一种新结构介观压光型微加速度计

彭 鹏[1,3],温廷敦[1,2,3],许丽萍[1]

(1. 中北大学 理学院,山西 太原 030051; 2. 中北大学 微米纳米技术研究中心,山西 太原 030051;
3. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室,山西 太原 030051)

摘 要:对镜像异质三周期光子晶体的研究理论表明,在实际应用范围内,透射率与光子晶体所受的轴向应力呈简单的线性关系。据此,设计一种能实现微梁直拉直压的加速度计,微梁很小很敏感,处于轴向直拉直压位置时,能极大提高结构的灵敏度和自由振动频率。以镜像异质三光子晶体替代以往的压敏电阻,只需检测其透射率,即可得出加速度大小。最后结果表明:当透射光强改变 1‰时,该结构可以感知小于 0.4 mgn 的加速度的变化,测量量程可达 3.2 gn。

关键词:光子晶体; 透射率; 加速度计; 直拉直压; 灵敏度

中图分类号:V241.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2014)10-3363-05

A new structure accelerometer based on Meso-Piezoptic

Peng Peng[1,3], Wen Tingdun[1,2,3], Xu Liping[1]

(1. Department of Physics, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. The Center of Micro/Nano Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Theoretical study about mirror shows, in application range, transmissivity has a simple linear relationship with the axial stress to photonic crystal. Accordingly, a new structure accelerometer with axially deformed tiny beams was designed. Tiny beams are sensitive, so the sensitivity and frequency of free vibration of the structure will be increased significantly when tiny beams were in axial position. Using mirror triply periodic photonic crystal replace the original pressure sensitive resistor as the sensing element. Detecting the transmissivity of the photonic crystal, the magnitude of the acceleration can be calculated. It is shown that this structure can measure less than 0.4 mgn when the transmissivity intensity changes one out of 1‰ and its measuring range is up to 3.2 gn.

Key words: photonic crystal; transmissivity; accelerometer; axially deformed; sensitivity

收稿日期:2014-02-05; **修订日期**:2014-03-03

基金项目:国家自然科学基金(60776062,50730009);国家自然科学基金仪器专项基金(61127015)

作者简介:彭鹏(1988-),男,硕士生,主要从事介观光子晶体传感器的研究设计方面的研究。Email:pengzhw@sina.com

导师简介:温廷敦(1957-),男,教授,博士生导师,主要从事微纳米功能材料及应用方面的研究。Email:tdwen@nuc.edu.cn

0 引 言

作为一种惯性器件,加速度计在车辆、自控、振动测试和航空航天等领域有着十分广泛的应用,目前已开发了压电式、压阻式、隧道式、电容式多种类型的硅微加速度计[1]。加速度计的结构设计总体上都是向着提高灵敏度以及提高带宽的方向发展[2]。J.T. Suminto 提出了一种微机械压阻式加速度传感器,并且成功地实现了商业化。

文中采用的是一种能实现微梁的直拉直压的加速度传感器。传感器横向工作时,微梁处于轴向直拉直压变形,能极大的提高灵敏度和自由振动频率。传感器的检测方式为介观压光式检测。光子晶体[3-4]是一种介电常数呈现周期性变化、具有一定光子能带结构的人工晶体,当光子晶体受轴向应力的作用时,不仅每层材料的厚度会发生改变,晶体材料折射率也会随形变发生相应的变化[5-6],通过检测出透射光强,来得到万分之一的透射光强改变量条件下的加速度测量。近年有学者对光量子阱进行研究,并根据介观压阻效应的思想,提出光子晶体的介观压光效应[7],进一步提出光子晶体在传感器应用上的可行性。文中在前人的基础上,将光子晶体应用在一种可实现直拉直压的加速度上,进一步提高了加速度计的灵敏度,并对小量程超敏感的加速度计的设计具有一定的参考意义。

