

含双负缺陷的一维光子晶体耦合腔的杂质带特性^{*}

董海霞¹⁾ 江海涛^{2)†} 杨成全¹⁾ 石云龙¹⁾²⁾

1) 雁北师范学院固体物理研究所, 山西大同 037009)

2) 同济大学波耳固体物理研究所, 上海 200092)

(2005 年 8 月 30 日收到, 2005 年 11 月 12 日收到修改稿)

利用转移矩阵方法研究了含双负缺陷的一维光子晶体耦合腔的透射谱. 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, 使得能隙中的杂质带也随之改变. 若这个折射率取适当值, 则可以在禁带中同时出现几个尖锐的透射峰和较宽的通带. 这种结构可同时用于多通道窄带滤波和宽带滤波.

关键词: 光子晶体, 缺陷模, 杂质带, 滤波

PACC: 4270Q, 7820P

1. 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]. 由于它具有全新的控制光子传播的机理, 所以一被提出就得到了广泛的关注^[3-6]. 当电磁波在光子晶体中传播时, 会发生多重散射干涉的作用而出现光子带隙. 与半导体掺杂相类似, 在光子晶体中引入缺陷时, 光子带隙中就会出现缺陷态并形成光子微腔. 近几年来, 在光子晶体中周期(或非周期)分布的光子微腔形成的耦合腔波导引起了人们的极大兴趣^[7-9]. 对含单个缺陷的光子晶体, 由于完整周期的破坏, 光子能隙中有可能出现杂质能级. 对于光子晶体耦合腔, 光子能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^[10-14]. 当相邻缺陷间距离较远时, 缺陷模间的耦合作用较弱, 在能隙中形成较窄的通带. 当缺陷间距离较近时, 缺陷模间的耦合作用较强, 杂质能级间的裂距较大, 构成较宽的杂质带. 可见, 缺陷位置的变化导致杂质带的变化. 这样通过控制缺陷的大小和相邻缺陷间的距离就可调节杂质带的位置和大小. 比如, 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, 这一特性可用来设计单或多通道窄带滤波器; 若重新调整缺陷大小和相邻缺陷

间的距离时, 可以在透射谱中得到相对很宽很平的杂质带. 这一特性可用来设计小型化的宽带滤波器. 尽管由正常材料构成的耦合腔结构通过调节耦合强度可以分别实现窄带滤波和宽带滤波的功能, 但它却不能同时实现窄带滤波和宽带滤波的双重滤波功能. 本文研究了含双负缺陷的一维光子晶体耦合腔的透射谱及缺陷的折射率对形成的杂质带的影响, 进而提出了一种可以同时实现多通道窄带滤波和宽带滤波的特殊结构, 这种结构有助于小型滤波器的设计.

2. 晶体结构与计算方法

由 A, B 两种材料沿 z 轴方向交替生长形成了一维光子晶体, 材料的折射率分别为 n_A, n_B , 且均为正. 若在这个一维光子晶体中周期性地加入缺陷 C 后, 就形成了一维光子晶体耦合腔结构.

这里所加的缺陷 C 是双负材料. 双负材料, 是指材料的介电常数和磁导率均为负值. 根据 $n = -\sqrt{\epsilon\mu}$, 可知材料的折射率也为负值, 故双负材料也被称为负折射率材料. 电磁波在双负材料中传播时, 电场、磁场和波矢三者构成左手螺旋关系, 所以它还被称为左手材料. 在双负材料中, 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, 因而其相位随波的传播不断消减, 这样使得

^{*} 山西省留学回国人员科研资助项目(批准号: 2005063)和山西省高科技开发项目(批准号: 2002052)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: jiang-haitao@mail.tongji.edu.cn

含双负材料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一个双负缺陷后, 由于掺杂效应和相位补偿效应的双重作用, 在光子能隙中有可能出现多个分立的缺陷模或者杂质带^[15].

