

粒子群算法优化异质结构光子晶体 环形腔滤波特性*

陈颖^{1)2)†} 王文跃¹⁾ 于娜³⁾

1)(燕山大学电气工程学院自动化仪表系, 秦皇岛 066004)

2)(燕山大学测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 秦皇岛 066004)

3)(燕山大学信息科学与工程学院, 秦皇岛 066004)

(2013年7月23日收到; 2013年9月9日收到修改稿)

为了提高异质结构光子晶体环形腔滤波器的滤波特性, 采用粒子群(PSO)算法对其结构参数进行全局优化. 以正方晶格光子晶体环形滤波器结构为优化对象, 根据粒子群算法的位置——速度更新公式, 对光子晶体缺陷处散射柱、耦合介质柱和内部介质柱的半径进行全局优化. 通过理论分析和数值模拟结果可以看出, 滤波结构参数优化后, 可实现单模窄带滤波. 与此同时, 归一化透射率由53%提高到97%, 证明了该优化算法的有效性, 从而为该滤波结构在光电器件中的应用奠定了基础.

关键词: 环形腔, 粒子群算法, 滤波器, 透射率

PACS: 42.70.Qs, 42.79.Sz, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.63.034205

1 引言

Yablonovitch 和 John 于 1987 年分别独立地提出了光子晶体的完整概念^[1,2], 迄今为止该领域已经取得了前所未有的发展. 光子晶体最根本的特性是光子禁带, 禁带中相应频率的电磁波是被禁止传播的^[3]. 在光子晶体结构中引入缺陷, 可以在光子晶体的完全禁带中打开允带, 将改变光子晶体的传输特性^[4,5]. 基于光子晶体的光学器件具有体积小, 结构紧凑, 易于集成, 抗干扰能力强等优点, 已得到了广泛的关注, 并存在着巨大的应用前景^[6].

随着光通信及光传感网络技术的不断发展, 光滤波器已经成为体现网络功能性和灵活性的关键器件之一. 对于光滤波器的设计已有不少研究报告, 例如基于多层介质薄膜、基于光纤 Bragg 光栅、基于阵列波导光栅或基于相位调制原理的干涉仪

结构, 均可实现对特定波长的选频和滤波. 文献^[7]提出了一种结构紧凑的、频率可调的光开关设计方法, 然而基于简单光子晶体缺陷腔建立的理论模型, 虽然易于制备, 但在实际应用中却存在较大的局限性. 文献^[8]提出了一种新型光子晶体太赫兹 (THz) 滤波器, 利用线缺陷和微腔实现频率选择, 通过改变点缺陷某些介质柱的半径来实现单信道单频率滤波. 文献^[9]和文献^[10]采用二维光子晶体环形腔实现了滤波器和分束器的设计, 其传输透射率相对较大, 但是滤波和分束的带宽较宽, 无法实现窄带滤波. 可见, 目前光子晶体滤波器的设计一般采用几种典型的耦合滤波结构, 通过引入不同类型缺陷, 并且经验性地调整缺陷处介质柱的几何参数来实现可调谐滤波, 通常这种情况下会存在波长调节不灵活和透射率较低等问题.

遗传算法 (genetic algorithm, GA) 和粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 作为行之有

* 国家自然科学基金 (批准号: 61201112, 61172044)、河北省自然科学基金 (批准号: F2013203250, F2012203169) 和中国博士后科学基金 (批准号: 2012M510765) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: chenying@ysu.edu.cn

效的优化设计方法, 已经应用到现代光学应用技术的研究中. 文献 [11] 采用粗粒度像素表示原胞结构, 将遗传算法应用于三角晶格光子晶体的禁带设计中, 得到了较好的禁带宽度, 但用粗粒度像素表示原胞的方法在光子晶体结构类型的选择上存在一定的局限. Jia 等 [12] 采用遗传算法设计了一维光子晶体滤波, 实现了宽频滤波. 基于以上分析, 可以发现, 目前对光子晶体器件传输特性优化的研究是十分必要的. 文献 [13] 和文献 [14] 对粒子群优化算法和遗传算法进行了对比, 结果表明粒子群优化算法在最优解的搜索效率上优于遗传算法, 且精度高、收敛快. 同时在计算过程中, 粒子群算法没有“交叉”(crossover) 和“变异”(mutation) 操作, 简单易实现. 因此本文应用粒子群算法对一种结构紧凑的正方晶格光子晶体环形滤波器结构进行优化设计, 寻找全局最优的光子晶体缺陷处散射柱、耦合介质柱和内部介质柱的半径, 并结合二维时域有限差分法 (finite difference time domain method, FDTD) 实现了最大归一化传输透射率的单模窄带滤波. 该方法也可在其他光器件的结构设计中进行推广.

