

新型 SU-8 光纤法布里-珀罗压力传感器的设计仿真

戴丽华 王 鸣 戎 华

(南京师范大学物理科学与技术学院江苏省光电技术重点实验室, 江苏 南京 210046)

摘要 主要提出了一种利用 SU-8 光刻胶形成高深宽比结构的新型压力传感器。为了解决传统压力传感器测量范围受限的问题,通过特定的结构设计,实现敏感膜形变量与法布里-珀罗(F-P)腔长变化量的分离且相关的关系。该传感器基于 F-P 干涉原理和相位解调理论测量压力。通过仿真逐一确定了结构参数,在半径为 $1500\ \mu\text{m}$,厚度为 $100\ \mu\text{m}$ 的硅圆膜上,利用 SU-8 光刻胶形成一个边长 $100\ \mu\text{m}$,高 $400\ \mu\text{m}$ 的位移柱作为压力传感器的主要感应部件,通过敏感膜受力形变带动位移柱倾斜,以此改变 F-P 腔的腔长。结构模型的灵敏度通过仿真测得为 $2.606\ \mu\text{m}/\text{MPa}$ 。以此为指导进行了基本的工艺实验,明确了主要的工艺步骤。

关键词 传感器;光学传感;光纤压力传感器;法布里-珀罗干涉测量;SU-8 光刻胶

中图分类号 TN491 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.s105005

Study of a Novel SU-8 Fiber Fabry-Perot Pressure Sensor

Dai Lihua Wang Ming Rong Hua

(*Jiangsu Key Laboratory of Opto-Electronic Technology, School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210046, China*)

Abstract A novel pressure sensor based on a high-aspect-ratio structure formed by SU-8 photoresist is proposed. The advantage of the structure lies mainly in the design of separation of sensing membrane deformation with the length change of Fabry-Perot (F-P) cavity, which restricts the linear measurement in most traditional pressure sensors. The sensor is based on F-P interferometer and phase demodulation method. The structural parameters have been ascertained, which will be dealt with during sensor fabrication through numerical simulation. The main sensing elements of the designed model include a silicon membrane and a square column on it. The membrane is with diaphragm thickness of $100\ \mu\text{m}$ and radius of $1500\ \mu\text{m}$. Meanwhile, the square column is with the dimension of $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}\times 400\ \mu\text{m}$. The sensitivity of the structure model is presented as $2.606\ \mu\text{m}/\text{MPa}$ from simulation. Under the guidance of the simulations, the fundamental processing is defined.

Key words sensors; optical sensing; optical fiber pressure sensor; Fabry-Perot interferometry; SU-8 photoresist

OCIS codes 060.2370; 160.5470; 120.5060; 120.2230; 120.5475

1 引 言

随着微机电系统(MEMS)技术的快速发展,对结构的改进、制备手段的提高以及封装技术的改良成为了人们对这一技术的主要需求。MEMS 技术水平不仅影响进一步的研究成果,而且对产业化应用有着深远的意义^[1,2]。微型光机电系统(MOEMS)是 MEMS 的一个特殊分支,在微尺寸的器件上导入光信号形成完整的光学机械系统。传统的 MOEMS 传感器包括

微加工的 MEMS 传感器结构和一个对准且固定的光纤组成。光学的引入使其可以在恶劣的环境下或者特殊要求的环境中使用,拓宽了其应用领域。

SU-8 光刻胶是一种近紫外的环氧树脂型光刻胶。这种环氧树脂型负光刻胶的分子结构使其可以产生均匀的胶层,通过光刻技术形成高深宽比结构。这种材料由于其特性优越受到了高度重视,被广泛应用于微机械加工和其他微电子应用中。

收稿日期: 2011-06-09; **收到修改稿日期:** 2011-08-31

基金项目: 江苏省高校自然科学研究重大项目(10KJA510024)资助课题。

作者简介: 戴丽华(1986—),女,博士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: sharon_dlh@139.com

导师简介: 王 鸣(1950—),男,教授,博士生导师,主要从事光电子和激光应用等方面的研究。

E-mail: wangming@njnu.edu.cn(通信联系人)

本文提到的基于法布里-珀罗(F-P)干涉原理的小型压力光纤传感器设计应用于微压力测量。微压测量不仅可应用于压力测量,同时还可以用于工业安全中的泄漏检测。在聚合物 MEMS 技术的辅助下,高深宽比结构成为了可能,新颖的设计使其摆脱了在传统压力传感器测量范围的局限性,可以更好地符合人们对微压测量的要求,得到更精准的测量效果。

