

基于各向异性光子晶体带隙的窄带带通角度滤波器

刘艳红 董丽娟 刘丽想 石云龙*

(山西大同大学固体物理研究所, 山西 大同 037009)

摘要 理论研究了基于各向异性光子晶体带隙的窄带带通角度滤波器。利用电磁有限元数值仿真方法计算出不同入射角的光子晶体的角度带隙结构及掺杂后光子晶体的角度缺陷模。数值计算结果表明,随着入射角度的改变各向异性光子带隙结构是可调的,而且在这个系统中掺杂后能够产生随入射角度变化的窄带缺陷模,因此掺杂的各向异性结构具有角度滤波的特性,可以实现窄带角度滤波,有望在未来的光子器件中发挥作用。

关键词 光电子学;通带滤波器;各向异性光子带隙;角度带隙;空间和频率滤波

中图分类号 TN713 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0823001

Narrow Bandpass Angular Filter Based on Anisotropic Photonic Band Gap

Liu Yanhong Dong Lijuan Liu Lixiang Shi Yunlong

(Institute of Solid State Physics, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)

Abstract A narrow bandpass optical angular filter is proposed based on the band gaps of one-dimensional anisotropic photonic crystal. The angle photonic band gap structures and the angle defect modes of doped anisotropic structures are calculated by the electromagnetic finite element method. Numerical simulations show that there is a strong correlation between the photonic band gap and the incident angle, as well as the defect modes are tunable based on the incident angles. Unique properties of this systems emerging from doped anisotropic structures can realize a narrow band angle filtering which can be used as a good optical device in the future.

Key words optoelectronics; bandpass angle filter; anisotropic photonic band gap; angular photonic band gap; space and frequency filtering

OCIS codes 230.4170; 230.1150; 230.7408

1 引言

光学滤波器是常用的无线电通信和光通信元器件之一,在光通讯、光信息处理及光电子学等方面有着广泛的应用前景。滤波器包括频率滤波器和空间滤波器。基于多层周期结构的频率滤波器和空间滤波器已经得到广泛的研究^[1-6],但这些器件不能同时实现频率滤波和特定方向空间滤波功能。文献[5]中利用法布里-珀罗(F-P)腔滤波器实现了空间滤波,而文献[4]利用一维周期性结构的共振隧穿效

应,并结合由负折射材料引起的零平均折射率带隙使得对某一频率范围内入射的电磁波仅在特定入射角度时才能完全透射,而在其他角度是不透明的,但是这种共振隧穿效应容易受到其他频率的影响不能发生在较宽的带隙内。文献[6]中利用负折射率特异材料和正常材料交替形成一维多层结构实现了零有效折射率带隙,实现了滤波频率比较固定的滤波特性。一维周期性介质层状结构是 20 世纪 90 年代初出现的一种新型周期性人工微结构材料,它能够

收稿日期: 2013-02-24; **收到修改稿日期**: 2013-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(10974123, 11104169)、高等学校博士学科点专项科研基金(20090072110052)、山西省自然科学基金(2010021006)、山西省高校科技研究开发项目(20111119)、山西大同大学博士启动项目(201202)

作者简介: 刘艳红(1979—),女,博士,讲师,主要从事人工微结构材料、特异材料等方面的研究。

E-mail: 09liuyan hong@ tongji. edu. cn

* **通信联系人**。E-mail: shi_yunlong@yahoo. com. cn

在某一频段内产生与光偏振无关,入射角度无关的全反射^[8]。如果一个物质系统主要依赖入射角度来传输光,则这个系统也会产生许多新奇的物理现象。一般的周期性结构虽然对光波具有角度分辨能力,但是这种分辨强烈依赖于频率,这样就不利于制作角度滤波器。可以利用各向异性特异材料与一般介电材料交替排列构造周期性结构,这样光在某些入射角度范围能够全透射,而在其他角度则是全反射,而且角度选择在很大频率范围内不依赖于极化方向。在自然界本身存在各向异性特异材料^[9],而且还可以通过人工微结构实现,对于材料的选择变得更有可能。

