

压缩六角格子 $[A(BC)]^m$ 结构光子晶体禁带特性

刘亮元, 邓晓鹏

(怀化学院物理与信息工程系, 湖南 怀化 418008)

摘要:通过引入缺陷和色散介质方法,调控光子的运动状态,研究一种压缩 $[A(BC)]^m$ 结构负折射率光子晶体的TE波和TM波的传输特性和色散特性,研究发现两种模的禁带特性随入射角和色散介质折射率的变化而变化,并且其带隙比普通光子晶体的大,而透射带要窄,这为高品质低损耗的谐振腔、微波天线、透射光栅、光波导等新器件的研制提供理论依据。

关键词:光子晶体; $[A(BC)]^m$ 结构;负折射率;禁带

中图分类号:O437

文献标识码:A

Band gap characteristics of photonic crystal with compressed hexagonal lattice $[A(BC)]^m$ structures

LIU Liang-yuan, DENG Xiao-peng

(Department of Physics and Information Engineering, University of Huaihua, Huaihua 418008, China)

Abstract: By introducing defects and dispersion medium, a kind of compression $[A(BC)]^m$ structure of photonic crystals is studied. It has negative refractive index. TE wave and TM wave propagation and band gap characteristics are analyzed. It is shown that dispersion properties of the two modules change with the incident angle and refractive index of the dispersion medium, its band gap is bigger than conventional photonic crystals, and the transmission band is more narrow. It provides a theoretical basis for the development of high quality low loss resonator, microwave antenna, transmission grating, optical waveguide devices.

Key words: photonic crystals; $[A(BC)]^m$ structure; negative refractive index; band gap

1 引言

光子晶体是将不同介电常数的介质材料在空间按一定的周期排列所形成的一种人造“晶体”结构。半导体中离子的周期性排列产生了能带结构,而能带又控制着载流子(半导体中的电子或者空穴)在半导体中的运动。相似的,在光子晶体中是由光的折射率指数的周期性变化产生了光带隙结构,从而由光带隙结构控制着光在光子晶体中的运动,类似于半导体材料中的电子在周期性势场作用下形成能带结构,在光子晶体中传播的光子能量也会有带状结构,带与带之间会出现光子禁带,频率落在禁带中的光子不能在晶体中传播。因此,又可以称光子晶体为光子带隙材料或光子半导体^[1-2]。光子晶体具有光子带隙,即可控制电磁波在其中的传播,负折射

率材料应用到光子晶体中可以形成新型光子晶体,且具有普通光子晶体不同的许多性质,通过引入缺陷、非线性、色散介质等方法,可以实现对光的传播进行控制,从而调节光子的运动状态,一些文献研究了一维光子晶体透射率随入射角的变化而变化,从而得到TE波和TM波的透射率随频率的变化而响应的曲线^[3-4],一些文献研究了一维光子晶体低色散和掺杂缺陷模特性^[5-6]。不管是色散特性还是偏振特性均强烈地依赖于光子晶体色散介质材料折射率、孔大小和孔间隔等。

基金项目:湖南省教育厅科研项目(No. 09C758)资助。

作者简介:刘亮元(1974-),男,硕士,副教授,现主要从事光通信和光信息处理的研究。E-mail:liuly1997@163.com

收稿日期:2010-09-30;修订日期:2010-11-20

2 结构设计和理论模型

我们研究一种新型结构压缩六角点阵排布光子晶体,由一种双负折射率材料与两单负折射率材料耦合后生成的光子晶体,其结构为[A(BC)]^m,m表周期数,如图1和图2所示。A为双负折射率材料,电常数和磁导率表示为:ε_A<0,μ_A<0,B为磁单负折射率材料,介电常数和磁导表示为:ε_B>0,μ_B<0,C为电单负折射率材料,介电常数和磁导率表示为:ε_C<0,μ_C>0。对应的折射率分别为n_A=√ε_Aμ_A和n_{BC}=-√ε_{BC}μ_{BC},电磁波从空气入射到[A(BC)]^m结构正负折射率交替构成的六角格子光子晶体上,采用周期结构全矢量平面波方法(FV-PWM),研究了这种含色散介质负折射率材料的压缩六角格子光子晶体的TE模和TM模禁带特性。

