

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0192-04

# 二维介质圆柱光子晶体自准直迈克耳孙干涉仪

倪波<sup>1</sup> 李晖<sup>1</sup> 陈曦曜<sup>2</sup> 邱怡申<sup>1</sup> 陈书强<sup>1</sup> 白继博<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 福建师范大学物理与光电信息科技学院, 福建 福州 350007; <sup>2</sup> 闽江学院物理学与电子信息工程系, 福建 福州 350108)

**摘要** 设计并模拟了一种基于光子晶体自准直效应的二维介质圆柱光子晶体迈克耳孙干涉仪。此结构包括一个分束器和两个反射器。利用有限时域差分法计算模拟发现,在归一化频率范围  $0.192c/a \sim 0.200c/a$  内,光束保持自准直传输,出口处透射谱成正弦形分布。固定短臂长度同时增大长臂的长度时发现透射谱峰值频率向低频方向移动,而透射谱峰值的间距非线性下降。因为其等间距分开某一频率范围的特性,此迈克耳孙干涉仪器可以用于波长信号分离器,对于光通讯波长 1550 nm,整个干涉仪结构只有几十微米大小,所以有可能将来用于光子晶体集成器件和全光通讯。

**关键词** 集成光学; 迈克耳孙干涉仪; 自准直; 光子晶体

中图分类号 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0192

## Michelson Interferometer Based on Self-Collimation in a Two-Dimensional Rod-Type Photonic Crystal

Ni Bo<sup>1</sup> Li Hui<sup>1</sup> Chen Xiyao<sup>2</sup> Qiu Yishen<sup>1</sup> Chen Shuqiang<sup>1</sup> Bai Jibo<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Physics and Optoelectronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)  
(<sup>2</sup> Department of Physics and Electronic Information Engineering, Minjiang University, Fuzhou, Fujian, 350108, China)

**Abstract** A theoretical model of Michelson interferometer in a two-dimensional rod-type photonic crystal (PhC), is proposed and numerically demonstrated. The MI includes one splitter and two mirrors. Lights propagate between them independence on self-collimation effect. The two interferometer branches have different path lengths. By using the finite-difference time-domain method, the calculation results show that the transmission spectra at the output ports are in the shape of sinusoidal curves and have a uniform peak spacing in the frequency range from  $0.192c/a$  to  $0.200c/a$ . When the path length of the longer branch is increased and the shorter one is fixed, the peaks shift to the lower frequencies and the peak spacing decreases nonlinearly. For the operating wavelength around 1550 nm, the whole structure is about tens of microns. So it may be applied in future photonic integrated circuits.

**Key words** integrated optics; Michelson interferometer; self-collimation; photonic crystal

### 1 引 言

光子晶体是一种介电常数呈周期性分布的人工电介质结构<sup>[1]</sup>。其特有的光子禁带结构提供了一个非常便利的方法能够很好控制光子的运动<sup>[2]</sup>,因而可以设计制造一些光子晶体器件,如光子晶体光纤、光子晶体波导、低阈值激光器<sup>[3~6]</sup>。近年来光子晶体中的自准直效应得到众多关注<sup>[7~11]</sup>,自准直效应是指不需要在光子晶体中人为的制造缺陷(如波导)

某一些特定频率的光在光子晶体中可以沿某个方向无展宽的直线传播。在自准直效应的研究中,不断地有一些光束弯曲和分束的新方法被发现<sup>[12~18]</sup>。干涉仪是利用同一光束分束后通过不同路径的两束光相互干涉的光学仪器,广泛应用在强度调制、波长选择、光开关等集成器件中。之前结构设计经常采用做缺陷波导的方法来控制光路<sup>[19,20]</sup>。利用光子晶体自准直效应的干涉仪有见报导<sup>[21]</sup>,光在光子晶

