

文章编号:1001-5078(2014)03-0306-03

· 太赫兹技术 ·

锥台型光子晶体在太赫兹波段的透射特性

刘子辰, 朵天波, 陈 均, 潘 武
(重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065)

摘要:设计一种工作于太赫兹波段的锥台型光子晶体,利用 CST 软件研究了光子晶体的禁带特性。通过在 0.3 ~ 1 THz 范围内进行模拟仿真得出,锥台型光子晶体存在光子禁带。与普通的圆柱形光子晶体进行了对比,并对不同的参数进行仿真发现:禁带范围会随着参数的改变而整体移动,其中取锥台顶部半径 0.05 ~ 0.1 mm 间隔 0.01 mm,发现随着锥台顶部圆的半径的减小,禁带向高频方向移动。取晶格常数 0.2 ~ 0.3 mm 间隔 0.05 mm 发现随着晶格常数的增大会使禁带向低频方向移动。研究结果为太赫兹光子晶体波导研究提供理论依据。

关键词:光子晶体;太赫兹;光子禁带;CST MWS

中图分类号: O451 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2014.03.019

Transmission characteristic of frustum terahertz photonic crystal in THz wave domain

LIU Zi-chen, DUO Tian-bo, CHEN Jun, PAN Wu

(Photoelectricity Engineering, Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: A frustum photonic crystal which is working in the terahertz band is designed. The CST MWS is used to study the band-gap properties of photonic crystals. From the simulation in THz range from 0.3 THz to 1 THz, the frustum photonic crystals have photonic band gap. Compared with the general cylindrical photonic crystals, the photonic crystals are simulated by relevant simulation software, it is found that band gap range moves with the change of the parameters, which changes radius of frustum top from 0.05 to 0.1 mm spacing with 0.01 mm, it is found that band gap shifts to high frequency with the decrease of the radius at the top of the frustum. Changing the lattice constant from 0.2 to 0.3 mm spacing with 0.05 mm, it is found that the band gap shifts towards low frequency with the increase of lattice constant. The research results provide theoretical basis for the study of the terahertz photonic crystal waveguide.

Key words: photonic crystal; terahertz; photonic band-gap; CST MWS

1 引言

太赫兹辐射^[1-3]是频率从 0.3 THz (1000 μm) 到 3 THz (100 μm), 介于微波和红外波段之间的电磁辐射。太赫兹波的研究和应用涉及物体成像、医疗诊断、通信技术等多领域。由于太赫兹波介于微波和红外之间, 在一段时期受波源和探测技术的限制, 以至于形成太赫兹空白区。近年来随着太赫兹光源和探测技术的发展, 太赫兹技术的研究已成为国内外研究的热点。太赫兹波在自由空间中传输时, 由于水蒸气的吸收和大气散射造成了太赫兹能量的大幅衰减, 因此基于波导的太赫兹传输器件的研究成为目前太赫兹技术研究

的一个重要分支。

1987年, Yablonovitch^[4]和 John^[5]首次分别提出了光子晶体的概念, 光子晶体是由不同介电常数的介质材料在空间周期排布形成的, 当电磁波在其中传播时会形成光子带隙。频率处于光子带隙中的电磁波不能在光子晶体中传播。标准波导中一个很小的弯曲会导致辐射损耗, 但是基于光子晶体的波导在急弯曲时可以低损耗甚至无损耗地传输光, 因此

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目 (No. CSTC2010BB2414) 资助。

作者简介: 刘子辰 (1988 -), 男, 硕士研究生, 主要研究工作是太赫兹技术。E-mail: sandyone28@126.com

收稿日期: 2013-07-20

光子晶体波导可以很好地控制太赫兹波的传输方向并用于集成光路控制。通过研究太赫兹波在光子晶体中的传输特性,可以为设计具有方向控制的小型集成波导器件提供理论依据^[6-10]。

本文设计了一种锥台型结构的光子晶体,利用 CST MWS 软件的时域求解器计算了这种结构光子晶体透射谱,通过改变结构参数,得到了透射谱随结构的变化规律。这些研究结果为太赫兹器件的开发提供了理论依据,具有潜在的应用价值。