2 微型压力传感器的设计

所设计的微 F-P 干涉传感器结构示意图如图 1(a)所示。首先制作形成一个硅圆膜,作为敏感膜;在膜上选取某个位置,利用 SU-8 光刻胶塑形形成一个长方体的位移柱,在位移柱正对光纤的一面沉积一层金属层作为反射镜,利用对准的光纤导入和导出光信号。当没有施加压力的时候,结构如图 1(b)所示。光纤端面与位移柱表面金属层分别作为两个反射镜,形成 F-P 干涉腔。由光纤导入的入射光一部分会被光纤端面反射;其他部分在 F-P 腔内传播形成驻波,部分光波由位移柱表面金属层反射回光纤内。两束反射光相互干涉,产生干涉信号,这个干涉信号是 F-P 腔长变化的函数^[3]。当在硅圆膜上加载负荷,会产生如图 1(c)所示的形变。将会由于硅膜形变驱使位移柱发生倾斜,产生倾角,从而导致法 F-P 腔长发生改变^[4]。通过计算反射谱的

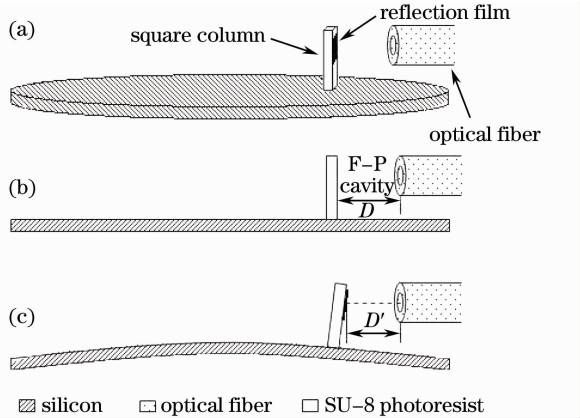


图 1 微型 F-P 压力传感器的示意图。(a)结构的立体视图; (b)无压力作用下结构的侧视图; (c)施加压力使敏感膜产生形变,影响 F-P 腔长发生改变

Fig. 1 Schematic of the micro Fabry-Perot sensor. (a) Stereoscopic view of the structure; (b) side view of the structure without pressure on the structure; (c) deformation of the pressure sensing membrane under load makes the Fabry-Perot cavity length change

相移,可以解析出所施加的压力大小^[5]。

与传统的传感器相比,所设计的微型传感器最大的不同在于:这个 F-P 压力传感器独特的设计使其感应水平位移量而不是传统的垂直位移。在传统的大多数传感器中,F-P 腔长变化量和施加压力的所产生的形变量通常是同一个变化量。鉴于 F-P 腔长一般是微米量级,如果负载过大,膜的形变可能使 F-P 的腔的两个端面相接触,不仅限制了传感器线性测量的范围,更严重者会使压力传感器产生无法修复的损坏导致失灵。同时,为了确保形变量和干涉光相移的单值关系,腔长应该尽量的小,以保证其自由频谱范围比工作范围稍大一些^[6,7]。在设计中,敏感膜的形变方向为垂直方向,而压力以及腔长变化的方向为水平方向,形变量与腔长变化量相分离的同时保持一定的相关关系,巧妙地回避了传统压力传感器的限制,使其具备更好的应用前景。

3 仿真及优化

由于结构设计中包含了一个联动结构,负荷下所产生的形变无法简单借助已有的公式进行计算^[8]。所以,为了探究所设计的传感器的性能,主要是采用商业化软件 Coventorware 进行仿真实验。

3.1 膜的形状

众所周知,在不同形状的膜上施加相同应力会产生不同的应力分布,得到不同的形变结果。形变量与传感器的灵敏度和信号的分辨率密切相关,首先讨论了硅膜的形状。在这个部分,将会讨论三种不同形状的硅膜,分别为圆形、正方形和矩形。

图 2 展示了三种形状不同的膜在 1 个标准大气压压力下的形变仿真结果。3 种膜的厚度都为 $100 \mu\text{m}$,其他的参数分别为:圆膜的直径为 $3 \times 10^3 \mu\text{m}$;正方形的边长为 $3 \times 10^3 \mu\text{m}$;矩形膜的长为 $4 \times 10^3 \mu\text{m}$,宽为 $3 \times 10^3 \mu\text{m}$ 。

