

文章编号: 0253-2239(2007)08-1498-5

多个单负材料缺陷一维光子晶体的孪生缺陷模

陈溢杭 徐清振

(华南师范大学物理与电信工程学院, 广州 510006)

摘要: 分析了含有多个单负材料缺陷层的一维光子晶体中缺陷模的性质。在两种单负(负介电常量或负磁导率)材料交替堆叠形成的一维光子晶体中,掺入了多个周期排列的单负材料缺陷层,得到在该光子晶体的零有效相位(zero-effective phase)带隙内存在孪生缺陷模。通过改变缺陷的数目或缺陷层的厚度,可调节缺陷模的频率间隔,但缺陷模的数目总保持为两个。计算结果显示,该孪生缺陷模的频率对入射角度的依赖较弱;随着入射角度的改变,缺陷模频率的相对改变量总保持在 0.03 以下。此外,对应缺陷模频率的电场在该光子晶体中传播时,将被强烈地局域在缺陷层与周期结构的交界面上。

关键词: 光子晶体; 孪生缺陷模; 传输矩阵; 单负材料

中图分类号: O436 文献标识码: A

Twin Defect Modes in One-Dimensional Photonic Crystals with Defect Layers of Multiple Single-Negative-Materials

Chen Yihang Xu Qingzhen

(School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006)

Abstract: The defect modes in one-dimensional photonic crystals containing defect layers of multiple single-negative materials are analyzed. The photonic crystals are stacked alternately with single-negative-permittivity and single-negative-permeability media with periodic defect layers. Twin defect modes are found inside the photonic gap with zero effective phase. By varying the defect number or the thicknesses of the defect layers, the frequency interval of the defect modes can be changed, but the number of the defect modes remains two. The two defect modes inside the zero-effective-phase gap are insensitive to incident angle; the normalized frequency shift of the defect modes is always less than 0.03 as the incident angle varies. Moreover, the electric fields at the frequencies of the defect modes are strongly localized at the interfaces between defect layers and periodic structures.

Key words: photonic crystal; twin defect modes; transfer matrix; single-negative material

1 引 言

光子晶体是指介质的折射率按一定周期发生变化的人工材料。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,如存在光子带隙。利用光子晶体的这些性质可有效的控制光的传播,因此,光子晶体已被应用于制作各种光学器件^[1~5]。另一方面,通过在光子晶体中引入缺陷,可在光子带隙内形成缺陷模^[6]。与缺陷模频率相对应的光将被局域在缺陷层附近,使得该处的光场得到极大地增强,从而导致在光子带隙内出现频率范围窄、透射率高的透射峰。含缺陷的一维光子晶体已被广泛应用

于包括多通道滤波器在内的各种窄带通滤波器^[7,8]。通过改变缺陷层的数目及厚度,可改变在一维光子晶体带隙中缺陷模的数目及频率位置^[9,10]。然而,传统的由正折射率材料(介电常量和磁导率均为正值)构成的光子晶体,其带隙的边缘以及缺陷模的频率均随入射角度的增大而蓝移^[11,12],使它在实际应用中受到限制。

近年来,利用单元结构的局域响应机理所制作的新型人造材料——特异材料,这种材料在微波段^[13,14]乃至近红外和可见光波段^[15]中,介电常量和磁导率只有一个为负数。利用这些材料构造的周期

作者简介: 陈溢杭(1979—),男,福建厦门人,讲师,博士,主要从事含特异材料的光子晶体方面的研究。

E-mail: kallenmail@tom.com

收稿日期: 2006-11-30; 收到修改稿日期: 2007-03-28

结构,人们发现了许多新奇的性质^[16~21]。研究证明,由两种单负材料(负介电常量材料和负磁导率材料)交替堆叠形成的一维周期结构中存在着一种新型的零有效相位(zero- φ_{eff})带隙^[22],该带隙具有一系列特殊的性质。然而,在零有效相位带隙中的缺陷模的性质尚未有系统的研究。

本文计算了含多个周期排列的缺陷层的单负材料构成的一维光子晶体中的缺陷模的性质。发现了在该结构中的零有效相位带隙中存在孪生缺陷模,并对其进行了分析。

2 结构模型

考虑由负磁导率材料和负介电常量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

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_a, \quad \mu_1 = \mu_a - \frac{\alpha}{(2\pi\nu)^2}, \quad (1)$$