**基金项目:** 教育部优秀青年教师项目(BD0050)和福建省自然科学基金(A0520001)资助课题。

**作者简介:** 倪波(1984—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体自准直方面的研究。E-mail: northlemon@sohu.com

**导师简介:** 李晖(1963—),男,博士,教授,主要从事光信息技术及应用等方面的研究。

E-mail: hli@fjnu.edu.cn (通信联系人)

体中可以不制造缺陷也可以不被展宽的直线传播。本文设计并模拟了二维介质圆柱光子晶体基于自准直效应的迈克耳孙干涉仪。利用有限时域差分法模拟分析此迈克耳孙干涉仪的各种特性发现此干涉仪可以用在波长分离等方面,也因此有可能将来用于光子晶体集成器件和全光通讯。

## 2 结构及数值模拟分析

### 2.1 光子晶体中的自准直频率范围

如图 1(a)所示,所用的二维光子晶体是空气中的正方格介质圆柱,其介电常数为  $\epsilon=12.25$  (折射率为 3.5)。圆柱半径为  $r=0.35a$ ,  $a$  为晶格常数。图 1(b)所示的是利用平面波展开法计算得到的此光子晶体结构 TM 模式的第一能带等频图,可以看到此 TM 模式的等频图在频率范围  $0.191c/a \sim 0.200c/a$  有非常平直的等频线,  $c$  为光在真空中的速度。在这些频率并垂直于图上四个平直的等频线方向,光束可以在此光子晶体结构中自准直传输。

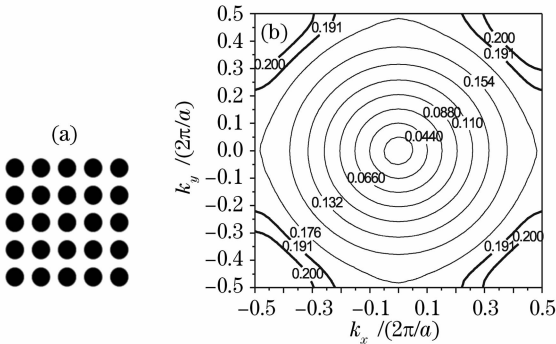


图 1 (a)正方格二维介质圆柱光子晶体结构;(b)TM 模式的第一能带等频图

Fig.1 (a) 2D photonic crystal consisting of a square lattice of dielectric rods in air; (b) equal frequency contours of the first band in the wave-vector space for TM modes

### 2.2 迈克耳孙干涉仪结构

二维光子晶体迈克耳孙干涉仪结构如图 2 所示。此结构包括一个分束器和两个反射器。光束在其间自准直传输。两反射器到分束器中心的距离不相等,向右方向的臂长为  $L_1=20a$ ,向上方向的长臂长为  $L_2=L_1+d$ ,  $d$  为两臂长的差值。两个反射器的圆柱半径也是  $0.35a$ ,不过其晶格常数为  $2a$ ,禁带范围为  $0.151c/a \sim 0.223c/a$  自准直频率范围  $0.191c/a \sim 0.200c/a$  处于此结构禁带范围内,因而光能量几乎被 100% 反射。分束器是通过改变半径大

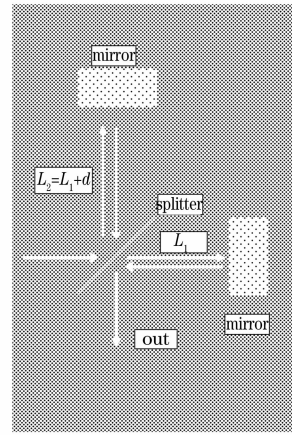


图 2 二维光子晶体迈克耳孙干涉仪结构示意图  
Fig.2 Structure of the Michelson interferometer in the 2D photonic crystal

