$	0.126/0.27
受压光纤长度 $L/\text{mm}$	8
泊松系数 $\mu$	0.17
光纤折射率 $n$	1.458

把上面的数据代入公式(3)中,得到:

$$\Delta\varphi = 0.7391497\text{rad}$$

由于光在光纤中来回传播两次,所以实际对系统产生的相位变化为:

$$\Delta\varphi' = 2 \times \Delta\varphi = 85.17^\circ$$

与理论值 $90^\circ$ 基本吻合,所以从实验论证了这一传感器的可行性。本实验只采用了一根传感光纤,若采用光纤环增加传感光纤的数目,将可以进一步提高系统的探测精度。

#### 5 结 论

本文理论和实验研究了一种基于激光自混和干涉的光纤传感器,将激光自混合干涉技术与传统的光纤压力传感器相结合,干涉光路简单、紧密,不受系统采用的单模或多模光纤影响,可以提高传感器自身的灵敏度、稳定性、精确度。如何进一步利用这一原理实现高精度的测量,是我们后续研究的重点。通过进一步的改进,可以实现全光纤压力传感器,其性能(可靠性、灵敏度、线性范围、精度等)将不断改善,性价比不断提高,应用范围也将不断扩大。

#### 参考文献:

- [1] 刘跃辉,等. 光纤压力传感器[J]. 光电子技术,2005, 25(2):124-132.
- [2] 郭凤珍,于长泰. 光纤传感技术与应用[M]. 杭州:浙江大学出版社,1992.
- [3] Gerard A Acket. The influence of feedback intensity on longitudinal mode properties optical noise in index-guide semiconductor laser[J]. IEEE J. Q. E, 1984, 20(10): 1163-1168.
- [4] W M Wang, K T V Grattan. Self-mixing interference inside a single mode diode laser for optical sensing applications[J]. IEEE J. Lightwave, 1994, 12(9): 1577-1578.