

文章编号: 1001-3806(2010)02-0232-04

含负折射率材料的1维光子晶体掺杂缺陷模研究

苑秋红, 谢康, 韩艳芬

(电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

摘要: 为了研究含有负折射率材料的光子晶体掺杂缺陷模的光学传输特性, 利用传输矩阵理论进行数值分析。采用插入和替代两种方式对排列整齐的光子晶体进行掺杂, 产生了缺陷模式。结果表明, 引入正折射率缺陷只能在布喇格带隙中产生缺陷模, 引入负折射率缺陷能够同时在全方位光子带隙和布喇格带隙中产生缺陷模。同时研究了掺杂方式、入射方向、缺陷厚度、缺陷位置、缺陷类型对缺陷模式的影响, 并对含有两层缺陷的光子晶体进行研究, 得到两缺陷层的距离与带隙产生的关系, 即距离越近越容易产生缺陷模式, 且缺陷模的深度越深。这对于制造新型的全方位滤波器是有指导作用的。

关键词: 光学器件; 负折射率; 传输矩阵; 光子晶体; 缺陷模式; 全方位光子带隙; 布喇格带隙
中图分类号: O734 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.02.024

Study on 1-D photonic crystal containing negative refraction material with impurity defects

YUAN Qiu-hong, XIE Kang, HAN Yan-fen

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: With the help of the transmission matrix, the optical transmission property of 1-D photonic crystal containing negative refraction material with impurity defects was studied. There are two methods, insertion and substitution, to introduce defects into the arranged photonic crystal, and defect modes should happen. The defect modes resulted from negative defect often appears in the omni-directional photonic band gap, while those resulted from positive defect usually appears in the Bragg gap. The effect of doped method, incident direction, the thickness, defect location and defect type on the defect modes was studied. After analyzing two-defect-layer photonic crystal, the relation between the distance of both the layers and the band gap was found, i. e., the nearer the defect layers, the easier and deeper the defect modes generated. The conclusions are useful for making the new type omni-directional filters.

Key words: optical devices; negative index; transmission matrix; photonic crystals; defect mode; omni-directional gap; Bragg gap

引言

负折射率介质是一种新颖、奇异的光学介质, 因此, 迄今为止的许多工作都是集中在对这种材料的理解, 对其存在合理性的检验以及对原有理论现象进行重新审度的基础上。这种材料包括双负材料, 即同时具有负的介电常数和负的磁导率, 从而具有负的折射率^[1]。电磁波在其中传播, 波矢方向和能流方向相反, 在正负折射率材料交界面上具有负的折射方向^[2]。除了双负材料之外, 也包含单负材料, 就是介

电常数和磁导率中只有一种为负, 这种材料称为单负材料^[3]。

2000年, 美国加州大学圣迭哥分校科研小组将金属丝板和谐振环板有规律地排列在一起, 制作了世界上第1块等效介电常数和等效磁导率同时为负数的媒质, 频率范围约为4.2GHz~4.6GHz^[4]。2001年, 这个研究小组又制作了射线波段等效介电常数和等效磁导率同时为负数的媒质, 并且用实验证明了当电磁波斜入射到左手征介质和右手征介质的分界面时, 折射波的方向与入射波的方向处在分界面法线的同侧。这两个实验所用的人造媒质的尺寸都比较小, 实验都是在波导中进行的。2002年, BAYINDIR等人对电磁波在尺寸较大的这种媒质中传播特性进行了实验研究, 也证实了负等效介电常数和负等效磁导率的存在^[5-6]。

在光子晶体中引入负折射材料必然会得到新的传输性质, 可以用来制造更多的光通信器件。目前

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(60588502); 国家自然科学基金资助项目(60607005)

作者简介: 苑秋红(1980-), 女, 硕士, 主要从事光子晶体的研究。

E-mail: yuanqiu hong_2002@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-12-27; 收到修改稿日期: 2009-03-10

正负折射率介质交替的光子晶体的光学特性已经有了一定的研究^[7-8]。主要集中在其能带结构研究、色散特性研究等。作者在传统光子晶体的基础上,对含有双负材料的光子晶体的能带结构进行数值模拟分析,并对引入缺陷后,其透射特性及缺陷模式进行了分析。