负介电常量材料满足

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_b - \frac{\beta}{(2\pi\nu)^2}, \quad \mu_2 = \mu_b, \quad (2)$$

(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^[23]。在接下来的计算中,选取 $\mu_a = \varepsilon_b = 1, \varepsilon_a = \mu_b = 3, \alpha = \beta = 100$ 。光子晶体的周期结构中的负磁导率材料(N_μ)和负介电常量材料(N_ε)的几何厚度分别为 d_{N_μ} 和 d_{N_ε} 。在此一维光子晶体中存在零有效相位带隙^[22]。在光子晶体的中央掺入周期排列的缺陷层,其结构形式分别为 $(N_\mu N_\varepsilon)^m 0.5 N_\mu D_1^\dagger 0.5 N_\mu (N_\varepsilon N_\mu)^m$ 和 $(N_\varepsilon N_\mu)^n 0.5 N_\varepsilon D_2^\dagger 0.5 N_\varepsilon (N_\mu N_\varepsilon)^n$, 其中

$$D_1 = (0.5 N_\mu N_\varepsilon D_\mu N_\varepsilon 0.5 N_\mu),$$

$$D_2 = (0.5 N_\varepsilon N_\mu D_\varepsilon N_\mu 0.5 N_\varepsilon).$$

这里 D_μ 和 D_ε 分别为负磁导率材料、负介电常量材料缺陷层,其几何厚度分别为 d_{D_μ} 和 d_{D_ε} , $0.5 N_\mu$ 层和 $0.5 N_\varepsilon$ 层对应的厚度分别为 $0.5 d_{D_\mu}$ 和 $0.5 d_{D_\varepsilon}$; m, n 和 s 分别为周期的数目。假设一单色平面电磁波沿 z 轴传播,则在第 l 层的电场分量可表示为

$$E_l(x, z) = [a_l \exp(-ik_{lz}d_l) + b_l \exp(ik_{lz}d_l)] \times \exp(ik_{lx}x), \quad (3)$$

其中 k_{lx} 和 k_{lz} 分别为入射波矢在 x 和 z 轴的分量,系数 a_l 和 b_l 为前向和后向传播平面波的振幅。电场振幅系数 $[a_l, b_l]^T$ 和 $[a_{l+1}, b_{l+1}]^T$ 可通过传输矩阵

$$\mathbf{M}_l = \begin{bmatrix} \cos k_{lz}d_l & i \sin k_{lz}d_l / \eta_l \\ i \eta_l \sin k_{lz}d_l & \cos k_{lz}d_l \end{bmatrix} \quad (4)$$

联系起来。其中,对于 s 偏振 $\eta_l = \eta_l^s = ck_{lz} / \omega \mu_l$, 对

于 p 偏振 $\eta_l = \eta_l^p = \omega \varepsilon_l / ck_{lz}$ 。

3 计算结果及讨论

先讨论结构为 $(N_\mu N_\varepsilon)^m 0.5 N_\mu D_1^\dagger 0.5 N_\mu (N_\varepsilon N_\mu)^m$ (系统 A) 的光子晶体。利用(4)式对应的传输矩阵,计算该光子晶体结构的透射谱。首先固定缺陷层 D_μ 的厚度,研究在零有效相位带隙内的缺陷模,随缺陷层数目改变的变化规律,如图 1 所示。图 1(a)~图 1(c)分别对应结构中周期数 $s=1, 2$ 和 3 的透射谱,这里取结构参量为 $m=15, d_{N_\mu}=6$ mm, $d_{N_\varepsilon}=10$ mm, $d_{D_\mu}=24$ mm。从图 1 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。随着缺陷数目的增加,两缺陷模分别逐渐向带隙中央靠拢,但缺陷模数目维持不变。

