

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0163-05

基于遗传算法设计全方向高质量滤波器

崔 骥 贾 巍 蒋立勇 袁 俊 李相银

(南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094)

摘要 采用了结构为 $(B'A')^N(A'B')^N(B''A'')^N(A''B'')^N$ 的光子晶体异质结构来设计一维全方向滤波器。利用传输矩阵法对该结构的透射性能进行了分析,并结合遗传算法对该光子晶体异质内各组元厚度比和组元的周期数进行了优化,最终得到一个相对较优的一维光子晶体滤波器。该滤波器具有较宽的滤波频带,并且具有很好的方向选择特性,是一种高精度的一维全方向光子晶体滤波器,可广泛应用于滤波器、光开关等光通讯领域。

关键词 光子晶体;全方向滤波器;光子晶体异质结构;遗传算法

中图分类号 O431 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0163

Broad Omnidirectional High-Precision Filters Design Using Genetic Algorithm

Cui Ji Jia Wei Jiang Liyong Yuan Jun Li Xiangyin

(School of Sciences, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract A photonic heterostructure, described as $(B'A')^N(A'B')^N(B''A'')^N(A''B'')^N$, is applied to design one dimensional (1D) omnidirectional filters. Using the transmission matrix method, we have investigated the transmission property of such structure, while the genetic algorithm is as well adopted to make an optimization for different periodic number and thickness ratios in the heterostructure. Finally, we got a relatively good 1D photonic filter, which not only has relatively broad omnidirectional filter bandwidth but also presents perfect performance in direction-selection. As a high-precise omnidirectional photonic filter, it can be widely used in filters, optical switches and many other optical telecommunication areas.

Key words photonic crystal; omnidirectional filters; photonic crystal heterostructure; genetic algorithm

1 引 言

自 1987 年由 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 提出光子晶体(PC)的概念以来,由于它具有光子禁带的特性,处于禁带频率范围内的光子将无法进入光子晶体内部,并且禁止存在,将会全部反射回去。光子禁带的存在使得光子晶体具有很高的应用价值^[3~5],经过十几年的发展,光子晶体已成为一个非常让人关注的领域。光子晶体是一种介电常数呈周期性分布的结构,根据维度可以将光子晶体分为一维、二维、三维光子晶体。利用介质材料制作的光子晶体在某一频率之下全是禁带区,是理想的高通滤波器^[6~8]。常见的有一维、二维、三维的光子晶体滤波器。

近年来,随着大容量、高密度光通信技术的发展,人们希望研制出通带非常窄的窄带光滤波器;同时在光学精密测量、光波分复用、发光二极管和激光发射腔等应用技术中通常都希望在一个比较宽的禁带区内出现一个或几个狭窄的透过带。因此,禁带区内的窄带滤波特性是一个人们很感兴趣的课题,发展超窄带滤波技术和多通道滤波技术对国民经济和科学研究都具有重要意义。最新的研究结果发现一维光子晶体异质结构具有很宽的全方向禁带^[9],可应用于宽禁带超窄带滤波器的设计^[10]。本文将采用当前非常流行的全局优化算法——遗传算法^[11]来优化设计一种由两种材料组成的光子晶体异质结构,拟最终得到一个具有方向选择特性的宽禁带超

作者简介: 崔 骥 (1972—),副教授,主要从事半导体光电测试技术,纳米材料光学特性方面的研究。

E-mail: cuiyangji2001@yahoo.com.cn

窄带一维光子晶体滤波器。

2 理论分析

2.1 一维光子晶体异质结构的传输特性

如图 1 所示,本文所研究的一维光子晶体滤波器由高折射率材料 A 和低折射率材料 B 交替生长的两个较小的光子晶体异质结构组合而成。左侧为一个厚度较薄的光子晶体异质结构,右侧为一个厚度较厚的光子晶体异质结构,厚度条件要求两侧光子晶体的组元厚度关于中心波长的四分之一波片的厚度对称。用 $D_L = (B'A')^N(A'B')^N$ 表示靠近入射波的光子晶体异质结构, $D_R = (B''A'')^N(A''B'')^N$ 表示靠近出射波的光子晶体异质结构。故整个光子晶体滤波器结构可表示为

