

太赫兹波在二维正三角晶格金属光子晶体中的传输特性

谭毅 袁纵横

(桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004)

摘要 运用频域有限元法研究了一种二维正三角晶格金属光子晶体在太赫兹波段的传输特性。该模型选取空气为背景材料,金属铜为介质柱。通过改变太赫兹波的入射方向、晶格常数和介质柱填充率,对 TM 模和 TE 模的传输特性进行了系统完整的分析,获得了太赫兹波在正三角晶格金属光子晶体中的传输规律。结果表明,传输特性随着介质柱填充率、晶格常数及太赫兹波入射方向的变化而变化,且 TE 模和 TM 模带隙差异很大,这为太赫兹波段的光子晶体滤波器、反射器和极化器的开发与制作提供了参考依据。

关键词 太赫兹技术;金属光子晶体;传输特性;正三角晶格

中图分类号 O431 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.071601

Transmission Characteristic of 2-D Regular Triangular Lattice Metallic Photonic Crystal in THz Range

Tan Yi Yuan Zongheng

(School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Transmission characteristic of terahertz wave in two-dimensional regular triangular lattice metallic photonic crystal is analyzed and studied through frequency-domain finite element algorithm. Copper is chosen for dielectric cylinder, and the background material is air. By changing the incident direction of terahertz, lattice constant and the ratio of filling material, and combining with a thoroughly systematic analysis of the transmission properties of both the TM mode and TE mode, the transmission patterns of terahertz in metallic photonic crystal with regular triangular lattice are acquired. The research results indicate that the characteristics of transmission are related to the ratio of filling material, lattice constant and incident direction of terahertz, and the band gap ranges of TE mode and TM mode are also very different. These have provided theoretic foundation for the development and production of photonic crystal filter, reflector and E/H polarization in terahertz region.

Key words Terahertz technique; metallic photonic crystal; transmission characteristic; regular triangular lattice

OCIS codes 160.5298; 160.5293; 040.2235

1 引言

太赫兹波是指频率从 100 GHz~10 THz,相应波长从 3 mm~30 μm 范围内的电磁波,位于电子学与光学的交界处^[1,2]。太赫兹波具有频率高、脉冲短、空间相干性好、光子能量低等特点。近年来,太赫兹波以其独特的优势已经引起了广大学者的重视,主要包括产生机理、检测技术、应用技术等方面^[3,4]。太赫兹技术

收稿日期: 2012-02-28; **收到修改稿日期**: 2012-03-28; **网络出版日期**: 2012-05-16

基金项目: 广西壮族自治区教育厅科研项目(201106LX215)资助课题。

作者简介: 谭毅(1985—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹波在光子晶体中传播方面的研究。

E-mail: tanyi1224@163.com

导师简介: 袁纵横(1957—),男,博士,教授,主要从事光电子技术及应用、光通信、光子晶体和表面等离子体等方面的研究。E-mail: yuanzongheng@sina.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(www.opticsjournal.net)

广泛应用于成像、探测、安检、通信及军事领域^[5]。太赫兹探测器^[6]、反射器、滤波器^[7]、调制器^[8]、波导^[9]等功能器件的研究已经变得非常热门。光子晶体作为一种新型的人工材料,研究太赫兹波在光子晶体中的传播具有重要的现实意义^[10]。

光子晶体是由不同介电常数的材料周期性排布构成的人工晶体。其概念是在1987年由Yablonvitch^[11]和John^[12]几乎同时各自提出的,它是根据传统的晶体概念类比而来的。光子晶体最大的特点就是禁带特性和光子局域特性。光子晶体的晶格常数需要与波长相当,因此波长越短,光子晶体的制作就越困难,太赫兹波其波长在微米量级,所以太赫兹波段的光子晶体的制作相对容易得多,而且其物理尺寸也比微波波段小,具有实用价值^[13]。与半导体介质相比,金属介质构成的光子晶体还具有其独特性质^[14~17],因此研究太赫兹波在金属光子晶体中的传播特性具有重要价值。

