

文章编号: 1001-3806(2011)03-0312-03

一种光子晶体开放腔的特性研究

李雷,肖峻*,张芬,陶宁

(电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

摘要: 为了研究光子晶体开放腔特性,采用平面波展开法和时域有限差分法对顶角为 30° 楔角的光子晶体和空气槽交替组成的新型光子晶体开放腔进行了研究。研究发现,这种结构的光子晶体开放腔在两个归一化频率范围(0.3006 ~ 0.35, 0.6755 ~ 0.6851)内具有负折射特性,并且在负折射频率范围内可形成一个零光程的闭合回路;光子晶体与空气槽的分界面上有高的透射率,能够在某个波长产生共振。结果表明,可以利用共振波长随着折射率的变化而变化的光子晶体开放腔实现折射率的高灵敏度测量。

关键词: 光学设计与制造;光子晶体开放腔;平面波展开法;时域有限差分法;探测

中图分类号: O436 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.03.007

Performance study on an open photonic crystal cavity

Li Lei, XIAO Jun, ZHANG Fen, TAO Ning

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: To study the property of an open photonic crystal cavity, the new open cavity, formed by 30° vertex angle of the photonic crystal and air tank alternately was analyzed based on the plane wave expansion method and finite-difference time-domain method. It was found that the open cavity structure had negative refraction property in both the normalized frequency bands (0.3006 ~ 0.35 and 0.6755 ~ 0.6851), and a zero-optical path closed-loop could be formed with the air tank in the frequency range of negative refraction; and there was a high transmission rate in the photonic crystal and air tank boundaries, so resonance could happen at a certain wavelength. The results indicate that the refractive index can be measured with high sensitivity using this open photonic crystal cavity whose resonance wavelength varies with the refractive index.

Key words: optical design and fabrication; open photonic crystal cavity; plane wave expansion method; finite-difference time-domain method; detection

引言

自从1987年YABLONOVITCH^[1]和JOHN^[2]分别独立地提出光子晶体和光子能带结构以来,光子晶体在理论、实验和应用研究方面取得了很大的进展。光子晶体最基本的特性就是具有光子禁带和“光子局域态”。近几年学者们对光子晶体的负折射特性也进行了大量研究。光子晶体的负折射特性在许多方面都具有潜在的应用^[3-5],如利用光子晶体的负折射特性可以实现“完美成像”,以及制作偏振分束器等^[6];可以利用时域有限差分法和MATLAB将电磁波在真空、光子晶体中的传播可视化,展示特定情况下场的分布。

光子晶体负折射特性的另一个最新的应用是可以

制成开放腔。光子晶体开放腔不同于一般的腔,它没有反射壁,是通过在空气/光子晶体界面上发生负折射使得光线的轨迹构成一个闭合回路。开放腔结构是NOTOMI^[7]在2000年首先提出来的,其基本思想就是利用正负折射率介质使得光程抵消,但是NOTOMI提出的这种开放腔结构是由一个矩形结构实现的,有着较高的反射,从而这种开放腔不能有效工作。2005年,HE等人^[8-12]提出了一种由3个顶角为 60° 楔角的负折射光子晶体和空气槽交替组成的光子晶体开放腔结构。2006年,SUN^[12]等人提出了几种新的光子晶体开放腔结构,其中包括顶角为 90° 的楔角形成的矩形结构光子晶体开放腔以及顶角为 45° 楔角的风车结构的光子晶体开放腔。

作者依据参考文献[12]中提出的一种由顶角为 30° 楔角的光子晶体和空气槽交替组成的光子晶体开放腔结构,对该结构光子晶体开放腔的负折射特性以及其在气体/液体探测方面的应用做详细的分析研究。

作者简介:李雷(1986-),男,硕士研究生,主要从事光子晶体特性方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: junxiao@uestc.edu.cn

收稿日期:2010-06-09;收到修改稿日期:2010-07-26

1 光子晶体的负折射特性

在光子晶体中,光传播的群速率方向垂直于等频率曲线,因此,可在等频率线的结构上找到群速率方向为负,即光的传播方向由等频率曲线向内的频带,由此结构的等频率线所示的频率就是出现负折射现象的频率范围。

