

# 光纤微机电压力传感器的设计

李 明,王 鸣,王婷婷,聂守平

(南京师范大学 物理科学与技术学院,江苏 南京 210097)

[摘要] 设计了一种基于微机电系统(MEMS)的光纤压力传感器,证明了光纤 MEMS 压力传感器在工作状态下可以由法布里-珀罗腔的理论模型进行解释.推导出光纤 MEMS 压力传感器中硅横膈膜受到的压力与干涉光强的关系表达式.并且对光纤 MEMS 压力传感器的模型进行数值模拟,得到了传感器制作过程中涉及到的各个物理量的取值.其中腔体半径为 300 μm、腔体深度为 2.42 μm、硅横膈膜厚度为 23 μm.该设计为光纤 MEMS 压力传感器的加工和制作提供了理论基础.

[关键词] 集成光路;光纤 MEMS 压力传感器;数值模拟;干涉光强

[中图分类号]TN491, [文献标识码]B, [文章编号]1672-1292-(2004)04-0020-05

## 0 引言

光纤 MEMS 压力传感器由于其具有的微型、响应频带宽、高灵敏度、低成本等特点而在很多应用领域中显得极为实用.光纤 MEMS 压力传感器在强电磁干扰、高温等恶劣环境下相比于其它传统的传感器具有较强的适应能力;而且它可以利用波分复用或时分复用等信号处理技术组成多元传感器阵列,测量环境中的压力、温度等物理量的分布. MEMS 器件适合于大规模集成化生产,从而大大降低了传感器的生产成本.

光纤 MEMS 压力传感器的研究始自 20 世纪 70 年代<sup>[1]</sup>,当时主要是以光强度调制为理论基础进行设计,设计出来的传感器体积较大、制作难度大而且成本较高.20 世纪 80 年代开始研究工作主要集中在基于法布里-珀罗干涉仪的光纤压力传感器<sup>[2,3]</sup>上,这种传感器虽然消除了光强度调制带来的一些限制,但它还是需要非常复杂的信号处理设备.目前在 MEMS 器件的研究方面,压力传感器、加速度传感器已经成熟,利用波分复用<sup>[4]</sup>和时分复用技术组成传感器信号处理系统可以实现对压力、应力、温度、加速度等物理量的测量.

本文设计了一种基于 MEMS 结构的光纤压力传感器,并且对该光纤 MEMS 压力传感器进行理论分析,推导出硅横膈膜受到的压力与干涉光强的关系式;在以法布里-珀罗腔结构构成的干涉型光纤 MEMS 压力传感器中<sup>[5]</sup>,一般直接认为横膈膜受到外部压力后产生形变,它中心区域的偏移量表征法

布里-珀罗腔深度的变化.目前很少有人涉及证明横膈膜在受到一定压力作用产生形变后仍然符合法布里-珀罗腔的理论模型,即它中心区域的移动在误差允许范围内可近似为平动.本文具体证明了 MEMS 光纤压力传感器中横膈膜受到一定压力作用产生形变后仍然符合法布里-珀罗腔理论模型;推导出 MEMS 结构的光纤压力传感器干涉光强的具体表达式并对 MEMS 结构的光纤压力传感器理论模型进行数值模拟,得到各个重要物理参数与干涉光强的关系曲线,为 MEMS 光纤压力传感器的加工制作打下基础.

## 1 光纤 MEMS 压力传感器的理论模型<sup>[6]</sup>

图 1 是 MEMS 压力传感器的原理图, MEMS 压力传感器是由一个表面被蚀刻了浅薄圆柱形腔体的玻璃和覆盖在腔体上面的硅横膈膜组成,横膈膜受到的压力与形变量在一定范围内成一一对应的关系.通过玻璃光进入 MEMS 压力传感器的法布里-珀罗腔中,并且垂直传播至横膈膜与腔体的界面  $S_1$ ,  $S_1$  面反射了大部分的光,腔体与玻璃的分界面  $S_2$  作为第二反射面,因此组成了法布里-珀罗干涉仪,压力造成薄硅横膈膜产生偏移从而改变两个反射镜之间的间隔,而间隔的变化带来干涉光强的变化,因此通过测量干涉光强的变化得到引起法布里-珀罗腔两镜面间隔变化的压力值.