本文设计了基于各向异性特异材料的一维周期性结构,该结构具有角度光子带隙(PBG),在很大角度范围内($22.5^\circ \sim 90^\circ$)光都是不透明的,即可以实现很宽的带隙^[7]。在该结构中掺入空气或者介质杂质层,在带隙内会出现较窄的缺陷模,而且缺陷模的位置可以随着入射角度的改变来调节,这样就可以同时实现频率和空间滤波效应。

2 模型和计算

根据文献[7]中的方法利用一维各向异性材料实现跟角度相关的光子带隙。考虑到光从真空入射到一维各向异性周期结构,它由两种材料交替排序:材料层 A 为各向异性材料其介电常数为 ϵ_A , 磁导率为 μ_A , 厚度为 d_A , 材料 B 为一般材料其介电常数为 ϵ_B , 磁导率为 μ_B , 厚度为 d_B 组成。如图 1 所示,有限周期一维光子晶体结构表示 $(AB)_{18}$, 材料 A 和材料 B 的电磁参数见参考文献[7], 即令 A 为各向异性材料 $\epsilon_A = [1.23, 1.23, 2.43]$, 且 $\mu_A = \epsilon_A$, 各向异性材料可以通过人工微结构材料的方法实现或者是直接用天然各向异性材料,如 TiO_2 , B 为一般材料 $\epsilon_B = 1.23, \mu_B = 1$, 在图 1 中给出各向异性周期结构的结构示意图。利用有限元数值仿真方法计算光波在结构中的透射系数,从而得到透射谱。只考虑 TM 模的电磁波,即电场方向与入射面平行。图 2 中给出不同入射角情况下透射谱,计算中设置材料 A 和材料 B 的厚度都为 10 mm。从图中可以看到带隙的位置和宽度都会随着入射角的变化而变化,从而实现了角度带隙。图 3 给出了带隙中心频率位置随着入射角的变化曲线,从图中可以看到随着入射角度的增加,带隙的中心频率发生了蓝移,而且变化比较大。

为了得到带通角度滤波器,还计算了掺杂的各向

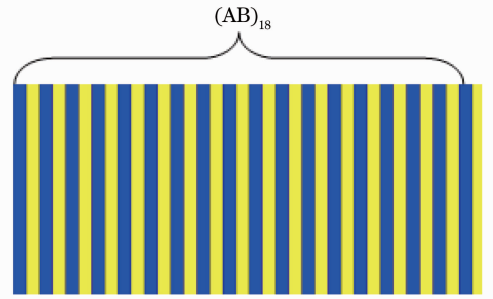


图 1 各向异性周期结构图(其中蓝色层为各向异性材料 A,黄色层为一般材料 B)

Fig. 1 Scheme of anisotropic periodic structure (the blue layer is anisotropic material A, the yellow layer is general material B)

