

含单层负折射率缺陷的光子晶体的光学特性

董海霞¹ 董丽娟¹ 杨成全¹ 石云龙^{1,2*}

(¹大同大学固体物理研究所, 山西 大同 037009)
(²同济大学波耳固体物理研究所, 上海 200092)

摘要 利用转移矩阵法研究了含单层负折射率缺陷的一维光子晶体缺陷模的光学特性。结果表明,随着缺陷层厚度的增加,缺陷模的频率呈现分阶段的变化。第一阶段为单调递增,第二阶段为过渡过程,第三阶段为单调递减。这些性质与缺陷层为正常材料的相应结构有很大的不同。尽管第三阶段与之有点相似,但此时移动的速度却较大。研究还发现,整个过程缺陷模移动得比缺陷层为正常材料时要快。

关键词 材料;光子晶体;光学特性;转移矩阵;负折射材料

中图分类号 O431;O483;O734 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.1006002

Optical Properties of One-Dimensional Photonic Crystal Containing a Single Defect Layer with Negative Refractive Index

Dong Haixia¹ Dong Lijuan¹ Yang Chengquan¹ Shi Yunlong^{1,2}

(¹*Institute of Solid-State Physics, Datong University, Datong, Shanxi 037009, China*)
(²*Pohl Institute of Solid-State Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract By using transfer-matrix method, optical properties of defect modes in one-dimensional photonic crystal containing a single defect layer with negative refractive index are studied. It is found that when the thickness of defect is increased, the frequency of defect modes can be changed presenting several stages. First stage is monotonously increased, second stage is a transitional process, and the third is monotonously decreased. These properties are different from those of the structure that defect layer has positive refractive index. Though the third stage is somewhat alike, but now defect modes move with greater speed. It is also found that in the whole process defect modes move faster than them in the structure containing a defect layer with positive refractive index.

Key words materials; photonic crystal; optical property; transfer-matrix; negative refraction materials

OCIS codes 160.5298; 160.4670; 160.4760

1 引 言

光子晶体是周期性排列的介电结构^[1],在光子晶体中引入缺陷时,带隙中会出现局域的缺陷模,光波就可以在缺陷中传播,故对光子晶体缺陷模^[2~7]的研究已相当重要。这种材料有许多新奇的特性,如负折射、逆多普勒效应和逆切仑科夫辐射等。若将负折射率材料加到光子晶体中,由于掺杂效应和相位补偿效应的双重作用,使得在光子带隙中有可能出现多种特性的缺陷模^[8~10]。比如利用含双负

缺陷的光子晶体耦合腔结构,可同时实现窄带滤波和宽带滤波的双重滤波功能^[8]等。

光子晶体可以实现负折射性质,这在理论及实验上都已证实^[11]。20世纪90年代后期,人们开始尝试用特异材料来实现负折射性质,这种材料就是负折射率材料。它在自然界并没找到,是通过人工合成的。2000年前后,Smith等将负介电常数材料(金属线阵列)与负磁导率材料(开口金属谐振环阵列)组合起来构造出了负折射率材料^[12]。2002年,

收稿日期: 2011-05-12; 收到修改稿日期: 2011-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(10974123)、高等学校博士学科点专项科研基金(20090072110052)和山西省自然科学基金(2010021006)资助课题。

作者简介: 董海霞(1977—),女,硕士,讲师,主要从事一维光子晶体方面的研究。E-mail: donghx@stu.xjtu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: shi_yunlong@yahoo.com.cn

Grbic 等^[13,14]又分别提出了利用微波传输线模型实现负折射率材料,这样制备的材料损耗较小,并且得到的负折射率带较宽。目前负折射率材料大多是基于这两种方法制备的。

本文从理论上讨论了一种较简单的结构,即把负折射率材料当作缺陷加到正常材料组成的一维光子晶体中形成的结构,完整地模拟了缺陷模随缺陷层厚度变化的特性,结果出现了一些新异的物理现象,通过对该结构缺陷模光学特性的研究,能更清楚地看到与缺陷层为正常材料时相应结构的异同。