$$(B'A')^N(A'B')^N(B''A'')^N(A''B'')^N,$$

其中 N 为光子晶体单元的周期数;材料的折射率为 $n_{A'} = n_{A''} = 4.6(\text{Te}), n_{B'} = n_{B''} = 1.6(\text{TiO}_2)$; 组元的光学厚度为

$$d_{A'(B')} = f\lambda_0/(4n_{A'(B')}), d_{A''(B'')} = g\lambda_0/(4n_{A''(B'')}),$$

其中 λ_0 为中心波长, f 和 g 分别表示不同的组元厚度比,该光子晶体滤波器的两侧为空气。此外,为了得到适用于一般情况的设计结果,假设所采用的介质材料是线性的、各向同性的和无吸收的。

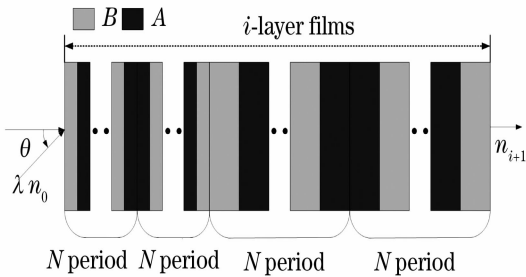


图 1 光子晶体异质结的结构示意图

Fig. 1 Schematic of the photonic heterostructure

采用传输矩阵法来分析该光子晶体异质结构的传输特性。考虑到该结构为 i 层薄膜生长的叠加,其中 A 组元的折射率为 n_A ,如果电磁波在该层入射时入射角为 θ_A ,那么 A 组元的传输矩阵可以表示为 M_A

$$M_A = \begin{bmatrix} \cos\beta_A & \frac{j\sin\beta_A}{\eta_{A(\text{TE,TM})}} \\ j\eta_{A(\text{TE,TM})}\sin\beta_A & \cos\beta_A \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 A 组元的位相角 $\beta_A = 2\pi n_A d_A \cos\theta_A / \lambda$, $\eta_{A(\text{TE,TM})}$ 表示 A 组元的导纳。当入射波为 TE 偏振的时候,

$\eta_{A(\text{TE,TM})} = n_A \cos\theta_A$,入射波为 TM 偏振的时候, $\eta_{A(\text{TE,TM})} = n_A / \cos\theta_A$ 。

根据(1)式,同样可以得到 B 组元的传输矩阵 M_B 。这样整个光子晶体滤波器的传输矩阵可表示为

$$M = \prod_{k=1}^i M_k = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

由于光子晶体周围的介质为空气,故可以得到光子晶体滤波器的反射系数和透射系数分别为

$$\begin{cases} t_{\text{total}}^{\text{TE,TM}} = \frac{2\eta_0}{(m_{11} + m_{12}\eta_0)\eta_0 + (m_{21} + m_{22}\eta_0)}, \\ r_{\text{total}}^{\text{TE,TM}} = \frac{(m_{11} + m_{12}\eta_0)\eta_0 - (m_{21} + m_{22}\eta_0)}{(m_{11} + m_{12}\eta_0)\eta_0 + (m_{21} + m_{22}\eta_0)} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 η_0 表示光子晶体异质结构两侧空气的导纳。