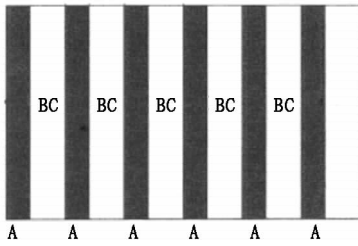


图1 [A(BC)]^m 结构光子晶体



图2 压缩六角格子[A(BC)]^m 结构光子晶体截面图

通常金属反射镜的反射率不依赖入射角,但它对入射电磁波有很强的吸收,使反射率不高,而传统的多层高反射模则会随入射角的增大而降低。J. E. Dowling^[7]从理论上得到一维周期性光子晶体具有全向光子晶体带隙的必要条件:θ₁^{max} = arcsin(n₀/n₁) < θ_B = arcsin(n₂/n₁),n₁,n₂分别是两种介质的折射率,θ₁^{max}是从n₁介质入射至n₂介质中的最大折射率,θ_B是介质n₁和介质n₂界面的布儒斯特角。

在周期性排布的光子晶体中,E→(r)和H→(r)都是空间坐标的周期性函数,将E→(r)和H→(r)展开成傅里叶幂级数:

$$\frac{1}{\epsilon(r)} = \sum_G K(G) e^{iG \cdot r} \tag{1}$$

$$E(r) = \sum_G B(k+G) e^{iG \cdot r}$$

$$H(r) = \sum_G A(k+G) e^{iG \cdot r} \tag{2}$$

考虑到电磁波的TE模式和TM模式偏振性,可以将H→(r)的旋度方程∇×∇×(1/ε(r))H→(r)=

ω²/c²H→(r)展开并代入E→(r)和H→(r)的傅里叶幂级数得消去电场E得磁场H表达式:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\epsilon(r)} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\epsilon(r)} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 H = 0 \tag{3}$$

将式(3)代入E→(r)傅里叶幂级数E(r)=∑_GB(k+G)e^{iG·r}得:

$$\sum_G K(G-G') A(k+G')(k+G')(k+G) = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 A(k+G) \tag{4}$$

TE波偏振的电磁波在六角格子光子晶体的传播问题变成求解一个对称矩阵的本征值和本征函数问题。对于TM波偏振,也有如下方程:

$$\sum_G K(G-G') B(k+G')(k+G)^2 = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 B(k+G) \tag{5}$$

根据薄膜光学理论^[8],电磁波在每层介质中的传输特性可用一个2×2的特征矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} \cos(k_z^i \Delta z) & \frac{\mu_i}{\sqrt{\epsilon_i}} \sin(k_z^i \Delta z) \\ \frac{\sqrt{\epsilon_i}}{\mu_i} \sin(k_z^i \Delta z) & \cos(k_z^i \Delta z) \end{bmatrix} \tag{6}$$

其中,k_zⁱ=±ω/c√ε_iμ_i,正折射材料A时取“+”,负折射材料BC时取“-”。

六角格子光子晶体是由N个基本周期组成,根据在无限周期排列的系统布洛赫定理ψ(z+a)=e^{-ka}ψ(z),作矩阵乘法就可以求出整个一维光子晶体的特征矩阵:

$$M = M_A M_{BC} M_A M_{BC} \dots = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \tag{7}$$

3 数值模拟结果

设定[A(BC)]^m结构光子晶体的参数分别为:ε_A=-2,μ_A=-1,n_A=√2,ε_{BC}=-4,μ_{BC}=-1.5,n_{BC}=-√6,波长λ=1550nm和它相对应的中心频率ω_{min}=1.22THz,通过数值计算可以得到六角格