目前对太赫兹波在光子晶体中传播特性的研究,其介质柱形状一般为正方柱和圆柱,介质材料一般为硅、砷化镓等半导体材料,晶格类型一般为正方晶格和正三角晶格,但对于正三角晶格的研究没有涉及到波的入射方向。本文以空气为背景材料,金属铜圆柱为介质柱,对正三角晶格光子晶体结构参数进行较深入的研究,对TM模和TE模的传输特性进行了系统完整的分析,得出了太赫兹波在二维正三角晶格金属光子晶体中的传输特性与介质柱填充率、晶格常数及其太赫兹波的入射方向的关系。这对研制太赫兹波功能器件具有指导意义。

2 物理模型

图1为二维正三角晶格铜圆柱金属光子晶体结构示意图,该图为光子晶体横截面图,晶格常数为 a ,黑色部分为圆铜柱,铜柱轴向沿 x 方向,与纸面垂直,半径为 r ,白色部分为背景空气。金属的相对介电常数为电磁波频率的函数,在频域内的相对介电常数可表示为

$$\epsilon_r = 1 - i\sigma/\omega, \quad (1)$$

式中 ω 为电磁波的角频率, σ 表示金属的电导率,铜的电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$,相对磁导率取 $\mu_r = 1$ 。背景材料为空气,其相对介电常数和相对磁导率取1。由于太赫兹波沿 y 轴正方向入射与沿 z 轴正方向入射所导致的传输特性是不相同的,所以对于二维正三角晶格光子晶体传输特性的研究要选取两个入射方向,为了叙述方便将太赫兹波沿 y 轴正方向入射称为A方式入射,将太赫兹波沿 z 轴正方向入射称为B方式入射。

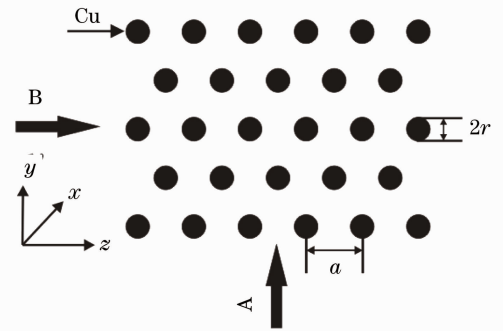


图1 二维正三角晶格铜柱光子晶体模型
Fig. 1 2-D regular triangular lattice photonic crystal mode of copper cylinder

3 仿真与分析

3.1 数学计算方法

采用四面体网格剖分的频域有限元法,适合横截面为任意形状和边界条件为周期边界的计算,通过对所建模型透射系数和反射系数进行分析,即可得出该模型的传输特性。有限元法的基本思想是通过与边值问题对应的泛函数得出等价的变分问题,把连续的求解域离散成单元格,对函数求极值,可得有限元的矩阵方程,从而得到整个问题域的电磁场分布情况。齐次亥姆霍兹场边值问题可以表述为

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\nabla \varphi) + k_c^2 \varphi = 0 \\ \varphi|_{s1} = \varphi A \\ \partial \varphi / \partial n|_{s2} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中 n 为法线方向, $s1 + s2$ 为总边界, k_c 为波数。将(2)式变分可得

$$\begin{cases} J(\varphi) = \int_u [(\nabla \varphi)^2 - k_c^2 \varphi] du \\ \varphi|_{s1} = \varphi A \end{cases}, \quad (3)$$

根据单元格形状,可以得到与形状有关的形状函数,将形状函数代入(3)式,可得单元泛函数,其矩阵表示为

$$\mathbf{J}_e(\varphi) = \boldsymbol{\varphi}_e^T \mathbf{K}_e \boldsymbol{\varphi}_e - \mathbf{K}_e^2 \boldsymbol{\varphi}_e^T \mathbf{T}_e \boldsymbol{\varphi}_e. \quad (4)$$