最终该光子晶体滤波器对入射波的透射率和反射率可表示为

$$T_{\text{total}}^{\text{TE,TM}} = t \cdot t^*, \quad (4)$$

$$R_{\text{total}}^{\text{TE,TM}} = r \cdot r^*. \quad (5)$$

2.2 优化光子晶体全方向滤波窗口的目标函数

所采用的光子晶体滤波器结构是将两个厚度不同的光子晶体异质结构组合在一起而形成的大的光子晶体异质结构,并且要求左侧的光子晶体异质结与右侧的光子晶体异质结的组元厚度比要对称,即 $1-f = g-1$ 。考虑电磁波垂直入射情况,当入射波的波长为中心波长 λ_0 时,位相角 $\beta'_A + \beta''_A = \pi$,将其代入(4)式中,可以得出在中心波长或者中心波长二分之一处,电磁波的透射率为 100%。同时发现如果两侧的光子晶体异质结满足 $1-f = g-1$ 条件,并且它们的周期相等,那么该处透射率与其他因素无关。因此,欲使滤波禁带范围变得更宽,仅仅需要优化一个全方向滤波带宽即可,不需要考虑滤波窗口的透射率大小。需要考虑的因素为两个光子晶体异质结构光学厚度比 (f, g) 和光子晶体异质结构的周期。一个高质量的滤波器,可以在较宽的频率范围内对以任意角度入射和偏振态入射的电磁波都具有很好的滤波效果。因此,目标函数可以写为

$$F_{\text{odfw}} = \frac{[\sum_{i=1}^P V(\omega_i)]}{P}, \quad (6)$$

其中

$$V(\omega_i) = \begin{cases} 1, & R_{\text{total}}^{\text{TE,TM}}(\omega_i, \theta_j) \geq R_P \\ 0, & R_{\text{total}}^{\text{TE,TM}}(\omega_i, \theta_j) < R_P \end{cases} \quad (\text{对任意 } \theta_j \text{ 和偏振态}), \quad (7)$$

这里,我们定义入射频率范围为 $0-2\omega_0$, 频率等分数

P 为 1001, 即 $\omega_i = 0, 0.002\omega_0, \dots, 2\omega_0$, 入射角 θ_j 从 0° 到 89° 以 1° 为变化步长。此外, R_p 为反射率参考值, 在实际的应用中, 一般要求 R_p 为 0.995。上述目标函数可表示为一维光子晶体滤波器的相对滤波带宽。

2.3 遗传算法

图 2 描述了遗传算法的流程图。该算法首先要生成一个包含 N_c 个染色体(也称个体)的初始种群 P_0 。每个染色体表示一种可行方案, 一般由二进制或十进制字符串进行编码。针对本文的物理模型, 每个染色体表示一种光子晶体滤波器设计方案, 采用下面的二进制字符串来表

$$K_j = K_{s_1}K_{s_2}K_{p_1}K_{p_2}, \quad (j = 1, 2, \dots, N_c), \quad (8)$$

式中

$$K_{s_i} = O_1O_2 \dots O_Y, \quad (i = 1, 2), \quad (9)$$

$$K_{p_i} = O_1O_2 \dots O_L, \quad (i = 1, 2), \quad (10)$$

(9)和(10)式中, K_{s_i} 和 K_{p_i} 分别表示第 i 个光子晶体异质结构的厚度比 (f, g) 编码和周期数编码。为了设计出结构相对简单并且较薄的光子晶体滤波器, 规定两个光子晶体异质结构组合单元的厚度比不能相差太大 ($f > 0.5, g < 1.5$), 而且周期数 N 不能超过 10。编码完毕后, 将对种群中每个个体进行解码并通过目标函数(也称适应度评价函数)进行适应度值估算。解码的目的是得到实数空间的初始解。个体适应度的大小不仅反映了其在进化过程中生存能力的大小, 同时也能评价所需优化目标的性能好坏。