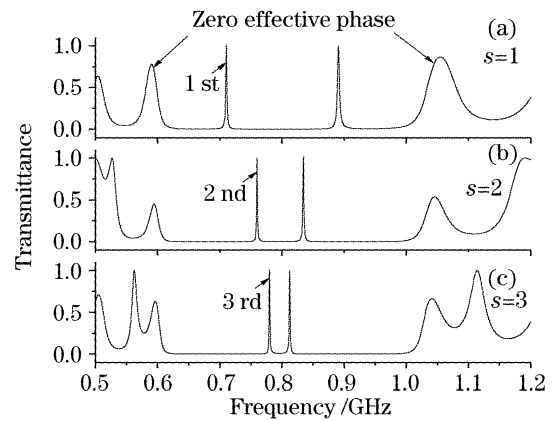


图 1 结构 $(N_\mu N_\varepsilon)^m 0.5 N_\mu D_1^\dagger 0.5 N_\mu (N_\varepsilon N_\mu)^m$, 随着缺陷层数目的增加,零有效相位带隙内缺陷模的变化

Fig. 1 Dependence of the defect modes inside the zero-effective phase gap in structure $(N_\mu N_\varepsilon)^m 0.5 N_\mu D_1^\dagger 0.5 N_\mu (N_\varepsilon N_\mu)^m$ on the number of the defect layers

接着,固定缺陷层的数目,研究在零有效相位带隙内的缺陷模随缺陷层厚度的变化规律,如图 2 所示。这里选取 $m=15, d_{N_\mu}=6$ mm, $d_{N_\varepsilon}=10$ mm, $s=2$ 。从图 2 可见,随着缺陷层厚度的增大,在零有效相位带隙内的两个缺陷模同样分别从零有效相位带隙的两侧向带隙中央靠拢,孪生缺陷模现象依然存在。

孪生缺陷模的性质明显区别于传统的布拉格(Bragg)带隙内的缺陷模。若增加缺陷的浓度,在布拉格带隙内的缺陷与缺陷之间会发生耦合^[24],导致布拉格带隙内的缺陷态发生分裂^[25],从而导致缺陷模数目改变。与之相对比,在零有效相位带隙内的缺陷模的数目总保持为两个,仅仅改变缺陷的数目或缺

陷层的厚度,即可调节两缺陷模之间的频率间距。

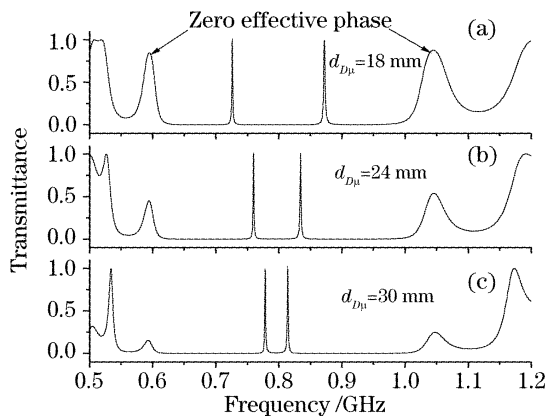


图 2 结构 $(N_\mu N_\epsilon)^m 0.5N_\mu D_i 0.5N_\mu (N_\epsilon N_\mu)^m$, 零有效相位带隙内的缺陷模随缺陷层厚度的变化

Fig. 2 Dependence of the defect modes inside the zero-effective-phase gap in structure $(N_\mu N_\epsilon)^m 0.5N_\mu D_i 0.5N_\mu (N_\epsilon N_\mu)^m$ on the thicknesses of the defect layers

为了理解上述孪生缺陷模产生的机理,计算了电场在光子晶体中传播时的场强分布。图 3 展示了对应图 1 中各缺陷模频率的电场,在光子晶体中的分布情况,其中图 3(a)~图 3(c)中电场的频率分别对应图 1(a)~图 1(c)中的第一、第二以及第三个缺陷模的频率。由图 3(a)可以看出,当只有一个缺陷层时,电场局域最强的位置不在缺陷层的中心,而在缺陷层与其两边周期结构的两交界面上。当缺陷的

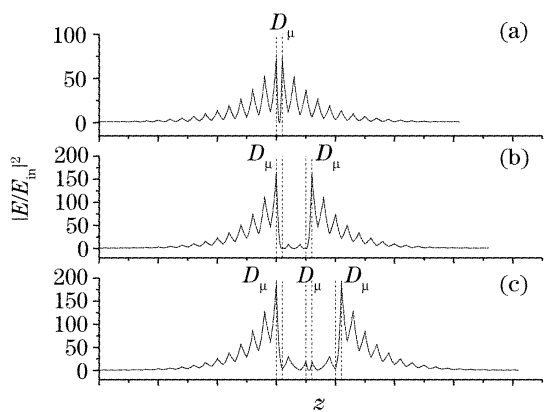


图 3 一维光子晶体 $(N_\mu N_\epsilon)^{14} 0.5N_\mu D_i 0.5N_\mu (N_\epsilon N_\mu)^{14}$ 中的场强分布。图中 D_μ 对应缺陷层所处的位置。(a)对应图 1(a)中频率为 0.710 GHz 的缺陷模,(b)对应图 1(b)中频率为 0.759 GHz 的缺陷模,(c)对应图 1(c)中频率为 0.779 GHz 的缺陷模

