

含负折射率缺陷的一维光子晶体的杂质带*

安丽萍^{1,2}, 刘念华²

(1 燕山大学 物理系, 河北 秦皇岛 066004)

(2 南昌大学 物理系, 南昌 330047)

摘 要:利用传输矩阵方法研究了含负折射率缺陷的一维光子晶体的透射谱. 以 19 个周期的 1/4 波堆存在 3 个负折射率缺陷的光子晶体为例进行了数值计算. 结果表明: 如果改变缺陷的折射率, 缺陷模之间的耦合作用将发生改变, 带隙中形成的杂质带也随之改变; 当这个折射率取适当值时, 在禁带中出现多个尖锐的透射峰, 与正折射率缺陷构成的杂质带不同.

关键词:光子晶体; 负折射率缺陷; 杂质带; 滤波

中图分类号: O431

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)02-289-4

0 引言

光子晶体是按照晶体的对称性制备的周期性介电结构^[1-2]. 光子带隙的存在使光子晶体具有广泛的应用前景. 通过改变材料的介电函数或改变原胞的大小, 可以调制光子晶体的带隙的位置和宽度. 所以, 可以像裁剪半导体的能带那样, 构造限制光子运动的光子晶体量子阱^[3-5]. 与半导体中的杂质能级类似, 通过在光子晶体中引入缺陷或杂质将在带隙中产生定域的电磁波模式^[6-7]. 对于多缺陷的光子晶体, 光子带隙中则将出现杂质带. 这是由于局域在不同缺陷处的电磁波之间的相互耦合作用, 导致杂质能级分裂并展宽为杂质带^[8]. 由于缺陷位置的变化导致杂质带的变化, 所以可以通过控制缺陷的大小和相邻缺陷间的距离就可以调节杂质带. 选择适当的缺陷大小和相邻缺陷间的距离可以在透射谱中得到相对尖锐的透射峰, 利用这一特性可用来设计多通道滤波器. 尽管由含多个正折射率缺陷的光子晶体通过调节耦合强度可以实现这一功能, 但这种结构在禁带中出现的透射峰的个数最多与晶体结构中缺陷的个数相同.

本文研究了含负折射率缺陷的一维光子晶体的透射谱及缺陷的折射率对形成的杂质带的影响, 发现选择合适的缺陷折射率, 可以在禁带中得到多于晶体结构中缺陷数目的多个尖锐透射峰, 这一结构有助于多通道滤波器的设计.

1 光子晶体的结构与计算方法

考虑由 A, B 两种材料沿 z 轴方向交替生长的

一维光子晶体, 材料的光学性质由常量折射率 n_A 和 n_B 表征, 且均为正. 在这个一维光子晶体中周期性地加入缺陷 C.

缺陷 C 是负折射率材料, 即材料的介电常量和磁导率都为负值. 1966 年 Veselago 首先用方程证明这种材料具有负的光学折射率, 即 $n = -\sqrt{\epsilon\mu}$ ^[9]. 在负折射率材料中, 电磁波的 E, H 和波矢 K 三者构成左手螺旋关系, 所以它还被称为左手材料. 2001 年, Smith 等人首次构造出微波波段 ϵ, μ 同时为负 (即负折射率) 的人工介质^[10-11]; Linden 等人则证明了可在光波段得到负折射率材料^[12-13]; 利用负折射率材料还可制作完美的消色散透镜^[14]、新型波导管^[15]等. 近年来对由正和负两种折射率材料交替构成的光子晶体有了较多的研究^[16-21]. 在负折射率材料中, 相速度 (波矢方向) 与群速度 (坡印廷矢量或能流方向) 的传播方向相反, 因此其相位随波的传播不断消减, 这样使得含负折射率缺陷的光子晶体存在一种相位补偿效应. 在普通的一维光子晶体中加入负折射率缺陷后, 由于掺杂效应和相位补偿效应的双重作用, 使在光子带隙中有可能出现多个分立的缺陷模或杂质带.