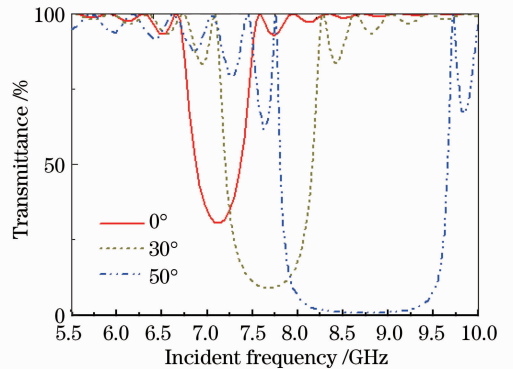


图 2 有限周期各向异性结构的透射谱

Fig. 2 Transmittance spectra of the finite period anisotropic structure

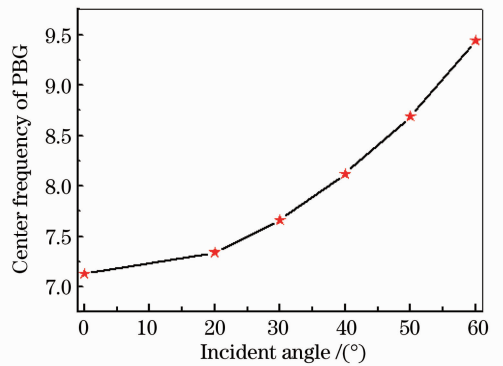


图 3 各向异性光子带隙中心频率随入射角度的变化

Fig. 3 Center frequency of anisotropic photonic band gap vary with the incident angle

异性周期性结构的透射谱。图 4 给出了有限周期结构的掺杂一维各向异性结构示意图,其中 C 为缺陷层,计算中设置材料 C 为空气。图 5 给出了不同入射角度的缺陷模的位置及宽度,从图中可以看到随着入射角度从 0° 增大到 50° ,光子晶体缺陷模的 Q 因子在增大,且中心频率从 7.15 GHz 增大到 9.07 GHz,因此可以实现窄带带通角度滤波特性。同时计算出

射角为 20° 时的缺陷模的电磁场分布如图 6 所示,从图中可以看到,电磁场是强烈局域在缺陷层内的。

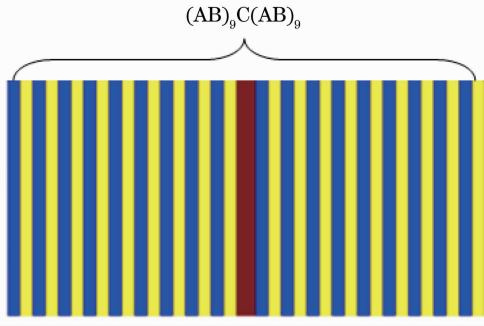


图 4 掺杂后的各向异性周期结构图(其中 C 层为杂质层)

Fig. 4 Scheme of doped anisotropic periodic structure (the C layer is impurity layer)

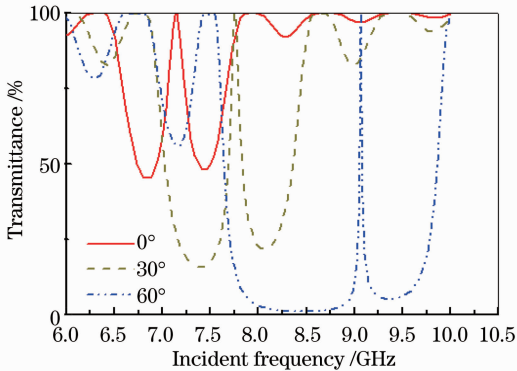


图 5 有限周期掺杂各向异性结构缺陷模(其中空气层的厚度为 10 mm)

Fig. 5 Defect mode of the finite period doped anisotropic structures (the thickness of air layer is 10 mm)

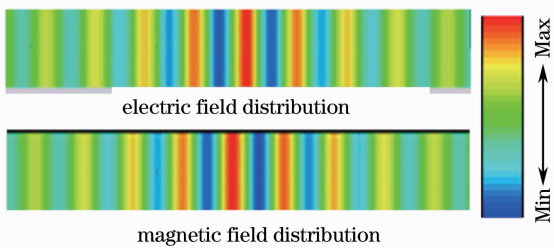


图 6 角度缺陷模电磁场分布图(入射角为 20° , 缺陷模厚度为 10 mm)

Fig. 6 Electromagnetic field distribution for the angular defect mode (the incident angle is 20° and the thickness of the impurity layer is 10 mm)

