

高效异质结构四波长波分复用器的设计与优化^{*}

叶 涛 徐旭明[†]

(南昌大学物理系, 南昌 330031)

(2009 年 11 月 24 日收到; 2009 年 12 月 22 日收到修改稿)

将两光子晶体单模波导平行、邻近放置构成一个光子晶体波导耦合结构. 根据耦合和解耦理论, 设计了一种新型的高效异质结构四波长波分复用器. 应用时域有限差分法模拟了该器件的效率, 并通过改变一排介质的折射率, 实现了较高的透射率. 进一步发现在入射口处添加三对介质柱, 可以有效地降低系统的反射, 实现了四个波长的高效传输, 四个波长的透射率均超过了 90%. 该器件不仅具有较高的透射率, 而且其尺寸仅为 $36 \mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$, 在未来的光子集成回路中具有潜在的应用价值.

关键词: 光子晶体波导, 耦合, 异质结构, 波分复用

PACC: 4270Q, 4278M

1. 引 言

光子晶体^[1,2]是一种折射率在空间周期性变化的新型微结构材料, 其最基本的特征是具有光子带隙, 频率落在带隙内的光不能通过. 像晶体中的杂质或缺陷会在禁带中形成杂质能级一样, 在完整的光子晶体中引入缺陷, 光子禁带中会出现缺陷模. 若缺陷连续分布将形成线缺陷, 处于原来对完整光子晶体不透明的禁带中的光可以沿着线缺陷传播, 光子晶体光波导就是这样形成的. 光脉冲通过光子晶体可以获得极慢的群速度^[3], 光波在光子晶体光波导中可以低损耗甚至无损耗传播^[4,5]. 近 20 年来光子带隙材料的发现, 因其具有很好的控制光子运动的能力, 一直在促进并深化人们对光子晶体的研究^[6-11]. 利用光子晶体带隙或带隙中的缺陷态可设计出各种高性能的器件, 如光子晶体光开关、光子晶体功分束器、偏振光分束器、波分复用器等^[12-19]. 这些器件相对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, 为光电子器件向高度集成化的发展带来了崭新的应用前景.

波分复用或解复用技术是现代光通信技术领域中的关键技术, 其中三波长波分复用器在光纤到户

(FTTH) 网络系统中扮演着很重要的角色. 根据 ITUG. 983 标准, 在光通信领域三个通信波长分别为 1310 nm, 1490 nm, 1550 nm. 其中 1310 nm 作为上传波长, 发送数字信号, 1490 nm 和 1550 nm 作为下载波长, 分别接收数字和模拟视频信号. Shi 等利用两邻近波导系统的耦合和解耦的特性, 通过级联多个耦合器实现了上述三个波长的分束功能, 但级联层数多, 而且为了提高透射率, 需要在耦合区采用复杂的锥形折射率分布^[20], 加大了这种设计结构实际应用的难度. 本论文在研究了两波导的光子晶体波导耦合结构的耦合和解耦特性的基础之上, 根据不同折射率材料构成的光子晶体波导耦合结构解耦点的变化, 设计了一种新型超微光子晶体波导耦合型异质结构四波长波分复用器. 实现了光通信领域中三个通信波长 1310 nm, 1490 nm, 1550 nm 和另一波长 1390 nm 的分束效果. 应用时域有限差分法模拟了该器件的效率, 通过结构的优化, 实现了四个波长的高效传输, 四个波长的透射率均超过了 90%. 与文献[20]提出的结构相比, 本论文提出的结构不仅效率更高, 而且尺寸更小, 总的尺寸仅为 $36 \mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$, 使其在未来的集成光回路中具有潜在的应用价值.

2. 原理与分析

我们讨论的是二维光子晶体, 由介质柱放置在

^{*} 江西省自然科学基金 (批准号: 2007GZW2547; 2008GZW0007) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: ncxmxcn@ncu.edu.cn

空气背景中形成,设定介质柱为无限长,按照正方晶格排列,晶格常数为 a ,介质柱的介电常数 $\epsilon = 11.56$,介质柱的半径为 r ,取 $r = 0.14a$.在完整光子晶体中去掉两排平行、邻近的介质柱构成两波导的光子晶体耦合结构.根据耦合模理论,当耦合长度为 $L_B/2$ (拍长 $L_B = 2\pi/|\beta_o - \beta_e|$, β_o, β_e 分别为奇模和偶模的传播常数,如图 1 所示)的奇数倍时光波将呈交叉态输出,当耦合长度为 L_B 的整数倍时将呈直通态输出^[21].因此,通过选择不同的耦合长度 L 可以决定入射光波的输出位置^[22].