2 物理模型

锥台型光子晶体的三维结构如图 1(a)所示,它是由两个完全相同的锥台组合而成的,对于单个锥台的尺寸,设定 R_t 为锥台顶部圆的半径, R_b 为底部圆的半径, h 为锥台组合体的高度,如图 1(b)所示。相邻两个锥台组合体中心位置的距离定义为晶格常数 a ,如图 1(c)所示。

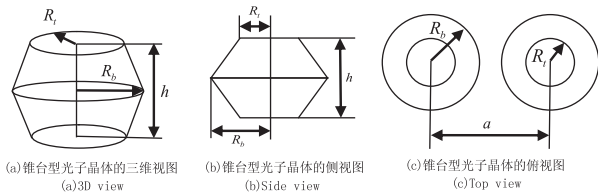


图1 锥台型光子晶体

Fig.1 The frustum photonic crystal

根据文献,光子晶体的尺寸应小于其工作波长,在 0.3 ~ 1 THz 频率范围时,对应波长 0.3 ~ 1 mm 范围,据此设定锥台形光子晶体的结构参数 $h = 0.2 \text{ mm}$; $R_b = 0.1 \text{ mm}$; $R_t = 0.05 \text{ mm}, 0.06 \text{ mm}, 0.07 \text{ mm}, 0.08 \text{ mm}, 0.09 \text{ mm}, 1.00 \text{ mm}$; $a = 0.2 \text{ mm}, 0.25 \text{ mm}, 0.3 \text{ mm}, 0.35 \text{ mm}, 0.4 \text{ mm}, 0.45 \text{ mm}$ 。光子晶体的材料应选择相对介电常数较大的材料,故本文选用 GaAs,相对介电常数为 $\epsilon_a = 12.94$,背景材料为空气 $\epsilon_b = 1$ 。

如图 2 所示,锥台型光子晶体在两个方向上是无限扩展的,根据电磁场中的镜像原理,在其中一列周期结构的左右两侧采用理想磁壁(PMC)边界,上下两面采用理想电壁(PEC,如图 3 所示)。在周期结构的前后两个面上加波端口(Wave Port)激励,并设置 open addspace 边界,这是由于波导端口的位置至少要离周期结构 $\lambda/8$ 的距离,这样可以排除结构不连续性产生的高次截止模对端口场分布的影响以获取正确的传输参数。这样设置可以等效为 TEM 平面波垂直入射,激励一个平板双导线,并在双线结构中嵌入了周期结构,由于在双线系统中传播的 TEM 电磁波不存在截止频率,因此仿真频率范围可