式中 \mathbf{K}_e 为单元系数矩阵。由单元系数矩阵可以得到合成的总刚度矩阵。通过在给定的边界条件下求总刚度矩阵就可以计算出其传输系数。有限元法可以用于任意不规则截面,而且特别适合周期性结构,所以用有限元法解决正三角晶格光子晶体的传输特性是非常合适的。

3.2 入射波方向对传输特性的影响

图2为两种入射方式的TE模透射系数对照图,其中 S_A , S_B 分别表示A方式和B方式入射的透射系数。模型参数设置为:晶格常数 $a=100 \mu\text{m}$,铜柱半径 $r=20 \mu\text{m}$ 。图中的透射系数以dB形式给出,在实际应用中,透射系数低于 -50 dB 就可以认为是禁带。由图2可知,两种入射方式对于TE模均有禁带,A方式入射的一级禁带为 $1.49 \sim 1.82 \text{ THz}$,B方式入射的一级禁带为 $1.90 \sim 2.33 \text{ THz}$,两禁带完全错开,B方式入射的禁带范围比A方式宽,透射系数更低,且禁带位置向高频端移动。在高频处,A方式入射会产生一个较窄的禁带,中心频率约为 3.33 THz ,然而B方式入射的禁带特性在高频处并不明显。

图3为两种入射方式的TM模透射系数对照图,其中 S_A , S_B 仍分别表示A方式和B方式入射的透射系数,参数设置与图2一致。由图3可知,对于TM模而言,两种入射方式均会产生一截止频率,且频率相同,约为 1.856 THz ,低于这个频率的波均被禁止传播,而且其透射系数非常低。对于第二级禁带,两种方式入射所产生的禁带差异非常大,A方式入射时,禁带范围为 $2.255 \sim 2.625 \text{ THz}$,B方式入射时,禁带范围为 $2.667 \sim 3.558 \text{ THz}$,两禁带也完全错开。可见,B方式入射时的禁带范围比A方式要宽得多,且B方式入射的禁带向高频端移动。

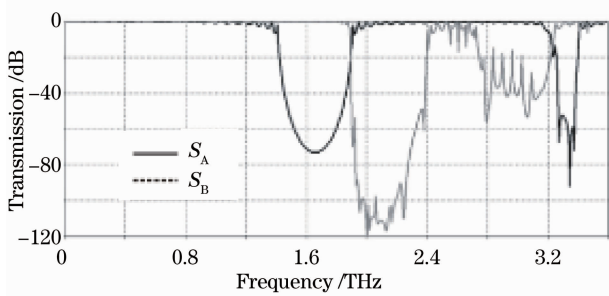


图2 两种入射方式的TE模透射系数对照图

Fig. 2 Transmission coefficient comparison of TE mode with two kinds of incident direction

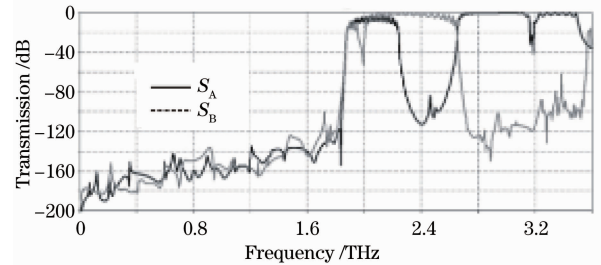


图3 两种入射方式的TM模透射系数对照图

Fig. 3 Transmission coefficient comparison of TM mode with two kinds of incident direction

