

MZI型MOEMS压力传感器的研究

注：国家高技术研究发展计划(863)新材料领域课题资助（项目编号：2009AA03Z413）

摘要：集成光学压力传感器利用幅度、相位、折射率分布、光程和光波极化方式的改变来感应外部压力。设计了马赫-曾德尔干涉仪（MZI）型微型光机电系统（MOEMS）压力传感器，探讨了工作原理，分析了弹性薄膜尺寸对应力的影响和波导中 TE、TM 模式的光对波导折射率的影响。通过设计弹性薄膜的尺寸和选用特定波长的单模激光，得到传感器的工作特性。

关键词：马赫-曾德尔干涉仪（MZI）；压力传感器；折射率；相位；微型光机电系统（MOEMS）

中图分类号：TP212.1 文献标识码：A 文章编号：1006-883X（2009）04-0010-04

►► 王仕超 张晓霞 周勇 王祥斌 陈沛然 冷洁

一、引言

微型光机电系统（Micro-opto-electro-mechanical System, MOEMS）是将集成光学（Integrated Optics, IO）应用于微机电系统（Micro-electromechanical System, MEMS）。由于 MOEMS 体积小、功耗小、抗电磁干扰能力强、工作带宽大、灵敏度高，获得越来越多的关注^[1]，其产品在市场上占有越来越多的份额^[2]。

集成光学式的压力传感器利用光在光路中幅度、相位、折射率、光程和极化方式的改变来探测外部压力的变化。许多光机压力传感器很早就被报道过。如 F-P 式光纤压力传感器^[3]，虽然其灵敏度高，但是工作范围很窄。而本文设计的马赫-曾德尔干涉仪（Mach-Zehnder Interferometer, MZI）波导压力传感器，有较大的工作范围和灵敏度。

本文设计了一个基于 MZI 光波导的 MOEMS 压力传感器，对其工作原理进行了介绍。分析了弹性薄膜的机械性能，并讨论了弹性薄膜的尺寸对传感器性能的影响。通过设计弹性薄膜的尺寸（ $a=2\text{mm}$, $b=1\text{mm}$, $h=20\mu\text{m}$ ）和采用 $1.31\mu\text{m}$ 的 TM 模式的单模激光，分析了该压力传感器灵敏度和半波压力。

二、分析与模拟

传感器的结构如图 1 所示，传感器主要由一个 MZI 结构光波导和一个弹性薄膜组成。MZI 的传感臂置于弹性薄膜的边缘，参考臂远离测量臂，以减少干扰。在工作状态下，由激光产生的光信号，通过固

定在 V 型槽中的单模光纤耦合到波导中，在输入 Y 结分支点处分成等强度的两束光，分别通过传感器的参考臂和传感臂。当弹性薄膜受到外界压力时，通过光弹效应，改变了传感臂中的折射率，即改变了传感臂中传

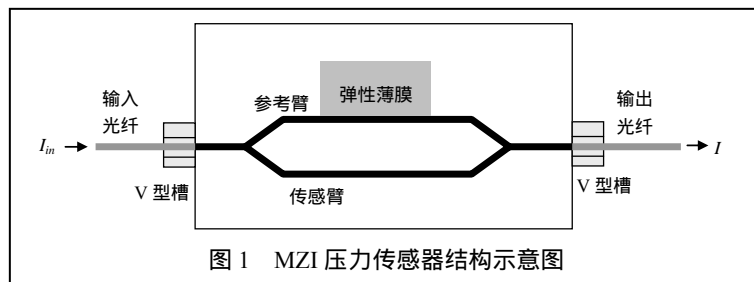


图 1 MZI 压力传感器结构示意图

输光的相位，从而导致 MZI 输出光强的改变，通过检测输出光强的变化即可知压力的变化。

传感器的设计包括弹性薄膜的分析和光机耦合的分析，通过具体的参数能得到传感器的工作特性。

1、弹性薄膜的分析

弹性薄膜结构示意图如图 2 所示。薄膜的长、宽、高分别为 a, b, h 。当压力作用于弹性薄膜时，薄膜与平衡位置产生偏移，变成曲面，称为弹性曲面^[4]。以薄膜下底面中心建立坐标系， x 方向代表薄膜的高度， y 方向代表弹性薄膜宽度， z 方向代表弹性薄膜的长度，同时与 MZI 光波导的传感臂平行。根据薄膜弯曲理论，得到该弹性薄膜曲面微分方程：

