

准分形结构光子晶体滤波器层厚误差容限

许攀 田慧平 李长红 纪越峰

(北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要 为了研究准分形结构光子晶体滤波器制作过程中引入的层厚误差微扰对其性能的影响,并得出准分形结构光子晶体滤波器的层厚误差容限,通过向正负折射率介质层加入不同的层厚微扰,分析了含负材料准分形结构光子晶体滤波器制作过程中的层厚微扰对其性能的影响。得到透射峰移动随介质折射率、介质层层数和层厚微扰大小的变化规律。对每层加入随机几何层厚微扰的情况进行了仿真,得到透射峰移动位置的统计图,并分析了透射峰位置统计数字特征随随机微扰的变化趋势。总结出含负材料准分形结构光子晶体滤波器在密集波分复用(DWDM)通信系统中的随机几何层厚误差容限为 0.01 nm。

关键词 光子晶体; 层厚微扰; 滤波器; 准分形结构

中图分类号 O734 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2308

Tolerance of Thickness Fluctuations of Quasi-Fractal Photonic Crystal Filter

Xu Pan Tian Huiping Li Changhong Ji Yuefeng

(Key Laboratory of Optical Communication & Lightwave Technologies, Ministry of Education, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract In order to research the influence of layer thickness fluctuations on the performance of quasi-fractal photonic crystal filter and to find out the tolerance of the thickness fluctuations, the influence of layer thickness fluctuation on the filter properties of quasi-fractal photonic crystal filter containing negative material is analyzed through adding different thickness fluctuations both in positive and negative refractive index layers. Laws of the transmission peak shifting with the refractive index, number of the layers and the thickness of layer fluctuation are summarized. The statistic figures of the positions of the transmission peaks are simulated and the statistic feature of the position of the transmission peaks are analyzed when the random geometric thickness fluctuations are added in each layer. The conclusion is that the tolerance of random geometric thickness fluctuation of this kind of photonic crystal filter used in dense wavelength division multiplexing (DWDM) optical communication system is only 0.01 nm.

Key words photonic crystals; thickness fluctuations of layers; filter; quasi-fractal structure

1 引 言

光滤波器是光通信系统中的重要器件。近年来,光通信技术的发展对光滤波器提出了越来越高的要求。不仅要求光滤波器滤波通带窄,滤波频率可调节,其质量和体积等参数也直接影响到它的应用价值。由于光子晶体的体积和质量非常小,并且

具有光子禁带^[1]的特征,因此光子晶体滤波器具有良好的应用前景^[2]。

由于光子晶体的几何结构对光子晶体的能带有很大影响,具有分形特征的光子晶体与传统的光子晶体相比有着不同的特点^[3~5]。准分形结构光子晶体的能带具有双频及多频带隙的特点,这是传统

收稿日期: 2008-06-16; 收到修改稿日期: 2008-12-11

基金项目: 国家 973 计划(2007CB310705)、国家 863 计划(2007AA01Z247)、国家自然科学基金(60707001, 60772024)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0110)、教育部“长江学者和创新团队发展计划”(IRT0609)资助课题。

作者简介: 许攀(1985-),男,硕士研究生,主要从事宽带通信网、光子晶体方面的研究。E-mail: xpblack@163.com

导师简介: 田慧平(1976-),女,博士,副教授,主要从事光学传输与超快过程、光纤通信与光子晶体方面的研究。

E-mail: hptian@bupt.edu.cn

光子晶体能带所不具备的优点;而且,其带隙的谐振频率可以随着分形结构单元的调整而得到改变,这种能带的特点为具有分形特征的光子晶体在通信等领域的应用提供了可能。其中,基于准分形结构的光子晶体滤波器凭借其超窄带多通道的滤波特性、滤波通带间几乎无干扰、通带位置和数目易调节、滤波器尺寸小、易于集成等众多优点^[6,7],在光通信系统,特别是密集波分复用(DWDM)系统中有良好的应用前景。

目前光子晶体的制作工艺还很不成熟,目前的制作方法有:自组装法、电化学法、积木法、逐层刻蚀法等^[8~10]。虽然光子晶体制作方法已经有了长足的进步,但是受到制作工艺的制约,要在纳米级甚至更小的精度上做到精确控制还是很困难的。

