

基于光子晶体共振耦合的四波长波分复用/解复用器*

张佳¹⁾ 徐旭明¹⁾ 何灵娟¹⁾ 于天宝^{1)2)†} 郭浩¹⁾

1) (南昌大学物理系, 南昌 330031)

2) (中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

(2011年3月24日收到; 2011年5月26日收到修改稿)

谐振腔因其具有选频功能而在集成光学领域具有广泛的应用. 通过两个光子晶体环形腔、四个不同尺寸的光子晶体微腔及波导之间的耦合, 实现了 1310 nm, 1550 nm, 1600 nm 和 1650 nm 四个波长的波分解复用. 时域有限差分法模拟分析的结果表明, 仅仅通过调制输出波导边缘介质柱的半径, 即可使四个波长的输出效率均达到 90% 以上. 所设计的器件不但效率高, 而且尺寸小 (约为 $12\ \mu\text{m} \times 17\ \mu\text{m}$), 在未来的光通信领域中具有潜在的应用价值.

关键词: 光子晶体环形腔, 微腔, 共振耦合, 波分复用/解复用器

PACS: 42.70.Qs, 42.79.Bh

1 引言

光子晶体的概念最早在 1987 年由 Yabno-lovitch^[1] 和 John^[2] 提出, 是一种介电材料在空间按一定的周期排列的人工材料. 光学谐振腔具有选频功能^[3], 是光集成回路中十分重要的部件之一. 光子晶体微谐振腔^[4] 是通过在光子晶体中引入缺陷形成的, 具有体积小、损耗低、品质因子高等特性. 光子晶体环形腔^[5] 和微腔^[6] 因其具有波长选择性好, 滤波响应灵敏, 消光率高^[7] 等特性, 广泛应用于光开关^[8]、偏振分束器^[9]、滤波器^[10]、波分复用/解复用器^[11] 等.

波分复用/解复用技术是现代光通信时代的一项重要技术. 目前, 基于光子晶体波导、微腔和环形腔设计的波分复用/解复用器已经得到了广泛的研究. 如基于波导耦合的三波长、四波长波分复用器, 具有透射率高、带宽较宽的特性^[12,13]; 而基于微腔或环形腔的波分复用/解复用器能实现窄带波长输出, 如 Foresi 等^[14] 提出的基于微腔设计的波分复用/解复用器, 不但结构简单, 还可以实现单一

波长的窄带输出, 但是其透射效果不高, 波长间隔小, 较适用于密波分复用. Kumar 等^[15] 提出了正方晶格型光子晶体环形腔, Djavid 等^[16,17] 对此类环形腔做了进一步的研究和分析, 重点研究了各主要结构参数 (散射介质柱、腔内介质柱和耦合介质柱的填充率) 对环形腔特性的影响, 并在此基础上实现了波分复用功能, 但由于采用的是异质结构, 结构复杂, 使得制作较为烦琐. Wu 等^[18] 设计了一种输出波导垂直环形腔的波分复用器, 讨论了腔内介质柱分别为 2×2 , 3×3 和 4×4 的结构时的输出特性, 设计了基于传输特性、品质因子综合效果最好的 3×3 结构、通过改变腔内介质柱半径的四波长波分复用器, 但由于每个环形腔只选择了一个共振波长, 因此需要采用四个环形腔, 使得整个器件尺寸较大.

本文通过环形腔、微腔及波导的共振耦合, 设计了一种能高效率输出的波分复用/解复用器. 该器件由两个环形腔、四个微腔及五个用于输入输出的波导构成, 通过设计四个不同尺寸的微腔实现了 1310 nm, 1550 nm, 1600 nm 和 1650 nm 四个

* 江西省自然科学基金 (批准号: 20114BAB202007, 2007GZW2547, 2008GZW0007)、江西省教育厅科技项目 (批准号: GJJ11301)、集成光电子国家重点实验室 (中国科学院半导体研究所) 开放课题 (批准号: IOSKL-KF200901) 资助的课题.

† E-mail: yutianbao@ncu.edu.cn

波长的波分解复用. 其中 1310 nm 作为上传波长, 1550 nm 作为下载波长是通信领域中常用的波长; 1600 nm 和 1650 nm 的光波与 1550 nm 的光形成一组每隔 50 nm 的波分. 与文献 [18] 相比, 我们选择了单个环形腔的两个共振波长, 因此只需要两个环形腔就实现了四波长复用功能, 使得器件尺寸更小, 并同时包含了通信领域常用波长 1310 nm 和 1550 nm; 此外, 为了获得不同的共振波长, 前者需要改变整个环形腔的尺寸, 而我们仅仅需要改变单个微腔的特性, 因此调制方法更为简单.