2 理论模型与计算方法

2.1 理论模型

本文所研究的光子晶体环形腔滤波器结构如图 1 所示. 采用单晶硅作为光子晶体的高折射率介质柱, 折射率 $n = 3.4$, 介质柱半径 $r = 0.2a$, 以空气为背景, 折射率为 1, 其中 a 为晶格常数. 考虑到实际可操作性, 采用 19×17 的介质柱分布模型进行数值计算. 以高斯脉冲信号光由 A 端口输入, 经过环形腔的耦合作用, 特定频带的光信号被选择而实现滤波并由 B 端口输出.

当光子晶体的周期性分布受到破坏时, 就会形成缺陷. 引入缺陷的方法很多, 点缺陷可形成谐振腔, 线缺陷可构成波导. 根据耦合模理论, 当与谐振腔耦合的两个波导不对称时, 其传输透射率将变小, 因此涉及此类结构时, 为了提高滤波的透射率, 应该尽量使波导相对于谐振腔是对称的 [15]. 因此, 本文中的环形腔滤波结构是由输入和输出波导相对于环形腔对称情况下共同构成的. 由图 1 可知, 在环形腔的四个拐角处分别设置一个散射柱, 每个散射柱位于邻近四个介质柱的中心. Kumar 等 [16]

为了减少光散射损耗、提高光的传输效率而首次提出的散射柱概念. 位于环形腔和输入/输出波导之间的是耦合介质柱, 以及环形腔内部的介质柱, 都会对波导和腔之间的模式耦合产生影响. 本文将对散射柱、耦合介质柱和内部介质柱的半径进行优化, 从而获得最大透射率的单模窄带滤波, 并且分别定义三个参量为 $r_{\text{scatterer}}$, r_{coupling} 和 r_{inside} .

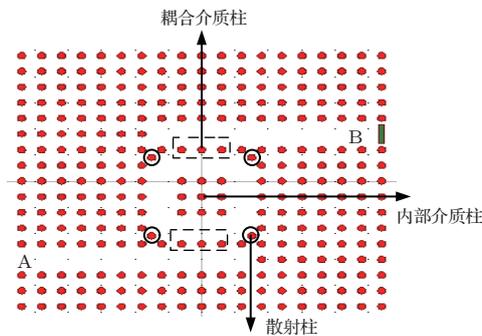


图 1 光子晶体环形腔滤波器结构示意图

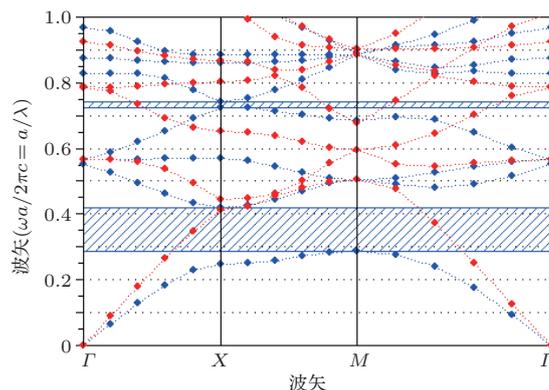


图 2 光子晶体正方晶格 TE 模式和 TM 模式的光子禁带分布

平面波展开法 (plane wave expansion method, PWE) 是光子晶体能带研究中使用较为广泛的一种方法. 其计算的原理主要是将电磁场在倒格矢空间以平面波叠加的形式展开, 从而将麦克斯韦方程化成一个特征方程:

$$\begin{aligned} \text{TE} \\ \sum_{G'} |\mathbf{k} + \mathbf{G}'| |\mathbf{k} + \mathbf{G}'| \varepsilon^{-1} \\ \times (\mathbf{G} - \mathbf{G}') e(G) = \frac{\omega^2}{c^2} e(G); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{TM} \\ \sum_{G'} |\mathbf{k} + \mathbf{G}'| |\mathbf{k} + \mathbf{G}'| \varepsilon^{-1}$$

$$\times (\mathbf{G} - \mathbf{G}') h(G) = \frac{\omega^2}{c^2} h(G). \quad (2)$$

