

# 具有周期性双单负材料缺陷的一维光子晶体缺陷模的研究

张雅男<sup>1</sup> 邓玲玲<sup>2</sup> 徐 飞<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 南京信息工程大学数理学院, 江苏 南京 210044; <sup>2</sup> 南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘要** 在传统的一维光子晶体中加入多个周期排列的双单负材料缺陷,可观察到零有效相位带隙内的缺陷模。计算结果表明:若两种单负材料缺陷厚度相等,增大缺陷层的总厚度会使零有效相位带隙内的缺陷模频率间隔变大,对应的透射率降低。若改变两种单负材料缺陷的厚度比,缺陷模的频率间隔也随之变化。当两种单负材料缺陷的厚度满足零平均磁导率和零平均介电常数条件时,发生缺陷模简并的现象。另一方面,入射角的变化对零有效相位带隙中的缺陷模影响较小,但却可以产生新的角度带隙。角度带隙范围与缺陷层厚度无关,会随入射角的增大而变宽。

**关键词** 光子晶体; 缺陷模简并; 角度带隙; 传输矩阵; 单负材料

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200929s1.0148

## Study on Defect Modes in One-Dimensional Photonic Crystals with Periodic Double Defect Layers of Single-Negative-Materials

Zhang Yanan<sup>1</sup> Deng Lingling<sup>2</sup> Xu Fei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Physics and Maths, Nanjing University of Information Science & Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210044, China

<sup>2</sup> School of Opto-Electronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,  
Nanjing, Jiangsu 210003, China

**Abstract** Defect modes are found inside the photonic gap with zero effective phase when multiple periodic double defect layers of single-negative materials are added into the traditional one-dimensional photonic crystals. The results show that by varying the total thickness of the defect layers, the frequency interval of the defect modes is increased and the transmission of defect modes is decreased when the thickness of each defect layer is identical. When altering the thickness-proportion of the defect layers the frequency interval of the defect modes can be changed. If the general zero average permeability and permittivity conditions are both satisfied, twin defect modes are found to merge into each other. On the other hand, defect modes inside the zero-effective-phase gap are insensitive to incident angle. However a new angle gap emerges because of the change of the incident angle. The angle gap enlarges with the increasing of the incident angle but is unrelated with the thickness of the defect layers.

**Key words** photonic crystal; defect-mode merger; angle gap; transfer matrix; single-negative material

## 1 引 言

自 1987 年 Yablonovitch 提出光子晶体概念以来<sup>[1]</sup>,由多种介电材料周期排列组合而成的光子晶体越来越受到科研工作者的关注<sup>[2,3]</sup>。光在这类材料中传播时具有类似于电子在半导体材料中运动的行为,如在一定频率范围内的光不能在光子晶体中

传播,即存在光子带隙。科研工作者在一维光子晶体中引入缺陷,从而改变了光子晶体内部的光的干涉过程,因此在光子带隙内会出现缺陷模。根据这个特性可以制造具有高透射率且带宽较窄的滤波器<sup>[4,5]</sup>。改变缺陷中不同介质的厚度或者改变缺陷的个数都会引起缺陷模的变化。在一定的频率点,

收稿日期: 2008-07-25; 收到修改稿日期: 2008-09-28

基金项目: 南京信息工程大学校科研基金(S8107279001)资助课题。

作者简介: 张雅男(1977—),男,硕士研究生,讲师,主要从事计算物理、光学和电磁场等方面的研究。

E-mail: phyzyn@nuist.edu.cn

多个缺陷模会简并为一个模式<sup>[6,7]</sup>。传统的光子晶体是由正折射率介电材料周期排列而成,因缺陷而产生的缺陷模并不会因结构的变化而转变,所以对缺陷模的利用就非常局限。近年来,特异材料在学术界引起了人们的兴趣<sup>[8~10]</sup>。特异材料是指材料的磁导率和介电常数为负值。如果磁导率( $\mu$ )为负而介电常数( $\epsilon$ )为正则称为负磁导率材料(MNG),若介电常数为负而磁导率为正则称为负介电常数材料(ENG)。这两种材料统称为单负材料(SNG)。有研究表明,将负磁导率材料和负介电常数材料交替排列而形成的周期性光子晶体会产生光子带隙,该带隙称为零有效相位(zero- $\varphi_{\text{eff}}$ )带隙<sup>[11]</sup>。当单负材料缺陷被插入到上述结构的光子晶体中时,在零有效相位带隙中可以产生两个缺陷模,这两个缺陷模会随着缺陷层的厚度和周期数发生一定规律的变化<sup>[12]</sup>。然而,在一维光子晶体中插入双单负材料缺陷这种结构缺陷模的性质尚未有系统的研究。本文计算了在一维单负材料构成的周期性光子晶体中引入由负磁导率材料和负介电常数材料交替排列而形成的双缺陷这种特殊的结构。当光入射到该种结构的光子晶体中时,在零有效相位带隙中会产生缺陷模。当两缺陷层的厚度比为 1 时,随着缺陷层总厚度的增加,带隙宽度变窄,缺陷模对应的透射率减小;如果两种缺陷层厚度之比由小至大变化,在零有

