

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.01.003

# 基于光子晶体微腔和光纤环形衰荡的微力传感器

钱晓龙, 张亚男

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 提出一种基于光子晶体微腔的高灵敏度的微力测量方法. 首先, 提出一种 M 型结构的梁作为传感探头, 使系统在受到微力作用时, 仅有光子晶体微腔的空气孔折射率发生变化而引起谐振波长的漂移, 极大地提高了传感器的线性度和测量范围. 然后, 对微纳环结构的光子晶体微腔结构进行优化设计, 获得了品质因子高达 7 100 的微腔. 最后, 选择合适的实验器件及其特性参数, 搭建基于光纤环形衰荡的波长解调系统, 实验结果表明该系统的波长解调灵敏度为 90  $\mu\text{s}/\text{nm}$ , 所设计的微力测量系统的灵敏度可达 194.616  $\mu\text{s}/\mu\text{N}$ .

**关 键 词:** 光子晶体微腔; M 型梁; 微力传感器; 光纤环形衰荡; 品质因子

**中图分类号:** TP 212.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2018)01-0011-04

## Micro-force Sensor Based on Photonic Crystal Micro-cavity and Fiber Loop Ring-Down

QIAN Xiao-long, ZHANG Ya-nan

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Ya-nan, E-mail: zhangyanan@ise.neu.edu.cn)

**Abstract:** A high-sensitive micro-force measurement method based on photonic crystal micro-cavity was proposed. Firstly, an M-typed beam was proposed as the sensing head, thus the resonance wavelength drift of the micro-cavity will only be affected by holes refractive index of photonic crystal micro-cavity when force was applied on this system, which could greatly improve the linearity and measurement range of sensor. Then, the structure of photonic crystal micro-cavity with micro-ring structure was optimized, and the quality factor of 7 100 was obtained. Finally, the wavelength demodulation system based on fiber loop ring-down was built, with proper selection and design of experimental apparatuses, and the wavelength demodulation sensitivity could reach to 90  $\mu\text{s}/\text{nm}$ . Therefore, it was demonstrated that the measurement sensitivity of 194.616  $\mu\text{s}/\mu\text{N}$  could be obtained by using our proposed micro-force measurement system.

**Key words:** photonic crystal micro-cavity; M-typed beam; micro-force sensor; fiber loop ring-down; quality factor

近几年,随着微机电技术的迅速发展,微尺度环境下的微力测量逐渐成为微纳技术领域的前沿课题<sup>[1]</sup>,而研发微型化、高灵敏度的微力传感器是众多科研工作者追求的目标<sup>[2]</sup>.

光子晶体所具有的独特的光子带隙特性使人类操纵和控制光的传输成为可能<sup>[3]</sup>.通过在光子晶体中引入一个点缺陷,便可以形成光子晶体微腔<sup>[4]</sup>.相比于传统的光学微腔,光子晶体微腔具有更高的品质因子和更小的模式体积,表现出较强的光局域特性<sup>[5]</sup>.其输出光谱通常具有一个或多个谐振峰,当外界环境参数变化引起微腔结构发生微小变化后,微腔输出光谱会发生移动,通过测量谐振峰所对应的光波长移动量即可推测出外界参数的变化量<sup>[3]</sup>.基于此特性,通过将光子晶体微腔粘贴在悬臂梁上,当悬臂梁的自由端受到微力作用时,会带动光子晶体微腔的结构参数(孔形状、孔大小、腔长度)发生变化,进而使得光子晶体微腔的谐振波长发生变化<sup>[6-8]</sup>.因此,通过

监测光子晶体微腔谐振波长的偏移量即可反推出所施加微力的大小. 但是, 光子晶体微腔几何结构参数的变化会导致光子晶体微腔谐振光谱发生畸变, 进而影响微力测量的线性度和范围<sup>[9]</sup>.

本文提出一种 M 型结构的传感探头, 使系统在受到微力作用时, 仅有光子晶体微腔的空气孔折射率发生变化而引起谐振波长的漂移, 极大地提高了微力测量范围. 此外, 为了实现高精度、低成本的谐振波长偏移量监测, 提出一种基于光纤衰荡技术的波长解调方法.