Fig. 3 Electric field distributions in one-dimensional photonic crystal $(N_\mu N_\epsilon)^{14} 0.5N_\mu D_i 0.5N_\mu (N_\epsilon N_\mu)^{14}$. D_μ denotes the position of the defect layers. Corresponding frequencies of the defect modes are (a) 0.710 GHz in Fig. 1(a), (b) 0.759 GHz in Fig. 1(b), (c) 0.779 GHz in Fig. 1(c)

数目增加为 2 或 3 层时,电场强度仍然在缺陷层与周期结构的两交界面上达到最大值,如图 3(b)和图 3(c)所示,而电场在两交界面之间的强度较小(场强小于最大值的 1/10)。

与传统的布拉格带隙不同,零有效相位带隙的产生是基于消逝波在单负材料层之间的相互耦合,即它源自于光波的隧穿机理而非传统的布拉格散射机理。在单负材料中传播的电场或磁场,其沿传播方向的导数的绝对值仍保持连续,只是在负磁导率材料和负介电常量材料的交界面两边的导数异号,因此电场或磁场总在材料交界面上达到极值。若往光子晶体中引入缺陷,将改变电磁场在光子晶体中的传播规律,和缺陷模对应频率的场强在缺陷层的两侧均达到极大值,如图 3 所示,该电磁场局域模式导致了 2 个缺陷模的产生。若增加缺陷层的厚度,其结果仅仅是增强了场强的局域效果,因此缺陷模的数目维持为 2 个。若缺陷层的数目不为 1,仍可将所有的缺陷层作为 1 个整体缺陷考虑;此时增加缺陷层的数目,等同于增加整体缺陷的厚度,因此孪生缺陷模现象依然存在。

接着,分别比较在零有效相位带隙和布拉格带隙内的缺陷模的频率对入射角度依赖的关系。图 4 为光正入射时,结构 $(N_\mu N_\epsilon)^m 0.5N_\mu D_i 0.5N_\mu (N_\epsilon N_\mu)^m$ 的透射谱。从图中可见,布拉格带隙的频率范围在 3.7 GHz 与 7.3 GHz 之间,在该带隙内有四个缺陷模出现。由于两种带隙所处的频率位置不同,为了准确地比较带隙内缺陷模的频率移动量,这里使用归一化频率改变量 $(\Delta\nu/\nu_0)$ 衡量缺陷模的频率移动。其中 $\Delta\nu = \nu - \nu_0$, ν_0 为正入射时缺陷模的频率。图 5

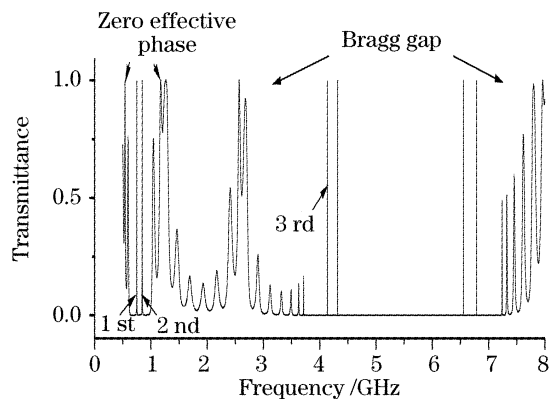


图 4 结构 $(N_\mu N_\epsilon)^{14} D_i (N_\epsilon N_\mu)^{14}$ 中零有效相位带隙和布拉格带隙内的缺陷模。光子晶体的结构参量与图 1(b)相同

Fig. 4 Defect modes in zero-effect-phase gap and Bragg gap of $(N_\mu N_\epsilon)^{14} D_i (N_\epsilon N_\mu)^{14}$, the parameters are the same as those in Fig. 1(b)

