

# 基于迈克耳孙干涉仪的二维光子晶体传感器

王宇飞<sup>1</sup> 邱怡申<sup>2</sup> 陈曦曜<sup>2</sup> 韩一石<sup>3</sup> 倪波<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 龙岩学院物理与机电工程学院, 福建 龙岩 364012; <sup>2</sup> 福建师范大学光子技术福建省重点实验室, 福建 福州 350007

<sup>3</sup> 广东工业大学信息工程学院, 广东 广州 510006

**摘要** 在基于自准直效应的二维空气柱型光子晶体迈克耳孙(Michelson)干涉仪的基础上设置一块传感区域, 改变传感区折射率从而引起一路光的相位发生变化, 导致干涉之后输出光束的能量也随之改变。利用平面波展开法计算得到的等频面确定了入射光的自准直频率范围, 运用时域有限差分法分析该传感器的灵敏度最高可达 120 nm/RIU, 通过单频光入射实现了该传感器的传感模拟。该传感器完全依赖自准直导光, 不需构造任何缺陷波导, 对制造工艺的要求大大降低。对于 1.55  $\mu\text{m}$  的中心工作波长, 传感器大小只有几十微米, 进一步添加分束器可以实现高度并联传感器探测。

**关键词** 传感器; 光子晶体; 自准直; 干涉

**中图分类号** TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092904.1083

## Two-Dimensional Photonic Crystal Sensor Based on Michelson Interferometer

Wang Yufei<sup>1</sup> Qiu Yishen<sup>2</sup> Chen Xiyao<sup>2</sup> Han Yishi<sup>3</sup> Ni Bo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Physics and Electromechanical Engineering, Longyan University, Longyan, Fujian 364012, China

<sup>2</sup> Fujian Provincial Key Lab of Photonic Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China

<sup>3</sup> Information Engineering College, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China

**Abstract** A new Michelson interferometer sensor is proposed based on the self-collimation effect of two-dimensional air-cylinder photonic crystal. By introducing a sensor area and changing its refractive index, a phase shift is created and thus lead to the change of optical output power. Self-collimation frequency range can be determined by the equal frequency contours calculated with the plane wave expansion method. Two-dimensional finite-difference time-domain technique is also used. 120 nm/RIU sensitivity is achieved. The simulated performance is realized by the incidence of single frequency light. The proposed photonic crystal sensor is defect-free configuration and thus reduces the fabrication difficulty. For 1.55  $\mu\text{m}$  central operating wavelength, the dimensions of such sensors are only tens of microns. It is desirable to perform ultra-parallel sensor by cascading beam splitters.

**Key words** sensors; photonic crystal; self-collimation; interference

## 1 引言

光传感器由于具有不受电磁干扰、灵敏度高等优点, 已引起人们的广泛兴趣<sup>[1~3]</sup>。新型光学微传感器能够准确测定周围介质的物理、化学、生物性质, 它的设计对于实际应用和科学研究具有重要意义<sup>[4~10]</sup>。光学传感的一种流行方式是探测折射率的值及其变化, 能够提供实时的检测结果和最小的样品准备, 而

且不用荧光标记, 具有显著的商业前景<sup>[11]</sup>。对于干涉型的传感器件, 往往都是通过传感区折射率的改变引起一路光的相位发生变化导致干涉之后输出光束的能量也随之改变<sup>[12~15]</sup>。但这种基于全反射原理导光的传感器, 很难满足将来光传感器的要求: 小型、高灵敏度、低造价及低功耗。

光子晶体<sup>[16,17]</sup>是一个良好的纳米光电器件制作

**收稿日期**: 2008-08-15; **收到修改稿日期**: 2008-10-27

**基金项目**: 福建省科技厅(K04021, 2005K021)和福建省自然科学基金(T0750009)资助课题。

**作者简介**: 王宇飞(1979—), 男, 助教, 硕士, 主要从事光子晶体理论分析、器件设计和电磁场数值计算等方面的研究。

平台,复杂的能带结构使其具有强色散和各向异性等特异性质,能够很好地操控光子的行为。如自准直效应,是在不借助任何非线性效应的情况下,光束在光子晶体中能够克服发散或衍射加宽效应而显示出几乎完全准直的传播特性<sup>[18,19]</sup>。光子晶体传感器不引入任何缺陷波导,可大大降低对制造工艺的要求。与传统的商业集成光传感器相比,其大小要小约三个数量级。本文基于光子晶体自准直效应,设计了一种迈克耳孙(Michelson)二维光子晶体传感器,运用时域有限差分法分析了这种传感器的特性。