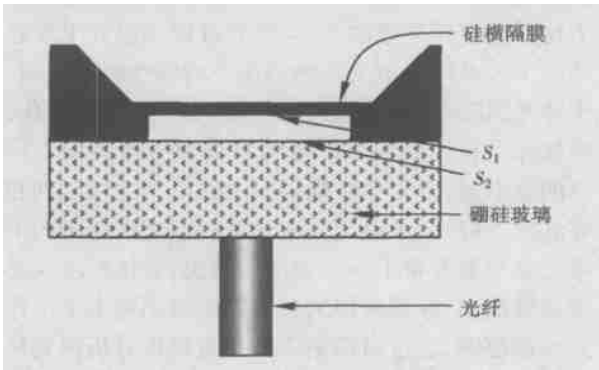


图 1 MEMS 压力传感器的原理图

1.1 硅横隔膜受到的外部压力与其形变量关系式的推导

图 2 是硅横隔膜受到均匀分布的压力后变形的截面图, 假设硅横隔膜受到均匀分布的压力, 横隔膜周边固定, 腔体半径为  $R_0$ , 弹性曲面的微分方程<sup>[7]</sup>为:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}\right) \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial \theta^2}\right) = \frac{P}{D} \tag{1}$$



图 2 硅横隔膜受到均匀分析的压力后变形的截面图

式中,  $\omega$  为硅横隔膜的横向变形量;  $P$  为硅横隔膜所承受的压力;  $r$  为横隔膜上点到膜中心轴的距离;  $D$  为硅横隔膜的抗弯刚度.

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

式中,  $E$  为硅横隔膜的杨氏模量,  $h$  为硅横隔膜的厚度,  $\nu$  为硅横隔膜的泊松比.

通过求解 (1) 式可得硅横隔膜受到的压力与其形变量之间的关系为:

$$\omega = \frac{PR_0^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right)^2$$

将(2)式代入上式得:

$$\omega = \frac{3PR_0^4(1-\nu^2)}{16Eh^3} \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right)^2 \tag{3}$$

1.2 光纤 MEMS 压力传感器的法布里-珀罗腔理论模型

在 MEMS 压力传感器中, 光通过光纤垂直入射到法布里-珀罗腔中, 然后在法布里-珀罗腔中来回反射形成干涉. 要证明横隔膜在受到一定范围内压

力作用产生形变后仍然符合法布里-珀罗腔的理论模型, 那么横隔膜中心区域的移动必须在实验误差范围内可认为是平动, 从而横隔膜中心区域的上下移动就可表征法布里-珀罗腔深度的变化. 硅横隔膜是一个圆形膜片, 取受到压力变形后的经过它中心点的一个横截面作为研究对象 (如图 2 所示). 任何物体在一个平面内运动都可以由平动加转动组成, 如果横截面的每一小的曲线段在一个平面内没有转动或者转动非常小, 那么也就证明每一小的曲线段在这个平面的运动只有平动即横隔膜中心区域的上下移动是平动.

为了得到图 2 中每个小曲线段的斜率的绝对值, 首先将式(3)中的  $\omega$  对距离硅横隔膜中心点的位置  $r$  求导:

$$|\omega'| = \left| \frac{3PR_0^4(1-\nu^2)}{16Eh^3} 2 \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right) \left(-\frac{2r}{R_0^2}\right) \right|$$

式中,  $\omega_0 = \frac{3PR_0^4(1-\nu^2)}{16Eh^3}$  表示硅横隔膜中心处的偏移大小,  $|\omega'|$  指的是图 2 所示横隔膜在截面中的每一点上切线的斜率的绝对值, 表示了截面中横隔膜每一点转动角的大小.

