

文章编号: 1000-7032(2012)08-0883-05

THz 波段光子晶体带隙影响因素研究

张 会^{1*}, 张卫宇¹, 徐 旺¹, 郭一飞¹, 常胜江²

(1. 中国石油大学(华东)理学院 物理与光电工程系, 山东 青岛 266555;

2. 南开大学 现代光学研究所, 天津 300071)

摘要: 应用平面波展开法和时域有限差分法分析计算了二维方形光子晶体在太赫兹波段的带隙特征, 并着重研究了影响太赫兹波段二维方形光子晶体带隙的因素。通过改变光子晶体的介电常数和截面半径得出了光子晶体带隙随这两种因素的变化规律, 进而研究了太赫兹波段损耗较小的塑料和高阻硅两种材料构成的光子晶体带隙及光子晶体波导的传输特性。

关键词: 太赫兹波; 光子晶体; 平面波展开法; 时域有限差分法

中图分类号: TN214; O441.4 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20123308.0883

Study on The Influencing Factors of Photonic Crystal's Band Gaps in THz Waveband

ZHANG Hui^{1*}, ZHANG Wei-yu¹, XU Wang¹, GUO Yi-fei¹, CHANG Sheng-jiang²

(1. College of Science, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266555, China;

2. Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

* Corresponding Author, E-mail: zhanghuizxh@126.com

Abstract: The photonic band gaps of two dimensional square lattice photonic crystals are analyzed in terahertz range using the plane wave expansion method and the finite difference time domain method. The simulation results indicate that the photonic gaps vary with the dielectric constants and radius of materials in the square lattice photonic crystal. Then the band gaps and transmitting characteristics of photonic crystal that based on the plastic and high-resistivity silicon are studied.

Key words: terahertz wave; photonic crystal; plane wave expansion method; FDTD

1 引 言

太赫兹 (THz) 波是指波长在 30 ~ 3 000 μm 范围内的电磁波。长期以来, 由于缺乏有效的 THz 辐射源, 导致 THz 频段的电磁波未得到充分的研究和应用, 被称为电磁波谱中的“THz 空隙”。高效的 THz 辐射源和成熟的检测技术是推

动 THz 技术科学发展和应用的首要条件。在 THz 源和 THz 检测接收之间还有一个“桥梁”, 那就是 THz 波的传输, 这一桥梁决定着 THz 波能否成功地被处理、成像、倍频、差放、放大、滤波、环行、隔离等。由于 THz 波在自由空间的传输损耗很大, 因此, 低损耗太赫兹传输器件就成了 THz 传输的重要基础, 也是 THz 波能否被广泛应用的关键。

收稿日期: 2012-03-27; 修订日期: 2012-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(61171027); 天津市自然科学基金重点项目(10JCZDJC15200)资助项目

作者简介: 张会(1981-), 女, 山东肥城人, 主要从事太赫兹方面的研究。

E-mail: zhanghuizxh@126.com

目前已经提出了多种传输系统,如金属不锈钢波导、铁电聚合物(包层)波导(PVDF)、塑料带状平面波导和单模蓝宝石光纤等,而光子晶体将最有潜力成为性能优越的 THz 波传输及控制器件。上世纪 90 年代末,人们开始利用光子晶体研究和开发太赫兹器件。频率禁带处在 THz 波段的光子晶体制作水平的提高和完善大大促进了光子晶体 THz 器件的研究,并在多个方面取得了成果。例如,日本物理化学研究所用多层约瑟夫结制作了 THz 光子晶体滤波器^[1];美国俄克拉荷马州立大学制作了 THz 波段的二维金属光子晶体波导,并利用 THz 时域谱系统展示了金属平板中点缺陷形成的微腔对 THz 的局域特性^[2-3];法国的 Nemeč 等通过在一维光子晶体结构中加入 KTaO_3 缺陷,实现了温控的 THz 窄带带通滤波器^[4]。国内开展光子晶体 THz 器件研究的单位也比较多,如中科院上海技术物理研究所、浙江大学、清华大学、天津大学、南开大学和中山大学等^[5-6]。