缺陷模的产生是因为电磁波在空气缺陷层内部的共振效应,所以缺陷层共振所需的波长与空气层的厚度密切相关。如图 7 所示,各个透射峰对应的

空气厚度分别是 8, 10, 12 mm, 可见通过调节空气层的厚度可以调节缺陷模的位置,从而实现空间滤波的特性。

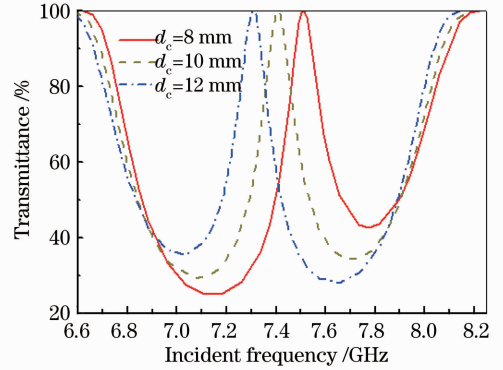


图 7 入射角为 20° 时,不同厚度缺陷层对应的角度缺陷模

Fig. 7 Angle defect mode of defect layer of different thicknesses with the incident angle of 20°

3 结 论

通过设计由各向异性材料和普通材料组成的周期交替结构实现的特殊的角度带隙,即带隙的形状强烈依赖于角度。由于非同寻常的光子带隙,必定会有特殊的缺陷模的存在。利用掺杂后的各向异性周期结构实现了窄带角度滤波特性,实现了窄带通带角度滤波器,而且可以通过调节空气缺陷层的厚度把该结构设计成频率和空间滤波器,虽然考虑的是微波段,但是可以基于同样的思想,通过调节结构常数,把电磁波频率从微波段扩展到其他波段。

参 考 文 献

- Jiang Haitao, Chen Hong, Li Hongqiang, *et al.*. Compact high-Q filters based on one-dimensional photonic crystals consisting single-negative materials [J]. *J Appl Phys*, 2005, 98 (1): 013101-013105.
- Liang Guanquan, Han Peng, Wang Hezhou. Thin-film optical filters with both functions of incident angle and frequency[J]. *Acta physica Sinica*, 2004, 53(7): 2197-2200.
- 梁冠全, 韩鹏, 汪河洲. 空间与频率双性能的薄膜光学滤波器[J]. *物理学报*, 2004, 53(7): 2197-2200.
- Xu Jingping, Wang Ligang, Yang Yaping. Realization of an angular filter using one-dimensional photonic crystal containing negative refractive metamaterials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(6): 2765-2770.
- 许静平, 王立刚, 羊亚平. 利用含负折射率材料的光子晶体实现角度滤波器[J]. *物理学报*, 2006, 55(6): 2765-2770.
- D Mao, Z B Ouyang, J C Wang. A photonic-crystal polarizer integrated with the functions of narrow bandpass and narrow transmission angle filter [J]. *Appl Phys B*, 2008, 90(1): 127-131.
- X Z Sun, P F Gu, M Y Li, *et al.*. Tunable spatial demultiplexer based on the Fabry-Perot filter [J]. *Opt Express*, 2006, 14(18): 8470-8475.

6 Wang Jiayu, Wang Yongshun, Guan Helan, *et al.*. Tunable frequency filter and directional filter based on one-dimensional photonic crystals containing negative refraction materials[J]. *J Synthetic Crystals*, 2011, 40(2): 400–404.
王嘉宇, 王永顺, 管荷兰, 等. 基于负折射率材料一维光子晶体可调节的频率和方向滤波器[J]. *人工晶体学报*, 2011, 40(2): 400–404.

7 Rafif E. Hamam, Ivan Celanovic, Marin Soljāčić. Angular photonic band gap [J]. *Phys. Rev. A*, 2011, 83(3): 035806.
8 John D Joannopoulos, Steven G Johnson, Joshua N Winn, *et al.*. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, 2nd ed[M]. Princeton: Princeton University Press, 2008.
9 Pochi Yeh. *Optical Waves in Layered Media*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1988.

栏目编辑: 韩 峰