由于准分形结构光子晶体滤波器对制作精度的要求很高,因此准光子晶体滤波器在制作过程中产生的层厚微扰对滤波器性能的影响,是必须要考虑的问题。本文将讨论由制作误差导致的层厚微扰对含负材料准分形结构光子晶体滤波器滤波性能的影响。

2 理论模型

一维光子晶体是介电常数不同的两种材料介质层在一个方向上交替排列构成的周期性多层结构。本文应用传输矩阵法来计算一维光子晶体的带隙结构及滤波特性:将光波在介质层中的行进看作是正向行进的电磁波(下行波)和反向行进的电磁波(上行波)的叠加,介质交界面处的电磁波满足边界条件,每一个介质层与光波的作用可用其特征矩阵完全决定。

用传输矩阵公式^[11,12],对一维结构光子晶体进行数值模拟计算。每一个介质层的传输矩阵为

$$\mathbf{T}_j = \begin{pmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中 $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \theta_j$, $j=1, 2, \dots, N$ 。

$$\eta_j = \begin{cases} \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} \cos \theta_j & (\text{TE}) \\ \sqrt{\frac{\epsilon_j}{\mu_j}} \frac{1}{\cos \theta_j} & (\text{TM}) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 λ 为入射波长, n_j , d_j , θ_j 分别为各层的折射率,厚度,入射角,各层的阻抗 η_j 对应入射波为 TE 和 TM 两种情况,有如上式的两种形式。

本文计算和方针结果均为入射光垂直入射时,

此时 TE 模和 TM 模具有相同的结果。

3 数值模拟与分析

3.1 含负材料准分形结构光子晶体滤波器

负材料又称左手材料,是指材料的介电常数 ϵ 和磁导率 μ 同时为负值。用负材料和正材料交替排列形成的一维光子晶体,其带隙结构和普通一维光子晶体有很大的不同,禁带很宽,导带为没有振荡的尖锐峰。将负材料加入准分形结构光子晶体中,可以在禁带中获得超窄带的透射峰^[13~16]。本文研究的由正、负材料构成的一维准分形结构光子晶体如图 1 所示,其中 Sa, Sb 由三层组成,分别是 Sa 为 AAA, Sb 为 BAB。A, B 层折射率分别为 $n_a = 2$, $n_b = -3$,这种结构具有分形的自相似特性。取中心波长 $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$,通过仿真计算出此结构光子晶体的透射谱在中心波长 $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 处有一个极窄的透射峰,如图 2(a)所示,透射峰最大透射率为 1,透射峰宽度只有约 0.02 nm ,具有良好的滤波特性。此时,结构中 A, B 层每层的光学厚度均为 $1/4$ 倍 λ_0 ,对应的几何厚度为, A 层 193.75 nm , B 层 129.17 nm ,层厚精度达到 0.01 nm 。如此高的精度,对这种准分形结构光子晶体滤波器的制作提出了很高的要求。下面将讨论层厚微扰对准分形结构光子晶体滤波器的影响。

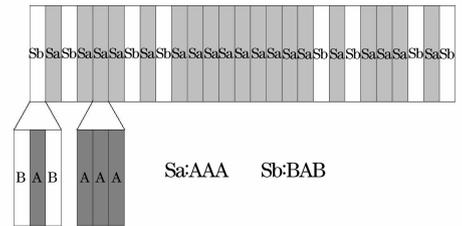


图 1 准分形结构光子晶体滤波器结构

Fig. 1 Structure of quasi-fractal photonic crystal filter

3.2 透射峰随层厚微扰的变化规律

分析在 A 层中加入不同光学层厚微扰时透射峰的变化情况。将此结构光子晶体滤波器的所有 A 层光学厚度变为 $0.250005\lambda_0$,即增加 $0.000005\lambda_0$ 的光学层厚微扰。每层层厚对应的几何厚度为 193.754 nm ,层厚微扰对应的几何厚度为 0.004 nm 。仿真计算得出此时的透射谱如图 2(b)所示。与图 2(a)相比,可以看出,此时透射峰向长波长方向移动了 0.15 nm ;将 A 层每层的光学厚度变为 $0.25001\lambda_0$,即增加 $0.00001\lambda_0$ 的光学层厚微扰。层厚对应的几何厚度为 193.758 nm ,微扰误差为 0.008 nm 。仿真计算得出其相应的透射谱如图 2(c)

