

二维光子晶体非对称 Mach-Zehnder 自准直传感器研究*

王宇飞¹, 邱怡申², 陈曦曜³, 强则焯², 赖国忠¹, 邱晖晔¹

(1 龙岩学院 物理与机电工程学院, 福建 龙岩 364012)

(2 福建师范大学 a. 医学光电科学与技术教育部重点实验室; b. 光子技术福建省重点实验室, 福州 350007)

(3 闽江学院 物理学与电子信息工程系, 福州 350108)

摘要:基于自准直效应,通过在二维空气柱型光子晶体非对称 Mach-Zehnder 干涉仪长臂上设置传感区域,设计了一种自准直传感器.平面波展开法确定了入射光的自准直频率范围,时域有限差分法分析了传感器的灵敏度达到 68 nm/RIU,采用单频光入射实现了传感模拟.该传感器完全依赖自准直导光,无需引入任何缺陷波导,大大降低了制作工艺要求,其大小只有十几个微米,能够满足超紧凑、高灵敏度、廉价和无标记的要求.

关键词:光子晶体;自准直;传感器;光子集成芯片

中图分类号:TP212.14

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2009)08-1958-4

0 引言

随着半导体光源及光纤技术的逐渐成熟,光传感器具有免受电磁干扰、灵敏度高等优点,已引起人们的广泛兴趣^[1-3].迄今为止,人们基于 Mach-Zehnder(MZ)干涉仪^[4]结构报道了各种光学传感器^[5-8].一般说来,这类传感器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.它们可以分为光纤型^[5-6]和光波导型^[7-8].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^[9-12]是一个良好的纳米光电器件制作平台,可以很好地操纵光子的行为,如利用光子晶体的特殊色散关系,无需引入缺陷波导,一定频率的光在光子晶体中沿某个方向可以无展宽地直线传播,亦即光束可以自准直地传播^[13-14].光子晶体传感器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,设计了一种非对称 Mach-Zehnder 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.

1 自准直频率范围及结构设计

如图 1 左下的插图所示,我们考虑的是二维正方晶格空气柱型光子晶体,以硅为材料,折射率 $n = 3.5$.空气柱的半径 $r_1 = 0.26a$, a 是晶格常量.利用

平面波展开法得到图 1 虚线所示的 TE(电场垂至于空气柱的轴线)模的能带图和图 2 所示的 TE 模第二能带的等频图.图 2 中大小两个黑色实线框分别对应着空气柱中介质的折射率为 $n_{\text{sensor}} = 1$ 时频率为 $0.255c/a$ 和 $0.275c/a$ 的等频线,其中 c 是自由空间的光速.它们接近于正方形,说明介于这些频率的光束以垂直于等频面沿 ΓX 方向传输时,光束可以自准直地传播.有趣的是,当空气孔充入生物液体,假定 $n_{\text{sensor}} = 1.5$,两个等频面会基本保持方形地向内缩进,如图中大小两个黑色虚线框所示,说明即使在填充入生物液体时,光束还可以保持原来的自准直传输特性.据此,我们可以基于自准直结构设计一种二维空气柱型光子晶体非对称 Mach-Zehnder 传感器.如图 3,该传感器由两个全反镜和两个分束器构成.位于光子晶体左上角和右上角的两个全反镜由另外一个空气柱型硅光子晶体构成,其气孔半径 $r_2 = 0.392a$,使得在频率范围 $0.2526c/a \sim 0.2762c/a$ 出现了光子带隙,如图 1 阴影区所示.因而两个镜子对于自准直频率范围 $0.255c/a \sim 0.275c/a$ 内的入射光束来说有 100% 的反射率.两个分束器分别由沿 ΓN 的方向放大一排空气柱的半径至 $r_3 = 0.434a$ 形成的缺陷构成.对于自准直光束,分束器透射率的范围是 26.44%~54.61%,反射率的范围是 72.74%~41.46%,如图 4.两干涉臂的长度不同,位于两分束器之间的短干涉臂的长度为 $30a$,长干涉臂的长度为 $80a = 25a + 30a + 25a$,所以该 Mach-Zehnder 干涉仪从结构上来说是非对称的.在长臂上设置一块传感区域,如图 3 中白色虚线框所围的区域,由两块大小分别为 $46a \times 13a$ 、 $18a \times$