鉴于在角区部位会存在应力集中效应,从传感器的反复性考率出发,选取硅圆膜作为整个传感器件的基础。不过应该指出的是,通过比较圆形膜和正方形膜的形变结果,可以得出结论:膜面积越大,将会带来越大的形变量;通过将矩形膜与方形膜进行比较,可以得出:在适当的长宽比下,矩形膜的长会为敏感膜引入更大的位移量。

3.2 位移柱的最优位置

位移柱的运动直接影响腔长的变化量。为了得到最好的性能,优化位移柱的位置起到了是很重要的。在直径为 $3 \times 10^3 \mu\text{m}$ 的硅圆膜上,塑造边长

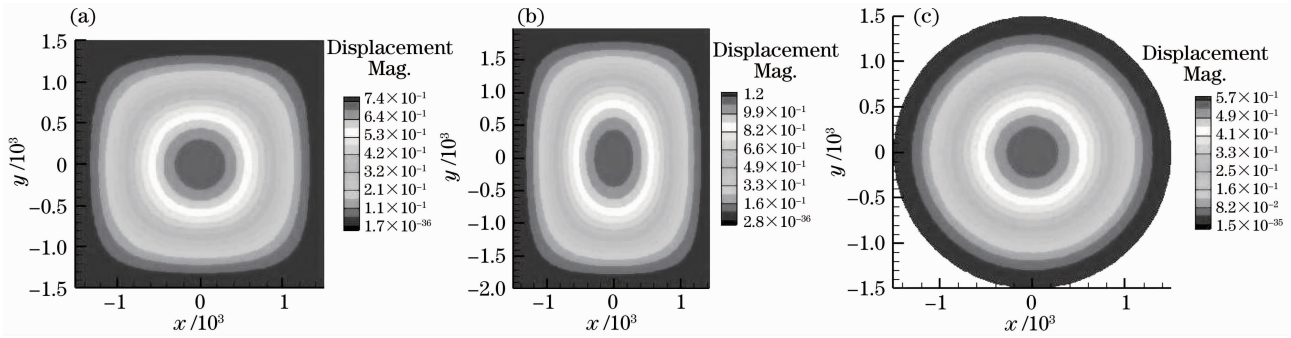


图2 不同形状的敏感膜在相同负荷下的形变仿真。(a)方形膜的形变分布;(b)矩形膜的形变分布;(c)圆形膜的形变分布

Fig. 2 Deformation simulation result of different shapes of membranes. (a) Deformation distribution of a square membrane; (b) deformation distribution of a rectangular membrane; (c) deformation distribution of a circular membrane

100 μm ,高 400 μm 的位移柱,数字仿真结果显示在施加恒压的情况下,位移柱的整体运动中,存在某一个确定的位置,可以使得位移柱得到最大的侧向位移量。

图3阐明了位移柱的位置和最大测量位移值也就是腔长变化的关系。假设位移柱面对光纤的面为前端面,则文中所提及的位置以及图3中的距离都以硅膜的圆心为原点,位移柱的后端面与圆心的距离。图3中明显可以看出最大侧向位移与位移柱位置的曲线是驼形的,也就是说对于一定尺寸的位移柱而言存在一个最优位置。在这个仿真实验中,位移柱的尺寸设置相同,长宽高分别为 100, 100, 400 μm 。对于直径为 $3 \times 10^3 \mu\text{m}$ 的硅圆膜而言,在距离圆心 845~945 μm 处放置位移柱可以得到最优的性能。

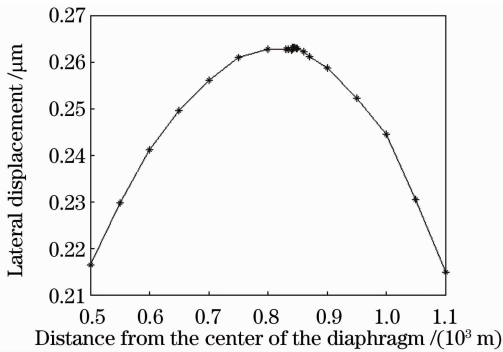


图3 位移柱的位置对应其最大侧向位移量的曲线

Fig. 3 Relation between the position of the square column and the attainable maximal lateral displacement