3.3 晶格常数对传输特性的影响

选取以A方式入射作为研究对象,在保持介质材料和 $r/a=0.2$ 不变的情况下,分别研究了晶格常数 a 取 $60, 80, 100, 120 \mu\text{m}$ 时的传输特性。图4~6分别表示晶格常数 a 取 $60, 80, 120 \mu\text{m}$ 时的TE模、TM模传输特性,其中 S_{TE} , S_{TM} 分别表示TE模和TM模的传输特性,晶格常数为 $100 \mu\text{m}$ 的传输特性在上节中已给出。结果发现晶格常数对光子晶体禁带的影响非常大,主要体现在禁带频段的移动。将各图数据汇入表1,主要对比TE模的一级禁带, TM模的一级禁带和二级禁带。由表1可以看出,随着晶格常数的增大,TE模

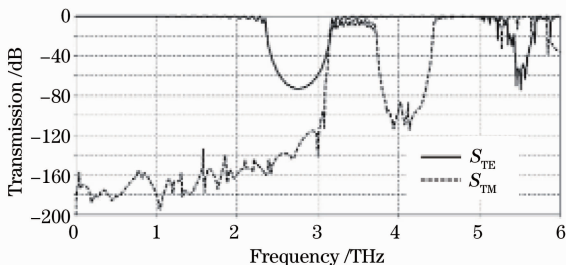


图4 $a=60 \mu\text{m}$ 时的传输特性

Fig. 4 Transmission coefficient when $a=60 \mu\text{m}$

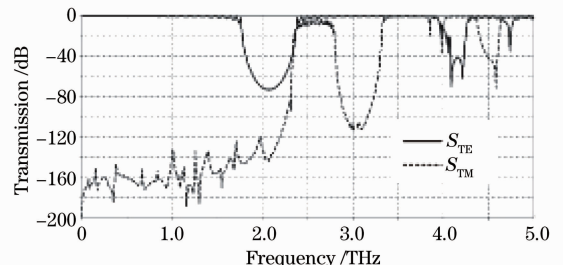


图5 $a=80 \mu\text{m}$ 时的传输特性

Fig. 5 Transmission coefficient when $a=80 \mu\text{m}$

的一级禁带与 TM 模的截止频率和二级禁带均向低频移动,且趋势非常明显,但并不改变带隙的总体结构特征。

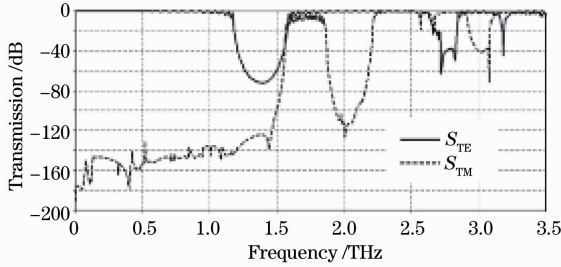


图 6 $a=120 \mu\text{m}$ 时的传输特性

Fig. 6 Transmission coefficient when $a=120 \mu\text{m}$

表 1 4 种晶格常数的禁带

Table 1 Band gap of 4 lattice constants

a / mm	First band gap of TE /THz	Cut-off frequency of TM /THz	Second band gap of TM /THz
60	2.48~3.05	3.10	3.76~4.38
80	1.85~2.29	2.32	2.83~3.28
100	1.49~1.82	1.86	2.26~2.62
120	1.24~1.52	1.55	1.88~2.19

3.4 介质柱填充率对传输特性的影响

选取以 A 方式入射作为研究对象,保持晶格常数 $a=100 \mu\text{m}$ 不变,通过改变介质柱半径来分析太赫兹波在二维正三角晶格金属光子晶体中的传播,分别计算了介质柱半径 r 取 10,15,20,25,30,35 μm 的传输特性,发现随着介质柱半径的变化,太赫兹波在二维金属光子晶体中传播呈现一定的规律。

