

基于掺Bi复合稀土铁石榴石光子晶体滤波器

梅晨¹,陈鹤鸣^{2*}

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院,南京 210023;2. 南京邮电大学 贝尔英才学院,南京 210023)

摘要:为将磁性介质引入到光子晶体滤波器中,提高滤波器性能,提出一种新型二维正方晶格光子晶体滤波器,该滤波器由线缺陷波导和环形谐振腔组成,环形谐振腔由4层掺Bi复合稀土铁石榴石(TbYbBiIG)介质柱形成,通过外加磁场改变环形腔介质柱的磁导率来改变谐振腔介质柱的折射率,使谐振腔的谐振频率发生改变,从而实现1.55 μm波段滤波。基于时域有限差分法(FDTD)的原理,应用Lumerical软件进行仿真分析,结果表明:该滤波器性能优良,插入损耗为0.46dB,3dB带宽为11.46GHz。

关键词:光子晶体;滤波器;谐振腔

中图分类号:TN814 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)06-0021-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.06.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Photonic crystal filter based on Bi-doped composite rare earth iron garnet

MEI Chen¹, CHEN Heming^{2*}

(1. College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 2. Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to introduce magnetic medium into photonic crystal filter and improve its performance. A new two-dimensional square lattice photonic crystal filter is proposed in this paper. The filter consists of a linear defective waveguide and a ring resonator. The ring resonator consists of four layers of Bi-doped composite rare earth iron garnet (TbYbBiIG) dielectric pillars. By changing the permeability of the dielectric pillars of the ring resonator through an applied magnetic field, the refractive index of the dielectric pillars of the ring resonator is changed, so that the resonant frequency of the cavity is changed. 1.55 μm band filtering is realized. Based on the principle of finite-difference time-domain method(FDTD), simulation analysis is carried out with Lumerical software. The results show that the filter has excellent performance, insertion loss is 0.46dB, and bandwidth of 3dB is 11.46GHz.

Key words: photonic crystals; filter; resonant cavity

0 引言

光子晶体是一种介电常数在空间周期性变化的结构,该介质中存在光子禁带,处于非禁带波段的电

磁波才能在其中传播。滤波器用于对信号中特定频率的频点或该频点以外的频率进行有效滤除,得到一个特定频率的信号。基于光子晶体的光通信器件结构紧凑性,在未来光集成芯片和全光通信网络中具有巨大应用前景。相关研究已经引起关注,并成为目前光通信领域研究的热点。光子晶体滤波器是波分复用器重要的组成部分,在波分复用光通讯领域有着极其重要的地位。

光子晶体滤波器分为梳状滤波器^[1]和二维光子晶体滤波器^[2]。2003年,张玉萍等人^[3]提出了一维光子晶体滤波器;Yoshithiro Akahane^[4]为首的研究团队成功地制作出了二维光子晶体微腔谐振器;Chih-Wen Kuo

收稿日期:2019-01-24。

基金项目:国家自然科学基金(批准号:61571237)资助;江苏省自然科学基金(批准号:BK20151509)资助。

作者简介:梅晨(1994-),女,湖北黄冈人,硕士研究生,本科毕业于南京邮电大学光学工程专业,从事光通信与光电子器件方面的研究。研究生阶段参与了国家自然科学基金(批准号:61571237)项目和江苏省自然科学基金(批准号:BK20151509)项目的研究;主要研究方向是光子晶体滤波器和磁性介质磁控可调光子晶体滤波器。



*通信作者:陈鹤鸣(E-mail:lchhm@njupt.edu.cn)。

等人^[5]设计出光子晶体滤波器,利用了二维光子晶体谐振腔与波导之间的耦合作用实现滤波的光子晶体光滤波器,但谐振波长带宽过窄,导致波导与谐振腔之间的耦合比较困难。随着研究的深入与科学的发展,对光子晶体材料多样性的研究越来越多。2008年, Hasek 等人^[6,7]在光子晶体中填充 N-(4-甲氧基苄叉)-正丁基苯胺(5CB)向量液晶材料,但液晶材料光子晶体滤波器的动态响应慢。针对上述问题,又有学者提出引入磁性材料^[8-11],通过将磁性介质引入到点缺陷中,从而形成一种新型由磁性介质和介质交替构成的光子晶体滤波器^[12,13]。2011年,郭展等人^[14]在二维光子晶体中填充磁性铁氧体材料^[15-17],实现了 0.8314~1.08542THz 波段滤波。2016年,顾艳等人^[18]提出了一种基于磁性光子晶体的高性能微波带通滤波器。同年,滕晨晨等人^[19]提出一种采用石榴石型铁氧体磁性材料的太赫兹滤波器,通过改变外磁场影响铁氧体材料的磁导率,使谐振频率发生改变,从而对太赫兹波进行滤波。但这些磁光子晶体器件工作波长多处于太赫兹波段(频率为 0.1~10THz,波长为 30 μm ~3mm),而对 1.55 μm 波段的研究较少。