3.3 位移柱的尺寸

确定了最优位置后,在这个部分继续讨论了位移柱的尺寸和侧向位移的关系。位移柱的尺寸也是影响其运动的一个可控因素。

设置位移柱的高度固定为 400 μm ,将截面积分别设置为 150 $\mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$, 100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$,

50 $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$,建立三个模型。为了便于区分,图4采取了不同的记号来展示不同尺寸的位移柱在加载相同负荷的情况下得到的一系列仿真结果。由图中可以看出不同模型的侧向位移最大值的曲线峰值只产生了轻微的偏移。

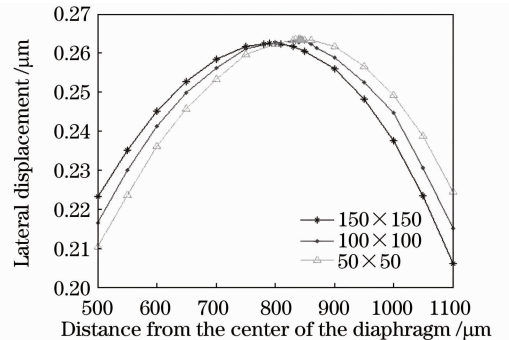


图4 不同尺寸的位移柱仿真实验结果对比

Fig. 4 Simulation comparison of the square column with different design dimensions

更详尽的结果如表1中所示。根据这些数值可以得出以下结论:位移柱的尺寸大小并不明显影响测量位移量。峰值的偏移只是因为接触面积尺寸不同所导致的,接触面积大小不同影响了膜的形变,因此产生了不同的倾角。从这三个模型中可以看出,带来最大侧向位移的位置集中在距圆心 850~900 μm 处。这同样说明,对于周边固支的圆膜,施加均匀的应力,存在某一个位置的转角最大,使位移柱产生最大程度的倾斜。同时可以得出位移柱的位置是影响位移柱运动的主导因素。

表1 仿真结果

Table 1 Simulation result

Dimension / μm^2	Optimal position / μm	Maximum lateral displacement / μm
150 \times 150	790~940	0.2625198
100 \times 100	845~945	0.2631744
50 \times 50	840~890	0.2635976

对于位移柱的高度也进行了讨论。与推测相一致,由于倾角不变,更高的位移柱带来更大的侧向位移。不过需要指出的是,位移柱高度的增加在带来更高灵敏度的同时,也会导致传感器的尺寸的变大,对于某些对尺寸有要求的应用而言,增加高度就需要进一步权衡了。

3.4 参数设定及工艺步骤的确定

集合仿真结果逐一确定参数,考虑到工艺水平及后期加工难度^[9~12],最终传感部件结构模型设定为:敏感膜为厚度为 100 μm ,半径为 $1.5 \times 10^3 \mu\text{m}$ 的硅圆膜;在硅圆膜上,距离圆心 845~945 μm 的位置处,形成一个高为 400 μm ,底面边长为 100 μm 的 SU-8 位移柱。

实现这个设计的工艺步骤如图 5 所示。首先采用体 MEMS 加工技术,将厚度为 400 μm 的硅晶圆[图 5(a)]在氢氧化钾溶液中进行各向异性湿法腐蚀,通过控制腐蚀时长,在硅晶圆的背面腐蚀去 300 μm ,得到所需的 100 μm 的膜厚[图 5(b)]。接着在硅晶圆的正面进行两次近紫外光刻步骤,分别如图 5(d)和 5(f)中所示,曝光光源为波长 360 nm 的紫外光,每层 SU-8 胶层厚度为 200 μm ,第一次光刻主要形成固定光纤的光纤槽,在这个基础上,第二次光刻完成位移柱和支持壁。

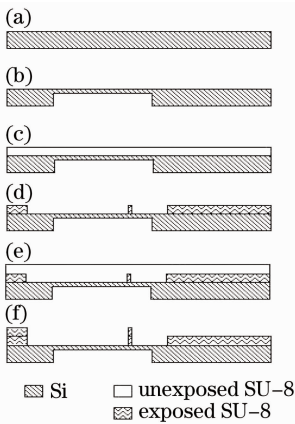


图 5 工艺流程示意图

Fig. 5 Sketch of fabrication process

通过控制位移柱与光纤端面的距离,将初始腔长设为 300 μm ,压力测试范围 0~0.101 MPa,每 0.0101 MPa 增量会对最大侧向位移量进行采样。测试结果如图 6 所示,拟合曲线为 $L = 300 \mu\text{m} - 2.606 \mu\text{m} \times P$,线性度为 0.12%,灵敏度(腔长变化量/压力值)为 2.606 $\mu\text{m}/\text{MPa}$ 。通过跟踪光谱的移动,可以解调光信号。仿真结果验证了设计的可行性。