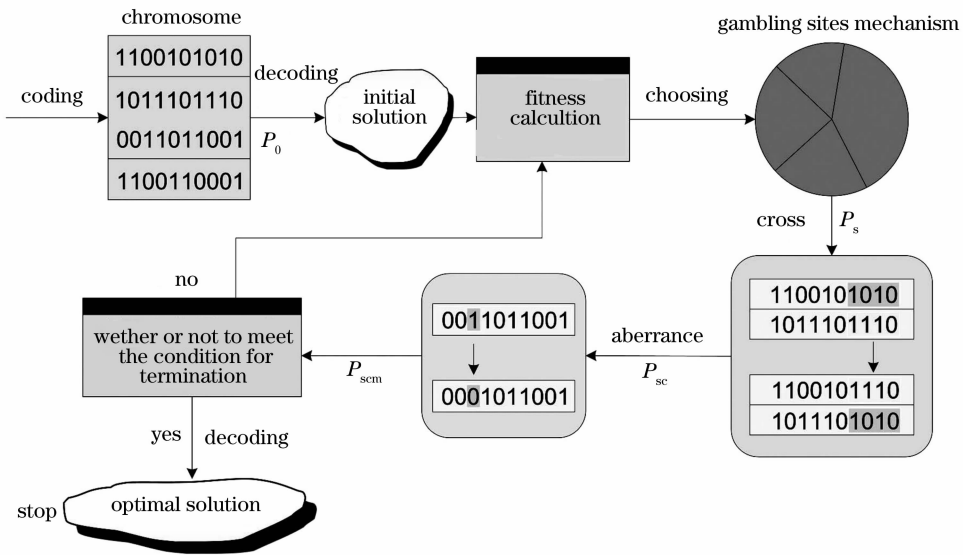


图 2 遗传算法的流程图
Fig. 2 Flowchart of the genetic algorithm

在完成初始种群的编码、解码和适应度估算后, 程序便进入了进化过程。该过程基于三种遗传操作算子, 即选择、交叉和变异算子来进行循环迭代, 从而使得种群得到不断的进化。一般来说, 程序的终止条件是循环过程达到了预先设定的最大进化代数 N_G 。以上便是遗传算法的一般流程, 需要指出的是交叉概率 p_c 和变异概率 p_m 是遗传算法中两个非常重要的控制参数。通常 p_c 在 0.6~0.9 内取值, 而 p_m 在 0.005~0.01 内取值。根据大多数遗传算法程序设计者的推荐, 在本文中我们选择交叉概率 $p_c = 0.9$, 变异概率 $p_m = 0.005$ 。此外初始种群数 P_0 设为 300, 最大进化代数 N_G 设为 50, 确保优化过

程具有足够的时间收敛。

3 结果和讨论

基于 2.3 节的讨论, 我们采用遗传算法对各光子晶体异质结构的周期和组元厚度比进行了优化, 最终得到了一个一维光子晶体滤波器的设计方案, 可表示为 $(B'A')^{10}(A'B')^{10}(B''A'')^{10}(A''B'')^{10}$, 其中 $f = 0.7936, g = 1.2064$ 。

针对 2 节设计结果, 研究了该光子晶体滤波器的全方向光子禁带特征。图 3 给出了左右光子晶体异质结单独存在以及拼接后的全方向特征频带对比效果图。图 3 中定义入射角 $-90^\circ \sim 0^\circ$ 为 TM 偏振,

入射角 $0^\circ \sim 90^\circ$ 为 TE 偏振, 黑色区域为全方向光子禁带。图 3(a) 表示的为左侧光子晶体异质结构的特征频带, 该结构的全方向光子禁带的频率范围为 $1.056 \omega_0 \sim 1.676 \omega_0$, 在光子禁带频率范围的电磁波的反射率均接近于 1; 图 3(b) 表示的为右侧光子晶体异质结构的特征频带, 禁带频率范围的电磁波反射率也接近于 1, 全方向光子禁带的频率范围为 $0.692 \omega_0 \sim 1.102 \omega_0$ 。因此, 左右光子晶体异质结

单独存在时不存在全方向滤波窗口。然而由图 3(c) 所示, 当两个光子晶体异质结构拼接后, 组合的光子晶体异质结构的禁带发生了叠加, 频率范围扩大为 $0.692 \omega_0 \sim 1.676 \omega_0$, 其结构的全方向滤波带宽达到了 $0.984 \omega_0$ 。并且更加重要的是, 发现组合结构仅在中心频率 ω_0 垂直入射位置存在一个透射率高达 100% 的滤波窗口。因此光子晶体异质结构拼接后可以有效的拓宽滤波带宽。