因此,本文采用磁性介质光子晶体,设计一种基于掺 Bi 复合稀土铁石榴石(TbYbBiIG)的二维正方晶格光子晶体滤波器。

1 结构设计与原理分析

本文设计的磁光子晶体滤波器的结构如图 1 所示。空气基底中排列 25 $\times$ 25 正方形晶格的圆柱形介质柱,背景空气折射率 $n=1$ 。因该光电子基础材料需要具备使用范围广泛、生产使用量足够大,且需要对磁场不敏感等特性,所以介质柱的材料选择 Si,折射率 $n=3.45$,半径 $R=0.1\mu\text{m}$,晶格常数 $a=0.54\mu\text{m}$ 。在完整光子晶体中心沿着横轴方向去掉一排介质柱,形成一个直

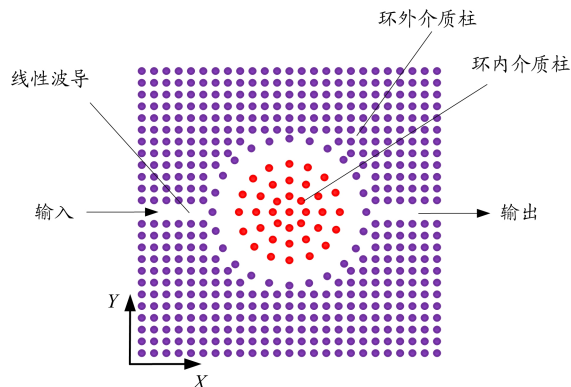


图 1 磁光子晶体滤波器圆环形谐振腔结构图

波导作为输入波导和输出波导,左侧为输入端,右侧为输出端。由于传统点腔结构简单性能单一,不利于功能多变,故本文滤波器的谐振腔选择圆环形谐振腔。环形谐振腔的线宽窄,具备更强的拓展性和灵活性。中心的环形谐振腔分为环外介质柱和环内介质柱,环内介质柱由 4 层圆型掺 Bi 复合 TbYbBiIG 介质柱构成,环外是 Si 圆形介质柱。图 1 中圆点代表半径为 R 的圆柱状的介质柱,介质柱之间的区域为空气。

磁光子晶体滤波器的核心部分谐振腔是在腔内引入 4 层 TbYbBiIG 介质柱。TbYbBiIG 是一种具有铁磁性的金属氧化物,具有较高的介电性能、对磁场敏感、制作的器件响应速度快、饱和磁化强度较低和在高频时有较高的磁导率等优点。其中,石榴石型铁氧体晶体在极化均匀的情况下,可实现低损耗传输,且吸收系数低。对于 TE 模式,外磁场方向沿 Y 方向时,因磁场方向与 TE 模式的磁场分量 H_z 方向垂直,引起周围磁偶极子的运动,使磁导率因外加磁场下的偏振特性发生改变,TbYbBiIG 在沿 Y 方向的外加磁场控制下的磁导率张量为^[19]:

$$[\mu_y] = \begin{bmatrix} \mu_y & 0 & -jk \\ 0 & \mu_0 & 0 \\ jk & 0 & \mu_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中张量的矩阵元为^[19]:

$$\mu_y = \mu_0 \left(1 + \frac{\omega_0 \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \quad (2)$$

$$k = \mu_0 \frac{\omega \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (3)$$