## 1 传感系统设计与理论建模

本文所设计的微力测量系统示意图如图 1 所示. 其工作过程为: 激光器发出的光经过一个电光调制器后, 会被信号发生器发出的电脉冲信号调制成为一定频率的光脉冲信号, 该脉冲信号经耦合器 1 的一个输入端进入光纤环形衰荡腔. 首先通过光子晶体微腔发生一定的衰减, 然后进入耦合器 2 的输入端并被分为两束, 其中一束光直接被光电探测器检测并在示波器上显示, 另一束光经光纤延迟线延时后接入耦合器 1 的另一个输入端, 继续在光纤环形衰荡腔中传输. 光信号如此往复在环内循环, 每循环一次都有部分光被检测并显示在示波器, 最终在示波器上将显示出一系列呈指数衰减的脉冲信号.

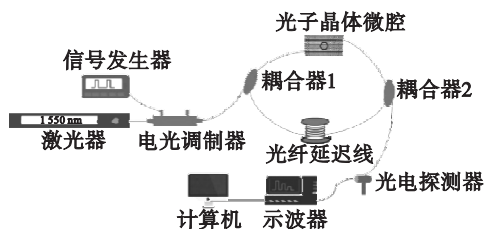


图 1 微力测量系统结构

Fig. 1 Structure schematic of micro-force measurement system

光子晶体微腔微力传感探头结构如图 2 所示, 在光子晶体微腔缺陷孔上方悬挂一个 M 型结构的梁, 当在梁上方施加一定应力时, 会使悬挂的硅柱产生向下的位移, 部分硅柱将进入光子晶体微腔的缺陷孔内, 使得微腔的有效折射率发生变化, 进而使得微腔的谐振波长发生偏移, 谐振波长对微力的灵敏度为  $S_F$ . 从透射率的角度来看, 对于某一固定的工作频率, 微腔的透射率  $T$  将会随微力  $F$  的变化而变化, 且有如下关系:

$$\Delta T(\Delta F) = T(F + \Delta F) - T(F) = T(\omega_0 + \Delta\omega, \omega_1) - T(\omega_0, \omega_1), \quad (1)$$

对  $T(\omega_0 + \Delta\omega, \omega_1)$  进行泰勒展开可得

$$\Delta T(\Delta F) = T'(\omega_0, \omega_1) \cdot \Delta\omega + \frac{T''(\omega_0, \omega_1)}{2} \cdot \Delta\omega^2 + o(\Delta\omega). \quad (2)$$

$$\text{其中, } T'(\omega_0, \omega_1) = \frac{-2(\omega_0/2Q)^2(\omega_0 - \omega_1)}{((\omega_0 - \omega_1)^2 + (\omega_0/2Q)^2)^2},$$

$$T''(\omega_0, \omega_1) = \frac{6(\omega_0/2Q)^2(\omega_0 - \omega_1) - 2(\omega_0/2Q)^4}{((\omega_0 - \omega_1)^2 + (\omega_0/2Q)^2)^3}.$$

式中:  $\omega$  为光工作频率;  $Q$  为光子晶体微腔的品质因子. 在实际系统中, 通过选择合适的工作频率, 使传感器工作在近线性区域, 则可认为  $T'(\omega_0, \omega_1) \approx 0$  (或  $\omega_1 \approx (1 + 1/2\sqrt{3}Q)\omega_0$ ), 这样,  $\Delta T(\Delta F)$  可以表示为一个随应力  $\Delta F$  的变化而近似线性变化的函数:

$$\Delta T(\Delta F) = \frac{3\sqrt{3}Q}{4\omega_0} \cdot \Delta\omega = \frac{3\sqrt{3}Q \cdot S_F}{4\lambda} \cdot \Delta F. \quad (3)$$

由式(3)可知, 光子晶体微腔在某一固定频率处的透射率会随所施加微力的变化而近似线性变化. 因此, 可以根据衰荡时间推断出微力的大小.

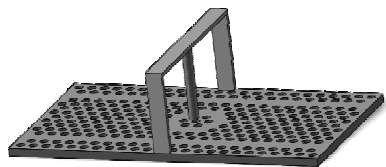


图 2 微力传感探头结构示意图

Fig. 2 Probe structure of micro-force sensor

在光纤环形腔衰荡检测技术中, 衰荡信号的衰荡时间  $\tau$  与光在光纤环中的传输损耗  $\alpha$  之间具有如下关系:

$$\tau = -\frac{4 \cdot 34 t_r}{\alpha} = -\frac{4 \cdot 34 n_{\text{eff}} s / c}{A + B}. \quad (4)$$