通过求解方程(1)和(2)的特征值,即可求得第一布里渊区波矢 k 对应的特征角频率 ω ,即 $k-\omega$ 关系,进而得到光子晶体的归一化能带结构^[17].图2为该正方晶格排列下的光子晶体结构TE模式和TM模式的光子禁带分布图.其纵坐标表示为标量的归一化频率 $\omega a/2\pi c$ (无量纲频率),即 a/λ .横坐标 $\Gamma-K-M-\Gamma$ 表示的是第一布里渊区布洛赫波矢.该结构TE模式较窄带隙归一化频率 a/λ (λ 为输入中心波长)为0.72516—0.74268,较宽带隙归一化频率 a/λ 为0.28726—0.42038, TM模式惟一的带隙归一化频率 a/λ 为0.82166—0.83312.通常选择较宽的禁带频率来进行研究,因此本文主要分析TE极化波.

2.2 计算方法

PSO算法是一种基于迭代的优化算法.系统初始化为一组随机解,通过迭代搜寻最优值,通过适应度来评价解的品质.因此本文采用PSO算法优化光子晶体滤波结构,在禁带范围内(即归一化频率 a/λ 为0.28726—0.42038之间)提高该结构的传输效率.首先仅以散射柱作为变量进行全局优化,其次是散射柱和耦合介质柱,最后是散射柱、耦合介质柱和内部介质柱同时进行优化.

下面仅以散射柱单独作为变量进行优化为例来说明算法流程:

1) 首先对在结构中的四个散射柱粒子的位置进行初始化.每个粒子的初始化随机值取为 $0 \leq r_{\text{scatterer}} \leq (\sqrt{2}a/2 - r)$. $\sqrt{2}a/2 - r$ 是散射柱中心点到邻近介质柱边沿的距离.

2) 目标函数定义为

$$F = \max\{T_{\text{norm}}(\omega)\} \\ = \max\left\{\left|\frac{p_{\text{out}}[\omega]}{p_{\text{in}}(\omega)}\right|\%\right\}, \quad (3)$$

其中 $T_{\text{norm}}(\omega)$ 是输出频率为 ω 对应的归一化透射率, $p_{\text{out}}(\omega)$ 和 $p_{\text{in}}(\omega)$ 分别通过FDTD计算出.

3) 计算粒子适应度值.采用FDTD对该结构进行数值模拟,得到光波在该滤波结构中的传输光谱,从而得到各变量下的归一化透射率 $T_{\text{norm}}(\omega)$.

4) 粒子个体极值 P_{best} 和群体极值 Z_{best} 的更新.粒子在进化过程中依据其适应度值调节 P_{best}

和 Z_{best} ,且依据:对于个体最优解,如果 $F > P_{\text{best}_i}$,则 $P_{\text{best}_i} = F$.并且此时有:如果 $r_{\text{scatterer}} < 0$,则 $r_{\text{scatterer}} = 0$; $r_{\text{scatterer}} > (\sqrt{2}a/2) - r$,则 $r_{\text{scatterer}} = (\sqrt{2}a/2) - r$; 否则 $r_{\text{scatterer}}(P_{\text{best}_i}) = r'_{\text{scatterer}}$.对于全局最优解,如果 $F > Z_{\text{best}}$,则 $Z_{\text{best}} = F$,且同理 $r_{\text{scatterer}}(Z_{\text{best}}) = r'_{\text{scatterer}}$.

5) 每一次迭代中每一个粒子更新位置(本文中参数为半径)依据:

$$r''_{\text{scatterer}} \\ = r_{\text{scatterer}} + \Delta r_{\text{scatterer}} \\ = r_{\text{scatterer}} + \Delta r_{\text{scatterer}} \\ + C_1 r_1 [r_{\text{scatterer}}(P_{\text{best}}) - r_{\text{scatterer}}] \\ + C_2 r_2 [r_{\text{scatterer}}(Z_{\text{best}}) - r_{\text{scatterer}}], \quad (4)$$

其中, $\Delta r_{\text{scatterer}}$ 是粒子的变化量, $r_{\text{scatterer}}$ 是当前粒子的位置, $r_{\text{scatterer}}(P_{\text{best}})$ 和 $r_{\text{scatterer}}(Z_{\text{best}})$ 分别是迭代到当前个体最优和全局最优的位置, C_1 和 C_2 是学习因子, r_1 和 r_2 是在 $[0, 1]$ 之间的随机常数.