选取具有三角晶格结构的2维光子晶体来制作光子晶体开放腔(如图1所示),材料选用 EMERY SAND

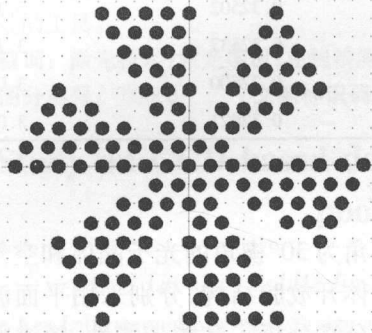


Fig.1 Plan structure of an open photonic crystal cavity

(折射率 $n=4$),介质柱半径 r 取为 $0.18a$ (a 为晶格常数), $a=0.62\mu\text{m}$,初始光源取高斯波束。通过能带计算可以发现,在归一化频率范围 $0.3006 \sim 0.35$ 内,沿着第一布里渊区的 ΓK 方向,随着 Bloch 波矢 k 的增大而频率 ω 减小(如图2所示),意味着群速率的方向

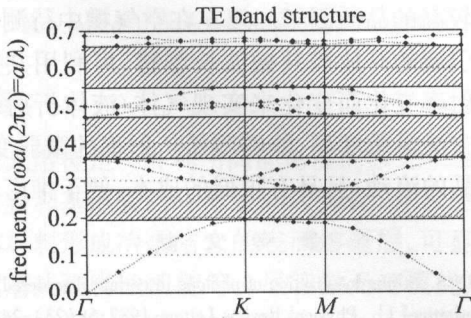


Fig.2 Band structure of the open photonic crystal cavity for TE mode

与波矢方向相反,存在负折射现象。同样沿着第一布里渊区的 ΓM 方向,在归一化频率范围 $0.6755 \sim 0.6851$ 内也出现了负折射现象。图3为出现负折射现象能带的等频率面,从图上可以看出,等频率曲线都接近于一个圆,表明在 $0.3006 \sim 0.35, 0.6755 \sim 0.6851$ 这两个归一化频率范围内,光子晶体结构可以被看成是一个各向同性的介质,整个结构具有负等效折射率。