1 理论基础

由A,B两种不同材料组成的1维2元光子晶体,介质层排列顺序为 $(AB)^N$ 。均匀厚度的介质层的表面平行于 $x-y$ 平面,而电磁波是从平面 $x-y$ 进入并沿 z 轴正方向的传播。相应的实际厚度分别为 d_A, d_B ,其中A层为正折射率材料,介电常数分别为 ε_A ,磁导率分别为 μ_A ,B层为负折射率材料,虽然在某些区域内的介电常数和磁导率为正,但是在一段频率范围之内,介电常数 $\varepsilon_B < 0$,磁导率 $\mu_B < 0$,A和B两种材料的折射率分别表示为 n_A, n_B 。 θ_i 为透射角,见图1。

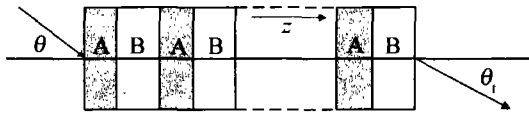


Fig. 1 The structure of 1-D photonic crystal

根据最近的研究成果^[9],某些各向同性的、具有色散特性的负折射率材料的等效介电常数和等效磁导率随角频率 ω 变化的表达式可以近似表示为:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 - \frac{\omega_{ep}^2}{\omega^2} \quad (1)$$

$$\mu(\omega) = \mu_0 - \frac{\omega_{mp}^2}{\omega^2} \quad (2)$$

式中, μ_0 和 ε_0 分别表示无扰传输线的固有介电常数和固有磁导率, ω_{ep} 为电场等离子体频率, ω_{mp} 为磁等离子体频率。当 ω 远远大于 ω_{ep} 和 ω_{mp} 时, $\varepsilon(\omega)$ 和 $\mu(\omega)$ 将会趋于恒定的值。这种色散材料可以通过周期性的金属装载传输线组装制作而成。最近的研究表明,这种负折射率材料具有很好的微波特性,例如,具有很低的吸收损耗和较大的透射带宽。

当一束入射光在真空中以 θ 入射角入射到由负折射率材料和正折射率材料周期性排列而成的1维光子晶体中,并假设入射波矢 $k(\omega)$ 位于 $x-z$ 的平面内。对于TE波来讲,电矢量 E 在 y 方向,而对于TM波来讲,磁矢量 H 在 y 方向。由传输矩阵^[10],TE波每一层的传输矩阵表示如下:

$$M_{TE} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \frac{-i\mu\sin\delta}{\sqrt{\varepsilon\mu - \sin^2\theta}} \\ \frac{-i\sin\delta\sqrt{\varepsilon\mu - \sin^2\theta}}{\mu} & \cos\delta \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $\delta = k_z \times \Delta z$, Δz 表示相位变化, $k_z = \pm \frac{\omega}{c} \times \sqrt{\varepsilon\mu - \sin^2\theta}$, c 为光速,正号代表折射率取正值,负号对应的是负折射率。由(1)式和(2)式可以看出,虽然B材料为负折射率材料,事实上仅仅是在某段频率内为负折射率,跟入射光的频率有关,数值模拟的时候要注意。

整个光子晶体的传输矩阵为:

$$M = \prod_{r=1}^N M_r = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

光的透射系数为:

$$t(\omega) = \frac{2\cos\theta}{(m_{11} + m_{22})\cos\theta + m_{12} + m_{21}\cos^2\theta} \quad (5)$$

光的透射率为:

$$T = |t(\omega)|^2 \quad (6)$$

TM波的计算公式与上面的类似,本文中主要对TE波进行研究。

2 计算仿真结果分析

在下面的研究中选用两种材料构成规则的光子晶体,其中正折射率介质的折射率为 $n_A = 1.5$,负折射率介质的折射率由 $n(\omega) = -\sqrt{\mu(\omega)\varepsilon(\omega)}$ 给出,介质的厚度: $d_A = 16\text{mm}$, $d_B = 8\text{mm}$,周期数为20。为了简便,假设所用的正折射率都是非磁性的($\mu = 1$),所有的入射波为TE波。 $\varepsilon_0 = 1.21$, $\mu_0 = 1$, $\omega_{ep} = \omega_{mp} = 10$,注意角频率 ω 在运算时转化为 $\omega = 2\pi f$, f 为频率,数量级为吉赫兹。规则的正负交替排列的光子晶体中存在两种光子带隙,一种几乎不会随入射角度的改变而改变,称为全方位光子带隙;另一种会随入射角度的改变而改变,称为布喇格带隙^[11-12]。

