

doi: 10.3788/gzxb20164502.0216002

微波段左手材料光子晶体带隙特性研究

刘文莉, 唐婷婷, 何修军

(成都信息工程大学 光电技术学院, 成都 610225)

摘 要:利用电磁理论和传输矩阵法仿真得到了在 0.3~6.935GHz 微波波段具有负折射率的左手材料,并分别对右手材料和左手材料构成的光子晶体带隙特点进行了分析.结果表明:右手材料光子晶体结构的带隙对周期数变化不敏感,而对层厚度比、入射角度变化敏感;左手材料光子晶体带隙随层厚度比的增大,带隙位置出现蓝移,随着入射角度的增大,TM 波主带隙的上带边会出现红移,而 TE 波带隙特性对入射角度变化不敏感.研究结果对微波技术中全方位反射器等器件的设计有一定的参考意义.

关键词:光子晶体;传输矩阵;左手材料;带隙;蓝移;红移

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)02-0216002-4

Band Gap Characteristics of Photonic Crystals Consisted of Left-Handed Material in the Microwave Band

LIU Wen-li, YUAN Yi-dan, TANG Ting-ting, HE Xiu-jun

(College of Optoelectronic Technology, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Using the electromagnetic theory and the method of transfer matrix, a kind of left-handed material with negative refractive index in 0.3~6.935 GHz microwave band was obtained. The band gap characteristics of photonic crystal consisted of right-handed material and left-handed materials were analyzed, respectively. The results show that the band gap of photonic crystal consisted of right-handed material is sensitive to the thickness ratio and the incidence angle, while is not sensitive to the change of period number. To the left-handed material photonic crystal, the band gap position appears blue shift as the thickness ratio increasing, and the upper band edge of main band gap appears red shift phenomenon as the incidence angle increasing, but the band gap of TE wave is not sensitive to the change of incidence angle. These properties are significance to design omnidirectional reflector in microwave technologies.

Key words: Photonic crystal; Transfer matrix; Left-handed material; Band gap; Blue shift; Red shift

OCIS Codes: 160.5293;160.5298;160.3918

0 引言

光子晶体^[1-2]是一种折射率周期性变化的材料,其周期性所带来的布喇格散射,使得它能够在一定频率范围内产生光子带隙(光子禁带).利用光子带隙特性可以制作全新的光子晶体全反射镜^[3-5]、微波天线、光子晶体滤波器^[6]、光波导、光子晶体光纤等^[7-8].影响光子晶体带隙的参量主要有结构参量和材料参量,结构参量包括晶格常量、介质的厚度比以及周期数等.材料参量包括相对介电常量和磁导率.分析这些参量对带

隙结构的影响对设计新型光子晶体器件有积极的意义.

左手材料^[9-10](Left Handed Material, LHM)也称负折射率材料,是指介电常量和磁导率同时为负数的材料,在这种介质中,电场、磁场和电磁波传播常量三者之间构成左手螺旋关系.介电常量和磁导率中某一个为负数的材料称为单负材料^[11].左手材料具有负折射率、逆 Doppler 效应、完美成像^[12-13]等光学和电磁学性质,含左手材料的光子晶体结构成为目前研究的热点之一. Lin M^[14]等研究了含左手材料光子晶体结构

基金项目:四川省科技厅资助项目(No. 2014ZR0044)和四川省教育厅资助项目(No. 13Z200)资助

第一作者:刘文莉(1975-),女,讲师,硕士,主要研究方向为光子晶体及其器件. Email:liuwl2000@cuit.edu.cn

收稿日期:2015-07-22;录用日期:2015-11-02

<http://www.photon.ac.cn>

的全向反射和滤波特性;Gerardin J^[15]从分布式布喇格反射分析了反射系数随单元厚度变化规律;Kang Y Q^[16]等研究了单负材料光子量子阱中的共振模;尚廷义^[17]等研究了含负折射率材料一维光子晶体的全方位带隙和缺陷模;张利伟等^[18-20]研究了含左手材料一维光子晶体的反射相特性以及零平均折射率带隙的展宽问题.这些研究大都局限于由左手材料和右手材料(Right Handed Material, RHM)或单负材料和右手材料交替构成的结构.本文研究了 A、B 层均为左手材料一维二元光子晶体结构的带隙特性,分别分析了 A、B 层均为右手材料或均为左手材料的带隙特性,由影响两种结构带隙带宽和位置的因素得到的相关参量.