其中, μ_0 为真空中的磁导率, $\mu_0=4\pi \times 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{M}^{-1}$; ω 为传输光的角频率, $\omega=2\pi c/\lambda$ (此时波长 $\lambda=1.55\mu\text{m}$), $\omega_m=4\pi\gamma M_s$, $\omega_0=\gamma B_0$; B_0 为外加磁场的磁场强度; γ 为磁旋比, $\gamma=1.759 \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。当外磁场方向沿 y 方向时,TE 模对应的介质柱的磁导率 μ_{TE} 由式(1)、式(2)和式(3)可得:

$$\mu_{\text{TE}} = \frac{\mu_y^2 - k^2}{\mu_y} \quad (4)$$

本文使用的铁氧体材料为 TbYbBiIG 晶体,在 0.7~2.5 μm 波段的吸收损耗很小,可以忽略,其饱和磁化强度为 $4\pi M_s=6 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 。由式(4)可以得到当外磁场方向沿 Y 方向时,磁性介质柱的磁导率 μ_{TE} 与磁场强度 B_0 之间的关系曲线,即 TbYbBiIG 晶体在不同磁场强度下介质柱的磁导率变化曲线如图 2 所示。

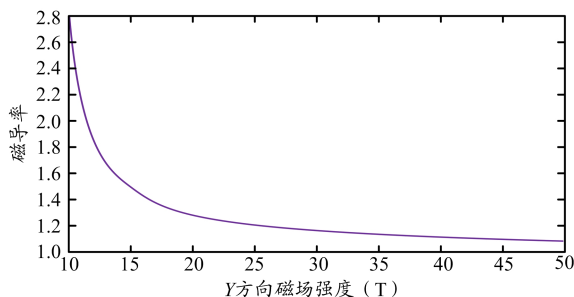


图2 1.55 μm 波段下的磁导率与外磁场的磁场强度关系

TbYbBiIG 材料的折射率计算式为:

$$n_{TE} = \sqrt{\epsilon \mu_{TE}} \quad (5)$$

由式(5)可知,在 1.55 μm 波段工作时,内环形腔磁性介质柱的折射率 n_{TE} 与 Y 方向外磁场的磁场强度关系如图 3 所示。

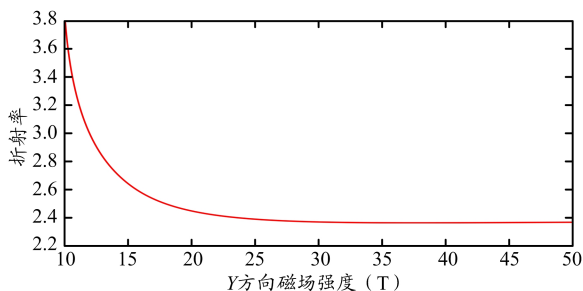


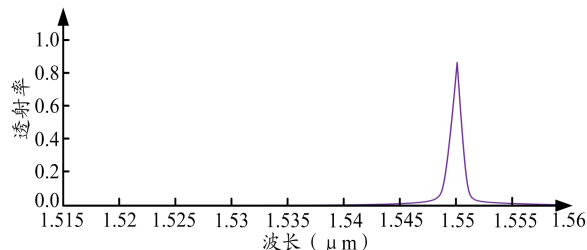
图3 1.55 μm 波段下的折射率与外磁场的磁场强度关系

光波频率处于光子禁带范围内的电磁波,不能在光子晶体中继续传输,只能在波导中继续传输,即仅有符合在光子禁带的电磁波从左端经波导输入。当电磁波进入到该环形腔后与环形谐振腔的谐振频率一致时,输入波导中的该部分电磁波会被耦合到输出波导中,进而经输出波导的输出端口输出;当输入波导内的电磁波频率与圆环形谐振腔的谐振频率不一致时,输入波导内的电磁波不能通过光子晶体圆环形谐振腔,而是被局限在圆形谐振腔内,导致无法从输出波导的输出端口输出。

当沿滤波器 Z 方向 (平行于光子晶体介质柱方向)加载磁场强度大小为 11.4T 的磁场时,圆环外层 Si 介质柱不会受到磁场的影响,而内部 4 层磁性 TbYbBiIG 介质柱的折射率可按式(1)~式(4)进行计算,在磁场的作用下相对折射率变为 3.16,此时 1.55 μm 波长正好处于谐振腔的谐振波长,可以通过输出波导输出;而其它波长的信号则因与滤波器谐振波长不吻合,无法通过谐振腔从输出波导输出,从而实现滤波功能。

2 仿真计算与结果分析

本文利用 Lumerical 仿真软件基于时域有限差分法(FDTD)原理对所设计的光子晶体滤波器进行仿真,并分析该滤波器的性能,仿真计算时光子晶体滤波器四周设有完美匹配层(PML)。环形腔中的磁性 TbYbBiIG 介质柱的相对介电常数可以随外加 Y 方向的磁场强度的变化而改变,由上文公式推断出,当调节外界磁场强度 $B_0=11.4T$ 时,环形腔内部磁性介质柱的折射率 $n_{TE}=3.16$ 。在 Lumerical 仿真软件中进行模拟计算得到透射谱如图 4 所示,透射峰位于图中波长 1.55 μm 处。