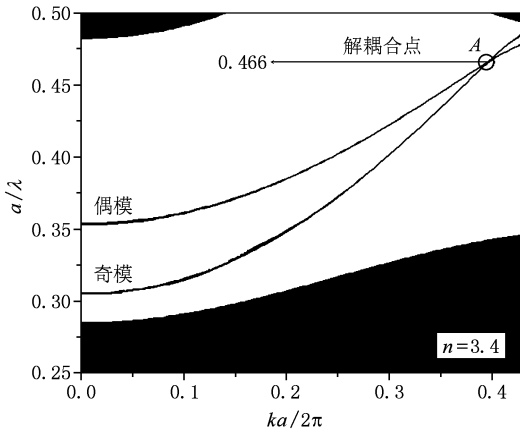


图 1 两波导光子晶体耦合结构的色散曲线图

当耦合系统的耦合模式具有相同的传播常数时,邻近波导的耦合将被解除,光功率将不再在耦合波导中转换,而是始终沿着原波导方向输出^[21,22].图 1 给出了两波导的光子晶体耦合结构的色散关系曲线图.从图中可以看出,两波导的光子晶体耦合结构的色散曲线相交于 A 点,该点位于归一化频率 $a/\lambda = 0.466$ 处.因此,当电磁波以 A 点处的频率 $a/\lambda = 0.466$ 入射时,在两波导的耦合系统中,能量都将沿原输入波导方向传输,不会发生能量转移.基于波导系统的耦合和解耦合特性可以实现三个波长的分束功能,但基于此特性的四波长的波分复用器确少有研究,需要引入新的思路.

通过研究我们发现,由光子晶体材料组成的两波导耦合系统,如果材料的折射率发生变化,解耦合点也会随之发生变化.应用平面波展开法,我们研究了不同材料在折射率变化时,两波导耦合系统解耦合点的归一化频率的变化.如图 2 所示,随着光子晶体材料折射率的增大,解耦合点的归一化频率逐渐减小,大体呈近似线性变化.由不同光子晶体材料折射率的变化,引起了解耦合点的变化,这为研

究基于波导的耦合和解耦合特性的四波长波分复用器提供了新的思路.实现四波长波分复用器的一个解决途径就是采取异质结构,由两种不同折射率的材料组成异质结构波分复用器,结构中不同折射率部分对应不同的解耦合点,再根据波导系统的耦合和解耦合理论,我们设计一种新型高效率的异质结构四波长波分复用器.

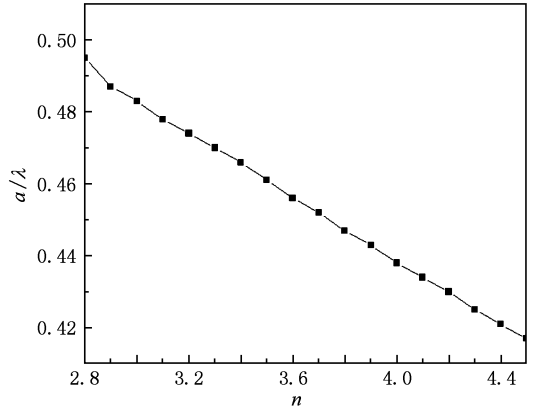


图 2 两波导光子晶体耦合结构的解耦合点的归一化频率随光子晶体材料的折射率 n 变化而变化的关系曲线

3. 设 计

设计如图 3 所示的四波长波分复用器件,此结构由两种不同折射率的材料构成.其中,虚线框所示区域的介电常数变为 16,其他区域仍为 11.56 保持不变.由图 2 可知,虚线框所示区域对应解耦合点的频率为 $a/\lambda = 0.438$,其他区域对应解耦合点的频率为 $a/\lambda = 0.466$.该结构包含四条不同的波导,分别标记为 A, B, C 和 D,光波由入射端 (标记为 I) 沿 z 方向进入输入波导,光子晶体波导的其余结构参数与前述部分完全一致.