1 加速度计的工作原理及设计

加速度计的结构如图 1 所示。主要由 1 个边框、1 个主支撑梁、2 根微梁和一个可动质量块组成。当器件受到加速度质量块偏转时,两根微梁会一根压缩,一根拉伸[8]。

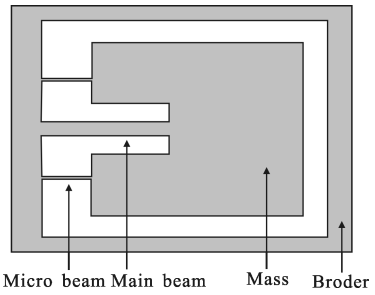


图 1 加速度的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of acceleration

用于检测加速度的光子晶体在微梁上,为了获得高灵敏度,微梁很细,十分敏感,质量块很小的挠度都能在微梁上产生很大的应力,输出很大的信号。微梁的位置经过优化,以获得更大的灵敏度,优化的方法可以用直拉直压原理来解释[9]。

如图 2 所示,当质量块受到来自 Y 方向的加速度时,微梁与质量腿相交处 a 点的位移是支撑梁末端 b 在 Y 方向平移位移和由末端旋转角度带来的位移之和,而旋转位移又可以分解为 X,Y 两个方向的平移位移。合理选择微梁的位置,a 点在 Y 方向的位移可以被抵消。这样,a 点在 Y 方向的运动为零,微梁只有沿轴向的变形。微梁受到的应力是分布均匀的轴向应力,这就是微梁的直拉直压原理。

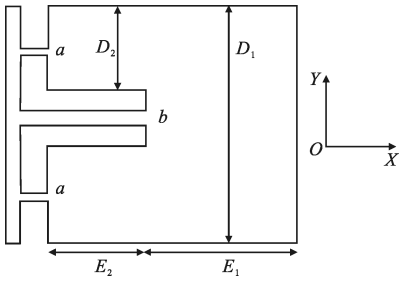


图 2 微梁直拉直压示意图

Fig.2 Schematic diagram of axially deformed tiny beams

由于绝大部分应力都均匀分布在两只微梁中,应力都能贡献给介观压光检测,所以该设计结构比传统的悬臂梁-质量块加速度传感器具有更高的灵敏度,同时,由于微梁只存在轴向变形,整体结构被微梁强化,从而具有更高的自由振动频率。

如图 2 所示,设支撑梁的长、宽、高分别为 L、W、T,微梁的长、宽、高分别为 l、b、h,质量块和质量腿的长、宽分别为 E_1、D_1 和 E_2、D_2,C 为最后给出的微梁直拉直压位置。

考虑结构的静态模型,支撑梁的弯矩方程为:

$$EIy_s''(X)=M+P(L-X)+\frac{1}{2}U(L-X)^2 \tag{1}$$

式中:E 为杨氏模量;M 和 P 分别外加加速度作用在质量块上时支撑梁末端的弯矩载荷和力载荷;U 是由于支撑梁自身质量引起的均布载荷。

使用归一化参数 $x=X/L$,$w=W/L$,$e_1=E_1/L$,$d_1=D_1/L$,$e_2=E_2/L$,$d_2=D_2/L$。

支撑梁 Y 方向的惯性矩 I 和公式(1)的边界条件

分别为：

$$I=\frac{W^3T}{12}=\frac{w^3T}{12}L^3=iL^3 \tag{2}$$

$$y_s(0)=y_s'(0)=0 \tag{3}$$

对于惯性力载荷 P 和均布载荷 U，得到：

$$P=a\rho TL^2(e_1d_1+2e_2d_2)=a\rho TL^2p \tag{4}$$

$$U=a\rho TW=a\rho TwL \tag{5}$$

式中：a 和 ρ 分别为外加加速度和材料密度。

对于弯矩载荷 M，是由质量块带来的弯矩 M_1 和微梁施加的弯矩 M_2 组成。其中：

$$M_1=a\rho TL^3\left(\frac{1}{2}e_1^2d_1-e_2^2d_2\right)=a\rho TL^3m_1 \tag{6}$$