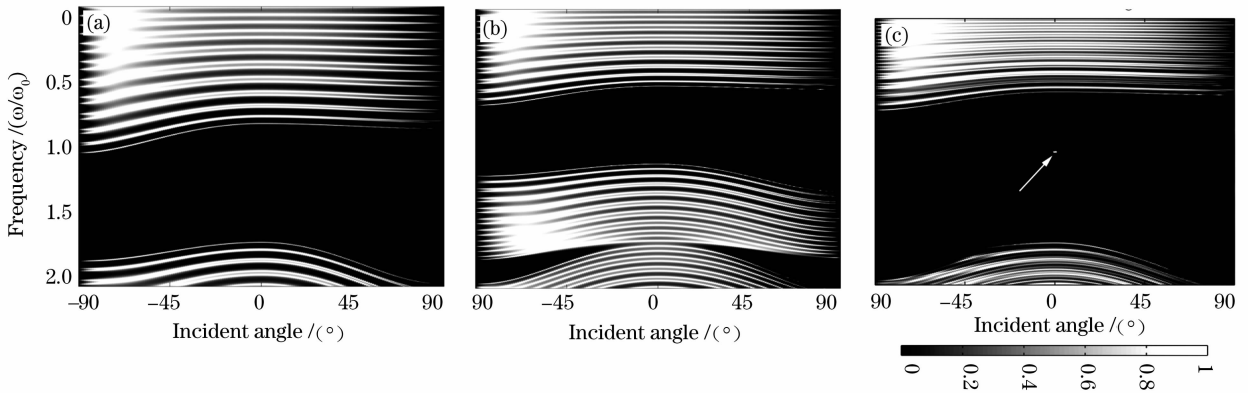


图 3 各光子晶体结构的全方向反射特征频带. (a) $(B'A')^{10} (A'B')^{10}$; (b) $(B''A'')^{10} (A''B'')^{10}$; (c) $(B'A')^{10} (A'B')^{10} (B''A'')^{10} (A''B'')^{10}$

Fig. 3 Omnidirectional reflection band for the structure of (a) $(B'A')^{10} (A'B')^{10}$; (b) $(B''A'')^{10} (A''B'')^{10}$; (c) $(B'A')^{10} (A'B')^{10} (B''A'')^{10} (A''B'')^{10}$

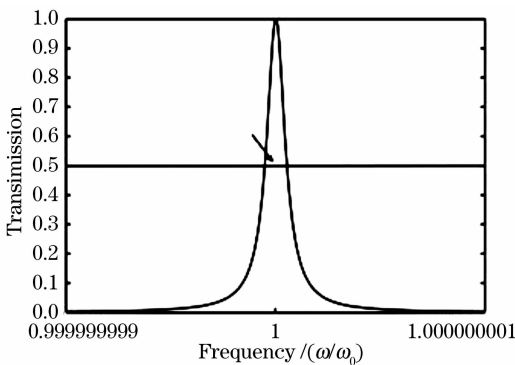


图 4 透射窗口的半高宽

Fig. 4 FWHM of transmittance windows

为了进一步分析该全方向滤波器的频率选择性, 设定入射角为垂直入射, 并且将透射窗口附近的对称频率细化分析。从图 4 中可以发现中心频率 ω_0 处的透射窗口的半高宽非常窄, 达到了 $10^{-9} \omega_0$ 的精度, 具有很高的频率选择性能。众所周知, 光子禁带和缺陷模在入射角从垂直入射向倾斜角度变化时 ($0^\circ \sim 90^\circ$ 或者 $0^\circ \sim -90^\circ$), 都存在蓝移现象。但在本文的结构中, 发现不论是 TE 偏振或者是 TM 偏振, 透射窗口都没有出现蓝移现象, 而是迅速消失。

