

基于磁光子晶体的低损耗窄带 THz 滤波器

滕晨晨 周雯 庄煜阳 陈鹤鸣

Low loss and narrow-band THz filter based on magnetic photonic crystals

Teng Chen-Chen Zhou Wen Zhuang Yu-Yang Chen He-Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 024210 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.024210

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024210>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

表层厚度渐变一维耦合腔光子晶体的反射相位特性及其应用

Reflection phase characteristics and their applications based on one-dimensional coupled-cavity photonic crystals with gradually changed thickness of surface layer

物理学报.2016, 65(1): 014217 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014217>

混合准周期异质结构的带隙补偿与展宽

Photonic bandgap compensation and extension for hybrid quasiperiodic heterostructures

物理学报.2016, 65(1): 014214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014214>

一种高增益低雷达散射截面的新型圆极化微带天线设计

A novel circularly polarized patch antenna with low radar cross section and high-gain

物理学报.2015, 64(22): 224219 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224219>

$k=0$ 处的类狄拉克锥

Dirac-like cones at $k=0$

物理学报.2015, 64(18): 184208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184208>

纵模对光子晶体中类狄拉克点传输特性的影响

Effect of longitudinal mode on the transmission properties near the Dirac-like point of the photonic crystals

物理学报.2015, 64(17): 174206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174206>

基于磁光子晶体的低损耗窄带THz滤波器*

滕晨晨¹⁾ 周雯¹⁾ 庄煜阳¹⁾ 陈鹤鸣^{2)†}¹⁾(南京邮电大学光电工程学院, 南京 210023)²⁾(南京邮电大学贝尔英才学院, 南京 210023)

(2015年8月27日收到; 2015年10月8日收到修改稿)

本文提出一种采用石榴石型铁氧体磁性材料的太赫兹滤波器, 利用波导线缺陷和腔内点缺陷的耦合特性, 通过改变腔内介质柱半径及分布, 实现对某个波长的耦合, 达到了高效率滤波的功能; 改变外磁场的大小, 影响铁氧体材料的磁导率变化, 使谐振频率发生改变, 从而对THz波进行滤波. 应用平面波展开法(PWM)和时域差分有限法(FDTD)进行仿真分析, 研究表明, 该滤波器其插入损耗为0.0997 dB, 3 dB带宽为8.22 GHz, 实现了低损耗窄带滤波.

关键词: THz滤波器, 磁光子晶体, 窄带, 低插入损耗**PACS:** 42.70.Qs, 85.70.Sq, 02.70.Bf, 42.79.Ci**DOI:** 10.7498/aps.65.024210

1 引言

1987年, Yablonovitch^[1]和John^[2]分别提出光子晶体这一概念. 这是一种由高、低介电常数介质材料在空间呈周期分布的物质结构, 通常由两种或两种以上不同折射率材料构成. 太赫兹(THz)波是指频率在0.1—10 THz(波长30 μm —3 mm)的电磁波, 它在电磁波谱中位于微波和红外光之间, 被称为“太赫兹空隙”. 滤波器是太赫兹技术应用的重要器件, 研制具有良好性能、便于集成的太赫兹滤波器等器件, 是研究热点. 光子晶体滤波器^[3–8]具有体积小、性能优良的特点. 2009年杨春云等^[9]提出了环形腔结构的光子晶体滤波器, 实现红外线波段滤波; 孟晴等^[10]提出了高效光子晶体窄带太赫兹滤波器, 但插入损耗为0.458 dB. 2014年顾艳等^[11]提出基于磁光子晶体的带通滤波器, 实现微波频段滤波, 但损耗较大. 2010年郭展等^[12]提出了通过改变带隙位置和宽度来实现高通、低通滤波功能的磁光子晶体太赫兹滤波器. 2015年Li等^[13]中提出了采用液晶材料作为点缺陷在外磁场作用下实现单波长滤波, 但插入损耗达

到0.706 dB.

磁性材料可以通过调节外加直流磁场, 或温度来改变其光学性质^[14]. 对磁光子晶体加外磁场, 就可对其带隙进行调节, 以实现以上功能, 因此磁光子晶体具有巨大的应用前景. Sigalas等^[15]理论上分析了磁导率 μ 对光子晶体带隙的影响. Kee等^[16]研究了二维磁光子晶体的一些性质, 发现在施加外磁场后, 其能带位置向低频移动, 带隙宽度变窄.