定义 θ 和 δ 分别表示支撑梁末端的旋转角度和在 Y 方向的位移，并取 C 为最后确定的微梁直拉直压位置，F 为微梁在此位置受到的轴向应力，可以得到：

$$F=k\cdot\Delta l=\frac{Ebh}{l}\cdot C\theta \tag{7}$$

式中：k 为微梁的弹簧系数。于是：

$$M_2=-2F\cdot C=-2kC^2\theta \tag{8}$$

经过归一化，公式(1)可以改写成：

$$y_s''(x)=\frac{a\rho TL^2}{Ei}\left[m_1+p(1-x)+\frac{1}{2}w(1-x)^2\right]-\frac{2kC^2\theta L}{Ei} \tag{9}$$

积分之后，并根据 θ 和 δ 的定义，得到：

$$\theta=\frac{1}{L}y_s'|_{x=1}=\frac{a\rho T\frac{L}{Ei}\left(m_1+\frac{1}{2}p+\frac{1}{6}w\right)}{1+\frac{2k}{EiL^2}C^2} \tag{10}$$

$$\delta=y_s|_{x=1}=a\rho T\frac{L^2}{Ei}\left(\frac{1}{2}m_1+\frac{1}{3}p+\frac{1}{8}w\right)-\frac{kC^2\theta}{EiL} \tag{11}$$

又因为满足微梁直拉直压的条件为：

$$\delta=e_2\theta \tag{12}$$

由公式(10)~(12)可以得到：

$$\theta=a\cdot\frac{\rho}{E}\cdot\frac{L}{w^3}\cdot\frac{2p+w}{2e_2-1} \tag{13}$$

$$C=\frac{\sqrt{6}}{12}\cdot\sqrt{\frac{1}{bh}}\cdot L\sqrt{w^3T}\cdot\sqrt{\frac{(12m_1+6p+2w)(2e_2-1)}{2p+w}-1} \tag{14}$$

可见 C 的位置与外加加速度无关，而是由结构决定，由上两式求得微梁受应力 σ 的大小，因微梁直拉直压，故

$$\sigma=\frac{F}{bh}=E\frac{\Delta l}{l}=\frac{E\theta C}{l} \tag{15}$$

对应的微梁上产生的应变量为：

$$\varepsilon=\frac{\sigma}{E}=\frac{\theta C}{l}=a\cdot\frac{\rho}{E}\cdot\frac{L}{w^3l}\cdot\frac{2p+w}{2e_2-1}\cdot C \tag{16}$$

2 加速度计的设计实例

在该设计中选用 GaAs 材料，其杨氏模量 E=85.5 GPa，泊松比为 0.31，密度为 5.32 g/cm^3。

考虑到质量腿的刚性假设，取 $0.2\leqslant d_2\leqslant 0.6$，$0.65\leqslant e_2\leqslant 0.95$，考虑器件大小等因素，取 $0.6\leqslant e_1\leqslant 2.5$，根据加工能力，微量尺寸 b=3 μm，h=2 μm 和 l=50 μm 是可以实现的。综合考虑灵敏度、固有频率、阻尼等因素，最后选取的优值为 e_1=1.3，d_1=1.3，e_2=0.95，d_2=0.2，w=0.03，T=500 μm，L=2 000 μm，将设计值带入，可以求得 C=276.06 μm。