## 2 自准直频率范围

如图 1(a)所示,考虑的完美二维光子晶体是在以硅(折射率  $n=3.5$ )为背景材料上钻正方晶格的

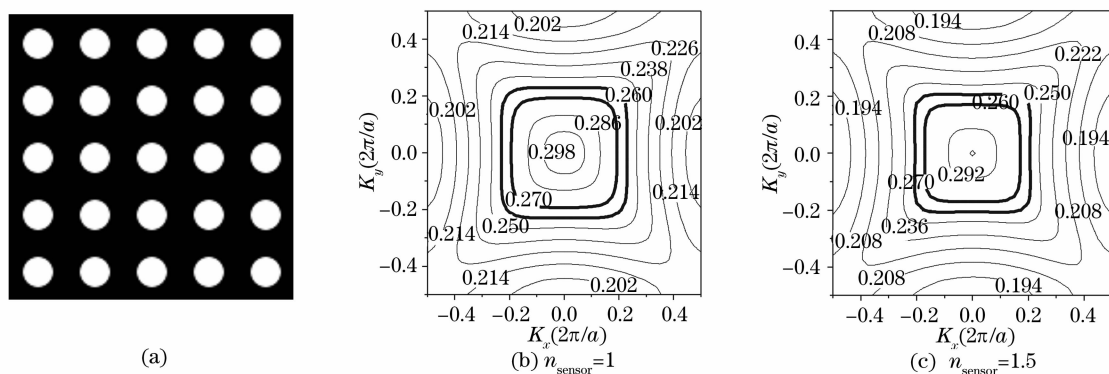


图 1 在硅上钻正方晶格的圆柱形空气孔构成的二维光子晶体(a)和 TE 模在波矢空间中的第二带的等频图(b),(c)

Fig. 1 Two-dimensional photonic crystal (a) consisting of a square lattice of cylindrical air holes in silicon and equipfrequency contours (b), (c) of the second band in the wave-vector space for TE modes

## 3 结构设计

图 2 所示的是由二维光子晶体构成的 Michelson

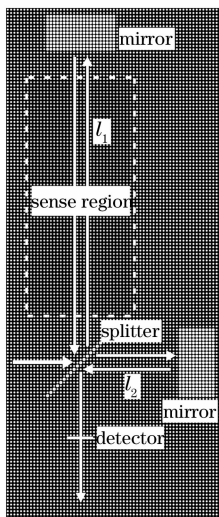


图 2 Michelson 传感器结构图

Fig. 2 Schematic structure of Michelson sensor

空气柱构成的。空气柱的半径  $r_1=0.26a$ ,  $a$  为晶格常数。图 1(b)是当柱的折射率为  $n_{\text{sensor}}=1$ (即柱中充满空气)时运用平面波展开法计算出来的波矢空间中的第二个能带的等频图。图中粗黑线方框显示这种结构的光子晶体对于 TE(磁场平行于空气柱的轴线)偏振模有自准直频率范围  $0.26c/a \sim 0.27c/a$ ,  $c$  为自由空间的光速。具有这些频率的光束以垂直于等频面的方向在完美光子晶体里面传输时没有衍射加宽,这就是自准直效应。图 1(c)是柱中介质材料的折射率为  $n_{\text{sensor}}=1.5$  时的等频图。很显然,当  $n_{\text{sensor}}=1.5$  时频率  $0.26c/a$  和  $0.27c/a$  对应的等频线仍保持方形,说明此情况下光束仍能够保持自准直传输,因而自准直频率范围  $0.26c/a \sim 0.27c/a$  对  $n_{\text{sensor}}=1.5$  依然适用。