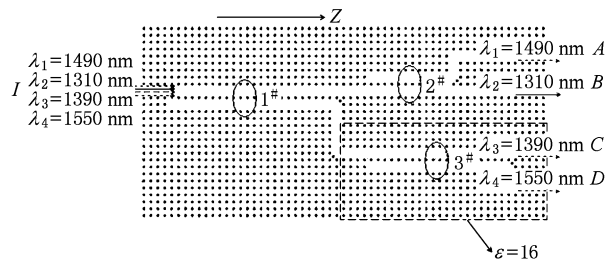


图 3 四波长波分复用器的结构示意图 (图中虚线框所示区域的介电常数为 16,其他区域仍为 11.56)

选取晶格常数 $a = 0.610 \mu\text{m}$,则四个工作频率 $a/\lambda = 0.466, 0.438, 0.410$ 和 0.394 ,对应的四个波

长为 1310 nm, 1390 nm, 1490 nm, 1550 nm, 其中 1310 nm, 1490 nm, 1550 nm 是光通信领域中三个通讯波长. 由光子晶体的耦合和解耦理论我们知道, 当四个波长从端口 I 输入时, 设置 $1^{\#}$ 的耦合长度为 $25a$, 那么 1310 nm 由于解耦合的特性将一直沿 B 端口输出, 1490 nm 因为呈直通态, 也将沿 B 端口传输. 而 1390 nm 和 1550 nm 将呈交叉态沿 C 波导传输. 设置 $2^{\#}$ 的耦合长度为 $13a$, 则 1490 nm 将呈交叉态从 D 端输出, 可以实现 1310 nm 和 1490 nm 的分离. 设置虚线框所示区域的折射率为 4, 我们知道, 1390 nm 对应的频率是折射率为 4 的两波导系统的解耦合点的归一化频率, 由于解耦合的特性, 将一直沿 C 端输出. 设置 $3^{\#}$ 的耦合长度为 $21a$, 则 1550

nm 将呈交叉态从端口 D 输出. 因此, 该结构利用光子晶体两波导系统的耦合和解耦特性, 应用异质结构实现了四个波长的分离.

采用时域有限差分法, 图 4 给出了四波长波分复用器达到稳定输出状态时, 四个波长的电场幅度分布图. 从图中可以看出, 四个波长在通过 $1^{\#}$ 后, 1310 nm 和 1490 nm 沿 B 端传输, 而 1390 nm 和 1550 nm 沿 C 端传输. 1310 nm 和 1390 nm 由于解耦合特性分别一直沿 B 端和 C 端输出. 1490 nm 和 1550 nm 在分别经过 $2^{\#}$ 和 $3^{\#}$ 后呈交叉态分别在 A 端和 D 端输出, 可见模拟结果与上述讨论结果一致. 该器件同时实现了 1310 nm, 1390 nm, 1490 nm, 1550 nm 四个波长的波分复用.

