

一种新型可调制的光子晶体环形腔滤波器*

杨春云 徐旭明[†] 叶涛 缪路平

(南昌大学物理系, 南昌 330031)

(2009年12月30日收到; 2010年3月23日收到修改稿)

在光子晶体环形腔中增加两个散射介质柱, 构成一个新型的环形腔滤波器, 该滤波器能有效选择光波透过, 光波的透射率可以达到90%以上, 带宽较小. 可通过这两种不同的调节方式使滤波器中波长的带宽和数值进行任意的改变: 1) 减小散射介质柱半径, 从负载波导输出波长的带宽变大, 主波导中波长的带宽减小; 增大其半径时, 它们的变化正好相反. 2) 改变耦合区域介质柱半径的大小, 滤波器中波长的数值也会相应地变化, 它与介质柱半径的变化呈正比, 并且透射率也会发生明显的变化. 这就为其在制备集成光子器件的应用中奠定了基础.

关键词: 环形腔, 滤波器, 散射介质柱, 透射率

PACS: 78.67.-n, 75.75.-c, 81.05.Xj

1. 引言

光子晶体^[1]的概念是由 Yablonovitch 和 John 在 1987 年各自独立地提出来的. 与半导体电子禁带相似, 介电常数在空间上的周期性也将会对光子产生类似的作用, 因而形成光子带隙结构, 即光子禁带^[2-4]. 光子禁带是指一定的频率范围, 该范围内的电磁波不能在结构中任何方向上传播. 光子晶体的出现给了人们可控制光的希望. 基于光子晶体的光电器件已经得到了广泛的研究, 这种器件对比于传统结构的光电器件, 具有体积小, 易于集成, 系统不受外界电磁场干扰等优点^[5-9], 为光电子器件向高集成化的发展带来了崭新的应用前景.

波分复用系统是全光光纤网络通信的常用技术, 而滤波器是处理某个特定信道或者多个信道光信号的关键器件. 然而经典滤波器的尺寸变化范围从几个毫米到几个厘米, 要实现密集的, 集成的波分复用系统就有点勉为其难了. 光子晶体的出现, 为这种极密集、高 Q 的光子器件的实现提供了一种新的解决途径. 发展至今, 已经实现种类繁多, 门类齐全的各种光子晶体滤波器^[10-14], 有光子晶体波导滤波器, 光子晶体带通滤波器、光子晶体带阻滤波器、光子晶体 Add/Drop 滤波器等.

在以往的光子晶体滤波器中, 波长调节性较弱, 透射率较低. 本文给出了一种光子晶体环形腔滤波器, 在环形腔中增加两个散射介质柱, 环形腔和波导之间相隔一排介质柱, 形成一种新的滤波器. 与正方形光子晶体环形腔滤波器相比, 它的调节结构简单, 易于控制光波波长和带宽的大小. 虽然环形腔和波导之间相隔两排介质柱可以提高 Q 值的大小, 但是它的透射效率较低; 而相隔一排介质柱的透射率可以达到 90% 以上, 但 Q 值有所降低. 在新的滤波器中, 通过改变两个散射介质柱和耦合区域介质柱半径的大小, 可以任意调节波长的带宽大小, 这将使滤波器在波分复用系统中有了更广阔的应用.

2. 光子晶体环形腔理论分析

在基质为空气, 晶格常数 $a = 0.62$ 的完整二维三角晶格光子晶体中, 介质柱材料为 Si, 折射率为 3.59, 介质柱半径为 $r = 0.16a$. 该结构对于横电模 (电场平行于介质柱), 在归一化频率 a/λ 从 0.288 到 0.505 之间存在一光子禁带, λ 为真空中的波长. 在完整的光子晶体中, 去掉一排介质柱形成光子晶体单模波导^[15]. 选取合适的超原胞, 采用平面波展开法, 计算出此光子晶体单模波导的色散关系曲线, 阴影部分为导带, 中间为光子禁带. 如图 1 所示,

* 江西省自然科学基金 (批准号: 2008GZW0007) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: ncxmxen@ncu.edu.cn

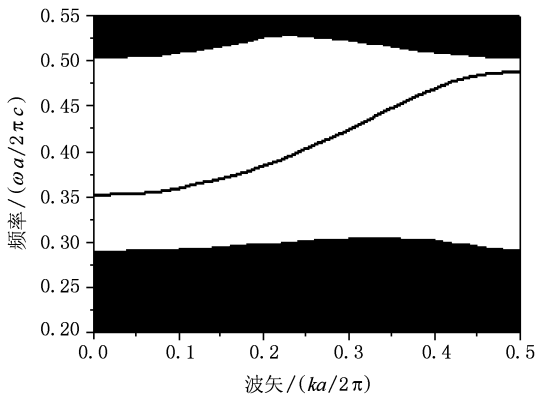


图1 光子晶体单模波导色散曲线

由归一化频率 0.352 延伸到 0.488 只存在一种传播模式.