2 原理与分析

无限长介质柱按正方晶格周期性地排列在空气背景中, 构成完整光子晶体. 结构的参数选取如下: 介质柱为折射率 $n = 3.4$ 的 GaAs, 半径 $r = 0.185a$, 其中 a 为晶格常数. 运用平面波展开法计算其禁带, 只有 TM 模 (电场方向平行于介质柱轴方向) 在 $0.298 (a/\lambda) \sim 0.436 (a/\lambda)$ 存在禁带.

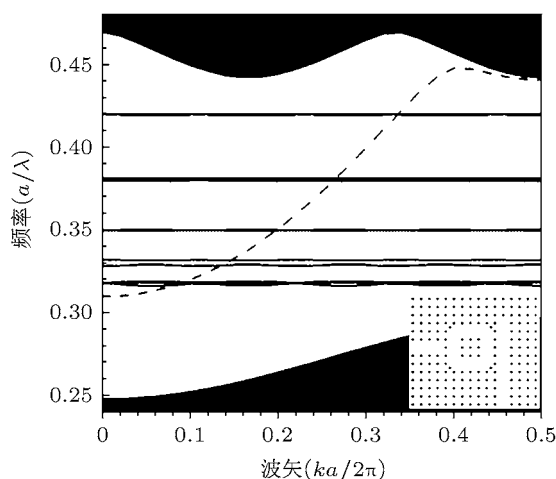


图 1 光子晶体直波导的色散曲线 (虚线所示), 实线指示环形腔的共振频率. 内插图由环形腔与两邻近直波导组成

在完整光子晶体中去掉一排介质柱形成一个直波导, 将直波导和环形谐振腔邻近放置. 环形谐振腔采用文献 [18] 中 3×3 的结构, 之间隔一排介质柱, 构成一个光子晶体环形腔, 在环形腔的四个角落均安置四个散射介质柱以增大输出效率 [15], 结构如图 1 中的内插图所示. 运用平面波展开法, 图 1 虚线给出了波导的色散曲线, 实线对应的是环形腔的谐振频率, 谐振频率分别为 $0.318(a/\lambda)$ (三重简并), $0.328 (a/\lambda)$, $0.331(a/\lambda)$, $0.350 (a/\lambda)$ (二重