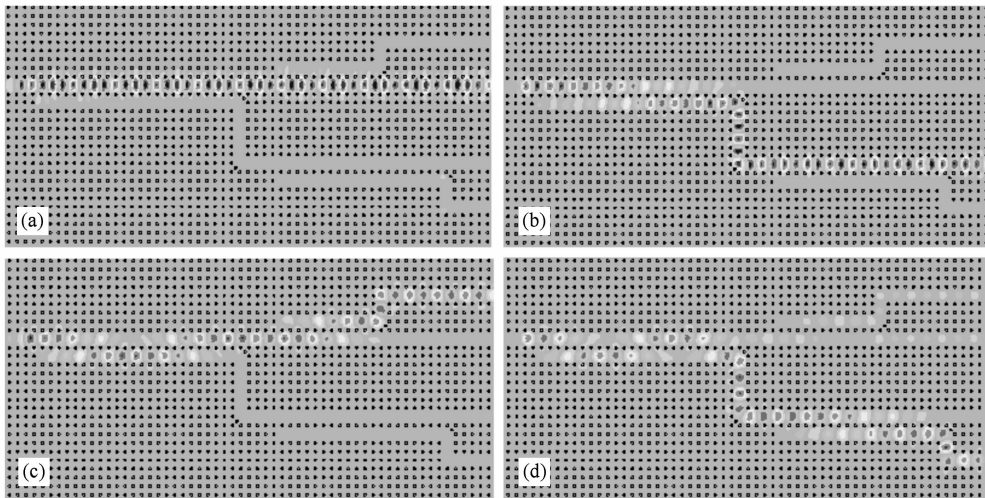


图 4 四波长波分复用器的电场幅度的稳态分布图 (a) $\lambda = 1310 \text{ nm}$; (b) $\lambda = 1390 \text{ nm}$; (c) $\lambda = 1490 \text{ nm}$; (d) $\lambda = 1550 \text{ nm}$

我们计算了四个波长的透射率, 四个波长 1310 nm, 1390 nm, 1490 nm, 1550 nm 的透射率分别达到 81%, 96%, 92%, 84%. 1390 nm, 1490 nm 效果比较理想, 透射率超过了 90%. 1310 nm 的透射率只有 81%, 在入射端产生了较大的反射, 效率损失比较大, 因此透射率比较低. 1550 nm 效果同样不很理想, 这是因为理论计算得出 1550 nm 在两耦合波导结构中的拍长为 $8.3a$, 而光子晶体必须是周期性的离散结构, 因此所设定的耦合长度必须为晶格常数的整数倍, 这样会带来效率的降低.

4. 优 化

为了提高 1550 nm 波长的透射率, 我们调节可调介质柱 $1^{\#}$ (如图 3 所示) 有效折射率. 图 5 给出了四个波长的透射率随 $1^{\#}$ 介质柱的折射率的变化而

变化的关系曲线. 从图中可以看到, 1310 nm 波长的透射率在 $n = 2.3$ 增大到 2.38 过程中几乎保持不变, 而在 $n \geq 2.38$ 时, 其透射率随着 n 的增大而缓慢增大; 1390 nm 波长的透射率变化比较平缓, 在 $n = 2.35$ 与 $n = 2.42$ 之间有较高的透射率; 1490 nm 波长的透射率先随 n 的增大而急剧增大, 到 $n = 2.38$ 时趋向于平缓; 而 1550 nm 波长的透射率在 $n = 2.3$ 增大到 $n = 2.37$ 过程中逐渐增大, 随后又急剧近似线性降低. 为了使得四个波长均获得较高的透射率, 我们选择 1490 nm 和 1550 nm 对应的变化曲线交点处的调制折射率 $n = 4.38$.

表 1 给出了调制 $1^{\#}$ 折射率为 4.38 后在不同输出端口四个波长的透射率. 此时与未调制前相比, 1310 nm 和 1490 nm 几乎没有改变, 透射率仍然超过 90%; 1390 nm 的透射率没有改变; 1550 nm 波长的透射率从 84% 提高到 91%, 提高了七个百分点.

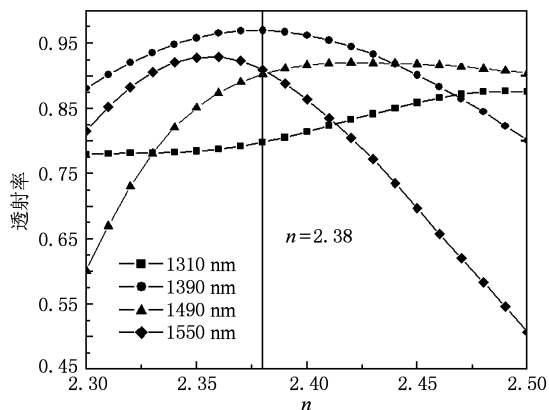


图5 四个波长的透射率随可调介质柱1#的折射率变化而变化的关系曲线

这是因为在调节了1#的折射率后,引入了缺陷模,波导中的导模和缺陷模的共振改变了输出效率.通过调节1#的折射率使三个波长的透射率均超过了90%,但是1310 nm的透射率仍为80%,反射并未因调节1#的折射率而有所降低,整个系统仍未达到理想的效果.