其中:  $t_r = n_{\text{eff}} s / c$  为光脉冲在光纤环中传播一圈所需要的时间;  $s$  是光纤环长;  $c$  是光在真空中的速度;  $n_{\text{eff}}$  是光纤有效折射率;  $\alpha = A + B$  是光在光纤环中传播一圈的全部传输损耗, 单位 dB, 其中  $A$  是光纤环本身损耗, 对于固定系统,  $A$  是固定的;  $B$  是由于光子晶体微腔透射谱的移动引起的传输损耗, 且有  $B = -10 \lg T$ , 其值大小与施加微力的大小有关. 对于本文所设计的基于光子晶体微腔的微力传感系统, 光在光纤环中的传输损耗只会与外界微力的大小有关, 因此可得整个系统微力测量的灵敏度为

$$S = \frac{\Delta\tau}{\Delta F} = \frac{\Delta\tau}{\Delta\alpha} \cdot \frac{\Delta\alpha}{\Delta T} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta F} = \frac{-56.376 \cdot 6 t_r}{\lambda T \alpha^2} \cdot Q S_F. \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 系统的测量灵敏度与微腔的品质因子  $Q$  以及谐振波长对微力的灵敏度  $S_F$  呈正比例关系.

## 2 仿真分析

首先,采用 Comsol 软件分析 M 型梁中硅柱的深入长度与微力之间的关系。材料选择硅,其弹性模量为 131 GPa,泊松比为 0.27。如图 3 所示,设置 M 型梁的长、宽、高分别为 40,4,20  $\mu\text{m}$ ,硅柱粘贴在梁中间的支撑平板下方,且其直径与光子晶体的空气孔直径相等(220 nm)。在微纳机电系统中,对于微力测量的量程要求通常为 0 ~ 1  $\mu\text{N}$ ,因此本文从 0.1  $\mu\text{N}$  开始,以 0.1  $\mu\text{N}$  步进,在硅柱上方的平板中央施加微力,直到 1  $\mu\text{N}$  为止。

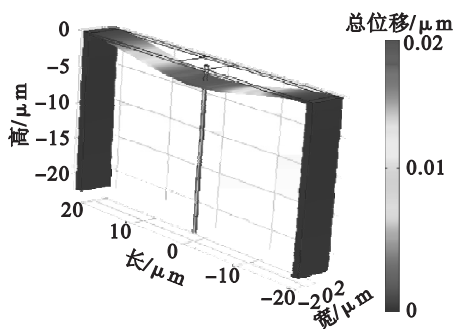


图 3 M 型梁受力模型图

Fig. 3 Force model diagram of M-typed beam

从 M 型梁的受力模型中可以看出,当受到微力作用时,梁中间的支撑平板会发生向下的变形,使得与其相连的硅柱向下进入光子晶体的空气孔中。微力大小与硅柱下移量之间的关系主要是由支撑平板的厚度所决定的。如图 4 所示,当支撑平板的厚度不同时,硅柱的下移量与微力之间均呈线性关系,而且厚度越薄,灵敏度越高。但是,当硅柱的下移量等于光子晶体微腔的厚度之后,再增加微力也不会改变空气孔的折射率。因此,最理想的情况是在最大微力时(1  $\mu\text{N}$ ),硅柱的下移量正好等于或者略小于光子晶体微腔的厚度(一般为 220 nm)。再综合考虑光子晶体微腔的加工精度,设计支撑平板的厚度为 310 nm,此厚度下硅柱位移与微力之间的关系如图 5 所示,此时,硅柱下移量随微力的变化灵敏度为  $S_1 = 204 \text{ nm}/\mu\text{N}$ 。

接下来,利用 FDTD 方法分析硅柱进入光子晶体微腔空气孔后,光子晶体微腔谐振特性的变化特性,在仿真计算中,定义空气孔半径为  $r$ ,晶格常数为  $a$ ,且  $r = 0.30a$ 。为了使光子晶体微腔的谐振波长工作在 1 500 nm 附近,设置  $a = 400 \text{ nm}$ 。图 6 所示为拟设计的微纳环结构光子晶体微腔结构示意图,光进入光子晶体微腔后,经下波导传输至中间的六边形微腔下端,由于谐振作用,特定波