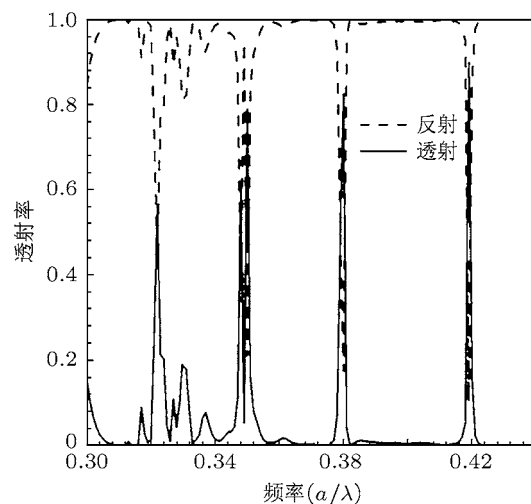


图 2 光子晶体环形腔透射谱

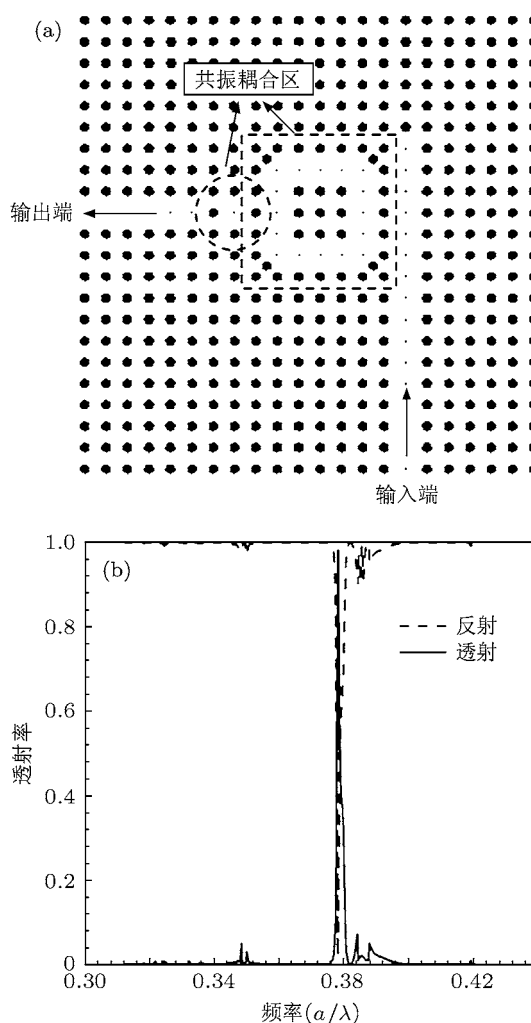


图 3 共振耦合腔结构示意图和透射谱 (a) 共振耦合腔结构示意图; (b) 共振耦合腔透射谱

简并), $0.380(a/\lambda)$ (二重简并) 和 $0.420(a/\lambda)$ (二重简并). 运用时域有限差分法 [19] 计算了环形腔的透射谱, 如图 2 所示. 从图 2 我们可以看到 5 个较为

明显的透射峰, 频率分别为 $0.322(a/\lambda)$, $0.348(a/\lambda)$, $0.352(a/\lambda)$, $0.378(a/\lambda)$ 和 $0.419(a/\lambda)$, 此外还存在一些透射率较低的透射峰, 考虑计算误差和部分模式简并解除的原因, 计算结果与图 1 的分析结果基本符合. 在完整的光子晶体中去除一个介质柱形成点缺陷, 构成单个微腔, 其禁带内只存在一个频率模式, 共振频率为 $0.380(a/\lambda)$. 在环形腔邻近放置单个微腔时, 只有当环形腔频率与微腔频率相一致时, 该频率的光波才可以产生共振, 而与此频率不相同的光则会被禁止输出, 因此实现了选频功能.

图 3(a) 给出了共振耦合腔的结构示意图. 该结构由输入波导、共振耦合区和输出波导三个部分组成, 其中共振耦合区又包括环形腔 (方形虚线框) 和微腔 (圆形虚线框) 两部分. 计算共振耦合腔的透射谱, 如图 3(b) 所示. 从图中可以看出输出端只有一个透射峰, 对应的频率为 $0.378(a/\lambda)$, 该结果与之前的分析一致. 与图 2 中环形腔的透射谱对比, 发现该频率的透射峰比环形腔的透射峰更窄,

效率更高.

基于共振耦合腔的特性, 通过设计不同的微腔结构, 当微腔禁带内的频率与环形腔的频率相近时, 可以实现不同频率的光波的输出. 基于此原理我们可以设计多通道的滤波器以及多波长波分复用/解复用器.

3 设计与优化

图 4 给出了四波长波分复用/解复用器的结构示意图. 由一个输入波导 (标记为 I)、两个共振耦合腔和四个输出波导 (分别标记为 A, B, C 和 D) 构成. 通过改变四个微腔中单个或两个介质柱的半径 R_C (圆形虚线圈), 设定其半径大小分别为: $R_{C1} = 140 \text{ nm}$, $R_{C2} = 42 \text{ nm}$, $R_{C3} = 47 \text{ nm}$, $R_{C4} = 54 \text{ nm}$. 通过设计这四个不同结构的微腔, 可以实现四个不同频率光波的输出.