光子晶体的带隙随光子晶体材料及结构的不同而变化,因此合理设计光子晶体结构使之具有较大的光子带隙和较大的可调谐范围是光子晶体器件要解决的一个关键问题。研究人员发现,塑料在太赫兹频段下具有损耗低、色散小的优异特性,还具有很好的柔韧性和易加工性^[7]。因此,本文运用平面波展开法和时域有限差分法对太赫兹波段二维光子晶体的带隙情况进行了研究和分析,重点分析了影响带隙特性的两个影响因素:材料介电常数和结构参数,在此基础上,研究了由塑料和高阻硅构成的光子晶体对太赫兹波的传输及控制特性。

2 THz 波段光子晶体带隙的影响因素

2.1 二维方形光子晶体的带隙影响因素分析

二维光子晶体是指在二维空间各方向上具有光子频率禁带特性的材料,它是由许多介质杆平行而均匀地排列而成的。这种结构在垂直于介质杆的方向上(两个方向)节点常数是空间位置的周期性函数,而在平行于介质杆的方向上介电常数不随空间位置而变化。由介质杆阵列构成的二维光子晶体的横截面存在许多种结构,如矩形、三角形、圆形和六边形等。其中方形的光子晶体结构最简单,加工容易,而且带隙宽度较大。本文就

利用平面波展开法^[8-9]和时域有限差分法^[10-11]分析太赫兹波段的方形二维光子晶体。

如图 1 所示,图中黑色的圆柱表示高折射率材料,基底为低折射率材料。周期 a 即相邻两个圆心之间的距离,取为 $100 \mu\text{m}$ 。取材料截面半径为 $0.2a$,背景材料介电常数为 1 即背景介质为空气,圆柱为高阻硅,其在太赫兹波段的介电常数为 11.7。

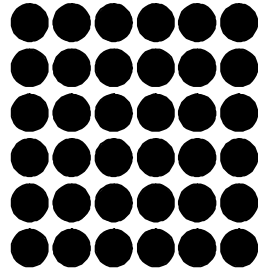


图 1 截面半径为 $0.2a$ 的方形二维光子晶体

Fig. 1 Section $0.2a$ square radius of two-dimensional photonic crystals

图 2 是利用平面波展开法得到的 TE 模光子带隙图,其中斜线填充的为光子带隙。由图 2 可以看出,这种结构具有两个带隙,比较宽的带隙的归一化频率为 $\omega a/2\pi c$,范围为 $0.28 \sim 0.42$,对应的太赫兹频率为 $0.84 \sim 1.26 \text{ THz}$ 。利用时域有限差分法,我们在光子晶体左端输入一个很宽的太赫兹脉冲,在右端输出端可以探测到其频谱,如图 3 所示,横坐标为归一化波长 λ/a 。由图 3 可以看出,透射谱在 $2.38 \sim 3.6$ 归一化波长范围内没有太赫兹波输出,对应的频率范围为 $0.79 \sim 1.2 \text{ THz}$,与平面波展开法得到的带隙基本一致。时域有限差分法得到的带隙窄一些,原因在于我们在水平方向的行数取得不够多。