在完整二维三角光子晶体中,去掉内部环形的介质柱,构成一个呈六边形的光子晶体环形腔^[16-18],内部有七个中心介质柱.图2(a)是光子晶体环形腔模型;在图2(a)中的环形腔中上下对称地增加两个介质柱,这两个介质柱可以作为散射介质柱,使进入环形腔的光波能够更有效的传播.图2(b)是经过增加散射介质柱后的环形腔模型,两个散射介质柱与邻近的两个介质柱构成一个新的散射面,减小了光波在环形腔中的损耗.

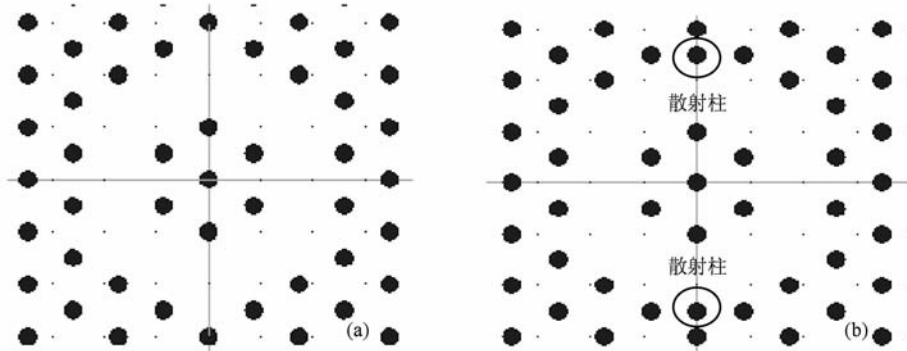


图2 光子晶体环形腔与增加散射柱后环形腔的结构图

3. 光子晶体滤波器的设计

图3是一种新的光子晶体环形腔滤波器,主波导和负载波导通过一个环形腔连接,该环形腔是增加散射介质柱后的结构.各波导的端口分别被标记,Input作为光波的输入端,而A作为主波导的输出端,B作为负载波导的输出端.以二维光子晶体时域有限差分法作为研究方法,并且以完全匹配层作为吸收条件^[19],进行模拟计算.

以高斯波作为入射波,在主波导中与环形腔发生耦合作用,通过调节环形腔的结构能够使某一特定光波进入负载波导,起到选择光波的作用.图4(a)为当光子晶体滤波器没有增加散射柱时,入射光波的透射谱图,从图中可以看出,出口端A的透射波长范围比较窄,且透射率不高.出口端B的透射波长 $\lambda = 1.58 \mu\text{m}$,且透射率也比较高,但是它的带宽较大,不利于滤波器的制备.图4(b)为光子晶体滤波器增加散柱后的透

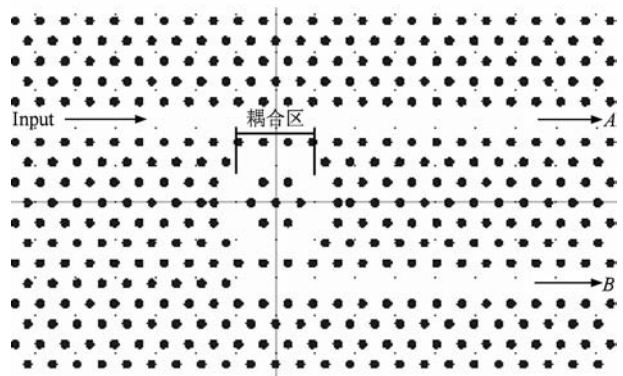


图3 光子晶体滤波器模型

射谱图,此时出口端A的透射率比没有增加散射柱时高,它的透射率达到90%以上,出口端B的波长没有改变,且带宽比较窄,A,B两出口端的波长间隔比较小,适合制备滤波器.图5为光波通过光子晶体滤波器两个出口端的电场模拟分布图.