所示,可以看出,增大层厚的微扰,透射峰向长波长方向的移动幅度更大了,移动了约 0.25 nm;将 A 层的光学厚度减小,变为 $0.24999\lambda_0$,即减少 $0.00001\lambda_0$ 的光学厚度。层厚对应的几何厚度为 193.742 nm,微扰误差为 -0.008 nm。计算得出透射谱如图 2(d)所示。可以看出,加入负的层厚微扰,透射峰向短波长方向移动,移动幅度约 0.25 nm。此时透射峰移动幅度与加入正 $0.00001\lambda_0$ 层厚微扰时相同,但移动方向相反。

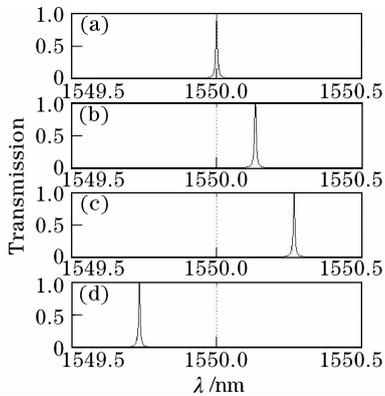


图 2 A 层加入层厚微扰对光子晶体滤波器透射峰的影响

Fig. 2 Effects of thickness fluctuations of layers A on transmission peak of the photonic crystal filter

在负折射层 B 层中加入与 A 层相同的层厚微扰,得到的透射谱如图 3 所示。其中,图 3(a)~图 3(d)分别是:不加入层厚微扰、向 B 层增加 $0.000005\lambda_0$ 光学厚度、增加 $0.00001\lambda_0$ 光学厚度和减少 $0.00001\lambda_0$ 光学厚度时得到的透射谱。分析图 3,并和图 2 对比,可以看出,向 B 层加入层厚微扰后,透射谱的移动方向正好与 A 层相反;向 B 层加入与 A 层大小相同的微扰后,透射谱的移动幅度略小于 A 层。

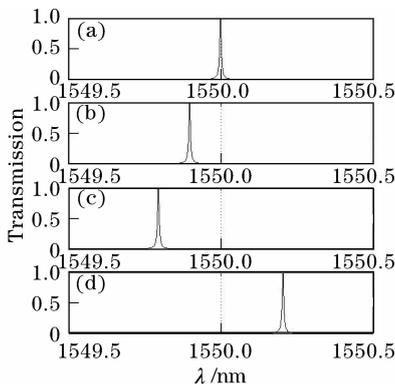


图 3 B 层加入层厚微扰对光子晶体滤波器透射峰的影响

Fig. 3 Effects of thickness fluctuations of layers B on transmission peak of the photonic crystal filter

向 A、B 层同时加入光学厚度为 $0.00001\lambda_0$ 的光学层厚微扰,微扰对应的几何厚度为 A 层

0.008 nm, B 层 0.005 nm。计算得出此时透射谱如图 4(a)所示。从图 4(a)中可以看出,在相同的光学层厚微扰下,由于 A 层层数多于 B 层,透射峰最终表现为向长波长方向移动了 0.05 nm。由于制作过程中的微扰是以几何厚度的形式呈现,向 A、B 层同时加入 0.005 nm 的几何层厚微扰,通过公式得出此时对应的光学厚度为 A 层 $0.0001\lambda_0$, B 层 $0.00015\lambda_0$ 。计算得出此时透射谱如图 4(b)所示。从图 4(b)中可以看到,由于 B 层折射率绝对值大于 A 层,导致 B 层光学厚度微扰大于 A 层,又由于 A 层和 B 层引起的透射峰移动方向相反,透射峰最终表现为向短波长方向移动了 0.03 nm。