当光波从空气正入射到该结构时, 在任意一层 (第 j 层) 内的光场满足以下波动方程

$$\frac{d^2}{dz^2} E_j(z) + \frac{\omega}{c} n_j^2 E_j(z) = 0 \quad (1)$$

方程的一般解可表示为

$$E_j(z) = E_j^+ \exp \left[i \frac{\omega}{c} n_j (z - z_j) \right] + E_j^- \exp \left[-i \frac{\omega}{c} n_j (z - z_j) \right] \quad (2)$$

式中 z_j 是界面坐标. 定义以下 2-分量波函数描述电磁场^[7]

* 燕山大学科技发展基金(YDJJ200534)资助

Tel: 0335-5918426 Email: fox781209@sina.com

收稿日期: 2007-09-26

$$\Psi_j(z) = \begin{pmatrix} E_j(z) \\ icB_j(z) \end{pmatrix} \quad (3)$$

则电磁场满足矩阵关系

$$\Psi_j(z + \Delta z) = M_j(\Delta z, \omega) \Psi_j(z) \quad (4)$$

式中

$$M_j(\Delta z, \omega) = \begin{pmatrix} \cos \frac{\omega}{c} n_j \Delta z & -\frac{1}{|n_j|} \sin \frac{\omega}{c} n_j \Delta z \\ |n_j| \sin \frac{\omega}{c} n_j \Delta z & \cos \frac{\omega}{c} n_j \Delta z \end{pmatrix} \quad (5)$$

利用电磁场的切向分量在界面上连续的条件, 可得透射系数为

$$t(\omega) = \frac{2}{[x_{11}(\omega) + x_{22}(\omega)] + i[x_{12}(\omega) - x_{21}(\omega)]} \quad (6)$$

透射率则为

$$T = |t(\omega)|^2 \quad (7)$$

式中 x_{ij} 是以下矩阵的矩阵元

$$X_N(\omega) = \prod_{j=1}^N M_j(d_j, \omega) \quad (8)$$

式中 d_j 为第 j 层的层厚, 它的序列与一维光子晶体的结构一致.

2 数值计算

结构为 $(ABABABABAC)_3 ABABABABA$ 共 39 层的一维光子晶体结构如图 1. 设 $n_A = 4.0, n_B = 1.5$, 在各层光学厚度均为 $1/4$ 波长的完整光子晶体中引入三个相同的负折射率半波缺陷 C, 即 $n_C < 0$, 光学厚度 $|n_C d_C| = 0.5\lambda_0$ (λ_0 为光子晶体禁带中心频率 ω_0 所对应的波长). 缺陷 C 在晶体结构中的图

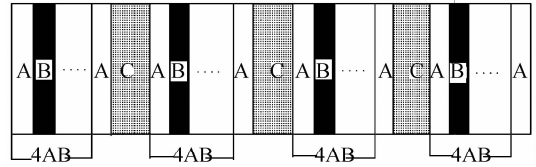


图 1 含有负折射率缺陷的一维光子晶体的结构
Fig. 1 The structure of one-dimensional photonic crystal with negative refractive index defects

中位置保持不变.