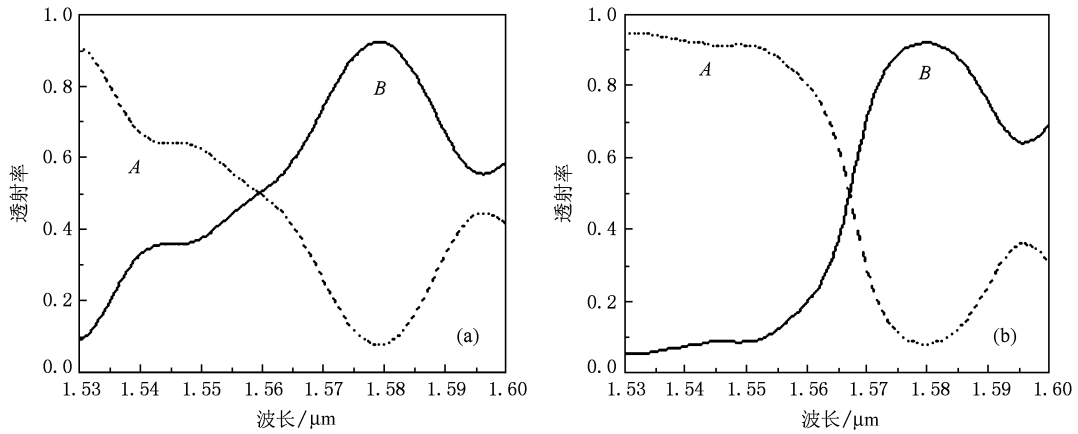


图4 (a) 无散射柱的滤波器的透射谱;(b)带散射柱的滤波器的透射谱

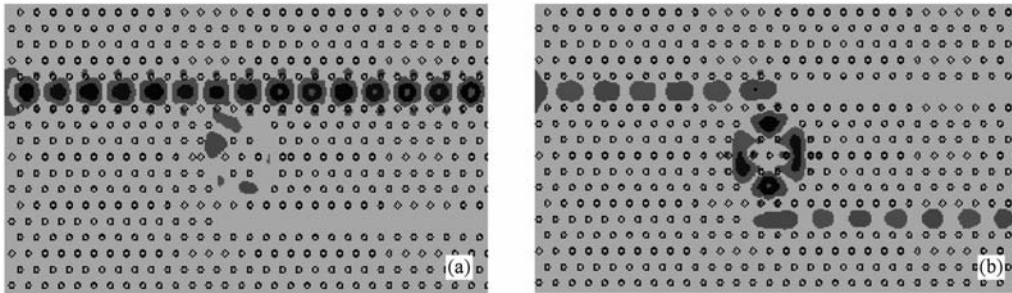


图5 光波在滤波器两个出口端的电场模拟分布图

4. 光子晶体滤波器的调节

4.1. 波长带宽调节

由于增加了散射介质柱,光子晶体环形腔滤波

器的透射率和波长带宽都不得有明显的改变,能够把波长相近的入射波区分. 经过 FDTD 模拟分析发现,改变两个散射介质柱半径的大小可以调节光波的带宽. 如图 6 (a) 所示,当散射介质柱半径 $r = 0.096a$ 时, B 端口输出的光波带宽增大,但是 A 端口输出的波长带宽却明显的减小,从 $1.54 \mu\text{m}$ 到