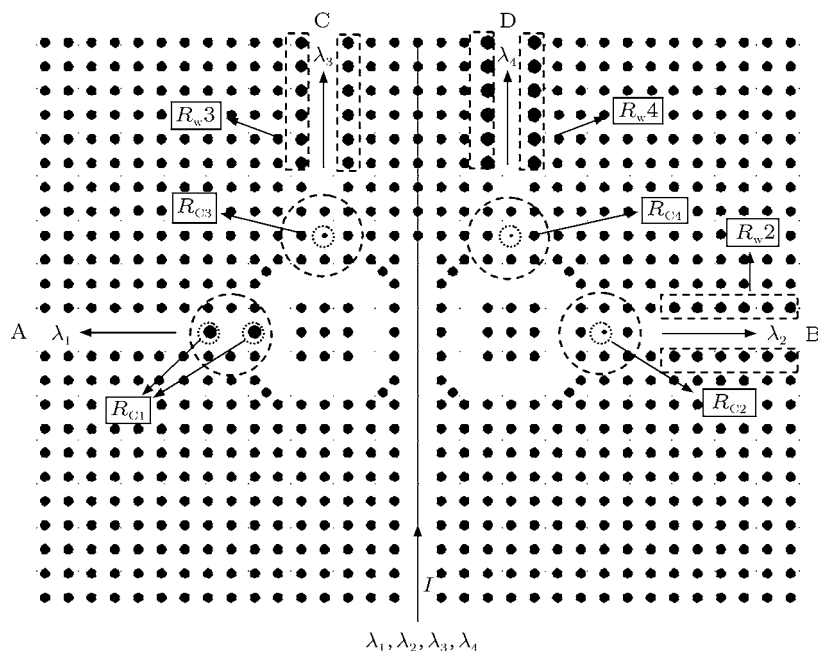


图 4 四通道波分复用/解复用器的结构示意图 图中的圆形虚线圈为四个不同的微腔, 矩形虚线框为输出波导的边缘介质柱

图 5 给出了不同结构微腔的共振频率随微腔半径变化的关系. 如图所示, 选定 $R_{C1} = 140 \text{ nm}$, $R_{C2} = 42 \text{ nm}$, $R_{C3} = 47 \text{ nm}$, $R_{C4} = 54 \text{ nm}$ 时, 四个微腔分别对应四个频率. 研究发现当中央介质柱逐渐增大, 共振频率向低频方向移动; 当增大微腔外围介质柱半径, 较之增大中央介质柱而言共振向高频方向移动; 在图的右半部分, 随着微腔外围介质

柱的半径增大, 共振频率同样向低频方向移动. 当我们选定不一样的微腔结构时, 可以实现不同频率的共振, 从而得到不同波长的输出. 我们选定四个不同的微腔分别对应的四个频率 $0.419(a/\lambda)$, $0.354(a/\lambda)$, $0.344(a/\lambda)$ 和 $0.333(a/\lambda)$, 如图中括号所示. 当选定晶格常数 $a = 550 \text{ nm}$ 时, 四个频率分别对应 1310 nm , 1550 nm , 1600 nm 和 1650 nm 四个波

长, 当同时输入这四个波长时, 它们分别会从 A, B, C, D 四个输出端口输出, 可实现这四个波长的波分解复用.

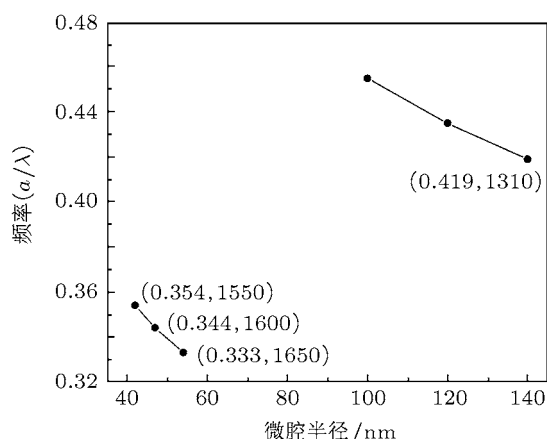


图 5 不同结构微腔的共振频率 图中左边为不同中央介质柱半径的频率, 右边为不同外围介质柱半径的频率. 四个括号标注为文中选定的四个微腔半径时相应的共振频率和波长

采用时域有限差分法, 模拟计算四波长波分解复用/解复用器稳定状态时的电场幅度分布, 如图 6 所示. 从图中可以看出, 从输入波导同时输入 1310 nm, 1550 nm, 1600 nm 和 1650 nm 四个波长的光波, 由于环形腔和微腔的共振耦合作用, 它们分别从 A, B, C, D 四个输出端口输出, 模拟结果与前面的分析一致.

表 1 给出了四个波长的输出效率, 1310 nm, 1550 nm, 1600 nm 和 1650 nm 四个波长的透射率分别为 98.5%, 64.2%, 87.8% 和 73.7%. 其中 1310 nm 的输出效率很高, 达到 98%, 而其他三个波长的输出效率却不是很理想, 特别是 1550 nm 和 1650 nm 的输出效率都不到 80%. 这是因为这些光波在入射端产生较大的反射, 如表中所示 1550 nm 和 1650 nm 的反射都达到 20% 以上, 而且有少部分光会从其他输出端口输出, 因此输出效率比较低.