1 计算模型

图 1 是由 A 和 B 两种不同材料组成的一维二元光子晶体结构.图中 A 层和 B 层的几何厚度分别为 d_A 和 d_B .当 A 和 B 的折射率均取正值时,得到传统的一维光子晶体,即右手材料光子晶体.

要使 A 和 B 层均为负折射率材料(左手材料),可令 A 和 B 层的介电常量和磁导率分别为^[21]

$$\epsilon_A = 1 - \omega_{epa}^2 / 2 \quad (1)$$

$$\mu_A = 3 - \omega_{mpa}^2 / 2 \quad (2)$$

$$\epsilon_B = 3 - \omega_{epb}^2 / 2 \quad (3)$$

$$\mu_B = 1 - \omega_{mpb}^2 / 2 \quad (4)$$

对应 A、B 层材料的折射率为

$$n_A = \sqrt{\epsilon_A \mu_A} \quad (5)$$

$$n_B = \sqrt{\epsilon_B \mu_B} \quad (6)$$

式中 ω_{epa} 为 A 材料的电等离子体频率, ω_{mpa} 为 A 材料的磁等离子体频率,两者均取为 14 GHz. ω_{epb} 为 B 材料的电等离子体频率, ω_{mpb} 为 B 材料的磁等离子体频率,二者均取为 12 GHz.

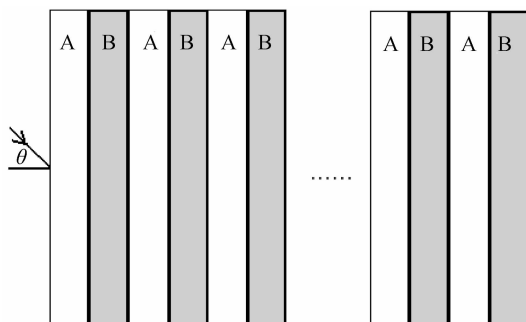


图 1 一维二元光子晶体结构

Fig. 1 Structure of 1D dual photonic crystal

对微波段 0.3~30 GHz 进行仿真分析后得到图 2 所示的 A、B 层材料的折射率随频率的变化关系图.由图 2 可知,频率小于 8.17 GHz 时, A 材料折射率为负,频率在 8.17~13.84 GHz 之间时, A 材料折射率为零,频率大于 13.84 GHz 时, A 材料折射率为正.对 B 材

料而言,频率小于 6.935 GHz 时,材料折射率为负,频率在 6.935~12 GHz 之间时,折射率为零,频率大于 12 GHz 时,折射率为正.由此可以确定,频段在 0.3~6.935 GHz 之间时, A 和 B 材料折射率均为负值.

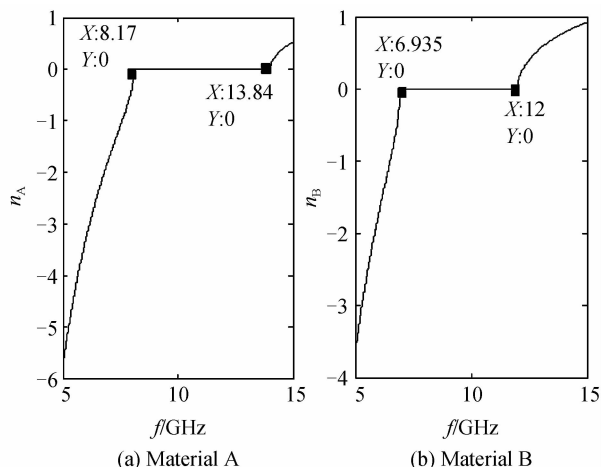


图 2 材料折射率 n 与频率 f 的关系

Fig. 2 Relationship between n and f

2 仿真结果及分析

利用传输矩阵理论^[22]仿真得到一维光子晶体结构在正入射时的透射图,见图 3.图 3(a)中 A 层取 MgF_2 , 折射率 $n_A = 1.38$, 厚度 $d_a = 24$ mm, B 层取 ZnS , 折射率 $n_B = 2.35$, 厚度 $d_b = 24$ mm, 周期依次取 $N = 6, 8, 12$.图 3(b)是 A、B 层均为左手材料光子晶体结构的带隙图,其折射率由式(1)~(6)决定,这里, A、B 层厚度仍为 24 mm.