*福建省自然科学基金(T0750009)资助

Tel:13860269635

Email:kaly1314520@163.com

收稿日期:2008-11-04

修回日期:2008-12-03

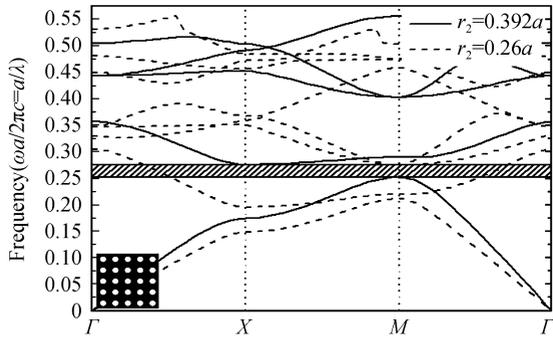


图1 气孔半径为 $r_1=0.26a$ 和 $r_2=0.392a$ 时 TE 模的能带
Fig.1 Photonic band structures for TE modes when the radius of air-cylinders are $0.26a$ and $0.392a$, respectively

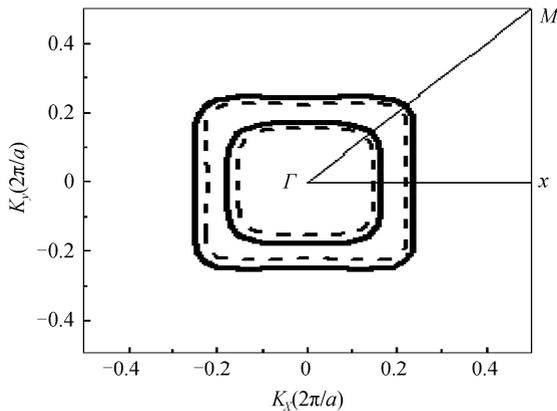


图2 波矢空间中 TE 模第二能带的等频
Fig.2 Equipfrequency contour of the second band in the wave-vector space for TE modes

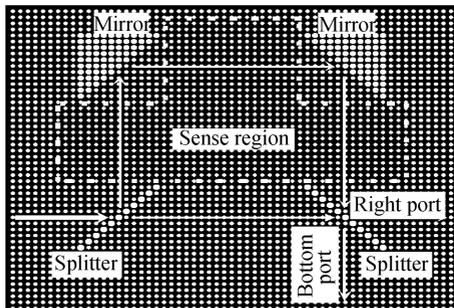


图3 非对称 Mach-Zehnder 自准直传感器结构
Fig.3 Schematic structure of 2D photonic crystal asymmetric Mach-Zehnder self-collimation sensor

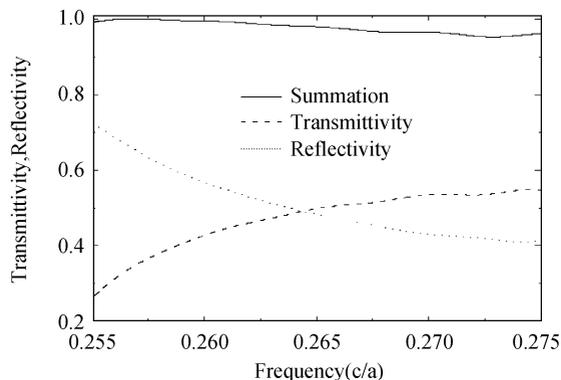


图4 分束器对于自准直光束的透射率和反射率
Fig.4 The transmittivity and reflectivity of one splitter for incident self-collimated light

14a 的区域合并而成. 只有传感区暴露在气体或液体中, 其他部分则被封装起来. 该传感器有两个出口, 分别是右端出口和下端出口. 一束 $5a$ 宽的高斯光从左端入射, 经过左分束器后被分成两束光, 经过长臂的光束先后经过两个全反镜的完全反射. 之后两束光经过右分束器的再次分束, 在两个出口端干涉形成输出光. 图3中粗白箭头线描述了自准直光束在传感器中的传输路径.

2 数值结果及分析

2.1 透射谱

取模拟区域大小为 $60a \times 50a$, 完美匹配层 (PML) 作为吸收边界条件, 时域有限差分法计算的结果如图5, 表明在自准直频率范围 $0.255c/a \sim 0.275c/a$ 内, 右端出口和下端出口的透射谱 (分别用实线和虚线表示) 均呈正弦形, 且几乎互补. 对应于每个 n_{sensor} 的透射谱都有 4~5 个透射峰, 峰值间隔几乎相等. 它们的透射率都在 80% 以上, 但都小于 1, 是因为在完美光子晶体和分束器的接触面处有插入损耗. 对比不同 n_{sensor} 的谱线可知, 当 n_{sensor} 增大时, 两个端口的谱线都向左移向低频部分, 而透射峰的峰值间隔几乎保持不变. 当 n_{sensor} 由 1.0 增大到 1.5 时, 透射谱左移超过了 $0.0048c/a$, 即超过了一个峰值间隔.