本文提出一种采用石榴石型铁氧体磁性材料的太赫兹滤波器, 利用波导线缺陷和腔内点缺陷的耦合特性, 通过改变腔内介质柱半径及分布, 实现对某个波长的耦合, 达到了高效率滤波的功能; 改变外磁场的大小, 影响铁氧体材料的磁导率变化, 使谐振频率发生改变^[13], 从而对THz波进行滤波. 该滤波器其插入损耗为0.0997 dB, 3 dB带宽为8.22 GHz, 实现了低损耗窄带滤波.

2 结构设计与原理分析

本文设计的磁光子晶体太赫兹滤波器采用三角晶格结构, 如图1所示. 图1中, 空气基底中排列

* 国家自然科学基金(批准号: 61077084, 61571237)和江苏省研究生科研创新计划项目(批准号: KYLX15_0835)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chhm@njupt.edu.cn

19×23 圆柱形介质柱, 介质柱为折射率 $n = 3.4$ 的硅, 半径 $R = 6 \mu\text{m}$, 晶格常数 $a = 30 \mu\text{m}$. 在完整光子晶体中沿着横轴方向去掉一排介质柱, 形成一个直波导作为输入波导, 左端为光源输入端, 将光子晶体直波导和一个微腔间隔两排介质柱放置, 沿微腔倾斜方向去掉一排介质柱形成输出波导, 末端为接收端. 在微腔中心介质柱处采用石榴石型铁氧体磁性材料, 铁氧体是一种具有铁磁性的金属氧化物, 有较高的介电性能, 介电常数的典型值在 $12.0\text{--}16.0$ [17], 饱和磁化强度较低, 在高频时具有较高的磁导率. 其按晶体结构可分为三类: 尖晶石型、石榴石型和磁铅石型 [18]. 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 THz 传输, 且吸收系数低 ($0.05\text{--}0.3 \text{ cm}^{-1}$) [19].

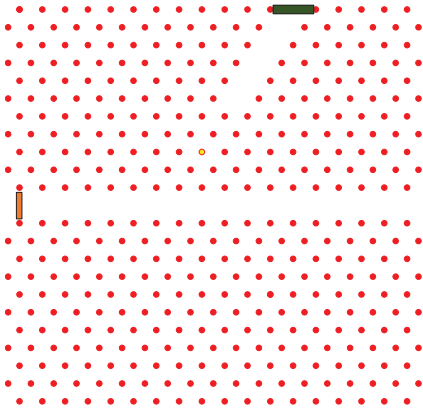


图1 含有点缺陷和线缺陷的磁光子晶体结构

Fig. 1. The structure of photonic crystal with the point defect and line defect.

引入的点缺陷使光子晶体其产生了一个缺陷模, 该点缺陷相当于一个谐振腔, 当改变外磁场的大小调节石榴石型铁氧体的磁导率时, 缺陷模的谐振频率改变, 只有符合缺陷模谐振频率的 THz 波才能够耦合进该点缺陷中. 因此当一定频率范围内的 THz 波信号从左端输入进入到该 THz 滤波器时, 只有符合点缺陷共振频率的 THz 波才能够耦合进该点缺陷中, 进而从滤波波导输出, 而其他频率范围内的 THz 波, 将从主波导输出.

3 仿真结果与分析

仿真计算时, 所施加的外磁场沿铁氧体柱轴向方向. TM 模的磁场方向平行于外磁场方向, 不与磁性介质的偶极矩相互作用, 所以对于 TM 模, 加磁场后其能带结构不变. 而 TE 模的磁场垂直于外

磁场, 将引起外磁场周围磁偶极子的运动 [16], 下面主要分析 TE 模. 通过平面波展开法可以得到光子晶体的禁带结构 [9], 如图 2 所示, TE 模归一化频率 a/λ 范围为 $0.27999\text{--}0.45031$, 对应光子晶体的禁带范围约为 $66.62\text{--}107.15 \mu\text{m}$.

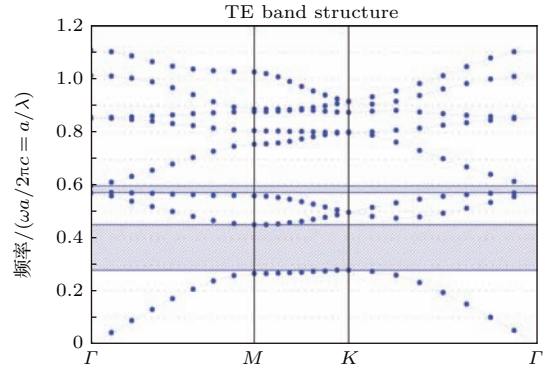


图2 磁光子晶体结构 TE 模带隙图

Fig. 2. TE band gap of magnetic photonic crystal.