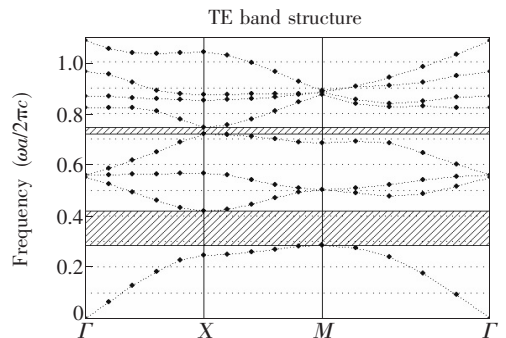


图 2 二维光子晶体归一化频率带隙图

Fig. 2 Two dimensional photonic crystal normalized frequency band gap figure

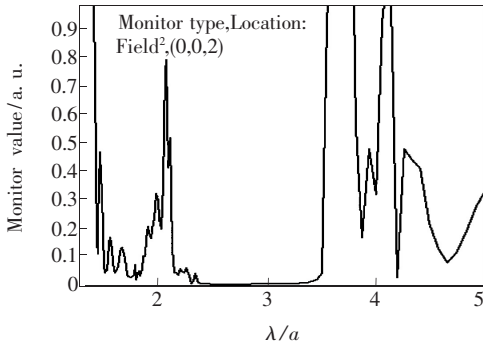


图 3 归一化波长透射传输谱

Fig. 3 The normalized wave transmit spectrum

为了得到较宽的光子带隙,我们分析了影响带隙宽度的两个因素:一个是构成光子晶体的两种材料折射率差,也就是构成光子晶体的材料所造成的带隙变化;另一个是光子晶体的结构参数,即圆柱的半径变化对带隙的影响。

首先保持背景介电常数为 1,逐渐增大圆柱材料的介电常数,可得到带隙范围随两种材料的折射率差的变化图,如图 4 所示。横坐标是两种材料的折射率差,其范围为 1 ~ 3;纵坐标是归一化频率。上图是用空白表示的带隙范围,下图是用竖线表示的带隙范围。由图 4 可以看出,折射率差越大,最下面的一个带隙宽度越大,频率下

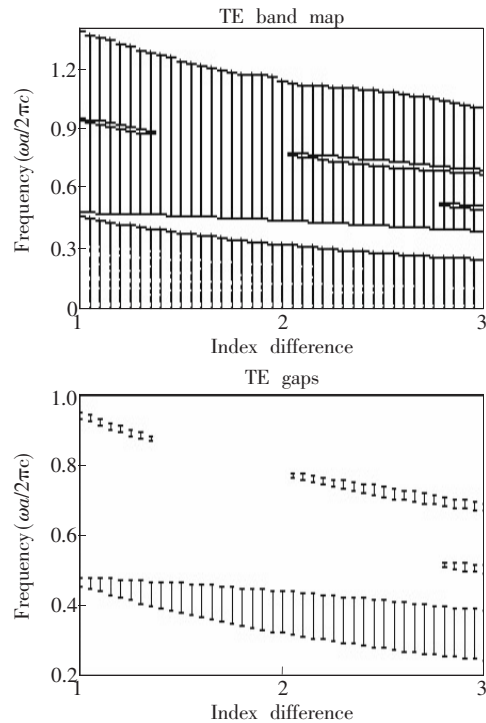


图 4 带隙随材料折射率差的变化图

Fig. 4 Bandgaps variation with refractive index difference

降;在折射率差比较小的情况下不存在带隙。例如,用空气和折射率为 1.5 ~ 1.8 的塑料制成的方形光子晶体不存在带隙。因此,用两种折射率差比较大的材料制作的光子晶体才能得到较宽的带隙范围。

另外,保持背景(空气)和圆柱材料(高阻硅)不变,逐渐增大圆柱的半径,可得到带隙随圆柱半径的变化图,半径的取值范围为 0.1a ~ 0.4a,如图 5 所示。从图中可以看出,光子带隙随半径的变化比较复杂。对于频率最低的一个带隙,随着半径的增大,带隙范围增大,频率减小,在 0.2a 左右带隙宽度达到最大值;继续增大半径,则带隙宽度逐渐减小。另外,当半径大于 0.23a 时,随着半径的增大,在第一个带隙上方增加了一个带隙,并在半径为 0.3a 左右时宽度最大,然后慢慢减小。由此,我们可以根据需求确定半径,从而得到适合的带隙宽度及位置。