下面再将  $|\omega'|$  对  $r$  求导得:

$$|\omega'|' = \frac{3PR_0^4(1-\nu^2)}{16Eh^3} \frac{4(3r^2 - R_0^2)}{R_0^4} \tag{4}$$

由式(4)可知:

$$\text{当 } r = \pm \frac{R_0}{\sqrt{3}} \text{ 时, } |\omega'| \text{ 取得最大值}$$

$$\max(|\omega'|) = \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{\omega_0}{R_0} \tag{5}$$

从式(5)可知, 硅横隔膜截面上的每个小的曲线段最大转动角为  $\frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{\omega_0}{R_0}$ ,  $\omega_0$  为横隔膜中心处的形变量, 为了保证横隔膜的形变量与光纤传输回来的干涉光强成一一对应关系,  $\omega_0$  必须小于  $\frac{\lambda_0}{4}$ , 其中  $\lambda_0$  为工作光波长, 代入式(4)有:

$$|\omega'| \leq \frac{\lambda_0}{3\sqrt{3}R_0}$$

本光纤 MEMS 压力传感器的工作波长  $\lambda_0$  在 1550 nm 左右, 腔体半径  $R_0$  为 300  $\mu\text{m}$ , 光纤纤径为 50  $\mu\text{m}$ , 因此  $|\omega'|$  在本 MEMS 结构中的取值小于  $10^{-3}$ , 横隔膜中心区域横截面上每一曲线段的转动角小于  $10^{-3}$ , 截面中横隔膜径向偏移量的相对于轴向位移是可以忽略不记的, 即证明了硅横隔膜受到压力时, 光纤所对应横隔膜的中心区域发生的形变可近似为平动, MEMS 结构压力传感器符合法布

里-珀罗腔的理论模型.

1.3 光纤 MEMS 压力传感器干涉光强公式

图 3 表示的是光在法布里-珀罗腔中多光束干涉的理论模型, 在此理论模型的基础上推导出硅横膈膜的形变量与干涉光强的关系式<sup>[8]</sup>, 由于横膈膜受到的压力与它的形变量成一一对应关系, 即推导出硅横膈膜受到的压力与干涉光强的关系.

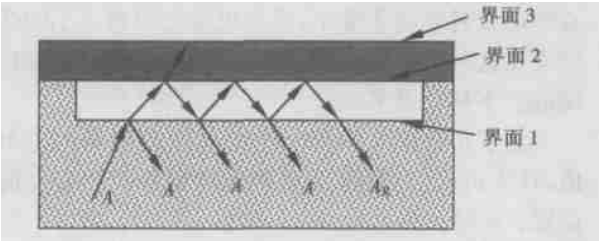


图 3 光纤 MEMS 压力传感器多光束干涉模型

将硅横膈膜看成是一个反射面, 它的反射率记为  $r_{23}$ . 产生折射或反射之前光束从下向上传播的折射率或反射率用“+”表示, 反之如果向下则用“-”表示.

入射光为:  $A_0 = A_0 \exp[j(\omega\tau + \varphi_0)]$   
反射光为:  $AR_1 = A_0 r_{1+} \exp[j(\omega\tau + \varphi_0)]$   
 $AR_2 = A_0 t_{1+} t_{1-} r_{23} \exp[j(\omega\tau + \varphi_0 + \Omega)]$   
 $AR_3 = A_0 t_{1+} t_{1-} r_{1-} r_{23}^2 \exp[j(\omega\tau + \varphi_0 + 2\Omega)]$   
 $AR_4 = A_0 t_{1+} t_{1-} r_{1-}^2 r_{23}^3 \exp[j(\omega\tau + \varphi_0 + 3\Omega)]$

式中,  $\Omega = 2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{air}} L \cos(\theta_1)$ ,  $\Omega$  表示相邻光束的相位差,  $n_{\text{air}}$  指的是空气层的折射率,  $L$  指的是腔体的深度,  $\theta_1$  为光通过第一个界面的折射角.

将所有反射光波相加得:

$$AR = AR_1 + AR_2 + AR_3 + AR_4 + \dots + AR_n =$$
$$\left[ r_{1+} + \frac{t_{1+} t_{1-} r_{23} \exp(j \Omega)}{1 - r_{1-} r_{23} \exp(j \Omega)} \right] \cdot A_0 \exp[j(\omega\tau + \varphi_0)] \tag{6}$$

干涉光强为:

$$I_R = AR \times AR^* = \left| \frac{r_{1+} + r_{23} \exp(j \Omega)}{1 + r_{1+} r_{23} \exp(j \Omega)} \right|^2 I_0 \tag{7}$$
$$r_{23} = \frac{r_{2+} + r_{3+} \exp(j \Omega')}{1 + r_{2+} r_{3+} \exp(j \Omega')} \tag{8}$$

其中,  $\Omega' = 2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{si}} \cos(\theta_2)$ ,  $n_{\text{si}}$  是硅横膈膜的折射率,  $\theta_2$  是光通过第二个界面时的折射角.