以从零频设置至足够大^[11]。

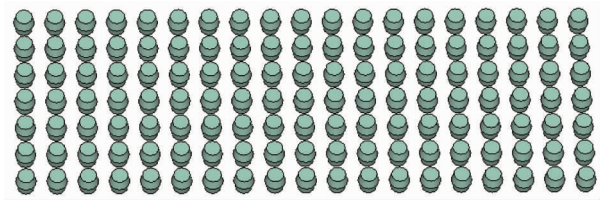


图2 锥台型光子晶体阵列三维图

Fig.2 The frustum photonic crystal array

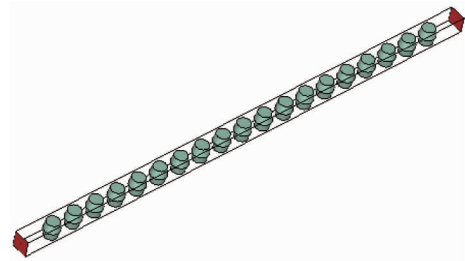


图3 单列锥台型介质柱

Fig.3 Single row of the frustum photonic

3 仿真分析

3.1 锥台型光子晶体结构参数对带隙的影响

固定锥台型光子晶体的高 $h = 0.2 \text{ mm}$;底部圆半径 $R_b = 0.1 \text{ mm}$;晶格常数 $a = 0.3 \text{ mm}$;通过取不同顶部圆半径 R_t 值 1.00 mm, 0.09 mm, 0.08 mm, 0.07 mm, 0.06 mm, 0.05 mm, 可以分别得到如图 4 所示的六组透射率,其中 $R_t = 1.00 \text{ mm}$ 时介质柱为标准的圆柱形,其禁带范围为 341.3 ~ 440.1 GHz; $R_t = 0.09 \text{ mm}$: 356.0 ~ 467.3 GHz; $R_t = 0.08 \text{ mm}$: 371.4 ~ 494.6 GHz; $R_t = 0.07 \text{ mm}$: 392.4 ~ 520.5 GHz; $R_t = 0.06 \text{ mm}$: 417.6 ~ 541.5 GHz; $R_t = 0.05 \text{ mm}$: 442.1 ~

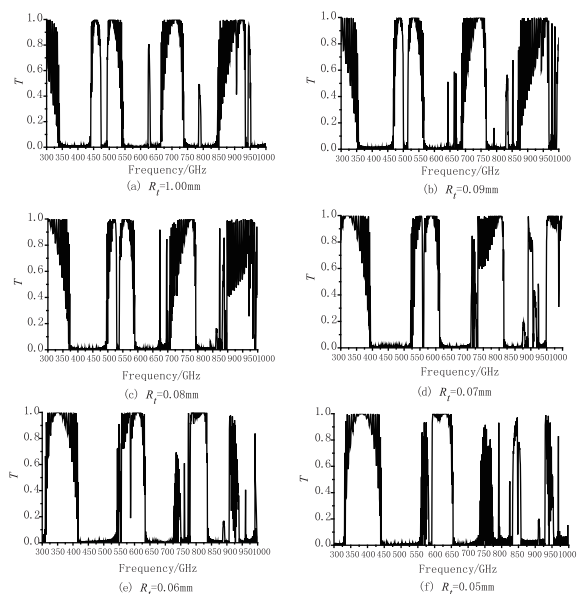


图4 不同 R_t 透射率图

Fig.4 The transmissivity of different R_t

550.6 GHz。禁带范围随着 R_t 的减小而逐渐向高频方向移动。与传统圆柱型光子晶体相比,这种锥台型的光子晶体可以对禁带范围进行微调,满足不同频带的需求。

3.2 晶格常数 a 对光子禁带的影响

固定锥台型光子晶体的 $R_b = 0.1 \text{ mm}$, $R_t = 0.08 \text{ mm}$, $h = 0.2 \text{ mm}$, 分别取晶格常数 $a = 0.2 \text{ mm}$, $a = 0.25 \text{ mm}$, $a = 0.35 \text{ mm}$, $a = 0.4 \text{ mm}$, $a = 0.45 \text{ mm}$ 并与 $a = 0.3 \text{ mm}$ 所得结果进行对比,透射率图如图 5 所示,其中 $a = 0.2 \text{ mm}$ 时为 a 可能取到的最小值,此时带隙范围为 458.9 ~ 503.7 GHz; 当 $a = 0.25 \text{ mm}$ 时,带隙范围为 404.3 ~ 505.1 GHz; 当 $a = 0.3 \text{ mm}$ 时,带隙范围为 371.4 ~ 494.6 GHz; 当 $a = 0.35 \text{ mm}$ 时,带隙范围为 353.9 ~ 474.3 GHz; 当 $a = 0.4 \text{ mm}$ 时,带隙范围为 339.9 ~ 446.3 GHz; 当 $a = 0.45 \text{ mm}$ 时,带隙范围为 328.0 ~ 414.8 GHz。可以看出随着 a 的增大,带隙范围向低频方向移动。