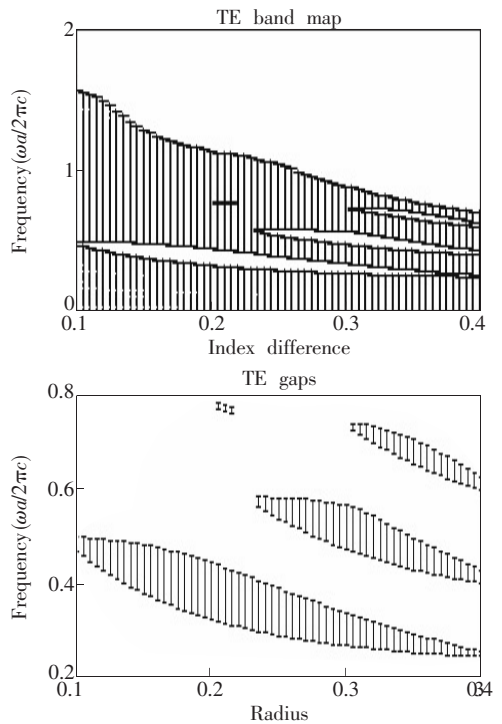


图 5 带隙随截面半径的变化图

Fig. 5 Bandgaps variation with radius of columns

2.2 塑料和高阻硅构成的太赫兹光子晶体

利用平面波展开法得到了由在太赫兹波段损耗较低的两种材料——塑料和高阻硅构成的方形光子晶体的太赫兹光子带隙特征。光子晶体周期 $a = 100 \mu\text{m}$,基底为折射率为 1.5 的塑料(高密度聚乙烯),圆柱为高阻硅(半径为 0.3a),得到的带

隙图如图 6 所示。由图 6 可以看出,这种光子晶体存在两个带隙,带隙范围分别为 $0.23 \sim 0.26$ 和 $0.4 \sim 0.43$,对应的 THz 范围为 $0.69 \sim 0.78$ THz 和 $1.2 \sim 1.29$ THz。其中频率较低的带隙比较宽,称为第一带隙。

图 7 为塑料和高阻硅构成的方形光子晶体波导的透射谱。由图 7 可以看出,强度最大的主要透射峰归一化波长为 4.48 , THz 频率为 0.67 THz;归一化波长范围为 $4.2 \sim 4.6$, THz 频率为 $0.65 \sim 0.72$ 。和图 6 比较可见,THz 波导的透射峰对应于完整结构的第一带隙。

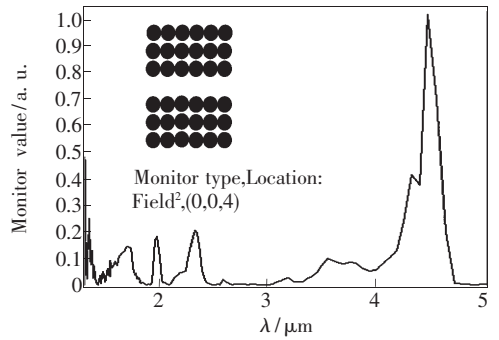


图 7 塑料光子晶体波导的归一化波长透射传输谱
Fig. 7 The normalized wave transmit spectrum of plastic photonic crystal waveguide

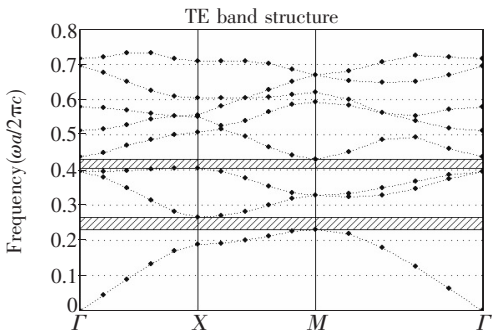


图 6 二维塑料光子晶体归一化频率带隙图

Fig. 6 Two dimensional plastic photonic crystal normalized frequency band gap figure

3 结 论

通过平面波展开法和时域有限差分法分析了太赫兹波段二维光子晶体的带隙结构,并重点分析了影响带隙宽度及带隙位置的两个主要因素:材料的介电常数和结构半径。两种材料的介电常数差或折射率差越大,带隙宽度越大,而结构半径存在最佳值,太小和太大都不会获得较宽的带隙。在此基础上,分析了由太赫兹波段吸收较小的两种材料——塑料和高阻硅组成的方形光子晶体在太赫兹波段的带隙特征,以及光子晶体波导的太赫兹传输特性。

参 考 文 献:

- [1] Savel'ev S, Rakhmanov A L, Nori F. Using Josephson vortex lattices to control terahertz radiation; Tunable transparency and terahertz photonic crystals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 94(15):157004-1-4.
- [2] Bingham A, Zhao Y G, Grischkowsky D. THz parallel plate photonic waveguide [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87(05): 051101-1-3
- [3] Zhang H F, Xiao Z Q, Yang G H, *et al.* Effects of plasma temperature and density on the defect mode in magnetized plasma photonic crystals [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(1):1-6 (in Chinese).
- [4] Krumbholz N, Gerlach K, Rutz F, *et al.* Omnidirectional terahertz mirrors: A key element for future terahertz communication systems [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88(20):202905-1-3.
- [5] Liu H, Yao J, Xu D, *et al.* Characteristics of photonic band gaps in woodpile three-dimensional terahertz photonic crystals [J]. *Opt. Express*, 2007, 15(2):695-703.
- [6] Li X, Xiang Y J, Wen S C, *et al.* Tunable terahertz-mirror and multi-channel terahertz-filter based on one-dimensional photonic crystals containing semiconductors [J]. *Appl. Phys.*, 2011, 110(7):073111-1-6.
- [7] Goto M, Quema A, Takahashi H, *et al.* Teflon photonic crystal fibers as terahertz waveguide [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, 43:L317-L319.
- [8] Ho K M, Chan C T, Soukoulis C M. Existence of a photonic bandgap in periodic dielectric structures [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, 65(25):3152-3155.
- [9] Liu G Y, Ning Y Q, Zhang L S, *et al.* Two-dimension photonic crystal complete bandgap [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(2):169-173 (in Chinese).

- [10] Mur G. Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time domain electromagnetic field equations [J]. *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, 1981, 23(4):377-382.
- [11] Su A, Zhang N. Transmission spectrum characteristics of single-negative materials with one-dimensional photonic crystal [J]. *Chin. J. Lumin. (发光学报)*, 2010, 31(3):439-444 (in Chinese).

欢迎订阅 欢迎投稿

《光学 精密工程》(月刊)

《光学 精密工程》是中国仪器仪表学会一级学术期刊,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办,科学出版社出版。由国内外著名科学家任顾问,陈星旦院士任编委会主任,青年科学家曹健林博士担任主编。

《光学 精密工程》坚持学术品位,集中报道国内外现代应用光学、光学工程技术、光电工程和精密机械、光学材料、微纳科学与技术、医用光学、先进加工制造技术、信息与控制、计算机应用以及有关交叉学科等方面的最新理论研究、科研成果和创新技术。本刊自 2007 年起只刊发国家重大科技项目和国家自然科学基金项目及各省、部委基金项目资助的论文。《光学 精密工程》竭诚欢迎广大作者踊跃投稿。

本刊获奖:

中国精品科技期刊
中国权威学术期刊(RCCSE)
中国科学技术协会择优支持期刊
中国百种杰出学术期刊
第一届北方优秀期刊
吉林省精品期刊

国际检索源:

《美国工程索引》(EI Compindex)
《美国化学文摘》(CA)
《英国 INSPEC》(SA)
《俄罗斯文摘杂志》(PЖ)
《美国剑桥科学文摘》(CSA)

国内检索源:

中国科技论文统计源期刊
中国学术期刊(光盘版)
万方数据系统数字化期刊
台湾华艺中文电子期刊网
中国科学引文数据库
中国物理文献数据库
中国期刊网
中文核心期刊要目总览(北大)
中国学术期刊综合评价数据库
中国科学期刊全文数据库
中国光学文献数据库
中国学术期刊文摘
中国物理文摘

地 址: 长春市东南湖大路 3888 号

《光学 精密工程》编辑部

邮 编: 130033

电 话: (0431)86176855

传 真: (0431)84613409

E-mail: gxjmgc@ciomp.ac.cn

gxjmgc@vip.sina.com

http://www.eope.net

国内邮发代号: 12-166

国外发行代号: 4803BM

定 价: 50.00 元/期

帐 户: 中国科学院长春光学
精密机械与物理研究所

银 行: 中行吉林省分行营业部

帐 号: 220801471908091001