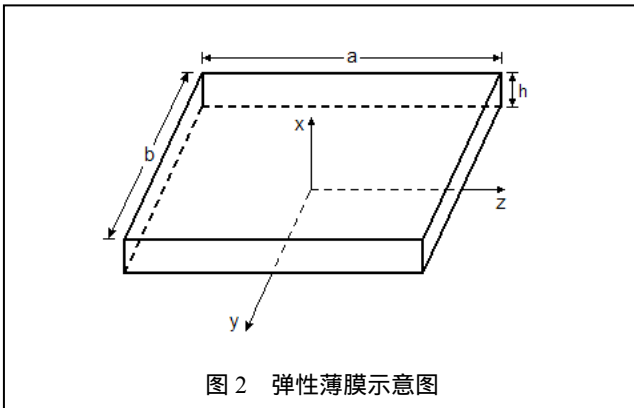


图 2 弹性薄膜示意图

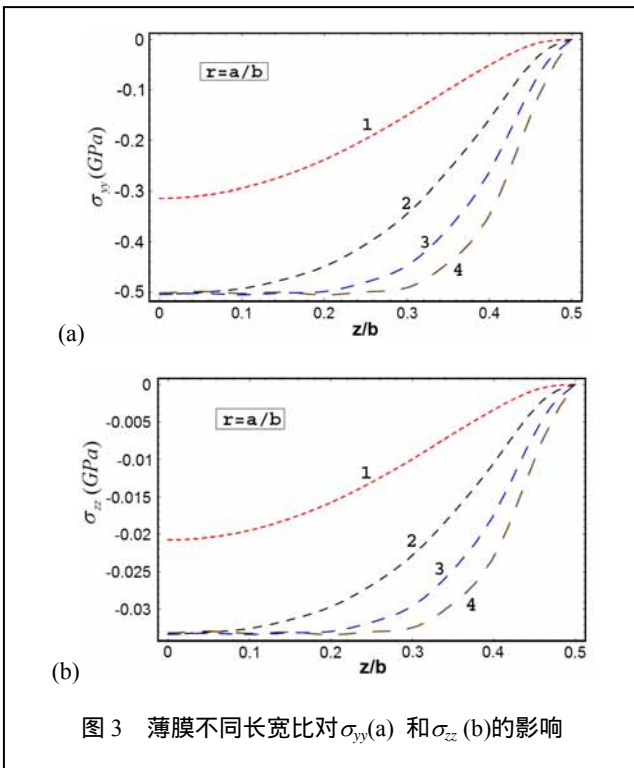


图 3 薄膜不同长宽比对 σ_{yy} (a) 和 σ_{zz} (b) 的影响

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial z^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial z^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{P}{D} \quad (1)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

式中， $\omega(y, z)$ —薄膜表面微小的位移，即挠度；

P —作用于薄膜的力；

D —薄膜抗弯刚度；

E —杨氏模量；

ν —泊松比；

h —薄膜厚度。

假设薄膜的边为固定边，即薄膜四边均是刚性固定，则微分方程的边界条件为：

$$\omega|_{z=\pm a/2, y=\pm b/2} = 0, \quad \frac{\partial \omega}{\partial z}|_{z=\pm a/2} = 0, \quad \frac{\partial \omega}{\partial y}|_{y=\pm b/2} = 0 \quad (3)$$

通过级数逼近法可以得出微分方程的近似解析解^[5]为：

$$\omega(z, y) = \frac{4PL^4}{\pi^5 D} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{(-1)^{(n-1)/2}}{m^5} \cos \frac{m\pi z}{L} \times \left(1 - \frac{\pi \tanh \frac{m\pi}{2} + 4}{4 \cosh \frac{m\pi}{2}} \cosh \frac{m\pi y}{L} + \frac{m\pi}{2 \cosh \frac{m\pi}{2}} \sinh \frac{m\pi y}{L} \right) - \frac{L^2}{2\pi^2 D} \sum_{n=1,3,5,\dots} E_m \frac{(-1)^{(n-1)/2}}{m^2 \cosh \frac{m\pi}{2}} \cdot [f(z, y) + f(y, z)] \quad (4)$$