对如上设计的加速度计进行有限元模拟，寻找满足微梁直拉直压的微梁位置。如图 3 所示，只考察压缩微梁的变形情况。事实上，当一只微梁直压时，另一只微梁一定直拉。

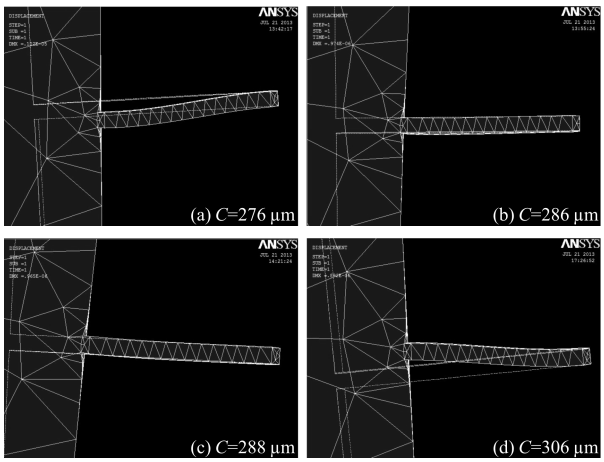
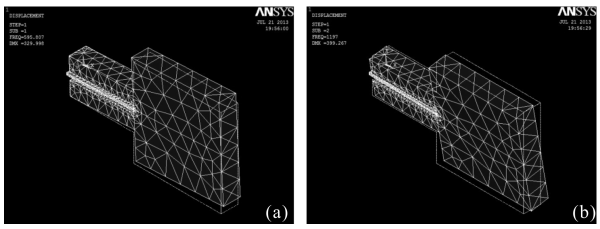


图 3 有限元仿真模型

Fig.3 Finite element simulation mode

由上图可以看到当 C=276 μm 时，微梁并不能实现直压，当 C=288 μm 时，微梁能实现比较好的直压变形。因此，对力学模型给出的微梁位置，必须经过有限元的修正。

采用有限元模拟修正的微梁位置，对结构的动态特性进行分析，给出以下的四个模态，并得到其固有频率，如图 4 所示。



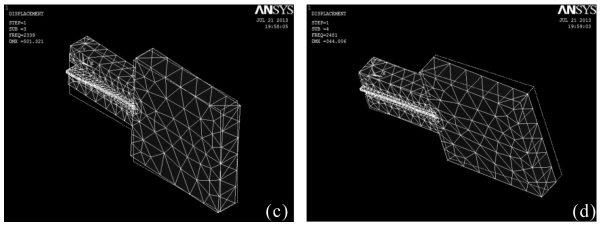


图 4 各阶模态阵型图

Fig.4 Each order models shape diagram

3 镜像异质三周期光子晶体的光学特性

镜像异质三周期光子晶体结构如图 5 所示，A、B、C 三薄层的基本介质组成分别为 TiO_2 和 SiO_2（折射率分别为 n_1=2.29 和 n_2=1.45），将其看作一个整体，以 N 个周期镜像对称的方式交替排列生长。

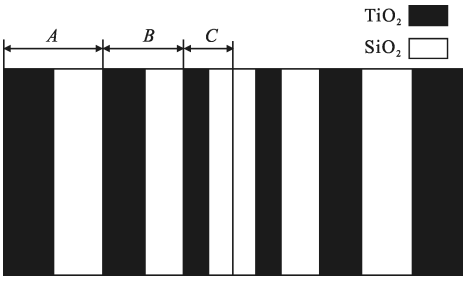


图 5 镜像异质三周期结构光子晶体示意图

Fig.5 Schematic diagram of mirror triply periodic photonic crystal heterostructures

忽略材料的光学厚度和色散影响，光子晶体每层的光程为 1/6 波长，即得到如下关系：

$$n_1d_{a1}=n_2d_{a2}=\lambda_1/6 \tag{17}$$

$$n_1d_{b1}=n_2d_{b2}=\lambda_2/6 \tag{18}$$

$$n_1d_{c1}=n_2d_{c2}=\lambda_3/6 \tag{19}$$

式中：λ_1、λ_2、λ_3 为禁带中心波长。

取值 λ_1、λ_2、λ_3 分别为 1 000 nm、800 nm、600 nm，ABC 循环周期 N=10。当平面波垂直入射，忽略偏振影响，根据传输矩阵法研究光量子阱的透射谱线，求出光子晶体在各波段下的透射率，图 6 所示为 Matlab 仿真得到的透射谱线。