若在周期性介质结构中加入第3种介质C,就会形成掺杂缺陷;或让其替代A或B,就会形成替代缺陷。引入的缺陷如果是具有正折射率,则称为正折射缺陷,若具有负折射率则称为负折射缺陷。数值模拟取值时,缺陷层的有效介电常数和磁导率与正折射率和负折射率层的大小一致,就是厚度不一样。

首先进行采用插入正折射缺陷,即在中间位置引入折射率为 $n_A = 1.5$ 的材料,即 $(AB)^{10}C(AB)^{10}$,缺陷的厚度分别取8mm,15mm和30mm。其余参量与前面一致,一共20层。

通过图2可以看出,引入正折射率缺陷后,在全方位光子带隙内并没有产生缺陷模,随着缺陷的厚度变化,第1带隙的位置和宽度都没有受到影响。而Bragg带隙中都产生了缺陷模式,随着掺杂的厚度的增加,缺陷模位置发生移动,可见全方位光子带隙非常稳定。

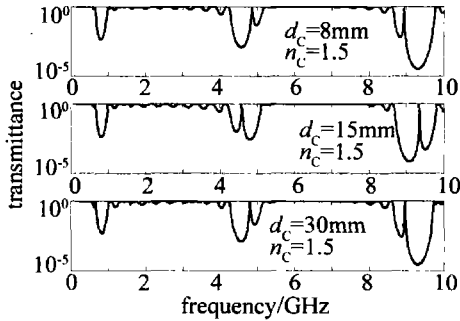


Fig. 2 Transmittance varying with different thickness from positive index

图3是中间的插入是正折射率介质,且 $d_c = 30\text{mm}$ 的时候,入射角度分别为 $0, \pi/6, \pi/4, \pi/3$ 时对应的透射图。从图3中可以看出,随着入射角度的增大,全方

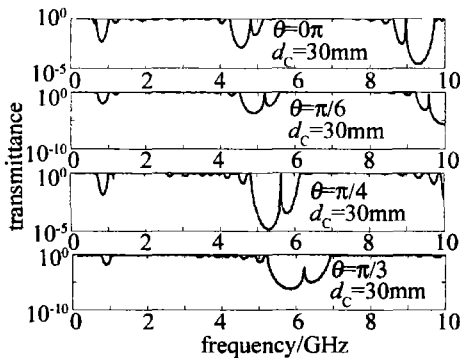


Fig. 3 Transmittance varying with different incident angle from positive index
位带隙几乎不变化,不会出现缺陷模式,而在 Bragg 带隙的带宽会伴随入射角度的增大而增大,并向高频移动,缺陷模式也会随之向高频段移动。

这里设计的1维光子晶体也可以作为滤波器,但是通过上面插入正折射率材料显然在全方位光子带隙内是办不到的,下面的方法可以办到。改变一下插入材料的性质,即引入负折射率缺陷,性质与B层一致,见图4。缺陷的厚度分别取8mm,15mm和30mm。可以

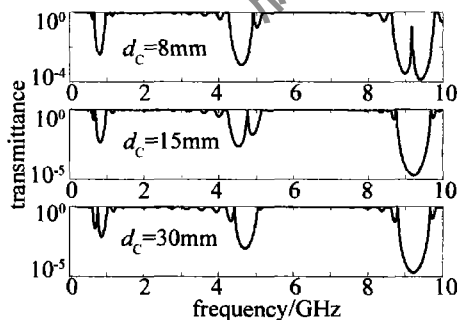


Fig. 4 Transmittance varying with different thickness from negative index
观察出当插入负折射率缺陷的时候,同样会产生缺陷模式,但是产生缺陷模的位置不仅仅局限早 Bragg 带隙中,当掺入的厚度达到一定的值时,在全方向带隙中也产生了缺陷模。