效相位带隙中会发现缺陷模间隔变小但对应的透射率变化不明显,当厚度比满足一定的关系时,缺陷模简并。另外,入射到光子晶体光线的入射角度对缺陷模的影响很小,但角度的改变会产生新的角度带隙,而角度带隙的范围与入射角却有直接的关系。

## 2 理论模型

考虑一个由负磁导率材料和负介电常数材料交替周期堆叠构成的一维光子晶体。假设负磁导率材料满足色散关系

$$\epsilon_1 = \epsilon_a, \quad \mu_1 = \mu_a - \alpha/\omega^2, \quad (1)$$

负介电常数材料满足

$$\epsilon_2 = \epsilon_b - \beta/\omega^2, \quad \mu_2 = \mu_b, \quad (2)$$

(1)式和(2)式中的色散特性可通过 L-C 负荷传输线制作的特异材料在微波段实现<sup>[13]</sup>。以后的计算中,选取  $\mu_a = \epsilon_b = 1, \epsilon_a = \mu_b = 3, \alpha = \beta = 100$ 。如图 1 所示,光子晶体的周期结构中的负磁导率材料( $N_\mu$ )和负介电常数材料( $N_\epsilon$ )的几何厚度分别为  $d_{N_\mu}$  和  $d_{N_\epsilon}$ 。在光子晶体内插入周期排列的双缺陷,其结构形式为  $(N_\mu N_\epsilon)^m (D_\mu D_\epsilon)^s (N_\mu N_\epsilon)^m$ , 这里  $D_\mu$  和  $D_\epsilon$  分别为负磁导率材料、负介电常数材料缺陷层,其几何厚度分别为  $d_{D_\mu}$  和  $d_{D_\epsilon}$ ,  $m$  和  $s$  分别为周期数。

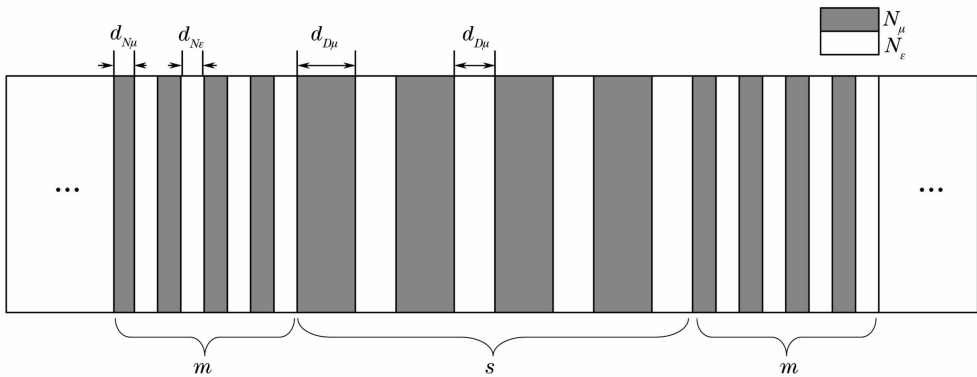


图 1 一维周期性双单负材料缺陷光子晶体示意图

Fig. 1 Schematic diagram of one-dimensional photonic crystals with periodic double defect layers of single-negative-materials

假设一平面电磁波沿  $z$  轴传播,以入射角  $\theta$  入射到光子晶体内,则光子晶体内第  $l$  层的波矢为  $k_l = k_{lx}x + k_{lz}z$ ,其中  $k_{lx}$  和  $k_{lz}$  分别为入射波矢在  $x$  轴和  $z$  轴的分量。电场分量的前向和后向传播平面波的振幅可以通过下面的传输矩阵得到:

$$\mathbf{M}_l = \begin{bmatrix} \cos k_{lz}d_l & i\sin k_{lz}d_l/\eta_l \\ i\eta_l \sin k_{lz}d_l & \cos k_{lz}d_l \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中,对于 s 偏振  $\eta_l = \eta_l^s = ck_{lz}/\omega\mu_l$ ,对于 p 偏振

$$\eta_l = \eta_l^p = \omega\epsilon_l / ck_{lz}.$$

## 3 计算结果及讨论

### 3.1 缺陷厚度对缺陷模的影响

先讨论负磁导率缺陷的厚度和负介电常数缺陷厚度对该光子晶体结构透射谱的影响。以 TE 波为例,首先固定结构中缺陷的周期数,使两种缺陷的厚度比为 1,研究在零有效相位带隙内的缺陷模随缺