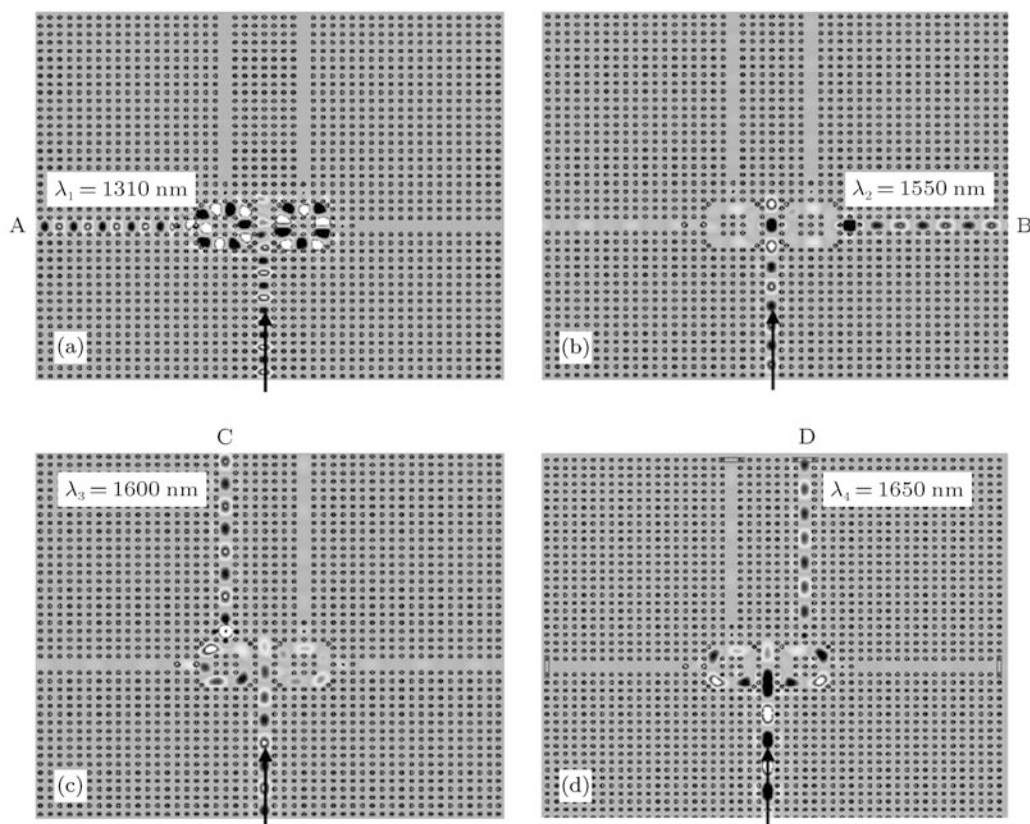


图 6 四波长波分解复用器稳定状态时的电场幅度分布图 (a) $\lambda_1 = 1310$ nm; (b) $\lambda_2 = 1550$ nm; (c) $\lambda_3 = 1600$ nm; (d) $\lambda_4 = 1650$ nm

为了提高 1550 nm, 1600 nm 和 1650 nm 三个波长的输出效率, 我们增大了对应的三个输出波导的边缘介质柱半径 R_{w2} , R_{w3} 和 R_{w4} (图 4 矩形虚线

框所示). 我们选定 $R_{w2} = 114$ nm, $R_{w3} = 125$ nm, $R_{w4} = 150$ nm, 计算优化后的四波长波分解复用/解复用器的输出效率, 如表 2 所示. 1550 nm, 1600 nm

和 1650 nm 三个波长的输出效率分别提高到了 94.5%, 92.8%和 90.1%. 与表 1 相比, 四个波长都可以达到很高的效率, 而且反射也大大减小. 这是由于当输出波导处的边缘介质柱的半径增大时, 其色散曲线会向低频方向移动, 因此输出波导只允许低频率的光波通过, 而高频率的光波则被禁止. 从而降低了反射, 减小了各输出波导间的串扰, 增加了输出效率.