分别取其中心频率为 0.3253 和 0.6803 。采用时域有限差分法对其进行模拟,结果如图4所示,从图上可以看出,在两个频率下都出现了负折射现象。

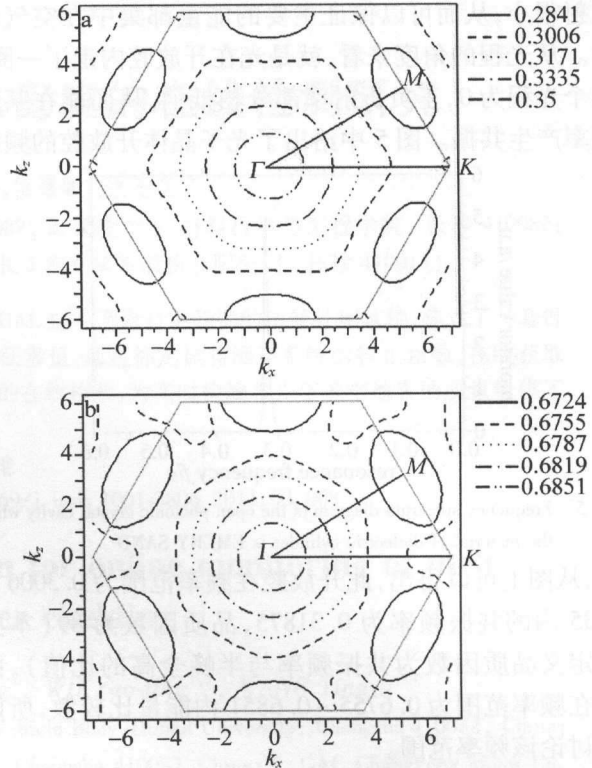


Fig.3 Band of the equi-frequency surface with negative refraction phenomena

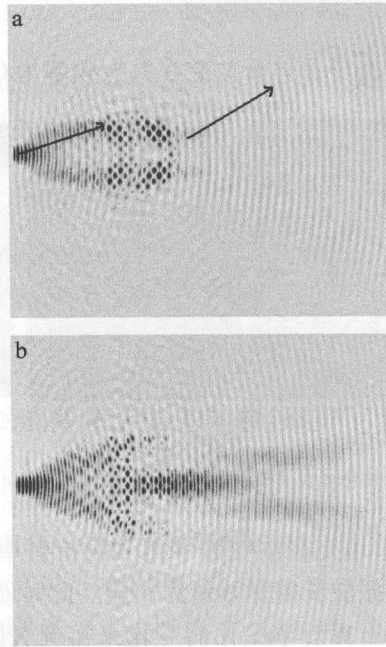


Fig.4 Simulation diagram in the center frequency of the band with the negative refraction phenomena

a—center frequency is 0.3253 b—center frequency is 0.6803

2 光子晶体开放腔特性的数值模拟

当入射光线沿着与光子晶体空气槽分界面方向平行的平面时,界面反射很大,而当入射光线沿着与光子晶体与空气槽分界面方向垂直的平面时,界面反射则很小。因此,采用顶角为 30° 楔角的光子晶体和空气槽交替组成的光子晶体开放腔结构,这样可以使界面

反射很小,从而可以保证主要的能量都集中在空气楔中。从光程的角度来看,就是光在开放腔内走了一圈,整个光程为0,正负折射率部分相抵消,从而能在某个频率产生共振。图5中给出了光子晶体开放腔的频谱

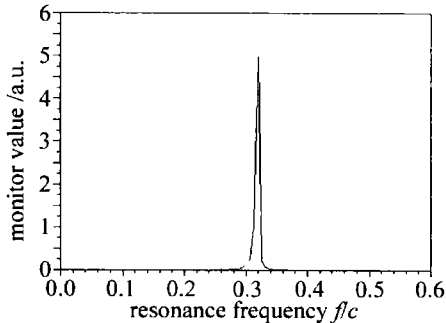


Fig. 5 Frequency spectrum diagram of the open photonic crystal cavity when the material of dielectric cylinder is EMERY SAND

图,从图上可以得出,此开放腔在频率范围为0.3006~0.35内的共振频率为0.31875,品质因数为89(本文中定义品质因数为共振频率与半峰全高的比值),由于在频率范围为0.6755~0.6851内能量比较散,所以不讨论该频率范围。

3 光子晶体开放腔在气体/液体探测方面的应用

图6为光子晶体开放腔在共振频率为0.31875时

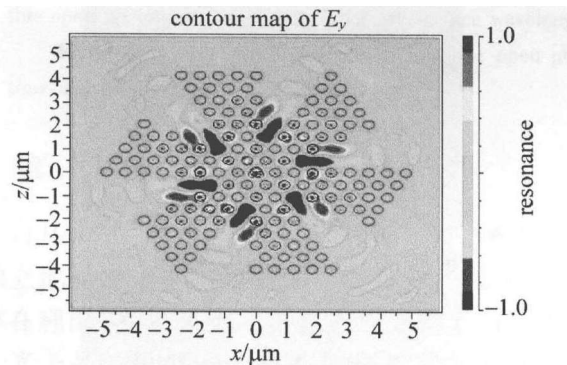


Fig. 6 Strength of field of the open photonic crystal cavity at the resonance frequency of 0.31875

的场强分布,填充在空气槽中待测物折射率变化引起的开放腔共振波长的漂移最为明显。此时就可以利用共振波长随着折射率变化而变化来实现气体/液体的测量。

传统的气体/液体光学探测器的检测机理主要还是分析透过被测物的透射光,通过对透射光的强度变化或者光谱分析进行检测,其对待测物的需求量大,一般还需要对其进行预处理,同时测定时一般还需加入其它试剂,而由此又带来生化反应过慢、并行处理能力弱等缺点。而采用负折射光子晶体开放腔来实现的气体/液体的探测,响应快、样品的用量小且成本低,便于推广普及。