陷层总厚度的变化规律。图 2(a)~图 2(c)分别对应结构中两种缺陷层的厚度为  $d_{D_\mu} = d_{D_\epsilon} = 10$  mm, 20 mm, 30 mm 时的透射谱。而其他的参数分别为  $m = 14, s = 4, d_{N_\mu} = 6$  mm,  $d_{N_\epsilon} = 10$  mm。从图 2 可见,零有效相位带隙的频率范围在 0.6 GHz 和 1.0 GHz 之间,两个缺陷模分别在带隙中央的两侧出现。随着缺陷层厚度的增加,带隙变窄,两缺陷模分别逐渐向带隙中央靠拢,并且缺陷模对应的透射率降低。

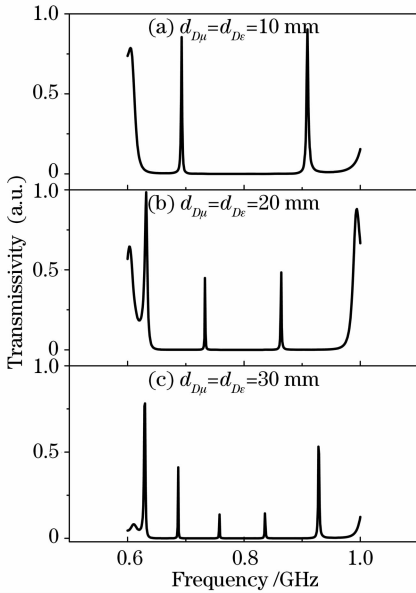


图 2 不同的缺陷层总厚度下,零有效相位带隙内缺陷模的透射率变化

Fig. 2 Transmissivities of the defect modes inside the zero-effective phase gap with different total thickness of defect layers

接着,固定两种缺陷其中一种的厚度而改变另一种缺陷的厚度,研究缺陷模随其变化规律。如图 3 所示,这里  $d_{D_\mu} = 10$  mm,  $d_{D_\epsilon} = 23$  mm, 15 mm, 10 mm。其他结构参数同图 2。从图 3 可见,随着缺陷  $D_\epsilon$  厚度的增加,两缺陷模分别逐渐向带隙边缘靠拢,对应的透射率并不发生变化。当厚度增加到 23 mm 时,缺陷模融入带隙边缘,即缺陷模消失。图 4 中,  $d_{D_\epsilon} = 10$  mm,  $d_{D_\mu} = 10$  mm, 20 mm, 35 mm。其他结构参数同图 2。从图 4 中可见,随着缺陷  $D_\mu$  厚度的增加,在零有效相位带隙内的两个缺陷模分别从零有效相位带隙的两侧向带隙中央靠拢,而厚度增大到 35 mm 时,两个缺陷模简并为一个模,简并频率为 0.7958 GHz。

以上结果即是两种缺陷厚度对零有效相位带隙中缺陷模影响的结果。从中可以看出,若两种缺陷

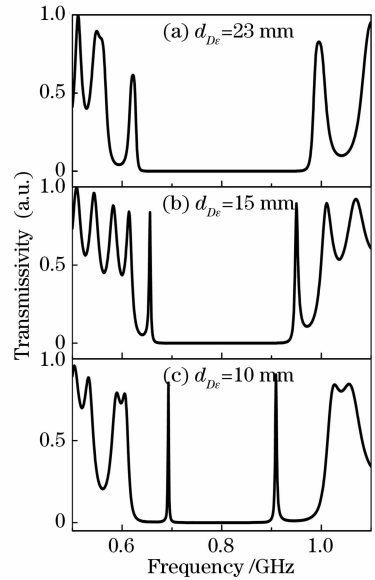


图 3  $d_{D_\mu}$  为 10 mm, 缺陷模随  $d_{D_\epsilon}$  的透射率变化  
Fig. 3 Transmissivities of the defect modes with different values of  $d_{D_\epsilon}$  ( $d_{D_\mu} = 10$  mm)