传感器的结构。该传感器所基于的 Michelson 干涉仪由两个全反镜和一个分束器构成。两个全反镜分别位于完美光子晶体的上部和右边。全反镜由另外一个硅光子晶体构成,其正方晶格的空气柱半径为  $r_2=0.392a$ ,它有位于  $0.2526c/a \sim 0.2762c/a$  的 TE 模光子带隙,所以两个镜子对于自准直频率范围  $0.26c/a \sim 0.27c/a$  内的入射光束有 100% 的反射率。分束器由沿  $\Gamma M$  的方向放大一排空气柱的半径至  $r_3=0.434a$  所形成的缺陷构成。对于自准直光束,分束器的透射率范围为  $42.73\% \sim 53.58\%$ ,反射率的范围为  $56.84\% \sim 43.07\%$ 。两干涉臂的固定长度为:长臂长  $l_1=95a$ ,短臂长  $l_2=30a$ 。在长臂上设置一块大小为  $30a \times 70a$  的传感区域。图 2 中白色虚线框所围的区域即为传感区。只有传感区暴露在气体或液体中,其他部分则被封装起来。一束  $5a$  宽的高斯光从左端入射,经过分束器后被分成两束光。这两束光分别被两个全反镜完全反射后再次

被分束器分束,在出口端干涉形成输出光。图 2 中粗白箭头线描述了自准直光束在该传感器中的传输路径。

### 4 分 析

#### 4.1 透射谱

利用时域有限差分法计算的结果表明当  $n_{\text{sensor}} = 1.0$  时在自准直频率范围  $0.26c/a \sim 0.27c/a$  内透射谱的形状呈正弦曲线形,如图 3 所示。透射谱中有 5 个透射峰,透射率的范围在  $61.35\% \sim 91.30\%$  之间,具有几乎相等的峰值间隔  $0.0020c/a$ 。

另外,也研究了对应于不同的  $n_{\text{sensor}}$  的透射谱,如图 4 所示。可见,当  $n_{\text{sensor}}$  增大时,透射谱向左移向低频部分,而透射峰的峰值间隔几乎保持不变。当