如图 5(a)、(b)、(c) 所示, 即使电磁波以一个很小的倾斜角入射, 透射峰也会很快衰减。因此该滤波器具有很好的方向选择性。

此外, 众所周知, 光子晶体的禁带特性对周期数的变化非常敏感。为了验证该全方向滤波器的周期数是合理的, 选择光子晶体异质结构的周期数从 5 ~ 10 变化, 来观察不同周期数下 TM 偏振的电磁波中心透射峰的方向选择特性。由图 6 可以看出, 随着周期数的增加, 透射窗口处的半高宽迅速缩小, 在周期数达到 10 的时候, 其透射方向的选择精度达到了 10^{-4} 。因此本文所得到的优化设计结果在周期数上合理的, 完全可以满足高方向滤波性能要求。

最后我们给出该全方向滤波器在不同偏振态以及以任意入射角 ($-90^\circ \sim 90^\circ$) 下的三维透射频谱。从图 7 中可以清楚的看到从 $0.7 \omega_0 \sim 1.6 \omega_0$ 的频率范围内, 存在一个透过率接近 100% 的透射峰。而且和图 3(c) 一致, 该透射窗口仅仅在电磁波为中心频率并且垂直入射情况下存在。该异质结构所具有的特性明显不同于常规的光子晶体, 是一种具有方向选择特性的宽禁带超窄带一维光子晶体滤波器。

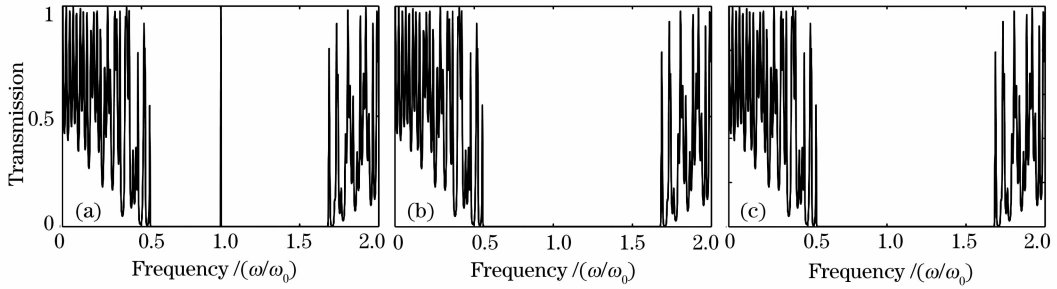


图5 一维光子晶体异质结构的各角度透射谱 (a) 0°入射,(b)入射角为1°TM 偏振光(c) 入射角为1°TE 偏振光
 Fig.5 Transmittance spectra for the 1D photonic crystals heterostructure at incident angles of (a) 0° , (b) 1° in the case of the TM polarization (c) 1° in the case of the TE polarization

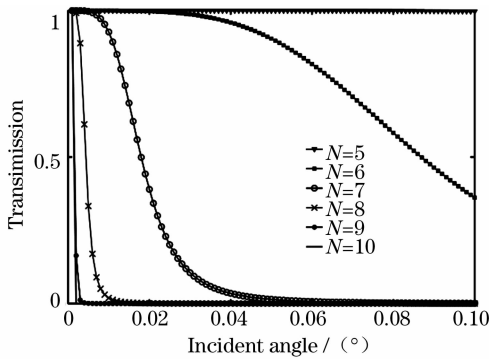


图6 对于 TM 偏振模,当周期数 N=5, 6, 7, 8, 9, 和 10 时,电磁波入射角 0° ~ 0.1°之间的透射谱

Fig.6 Transmittance spectra for period number N=5, 6, 7, 8, 9, and 10 at incident angles from 0° to 0.1°in the case of the TM polarization