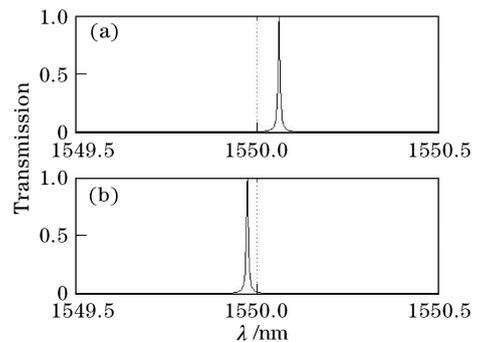


图 4 A、B 层加入相同层厚微扰对光子晶体滤波器透射峰的影响

Fig. 4 Effects of the same thickness fluctuations both in layers A and B on transmission peak of the photonic crystal filter

通过以上分析,可以得出含负材料准分形结构光子晶体透射峰随层厚微扰的变化规律如下:

- 1) 增加(减少)正折射率材料的层厚,透射峰向长(短)波长方向移动;
- 2) 增加(减少)负折射率材料的层厚,透射峰向短(长)波长方向移动;
- 3) 加入的层厚微扰越大,透射谱移动幅度越大;
- 4) 加入相同物理层厚微扰,材料折射率绝对值越大,透射谱移动幅度越大;
- 5) 加入相同光学层厚微扰,介质层层数越多,透射谱移动幅度越大。

透射峰移动幅度与加入几何层厚微扰大小的关系如图 5 所示。图中 X 轴是 A 层中加入几何层厚微扰的大小, Y 轴是 B 层中加入几何层厚微扰的大小, Z 轴是透射峰的位置。其中虚线(a)表示只在 B 层加入几何层厚微扰(A 层微扰为 0)后透射峰的移动幅度变化曲线;点线(b)表示只在 A 层加入几何

层厚微(B层微扰为0)扰后透射峰的移动幅度变化曲线;实线(c)表示在AB层同时加入相同几何层厚微扰后透射峰移动幅度的变化曲线。从图中可以看到,透射峰位置随层厚微扰大小呈线性变化。A层和B层同时加入相同层厚微扰后,由于B层为负折射层,A层和B层微扰导致透射峰的移动方向相反,相互抵消,最终引起透射峰移动幅度很小。因此,当每层具有相同的层厚微扰时,含正负材料的准分形结构光子晶体滤波器透射峰受层厚微扰的影响度明显小于只含正材料的光子晶体滤波器。

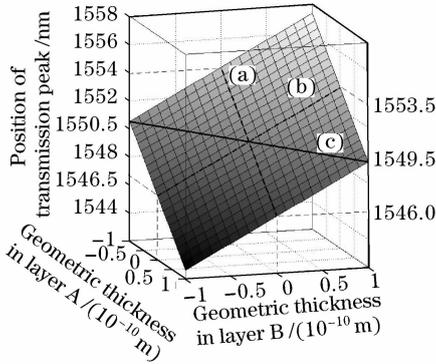


图5 透射峰随几何层厚微扰的变化情况

Fig. 5 Position of transmission peak as a function of geometric thickness fluctuation in both layer A and B

3.3 随机几何层厚微扰对透射峰的影响

在实际的光子晶体制作中,每个介质层产生的是几何层厚微扰,并且是随机的。本文下面将在含负材料准分形结构光子晶体滤波器每个介质层引入一定的随机几何层厚微扰,分析其对滤波性能的影响。

由计算机产生一个随机微扰量序列 W , W 在 $(-0.05 \text{ nm}, 0.05 \text{ nm})$ 上服从均匀分布。通过 1000 次仿真计算,可以得到在加入随机几何层厚微扰 W 后透射峰位置的统计图,如图 6(a)所示。分析图中数据可以得出,透射峰位置的均值约为中心波长 1550 nm,由于微扰的随机性,使得透射峰的最大移动幅度达到约 1.5 nm,移动幅度的标准差为 0.57 nm,而 DWDM 系统的信道间隔只有 0.2 nm,此时透射峰的移动幅度均远远超过 DWDM 系统的信道间隔,所以 $(-0.05 \text{ nm}, 0.05 \text{ nm})$ 均匀分布的随机几何层厚微扰是我们不能容忍的。

