

文章编号: 0253-2239(2010)05-1501-05

光子晶体环形谐振腔大角度超微多路光分束器的设计

郭浩¹ 吴评¹ 于天宝¹ 廖清华¹ 刘念华¹ 黄永箴²

(¹ 南昌大学物理系, 江西 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)

摘要 将环形谐振腔邻近放置在光子晶体直波导两侧构成环形谐振器, 利用平面波展开法及时域有限差分法, 数值分析了该系统中光的传播行为。基于此结构, 以三、四通道为例设计大角度超微多路光分束器。仅通过改变环形谐振腔中耦合介质柱的半径, 便可使光场发生重新分布, 实现输出能量的均分或自由分配。在同样保证多路和高传输效率的条件下, 该结构与常规波导定向耦合型分束器相比, 还可实现光束的大角度分离。

关键词 光子晶体; 分束器; 环形谐振腔; 时域有限差分法; 平面波展开法; 能量均分

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1501

Design of Large Separating Angle Ultracompact Multiway Beam Splitter Based on Photonic Crystal Ring Resonators

Guo Hao¹ Wu Ping¹ Yu Tianbao¹ Liao Qinghua¹ Liu Nianhua¹ Huang Yongzhen²

¹ Department of Physics, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China

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

Abstract Photonic crystal ring resonator can be constructed by putting ring resonators and the waveguides next together. The spectral transmittance and propagation of the optical field entering this system is analyzed numerically using the plane-wave expansion (PWE) method and finite-difference time-domain (FDTD) method. On the basis of this structure, ultracompact multiway beam splitter was designed and the ones with three and four output channels are discussed in details as examples. By simply tuning the radii of coupling dielectric rods in the ring resonators and inducing the redistribution of the optical field, equipartition of energy or free distribution can be achieved. Compared with the results of normal waveguides reported, the most important aspect is that a large separating angle can be obtained in this structure.

Key words photonic crystal; beam splitter; ring resonator; finite-difference time-domain (FDTD); plane-wave expansion (PWE); uniform energy distribution

1 引 言

近年来, 光子晶体由于具有控制光子流动的能力等奇特物理性质而备受人们的关注。光子晶体是一种折射率呈空间周期变化的新型微结构材料^[1,2], 通过在完整光子晶体中引入线缺陷, 形成光子晶体波导, 可实现大拐弯处的低损耗甚至零损耗

的能量传输^[3]。基于光子晶体波导的各种光电器件, 具有体积小, 易于大规模光电集成等优点。其中光分束器是组成光子集成电路(PIC)的一种很重要的光学元器件, 目前, 基于定向耦合器^[4,5]、Y型结构或T型结构^[6,7]和多模光波导^[8]的 1×2 分束器得到了广泛的研究, 但是, 基于Y型和T型结构的

收稿日期: 2009-05-31; 收到修改稿日期: 2009-07-16

基金项目: 集成光电子国家重点实验室(半导体研究所)开放课题, 江西省教育厅科学研究课题(2007-59, GJJ08066)和江西省自然科学基金(2008GZW0006, 2007GQW2057)资助课题。

作者简介: 郭浩(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体理论和器件设计等方面的研究。

E-mail: phng21am@163.com

导师简介: 廖清华(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事光波在固体中的传播方面的研究。E-mail: lqhua@ncu.edu.cn

分束器的透射率都比较低,如若不引入额外的微调结构,其透射率一般都不会超过 50%。而微调结构的引入却又会给光学器件的制作带来困难,这些特性使其在未来的光学集成中的应用受到了限制。与此同时,基于多模光波导结构的光学器件,由于具有尺寸小,低损耗,大带宽和极化不敏感等优点,也吸引着不少的研究^[9~12]。但是在常规的介电多模波导中,光分束的间距比较小,不易实现光束的大角度分离。而关于环形谐振腔及其光学器件的设计和研 究则让人们看到了新的希望。2004 年 V. Dinesh Kumar^[13]提出了环形谐振腔,他们研究了在光子晶体中嵌入一环形谐振腔之后,直波导与环形谐振腔共振与否对直波导中光的传播影响很大,该结构有时可把入射光场全部局域在环形谐振腔中。Djavid 研究小组对环形腔结构做了进一步的研究和分析,主要研究了环形谐振腔中各主要参数对光波传输特性的影响,以及通过选择不同折射率的散射介质柱、内部介质柱和耦合介质柱,从而实现波分解复用器^[14~16]。

本文以 3,4 通道为例,分析与研究的是光子晶体环形谐振腔光分束器,改变环形谐振腔内两排耦合介质柱的有效折射率(即改变环形谐振腔内两排耦合介质柱的半径或者折射率),使光波在环形谐振腔中耦合区的耦合强度发生改变,从而改变光场的