2 数值模拟

硅横膈膜厚度、干涉腔体的深度和半径是传感器加工制作中的 3 个主要参数, 3 个参数取值的不同将影响到传感器的性能. 干涉光强主要是由所选的硅横膈膜的厚度决定, 它决定了当给定一定的压

力情况下干涉光强的大小, 而且硅横膈膜和干涉腔体的半径共同决定了传感器压力的线性测量范围. 干涉光强随着腔体深度  $L$  变化而呈周期性变化, 腔体深度首先要大于硅横膈膜受到压力后中心区域的变形量, 以避免硅横膈膜受到压力后接触到腔体底部; 其次为了避免由于光源频谱宽度带来的干涉光强与形变量不一一对应的情况, 腔体厚度又必须尽量的小, 保证腔体的自由频谱范围稍大于工作光光谱范围. 通过对理论模型进行模拟分析得到传感器中各个物理量与干涉光强的关系曲线. MEMS 压力传感器数值模拟中涉及各个物理量取值为: 法布里-珀罗腔体的半径为  $300 \mu\text{m}$ , 硅的折射率为 3.478, 玻璃晶片的参数为 1.473, 空气薄膜的折射率为 1, 为计算方便设入射光光强为  $1 \text{ Ix}$ .

2.1 硅横膈膜受到压力形变后的三维图形

硅横膈膜受到均匀分布的外部压力后产生形变, 横膈膜中心部分的偏移表征了法布里-珀罗腔体深度的变化, 而法布里-珀罗腔体深度在一定范围内变化对应了干涉光强的变化, 因此可通过测量干涉光强得到传感器中硅横膈膜受到的压力大小. 根据式(3), 可模拟得到如图 4 所示的硅横膈膜受到压力时硅横膈膜产生形变后的三维图形.

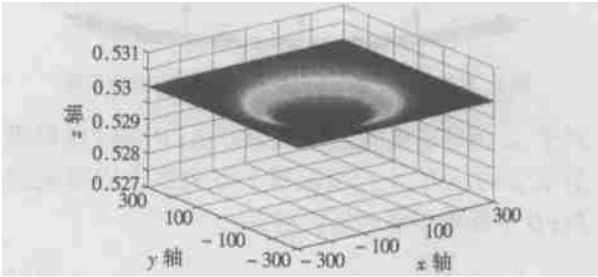


图 4 硅横膈膜受到压力产生形变的三维图形

2.2 横膈膜厚度对受到的外部压力与干涉光强关系的影响

膜片厚度  $h$  是 MEMS 压力传感器设计中的一个非常重要参数. 从式(3)和式(7)中可知膜片厚度首先影响到受到压力后形变量的大小, 其次还影响到膜片对光的反射率  $r_{23}$  的大小. 从(7)式可得传感器受到的外部压力与干涉光强呈周期性变化关系, 只有硅横膈膜受到的压力在一定范围内, 它才与干涉光强表现出较好的线性关系. 图 5 中所示是通过模拟计算所得的在横膈膜膜片厚度不同时, 横膈膜受到的压力与干涉光强的关系曲线. 模拟结果显示, 在 MEMS 压力传感器所要求压力测量范围内, 当硅横膈膜厚度在  $23 \mu\text{m}$  时, 横膈膜对其受到的压力灵敏度呈现较好的线性关系. 此时干涉光强随压

力变化的灵敏度为  $\frac{\Delta I}{\Delta P} = 0.15 \times 10^{-5} \text{ Lx/Pa}$ . 因此可见 MEMS 压力传感器的性能不仅仅由传感器的加工制作的水平决定, 还由传感器信号检测及处理方法的精度和灵敏度决定.