图4 外加磁场 $B_0=11.4T$ (谐振腔内部 $n_{TE}=3.16$) 时滤波器透射谱

但此时品质因素 Q 值仅为 530, Q 值计算公式为:

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (6)$$

其中, f_0 为谐振腔的中心波长, f_1 和 f_2 为缺陷模透射谱的半峰值对应的两频率。

为提高品质因数 Q 值(即减小 3dB 带宽),我们通过增加入射和出射波导与环形腔之间的距离来减小耦合系数,即在环形腔两侧左右各增加一个介质柱的方法。优化后的光子晶体滤波器结构如图 5 所示。

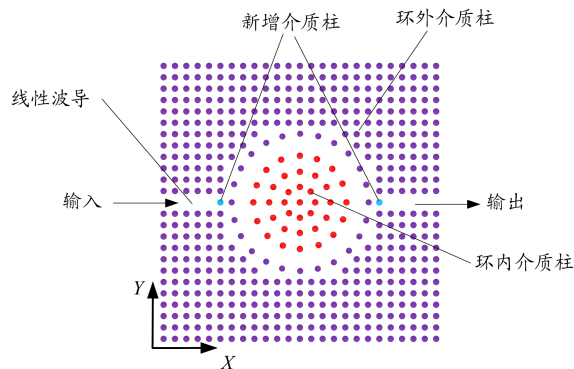


图5 优化后的光子晶体等离子体滤波器结构图

优化后的光子晶体滤波器结构仿真得到的透射谱图如图 6 所示。按照式(6),根据透射谱数值计算,中心波长除以(峰值取一半时对应的两波长之差)可得此时 $Q=2800$,但同时 1.55 μm 波长对应的透射率明

梅晨,陈鹤鸣:基于掺Bi复合稀土石榴石光子晶体滤波器

显降低。为提高其透射率,故需要对该结构进行进一步参数优化,本文通过减小圆腔两侧的介质柱半径大小来提高目标波长的透射率。取两侧光子晶体介质柱半径 r 从 $0.1\mu\text{m}$ 依次降为 $0.05\mu\text{m}$ 、 $0.06\mu\text{m}$ 和 $0.07\mu\text{m}$ 的 3 种情况进行分析,仿真结果如图 7 所示。

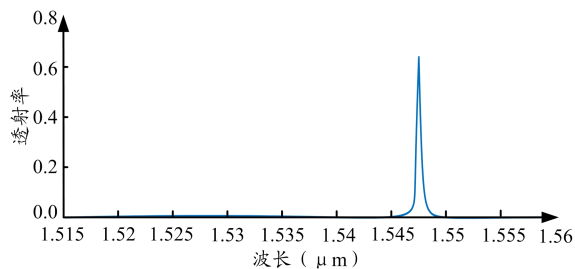


图 6 优化后的光子晶体滤波器透射谱图

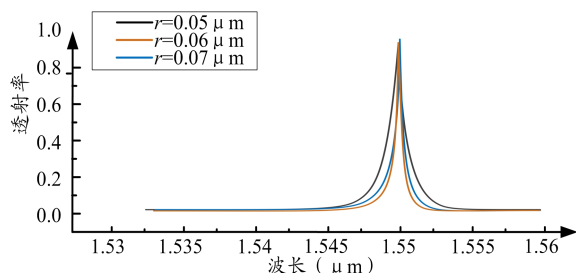


图 7 两侧介质柱分别为 $r=0.05\mu\text{m}$ 、 $0.06\mu\text{m}$ 和 $0.07\mu\text{m}$ 透射谱(三合一)

由图 7 可知,当外圈左右两侧各新增的一个圆形介质柱半径 $r=0.05\mu\text{m}$ 时,透射率约为 85%;当介质柱半径为 $r=0.06\mu\text{m}$ 时,透射率为 87%;当介质柱半径 $r=0.07\mu\text{m}$ 时,滤波器能表现出较高的透射率,透射率为 90%。故当新增的圆形介质柱半径 $r=0.07\mu\text{m}$ 时,结果最优。图 8 是该滤波器完整的透射谱图,可计算出在 $1.55\mu\text{m}$ 时透射率为 90%(即插入损耗值为 0.46dB),此时的品质因素 $Q=1800$ (3dB 带宽为 11.46GHz)。