2 计算方法

当电场方向位于 y 轴的横电(TE)波从空气中正入射到该结构时,位于 $z+\Delta z$ 和 z 处的电场和磁场分量通过转移矩阵^[15,16]相连接:

$$\mathbf{M}_i(\Delta z, \omega) = \begin{pmatrix} \cos(k_i \Delta z) & -\frac{1}{|n_i|} \sin(k_i \Delta z) \\ |n_i| \sin(k_i \Delta z) & \cos(k_i \Delta z) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 $k_i = \frac{\omega}{c} n_i$, i 对应不同的材料, c 为真空中的光速。若 $n_i > 0$ 时, $k_i > 0$, 矩阵 $\mathbf{M}_i(\Delta z, \omega)$ 为正常材料的转移矩阵。若 $n_i < 0$ 时, $k_i < 0$, 矩阵 $\mathbf{M}_i(\Delta z, \omega)$ 则为负折射率材料的转移矩阵。假设连接入射端和出射端电磁场的矩阵为

$$\mathbf{X}_N(\omega) = \prod_{j=1}^N \mathbf{M}_j(\Delta z, \omega), \quad (2)$$

式中 N 表示结构的总层数。经过计算,可得结构的透射率为

$$T = \left| \frac{2}{(x_{11} + x_{22}) + i(x_{12} - x_{21})} \right|^2, \quad (3)$$

式中 x_{ab} ($a, b = 1, 2$) 为 $\mathbf{X}_N(\omega)$ 的矩阵元。

3 数值模拟

考虑这样一个 ABABABC BABABA 结构,其中 A、B 是正常材料。材料的折射率和厚度分别为 $n_A = 3.5, n_B = 1.0, d_A = 0.02 \text{ m}, d_B = 0.07 \text{ m}$ 。

若缺陷 C 是正常材料,令 $n_C = 2.0$ 。该结构中缺陷模的频率会随缺陷层厚度 d_C 的变化而变化,结果如图 1 所示。从图中可看出,缺陷为正常材料时,缺陷模频率随着缺陷层厚度的增加变化是单调递减的。且随着 d_C 的增加,当低频处的缺陷模还没完全从低频通带移出时,高频处的缺陷模就已从高频通带移进来了。这样就有可能同时出现多个缺陷模,可以设计多通道滤波器。

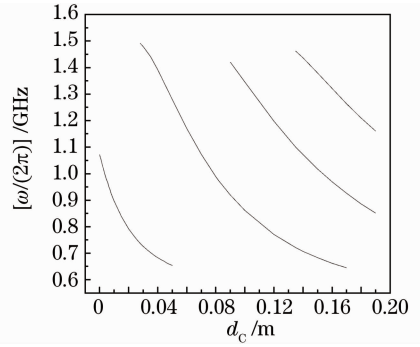


图 1 $n_C = 2.0$ 时缺陷模的频率随 d_C 的变化

Fig. 1 Dependence of the defect frequency on the change of d_C with $n_C = 2.0$

若缺陷 C 是负折射率材料,令 $n_C = -2.0$ 。此时结构中缺陷模的频率随缺陷层厚 d_C 的变化如图 2 所示。从图中可直观地看出,缺陷模频率随着缺陷层厚度 d_C 增加的变化不是单调的,整个过程大体可分为三个阶段。

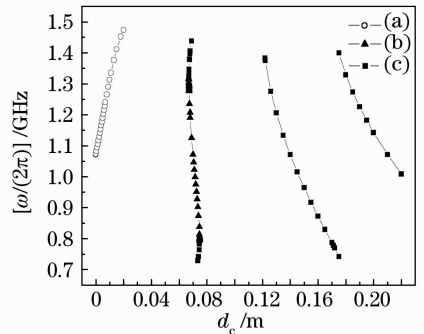


图 2 $n_C = -2.0$ 时缺陷模的频率随 d_C 的变化

Fig. 2 Dependence of the defect frequency on the change of d_C with $n_C = -2.0$

第一阶段与图 2(a) 对应。由图可知,随着 d_C 的增加,缺陷模一直向高频移动,最终消失在高频通带里。之后随着 d_C 的增加,带隙中没有缺陷模出现,完全是禁带。