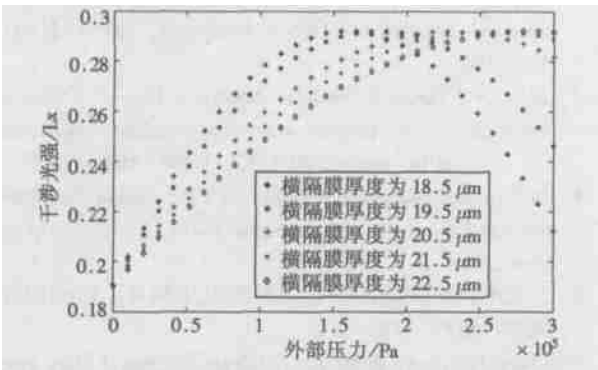


图5 不同膜片厚度对应的硅横隔膜受到的压力与干涉光强的关系曲线

2.3 初始腔体深度对硅横隔膜受到的压力与干涉光强关系的影响

从式(7)可得横隔膜受到压力时发生形变, 而设计时取不同的初始腔体深度将影响到干涉光强与压力的变化关系, 因此法布里-珀罗腔深度设计取值将直接影响到传感器的性能. 腔体的初始深度受3个因素共同决定: 首先腔体的深度必须大于横隔膜的最大偏移量; 其次腔体的深度必须满足工作光光源的自由频谱范围的要求, 本传感器对应的最大腔体深度为  $16.3 \mu\text{m}$ ; 最后为了使得传感器在不受压力时干涉光强处于极大或极小值, 最大限度地扩大压力测量范围. 模拟结果如图6所示, 在传感器所要求的压力测量范围内, 当腔体初始深度在  $2.40 \mu\text{m}$  左右时, 干涉光强与外界压力呈较好的线性关系, 在腔体初始深度为  $2.42 \mu\text{m}$  时线性度最

好, 此时干涉光强对压力的灵敏度为:  $\eta = 0.92 \times 10^{-6} \text{ Lx/Pa}$ , 而且在外部压力为零时, 干涉光强处于线性极小值的位置, 这样可实现压力测量范围最大化.

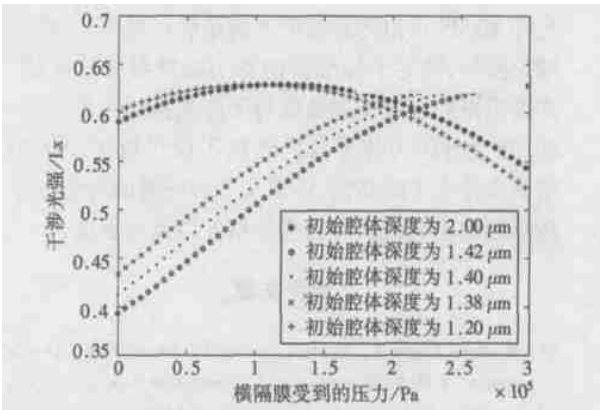


图6 不同的初始腔体深度对应于硅横隔膜受到的压力与干涉光强的关系曲线

2.4 工作波长对硅横隔膜受到的压力与干涉光强关系的影响

从式(6)和式(8)可得, 工作波长既影响到干涉光强的大小, 也影响到横隔膜反射率的大小, 而且一定的压力情况下, 工作波长的不同取值随干涉光强呈周期性变化关系, 传感器接收到干涉光强随波长的灵敏度为:  $\frac{\Delta I}{\Delta \lambda} = \frac{I(1532) - I(1531)}{1532 - 1531} = 0.081 \text{ (Lx/nm)}$ , 因此首先传感器工作光源的频谱宽度必须满足一定的条件, 否则我们无法辨别传感器接受到的干涉光强变化是因横隔膜受到外界压力变形所致还是光源谱线宽度所致. 其次如果采用双波长信号处理法测量压力信号, 则选用的波长的不同将影响到压力的测量精度以及灵敏度. 图7所示是在横隔膜受到一定范围内的压力时, 运用双波长法作为传感器的信号处理方法得到的干涉光强信号与受到的压力关系曲线.