分布,均可实现输出端能量的均分或自由分配。

2 结构和原理分析

无限长介质柱按矩形晶格周期性地排列在空气背景中,构成完整光子晶体。整个结构的参数选取如下:介质柱材料为折射率 $n=3.46$ 的 GaAs,介质柱半径 $r=0.185a$,其中 a 为晶格常数。采用一种新型紧凑的环形谐振腔来制作光子晶体分束器,由环形谐振腔(如图 1 所示)邻近放置在直波导的两侧构成。在完整光子晶体中去掉一排介质柱形成一个直波导,将光子晶体直波导和 N 个环形谐振腔邻近放置,之间只有一排介质柱相隔,构成一个具有 M 个输出通道的环形谐振腔分束器(Photonic crystal ring resonators-PCRR)。以 M -PCRR($M=3,4$)为例,其结构分别为图 2 中 1×3 分束器和 1×4 分束器。

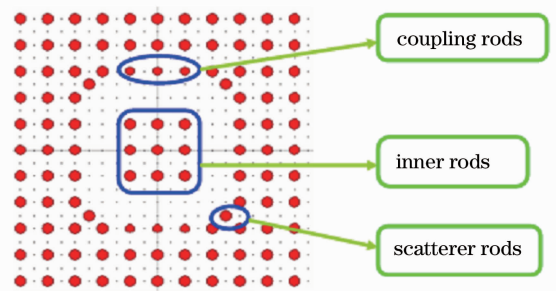


图 1 光子晶体环形谐振腔

Fig. 1 Single-ring photonic crystal ring resonator

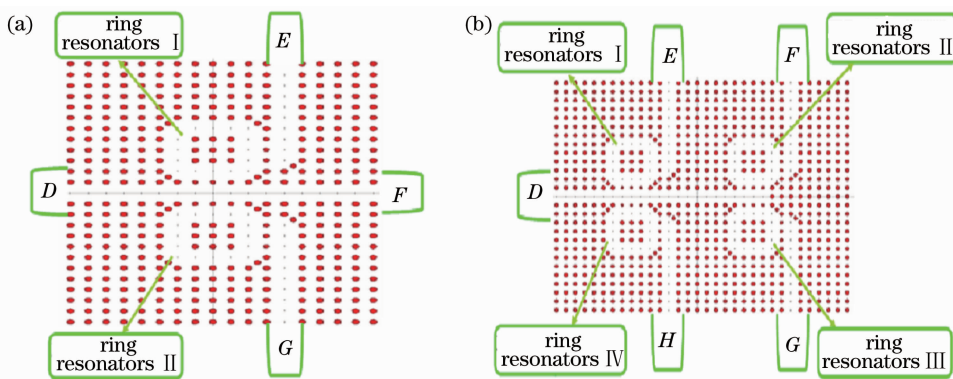


图 2 分束器结构图。(a) 3-PCRR; (b) 4-PCRR

Fig. 2 Schematic diagram of beam splitters. (a) 3-PCRR; (b) 4-PCRR

时域有限差分法(FDTD)是数值分析光子晶体特性的最重要方法之一。用 FDTD 方法计算禁带,对于各向异性材料,依赖时间的 Maxwell 方程可以写成下面的形式:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathcal{J}. \quad (2)$$

Maxwell 方程能够用所谓的 Yee 胞技术在空间和时间进行离散化处理。二维 Maxwell 方程在 \mathbf{E} 极化的情况下离散化的表达式为

$$\mathbf{H}_x \begin{vmatrix} n+1/2 \\ i, j+1/2 \end{vmatrix} = \mathbf{H}_x \begin{vmatrix} n-1/2 \\ i, j+1/2 \end{vmatrix} - \frac{\Delta t}{\mu_0} \left(\frac{\mathbf{E}_z \begin{vmatrix} n \\ i, j+1 \end{vmatrix} - \mathbf{E}_z \begin{vmatrix} n \\ i, j \end{vmatrix}}{\Delta y} \right), \quad (3)$$

$$\mathbf{H}_y \begin{vmatrix} n+1/2 \\ i+1/2, j \end{vmatrix} = \mathbf{H}_y \begin{vmatrix} n-1/2 \\ i+1/2, j \end{vmatrix} + \frac{\Delta t}{\mu_0} \left(\frac{\mathbf{E}_z \begin{vmatrix} n \\ i+1, j \end{vmatrix} - \mathbf{E}_z \begin{vmatrix} n \\ i, j \end{vmatrix}}{\Delta x} \right), \quad (4)$$