6) 种群根据适应值进行复制.如果终止条件满足的话,就停止,否则返回步骤3).

从以上步骤可知,在算法的优化过程中,是通过寻找最优变量 $r_{\text{scatterer}}$ 来获得最大归一化透射率.对变量 r_{coupling} 和 r_{inside} 也是同样的优化过程,这里不再赘述.

3 结果与分析

FDTD法是目前常用的求解电磁波在介质中传播的数值计算方法,本文将利用其分析光经过缺陷态光子晶体结构的传输特性.并用完全匹配边界层(perfect matched layer, PML)作为吸收边界条件.在 x 和 y 轴上的空间步长分别是 Δx 和 Δy ,时间步长为 Δt .为使解收敛且稳定,时间步长 Δt 满足Courant稳定性条件 $\Delta t \leq 1/c\sqrt{1/(\Delta x)^2 + 1/(\Delta y)^2}$,其中 c 为真空中的光速,计算时取单个原胞,进行 32×32 个网格分割离散.以高斯脉冲波作为输入信号.图3即为该滤波结构中散射柱、耦合介质柱和内部介质柱半径优化前的归一化透射率.可以看出,B端口输出共振单模窄带中心波长 $1.4505 \mu\text{m}$,透射率为53%.

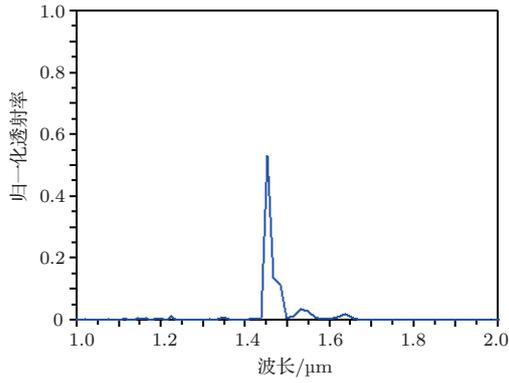


图3 优化前的光子晶体环形腔滤波器B端口的窄带滤波归一化透射谱

3.1 散射柱半径的优化

根据上述粒子群算法流程对环形腔拐角处四个散射柱进行优化, 迭代次数为30. 结果显示当 $r_{\text{scatterer}} = 0.95r$ 时, 最大自适应度值为66%. 为了验证优化得到的参数的有效性, 将散射柱半径 $r_{\text{scatterer}} = 0.95r$ 代入到光子晶体滤波结构中经过FDTD数值模拟后, B端口输出光谱结果如图4所示, 可以看见, 共振单模窄带波长依然为1.4505 μm , 但通过优化散射柱半径, 归一化透射率从53%提高到了66%, 透射率增加13%.