未加磁场前, 铁氧体材料的磁导率 $\mu = 1$, 铁氧体折射率 $n = \sqrt{\epsilon\mu} = \sqrt{12.96 \times 1} = 3.60$. 外加磁场后调节外磁场大小使磁导率 $\mu = 1.5$, 此时铁氧体折射率 $n = \sqrt{\epsilon\mu} = \sqrt{12.96 \times 1.5} = 4.41$.

图 1 的结构中, 波导是由去掉一行介质柱来实现的, 微腔是通过改变介质柱的半径来实现的, 优化过程如下:

- 1) 设点缺陷处介质柱半径依次为 $0.5R, 0.75R, R$, 通过仿真得到, 当点缺陷处介质柱半径为 $0.75R$ 时有较好的耦合效率, 即 $R_1 = 0.75R$, 但此时并不能出现较好的滤波效率;
- 2) 基于 1) 的基础, 设置点缺陷周围 6 个介质柱的半径 R_2 依次为 $1.5R, 1.6R, 1.7R$. 其点缺陷处的谐振频率如图 3 所示.

上述三种情况都不能满足低损耗滤波要求. 通过微调发现, 当 $R_2 = 1.61R$ 时, 可以获得相对幅度较高的单频率滤波, 此时的谐振频率分布如图 4 所示. 此时, 滤波器只允许波长为 $82.359 \mu\text{m}$ 的单一模式 THz 波通过.

为了降低滤波器的插入损耗, 在上述结构的基础上, 把图 5 中的两个介质柱半径 R_3 改为 $1.538R$ 时, 同时加入 7 个半径为 R 和 1 个半径为 $0.9657R$ 的介质柱作为反射壁, 仿真结果表明, 该滤波器的插入损耗只有 0.0997 dB , 入射波长 $82.359 \mu\text{m}$ 的稳态模场分布如图 6 所示.

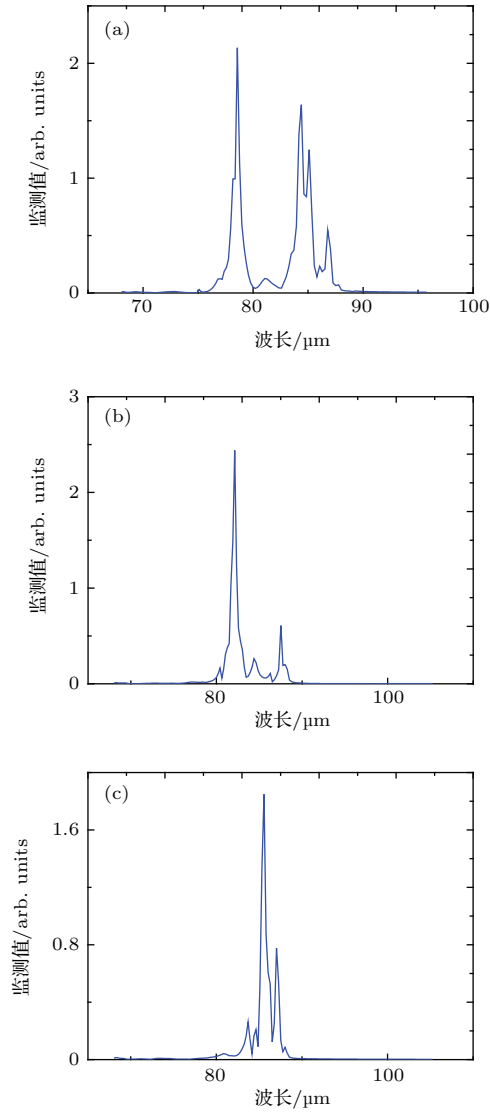


图3 三种情况下点缺陷处的谐振频率分布 (a) $R_2 = 1.5R$; (b) $R_2 = 1.6R$; (c) $R_2 = 1.7R$
Fig. 3. The resonance frequency distribution at three point defects: (a) $R_2 = 1.5R$; (b) $R_2 = 1.6R$; (c) $R_2 = 1.7R$.