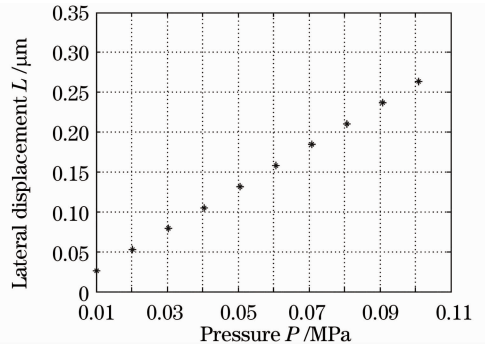


图 6 施加压力值与位移变化量的关系

Fig. 6 Relation between applied pressure and displacement change

4 结 论

主要提出了一种新颖的设计,改进了传统压力传感器的结构。它将压力产生的形变与腔长变化量分离,以此解决了传统压力传感器普遍存在的线性测量的限制。通过数字仿真,更进一步的确定和优化了敏感元件的结构参数。不仅验证了其可行性,而且证实设计的传感器可以得到较好的灵敏度,更高的精度,更符合大众需求的测量范围。精确的微型压力检测在工业中被广泛需求,撤除传统传感器的限制,达到更优越的特性使文中设计的传感器具备更广泛的应用空间。

参 考 文 献

- Zhenhai Chen, R. C. Luo. Design and implementation of capacitive proximity sensor using microelectromechanical systems technology[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1998, **45**(6): 886~894
- Xiaodong Wang, Baoqing Li, Onofrio L. Russo *et al.*. Diaphragm design guidelines and an optical pressure sensor based on MEMS technique[J]. *Microelectronics Journal*, 2006, **37**(1): 50~56
- Deng Ming. Study on Structures and Characteristics of Novel Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometric Sensors[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. 15~24
邓明. 新型光纤 F-P 干涉传感器结构及特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009. 15~24
- C. J. Lin, F. G. Tseng. A micro Fabry-Perot sensor for nano-lateral displacement sensing with enhanced sensitivity and pressure resistance[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, **114**(2-3): 163~170
- Ge Yixian, Wang Ming, Yan Haitao *et al.*. A MEMS pressure sensor based on a phase demodulation method[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2008, **14**(2): 472~475
葛益娴, 王鸣, 闫海涛等. 基于相位解调的光纤 MEMS 压力传感器[J]. *功能材料与器件学报*, 2008, **14**(2): 472~475
- Rao Yunjiang, Duan Dewen, Yang Xiaochen *et al.*. Photonic crystal fiber Fabry-Perot sensor fabricated using femtosecond laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 91~93
饶云江, 段德稳, 杨晓辰等. 飞秒激光加工光子晶体光纤微型 F-P 传感器研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1): 91~93

- 7 E. G. Bakhoun, M. H. Cheng. Capacitive pressure sensor with very large dynamic range[J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging*, 2010, **33**(1): 79~83
- 8 Gregory T. A. Kovacs. *Micromachined Transducers Sourcebook* [M]. Zhang Wendong Transl.. Beijing: Science Press, 2003. 180~181
格雷戈里 T. A. 科瓦奇. 微传感器与微执行器全书[M]. 张文栋译, 北京: 科学出版社, 2003. 180~181
- 9 V. R. Machavaram, R. A. Badcock, G. F. Fernando. Fabrication of intrinsic fibre Fabry-Perot sensors in silica fibres using hydrofluoric acid etching[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, **138**(1): 248~260
- 10 I. Zine-El-Abidine, M. Okoniewski. A low-temperature SU-8 based wafer-level hermetic packing for MEMS devices[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2009, **32**(2): 448~452
- 11 A. M. Sanchez, R. Prieto, M. Laso *et al.*. A piezoelectric minirheometer for measuring the viscosity of polymer microsamples[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, **55**(1): 427~436
- 12 C. H. Smith, N. S. Barker. SU-8 micromachining process for millimeter and submillimeterwave waveguide circuit fabrication [C]. IRMMW-THz 2008, 33rd International Conference, Sept. 2008. 1~2

栏目编辑:殷建芳