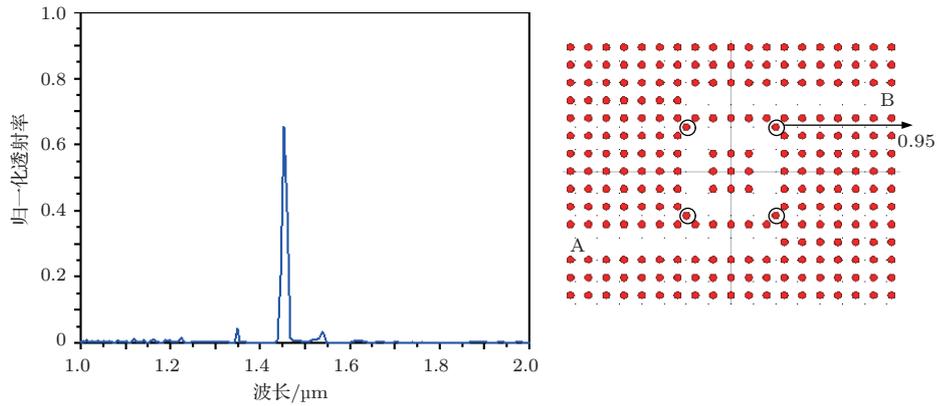


图4 优化散射柱半径后光子晶体环形腔滤波器B端口的单模窄带滤波归一化透射谱

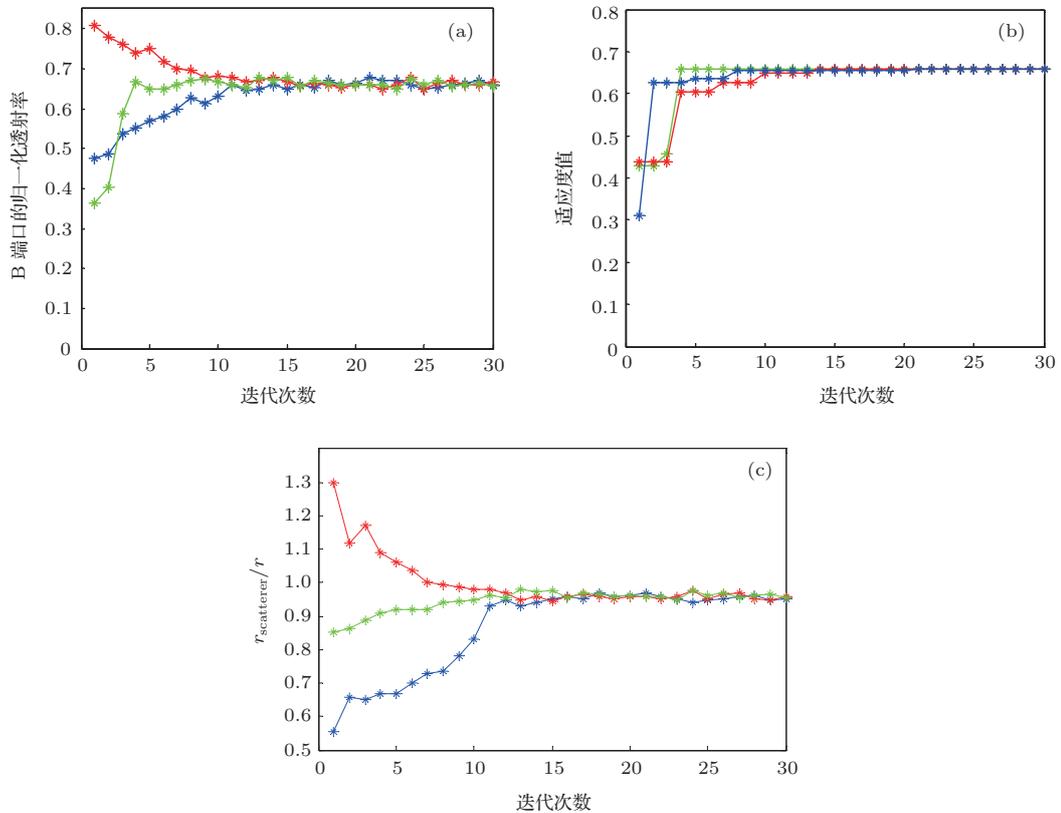


图5 优化结果 (a) B端口输出的的谐振窄带滤波归一化透射率; (b) 粒子(散射柱)的适应度值; (c) 粒子(散射柱)位置的迭代过程

其中优化过程收敛结果如图5所示. 图5(a)表示整个迭代优化算法过程中B端口输出的谐振窄带滤波归一化透射率. 图5(b)表示粒子(散射柱)的适应度值. 从图5(a)和(b)能看出, 每个粒子最终收敛的自适应值与B端口输出的谐振窄带滤波的最大归一化透射率趋势基本一致, 最后收敛的最优解相等. 图5(c)是粒子(散射柱)位置的优化过程, 其初始位置是随机的, 适应度值取到最大66%时有 $r_{\text{scatterer}} = 0.95r$. 同时因为光子晶体本身结构紧凑, 体积小, 晶格常数和介质柱半径只有几百纳米, 所以每个粒子位置的优化空间较小, 可以从图5中看出, 当迭代到21次时就已经达到收敛, 所以总共迭代30次足以满足优化需要.