给出了分别在零有效相位带隙内和布拉格带隙内的缺陷模,其频率对入射角度的依赖关系。从图 4 可见,随着入射角度的改变,在零有效相位带隙内的缺陷模的频移很小, $\Delta\nu/\nu_0$ 维持在 0.03 以下;与之相对比,布拉格带隙内的缺陷模的频移较大,当入射角度增大到 85° 时, $\Delta\nu/\nu_0$ 大于 0.20。零有效相位带隙内的孪生缺陷模对入射角度依赖弱的性质,可用于设计双通道全向滤光片,通过改变光子晶体的结构参量,可方便地调节通道频率间隔。

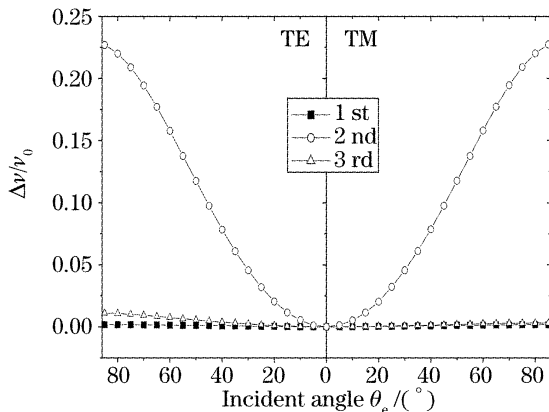


图 5 对应图 4 中分别在两种带隙内的缺陷模,其频率随入射角度的变化

Fig. 5 Dependence of the frequencies of the defect modes in Fig. 4 on the incident angle for different polarizations

此外,还研究了结构 $(N_\epsilon N_\mu)^n 0.5 N_\epsilon D_z^2 0.5 N_\epsilon (N_\mu N_\epsilon)^n$ (系统 B) 中的缺陷模的性质。计算结果发现,若单负材料的色散关系保持为(1)式和(2)式的形式,并且两系统(系统 A 和 B)中的第 l 层满足 $d(l)^A = d(l)^B$,则当波正入射时,在系统 B 中的带隙及缺陷模的频率与系统 A 完全相同。当波倾斜入射时,则系统 B 中 TE 偏振波的带隙及缺陷模的频率与系统 A 中 TM 偏振波的相同;系统 B 中 TM 偏振波的带隙及缺陷模的频率与系统 A 中 TE 偏振波的相同。由此可知,系统 B 中同样存在有孪生缺陷模,且其性质和系统 A 的相同。

4 结 论

通过在两种单负(负的介电常量和负的磁导率)材料交替堆叠构造的一维光子晶体中掺入了周期排列的单负材料缺陷层,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内存在孪生缺陷模。随着缺陷层数目的增加或缺陷层厚度的增大,两缺陷模分别从零有效相位带隙中央的两侧逐渐向带隙中央靠拢。而对应缺陷模频率的电场在光子晶体中传播时,其场强最大处总位于缺陷

层与两侧周期结构的交界面上。场强在缺陷层两侧面上的高度局域导致了孪生缺陷模的产生。此外,在零有效相位带隙内的缺陷模的频率对入射角度的依赖很弱,其频率的相对改变量($\Delta\nu/\nu_0$)总保持在 0.03 以下。