其中：

$$f(z, y) = \cos \frac{m\pi z}{L} \left[\frac{m\pi z}{L} \sinh \frac{m\pi z}{L} - \frac{m\pi z}{L} \tanh \frac{m\pi}{2} \cosh \frac{m\pi z}{L} \right] \quad (5)$$

对应的应力分量由挠度来表示：

$$\sigma_{yy} = -\frac{hE}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

$$\sigma_{zz} = -\frac{hE}{2(1-\nu^2)} \left(\nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

$$\sigma_{yz} = -\frac{hG}{2} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y \partial z} \right) \quad (8)$$

根据薄膜理论，剪应力 σ_{yz} 相对非常小，在这里忽略不计。图 3(a)和(b)是弹性薄膜不同长宽比($r=a/b=1, 2, 3, 4$)分别对 y 方向应力 σ_{yy} 和 z 方向应力 σ_{zz} 的影响。从图可知，长方形薄膜要比正方形薄膜的应力变化大些， y 方向的应力变化要比 z 方向的大。因为该压力传感器是利用光弹效应来改变波导的折射率，所以应力越大，折射率的改变也就越大。所以薄膜长宽比设计应该为 $r \geq 2$ ，同时薄膜的最大应力也小于硅的断

裂应力 (7GPa), 所以不会发生断裂应力。

传感器的性能取决于弹性膜的尺寸、波导位置和波导中光的极化方式, 波导应置于能够相位最大变化的地方。经计算^[6], 将波导传感臂置于弹性薄膜边缘, 能够产生最大相位变化, 如图 1 所示。

2、光机耦合分析

现将 MZI 波导的传感臂置于弹性薄膜的长边缘, 分析其波导光学性质的改变。光和机械的耦合是通过光弹效应^[7]来实现的。根据弹性力学原理, 当压力作用与弹性薄膜的时, 在弹性薄膜中产生应力的变化, 从而导致波导折射率的变化。由于波导折射率的变化, 而引起波导中光波相位的变化。根据光弹效应可以得到以下方程:

$$\Delta n_i = C_{ij} \sigma_j \quad (9)$$

式中, C —光弹张量, 其中非零张量为:

$$\begin{cases} C_{11} = -0.65 \times 10^{-12} (1/\text{Pa}) \\ C_{22} = -4.22 \times 10^{-12} (1/\text{Pa}) \\ C_{44} = C_{11} - C_{22} \end{cases} \quad (10)$$

对于 TE 模和 TM 模, 折射率变化方程为:

$$\begin{cases} \Delta n_{yy} = C_{11} \sigma_{yy} + C_{22} \sigma_{zz} & \text{TE 模式} \\ \Delta n_{xx} = C_{22} (\sigma_{yy} + \sigma_{zz}) & \text{TM 模式} \end{cases} \quad (11)$$

根据应力的变化, 可以分别得到 TE 模和 TM 模式下折射率变化关系, 如图 4 所示。从图 4(a)和(b)可知, 在光波导传感臂中心处 ($z=0$), 无论是 TE 模还是 TM 模, 长方形的薄膜要比正方形的薄膜对折射率的变化影响大些; 对比图 4(a)和(b)可知, 对于折射率的变化, TM 模比 TE 模影响要大些。

三、MZI 传感分析

当弹性薄膜受到外界压力时, 会导致输出端导膜的相位随压力发生变化, 在整个过程中, 同时有两个因素促使传感臂的相位改变: 一个是光弹效应, 即弹性薄膜在外界压力作用下产生的应力引起弹性薄膜上面光波导介质的介电常数的扰动, 从而导致光波导介质有效折射率的变化, 改变了介质中光波的传播常数; 另一个是由于薄膜受力传感臂弯曲产生的光程变化而引起相移, 两者造成总的相位变化为:

$$\Delta \phi = \Delta \phi_{TE, TM}^{\text{Photo-elastic}} + \Delta \phi^{\text{Deflection}} = \int_L \delta \beta dL + n_{eff} \Delta L \quad (12)$$

式中, L —受力区内传感臂的长度;