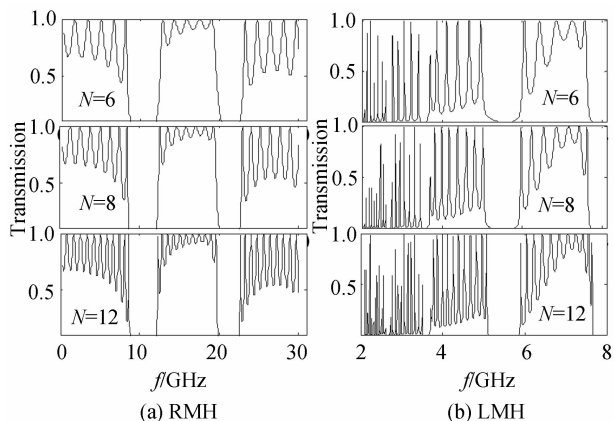


图 3 带隙与周期 N 的关系

Fig. 3 Relationship between band gap and period N

图 3(a)表明, A、B 层均为右手材料的光子晶体结构在整个微波频段形成两个禁带(带隙),分别位于 9~12 GHz, 20~22 GHz 频段.随周期的增加,带隙的位置和带宽不变,但带隙的带边变得陡峭.

图 3(b)表明,左手材料光子晶体结构在左手频段 0.3~6.935 GHz 处存在两个带隙,分别位于 3.5~3.75 GHz(次带隙)和 5~6 GHz(主带隙)处,与右手

材料光子晶体结构一样,这两个带隙的带边和带宽不随周期 N 的变化而变化,而带边随周期 N 的增大变得陡直。

图 4 是正入射时光子晶体结构带隙与厚度比 k 的关系图,定义层厚度比为 $k = d_a/d_b$ 。图 4(a)、(b) 分别是右手材料和左手材料构成光子晶体结构的带隙图。由图 4(a) 可知,随 A、B 层厚度比 k 的减小,带隙个数增多,带隙位置发生移动,带隙宽度变小。这个结果可以用固体物理中克龙尼克-潘纳模型解释,即 k 越小,光子所受势场的差异越小,光子能量的禁带就越小。由图 4(b) 可知,随 A、B 层厚度比 k 的减小,次带隙个数增多,主带隙个数不变,主带隙宽度不变,各带隙的位置集体出现蓝移,这正是左手材料光子晶体结构带隙的特点。

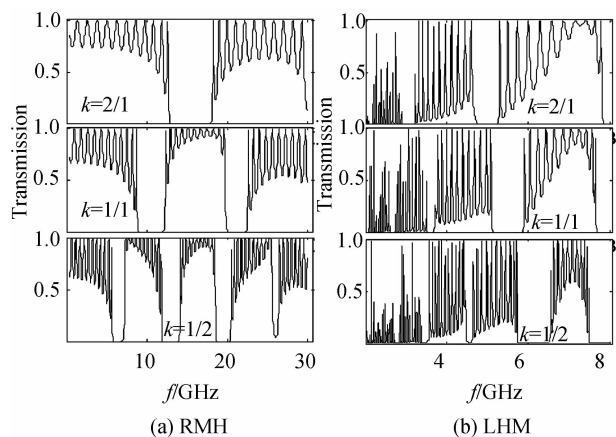


图 4 带隙与厚度比 k 的关系

Fig. 4 Relationship between band gap and k

图 5 是 TE 波的带隙随入射角度 θ 的变化关系图。图 5(a) 表明,右手材料构成的光子晶体结构在微波波段存在两个明显的带隙。0° 时,两带隙位于 9~12 GHz, 20~22 GHz 频段。随入射角 θ 的增大,两个带隙的带边逐渐蓝移。在 86° 时,两带隙位置各移至 9~15 GHz, 21~28 GHz 处,带宽从 3 GHz, 2 GHz 扩宽