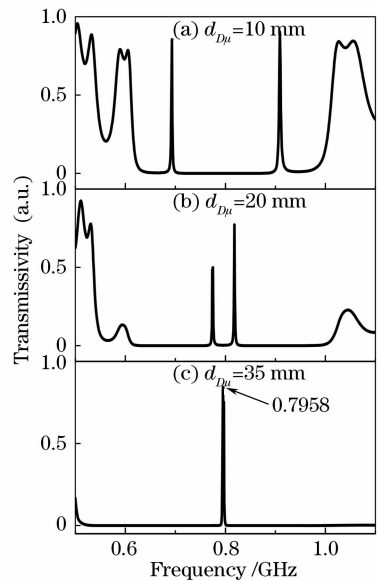


图 4  $d_{D_\epsilon}$  为 10 mm, 缺陷模随  $d_{D_\mu}$  的透射率变化  
Fig. 4 Transmissivities of the defect modes with different values of  $d_{D_\mu}$  ( $d_{D_\epsilon} = 10$  mm)

层厚度之比等于 1 时,随着厚度的增加零有效相位带隙变窄,带隙中两缺陷模对应的频率差变小,相应的透射率变低,但并未出现缺陷模简并现象。若两种缺陷层厚度之比不等于 1 且由小变大时,零有效相位带隙中的两缺陷模对应的频率差会逐渐减小,当厚度比增大到一定程度时,两缺陷模会简并为一个模式。这一现象在其他掺杂光子晶体结构中也曾出现<sup>[12]</sup>,根据文献可知两缺陷模的简并与厚度比没有直接关系,当结构参数满足(4)式或(5)式时

$$\bar{\mu} = \frac{(2m + s + 1)(\mu_1 d_{N\mu} + \mu_2 d_{Ne}) + s\mu_1 d_{D\mu} + (s - 1)\mu_2 d_{Ne}}{(2m + s + 1)(d_{N\mu} + d_{Ne}) + sd_{D\mu} + (s - 1)d_{Ne}} = 0, \quad (4)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{(2m + s + 1)(\epsilon_1 d_{N\epsilon} + \epsilon_2 d_{Ne}) + s\epsilon_1 d_{D\epsilon} + (s - 1)\epsilon_2 d_{Ne}}{(2m + s + 1)(d_{N\epsilon} + d_{Ne}) + sd_{D\epsilon} + (s - 1)d_{Ne}} = 0. \quad (5)$$

即满足零平均磁导率或零平均介电常数条件,就会产生缺陷模简并的现象。将图 4 中的光子晶体结构参数代入(4)式或(5)式,可求出理论的简并频率为 0.796 GHz,与仿真计算结果相一致。

### 3.2 入射角对光子晶体透射谱的影响

以上讨论的内容均假设光波垂直入射到光子晶体中,本节主要讨论该结构的光子晶体透射谱对入射角度的依赖关系。图 5 中计算的光子晶体结构参数与图 2(a)相同,而图 5(a)~图(c)计算的入射角度分别为 0°,15°,30°。由图 5 可知,入射角度的改变对零有效相位带隙中缺陷模的影响非常小;虽然入射角度变化很明显,但缺陷模相应的频率基本没发生变化,透射率也几乎没有改变。因此该种结构的光子晶体其缺陷模对入射角度的变化是非常不敏感的。值得注意的是,图 5 中随着入射角度的变化,在零有效相位带隙外,又出现了一个新的带隙。这个带隙明显是由于入射角度的变化而产生的,称之为角度带隙<sup>[14]</sup>。由于本文所述的光子晶体是由两种单负材料交替堆叠而成的,包括缺陷层在内,两种材料的磁导率和介电常数分别满足(1)式和(2)式,所以两种材料的折射率是一个随入射光频率而变化的物理量。将(1)式或(2)式带入折射率公式