第二阶段如图 2(b) 所示,这是一个过渡阶段,它发生在非常小的厚度范围里。图 3 是它的放大图。在该阶段中,当 $d_C = 0.0670 \text{ m}$ 时,带隙中高频区域出现了一个透射率很低的缺陷模,随着 d_C 的增加,此缺陷模的透射率迅速升高到 1,然后分裂成两个缺陷模,如图 4(a) 所示。继续增大,频率高的缺陷模向高频移动且迅速消失在高频通带中,而频率低的缺陷模一直向低频移动。当 $d_C = 0.074 \text{ m}$ 时,缺陷模移动到低频通带附近,这时在低频通带中渐渐又分裂出一个缺陷模,从而带隙中出现了两个缺陷模。继续增加 d_C ,原来向低频移动的缺陷模仍然向低频移动,而分裂出的缺陷模却向高频移动,当

$d_c = 0.07475$ m时,两个缺陷模相遇并重合在一起。继续增加 d_c ,这个缺陷模的透射率快速降为0,从带隙中消失,如图4(b)所示。之后增加 d_c ,带隙中没有缺陷模出现。

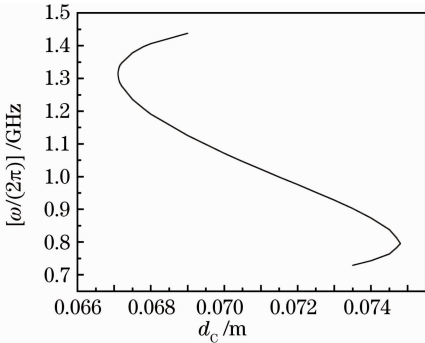


图3 第二阶段的特性图

Fig.3 Graph of the second stage

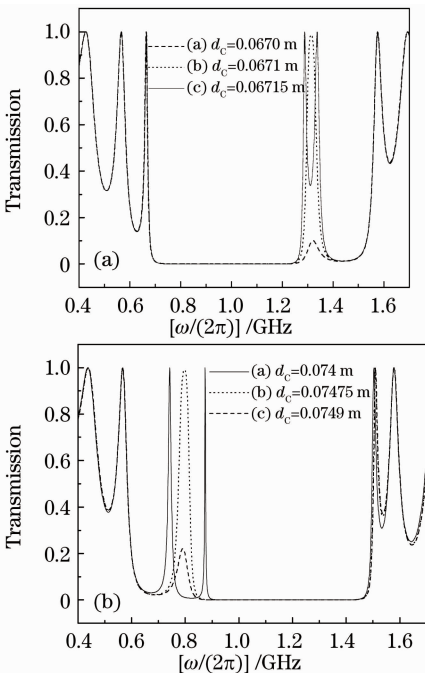


图4 d_c 取不同值时结构的透射谱

Fig.4 Transmission spectrum of the structure with different d_c

第三阶段与图2(c)对应。当 d_c 增加到大约0.13 m时,在高频处出现了一个缺陷模。随着缺陷层厚度的增加,该模向低频移动,最终消失在低频通带里。其间可能会伴随着高频处的缺陷模的出现及向低频的移动。

通过图1和图2的对比以及上述分析,发现两种结构缺陷模的频率随缺陷层厚度变化有很大的区别。当 $n_c > 0$ 时,缺陷模频率随着缺陷层厚度 d_c 的增加变化是单调递减的;当 $n_c < 0$ 时,缺陷模频率随着缺陷层厚度的增加变化不是单调的,而是分几个

阶段。前两个阶段与 $n_c > 0$ 时的情况完全不同。尽管第三阶段与 $n_c > 0$ 时有点相似,但移动的速度却比 $n_c > 0$ 时要快。

整体从图形的斜率来看: $n_c < 0$ 时,缺陷模随着缺陷层厚度的增加而移动的速度比 $n_c > 0$ 时的要快。

这些差异与负折射率材料自身的特性是分不开的。尤其是前两个阶段的区别,具体的分析将在后续工作中进行。

4 结 论

在加入了单层缺陷 ABABABCBABABA 结构的带隙中,缺陷模的频率随缺陷层厚度变化而发生变化。当 $n_c > 0$ 时,缺陷模频率随着缺陷层厚度 d_c 的增加变化是单调递减的。当 $n_c < 0$ 时,缺陷模频率随着缺陷层厚度的增加变化不是单调的,而是分几个阶段。随着缺陷层厚度 d_c 的增加,第一阶段缺陷模频率呈单调递增;第二阶段是中间伴有突变过程,是个过渡阶段;第三阶段是单调递减的。整体从图形的斜率来看: $n_c < 0$ 时,缺陷模频率随着缺陷层厚度的增加而移动的速度比 $n_c > 0$ 时要快。这些性质与缺陷层为正常材料的相应结构有很大的不同。通过对该简单结构的缺陷模特性的分析,将会对负折射率材料有更深入的认识,可以拓宽其应用前景。对含负折射率材料的光子晶体的研究,尤其是滤波方面以及一些小型化器件的设计和制作都有很大的帮助。