图 2 给出缺陷 C 取不同负折射率时一维光子晶体的透射谱. 当 $|n_C|$ (n_C 的绝对值) 减小时, 频率低的缺陷模 a 向低频移动, 频率高的缺陷模 b 向高频移动, 即它们对应频率的裂距增大, 说明缺陷模之间的耦合作用也增大了, 中间透射峰也分成 c, d 两个独立的透射峰, 如图 2(c). 从图 2(d), (e) 中可以看出, 在 $|n_C|$ 减小的过程中, 缺陷模 c, d 与 o 之间分别出现了一个较宽的透射峰, 然后每个透射峰又各分裂成了 e, f 和 m, n 两缺陷模, 并且 a, c 与 b, d 在整个过程中一直向两通带边移动. 这说明 $|n_C|$ 减小时, 缺陷模之间的耦合作用增强, 使原来简并的缺陷模频率分裂, 在禁带中形成多个缺陷模的杂质带, 如图 2(e), (f). 这一结构可用于多频道滤波. 而且禁带中透射峰的个数多于晶体结构中缺陷的个数 (本文缺陷个数是 3). 这与含多个正折射率缺陷的光子晶体通过调节缺陷间相对距离控制缺陷模之间的耦合强度来实现多频道滤波是不同的, 因为在这种传统晶体结构中禁带中出现的透射峰的个数最多与晶体结构中缺陷的个数相同. 如图 3, 在 39 层 $(AB)_{19}A$

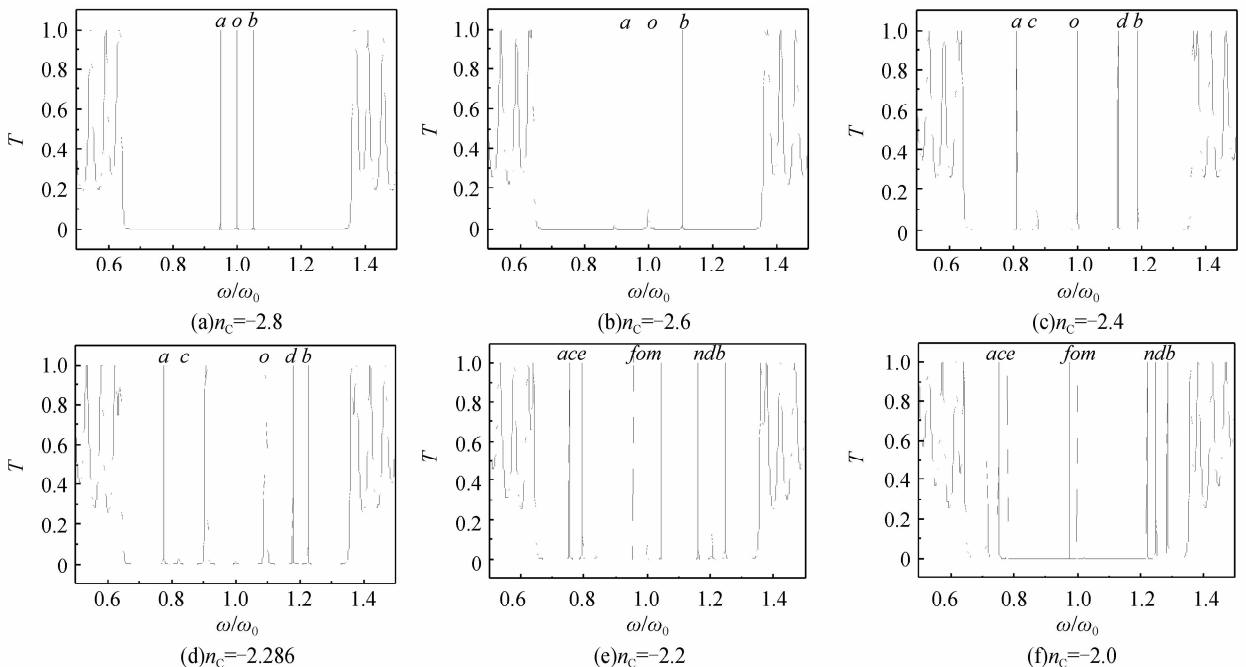


图 2 通过含有三个负折射率缺陷的一维光子晶体的透射谱
Fig. 2 The transmission through one-dimensional photonic crystal with three negative refractive index defects