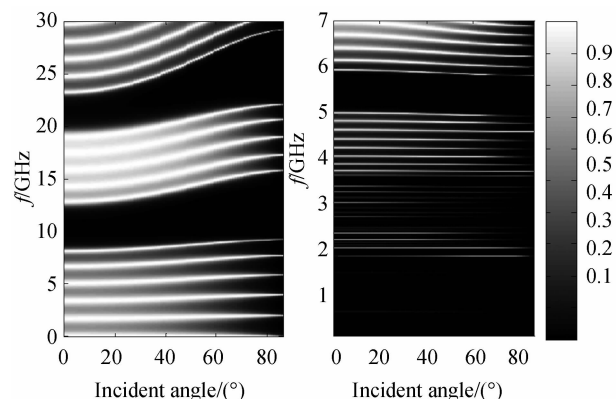


图 5 TE 波带隙与入射角度 θ 的关系

Fig. 5 Relationship between band gap of TE wave and θ

为 6 GHz, 7 GHz。图 5(b) 表明,左手材料光子晶体结构在左手频段也存在两个带隙。0° 时,两个带隙分别位于 3.5~3.75 GHz (次带隙)、5~6 GHz 频段 (主带隙)。随入射角 θ 的增大,该结构两个带隙的位置、带宽基本不变,这说明左手材料结构中,TE 波的带隙对入射角 θ 的敏感度不高。此性质可用于微波段全角度反射器以及全方向大角度天线的设计。

图 6 是 TM 波带隙与入射角度 θ 的关系。由图 6(a) 可知,右手材料结构中 TM 波存在两个带隙。0° 时,两个带隙位于 9~12 GHz, 20~22 GHz 频段。随入射角 θ 的增大,两个带隙都会出现蓝移,在 86° 时,两禁带分别移至 9~14 GHz, 23~26 GHz 频段,带宽从 3 GHz, 2 GHz 扩宽为 5 GHz, 3 GHz。图 6(b) 表明,随入射角 θ 的增大,左手材料结构 TM 波次带隙的位置和带宽均不变,而主带隙的上带边会出现红移,从 6 GHz (0° 时) 移动到 5.6 GHz (86° 时),主带隙的带宽略有减小,这表明左手材料 TM 波对入射角 θ 仍具有一定敏感性。不同于右手材料光子晶体带隙的是该结构带隙只在上带边出现频移。

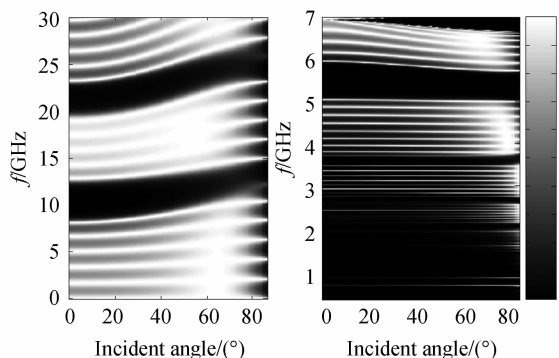


图 6 TM 波带隙与入射角度 θ 的关系

Fig. 6 Relationship between band gap of TM wave and θ

3 结论

本文分析了左手材料和右手材料的带隙特点,结果表明:对于右手材料光子晶体,当周期 N 增加时,带隙的宽度、位置和个数不变;当厚度比 k 减小时,带隙的宽度变小、个数增多、位置移动;当入射角度 θ 增大时,带隙宽度增大,对应 TE 和 TM 波的带隙个数不变,带隙带边位置出现蓝移。对于左手材料光子晶体,当 N 增加时,其带隙宽度、带边位置和带隙个数不变;当 k 减小时,带隙宽度基本不变,带隙个数不变,带隙的带边位置出现蓝移;当入射角度 θ 增大时,相应 TE 波的带隙宽度、位置和个数均不变。TM 波的两个带隙的变化规律不一样,主带隙上带边会出现红移,带宽略有减小,次带隙保持位置和带宽不变,也体现出对入射角度 θ 的不敏感性。这些性质对微波器件,如全角度、固定频段全方向反射器件的设计具有参考意义。