双负材料可以利用基于等效电路模型的“左手”微带传输线来实现. 该方法是根据电容、电感和介电常数、磁导率之间的等效性, 在普通微带传输线上周期性加载电容及电感, 但加载的位置与普通微带线上等效的电容和电感的位置正好互换(串联变并联, 并联变串联). 在特定的频率范围, 加载后的微带线就等效为双负材料. 这样制备的双负材料损耗较小, 并且得到的负折射率带较宽.

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 处的电场分量和磁场分量通过以下转移矩阵^[16]相连接:

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

其中 $k_i = \frac{\omega}{c} n_i$, $i = A, B, C, c$ 为真空中的光速. 若 $n_i > 0$ 时, $k_i > 0$, 矩阵 $M_i(\Delta z, \omega)$ 就是正常材料的转移矩阵. 若 $n_i < 0$ 时, $k_i < 0$, 矩阵 $M_i(\Delta z, \omega)$ 就是双负材料的转移矩阵. 假设连接入射端电磁场和出射端电磁场的矩阵为 $X_N(\omega)$, 表达式为

$$X_N(\omega) = \prod_{i=1}^N M_i(\Delta z, \omega), \quad (2)$$

其中 N 表示结构的总层数. 经过简单计算, 可得该结构的透射系数为

$$t(\omega) = \frac{2}{(x_{11} + x_{22}) + i(x_{12} - x_{21})}, \quad (3)$$

透射率则为

$$T = |t(\omega)|^2, \quad (4)$$

其中 x_{ij} ($i, j = 1, 2$) 为 $X_N(\omega)$ 的矩阵元.

3. 数值模拟结果

图 1 是排列为 $(ABABABABAC)_3 ABABABABA$ 的一维光子晶体耦合腔结构. 设 $n_A = 4.0$, $n_B = 1.5$. 因 C 的折射率 $n_C < 0$, 所以 C 的光学厚度 $n_C d_C < 0$. 这里 A, B, C 的光学厚度分别为 $n_A d_A = n_B d_B = 0.25\lambda_0$, $n_C d_C = -0.5\lambda_0$ (λ_0 是指光子晶体禁带中心频率 ω_0 所对应的波长).

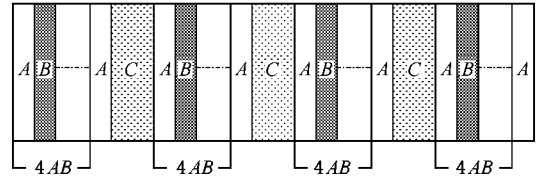


图 1 一维光子晶体耦合腔结构

图 2(a) 是 $n_C = -2.5$ 时, 一维光子晶体耦合腔的透射谱. 这时在禁带中出现了 a, b 两个缺陷模, 中间还有一个较宽的通带, 因而这一结构可以同时实现多通道窄带滤波和宽带滤波. 这个用途是用正常材料难以实现的.

当 $|n_C|$ (n_C 的绝对值) 逐渐增大到 $|n_C| = 2.6$ 时, a, b 向着中心处移动, 它们对应频率的裂距减小, 这说明缺陷模之间的耦合作用减弱, 并且中间较宽的通带也变成了尖锐的透射峰, 如图 2(b) 所示. 这种结构可用作多通道滤波器.

将 $|n_C|$ 减小时, 则频率低的缺陷模 a 向低频移动, 频率高的缺陷模 b 向高频移动, 即 a, b 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. 中间较宽的通带也逐渐分成 c, d 两个独立的透射峰, 如图 2(c) 所示. 从图 2(d)(e) 中可以清楚地看出, 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着两通带边移动. 这说明 $|n_C|$ 减小时, 缺陷模之间的耦合作用增强, 导致原来简并的缺陷模频率分裂. 图 2(e) 所示的杂质带中有多个缺陷模, 这一结构可用于多频道滤波. 之后, 随着 $|n_C|$ 的不断减小, 杂质带分为 3 组, 其中 a, c, e 以不同的速度向左通带移去, m, d, b 也同样向着右通带移去, 并且这两组缺陷模最终分别消失在左右通带里, 而 f, m 却向着中心缺陷模 o 逐渐靠近, 如图 2(f) 所示.