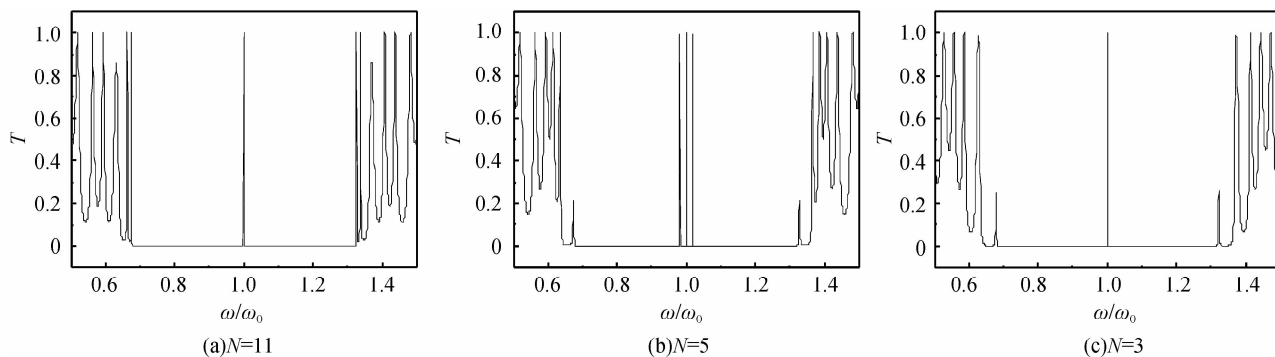


图3 通过含有三个正折射率缺陷的一维光子晶体的透射谱

Fig. 3 The transmission through one-dimensional photonic crystal with three positive refractive index defects

排列的光子晶体中引入三个相同的正折射率半波缺陷(即 $n_c > 0$),这里取 $n_c = 2.2$ (A,B 两层保持不变,与前面相同),它们对称地分布在中心缺陷两边,且任意两缺陷间的距离都相等.在中心缺陷位置不变的情况下,改变彼此间的距离.发现当缺陷间距离减小时,缺陷模之间的耦合作用增大,简并的缺陷模频率分裂,缺陷模对应频率的裂距逐渐增大,中心缺陷模两侧的缺陷模分别向低频高频方向移动.且发现在这个过程中,禁带中出现的独立透射峰的个数最多等于3与晶体结构中缺陷的个数相同,如图3(b).因此,可以在传统光子晶体(材料的折射率均为正值)中引入较少数目的负折射率缺陷来获得多通道滤波.这种结构对多通道滤波器的设计很有帮助.

3 结论

在传统光子晶体(材料的折射率均为正)中引入多个负折射率缺陷时,在光子能隙中出现杂质带.如果改变缺陷的折射率,局域在不同缺陷处的电磁波之间的耦合作用也发生改变,导致能隙中出现不同的杂质带.当缺陷折射率的绝对值减小时,缺陷模间的耦合作用增强.特别通过调整缺陷的折射率,可在透射谱中出现多个尖锐的透射峰,且禁带中透射峰的数目要比晶体结构中缺陷的数目要多.这样,可在传统光子晶体中引入较少数目的负折射率缺陷即可获得多通道滤波,这种结构有助于多通道滤波器的设计.

参考文献

[1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(20): 2059-2062.
 [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(23): 2486-2489.
 [3] YIANG J, NIU C, LIN D L. Resonance tunneling through photonic quantum well[J]. *Phys Rev B*, 1999, **59**(15): 9981-9986.