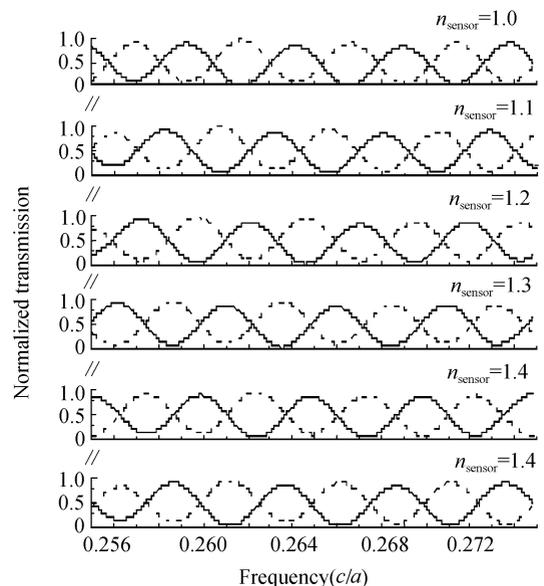


图5 充入不同探测液体 n_{sensor} 的传感器出口端的透射谱
Fig.5 The transmission spectra obtained at the output ports of the sensor by filling in different liquid n_{sensor}

2.2 灵敏度

图6 记录了随着 n_{sensor} 的增大透射谱中某一透射峰的波长移动情况, 其中 n_{sensor} 的变化幅度为 0.1. 当 n_{sensor} 从 1.0 增大到 1.5 时, 这个透射峰的波长从 1527.2 nm 红移到 1557.8 nm . 透射峰的波长增大

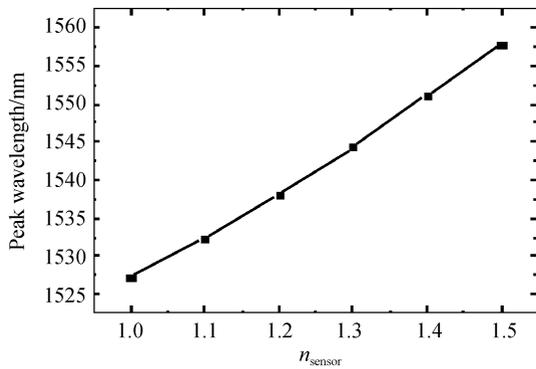


图6 n_{sensor} 的增大导致某一透射峰的波长红移
Fig. 6 One transmission peak shifts to longer wavelength with the increase of n_{sensor}

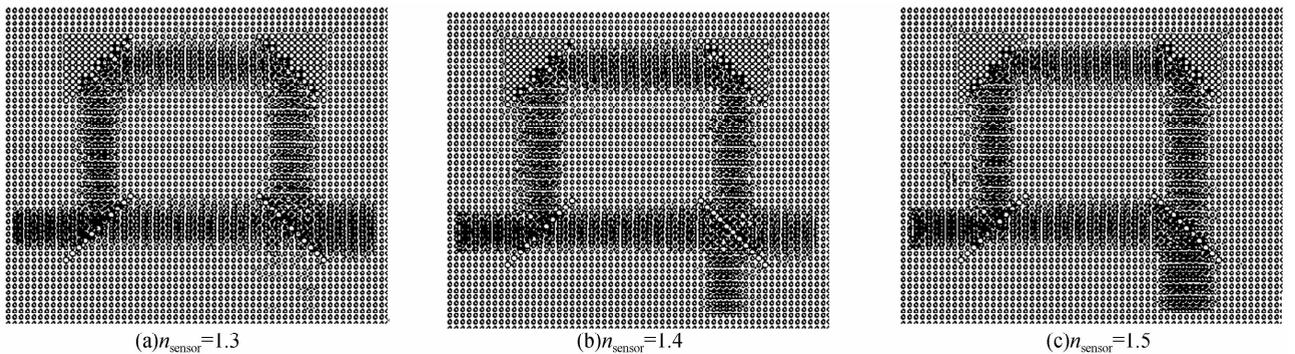


图7 n_{sensor} 为 1.3、1.4、1.5, 频率为 $0.2660c/a$ 的光输入时稳态磁场强度分布
Fig. 7 Steady-state magnetic field distribution when n_{sensor} is equal to 1.3, 1.4, 1.5 where the frequency of incident light is $0.2660c/a$

光能为 82.78%。图 7(b) 是当 $n_{\text{sensor}} = 1.4$ 时, 光同时从右端口和下端口射出, 测得的右端口的相对光能为 47.16%。图 7(c) 是当 $n_{\text{sensor}} = 1.5$ 时, 光几乎全部从下端口射出, 这时测得的右端口的相对光能仅为 1.63%。这里我们主要利用右端口的相对光能进行模拟传感测量, 也可以利用下端口。正因为它们是互补的, 所以只需要利用一个端口进行定标就行了。