致谢 非常感谢同济大学物理系陈鸿教授在本文写作中给予的指导和帮助。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
 - 2 E. Lidorikis, C. M. Soukoulis. Pulse-driven switching in one-dimensional nonlinear photonic band gap materials: a numerical study[J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **61**(5): 5825~5829
 - 3 S. Nishikawa, S. Lan, N. Ikeda *et al.*. Optical characterization of photonic crystal delay lines based on one-dimensional coupled defects[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(23): 2079~2081
 - 4 S. Y. Zhu, N. H. Liu, H. Zheng *et al.*. Time delay of light propagation through defect modes of one-dimensional photonic band-gap structures[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **174**: 139~144
 - 5 Su An, Gao Yingjun. Filter characteristics of one-dimensional photonic crystal with complex dielectric constant[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1535~1538
- 苏安, 高英俊. 含负介电常数一维光子晶体的滤波特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1535~1538

- 6 Wang Jizhou, Xiong Yuqing, Wang Duoshu *et al.*. Filtering characteristics and application of defect mode of one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2914~2919
王济洲, 熊玉卿, 王多书等. 一维光子晶体缺陷模的滤波特性及应用研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2914~2919
- 7 Liu Qineng. Filtering feature of 1D rectangle doping photonic crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2041~2044
刘启能. 一维矩形掺杂光子晶体的滤波特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2041~2044
- 8 Dong Haixia, Jiang Haitao, Yang Chengquan *et al.*. Properties of impurity band in one-dimensional photonic crystal coupled-resonator containing defect layers with negative refractive index [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(6): 2777~2780
董海霞, 江海涛, 杨成全等. 含双负缺陷的一维光子晶体耦合腔的杂质带特性[J]. *物理学报*, 2006, **55**(6): 2777~2780
- 9 Dong Haixia, Yang Chengquan, Shi Yunlong. The filtering properties of doped one-dimensional photonic crystal containing negative refractive index materials[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(12): 1435~1437
董海霞, 杨成全, 石云龙. 含负折射率材料的一维光子晶体掺杂后的滤波特性[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(12): 1435~1437
- 10 Zhang Lin, Han Peng, Chen Yihang. Phase compensator based on one-dimensional photonic crystals containing negative index materials[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3098~3102
张林, 韩鹏, 陈溢杭. 基于含负折射率材料一维光子晶体的宽带相位补偿器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3098~3102
- 11 Z. F. Feng, X. D. Zhang, Y. Q. Wang *et al.*. Negative refraction and imaging using 12-fold-symmetry quasicrystals[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(24): 247402~247405
- 12 Liu Yahong, Luo Chunrong, Zhao Xiaopeng. H-shaped structure of left-handed metamaterials with simultaneous negative permittivity and permeability[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(10): 5883~5889
刘亚红, 罗春荣, 赵晓鹏. 同时实现介电常数和磁导率为负的H型结构单元左手材料[J]. *物理学报*, 2007, **56**(10): 5883~5889
- 13 A. Grbic, G. V. Eleftheriades. Experimental verification of backward-wave radiation from a negative refractive index metamaterial[J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **92**(10): 5930~5935
- 14 L. Liu, C. Caloz, C. C. Chang *et al.*. Forward coupling phenomena between artificial left-handed transmission lines[J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **92**(9): 5560~5565
- 15 H. T. Jiang, H. Chen, H. Q. Li *et al.*. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals containing negative-index materials[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(26): 5386~5388
- 16 Dong Haixia, Jiang Haitao, Yang Chengquan *et al.*. Theoretical simulation and transmission properties of one-dimensional photonic quantum-well structure containing defect layers with negative refractive index[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2245~2249
董海霞, 江海涛, 杨成全等. 含负折射率缺陷的光量子阱的透射特性及理论模拟[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2245~2249