[4] QIAO Feng, ZHANG Chun, WANG Jun, *et al.* Photonic quantum-well structures: multiple channeled filtering phenomena[J]. *Appl Phys Lett*, 2000, **77**(23): 3698-3700.
 [5] YANO S, SEGAWA Y, BAE J S, *et al.* Quantized state in a single quantum well structure of photonic crystals[J]. *Phys Rev B*, 2001, **63**(15): 153316-1-4.
 [6] YABLONOVITCH E, GMITTER T G. Donor and acceptor modes in photonic band structure[J]. *Phys Rev Lett*, 1991, **67**(24): 3380-3383.
 [7] LIU Nian-hua. Defect modes of stratified media[J]. *Phys Rev B*, 1997, **55**(7): 4097-4100.
 [8] AN Li-ping, LIU Nian-hua. The impurity band based-on defects coupled in one - dimensional photonic crystal[J]. *Acta Photonica sinica*, 2003, **32**(9): 1083-1085.
 安丽萍,刘念华. 一维光子晶体中多缺陷耦合导致的杂质带[J]. *光子学报*, 2003, **32**(9): 1083-1085.
 [9] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously values of ϵ and μ [J]. *Sov Phys Usp*, 1966, **10**(4): 509-514.
 [10] 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.
 [11] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, **292**(4): 77-79.
 [12] YEN T J, PADILLA W J, FANG N, *et al.* Terahertz magnetic response from artificial materials[J]. *Science*, 2004, **303**(5663): 1494-1496.
 [13] LINDEN S, ENKRICH C, WEGENER M, *et al.* Magnetic response of metamaterials at 100 terahertz[J]. *Science*, 2004, **306**(11): 1351-1353.
 [14] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **85**(18): 3966-3969.
 [15] SHADRIVOV I V, SUKHORUKON A A, KIVSHAR Y S. Guided modes in negative-refractive-index waveguides [J]. *Phys Rev*, 2003, **E67**(5): 057602-1-4.
 [16] WU L, HE S L, SHEN L F. Band structure for one-dimensional photonic crystal containing left-handed materials [J]. *Phys Rev B*, 2003, **67**(23): 235103-235108.
 [17] GERARDIN J, LAKHTAKIA A. Negative index of refraction and distributed Bragg reflectors[J]. *Microw and Opt Tech Lett*, 2002, **34**(6): 409-411.

- [18] YIN Cheng-ping, LIU Nian-hua. Transmission properties of one-dimensional photonic crystals containing negative refraction materials[J]. *Chin J Lumin*, 2005, **26**(2):173-177.
尹承平, 刘念华. 含负折射率材料的一维光子晶体的光学传输特性[J]. *发光学报*, 2005, **26**(2):173-177.
- [19] WU L, HE S, CHEN L. On unusual narrow transmission bands for a multi-layers periodic structure containing left-handed materials[J]. *Opt Express*, 2003, **11**(11):1283-1290.
- [20] RUPPIN R. Bragg reflectors containing left-handed materials[J]. *Microw and Opt Tech Lett*, 2003, **38**(6):494-495.
- [21] JIANG Mei-ping, CHEN Guang, CHEN Xian-feng *et al.* The bistable properties of nonlinear bragg cavity containing negative refractive index materials[J]. *Acta Photonica sinica*, 2006, **35**(4):535-539.
蒋美萍, 陈光, 陈宪锋, 等. 含负折射率介质非线性 Bragg 腔的双稳态特性[J]. *光子学报*, 2006, **35**(4):535-539.

Impurity Band in One-dimensional Photonic Crystal Containing Defect Layers with Negative Refractive Index

AN Li-ping^{1,2}, LIU Nian-hua²

(1 *Department of Physics, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China*)

(2 *Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330047, China*)

Received date: 2007-09-26

Abstract: The transmission through one-dimensional photonic crystal with negative refractive index defects was studied by using transfer matrix method. Quarter-wave stack photonic crystal of 19 periods with three negative refractive index defects were taken as an example for numerical calculation. It is found that when the refractive index of defect was changed, the coupling effect between the defect modes was varied, which results in the change of the impurity band. Some sharp transmission peaks appear in the forbidden band when the refractive index of defects is appropriate. It is different from the impurity band formed by positive refractive index defects.

Key words: Photonic crystal; Negative refractive index defect; Impurity band; Filter



AN Li-ping was born in 1975. She received the M. S. degree from Department of Physics, Nanchang University in 2003. Now she is working at Department of Physics, Yanshan University, and her research interests focus on condensed matter physics and photonic band-gap structures.