从图中可以看出，镜像异质三周期光子晶体在 1 440~1 900 nm 的波长范围内形成一个明显的波段为 1 490~1 750 nm 的光子禁带。同时还可以发现，该光子禁带中出现了一个缺陷态，即上图中的以 1 655 nm 为中心，波段范围为 1 630~1 680 nm 的透射峰。

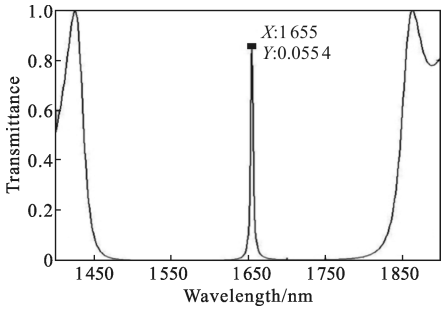


图 6 光子晶体局域态透射峰

Fig.6 Transmission peak localized states of mirror triply periodic photonic crystal heterostructures

对该结构为$(ABC)^N$ $(CBA)^N$ 的光子晶体施加均匀轴向应力，光子晶体受轴向力作用发生弹性应变，不仅每层材料的厚度会发生变化，其折射率也会发生相应变化，即产生晶体的弹光效应。晶体学中，应变和弹光系数都是张量表示，计算起来十分复杂。研究中为简化计算，将晶体的拉伸应变近似看成线性，引入线性等效应变和有效弹光系数。图 7 所示为有效弹光系数 Pe 取不同值时，缺陷态透射峰随应变的变化关系。由图可以看出，透射峰的透射率随应变增加而减小，即在弹光效应基础上引入应变量分析透射谱线的变化，可以得到一种新效应。将这种介观纳米数量级的光子晶体，其缺陷态透射峰随应变而变化的力光耦合现象称为介观压光效应。

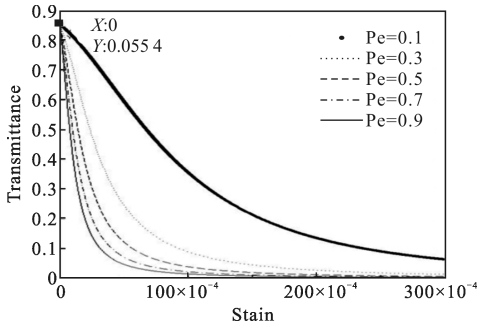


图 7 不同有效弹光系数 Pe 下的 1 655 nm 透射峰的透射谱线

Fig.7 Transmisson line of 1 655 nm transmission peak under different effective elastic coefficient Pe

作者引入介观压光系数 来衡量介观压光效应的强弱。其含义是描述局域态透射峰的透射率随应变发生变化的剧烈程度，图 8 所示为 Pe=0.5 时透射峰的透射谱线，截取应变至 30‰的部分，并以线性拟合的方式求出透射率与应变的关系。由介观压光

系数 的概念知其即为拟合直线的斜率，由此可得：

$$\tau=\rho_0\varepsilon+b_0 \tag{20}$$

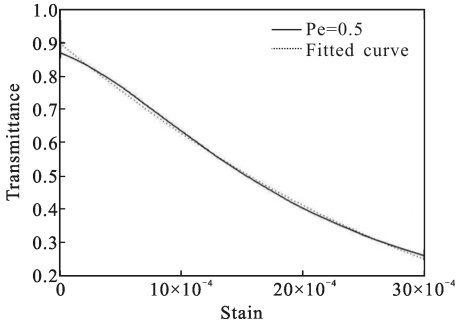


图 8 Pe=0.5 时，透射谱线的线性拟合

Fig.8 Pe=0.5, transmittance spectrum of linear fit

4 加速度计的理论分析计算

将镜像异质三周期光子晶体置于微梁根部应力检测最敏感处，忽略微梁的宽度和高度上的应变量。利用公式(16)、(20)，并结合求得的 C 的位置，整理得出加速度与透射率的关系式：