小为  $r=0.275a$  造成的线缺陷,通过模拟计算发现此线缺陷结构可以把  $0.191c/a \sim 0.200c/a$  的自准直光 1:1 等分。此迈克耳孙干涉仪有向下的一个出口。一束宽度为  $5a$  的高斯光束在整个迈克耳逊干涉仪里传输时,通过分束器后被分为向右和向上 1:1 的两部分,经过不同长度的路径传播被反射器完全反射回分束器并在再一次等分,向下的两束光相干涉并从此出口输出。图 2 中白色的线描述了此迈克耳孙干涉仪自准直光束的传播路径。

### 2.3 迈克耳孙干涉仪透射谱分析

模拟计算时采用的是高  $155\sqrt{2}a$  宽  $75\sqrt{2}a$  的正方格介质圆柱。利用由 MIT 开发的免费软件 MEEP<sup>22</sup> 通过有限时域差分法可以模拟计算得到出口的透射谱。图 3 所示的是  $d=61\sqrt{2}a$  时的迈克耳逊干涉仪的透射谱,在自准直频率范围  $0.192c/a \sim 0.200c/a$  内,透射谱呈正弦型分布,归一化的峰值频率间隔为  $0.0015c/a$ 。从图 3 中可以看出,透射

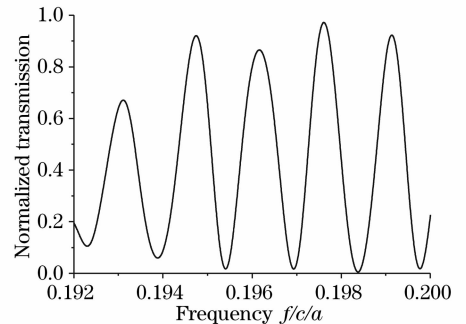


图 3 迈克耳孙干涉仪透射谱 ( $d=61\sqrt{2}a$ )  
Fig.3 Transmission spectrum at the output port of the Michelson interferometer when  $d=61\sqrt{2}a$

率最低为约 70%，最高可以达到 90%。

图 4 是对应于图 3 透射谱线上一些特定频率模拟的电磁场分布。当  $d = 61\sqrt{2}a$  时, 归一化频率  $0.19475c/a$  和  $0.19615c/a$  从出射口透射。而归一化频率  $0.19540c/a$  和  $0.19693c/a$  不被透射。从图 4 可以看出, 场图和透射谱线符合的非常好。在计算不同的  $d$  值的透射时发现谱线和  $d$  的大小密切相关。当  $d$  从  $61.00\sqrt{2}a$  每次增加  $0.05\sqrt{2}a$  到

$61.20\sqrt{2}a$  时, 透射谱峰值向低频方向有细微移动, 如图 5。而当  $d$  每次增加更多时, 移动的范围会变大。当  $d$  每次增加  $\sqrt{2}a$  时, 从  $61\sqrt{2}a$  增加到  $65\sqrt{2}a$ , 谱线峰值每次向低频方向移动半个峰值间距, 如图 6 所示。另外, 在  $d$  从  $30\sqrt{2}a$  增大到  $70\sqrt{2}a$  的范围内, 随着  $d$  值的增大, 透射谱峰值频率间距从  $0.00356c/a$  非线性地下降到  $0.00125c/a$ 。如图 7 所示。

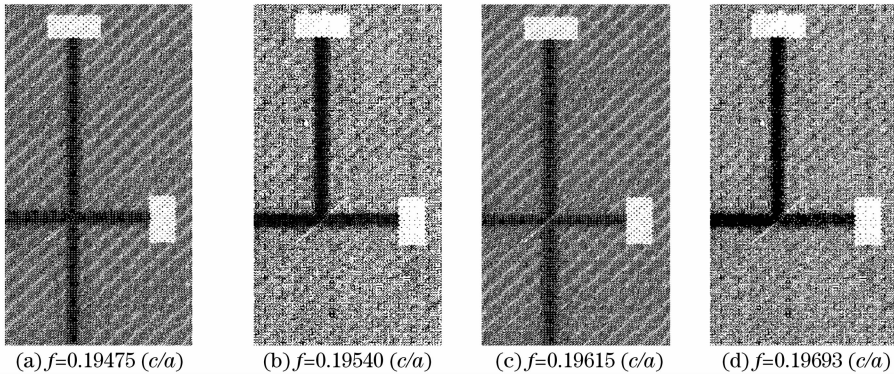


图 4 不同归一化频率的电磁场分布 ( $d = 61\sqrt{2}a$ )