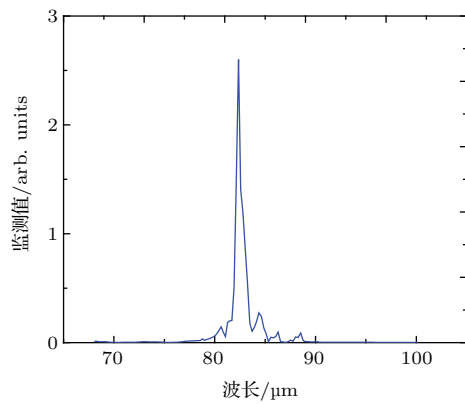


图4 $R_2 = 1.61R$ 时点缺陷处谐振频率的分布
Fig. 4. The resonance frequency distribution at $R_2 = 1.61R$.

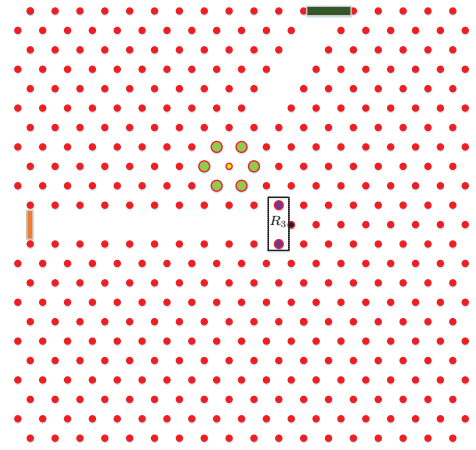


图5 介质柱改变后的磁光子晶体滤波器
Fig. 5. The structure of magnetic photonic crystal filter after the dielectric cylinders were changed.

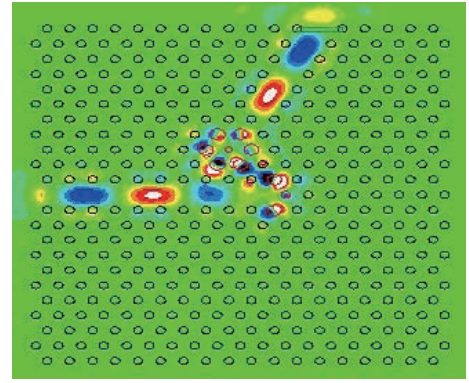


图6 入射波长 82.359 μm 的稳态模场分布图
Fig. 6. The steady mode field distribution when the incident wavelength is 82.359 μm .

图7中所示峰值对应的横坐标为82.359 μm , 通过计算得到其3 dB带宽为8.22 GHz, 实现了THz波段的窄带滤波功能. 所以利用此滤波器结构, 可以实现太赫兹波段的低损耗窄带滤波.

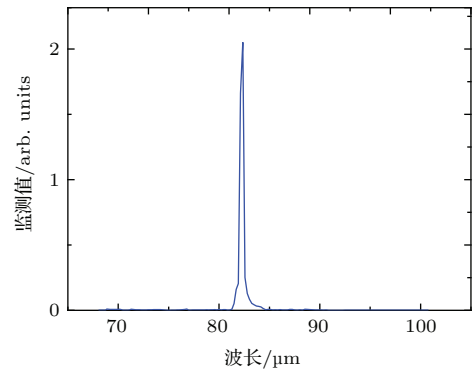


图7 输出端场强频率分布
Fig. 7. The frequency distribution of the output field.

4 结 论

本文设计的磁光子晶体 THz 滤波器, 利用石榴石型铁氧体磁性材料的磁导率随外磁场改变而变化的性质实现滤波功能. 研究结果表明, 该滤波器同时具有低损耗和窄带特性, 其插入损耗低只有 0.0997 dB; 3 dB 带宽窄为 8.22 GHz. 该滤波器性能优良, 在 THz 技术中具有重要应用.