长的光信号会被耦合进六边形微腔中,并在其中发生循环振荡,最终从上波导泄露出去,并可在出射端探测到一个谐振光谱。

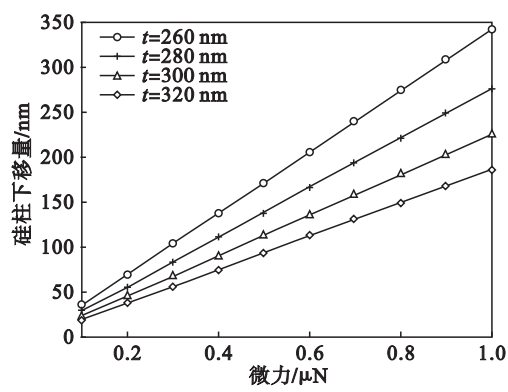


图 4 不同厚度平板的受力分析

Fig. 4 Force analyses of slabs with different thicknesses

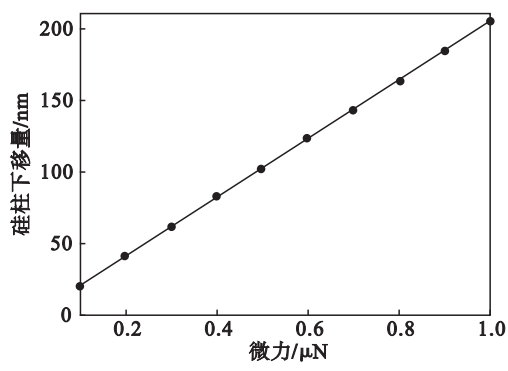


图 5 平板厚度为 310 nm 时位移随力的变化

Fig. 5 Displacement variation with force change for slab thickness of 310 nm

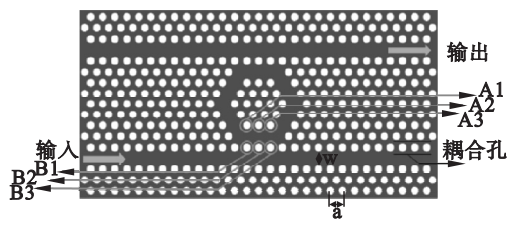


图 6 微纳环结构光子晶体微腔结构图

Fig. 6 Basic structure of photonic crystal micro-cavity with micro-ring structure

由于光首先是由下波导耦合进入谐振腔的,那么对谐振波长影响较为明显的将是  $A_2, B_1, B_2$  三个空气孔作为硅柱插入孔。图 7 所示为硅柱深入深度与空气孔总深度的比值从 0.1 到 0.5 时,光子晶体微腔谐振波长的变化曲线,其中  $B_2$  空气孔具有较好的灵敏度。本文将选取  $B_2$  空气孔作为传感孔,其谐振波长漂移量对硅柱深入长度的灵敏度为  $S_2 = 0.0106 \text{ nm}/\text{nm}$ 。

## 3 波长解调实验与结果分析

根据前面的系统设计,最终搭建的基于光纤

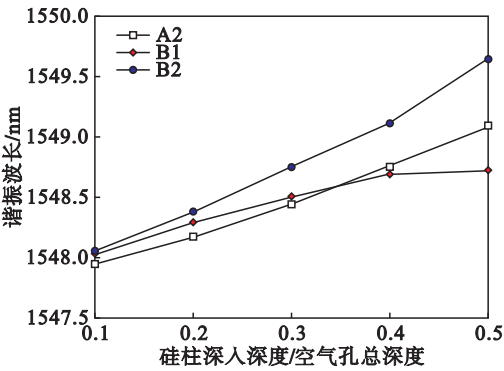


图 7 不同硅柱插入孔对应的谐振波长漂移灵敏度

Fig. 7 Shift sensitivity of resonant wavelength corresponding to different insert holes of silicon-pillar