表1中给出了基于负折射光子晶体开放腔测量气体/液体样品折射率比变化的结果(c 为光速)。从表中可以看出,被测物折射率的微弱变化就会引起共振波长的显著变化。通过测量共振波长就可以确定相应的折射率。

Table 1 The change of resonance wavelength with the results of the tested object's refractive index

refractive index	resonance frequency f/c	resonance wavelength/ μm
1.0	0.31875	3.154
1.002	0.31867	3.138
1.004	0.32502	3.122
1.006	0.32537	3.106
1.008	0.32600	3.090
1.01	0.32621	3.074

4 结论

对由顶角为 30° 楔角的光子晶体和空气槽交替组成的光子晶体开放腔结构,分别采用平面波展开法和有限时域差分法分析了其能带特性、频谱特性及在共振频率下的场分布。结果表明,当取光子晶体材料的折射率为4、半径 $r = 0.18a$ 时,光子晶体开放腔在0.3006~0.35,0.6755~0.6851这两个归一化频率范围内具有负折射特性,且在负折射频率范围内可形成一个零光程的闭合回路;在光子晶体与空气槽的分界面上有较高的透射率,因而能够在某个波长产生共振,并具有较高的品质因子。填充在空气槽中待测物折射率变化引起的开放腔共振波长漂移,可利用共振波长随着折射率变化而变化来实现气体/液体折射率的测量。该方法灵敏度高,能够测量折射率的微弱变化,适合于样品的流动,且具有很低的成本,便于推广。

参考文献

- [1] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattice[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23):2486.
- [2] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20):2059.
- [3] GUVEN K, AYDIN K, ALICI K B, *et al.* Spectral negative refraction and focusing analysis of a two-dimensional left-handed photonic crystal lens[J]. *Physical Review Letters*, 2004, B70(20):205125.
- [4] LI Y Y, GU P F, ZHANG J L, *et al.* Analysis of the negative refraction in two-dimensional photonic crystals with wave structure [J]. *Chinese Physics*, 2006, 55(9): 4919-4922 (in Chinese).
- [5] KONG L K, ZHENG Zh Q, FENG Zh H, *et al.* Focusing property of two-dimensional photonic crystals with ring-shaped air holes[J]. *Chinese Physics*, 2009, 58(11): 7703-7707 (in Chinese).
- [6] RONG Ch C, YAN K Zh, XIE Y M. The distribution of the electric field in two-dimension photonic crystals[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1):75-76 (in Chinese).

(下转第411页)

5 实验

实验模拟盾构机实际工作时,标靶随盾构机一起做刚体运动,将标靶和代表盾首的棱镜一起固定在实验平台上(见图9),通过调节实验平台来改变标靶的

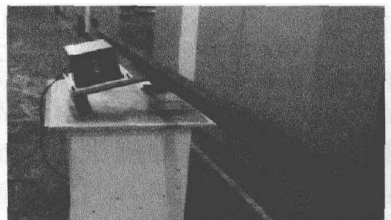


Fig.9 Simulation experiment setup

姿态,使标靶内的双轴电子水平仪的倾斜角示数在 $-3.5^\circ \sim +3.5^\circ$ 之间变化,滚动角示数在 $-12^\circ \sim +12^\circ$ 之间变化,调节全站仪与标靶的距离,使其最近 6.5m,最远 42.1m。用全站仪依次分别测量标靶和盾首棱镜的坐标,并记录下此时无衍射光电子标靶内电子水平仪的示数 θ_x 和 θ_y ,全站仪跟踪标靶时的水平方位角示数 δ ,以及无衍射光斑的中心坐标 (x, y) 。

进行了 30 次实验,按前述方法计算出的盾首中心的东坐标、北坐标和高程值与全站仪直接测得的盾首中心的东坐标、北坐标和高程之差分别由曲线 1, 2, 3 上的点表示,如图 10 所示。本标靶设计要求测角精度