3.2 散射柱和耦合介质柱半径的优化

与3.1中对散射柱半径的优化过程相同, 不同的是每个粒子的位置由两个变量组成变成了二维. 第一个变量是散射柱的半径 $r_{\text{scatterer}}$, 第二个变量是耦合介质柱的半径 r_{coupling} , 并且初

始随机值分别取 $0 \leq r_{\text{scatterer}} \leq (\sqrt{2}a/2 - r)$ 和 $0 \leq r_{\text{coupling}} \leq a/2$. 经过30次迭代之后, 当 $r_{\text{scatterer}} = 1.05r$, $r_{\text{coupling}} = 0.80r$ 时, 最大自适应度值为84%. 其在共振单模窄带波长为1.4505 μm 的B端口输出的归一化透射率如图6所示, 透射率增加了31%.

3.3 散射柱、耦合介质柱和内部介质柱半径的优化

同样, 每个粒子的位置有三个变量组成, 第一个变量是散射柱的半径 $r_{\text{scatterer}}$, 其初始随机值分别取在 $0 \leq r_{\text{scatterer}} \leq (\sqrt{2}a/2 - r)$ 之间; 第二个变量是耦合介质柱的半径 r_{coupling} , 第三个变量是内部介质柱 r_{inside} , 初始随机值取 $0 \leq r_{\text{coupling}}, r_{\text{inside}} \leq a/2$. 同样30次迭代之后, 当 $r_{\text{scatterer}} = 1.1r$, $r_{\text{coupling}} = 0.85r$, $r_{\text{inside}} = 0.8r$ 时, 最大自适应度值为97%. 其在共振单模窄带中心波长为1.4505 μm 的B端口输出的归一化透射率如图7所示, 透射率增加了44%.

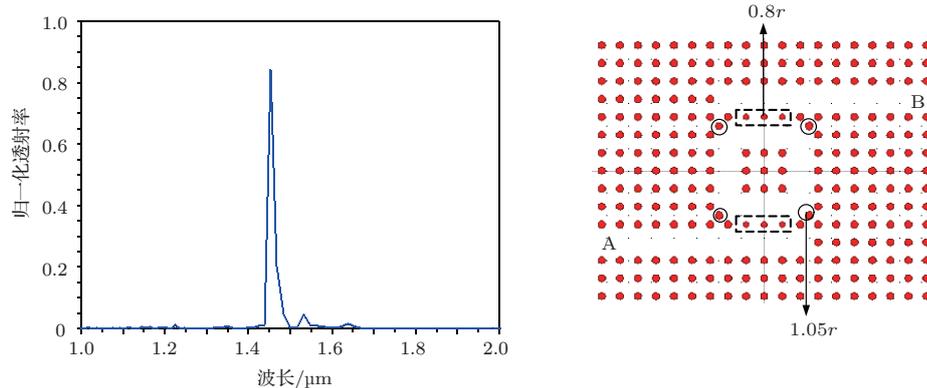


图6 优化散射柱和耦合介质柱半径后光子晶体环形腔滤波器B端口的单模窄带滤波归一化透射谱

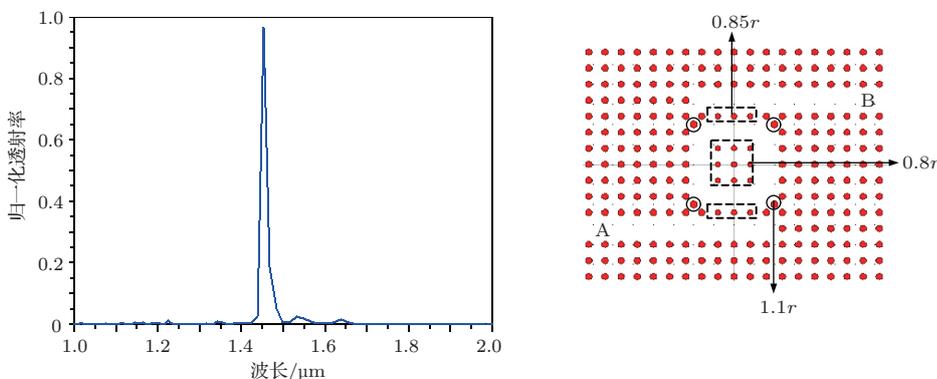


图7 同时优化散射柱、耦合介质柱和内部介质柱半径后光子晶体环形腔滤波器B端口的单模窄带滤波归一化透射谱

4 结 论

提出了一种光子晶体环形腔的滤波器设计方法, 其结构简单、紧凑. 通过理论分析和数值模拟结果可以看出, 经过PSO算法对环形腔缺陷处的散射柱、耦合介质柱和内部介质柱的半径进行全局优化之后, 提高了解的精度, 使输出 $1.4505 \mu\text{m}$ 的共振单模窄带滤波效果更好. 同时当 $r_{\text{scatterer}} = 1.1r$, $r_{\text{coupling}} = 0.85r$, $r_{\text{inside}} = 0.8r$ 时, 该滤波结构的归一化透射率达到了97%, 比优化前提高了44%. 该优化设计方法可为实际应用中滤波器的设计提供有效的理论参考和指导.