图 7 给出了优化后的四波长波分复用/解复用器在稳定状态时的电场幅度分布. 与图 8 相比, 四个波长的输出效率有了明显的提高. 从内插图的透射谱可以看出, 1310 nm, 1550 nm, 1600 nm 和 1650 nm 四个波长的半波宽分别为 4.3 nm, 7.8 nm, 8.5 nm 和 9.3 nm. 与波长间隔相比, 带宽相对很窄. 因此该器件实现了四波长的高效率、窄带输出. 同时, 整个器件的尺寸约为 $12\text{ }\mu\text{m} \times 17\text{ }\mu\text{m}$, 结构非常紧凑,

有利于在光集成回路中实现集成.

表 1 四波长波分复用/解复用器四个波长的输出效率

波长/nm	1310/%	1550/%	1600/%	1650/%
A	98.5	3.1	2.3	0
B	0	64.2	1.2	1.1
C	0	0.8	87.8	0.4
D	0	0	1.0	73.7
反射	1.5	31.0	7.1	23.2

表 2 优化后四波长波分复用/解复用器四个波长的输出效率

波长/nm	1310/%	1550/%	1600/%	1650/%
A	98.5	1.4	1.5	0
B	0	94.5	0.6	0
C	0	0.4	92.8	0.4
D	0	0	0.8	90.1
反射	1.5	2.8	3.3	8.5

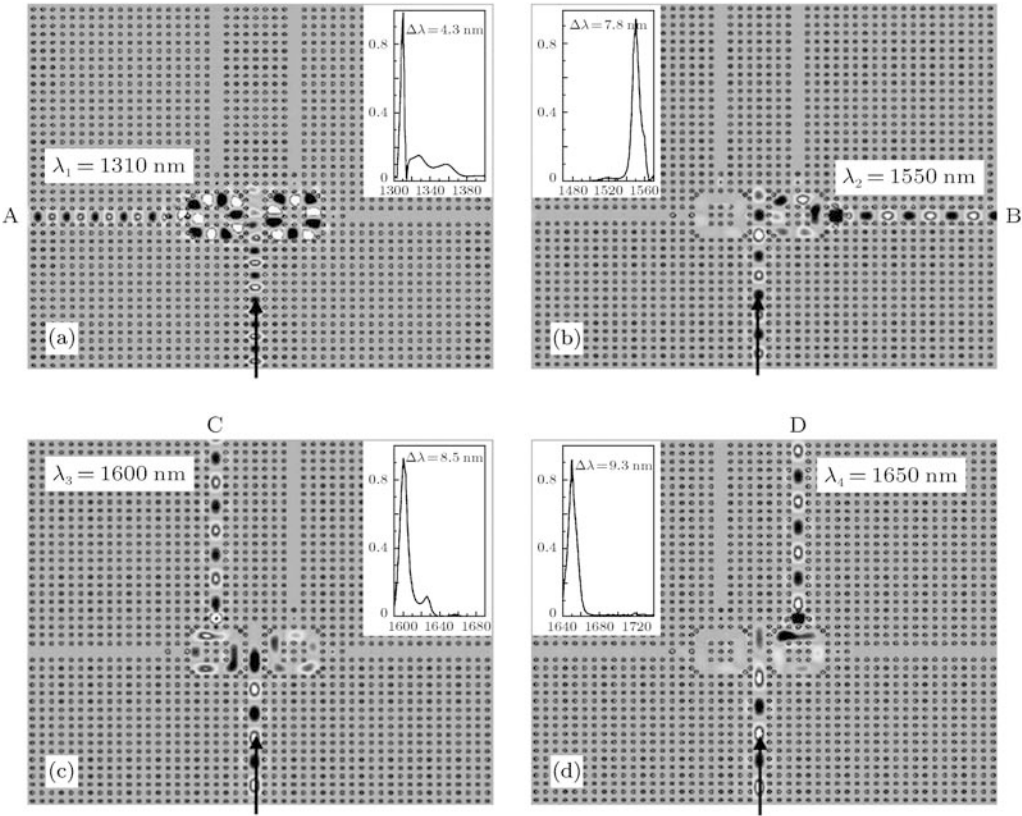


图 7 优化后四波长波分复用器电场幅度图, 内插图各个波导的透射谱 (a) $\lambda_1 = 1310\text{ nm}$; (b) $\lambda_2 = 1550\text{ nm}$; (c) $\lambda_3 = 1600\text{ nm}$; (d) $\lambda_4 = 1650\text{ nm}$