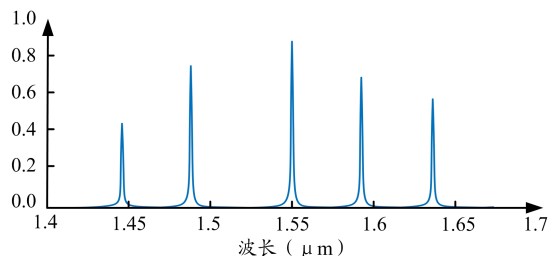


图 8 两侧介质柱分别为 $r=0.07\mu\text{m}$ 时滤波器完整透射谱

3 结束语

本文采用石榴石型铁氧体材料作为谐振腔的光子晶体滤波器,在外加磁场强度为 11.4T 下实现 $1.55\mu\text{m}$ 光波的滤波。仿真结果表明:该滤波器性能优

良,插入损耗值为 0.46dB , 3dB 带宽为 11.46GHz ,工作于 $1.55\mu\text{m}$ 波段。该磁光子晶体滤波器在高速光通信领域有着潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] 欧阳征标,刘海山,李景镇. 光子晶体超窄带滤波器[J]. 光子学报, 31(3): 281–284.
- [2] 陈晓波,张光寅,郝昭. 光子“四端管”模型实验研究及其应用— 新事滤波器的模型研究[J]. 中国激光, 1995, 22(12): 919–81.
- [3] 张玉萍,张会云,郑义. 超窄带和多通道窄带光子晶体滤波器[J]. 量子光学学报, 2004, 10(4): 173–175.
- [4] AKAHANE Y, ASANO T, Song B-S. High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal. Nature, 2003, 425 (6961): 944–947.
- [5] KUO C W, CHANG C F, CHEN M H, et al. A new approach of planar multi-channel wavelength division multiplexing system using asymmetric super-cell photonic crystal structures[J]. Optics express, 2007, 15(1): 198–206.
- [6] GHATTAN Z, HASEK T, SHAHABADI M, et al. Coupling of free space sub-terahertz waves into dielectric slabs using PC waveguides. [J]. Optics Express, 2008, 16(9): 6112–6118.
- [7] LI S, LIU H, SUN Q, et al. A Tunable Terahertz Photonic Crystal Narrow-Band Filter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(7): 752–754.
- [8] KONO N, KOSHIBA M. Magneto-photonic crystal slab waveguides with lower-refractive-index claddings [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(5): 258–260.
- [9] 卞丽梅,杨梓强,兰峰,等. 二维色散和各向异性磁化等离子体光子晶体色散特性研究[J]. 物理学报, 2010, 59(1): 351–359.
- [10] 宋厚彬. 电介质和磁介质光子晶体光学特性分析[J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(5): 99–103.
- [11] 张怀武,李颖,苏桦. Development and application of ferrite materials for low temperature co-fired ceramic technology [J]. Chinese Physics B, 2013, 22(11): 16–36.
- [12] 吕浩林. 磁可调滤波器用 YIG 铁氧体的制备研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [13] 梁龙学,张晓金,吴小所. 基于磁光子晶体的太赫兹滤波器和光开关[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 138–143.
- [14] 郭展,范飞,白晋军,等. 基于磁光子晶体的磁控可调谐太赫兹滤波器和开关[J]. 物理学报, 2011, 60(7): 379–383.
- [15] KEE C S, KIM J E, PARK H Y, et al. Essential role of impedance in the formation of acoustic band gaps [J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(4): 1593–1596.
- [16] 钟文果,李元勋,刘颖力. 基于铁氧体材料(YIG)的微带环行器设计与仿真[J]. 磁性材料及器件, 2011, 42(6): 66–69.
- [17] 王勇,张登国,欧阳征标,等. 基于二维磁性光子晶体的三端口 Y 形铁氧体柱环行器[J]. 光子学报, 2014, 43(6): 83–86.
- [18] 顾艳,伍瑞新. 基于磁性光子晶体的高性能微波带通滤波器[J]. 压电与声光, 2014, 36(1): 58–61.
- [19] 滕晨晨,周雯,庄煜阳. 基于磁光子晶体的低损耗窄带 THz 滤波器[J]. 物理学报, 2016, 65(2): 162–166.