表1 四个波长分别在五个端口的透射率(%)

λ/nm	1310	1390	1490	1550
I	19	2	4	4
A	0	0	90	2
B	80	1	1	1
C	0	96	1	1
D	0	0	3	91

通过进一步研究发现,在入射口处添加三对介质柱可以有效地降低系统的反射,实现四个波长的

高效传输.如图6所示,在入射端添加了额外的三对介质柱.

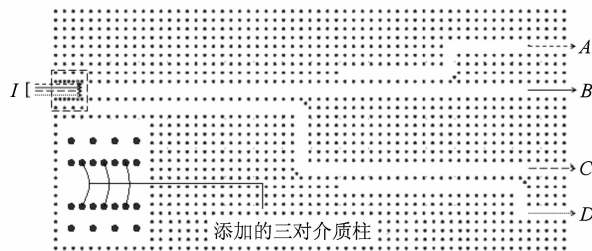


图6 在入射端添加三对介质柱的四波长波分复用器的结构示意图(插图为虚线框所示区域的放大图)

通过时域有限差分法计算,表2给出了在输入口I处添加三对介质柱后四个波长的透射率.我们看到,通过添加三对介质柱,1310 nm的透射率从80%提高到了90%,整整提高了10个百分点;1390 nm和1550 nm的透射率也有小幅度提高,分别达到98%和92%;1490 nm仍为90%保持不变.从表1和表2的对比中看出,1310 nm波长透射率的提高主要是因为是在入口I端处反射的降低.这是因为原来系统的耦合非常强烈,容易产生较大的反射,添加三对介质柱后,降低了在入射端口的耦合强度,使光波更容易地导入到传输波导中,从而降低了反射带来的损耗.实现了四个波长的高效传输,透射率均超过90%.

图7给出了在入口处增加3对介质柱后,四个波长的电场幅度的稳态分布图.与图4比较可知,通过在入射端添加了三对介质柱同时实现了四个波长的高效传输.

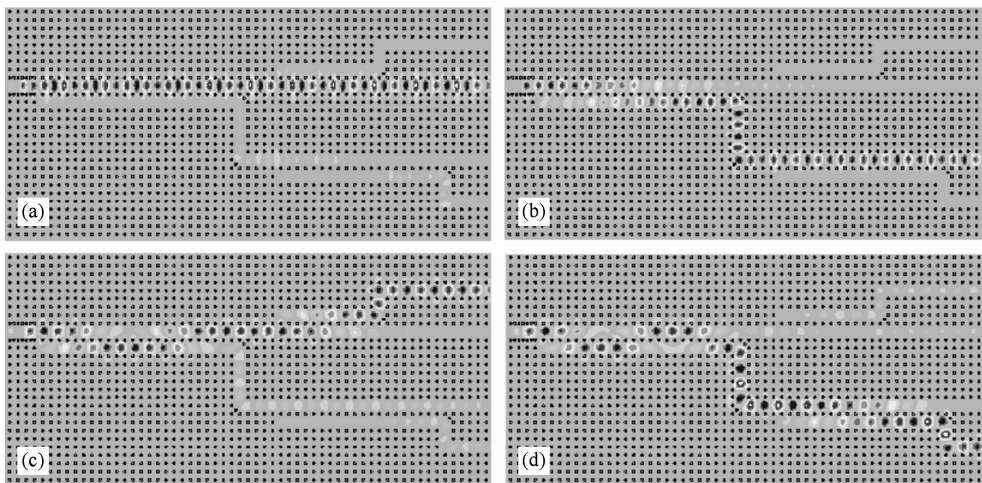


图7 在输入口I处添加三对介质柱后四波长波分复用器的电场幅度的稳态分布图 (a) $\lambda = 1310 \text{ nm}$; (b) $\lambda = 1390 \text{ nm}$; (c) $\lambda = 1490 \text{ nm}$; (d) $\lambda = 1550 \text{ nm}$

表 2 在输入口 I 处添加三对介质柱后四个波长
在五个端口的透射率 (%)