环形衰荡技术的波长解调系统如图 8 所示。

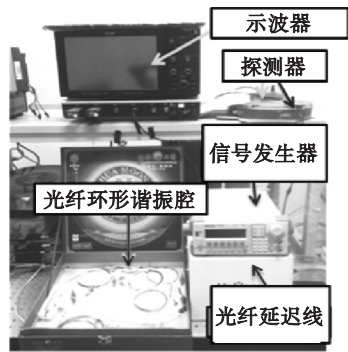


图 8 波长解调系统实物图

Fig. 8 Real object of wavelength demodulation system

激光光源波长定为 1 548.5 nm, 光纤延迟线长度为3 000 m, 两个耦合器的分光比均为 10: 90, 信号发生器的脉冲宽度为 4.5  $\mu$ s, 频率为6.65 kHz. 当光子晶体微腔的输出谐振波长以 0.02 nm 为步长, 由 1 548.60 nm 移动到 1 548.72 nm 时, 可以从示波器上读出一系列衰减脉冲. 定义脉冲光强降为原来的 1/e 时所对应的时间为衰荡时间  $\tau$ , 则可得衰荡时间  $\tau$  与微腔谐振波长  $\lambda$  之间的关系曲线如图 9 所示, 解调灵敏度为  $S_3 = \Delta\tau/\Delta\lambda = 90 \mu\text{s}/\text{nm}$ , 展现出了较高的解调灵敏度. 此外,

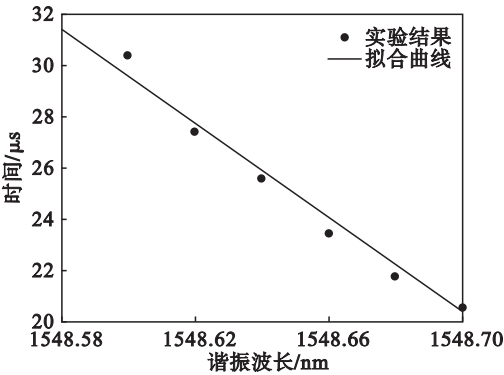


图 9 衰荡时间与谐振波长之间的关系曲线

Fig. 9 Relationship of ring-down time and resonant wavelength

由于系统最终的输出与光源强度无关, 所以测量结果不受光源强度扰动的影响, 可极大地提高系统的测量精度.

综合以上的分析结果可知, 整个微力测量系统的灵敏度为  $S = S_1 \times S_2 \times S_3 = 194.616 \mu\text{s}/\mu\text{N}$ .

## 4 结 论

1) 根据光子晶体微腔的谐振特性, 提出一种 M 型梁结构的微力传感探头. 传感探头的材料采用纯硅, M 型梁的长、宽、高分别为 40, 4, 20  $\mu\text{m}$ , 硅柱在中间支撑平板的正下方, 直径为 220 nm, 采用 Comsol 仿真软件计算出该系统的检测灵敏度可达 204 nm/ $\mu\text{N}$ .

2) 利用有限时域差分方法, 对微纳环结构的光子晶体微腔进行优化设计, 通过在环形腔内部的 6 个角引入渐变半径的空气孔, 获得了品质因子高达 7 100 的微腔.

3) 针对微力测量系统的波长移动特性, 搭建出基于环形衰荡腔的波长解调系统. 实验测得, 系统具有良好的稳定性和重复性, 波长解调灵敏度可达 90  $\mu\text{s}/\text{nm}$ . 本文所设计的微力测量系统的灵敏度可达 194.616  $\mu\text{s}/\mu\text{N}$ .

## 参考文献:

- [1] Liang Q K, Zhang D, Coppola G, et al. Multi-dimensional MEMS/micro sensor for force and moment sensing: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(8): 2643–2657.
- [2] Chen Y, Yan S C, Zheng X, et al. A miniature reflective micro-force sensor based on a microfiber coupler [J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 2443–2450.
- [3] Scherer A, Painter O, Vuckovic J, et al. Photonic crystals for confining, guiding, and emitting light [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2002, 1(1): 4–11.
- [4] Zhou W D, Zhao D Y, Shuai Y C, et al. Progress in 2D photonic crystal Fano resonance photonics [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2014, 38(1): 1–74.
- [5] Wang D L, Yu Z Y, Liu Y M, et al. Ultrasmall modal volume and high Q factor optimization of a photonic crystal slab cavity [J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(12): 125102.
- [6] Mao D, Liu P, Ho K M, et al. A theoretical study of a nano-opto-mechanical sensor using a photonic crystal-cantilever cavity [J]. *Journal of Optics*, 2012, 14(7): 075002.
- [7] Mai T T, Hsiao F L, Lee C, et al. Optimization and comparison of photonic crystal resonators for silicon microcantilever sensors [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 165(1): 16–25.
- [8] Lee C, Thillaigovindan J. Optical nanomechanical sensor using a silicon photonic crystal cantilever embedded with a nanocavity resonator [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(10): 1797–1803.
- [9] Lee C, Radhakrishnan R, Chen C, et al. Design and modeling of a nanomechanical sensor using silicon photonic crystals [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(5/6/7/8): 839–846.