图 7 为 r 取 10,20,30 μm 时 TE 模的传输特性,其中 S_{10}, S_{20}, S_{30} 分别表示介质柱半径为 10,20,30 μm 时的透射系数。由图可知当 $r=10 \mu\text{m}$ 时,无明显带隙,当 $r=20 \mu\text{m}$,中心频率约为 1.65 THz 处出现明显带隙,当 $r=30 \mu\text{m}$ 时,不仅低频处的带隙范围增大,在中心频率约为 3.77 THz 处出现良好带隙。可见对于 TE 模,随着介质柱半径的增加,低频处透射系数逐渐降低,带隙性能趋于明显,带隙宽度增大,中心频率向低频移动,当介质柱增大到一定尺寸时,高频处带隙特征开始显现出来。图 8 为 r 取 10,20,30 μm 时 TM 模的传输特性。由图可知,当 $r=10 \mu\text{m}$,TM 模的带隙特征已经明显显现出来,随着介质柱半径的增加,截止频率向高频移动,第二级禁带也向高频移动,两禁带间隔越来越小。

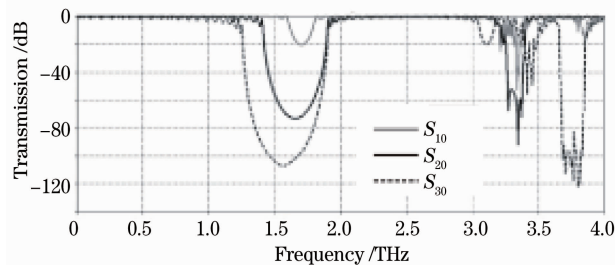


图 7 $r=10,20,30 \mu\text{m}$ 时 TE 模的传输特性

Fig. 7 Transmission coefficient of TE mode when

$r=10,20,30 \mu\text{m}$

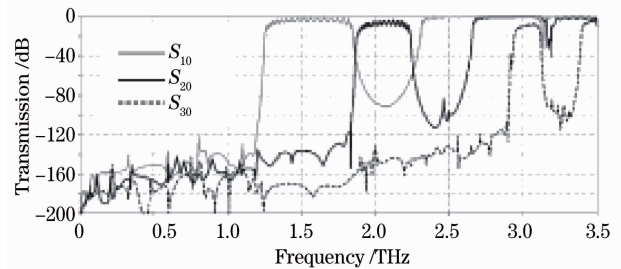


图 8 $r=10,20,30 \mu\text{m}$ 时 TM 模的传输特性

Fig. 8 Transmission coefficient of TM mode when

$r=10,20,30 \mu\text{m}$

4 结 论

对太赫兹波在二维正三角晶格金属光子晶体中传输特性进行了较深入的分析。结果表明,对于正三角晶格构成的金属光子晶体,太赫兹波从两个方向入射的传输特性差异较大,对于 TE 模来说,B 方式入射时 TE 模的第一级禁带较 A 方式入射向高频移动,两种入射方式的禁带频段完全错开,B 方式入射的禁带范围比 A 方式入射宽;对于 TM 模而言,两种方式入射对截止频率的影响甚微,但 B 方式入射会使得 TM 模的第二级禁带向高频移动,且禁带范围大大增加。在保持介质柱材料及其填充率一致的情况下,晶格常数的改变主要是引起禁带频段的移动,并不改变禁带的结构特征,随着晶格常数的增加,各种禁带均向低频移动。介质柱半径的改变对 TE 模和 TM 模的影响并不相同,当介质柱半径较小的时候,TE 模无禁带,而 TM 模禁带特性良好,随着介质柱半径的增加,TE 模低频处的带隙趋于良好,且在高频处开始出现带隙,而 TM 模则表现出截止频率与第二级带隙均向高频移动的特点。综上所述,TE 模和 TM 模的带隙差异很大,频段并不

相同, 这为 THz 波段的光子晶体滤波器和反射器, 尤其是极化器的开发与制作提供了参考依据, 在低频处, TM 模存在一截止频率, 低于截止频率的波被禁止传播。合理设置光子晶体尺寸与结构, 可以方便制作出人们所需要的 H 极化器。