子负折射率光子晶体色散图,如图3和图4所示。

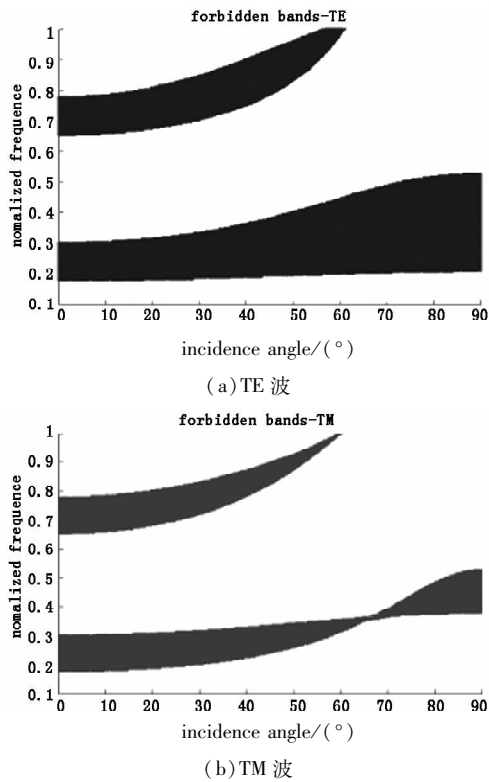


图3 $[A(BC)]^m$ 结构光子晶体带隙随入射角变化

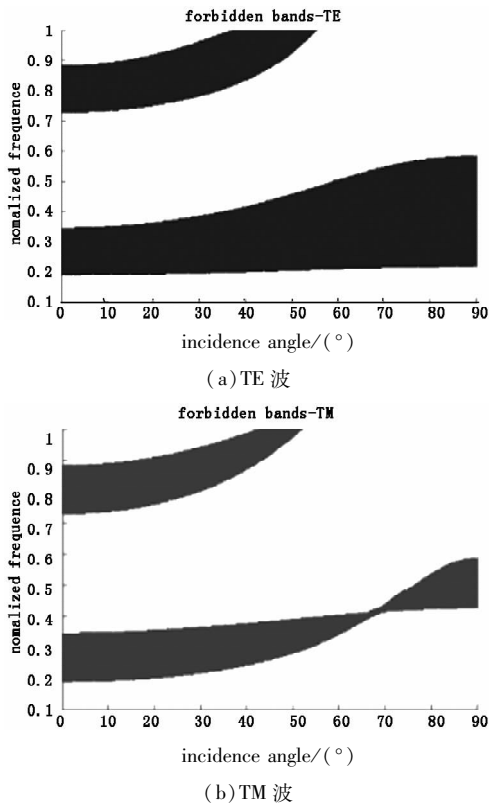


图4 $[A(BC)]^m$ 结构光子晶体带隙色散介质折射率变化

由图3可以看出,入射角度的不同对光子晶体的禁带宽度和禁带的位置也不同,TE波第一禁带宽度随着入射角增大而增大,频带中心也随之向着高

频方向移动,第二禁带宽度随着入射角增大而减少,频带中心向着高频方向移动。TM波随着入射角度的不断增加,光子晶体的第一和第二禁带宽度均变的越来越窄,禁带中心频率向着高频方向移动,在入射角为 68° 时,禁带最窄,随着角度增大,禁带又随之变宽,整个的色散关系伴随的角度的变化是一个两边比较宽敞中间比较狭小的“平台”。角度不同,平移的速度也有所不同,角度越大,禁带中心移动的速度就越快。

由图4可以看出,正负折射率 $n_A = \sqrt{\epsilon_A \mu_A}$ 和 $n_{BC} = -\sqrt{\epsilon_{BC} \mu_{BC}}$ 的改变也会影响光子晶体的禁带宽度和禁带的位置,随着 n_A 和 n_{BC} 相对折射率不断增加,TE波禁带宽度变窄,TM波禁带宽度变宽,而且禁带的位置也向高频率(短波长)方向移动,TE偏振光和TM偏振光的禁带中心位置均向短波方向移动,这与John D. Joannopoulos文献[9]的结论比较吻合。

当入射角增大时,光子晶体禁带的周期也随着变大了,但是对于每个角度入射所形成的各个禁带的宽度还是保持相等。结果表明,由正负折射率交替组成的光子晶体带隙比普通光子晶体的大,而透射带要窄。如果在使用光子晶体的过程中,考虑到入射角对光子晶体禁带的影响而沿光子晶体的法线两侧转动光,光子带隙中缺陷态的频移方向随缺陷层厚度改变而变化,对研究光谱的红移和蓝移也有较大的帮助。