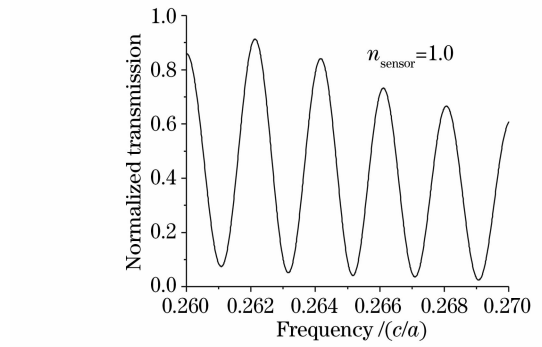


图 3 Michelson 传感器出口端的透射谱

Fig. 3 Transmission spectrum at the output port of Michelson sensor

$n_{\text{sensor}}$  由 1.0 增大到 1.5 时,透射谱左移超过了  $0.0010c/a$ ,即超过了峰值间隔的一半。

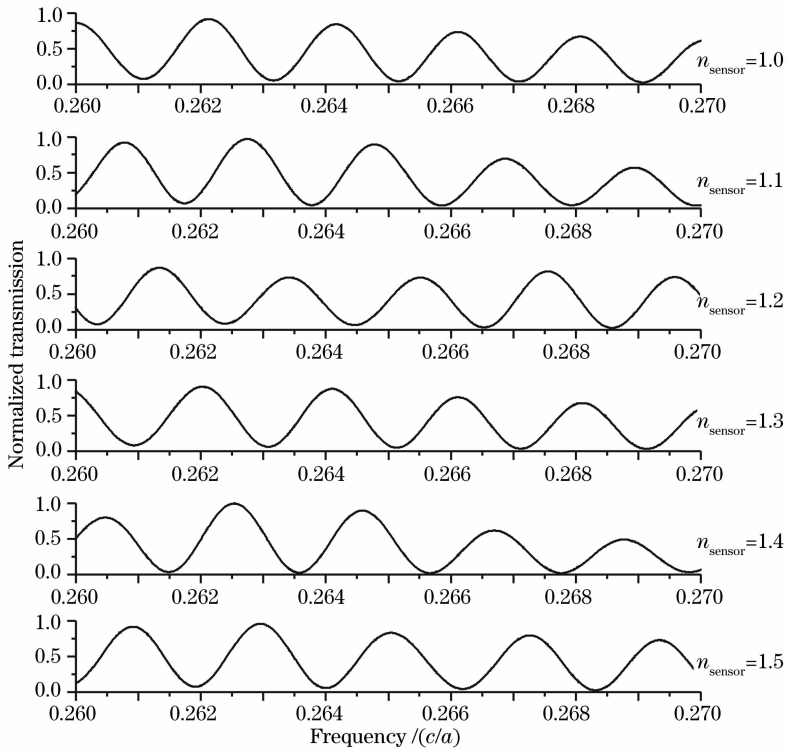


图 4 对应于不同  $n_{\text{sensor}}$  的 Michelson 传感器出口端的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra at the output port of Michelson sensor for different  $n_{\text{sensor}}$

模拟得到的场分布能够与透射谱很好地对应起来。图 5 所示的是频率为  $0.2643c/a$  的单频光在 Michelson 传感器中的稳态磁场强度分布。图 5(a) 是  $n_{\text{sensor}} = 1.35$  时的情形,测得的透射率为  $6.31\%$ ,光几乎不能从出口端射出。图 5(b) 是  $n_{\text{sensor}} = 1.42$  时的情形,测得的透射率为  $96.61\%$ ,光几乎全部从出口端射出。很显然,传感器的这种特性使得若在传感区域注入液晶,通过电压控制液晶的方向从而改变液晶的折射率,可以把该传感器改装成光开关

或可调衰减器。

#### 4.2 灵敏度

图 6 记录了随着  $n_{\text{sensor}}$  的增大透射谱中某一透射峰的移动情况,其中  $n_{\text{sensor}}$  变化幅度为  $0.005$ 。可见,透射谱的透射峰并不是严格等间隔的,透射峰的波长增大与  $n_{\text{sensor}}$  的增大不是线性关系。因而,得到的传感器的灵敏度是一个范围  $57 \sim 120 \text{ nm/RIU}$ ,平均值为  $84 \text{ nm/RIU}$ (用  $\text{nm/RIU}$  作为灵敏度的单位,它表示在 1 个折射率变化单位内波长移动的量

值)。这种灵敏度与其他种类传感器的灵敏度比起来偏低,但可以通过增大器件从而延长光在探测介质中的传输路径来得到改善。

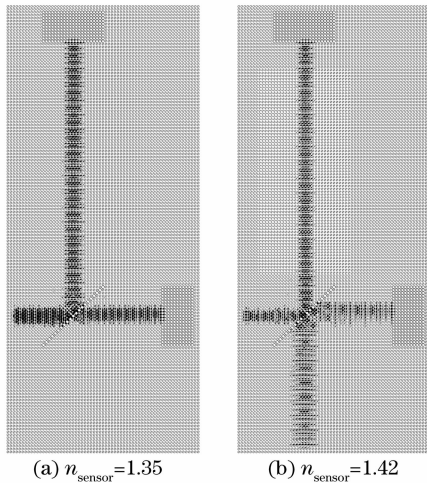


图 5 频率为  $0.2643c/a$  的单频光在 Michelson 传感器中的稳态磁场强度分布

Fig. 5 Steady-state magnetic-field distribution when the frequency is  $0.2643c/a$

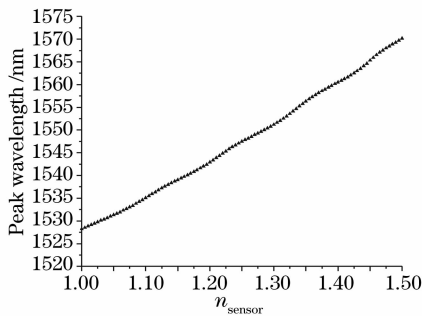


图 6 某一透射峰随  $n_{\text{sensor}}$  的增大而导致的波长红移  
Fig. 6 One transmission peak shifts to longer wavelength with the increase of  $n_{\text{sensor}}$

### 4.3 传感模拟

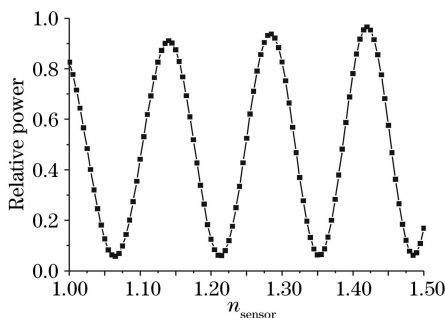


图 7  $n_{\text{sensor}}$  从 1.00 变化到 1.50 时 Michelson 传感器的模拟性能

Fig. 7 Simulated performance of Michelson sensor as the refractive index  $n_{\text{sensor}}$  varied from 1.00 to 1.50