通过调整随机几何微扰 W 的幅度并仿真计算,得到透射峰移动幅度最大值变化曲线如图 7 中实线 (a) 所示,透射峰移动幅度标准差变化曲线如图 7 虚线 (b) 所示。从图中可以看到,透射峰移动幅度最大值和标准差随着加入的随机几何层厚微扰的大小

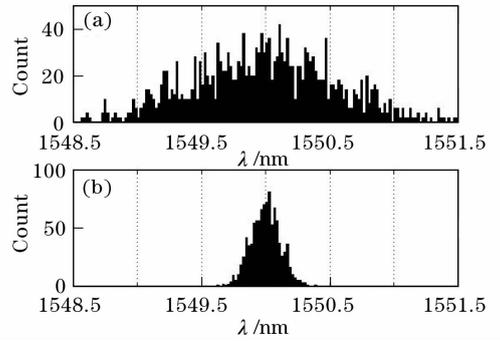


图6 A层和B层加入随机几何层厚微扰后透射峰的位置统计图

Fig. 6 Statistic figures of the position of the transmission peak as a function of random geometric thickness fluctuations in both layer A and B

呈线性变化。如图所示,当透射峰移动幅度标准差等于 DWDM 系统信道间隔 0.2 nm 时,对应的随机层厚微扰 W 在 $(-0.017 \text{ nm}, 0.017 \text{ nm})$ 均匀分布,然而此时透射峰的移动幅度最大值已达 0.5 nm,透射峰移动幅度大于信道间隔 0.2 nm 的概率高达 30.8%。因此,应同时用透射峰移动幅度最大值和标准差两个指标来衡量随机几何层厚微扰的影响。综合分析图 7 的曲线,选取随机几何层厚微扰 W 在 $(-0.01 \text{ nm}, 0.01 \text{ nm})$ 服从均匀分布,此时透射峰最大移动约为 0.3 nm,但移动幅度标准差只有 0.116 nm。透射峰位置的统计图如图 6(b)所示,其中透射峰位置的均值约为 1550 nm,透射峰移动幅度超过信道间隔的概率小于 5%。这种误差概率不影响此结构光子晶体滤波器在 DWDM 系统中的应用。

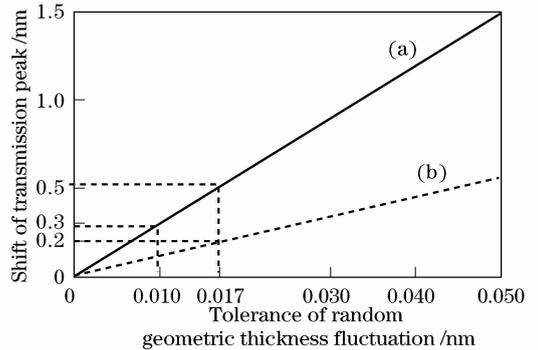


图7 透射峰移动幅度最大值和标准差随随机微扰的变化曲线

Fig. 7 Maximum and standard deviation of shift of transmission peak as a function of random geometric thickness fluctuation

通过以上分析,如果将含负材料准分形结构光子晶体滤波器用于 DWDM 光纤通信系统,要使得制作过程中产生随机微扰引起滤波器中心波长的偏差在

DWDM 系统的信道间隔之内,要求此结构光子晶体滤波器的随机几何层厚误差容限为 0.01 nm。

4 结 论

通过在含负材料准分形结构光子晶体滤波器的介质层中加入层厚微扰,得出透射谱随着加入不同层厚微扰的变化规律。分别在正负折射率材料层加入微扰后透射峰移动方向相反;透射峰移动幅度与微扰大小、材料折射率绝对值和介质层层数成正比。分析出含负材料的准分形结构光子晶体滤波器对层厚微扰的抗扰容限大于只含正材料的光子晶体滤波器。在以上结论和规律的基础上,考虑实际的层厚微扰为随机几何层厚微扰,通过进一步仿真计算,得出此结构光子晶体滤波器的随机几何层厚误差容限为 0.01 nm。这些结论和规律对含负材料准分形结构光子晶体滤波器制作过程中的层厚误差控制和在 DWDM 光纤通信系统中的应用提供了有价值的参考和理论指导。