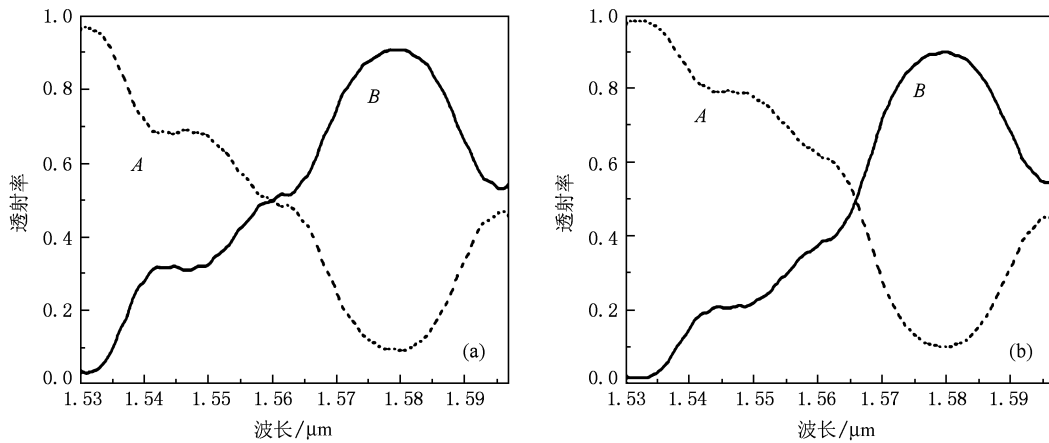


图6 光子晶体滤波器透射谱 (a) $r=0.096a$;(b) $r=0.128a$

1.56 μm 之间的波长区域,它们的透射率很低,从 A 和 B 两端口输出的光波主要为 1.53 μm 和 1.58 μm 两个波长. 图 6(b) 所示,当散射介质柱半径 $r = 0.128a$ 时, B 端口光波的带宽减小,而 A 端口的波长带宽却增大,透射率也达到 90% 以上.

通过图 6 的分析可以看出,增加的两个散射介质柱能够对两个出口端的光波起到调制的作用,改变它的半径大小,使两个波长的带宽相互制约的变化. 随着介质柱半径的减小,两个出口端的波长选择性逐渐提高. 而随着散射介质柱半径的增大, B 出口端的选择性大大提高,而 A 端口的波长带宽增大. 依此规律,可以对光子晶体滤波器波长带宽进行任意改变,使其达到所需要的效果.

4.2. 波长数值调节

光子晶体环形腔对光波的选择性决定了滤波器的优良特性,由于散射介质柱对光波的反射和环形腔内转动波的作用,使光波的透射率提高. 改变散射介质柱半径的大小对光波的反射有很大的影响,

造成光波带宽的不断变化. 这种调制方式仅仅是对两个特定的波长进行一些改变,作为滤波器,必须对某一区域的波长进行选择,可以选择任意波长,达到滤波器的作用,这样才可以应用在更多光子器件的制备中.

光波的传输主要通过主波导与环形腔之间的耦合区域来选择,耦合区域介质柱的变化决定输出波长的数值. 图 7 为改变耦合区域介质柱半径的大小所得到的透射谱图,图 7(a) 为当介质柱半径 $r = 0.096a$ 时, B 端口的输出波长为 1.526 μm ,透射率为 80%, A 端口输出的最大波长为 1.496 μm . 图 7(b) 为当介质柱半径 $r = 0.112a$ 时, B 端口的输出波长为 1.531 μm ,透射率达到 90%, A 端口输出的最大波长为 1.494 μm . 从图中可以得出,介质柱半径的大小决定了波长的数值,还影响到透射率的高低. 通过改变耦合区域介质柱半径的大小,使滤波器的输出波长发生变化,实现了对波长数值的调制. 此调制规律的发现,为制作光子晶体滤波器提供了理论依据.

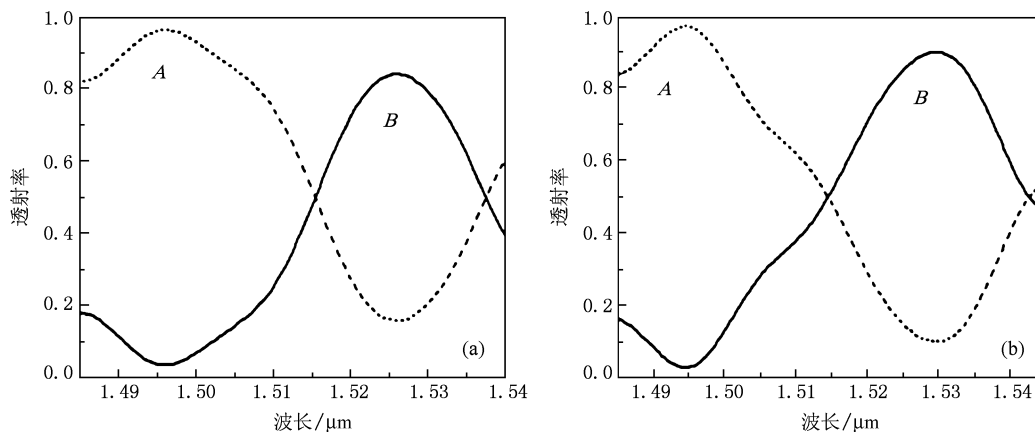


图 7 光子晶体滤波器透射谱 (a) $r = 0.096a$; (b) $r = 0.112a$

5. 结 论

本文通过在环形腔中增加两个散射介质柱,构成一种新的环形腔,从而制作一种新光子晶体环形腔滤波器. 此结构与原来的环形腔相比,波长的带宽减小,透射率都达到 90% 以上,能够从波长相近的波段中