Fig. 4 Magnetic-field distributions when  $d = 61\sqrt{2}a$  at the frequency of the beam

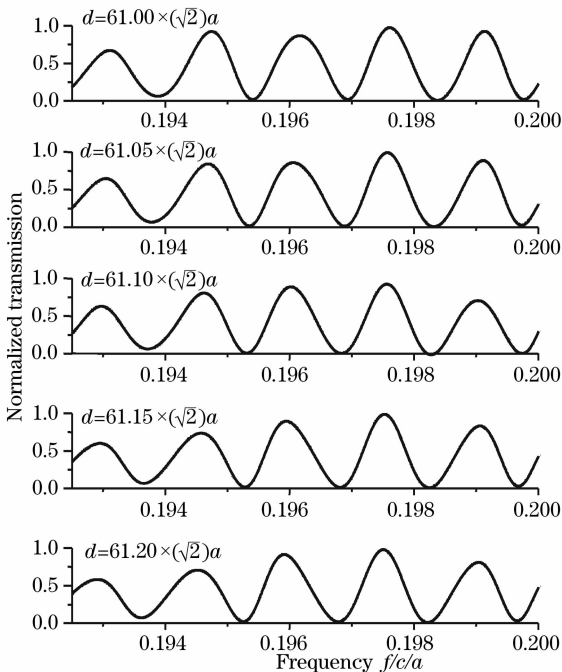


图 5  $d$  细微增大, 谱线峰值向低频方向有微小移动

Fig. 5 Peaks shift left to the lower frequencies slightly in transmission spectra at the out port when  $d$  changes every  $0.05\sqrt{2}a$

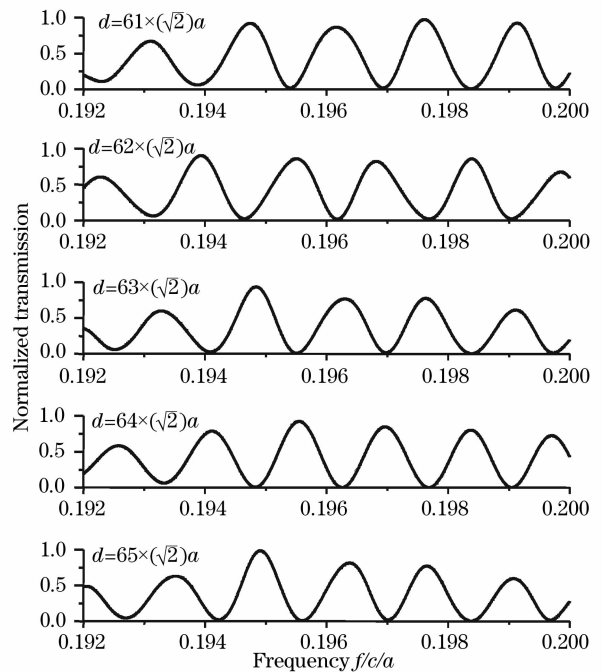
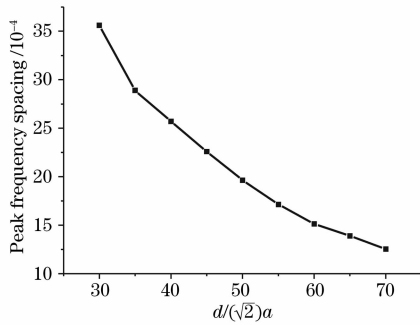