参 考 文 献

- 1 Xu Jingzhou, Zhang Xicheng. Terahertz Technology and Application[M]. Beijing: Beijing University Press, 2007. 1~7
许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007. 1~7
- 2 Gu Zhi, Chen Yuan, Li Huanyong *et al.*. Research progress of terahertz radiation sources[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(5): 252~256
谷 智, 陈 沅, 李焕勇 等. 太赫兹辐射源的研究进展[J]. 红外技术, 2011, **33**(5): 252~256
- 3 Wei Hua. The prospects for THz detection techniques development[J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(10): 231~234
魏 华. 太赫兹探测技术发展展望[J]. 红外技术, 2010, **32**(10): 231~234
- 4 Zhou Ping, Fan Dianyuan. Terahertz generation based on optical fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 708~712
周 平, 范滇元. 基于光纤的太赫兹产生技术[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 708~712
- 5 Yang Guangkun, Yuan Bin, Xie Dongyan *et al.*. Analysis on the use of THz technology in the military application[J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(4): 376~380
杨光颀, 袁 斌, 谢东彦 等. 太赫兹技术在军事领域的应用[J]. 激光与红外, 2011, **41**(4): 376~380
- 6 Du Yanli, Liu Xiaomin, Duan Zhiyong *et al.*. Research progresses on terahertz detectors [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, **30**(4): 481~485
杜艳丽, 刘晓旻, 段智勇 等. 太赫兹波探测器的研究进展[J]. 半导体光电, 2009, **30**(4): 481~485
- 7 Xue Chaomin, Liu Jiansheng, Zheng Zheng *et al.*. Terahertz filters[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(1): 43~49
薛超敏, 刘建胜, 郑 铮 等. 太赫兹滤波器[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(1): 43~49
- 8 Su Jian, Chen Heming. Terahertz wave modulator based on liquid-crystal-filled photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2710~2713
苏 坚, 陈鹤鸣. 基于液晶光子晶体的太赫兹波调制器[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2710~2713
- 9 Huang Wanwen, Li Baojun. Progress on terahertz waveguide devices[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(7): 9~15
黄婉文, 李宝军. 太赫兹波导器件研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2006, **43**(7): 9~15
- 10 H. Liu, J. Yao. Propagation characteristics of two-dimensional photonic crystals in the terahertz range[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **87**(1): 57~63
- 11 E. Yablonvitch. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 12 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 13 Yan Xin, Zheng Yi. Propagation characteristic of 2D triangular lattice photonic crystal in THz range[J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(3): 263~267
闫 昕, 郑 义. 太赫兹波在二维三角晶格光子晶体中的传播特性[J]. 激光与红外, 2008, **38**(3): 263~267
- 14 Yan Binying, Chen Heming. Band gap properties and defect characteristic of metallic photonic crystal in the terahertz region [J]. *Optic & Optoelectronic Technology*, 2009, **7**(3): 38~39
闫斌英, 陈鹤鸣. THz 波段金属光子晶体的带隙及缺陷特性分析[J]. 光学与光电技术, 2009, **7**(3): 38~39
- 15 Wang Huajuan, Bi Gang, Yang Dongxiao *et al.*. Characteristic of metallic photonic crystal in THz range[J]. *J. Micro Waves*, 2005, **21**(1): 31~34
王华娟, 毕 岗, 杨冬晓 等. 太赫兹波在金属光子晶体中的传播特性[J]. 微波学报, 2005, **21**(1): 31~34
- 16 Benjamin Reinhard, Garik Torosyan, René Beigang. Band structure of terahertz metallic photonic crystals with high metal filling factor[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(20): 201107
- 17 Yuan Xiaodong, Liu Ken, Ye Weimin *et al.*. Study on extraordinary optical transmission through arrays of holes metal films based on scattering matrix method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0131001
袁晓东, 刘 肯, 叶卫民 等. 基于散射矩阵方法的金属光子晶体薄膜异常光学透射研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 0131001