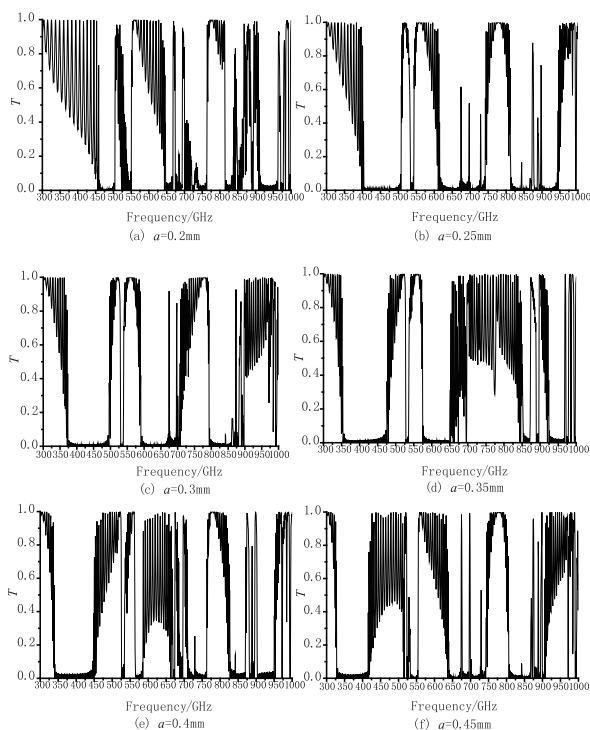


图 5 不同晶格常数透射率图

Fig. 5 The transmissivity of different lattice constant

4 结论

本文研究了一种由两个锥台组成的组合型光子晶体在太赫兹波段的带隙特性,锥台型组合光子晶体介质柱采用相对介电常数为 12.94 的 GaAs 材料按四方晶格排列,在晶格常数 $a = 0.3 \text{ mm}$ 时,锥台的顶部半径在 0.05 ~ 1.00 mm 范围内,随着半

径的减小会使禁带向高频方向移动。晶格常数在 0.2 ~ 0.45 mm 范围内变化时,随着晶格常数的增大会使禁带向低频方向移动。研究结果为太赫兹光子晶体波导研究提供了理论依据。

参考文献:

- [1] Hosako I, N Sekine, M Patrashin. At the dawn of a new era in terahertz technology[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(8): 1612 - 1623.
- [2] Rostami A, H Rasooli, H Baghban. Terahertz technology fundamentals and applications [M]. New York: Springer, 2011.
- [3] Yao Jiangquan, Chi Nan. Study and outlook of terahertz communication technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2214 - 2233. (in Chinese)
姚建铨, 迟楠. 太赫兹通信技术的研究与展望[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2214 - 2233.
- [4] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58(20): 2059 - 2062.
- [5] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58(23): 2486 - 2489.
- [6] Ai Taotao. Progress in the study of photonic crystals[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(12): 1257 - 1262. (in Chinese)
艾桃桃. 光子晶体的研究进展[J]. 激光与红外, 2009, 39(12): 1257 - 1262.
- [7] Tian D, H Zhang, Q Wen, Z Wang, S Li. Dual cylindrical metallic grating-cladding polymer hollow waveguide for terahertz transmission with low loss [J]. Appl. Phys. Lett., 2010, 97(13): 133502(1 - 3).
- [8] R W Ziolkowski. Design, fabrication, and testing of double negative metamaterials[J]. IEEE Trans. Antennas Propagate., 2003, 51: 1516 - 1529.
- [9] Yang Bo, Liang Jinqi, Liang Zhongzhu, et al. Study on the band gaps of 2D metallic photonic crystal[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(3): 314 - 318. (in Chinese)
杨波, 梁静秋, 梁中翥, 等. 二维金属型光子晶体带隙研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(3): 314 - 318.
- [10] Chen Shuhan, Zeng Menglin, Lin Enyu, et al. Research on band structure of square spiral photonic crystal[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(7): 795 - 798. (in Chinese)
陈书汉, 曾梦琳, 林恩宇, 等. 方形螺旋光子晶体的能带结构研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(7): 795 - 798.
- [11] Yee K S. Numerical solution of Initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media [J]. IEEE. Trans. Antennas Propagate., 1966, 14(4): 302 - 307.