3 结论

本文设计的二维光子晶体非对称 Mach-Zehnder 自准直传感器完全依赖自准直导光, 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。由于工作中心波长在 $1.55 \mu\text{m}$, 该传感器的大小只有十几个微米。它的灵敏度达到 68 nm/RIU , 通过增大器件改善灵敏度可以探测低于 0.01 的折射率变化。另一方面, 微米量级的大小使得我们设计的传感器轻便、紧凑, 进一步添加分束器可以实现高度的传感器并联, 利用同一光源探测多种介质。再加上该传感器能够提供实时的检测结果, 无需荧光标记, 从而能够满足超紧凑、高灵敏度、廉价和无标记的要求, 可用于光子集成芯片。

参考文献

[1] DAKIN J, CULSHAW B. Optical fiber sensors: Principles and

与 n_{sensor} 的增大不是线性关系, 因而, 我们得到传感器的灵敏度是一个平均值 68 nm/RIU (这里用 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得到改善。

2.3 传感模拟

图 7 所示的是对于不同的 n_{sensor} 具有频率 $0.2660c/a$ 的单频光在非对称 Mach-Zehnder 自准直传感器中的稳态磁场强度分布图。图 7(a) 是当 $n_{\text{sensor}} = 1.3$ 时, 光从右端口射出, 测得右端口的相对

components[M]. Volume 1 Boston, MA, Artech House, 1988: 343.

- [2] XU M G, REEKIE L, CHOW Y T, *et al.* Optical in-fibre grating high pressure sensor[J]. *Electronics Lett*, 1993, 29: 398-399.
- [3] BUCKLE E, DAVIES R J, KINNING T, *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] MARTINEZ A, GRIOL A, SANCHIS P, *et al.* Mach-Zehnder interferometer employing coupled-resonator optical waveguides[J]. *Opt Lett*, 2003, 28: 405-407.
- [5] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. High-resolution fibre-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection [J]. *Electronics Lett*, 1992, 28: 236-238
- [6] SPAMMER S J, SWART P L, BOOYSEN A. Interferometric distributed optical-fiber sensor[J]. *Appl Opt*, 1996, 35: 4522-4525.
- [7] DRAPP B, PIEHLER J, BRECHT A, *et al.* Integrated optical Mach-Zehnder interferometers as simazine immunoprobes[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1997, 39: 277-282.
- [8] HEIDEMAN R G, LAMBECK P V. 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.

- [9] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58: 2486-2489.
- [10] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58:2059-2062.
- [11] XU Gui-wen, OU-YANG Zheng-biao. A new double-wavelength photonic crystal resonator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(3):429-433.
许桂雯, 欧阳征标. 一种新型光子晶体双色谐振腔[J]. *光子学报*, 2007, 36(3): 429-433.
- [12] XIE Dong-hua, HE Xiao-dong, TONG Chuan-ping, *et al.* Parameter analysis of planer photonic crystal microcavity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(3): 434-438.
谢东华, 何晓东, 佟传平, 等. 平板型光子晶体谐振腔性能分析[J]. *光子学报*, 2007, 36(3): 434-438.
- [13] KOSAKA H, KAWASHIMA T, TOMITA A, *et al.* Self-collimating phenomena in photonic crystals[J]. *Appl Phys Lett*, 1999, 74: 1212-1214.
- [14] PRATHER D W, S SHI, MURAKOWSKI J, *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.

Investigation on Two-dimensional Photonic Crystal Asymmetric Mach-Zehnder Self-collimation Sensor

WANG Yu-fei¹, QIU Yi-shen², CHEN Xi-yao³, QIANG Ze-xuan², LAI Guo-zhong¹, QIU Hui-ye¹

(1 School of Physics and Electromechanical Engineering, Longyan University, Longyan, Fujian 364012, China)

(2a. Key Lab of Optoelectronic Science and Technology for Medicine; b. Ministry of Education & Fujian Provincial Key Lab of Photonic Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

(3 Department of Physics and Electronic Information Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: A new asymmetric Mach-Zehnder interferometer sensor is proposed based on the self-collimation effect of two-dimensional air-cylinder photonic crystal by introducing a sensing area in the longer branch. Self-collimation frequency range is confirmed by employing the plane wave expansion method. Two-dimensional finite-difference time-domain technique is used in this work. 68 nm/RIU sensitivity can be achieved. The simulated performance is realized by the incidence of single frequency light. The proposed photonic crystal sensor is defect free configuration and thus reduce the fabrication difficulty. The dimensions of such sensor are no more than twenty microns. It is desirable to perform ultra-compact, highly-sensitive, low-cost label-free sensor and may be applied to photonic integrated circuits.

Key words: Photonic crystal; Self-collimation; Sensor; Photonic integrated circuits



WANG Yu-fei was born in 1979. He received his M. S. degree in theoretical physics from Fujian Normal University in 2008. Now he is a teacher at School of Physics and Electromechanical Engineering, Longyan University. His research interests focus on optical components based on photonic crystals and numerical calculation of electromagnetic field.