参 考 文 献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2486~2489
- 2 Zhang Wenfu, Fang Qiang, Cheng Yihua *et al.*. Narrow band interleaver based on one-dimensional photonic crystal with positive-negative index alternant multilayer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9):1695~1699
张文富,方强,程益华等. 正负折射率交替一维光子晶体窄带梳状滤波器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9):1695~1699
- 3 Li Yan, Zheng Ruisheng, Feng Yuchun *et al.*. The multi-stopband characteristic of quasi-fractal photonic crystal and its application[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2):310~314
李岩,郑瑞生,冯玉春等. 准分形光子晶体多频带隙的特性及其应用[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2):310~314
- 4 Li Yan, Zheng Ruisheng, Feng Yuchun *et al.*. Photonic band in quasi-fractal photonic crystal structure including idealized metal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(9):3205~3210
李岩,郑瑞生,冯玉春等. 含有理想导体的准分形结构光子晶体的能带[J]. *物理学报*, 2004, **53**(9):3205~3210
- 5 Meng Qingsheng, Ouyang Zhengbiao, Wang Zhongchun *et al.*. Mode types and their related properties of one-dimensional photonic crystal resonant cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7):1290~1294
孟庆生,欧阳征标,王仲淳等. 一维光子晶体谐振腔的模式类型及其性质[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7):1290~1294
- 6 Zheng Cui, Tian Huiping, Li Changhong *et al.*. Band gap structure and filter properties of photonic crystals with GCLM defect[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1):101~105
郑翠,田慧平,李长红等. GCLM 缺陷光子晶体带隙结构及滤波特性[J]. *光子学报*, 2008, **37**(1):101~105
- 7 Liu Jing, Zheng Zhiqiang, Feng Zhuohong *et al.*. Tunable optical filter based on two-dimensional heterostructure photonic crystal with neighboring dot-defects and curved waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11):2034~2037
刘璟,郑志强,冯卓宏等. 二维异质结光子晶体中含近邻点缺陷的弯曲波导的可调谐滤波特性[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2034~2037
- 8 Zhu Shao'an, Zhong Yongchun, Wang Hezhou. Photonic band gap of the distorted face-center-cubic structure photonic crystal fabricated by holographic lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 279~282
朱少安,钟永春,汪河洲. 光全息制作的变形面心立方结构光子晶体的带隙[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 279~282
- 9 Campbell M., Sharp D. N., Harrison M. T. *et al.*. Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography[J]. *Nature*, 2000, **404**(6773): 53~56
- 10 Miguez H., Bianco A., M. Eseguer F. *et al.*. Control of the photonic crystal properties of fcc packed submicron SiO₂ spheres by sintering[J]. *Adv. Mater.*, 1998(10): 480~483
- 11 Jiang Meiping, Jiang Xingfang, Shen Xiaoming *et al.*. Study on the polarization property of 1-D photonic crystal [J]. *Chinese J. Quant. Electron.*, 2005, **22**(4):612~616
蒋美萍,江兴方,沈小明等. 一维光子晶体的偏振特性研究[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(4):612~616
- 12 Puppini R. Surface polaritons of a left-handed medium [J]. *Phys. Lett. (A)*, 2000, **277**(1):61~64
- 13 Shelby R. D., Smith D. R., S. C. Nemat-Nasser *et al.*. Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed meta material [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(22):489~492
- 14 Chen Yihang, Xu Qingzhe. Tunable optical filter based on two-dimensional heterostructure photonic crystal with neighboring dot-defects and curved waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8):1498~1502
陈溢杭,徐清振. 多个单负材料缺陷一维光子晶体的孪生缺陷模[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8):1498~1502
- 15 Shelby R. A., Smith D. R., Schultz S.. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, **77**:292~294
- 16 Weng Y., Wang Z. G., Chen H.. Band structures of one-dimensional sub wavelength photonic crystals containing metamaterials[J]. *Phys. Rev. (E)*, 2007, **75**:046601~046604