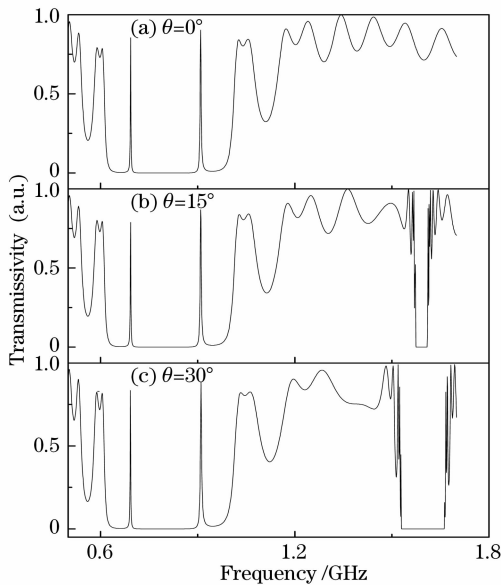


图 5 不同入射角度缺陷模透射率的变化

Fig. 5 Transmissivities of the defect modes with different incident angles

$n = \sqrt{\epsilon\mu}$ 后,根据 Snell 定律可以求出入射角与满足全反射条件的频率之间的关系,如图 6 所示。当入射角为零度时,任何频率都无法使入射光发生全反射;而随着入射角的增大,便可以得到能满足全反射条件的频率,且频率间隔也随之变大。满足全反射条件的频率范围变大,也就意味着禁带范围变大,当入射角接近 90°时,得到最宽的禁带(1.3873 ~ 1.9429 GHz)。图 6 中计算出射角对应的禁带范围与前文结果相对应。

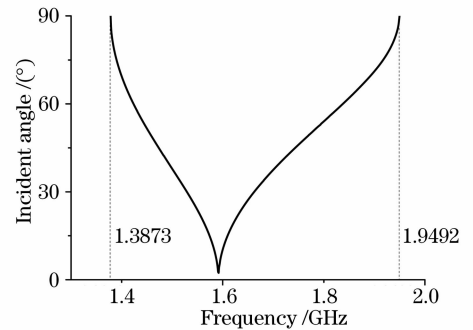


图 6 入射角与满足全反射条件的频率之间的关系

Fig. 6 Relationship between incident angle and frequency when total reflection occurs

## 4 结 论

通过在两种单负材料堆叠构造的一维光子晶体中掺入周期排列的双单负材料的缺陷层,研究了这种结构中缺陷模的性质。研究表明,在该结构的零有效相位带隙中,增大缺陷层的总厚度会使缺陷模频率间隔变大,对应的透射率降低。若两种缺陷的厚度不同,缺陷模对应的频率间隔会随着两种缺陷的厚度比增大而变小。当两种单负材料缺陷的厚度满足零平均磁导率和零平均介电常数条件时,两缺陷模频率间隔减小为零,发生缺陷模简并的现象。此外,零有效相位带隙中的缺陷模对入射角度的依赖关系较小,但入射角度的变化却可以产生新的角度带隙,角度带隙的宽度与缺陷层厚度无关,但会随入射角的增大而变宽。

### 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 J. N. Winn, Y. Fink, S. H. Fan *et al.*. Omnidirectional reflection from a one-dimensional photonic crystal [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(20): 1573~1575
  - 3 J. P. Dowling. Mirror on the wall; You're Omnidirectional after all[J]. *Science*, 1998, **282**(5395): 1841~1842
  - 4 H. A. Macleod. Thin-Film Optical Filters[M]. London: Adam Hilger Press, 1969
  - 5 N. E. J. Hunt, E. F. Schubert, G. J. Zyzik. Resonant-cavity p-i-n photodetector utilizing an electron-beam evaporated Si/SiO<sub>2</sub> microcavity[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(3): 391~393
  - 6 Z. S. Wang, L. Wang, Y. G. Wu *et al.*. Multiple channeled phenomena in hetero structures with defects mode[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(10): 1629~1631
  - 7 Q. Qin, H. Lu, S. N. Zhu *et al.*. Resonance transmission modes in dual-periodical dielectric multilayer films[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(26): 4654~4656
  - 8 J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins *et al.*. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 1999, **47**(11): 2075~2084
  - 9 D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier *et al.*. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(18): 4184~4187
  - 10 C. Enkrich, M. Wegener, S. Linden *et al.*. Magnetic metamaterials at telecommunication and visible frequencies[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**(20): 203901-1~4
  - 11 Haitao Jiang, Hong Chen, H. Q. Li *et al.*. Properties of one-dimensional photonic crystals containing single-negative materials [J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **69**(6): 06607-1~4
  - 12 Yihang Chen. Defect modes merging in one-dimensional photonic crystals with multiple single-negative material defects[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(1): 011925-1~3
  - 13 George V. Elftneriades, Ashwin K. Lyer, Peter C. Kremer. Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 2002, **50**(12): 2702~2712
  - 14 Munazza Zulfiqar Ali, Tariq Abdullah. Optical bistability at angular incidence in a one-dimensional photonic crystal containing single negative materials[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(11): 3177~3182