4 结 论

本文基于光子晶体环形腔、微腔与波导的

共振耦合, 采用平面波展开法和时域有限差分法, 设计和模拟分析了一种超微、高效的四波长波分复用/解复用器. 利用两个环形腔, 通过

改变四个微腔的介质柱尺寸, 实现了 1310 nm, 1550 nm, 1600 nm 和 1650 nm 四个波长的波分解复用. 进一步研究发现, 增大输出波导边缘介质柱的半径, 可以使得 1600 nm 和 1650 nm 的波长

透射率提高至 92.8%和 90.1%, 从而实现了四个波长均 90%以上的高效输出. 整个器件的尺寸约为 $12\text{ }\mu\text{m} \times 17\text{ }\mu\text{m}$, 同时调制方法简便, 在通信领域具有潜在的应用价值.

-
- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
 - [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
 - [3] Jin L, Li M Y, He J J 2011 *Opt. Commun.* **284** 156
 - [4] Vahala K J 2003 *Nature* **424** 839
 - [5] Vuckovic J, Loncar M, Mabuchi H, Scherer A 2001 *Phys. Rev. E* **65** 016608
 - [6] Lin X S, Chen X W, Lan S 2005 *Chin. Phys.* **14** 2033
 - [7] Xiao S S, Liu L, Qiu M 2006 *Opt. Express* **14** 2932
 - [8] 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]
 - [9] Yu T B, Huang J H, Liu N H, Yang J Y, Liao Q H 2010 *Appl. Opt.* **49** 2168
 - [10] Mao H 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] Rostami A, Nazari F, Banaei H A, Bahrami A 2010 *Photonics Nanostruct. Fundam. Appl.* **8** 14
 - [12] He L J, Xu X M, Liu N H, Yu T B, Fang L G 2010 *J. Opt.* **12** 065502
 - [13] Ye T, Xu X M 2010 *Acta Phys. Sin.* **9** 6273 (in Chinese) [叶涛, 徐旭明 2010 物理学报 **9** 6273]
 - [14] Foresi J S, Villeneuve P R, Ferra J, Thoen E R, Steinmeyer G, Fan S, Joannopoulos J D, Kimerling L C, Smith H I, Ippen E P 1997 *Nature* **390** 143
 - [15] Kumar V D, Spinivas T, Selvarajana A 2004 *Photonics Nanostruct. Fundam. Appl.* **2** 199
 - [16] Djavid M, Ghaffari A, Monifi F, Abrishamian M S 2008 *Physica E* **40** 3151
 - [17] Djavid M, Monifi F, Ghaffari A, Abrishamian M S 2008 *Opt. Commun.* **281** 4028
 - [18] Wu Y D, Shih T T, Lee J J 2009 *Appl. Opt.* **48** 24
 - [19] Chu S T, Chaudhuri S K 1989 *J. Lightwave Technol.* **7** 2033

Four-wavelength multiplexer/demultiplexer based on photonic crystal resonant coupling*

Zhang Jia¹⁾ Xu Xu-Ming¹⁾ He Ling-Juan¹⁾ Yu Tian-Bao^{1)2)†} Guo Hao¹⁾

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

2) (State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(Received 24 March 2011; revised manuscript received 26 May 2011)

Abstract

Resonant cavities are used widely in the field of integrated optics due to their excellent frequency-selective properties. Based on the characteristics of resonant coupling between two photonic crystal ring resonators, four cavities with different sizes and waveguides, the demultiplexing of four wavelengths, i.e. 1310 nm, 1550 nm, 1600 nm and 1650 nm is realized. The numerical results obtained by the finite-difference time-domain method show that the output efficiency of the four wavelengths can be higher than 90% only by modulating the radii of the border rods of output waveguides. The presented device that has not only a compact size with $12\text{ }\mu\text{m}\times 17\text{ }\mu\text{m}$ but also a high output efficiency, may have potential application in the future optical communication field.

Keywords: photonic crystal ring resonator, microcavity, coupling resonance, wavelength multiplexer/demultiplexer

PACS: 42.70.Qs, 42.79.Bh

* Project supported by the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China (Grant Nos. 20114BAB202007, 2007GZW2547, 2008GZW0007), the Research Project from Department of Education of Jiangxi Province (Grant No. GJJ11301), and the Open Funds of the State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics of Institute of Semiconductors (Grant No. IOSKL-KF200901).

† E-mail: yutianbao@ncu.edu.cn