杂质 C 的折射率变化时, 缺陷模 c, d 对应的频率一直在发生变化, 变化规律如图 3 所示.

从图中可见, 随着 $|n_C|$ 的增加, 缺陷模 c 的频率在能隙中呈上升趋势, 逐步向中间的缺陷模 o 靠拢, 同时 d 的频率呈下降趋势, 也逐渐向 o 靠拢. 二者频率变化的速度一致, 且都随着 $|n_C|$ 的增大而增大. 当 $|n_C|$ 超过 2.5 后, 这两个缺陷模最终会与中间的缺陷模 o 重合在一起.

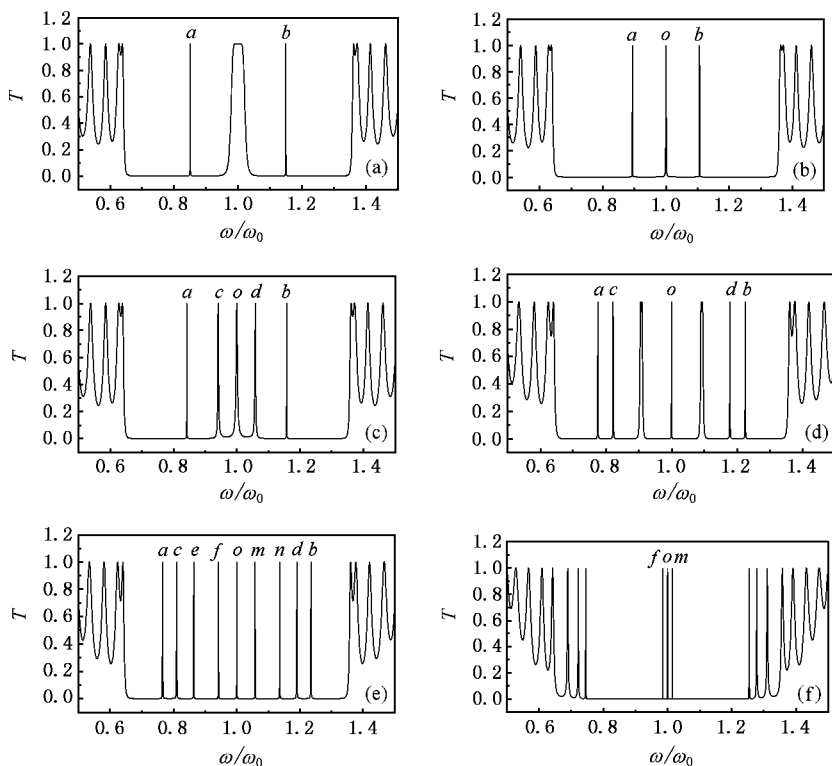


图2 n_c 取不同值时一维光子晶体耦合腔的透射谱 (a) $n_c = -2.5$ (b) $n_c = -2.6$ (c) $n_c = -2.48$ (d) $n_c = -2.286$ (e) $n_c = -2.25$ (f) $n_c = -1.8$

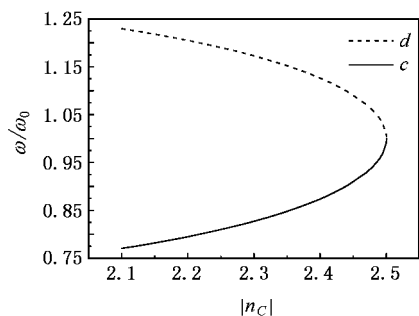


图3 缺陷模 c, d 的频率随 $|n_c|$ 的变化关系图

这里的双负材料都忽略了色散. 若考虑材料的色散后, 对结果会产生一定的影响, 如可能使透射峰变宽, 高度变低等, 我们将在另文中讨论.