图5是中间的插入是负折射率介质的时候, $d_c = 30\text{mm}$ 的时候,入射角度分别为 $0, \pi/6, \pi/4, \pi/3$ 时

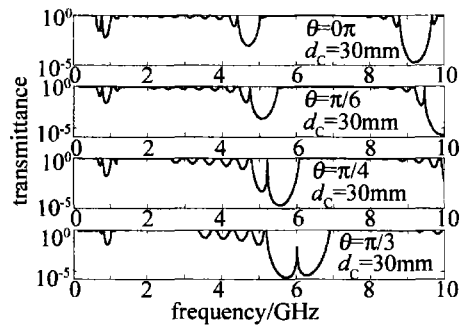


Fig. 5 Transmittance varying with different incident angle from negative index

应的透射图。通过图5可以发现,不仅仅在 Bragg 带隙中产生缺陷模式,在全方位带隙中同样产生了缺陷模。全方位带隙中的缺陷模受入射角度的影响远远小于 Bragg 带隙中的缺陷模,随着入射角度的变化,几乎不会移动,幅度的改变也很小。Bragg 带隙也会随着入射角度的增加而增大,整个带隙将会随入射角度的增加向高频移动,缺陷模的深度随角度的增大,幅度越来越小。

前面采用插入方式产生缺陷模,下面采用替代的方式产生。替代也有两种情况,用C层替代A层即 $(AB)^{10}CB(AB)^9$,此时C层采用的参量与B层的完全一致,用C层替代B层,即 $(AB)^{10}AC(AB)^9$ 时,C层参量与A层完全一致。

从图6可以看出,替代A层与替代B层的效果完

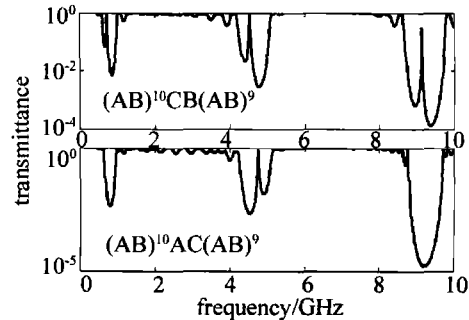


Fig. 6 Transmittance varying with different substituting layer

全不同,在用具有负折射性质的C层去替代A层时,仅仅替代一层,就在带隙中产生了缺陷模,而且在全方位带隙中也有缺陷模式的产生。而用正折射率的A层去替代一层B时,在全方位带隙中没有出现缺陷模。

上面仅仅是对插入或者替代一层且处于中间位置的光子晶体的带隙特性进行了研究分析,并对同时具有多层缺陷的含有负折射率的光子晶体进行了研究。首先 $(AB)^{20}$ 中的两层进行替代,被替代层的厚度为 $d_c = 30\text{mm}$,这两层具有相同的性质,即同为正折射率缺陷或者同为负折射率缺陷,为正折射率缺陷时,折射率与A层相同,为负折射率缺陷,缺陷层的内部参量与B层

一致。

图7有6副小图,其中,图7a~图7c分别代表代

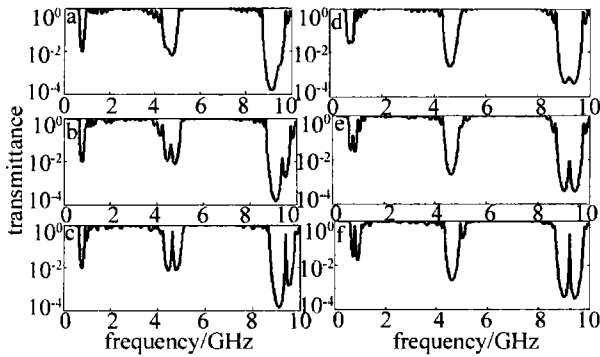


Fig. 7 The influence of the type and introducing way of the defect on the defect mode

表结构为 $(AB)^2CB(AB)^{16}CB$, $(AB)^4CB(AB)^{14}CB$, $(AB)^7CB(AB)^{11}CB$ 的掺杂光子晶体, C 层为正折射率缺陷。图7d~图7f 结构与之对应,但是 C 层为负折射率缺陷。可以看出,由正折射率缺陷进行替代时,随着两层缺陷的靠近,Bragg 带隙中缺陷模逐渐出现,且深度逐渐的加大。而全方位带隙中并没有出现缺陷模式。当负折射率缺陷来替代 A 层时,随着两缺陷层的靠近,在全方位带隙中出现了缺陷模式,并且随着量缺陷层的靠近,缺陷模的深度不断的加深。