参考文献

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Scalora M, Dowling J P, Tocci M, Bloemer M J, Bowden C M, Haus J W 1995 *Appl. Phys. B* **60** 57
- [4] Xu Z L, Wu F G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6285 (in Chinese)[许振龙, 吴福根 2009 物理学报 **58** 6285]
- [5] Liu H, Liu D, Zhao H, Gao Y H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 194208 (in Chinese)[刘会, 刘丹, 赵恒, 高义华 2013 物理学报 **62** 194208]
- [6] Park I, Lee H S, Kim H J, Moom K M, Lee S G, O B H, Park S G, Lee E H 2004 *Opt. Express* **12** 3599
- [7] Wu F F, Shen Y F, Wang Y C, Han K, Zhou J, Zhang Y, Chen Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 017801 (in Chinese)[吴芳芳, 沈义峰, 王永春, 韩奎, 周杰, 张园, 陈琼 2011 物理学报 **60** 017801]
- [8] Chen H M, Meng Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014202 (in Chinese)[陈鹤鸣, 孟晴 2011 物理学报 **60** 014202]
- [9] Yang C Y, Xu X M, Ye T, Miu L P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 017807 (in Chinese)[杨春云, 徐旭明, 叶涛, 缪路平 2011 物理学报 **60** 017807]
- [10] Ghaffari A, Monifi F, Djavid M, Abrishamian M S 2008 *Optics Communications* **281** 5929
- [11] Gong C J, Hu X W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 927 (in Chinese)[龚春娟, 胡雄伟 2007 物理学报 **56** 927]
- [12] Jia W, Jiang L Y, Zheng G G, Li X Y, Li H P 2010 *Optics & Laser Technology* **42** 382
- [13] Shen Y, Guo B, Gu T X 2005 *Journal of UEST of China* **34** 696 (in Chinese) [沈艳, 郭兵, 古天祥 2005 电子科技大学大学学报 **34** 696]
- [14] Dong Y S, Zhang A N 2009 *Informationization* **13** 4 (in Chinese) [董延胜, 张安年 2009 信息化纵横 **13** 4]
- [15] Wang X L 2009 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing University of Post & Telecommunication) (in Chinese) [王晓玲 2009 博士学位论文 (北京: 北京邮电大学)]
- [16] Kumar V D, Srinivas T, Selvarajan A 2004 *Photonics and Nanostructures* **2** 199
- [17] Shang P G, Sacharia Albin 2003 *Optics Express* **11** 167

Improvement of the filtering performance of a heterostructure photonic crystal ring resonator using PSO algorithm*

Chen Ying^{1)2)†} Wang Wen-Yue¹⁾ Yu Na³⁾

1) (Department of Automation Equipment, College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

2) (Hebei Province Key Laboratory of Test/Measurement Technology and Instrument, Qinhuangdao 066004, China)

3) (Institute of information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(Received 23 July 2013; revised manuscript received 9 September 2013)

Abstract

To improve the filtering performance of a heterostructure photonic crystal ring resonator filter, the filtering structural parameters were optimized globally by using particle swarm optimization (PSO) algorithm. By taking the square lattice photonic crystal ring resonator filter structure as the optimized object, according to the position-velocity updating formula of the PSO method, the radius of scattering rods, coupling rods, and internal rods at the photonic crystal defect were optimized globally. From the theoretical analysis and numerical simulation results, it can be seen that after the filter structural parameters were optimized, single narrowband filtering can be achieved. At the same time, its normalized transmission rate is increased from 53% to 97%, indicating the effectiveness of the optimization algorithm, which provides a basis for the application in photoelectric device.

Keywords: ring resonator, PSO method, filtering, transmission

PACS: 42.70.Qs, 42.79.Sz, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.63.034205

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61201112, 61172044), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant Nos. F2013203250, F2012203169), and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2012M510765).

† Corresponding author. E-mail: chenying@ysu.edu.cn