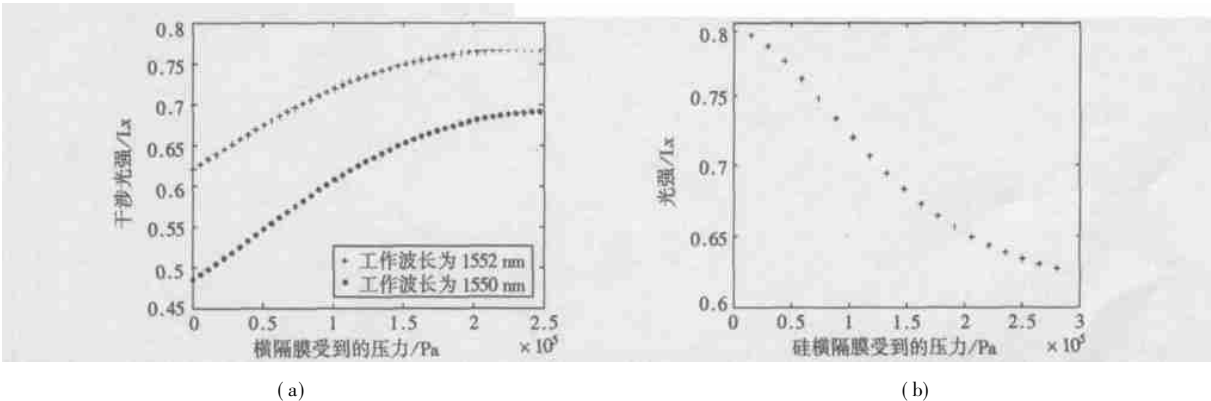


图7 (a)工作波长分别为 1552 nm, 1550 nm 时压力与干涉光强的关系曲线; (b)应用双波长法得到的光强信号与压力的关系曲线

### 3 结论

通过对光纤 MEMS 压力传感器法布里-珀罗腔模型的理论分析和数值模拟, 证明了在工作状态下光纤 MEMS 压力传感器仍然满足法布里-珀罗腔的理论模型, 确定了传感器的各个物理参数的取值, 并模拟得到各个物理参数与干涉光强的关系曲线. MEMS 光纤压力传感器的性能不仅仅取决于传感器头设计水平的高低, 还取决于传感器的封装以及传感器输出光强信号处理的精度以及灵敏度.

#### [参考文献]

[ 1 ] Wolthuis Roger A, Mitchell Gordon L, Soaski Elric. Development of Medical pressure and Temperature Sensors Employing Optical Spectrum Modulation[J]. IEEE Trans on Biomedical Engineering, 1991, 38( 10 ): 974 - 981.  
 [ 2 ] Chen Haixing, Li Haifeng. Interleaver Design Based Characteristics of Fabry-Perot Cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2002,

23( 1 ): 37 - 40.  
 [ 3 ] Zheng Xiaoping, Liao Yanbiao. A Polarization-Modulated Fiber-optic Sensor for Simultaneous Measurement of Two Parameters[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21( 1 ): 93 - 96.  
 [ 4 ] Li Weizhuo, Don C Abeysinghe, Boyd Joseph T. Wavelength multiplexing of microelectromechanical system pressure and temperature sensors using fiber Bragg gratings and arrayed waveguide gratings[J]. Optical Engineering, 2003, 42( 2 ): 431 - 438.  
 [ 5 ] Zhou Jie, Dasgupta Samhita, Kobayashi Hiroshi. Optically interrogated MEMS pressure sensors for propulsion applications[J]. Optical Engineering, 2001, 40( 4 ): 598 - 604.  
 [ 6 ] Bi Weihong. Mathematical Model for Fiber-Optical Non-Symmetrical Fabry-perot Interferometric Cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20( 7 ): 973 - 878.  
 [ 7 ] 江理平, 唐寿高, 王俊民. 工程弹性力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.  
 [ 8 ] Chang Chiachen, Sirkis Jim. Multiplexed Optical Fiber Sensors Using a Single Fabry-Perot Resonator for Phase modulation[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14( 7 ): 1653 - 1663.

## The Design of Optical MEMS Pressure Sensor

LI Ming, WANG Ming, WANG Tingting, NIE Shouping

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

**Abstract:** In this paper, the relation expression between pressure and interference light intensity is illustrated in MEMS pressure sensor, with MEMS pressure sensor explained by adopting Fabry-Perot cavity theory model. Every parameter have been ascertained, which will be dealt with during sensor fabrication through numerical simulation. For example, the radius of cavity is  $300\mu\text{m}$ , the deepness of cavity is  $2.42\mu\text{m}$ , the diaphragm thickness is  $23\mu\text{m}$ . The design presented in the paper has laid the theoretical basis for processing and making MEMS pressure sensor.

**Key words:** MEMS, pressure sensor, numerical simulation, interference light intensity

[ 责任编辑: 刘健]