λ/nm	1310	1390	1490	1550
I	9	0	4	4
A	0	0	90	1
B	90	1	1	1
C	0	98	1	1
D	0	0	3	92

5. 结 论

我们提出了实现基于波导耦合和解耦合理论

的四波长波分复用器的新思路,设计了一种高效率异质结构四波长波分复用器. 通过改变一排介质柱的折射率,实现了 1550 nm 波长的透射率的提高. 进一步在入射口处添加三对介质柱,降低了耦合系统的反射,使 1310 nm 的透射率提高了 10 个百分点,发现了一种降低系统反射的方法. 本文所设计的器件结构超微,总的尺寸仅为 $36 \mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$,同时实现了四个波长的高效传输,四个波长的透射率均超过了 90%,在未来的光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] Yu T B, Liu N H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3049 (in Chinese) [于天宝、刘念华 2004 物理学报 **53** 3049]
- [4] Mekis A, Chen J C, Kurland I, Fan S, Villeneuve P R, Joannopoulos J D 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 3787
- [5] Du X Y, Zheng W H, Zhang Y J, Ren G, Wang K, Xing M X, Chen L H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7005 (in Chinese) [杜晓宇、郑婉华、张冶金、任刚、王科、邢名欣、陈良惠 2008 物理学报 **57** 7005]
- [6] Liu Z Q, Feng T H, Dai Q F, Wu L J, Lan S 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2383
- [7] Yan H T, Wang M, Ge Y X, Yu P 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2389
- [8] Chen X J, Wu L J, Hu W, Lan S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1025 (in Chinese) [陈小军、吴立军、胡巍、兰胜 2009 物理学报 **58** 1025]
- [9] Feng T H, Dai Q F, Wu L J, Guo Q, Hu W, Lan S 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4533
- [10] 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]
- [11] Chen J, Li X L, Li H H, Wang Q K 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6216 (in Chinese) [陈健、李小丽、李海华、王庆康 2009 物理学报 **58** 6216]
- [12] Sharkawy A, Shi S, Prather D, Soref R 2002 *Opt. Express* **10** 1048
- [13] Boscolo S, Midrio M, Krauss T F 2002 *Opt. Lett.* **27** 1001
- [14] Zhu G X, Yu T B, Chen S W, Shi Z, Hu S J, Lai Z Q, Liao Q H, Huang Y Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1014 (in Chinese) [朱桂新、于天宝、陈淑文、石哲、胡淑娟、赖珍莹、廖清华、黄永箴 2009 物理学报 **58** 1014]
- [15] Ren G, Zhang W H, Wang K, Du X Y, Xing M X, Chen L H 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2553
- [16] Shen X P, Han K, Li H P, Shen Y F, Wang Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1737 (in Chinese) [沈晓鹏、韩奎、李海鹏、沈义峰、王子煜 2008 物理学报 **57** 1737]
- [17] Koshiba M 2001 *IEEE J. Lightwave Technol.* **19** 1970
- [18] Martinez A, Cuesta F, Marti J 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 694
- [19] Boscolo S, Midrio M, Someda C G 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 47
- [20] Shi Y, Dai D, He S 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 2293
- [21] Chien F S, Hsu Y, Hsieh W, Cheng S 2004 *Opt. Express* **12** 1119
- [22] Yu T B, Wang M H, Jiang X Q, Yang J Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1851 (in Chinese) [于天宝、王明华、江晓清、杨建义 2006 物理学报 **55** 1851]

The design and optimization of high efficiency heterostructure four-wavelength wavelength division multiplexing^{*}

Ye Tao Xu Xu-Ming[†]

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

(Received 24 November 2009; revised manuscript received 22 December 2009)

Abstract

A photonic crystal waveguide coupled structure can be constructed by placing two photonic crystal waveguides closely and parallel to each other. A new type of high efficiency heterostructure four-wavelength wavelength division multiplexing is designed according to the theory of coupling and decoupling. The finite-difference time-domain method is used to simulate the efficiency of the device, and the simulated results show that higher transmittance is achieved by adjusting the refractive index of a row of dielectric rods. We further found that adding three pairs of rods in the incident medium can effectively reduce the reflection of the system to realize the efficient transport for four-wavelength and the transmittance can exceed 90%. The present device not only has a high transmission rate, but also its size is only $36\ \mu\text{m} \times 17\ \mu\text{m}$ and may have potential applications in future photonic integrated circuits.

Keywords: photonic crystal, coupling, heterostructure, wavelength division multiplexing

PACC: 4270Q, 4278M

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Jiangxi Pvince, China (Grant Nos. 2007GZW2547, 2008GZW0007).

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