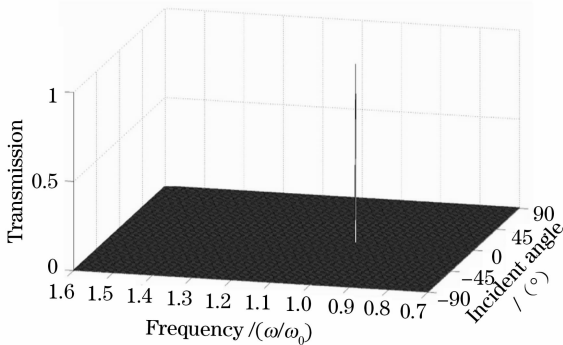


图7 任意波长和入射角的透射光谱

Fig.7 Transmittance spectra according to wavelength and incident angle

4 结 论

由于光子晶体异质结构特殊的滤波性能,故在本文中采用左、右两侧为光子晶体异质结构来组合构成一个一维光子晶体滤波器。利用传输矩阵法对该结构的透射性能进行了分析,并采用遗传算法对组成光子晶体滤波器的两个光子晶体异质结构的各组元厚度比和周期数进行了优化。最终得到一个相对较优

的设计结果 $(B'A')^{10}(A'B')^{10}(B''A'')^{10}(A''B'')^{10}$, 其中左侧的光子晶体异质结构厚度比为 0.7936,右侧的光子晶体异质结构厚度比为 1.2064。该光子晶体滤波器的全方向光子禁带频率范围为 $0.692\omega_0 \sim 1.676\omega_0$, 宽度达到了 $0.984\omega_0$, 并且发现仅仅在入射电磁波的频率为中心频率处并且要以垂直入射的情况下,才会存在透射窗口。该透射窗口频率选择性能精度达到了 $10^{-9}\omega_0$ 以上,在方向选择性能上精度达到了 10^{-4} 。该光子晶体滤波器可以应用在光开关^[12]、高精度滤波器等领域,对发展超高精度的光学信息测量和光通讯技术具有一定的意义。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20):2059~2061
- 2 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23):2486~2489
- 3 M. M. Sigalas, C. T. Chan, K. M. Ho et al.. Metallic photonic band-gap materials[J]. *Phys. Rev. B*, 1995, **52**(16): 11744~11751
- 4 C. M. Soukoulis. Ed. Photonic Band Gap Materials Dordrecht (The Netherlands) [M]. Kluwer Academic Publishers, 1996
- 5 Ouyang Zhengbiao, Li Jingzhen. Advanced in the research of photonic crystals[J]. *Laser Journal*, 2000, **21**(2):4~6
 欧阳征标, 李景镇. 光子晶体的研究进展[J]. *激光杂志*, 2000, **21**(2):4~6
- 6 Zheng Cui, Tian Huiping, Li Changhong et al.. Tunable frequency and angular photonic crystal filter[C]. *SPIE*, 2007, **6781**(17):1~5
- 7 S. Gupta, G. Tuttle, K. M. Ho et al.. Infrared filters using metallic photonic band gap structures on flexible substrates[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(17):2412~2414
- 8 Lei Xinya, Li Hua, Ding Feng et al.. Novel application of a perturbed photonic crystal: High-quality filter[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(20):2889~2891
- 9 Y. J. Xiang, X. Y. Dai, S. C. Wen. Broad Omnidirectional Total Reflectors by using the Combination of Thus-Morse Photonic Crystal [C]. *IEEE*, New York, 2006, 354~357
- 10 Liang Guanquan, Han Peng, Wang Hezhou. Narrow frequency and sharp angular defect mode in one-dimensional photonic crystals from a photonic heterostructure[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(2):192~194
- 11 D. E. Goldberg. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning[M] Addison - Wesley, MA, 1989
- 12 Y. H. Lu, M. D. Huang, S. Y. Park et al.. Switching effect of defect modes in one-dimensional heterostructure photonic crystals [J]. *Journal of the Korean Physical Society*. 2007, **51**(4):1550~1554