参考文献

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Zhao D T, Shi B, Jiang Z M, Fan Y L, Wang X 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 409
- [4] Park I, Lee H S, Kim H J, Moom K M, Lee S G, O B H, Park S G, Lee E H 2004 *Opt. Express* **12** 3599
- [5] Zimmermann J, Kamp M, Forchel A, Marz R 2004 *Opt. Commun.* **230** 387
- [6] Chien F S, Hsu Y, Hsieh W, Cheng S 2004 *Opt. Express* **12** 1119
- [7] Yuan C, Xu S L, Yao J Q, Zhao X L, Cao X L, Wu L 2014 *Chin. Phys. B* **23** 018102
- [8] Zhang H Y, Gao Y, Zhang Y P, Wang S F 2011 *Chin. Phys. B* **20** 094101
- [9] Yang C Y, Xu X M, Ye T, Miao L P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 017807 (in Chinese) [杨春云, 徐旭明, 叶涛, 缪路平 2011 物理学报 **60** 017807]
- [10] Chen H M, Meng Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014202 (in Chinese) [陈鹤鸣, 孟晴 2011 物理学报 **60** 014202]
- [11] Gu Y, Wu R X 2014 *Piezoelectrics & Acousto-optics* **36** 58 (in Chinese) [顾艳, 伍瑞新 2014 压电与声光 **36** 58]
- [12] Guo Z, Fan F, Bai J J, Niu C, Chang S J 2011 *Acta Phys. Sini.* **60** (in Chinese) [郭展, 范飞, 白晋军, 牛超, 常胜江 2011 物理学报 **60**]
- [13] Li S P, Liu H J, Sun Q B, Huang N 2015 *IEEE Photonics Technology Letters* **27** 752
- [14] Zhang H W, Li J, Su H, Zhou T C, Long Y, Zheng Z L 2013 *Chin. Phys. B* **22** 117504
- [15] Sigalas M M, Soukoulis C M, Biswas R 1997 *Phys. Rev. B* **56** 959
- [16] Kee C S, Jae-Eun K, Hae Y P 2000 *Phys. Rev. B* **61** 15523
- [17] Pozar D M 1998 *Microwave Engineering* (New York: Wiley) p705
- [18] Zhou Z G 1998 *Ferrite Magnetism Materials* (Beijing: Science Press) p12 (in Chinese) [周志刚 1998 铁氧体磁性材料 (北京: 科学出版社) 第 12 页]
- [19] Yang Q H, Zhang H W, Liu Y L 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 3957

Low loss and narrow-band THz filter based on magnetic photonic crystals*

Teng Chen-Chen¹⁾ Zhou Wen¹⁾ Zhuang Yu-Yang¹⁾ Chen He-Ming^{2)†}

1) (Department of Opto-Electronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

2) (Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

(Received 27 August 2015; revised manuscript received 8 October 2015)

Abstract

As a key point to applying and studying magnetic photonic crystal technology, communication devices such as the magnetic photonic crystal filters with high performance and easy integration are developed. We investigate the feasibility of ferrite magnetism materials that can be used to make photonic crystal filters. The optical properties of the magnetic materials may be tuned by adjusting the magnetic field or temperature. The band gap of the magnetic photonic crystal can thus be transferred by changing the external magnetic field. This kind of magnetic photonic crystal has a great application prospect. A low insertion loss and narrow-band filter is designed based on a magnetic field-controlled ferrite defect in a photonic crystal for a terahertz (THz) wave. Ferrite is a ferromagnetic metal oxide with high dielectric constant, low saturation magnetization intensity, and high magnetic permeability at high frequencies. According to the crystal structure it can be divided into three categories: spinel, garnet and magnetic rock types. The garnet ferrite crystal can be used to realize THz band transmission, and its absorption coefficient is low (0.05–0.3) in uniform polarization. In this paper, a novel magnetic THz photonic crystal filter is proposed, in which point defects are produced by the introduction of garnet ferrite magnetic materials. Based on the coupling characteristics between the linear defect wave guide and the point defects, THz waves with a certain wave length can be well coupled by changing the radius and arrangement of the resonant cavity, so as to achieve high efficiency filter function. The permeability properties of ferrite magnetic materials are changed with the variation of the intensity of the external magnetic field, and the tuning of the frequency of the resonance mode. The optical properties of the filter are analyzed in detail by using plane waves method in finite difference time domain. Simulation results show that by changing the point defect structure and the radius of a certain dielectric cylinder, the insertion loss and 3 dB bandwidth of the filter are 0.0997 dB and 8.22 GHz, respectively.

Keywords: THz filter, magnetic photonic crystal, narrow-band, low insertion loss

PACS: 42.70.Qs, 85.70.Sq, 02.70.Bf, 42.79.Ci

DOI: 10.7498/aps.65.024210

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61077084, 61571237) and the Plans for Graduate Research and Innovation of the Colleges and Universities in Jiangsu Province, China (Grant No. KYLX15_0835).

† Corresponding author. E-mail: chhm@njupt.edu.cn