$\delta \beta$ —应力造成的传播常数的变化;

n_{eff} —有效折射率。

上式中, 第一项表示由光弹效应引起的相位变化; 第二

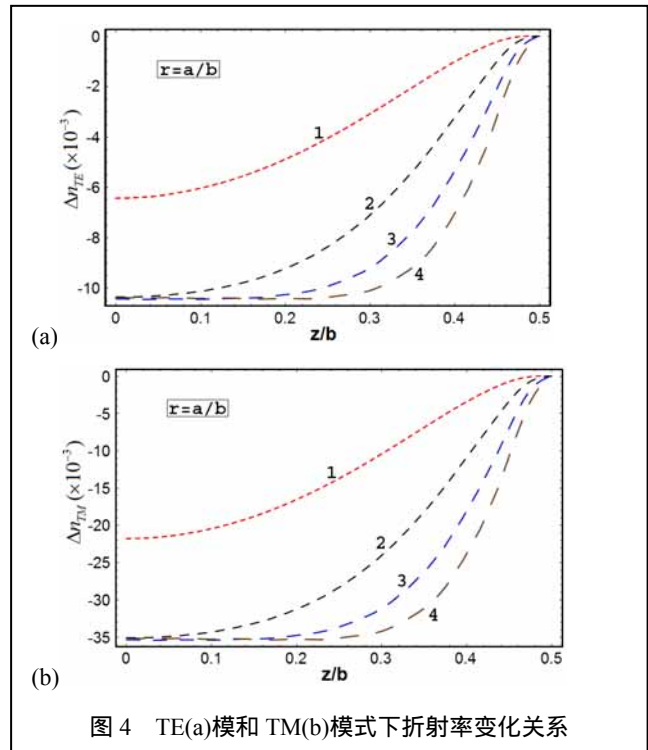


图 4 TE(a)模和 TM(b)模式下折射率变化关系

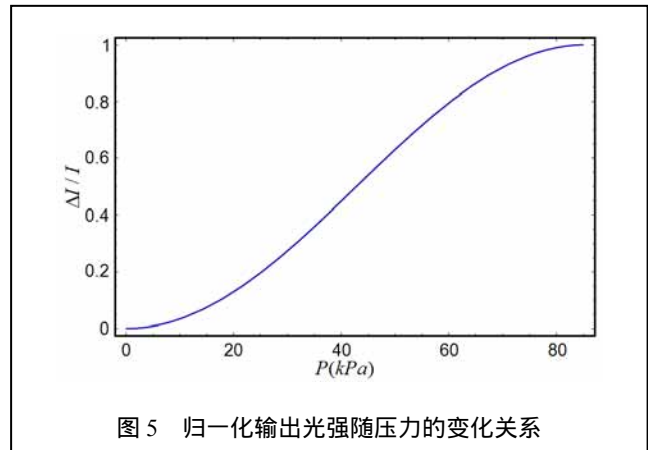


图 5 归一化输出光强随压力的变化关系

项表示光程变化引起的相位变化, 由于弹性薄膜受力导致的微弯曲引非常小, 可以忽略不计^[6]。(12)式可以简化为:

$$\Delta \phi = \Delta \phi_{TE, TM} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n}{n_{eff}} \int_z \Delta n_{TE, TM}(y, z) dz \quad (13)$$

传感器的相位灵敏度为: $S_{\Delta \phi} = \frac{\partial \phi}{\partial P}$ (14)

假设弹性薄膜的尺寸是 $a=2\text{mm}$, $b=1\text{mm}$, $h=20\mu\text{m}$, 采用 $1.31\mu\text{m}$ 的 TM 模式的单模激光。经计算, 此传感器的相位灵敏度是 $36.7\mu\text{rad}/\text{Pa}$ 。

当 MZI 参考臂和传感臂两束光在 Y 节点处发生干涉后, MZI 的输出光强为:

$$I = \frac{I_{in}}{2} [1 + \cos(\Delta\phi)] \quad (15)$$

其中, I_{in} —输入光强;

$\Delta\phi$ —传感臂和参考臂的相位差。

归一化的光强变化可表示为:

$$\frac{\Delta I}{I} = \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (16)$$