图 6  $d$  每增加  $\sqrt{2}a$ , 谱线峰值相应向低频方向移动半个峰值间距

Fig. 6 Peaks shift over integer multiple of half of the peak spacing in the transmission spectra when  $d$  changes every  $\sqrt{2}a$

图7 峰值频率间距随  $d$  增加非线性下降Fig. 7 Peak frequency spacing decreases nonlinearly with  $d$  increases

### 3 结 论

本文通过对二维介质圆柱光子晶体基于自准直效应的迈克耳孙干涉仪的设计及模拟,我们完成了一种不需要引入缺陷来控制光子运动的干涉仪设计及模拟。此迈克耳孙干涉仪的透射谱线和两臂长度的差值密切相关并且呈正弦型分布,因此可以在波长分离方面起到重要作用。而对应于光通讯波长 1550 nm,整个光子晶体迈克耳孙干涉仪只有几十微米大小,可望将来用于光子晶体的集成器件和全光通讯。

### 参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**: 2059~2062
- 2 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**: 2486~2489
- 3 J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Winn. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* [M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1995. 94~100
- 4 J. Knight, T. Birks, P. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**: 1547~1549
- 5 M. Loncar, D. Nedeljkovi, T. Doll *et al.*. Waveguiding in planar photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**: 1937~1939

- 6 B. D'Urso, O. Painter, J. O'Brien *et al.*. Modal reflectivity in finite-depth twodimensional photonic-crystal microcavities[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1998, **15**: 1155~1159
- 7 H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita *et al.*. Self-collimating phenomena in photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**: 1212~1214
- 8 J. Witzens, M. Loncar, A. Scherer. Self-collimation in planar photonic crystals[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, **8**: 1246~1257
- 9 J. Witzens, A. Scherer. Efficient excitation of self-collimated beams and single Bloch modes in planar photonic crystals[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**: 935~940
- 10 D. N. Chigrin, S. Enoch, C. M. Sotomayor Torres *et al.*. Self-guiding in two-dimensional photonic crystals[J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**: 1203~1210
- 11 L. Wu, M. Mazilu, T. F. Krauss. Beam steering in planar-photonic crystals: From superprism to supercollimator[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**: 561~566
- 12 X. Yu, S. Fan. Bends and splitters for self-collimated beams in photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**: 3251~3253
- 13 S. Shi, A. Sharkawy, C. Chen, D. M. Pustai *et al.*. Dispersion-based beam splitter in photonic crystals[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**: 617~619
- 14 D. W. Prather, S. Shi, D. M. Pustai *et al.*. Dispersion-based optical routing in photonic crystals[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**: 50~52
- 15 C. Chen, A. Sharkawy, D. M. Pustai *et al.*. Optimizing bending efficiency of self-collimated beams in non-channel planar photonic crystal waveguides[J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**: 3153~3159
- 16 D. M. Pustai, S. Shi, C. Chen *et al.*. Analysis of splitters for self-collimated beams in planar photonic crystals[J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**: 1823~1831
- 17 S. G. Lee, S. S. Oh, J. E. Kim *et al.*. Line-defect-induced bending and splitting of selfcollimated beams in two-dimensional photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**: 1811061-3
- 18 V. Zabelin, L. A. Dunbar, N. Le Thomas *et al.*. Selfcollimating photonic crystal polarization beam splitter[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**: 530~532
- 19 A. Martinez, P. Sanchis, J. Marti. Mach-Zehnder interferometers in photonic crystals[J]. *Optical and Quantum Electron.*, 2005, **37**: 77~93
- 20 C. Liu, L. Chen. Tunable photonic-crystal waveguide Mach-Zehnder interferometer achieved by nematic liquid-crystal phase modulation[J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**: 2616~2624
- 21 D. Zhao, J. Zhang, P. Yao *et al.*. Photonic crystal Mach-Zehnder interferometer based on selfcollimation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**: 231114-1
- 22 <http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/Meep>