参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Physical Review Letter*, 1987, **58**(20): 2059-2062.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letter*, 1987, **58**(23): 2486-2489.
- [3] GENG Hong-gang, CHEN Guang-de. A combination of one-dimensional photonic crystal reflector Almighty [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1245-1249.
耿红刚, 陈光德. 组合一维光子晶体全能反射镜[J]. 光子学报, 2005, **34**(8): 1245-1249.
- [4] CHEN K M, SPARKS A W, LUAN H C, *et al.* SiO₂/TiO₂ omnidirectional reflector and microcavity resonator via the sol-gel method[J]. *Applied Physics Letters*, 1999, **75**: 3805-3808.
- [5] FINK Y, WINN J N, FAN S H, *et al.* A dielectric omnidirectional Reflector[J]. *Science*, 1998, **282**(27): 1679-1682.
- [6] WANG Jia-yu, WANG Yong-shun, GUAN He-lan, *et al.* Tunable frequency filter and directional filter based on one-dimensional photonic crystals containing negative refraction materials[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2011, **40**(2): 400-404.
王嘉宇, 王永顺, 管荷兰, 等. 基于负折射率材料一维光子晶体可调节的频率和方向滤波器[J]. 人工晶体学报, 2011, **40**(2): 400-404.
- [7] TANG Fa-ling, LIU Gui-qiang, LI Lei, *et al.* Three channels wavelength division multiplexing of two-dimensional triangular lattice photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12): 1470-1473.
唐发林, 刘桂强, 黎磊, 等. 二维三角晶格光子晶体三通道解波分复用器[J]. 光子学报, 2012, **41**(12): 1470-1473.
- [8] YANG Y, POO Y, WU R X, *et al.* Experimental demonstration of one-way slow wave in waveguide involving gyromagnetic photonic crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(23): 231113.
- [9] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, *et al.* Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. *Physical Review Letter*, 2000, **84**(18): 4184-4187.
- [10] ZIOLKOWSKI R W, HEYMAN E. Wave propagation in media having negative permittivity and permeability [J]. *Physical Review E*, 2001, **64**(5): 056625.
- [11] ALU A, ENGHETA N. Guided modes in a waveguide filled with a pair of single-negative (SNG), double-negative (DNG), and/or double-positive (DPS) layers [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2004, **52**(1): 197-209.
- [12] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letter*, 2000, **85**(18): 3966-3969.
- [13] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, **10**: 509-514.
- [14] LIN M, OUYANG Z B, XU J, *et al.* Omnidirectional and multi-channel filtering by photonic quantum wells with negative-index materials[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(7): 5681-5686.
- [15] GERARDIN J, LAKHTAKAI A. Negative index of refraction and distribution Bragg reflector[J]. *Microwave and Optical Technology Letter*, 2002, **34**(6): 409-411.
- [16] KANG Y Q, ZHANG C M, GAO P, *et al.* Electromagnetic resonance tunneling in a single-negative sandwich structure [J]. *Journal of Modern Optics*, 2013, **60**(13): 1021-1026.
- [17] KANG Yong-qiang. Reflection phase characteristic left-handed material containing one-dimensional photonic crystals [J]. *Journal of Shanxi Datong University*, 2015, **31**(2): 21-24.
康永强. 含左手材料一维光子晶体的反射相特性[J]. 山西大同大学学报, 2015, **31**(2): 21-24.
- [18] SHANG Ting-yi, ZHENG Yi, ZHANG Hui-yun, *et al.* Containing negative refraction materials comprehensive one-dimensional photonic crystal bandgap and defect mode [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 664-666.
尚廷义, 郑义, 张会云, 等. 含负折射率材料一维光子晶体的全方位带隙和缺陷模[J]. 光子学报, 2007, **36**(4): 664-666.
- [19] ZHANG Li-wei, DU Gui-qiang, XU Jing-ping, *et al.* Experimental research on zero average refractive index transmission line technology (zero-n) band gap [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 1953-1957
张利伟, 杜桂强, 许静平, 等. 基于传输线技术的零平均折射率(zero-n)带隙的实验研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(8): 1953-1957.
- [20] SUN Jian, ZHENG Yi, DING Chun-feng, *et al.* Zero average refractive index of left-handed material containing heterostructure photonic crystal band gap broadening [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1702-1706.
孙健, 郑义, 丁春峰, 等. 含左手材料异质结构光子晶体的零平均折射率带隙的展宽[J]. 光子学报, 2009, **38**(7): 1702-1706.
- [21] LI J, ZHOU L, CHAN C T, *et al.* Photonic band gap from stack of positive and negative index materials [J]. *Physical Review Letter*, 2003, **90**: 083901.
- [22] TANG Jun, YANG Hua-jun, XU Quan, *et al.* Analysis of the transfer characteristics of one-dimensional photonic crystal and its application with transfer matrix method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(1): 76-80.
唐军, 杨华军, 徐权, 等. 传输矩阵法分析一维光子晶体传输特性及其应用[J]. 红外与激光工程, 2010, **39**(1): 76-80.