前面研究了两层替代方式对缺陷模式的影响,图8是插入两层缺陷后,对透射图谱的影响曲线图。其

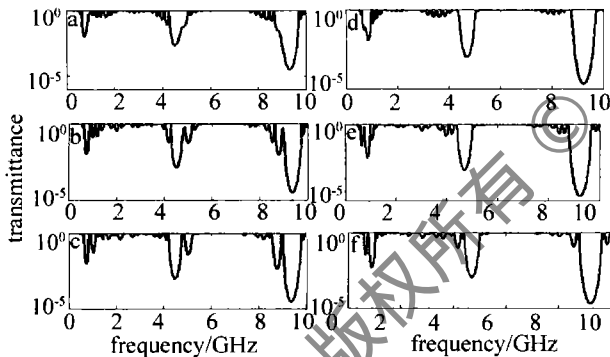


图8a~图8c分别代表代表结构为 $(AB)^2C(AB)^{16}C(AB)^2$, $(AB)^4C(AB)^{12}C(AB)^4$, $(AB)^6C(AB)^8C(AB)^6$ 的掺杂光子晶体, C 层为正折射率缺陷。图8d~图8f 结构与之对应,但是 C 层为负折射率缺陷。可以看出,由正折射率缺陷进行插入时,随着两层缺陷的靠近,Bragg 带隙中缺陷模慢慢出现,且深度逐渐的加大,随着缺陷层的接近,全方位带隙中逐渐出现缺陷模式。而由负折射率缺陷进行插入时,随着两缺陷层的靠近,在全

方位带隙中出现了缺陷模式,并且随着量缺陷层的靠近,缺陷模的深度不断的加深。

3 结论

作者建立了简单的模型,利用传输矩阵法数值研究了含有负折射率材料的1维光子晶体掺杂时的透射特性。采用两种方式对规则的光子晶体引入缺陷,两种方式中的缺陷也采用两种不同的性质的材料,缺陷模的位置不同,解决了如何在全方位带隙中产生缺陷模的难题。

模型中所用的负折射率材料模型是建立在已经有实验证实的人造的负折射率材料基础上的,其实对负折射率材料正在进行研究的有很多,这种数值研究有利于实验研究和负折射率材料的应用推广。

参考文献

- [1] SMITH D R. Negative refractive index in left-handed materials[J]. Phys Rev Lett, 2000, 85(14):2933-2936.
- [2] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Vspkhi, 1968, 10(4):509-514.
- [3] FREDKIN D R, RON A. Effectively left-handed (negative index) composite material[J]. A P L, 2002, 81(10):1753-1755.
- [4] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, *et al.* Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Phys Rev Lett, 2000, 84(18):4184-4187.
- [5] BAYINDIR M, AYDIN K, OZBAY E, *et al.* Transmission properties of composite metamaterials in free space[J]. A P L, 2002, 81(1):120-122.
- [6] BAYIZDZR M. Problems in theoretical mechanics [M]. Istanbul: Tubitak Yayinlari, 2002:262-272.
- [7] LI J, ZHOU L, CHAN C T, *et al.* Photonic band gap from a stack of positive and negative index materials[J]. Phys Rev Lett, 2003, 90(8):083901-083904.
- [8] GAO L, TANG C J, WANG S M. Photonic band gap from a stack of single-negative materials[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2006, 301(2):371-377.
- [9] ZHANG H Y, ZHANG Y P, WANG P, *et al.* Frequency response in photonic heterostructures consisting of single-negative materials[J]. J A P, 2007, 101(1):013111/1-013111/3.
- [10] DENG X H, LIU N H. Resonant tunneling properties of photonic crystals consisting of single-negative materials[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(4):529-533.
- [11] QI J X, WEN Sh Ch. Research of optical properties of one-dimensional photonic crystals constructed by ositive-negative refractive materials[J]. Laser Technology, 2006, 30(5):504-506 (in Chinese).
- [12] HU Ch B, XU Y P, HE H Sh. Comment on Properties of one-dimensional photonic crystals containing negative refraction materials [J]. Proc SPIE, 2007, 6831:68310E/1-68310E/10.