通过频率为  $0.2643c/a$  的单频光入射,实现了所设计的自准直 Michelson 传感器的传感模拟。图 7 记录了当  $n_{\text{sensor}}$  从 1.00 变化到 1.50,每次变化 0.005 时出口端得到的相对光能。这样,在应用中,通过单频光入射,得到的相对光能与图 7 中的记录值相比较,就可知探测区待探测介质的折射率。

## 5 结 论

设计的完全依赖自准直导光的二维光子晶体 Michelson 传感器不需构造任何缺陷波导,因而对制造工艺的要求大大降低了。由于中心工作波长在  $1.55 \mu\text{m}$ ,该传感器的大小只有几十微米,灵敏度最高达  $120 \text{ nm}/\text{RIU}$ ,通过改善灵敏度可探测低于 0.005 的折射率变化。设计的传感器轻便、紧凑,进一步添加分束器可以实现高度的传感器并联,可利用同一光源探测多种介质,能够满足超紧凑、高灵敏度、廉价和无标记的要求。

## 参 考 文 献

- 1 J. Dakin, B. Culshaw. Optical Fiber Sensors: Principles and Components (Volume 1) [M]. Boston: MA, Artech House, 1988. Volume 1, 343
- 2 M. G. Xu, L. Reekie, Y. T. Chow *et al.*. Optical in-fibre grating high pressure sensor[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**: 398~399
- 3 E. Buckle, R. J. Davies, T. Kinning *et al.*. The resonant mirror: a novel optical sensor for direct sensing of biomolecular interactions. II: Applications[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 1993, **8**: 355~363
- 4 C.-Y. Chao, W. Fung, L. J. Guo. Polymer microring resonators for biochemical sensing applications[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2006, **12**: 134~142
- 5 M. Sumetsky, Y. Dulashko, J. M. Fini *et al.*. The microfiber loop resonator: Theory, experiment, and application [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**: 242~250
- 6 A. Yalçin, K. C. Popat, J. C. Aldridge *et al.*. Optical sensing of biomolecules using microring resonators[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2006, **12**: 148~155
- 7 I. M. White, H. Oveys, X. Fan. Liquid core optical ring resonator sensors[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**: 1319~1321
- 8 I. M. White, H. Oveys, X. Fan *et al.*. Integrated multiplexed biosensors based on liquid core optical ring resonators and antiresonant reflecting optical waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**: Art. 191106
- 9 H. Zhu, I. M. White, J. D. Suter *et al.*. Analysis of biomolecule detection with optofluidic ring resonator sensors[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**: 9139~9146
- 10 N. Chen, B. Yun, Y. Wang *et al.*. Theoretical and experimental study on etched fiber Bragg grating cladding mode resonances for ambient refractive index sensing[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**: 439~445
- 11 I. M. White, X. Fan. On the performance quantification of resonant refractive index sensors[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**: 1020~1028
- 12 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. High-resolution

- fibre-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**: 236~238
- 13 S. J. Spammer, P. L. Swart, A. Booyen. Interferometric distributed optical-fiber sensor [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**: 4522~4525
- 14 B. Drapp, J. Pehler, A. Brecht *et al.*. Integrated optical Mach-Zehnder interferometers as simazine immunoprobes[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1997, **39**: 277~282
- 15 R. G. Heideman, P. V. Lambeck. Remote opto-chemical sensing with extreme sensitivity: design, fabrication and performance of a pigtailed integrated optical phase modulated Mach-Zehnder interferometer system[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1999, **61**: 100~127
- 16 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**: 2486~2489
- 17 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**: 2059~2062
- 18 H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita *et al.*. Self-collimating phenomena in photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**: 1212~1214
- 19 D. W. Prather, S. Shi, J. Murakowski *et al.*. Self-collimation in photonic crystal structures; a new paradigm for applications and device development[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, **40**: 2635~2651