参 考 文 献

- 1 J. Schilling, F. Muller, S. Matthias *et al.*. Three-dimensional photonic crystals based on macroporous silicon with modulated pore diameter[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(9): 1180~1182
- 2 Chiyan Luo, Steven G. Johnson, J. D. Joannopoulos *et al.*. All-angle negative refraction without negative effective index[J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **65**(20): 201104-1~201104-
- 3 Xinhua Hu, C. T. Chan. Photonic crystals with silver nanowires as a near-infrared superlens [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(9): 1520~1522
- 4 E. Yablonovitch, T. J. Gmitter. Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **67**(17): 2295~2298
- 5 Gu Guochang, Li Hongqiang, Chen Hongtao *et al.*. Properties of light propagation in 1-D periodic dielectric structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 728~734 (in Chinese)
顾国昌,李宏强,陈宏涛等. 一维光子晶体材料中的光学传输特性[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6): 728~734
- 6 E. Yablonovitch, T. J. Gmitter. Donor and acceptor modes in photonic band structure[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **67**(24): 3380~3383
- 7 Hyun-Yong Lee, Hisao Makino, Takafumi Yao *et al.*. Si-based omnidirectional reflector and transmission filter optimized at a wavelength of $1.55 \mu\text{m}$ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(24): 4502~4504
- 8 N. E. J. Hunt, E. F. Schubert, G. J. Zydzik. Resonant-cavity p-i-n photodetector utilizing an electron-beam evaporated Si/SiO₂ microcavity[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(3): 391~393
- 9 Z. Wang, R. W. Peng, F. Qiu *et al.*. Selectable-frequency and tunable-Q perfect transmissions of electromagnetic waves in dielectric heterostructures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(20): 3969~3971
- 10 R. W. Peng, Y. M. Liu, X. Q. Huang *et al.*. Dimerlike positional correlation and resonant transmission of electromagnetic waves in aperiodic dielectric multilayers [J]. *Phys. Rev. B*, 2004, **69**(16): 165109-1~165109-7
- 11 Sheng Lan, Satoshi Nishikawa, Yoshimasa Sugimoto *et al.*. Analysis of defect coupling in one- and two-dimensional photonic crystals[J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **65**(16): 165208-1~165208-9
- 12 Hyun-Yong Lee, Takafumi Yao. Design and evaluation of omnidirectional one-dimensional photonic crystals[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**(2): 819~830
- 13 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
- 14 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
- 15 C. Enkrich, M. Wegener, S. Linden *et al.*. Magnetic metamaterials at telecommunication and visible frequencies[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**(20): 203901-1~203901-4
- 16 Jense Li, Lei Zhou, C. T. Chan *et al.*. Photonic band gap from a stack of positive and negative index materials[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(8): 083901

17 Chen Y H, Liang G Q, Dong J W, Wang H Z. Derivtion and characterization of dispersion of defect modes in photonic band gap from stacks of positive and negative index material[J]. *Phys. Lett. A*, 2006, **351**(6): 446~451

18 Yi-hang Chen, Jian-wen Dong, He-zhen Wang. Conditions of near-zero dispersion of defect modes in one-dimensional photonic crystal containing negative-index materials [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(4): 776~781

19 Y. H. Chen, J. W. Dong, H. Z. Wang. Omnidirectional resonance modes in photonic crystal heterostructures containing single-negative materials [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(10): 2237~2240

20 Y. H. Chen, J. W. Dong, H. Z. Wang. Twin defect modes in one-dimensional photonic crystals with a single-negative material defect[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(14): 141101-1 ~ 141101-3

21 Dong Jianwen, Chen Yihang, Wang Hezhou. Dispersion and localization of defect state in one-dimensional photonic crystal consisting of metamaterials [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(1): 268~273 (in Chinese)
董建文,陈溢杭,汪河洲. 含奇异材料的掺杂一维光子晶体色散关系和空间局域度理论[J]. *物理学报*, 2007, **56**(1): 268~273

22 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): 06607-1~06607-4

23 George V. Eleftheriades, Ashwin K. Iyer, 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

24 Mehmet Bayindir, C. Kural, E. Ozbay. Coupled optical microcavities in one-dimensional photonic bandgap structures[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2001, **3**(6): S184~S189

25 T. Mukaiyama, K. Takeda, H. Miyazaki *et al.*. Tight-binding photonic molecule modes of resonant bispheres[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **82**(23): 2582~4626



征 订 启 事

第八届全国激光加工学术论文集——《中国激光》2007年增刊,已于2007年3月出版。论文集较全面地反映了近年来我国激光加工技术研究、应用和产业化的最新成果,包括激光连接(焊接、钎焊),激光去除(切割、打孔、清洗、抛光等),激光强化(合金化、熔覆、沉积等),激光制备新材料,激光快速成形与激光快速制造,激光复合加工技术,激光微纳米技术,激光加工新技术与新应用,激光加工过程检测与控制,新型激光器件与光加工系统等领域,作者来自于国内近40个大专院校、科研机构和企业。是广大激光加工领域工作者的非常有价值的参考资料。

论文集约400页,定价100元,进口雅光纸精印,光盘版定价80元,欢迎读者订阅。

联系人:高先生 电 话:021-69918253