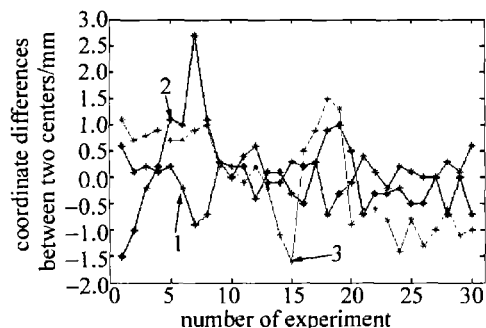


Fig. 10 Coordinate difference between calculated value and measured by total station

为 1mrad,图中可看出最大测量误差为 2.8mm,均方差小于 1mm,满足设计要求。

实验证明:经过这种新型直接映射标定方法标定后的无衍射光电子标靶能够获得较高的测量精度,测

量盾构机盾首的偏差精度达到毫米级,能够满足现场导向要求。

6 结论

尽管本文中所述的直接映射标定方法基本能满足测量精度的要求,但在实际工作中,它存在标定工作数据量太多、标定实验时间过长的缺点,未来可以用自动经纬仪实现自动标定;同时,在用 CCD 上光斑位置插值求光线空间角度的过程中,插值精度也受具体插值算法的影响,有待进一步改进。

参考文献

- [1] FENG D J, PAN Q L, ZHANG F M, *et al.* On the orientation survey of the shield in subway construction[J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*, 2003, 31(5):57-61 (in Chinese).
- [2] ZHANG H M, GU L. On the measurement and the method of computation of the posture parameters of shields[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2004, 41(2):14-20 (in Chinese).
- [3] ZOU W J, ZHU G L, WU X B. Angle measuring system of laser based on array CCD[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(10):91-95 (in Chinese).
- [4] WU X B, ZHU G L, ZOU W J. Research of a PSD-based electric laser system[J]. *Machinery & Electronics*, 2006, 24(7):38-40 (in Chinese).
- [5] PAN M H, ZHU G L. Study of measure methods of the automatic guiding system of shield machine[J]. *Construction Technology*, 2005, 34(6):34-36 (in Chinese).
- [6] LIU D L, HUANG Y K. Guided system VMT of shield machine[J]. *Construction Machinery*, 2003, 23(1):60-61 (in Chinese).
- [7] ZHOU L P, ZHAO B, LI Zh. Theory and generation of non-diffracting Bessel beams[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(4):14-19 (in Chinese).
- [8] ZHANG B, LÜ B D. Analyzing the propagation properties of diffraction-free beams[J]. *Laser Technology*, 1996, 20(1):14-19 (in Chinese).
- [9] ZHAI Zh Sh, ZHAO B. Study on property of central spot of non-diffracting beams[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(5):480-483 (in Chinese).
- [10] ZHAO B, LI Zh. The focus diffraction property of axicon illuminated by inclined plane wave[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(3):299-305 (in Chinese).
- [11] CHEN H, ZHAO B. Global center detection algorithm of non-diffracting beam[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, 29(5):770-773 (in Chinese).
- [12] ZHU G L, WU X B, PAN M H. Analysis of errors in shield automatic guide system[J]. *China Municipal Engineering*, 2006, 31(1):44-47 (in Chinese).

(上接第 314 页)

- [7] NOTOMI M. Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: refractionlike behavior in the vicinity of the photonic band gap[J]. *Physical Review Letters*, 2000, B62(16):10697-10705.
- [8] HE S L, JIN Y, RUAN Zh Ch, *et al.* On subwavelength and open resonators involving metamaterials of negative refraction index[J]. *New Journal of Physics*, 2005, 7: 210.
- [9] HE S L, RUAN Zh Ch. A completely open cavity realized with photonic crystal wedges[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2005, A6(5):355-357.
- [10] RUAN Zh Ch, HE S L. Open cavity formed by a photonic crystal with negative effective index of refraction[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(17):2308-2310.
- [11] KUANG J C, JIN Y, HE S L. An open wedge cavity based on the negative refraction of a photonic crystal[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2006, 16(11):582-584.
- [12] SUN G L, BAKHTAZAD A, JUGESSUR A, *et al.* Open cavities using photonic crystals with negative refraction[J]. *SPIE*, 2006, 6343: 63433M/1-63433M/7.