4 结论

对于一维 $[A(BC)]^m$ 结构正负折射率交替光子晶体,入射光的角度和色散介质正负折射率比值的变化都对光子晶体的禁带产生较大影响,当入射光的角度变大时,TE波光子晶体的第一禁带随着变宽,TM波光子晶体的第一禁带随着变窄,中心频率向高频率处移动,不同的角度移动的速度是不同的,角度增大时,带隙随角度变化明显加快,由 $[A(BC)]^m$ 结构正负折射率交替组成的光子晶体带隙比普通光子晶体的大,而透射带要窄。对于 $[A(BC)]^m$ 结构六角格子光子晶体光子带隙,在某些共同的频率范围内,任何偏振光以任何入射角度入射都不能在光子晶体中传播,这些共同的频率范围就是光子晶体的完全带隙,具有完全带隙的一维光子晶体又称为全方位反射镜,利用这一特征可以制造高品质的全方位反射镜及超低损耗波导。通过计算在 $0 \sim 68^\circ$ 入射角范围内,TE波和TM波在 $650 \sim 900 \text{ nm}$ 范围内具有99%高反射带隙,在可见

光波段 $0 \sim 68^\circ$ 入射角范围内实现了 75 nm 的禁带, 通过掺入多孔的缺陷层, 则在 1.55 μm 的红外波段可以得到品质因数 Q 为 45 的谐振微腔。负折射率六角格子光子晶体可广泛应用于微波天线、透射光栅、光波导等器件的研制, 其中引入缺陷控制对应频率的光输出, 还可以用于制作高品质、低损耗的谐振腔, 用于微波源或激光器的谐振腔, 从而替代传统的光学元器件, 体现出巨大的优越性和应用前景。

参考文献:

- [1] Winn J N, Fink Y, Fan Shan Hui, et al. Omnidirectional re-reflection from a one dimensional photonic crystal[J]. Opt Lett, 1998, 23(20): 1573 - 1575.
- [2] Felix C L, Vurgaf Tman I, Bewley W W, et al. Highbrightness mid-infrared photonic-crystal distributed-feedback lasers[J]. J Mod Optic, 2002, 49(5 - 6): 801 - 810.
- [3] Wang Tongbiao, Liu Nianhua. Band structures and electric fields of one - dimensional photonic crystals composed of alternate layers of left-handed and right-handed materials [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(10): 5878 - 5882. (in Chinese)
王同标, 刘念华. 正负折射材料组成的一维光子晶体的能带及电场 [J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5878 - 5882.
- [4] Lin Guohua, Wang Yongshun, Zhang Yu. Study on properties of polarization of one-dimension photonic crystal comprised by a dispersive negative-index material[J]. Journal of Nanjing Normal University, 2010, 33(2): 43 - 46. (in Chinese)
林国华, 王永顺, 张羽. 含色散特性的负折射材料的一维光子晶体偏振特性的研究[J]. 南京师范大学学报, 2010, 33(2): 43 - 46.
- [5] Zhang Yani. Low-dispersion high-birefringence effect of squeezed hexagonal lattice elliptical hole photonic crystal fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(6): 4050 - 4055. (in Chinese)
张亚妮. 压缩六角点阵椭圆孔光子晶体光纤的低色散高双折射效应[J]. 物理学报, 2010, 59(6): 4050 - 4055.
- [6] Wu Jijiang. Defect modes of one-dimensional photonic crystals with gradual refractive index layer [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(3): 308 - 310. (in Chinese)
武继江. 一种缓变结构一维光子晶体的缺陷模研究 [J]. 激光与红外, 2009, 39(3): 308 - 310.
- [7] Dowling J E. Mirror on the wall; you, re omnidirectional after all [J]. Science, 1998, 282: 1841 - 1842.
- [8] Born M, Wolf E. Principles of optics [M]. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 49 - 54.
马科斯·玻恩, 埃米尔·沃耳夫. 光学原理 [M]. 7 版, 北京: 电子工业出版社, 2005: 49 - 54.
- [9] John D Joanno Poulos, Steven G Johnson. Photonic crystals molding the flow of light [M]. Princeton: Princeton Universit Press, 2007: 149 - 158.