由该关系式可知, 归一化输出光强随相位差呈正弦变换。如图 5 所示为归一化输出光强随压力的变化关系。由图可知, 归一化输出光强变化随压强呈正弦变换。该传感器的半波压(相位变化为 π 时的压力)大约为 85kPa, 灵敏度大约为 $1.84 \times 10^{-2} / (\text{kPa})$, 在 20 ~ 60kPa 的范围内有较好的线性关系 ($\Delta I / I = 1.84 \times 10^{-2} P - 0.28$)。在实际动态测量中, 应将测试压的静态工作点置于半波压力的 1/2 处, 即约 40kPa 处。

四、总结

设计了基于 MOMES 的 MZI 压力传感器的器件结构, 并通过理论分析, 讨论了传感器的工作特性。采用 $2\text{mm} \times 1\text{mm} \times 20\mu\text{m}$ 的弹性薄膜, 采用 $1.31\mu\text{m}$ 的 TM 模式的单模激光输入, 结合 MZI 结构, 得到器件灵敏度和半波压力。由于光弹效应导致波导中传输光的相位改变, 这样的机理决定了该光学传感器的灵敏度要比其他的 MEMS 高。由于该传感器的结构简单、尺寸小、灵敏度高, 便于集成, 可用于微小压力测量领域^[8]。

参考文献:

- [1] 李德胜, 王东红, 孙金玮等. MEMS 技术及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002: 1~20
- [2] Zaiazmin Y. N., Azid I. A.. Comparison between ANSYS and CATIA simulation capability in simulating round shape diaphragm of MEMS piezoresistive pressure sensor[J], IEEE Electronics Manufacturing and Technology, 2007(11): 191~195.
- [3] Yixian Ge, Ming Wang, Hua Rong, Xuxing Chen. A novel optical MEMS pressure sensor with a mesa diaphragm[A]. Proceedings of SPIE[C]. 2007(6836): 1~9.
- [4] 刘鸿文, 林建兴, 曹曼玲. 高等材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984: 439~496
- [5] 薛大为. 板壳理论[M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1988: 2~44.
- [6] Masashi Ohkawa, Masayuki Izutsu, and Tadasi Sueta. Integrated optic pressure sensor on silicon substrate[J]. Applied Optics. 1989(28): 5153~5157.
- [7] Prasant Kumar Pattnaik, Bh. Vijayaaditya, T. Srinivas and A. Selvarajan. Optical MEMS pressure and vibration sensors using

integrated optical ring resonators [J], IEEE Sensors, 2005(3): 636~639

[8] Liwei Lin, Weijie Yun. MEMS pressure sensors for aerospace applications [J], IEEE Aerospace Conference, 1998(1): 429~436

Research on Mach-Zehnder interferometer for MOEMS pressure sensor

WANG Shi-chao, ZHANG Xiao-xia, ZHOU Yong, WANG Xiang-bin, CHEN Pei-ran, LENG Jie

(School of Opto-Electronic Information, UESTC, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: Integrated optical pressure sensor can sense external pressure by utilizing the changes of amplitude, phase, refractive index distribution, optical path length or polarization way of lightwave. A micro-opto-electro-mechanical system(MOEMS) pressure sensor based on Mach-Zehnder interferometer (MZI) is designed and the operation principle is presented in this paper. The influence on stress made by diaphragm size and that on refractive index made by light in TE or TM modes are analyzed. The excellent characteristics of the sensor are obtained by correct choices of elastic membrane parameters and single mode laser with special wavelength.

Keywords: Mach-Zehnder interferometer(MZI); pressure sensors; refractive index; phase; micro-opto-electro-mechanical system(MOEMS)

作者简介:

王仕超, 电子科技大学光电信息学院硕士研究生, 主要研究方向为集成光学、光电传感

通信地址: 四川电子科技大学沙河校区学生公寓 17 栋 619 室 邮编: 610054

电话: 13880731767 电邮: victor29999@yahoo.com.cn

张晓霞, 电子科技大学光电信息学院教授、博士生导师, 主要从事集成光学探测器的研究

周勇, 电子科技大学光电信息学院硕士研究生, 研究方向为光电探测器

王祥斌, 电子科技大学光电信息学院硕士研究生, 研究方向为光波导放大器

陈沛然, 电子科技大学光电信息学院硕士研究生, 研究方向为光电探测器

冷洁, 电子科技大学光电信息学院硕士研究生, 研究方向为光波导激光器

读者服务卡编号 002