4. 结 论

在正常材料形成的光子晶体中周期性地加入双

负缺陷后, 就构成了含双负缺陷的光子晶体耦合腔, 并在光子能隙中出现杂质带. 如果改变缺陷的折射率时, 局域在不同缺陷处的电磁波之间的耦合程度也发生改变, 导致能隙中会出现不同的杂质带. 当缺陷折射率的绝对值较小时, 缺陷模间的耦合作用较强, 杂质能级间的裂距较大, 在能隙中形成较宽的通带. 当缺陷折射率的绝对值较大时, 缺陷模间的耦合作用较弱, 构成较窄的杂质带. 可见, 能隙中的杂质带与所加缺陷的折射率有着很大关系. 特别是通过调整缺陷的折射率, 可在透射谱中同时出现几个尖锐的透射峰和较宽的通带, 这样的结构可以同时实现多通道窄带滤波和宽带滤波双重滤波功能, 这给滤波器的设计带来很大的方便.

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.

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Wang H, Li Y P 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2172 (in Chinese) 王辉、李永平 2001 *物理学报* **50** 2172]
- [4] Du G Q, Liu N H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1095 (in Chinese) 杜贵强、刘念华 2004 *物理学报* **53** 1095]
- [5] Zhuang F, Wu L, He S L 2002 *Chin. Phys.* **11** 834
- [6] Mao H B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2201 (in Chinese) 茅惠兵 2004 *物理学报* **53** 2201]
- [7] Oliver S, Smith C, Rattier M *et al* 2001 *Opt. Lett.* **26** 1019
- [8] Sumetsky M, Eggleton B J 2003 *Optic Express* **11** 381
- [9] Liu N H, Zhu S Y, Chen H *et al* 2002 *Phys. Rev. E* **65** 046607-1
- [10] Liu N H 1977 *Phys. Rev. B* **55** 4097
- [11] Bayindir M, Temelkuran B, Ozbay E 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 2140
- [12] Liu N H 2002 *Journal of Jiangxi Institute of Education (Natural Sciences)* **23** 12 (in Chinese) 刘念华 2002 *江西教育学院学报 (自然科学版)* **23** 12]
- [13] An L P, Liu N H 2003 *Acta Photonica Sinica* **32** 1083 (in Chinese) [安丽萍、刘念华 2003 *光子学报* **32** 1083]
- [14] Feng L J, Jiang H T, Li H Q *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2102 (in Chinese) 冯立娟、江海涛、李宏强等 2005 *物理学报* **54** 2102]
- [15] Jiang H T 2005 Theoretical study on the photonic crystals with metamaterials and other related problems (Doctoral dissertation) Shanghai :Tongji University p1 ~ 24 [江海涛 2005 含特异材料的光子晶体及相关问题的理论研究 [博士论文]. 上海 :同济大学 第 1—24 页]
- [16] Jiang H T, Chen H, Li H Q, Zhang Y W 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 5386

Properties of impurity band in one-dimensional photonic crystal coupled-resonator containing defect layers with negative refractive index *

Dong Hai-Xia¹⁾ Jiang Hai-Tao^{2)†} Yang Cheng-Quan¹⁾ Shi Yun-Long^{1, 2)}

1 *✉ Institute of Solid State Physics, Yanbei Normal University, Datong 037009, China*

2 *✉ Pohl Institute of Solid State Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China*

(Received 30 August 2005 ; revised manuscript received 12 November 2005)

Abstract

The transmission through one-dimensional photonic crystal coupled-resonator containing defect layers with negative refractive index is studied by using transfer matrix method. It is found that when the refractive index of defects is changed, the coupling effect between the defect modes is varied, which results in the change of the impurity band. Some sharp transmission peaks and a wide pass band appear at the same time in the forbidden band when the refractive index of defects is appropriate. So the structure can be used as both a multiple channel narrow-band filter and a wide-band filter at the same time.

Keywords : photonic crystal, defect mode, impurity band, filter

PACC : 4270Q, 7820P

* Project supported by the Scientific Research of Shanxi Province for Returned Scholars (Grant No. 2005063) and the High-Tech Development of Shanxi Province (Grant No. 2002052).

† Corresponding author. E-mail : jiang-haitao@mail.tongji.edu.cn