$$a=\frac{(\tau-b_0)}{\rho_0}\frac{Ew^3l(2e_2-1)}{\rho L(2p+w)C} \tag{21}$$

图 8 中，Pe=0.5，求出拟合直线的斜率与截距，得到 $\rho_0=-216$ 和 $b_0=0.855\,4$。

当光强分析仪检测得到透射光强发生 1‰的变化时，此时透射率 $\tau=0.855\,3$，由公式(21)得到产生的加速度为：

$$a_{\min}=\frac{(\tau-b_0)}{\rho_0}\frac{Ew^3l(2e_2-1)}{\rho L(2p+w)C}=0.003\,7\ \mathrm{m/s^2} \tag{22}$$

即加速度计的分辨率可达 0.37 mgn，小于 0.4 mgn。

当透射率 $\tau=0$，得到理论上加速度的最大值，即加速度计的量程为：

$$a_{\max}=\frac{(\tau-b_0)}{\rho_0}\frac{Ew^3l(2e_2-1)}{\rho L(2p+w)C}=32.2\ \mathrm{m/s^2}\approx 3.2\ \mathrm{gn} \tag{23}$$

5 结　论

利用直拉直压原理设计出的加速度计，因检测微梁几乎不发生弯曲，可以感应很微小的应力变化，能显著的提高加速度计的灵敏度和振动频率。而对镜像异质三周期一维光子晶体施加轴向应力，其缺陷态透射峰的透射率随应变增加而急剧减小，对相关曲线进行一定范围内的线性拟合可以得到透射率随应变变化的关系式。因此，将光子晶体作为检测部分的压敏元件，便可以实现力学信号到光信号的转换，求出透射率的变化即实现对外加加速度的测量。计算得出，该结构可以感知透射光强发生 1‰改变时的 0.4 mgn 的加速度测量，最大测量量程可达 3.2 gn。这种结构的设计特性，可以为高精度小量程加速度计的设计研究提供可行性思路。

参考文献：

[1] Wu Rui, Wen Tingdun. Silicon micro-accelerometers based on meso-piezoresistance[J]. ***Chin J Sensors Actuators***, 2007, 20(8): 1771-1774. (in Chinese)

[2] Shen Yu, Wang Jianzhong, Luo Junyan, et al. Theory and simulation of accelerometer based on laser trapping [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2010, 39(3): 543-548. (in Chinese)

[3] Tang Jun, Yang Huajun, Xu Quan. Analysis of the transfer characteristics of one-dimensional photonic crystal and its application with transfer matrix method [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2010, 39(1): 76-80. (in Chinese)

[4] Ni Peigen. Progress in the fabrication and application of photonic crystals [J]. ***Acta Physica Sinica***, 2010, 59 (1): 340-350. (in Chinese)

[5] Tian Yi, Li Qi, Zhang Li. One-dimensional photonic crystal infrared space light modulator imagination [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(9): 2333-2338. (in Chinese)

[6] Yang Yang, Xu Liping, Wen Tingdun. The effect of uniaxial stress on optical transmission properties of one-dimensional photonic crystals with a mirror symmetry [J]. ***Integrated Ferroelectrics***, 2012, 136(1): 105 -109.

[7] Liu Qineng, Liu Qin. Dispersion characteristics of total reflection tunnel in 1D photonic crystal [J]. ***Acta Photonica Sinica***, 2013, 42(5): 611-614. (in Chinese)

[8] Chen Xuemeng. Research of piezoresistive micromachined gyroscope [D]. Shanghai: Institute of Microsystem and Information Technology, 2005. (in Chinese)

[9] Huang Shusen. A micromachined piezoresistive accelerometer with axially deformed tiny beams [D]. Shanghai: Institute of Microsystem and Information Technology, 2003. (in Chinese)