滤出光波. 改变散射介质柱和耦合区域介质柱半径的大小,能够对滤波器进行调制,波长带宽随着散射介质柱半径的变化而相互制约,耦合区域介质柱的变化决定了输出的波长. 通过这两种调节方法,可以制备更加精密的光子晶体滤波器,在光子器件的制作方面有了更广泛的用途. 对这种新型的光子晶体滤波器的调制方法还有很多,以后再作进一步研究.

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] Yablonovitch E, Gmitter T G 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 3380
- [3] Tang, H X, Zuo Y H, Yu J Z, Wang Q M 2007 *Chin. Phys.* **16** 2011
- [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] Zhao D T, Shi B, Jiang Z M, Fan Y L, Wang X 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 409
- [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] Zimmermann J, Kamp M, Forchel A, Marz R 2004 *Opt. Commun.* **230** 387
- [8] Chien F S, Hsu Y, Hsieh W, Cheng S 2004 *Opt. Express* **12** 1119
- [9] Zhou P, You H Y, Wang S Y, Li H Y, Yang Y M, Cheng L Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2276 (in Chinese) [周鹏、游海洋、王松有、李合印、杨月梅、陈良尧 2002 物理学报 **51** 2276]
- [10] Mao L B, Yang C L, Lai Z S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2201 (in Chinese) [茅惠兵、杨昌利、赖宗声 2004 物理学报 **53** 2201]
- [11] D' Orazio A, De Sario M, Petruzzelli V, Prudenzeno F 2003 *Opt. Express* **11** 230
- [12] Fan S H, Villeneuve P, Joannopoulos J, Haus H 1998 *Opt. Express* **3** 4
- [13] Jugessur A, Pottier P, De La Rue R 2004 *Opt. Express* **12** 1304
- [14] Little B E, Chu S T, Haus H A, Foresi J, Laine J P 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 998
- [15] Qiang Z X, Zhou W D, Soref Richard A 2007 *Opt. Express* **15** 1823
- [16] Djavid M, Monifi F, Ghaffari A, Abrshamian M S 2008 *Opt. Commun.* **281** 4028
- [17] Liu N H 1997 *Phys. Rev. B* **55** 4097
- [18] Dinesh Kumar V, Srinivas T, Selvarajan A 2004 *Photonics and Nanostructures* **2**
- [19] Zhang B 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5677 (in Chinese) [张波 2005 物理学报 **54** 5677]

The modulation of a novel photonic crystal ring resonator filter*

Yang Chun-Yun Xu Xu-Ming[†] Ye Tao Miao Lu-Ping

(Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

(Received 30 December 2009; revised manuscript received 23 March 2010)

Abstract

Adding two scattering dielectric cylinders in a photonic crystal ring resonator, a new type of ring resonator filter is achieved, the transmission of which attains 90% and the bandwidth are relatively small. By taking two different measures, the filter wavelength and bandwidth are modulated arbitrarily: (1) With the scattering dielectric cylinder radius decreasing, the bandwidth of output wavelength from the load waveguide gets larger, while the wavelength bandwidth of the bus waveguide decreases; and when the radius increases, they change adversely. (2) Changing the radius of dielectric cylinder in the coupling region, the wavelength in the filter will change accordingly, and the amount of change was proportional to the radius of dielectric cylinder, and the transmission changes significantly. This may serve as the foundation for applications in the preparation of integrated photonic device.

Keywords: ring resonator, filter, scattering dielectric cylinders, transmission

PACS: 78.67.-n, 75.75.-c, 81.05.Xj

* Project supported by the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China (Grant No. 2008GZW0007).

[†] Corresponding author. E-mail: nexmxcn@ncu.edu.cn