$$\mathbf{E}_z \begin{vmatrix} n+1 \\ i, j \end{vmatrix} = \mathbf{E}_z \begin{vmatrix} n \\ i, j \end{vmatrix} + \frac{\Delta t}{\epsilon_{i,j}} \left(\frac{\mathbf{H}_y \begin{vmatrix} n+1/2 \\ i+1/2, j \end{vmatrix} - \mathbf{H}_y \begin{vmatrix} n+1/2 \\ i-1/2, j \end{vmatrix}}{\Delta x} - \frac{\mathbf{H}_x \begin{vmatrix} n+1/2 \\ i, j+1/2 \end{vmatrix} - \mathbf{H}_x \begin{vmatrix} n+1/2 \\ i, j-1/2 \end{vmatrix}}{\Delta y} \right). \quad (5)$$

式中 FDTD 网格尺寸为 $\Delta x = \Delta y = a/21$ ，时间步长 $\Delta t = \Delta x / (2c)$ ，式中 c 为光速。比较时间本征值和空间本征值的变化范围，考虑实际情况，关于时间本征值和空间本征值都应该有意义，都应该落在要求的数值和本证谱内。如果要同时满足时间本征值和空间本征值的数值要求，就需要满足下面方程：

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{1/\Delta x^2 + 1/\Delta y^2}}. \quad (6)$$

用上述方法计算功率的频谱，同时再通过傅里叶变换找出对应的谱峰的本征频率。具有上述结构参数

的完整矩形晶格光子晶体，对于 TM 波(电场平行于介质柱)，在归一化频率 $a/\lambda = 0.29229 \sim 0.41171$ 范围内存在一光子禁带。

3 结果及讨论

根据上面的计算结果，选取工作频率为归一化频率 $a/\lambda = 0.35$ ，入射波的横向分布为高斯型(若取晶格常数 $a = 0.543 \mu\text{m}$ ，则该归一化频率对应波长为 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ，正好是光通信中常用的波长)。现在设计光子晶体环形谐振腔光分束器，M-PCRR 光子晶体环形谐振腔光分束器的结构由输入波导、 N 个环形谐振腔和输出波导三个部分组成。输入波导由一个直波导组成，光场由输入波导耦合到环形谐振腔中。输出波导部分由 N 个环形谐振腔置于直波导的两侧组成。图 2 给出 M-PCRR ($M = 3, 4$) 光子晶体环形谐振腔光分束器结构示意图。由于结构的对称性，电场强度和相位均关于传输轴对称分布。在 3-PCRR 分束器中，输出波导 E 和 G 中的能流相等。在 4-PCRR 分束器中，输出波导 E 和 H, F 和 G 中的能流分别相等。图 3 给出了它们的透射率与调制耦合介质柱半径 R 的关系，对于 3-PCRR 分束器和 4-PCRR 分束器，根据计算和模拟的结果发现仅仅通过调整环形谐振腔的耦合介质柱的半径，便可以实现各个端口能量的均分。在只考虑环形谐振腔中能量损失的情况下，PCRR 光分束器的输出效率最高可达 93%。

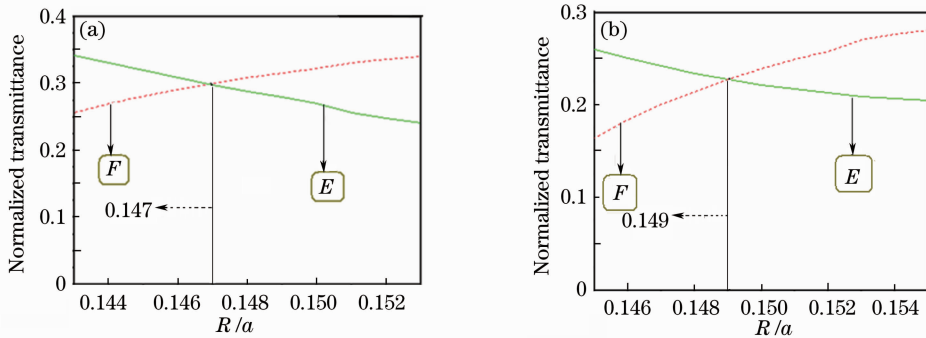


图 3 (a) 3-PCRR 分束器和(b)4-PCRR 分束器中输出端 E 和 F 的透射率和可调耦合介质柱半径 R 的关系

Fig. 3 Relations between coupling dielectric rods R and transmissivity of the output channels E and

F in (a) 3-PCRR beam splitter and (b) 4-PCRR beam splitter

采用时域有限差分法计算和模拟光在这种分束器中的传播行为，图 4 和图 5 给出了 3-PCRR 分束器和 4-PCRR 分束器中的电场幅度分布图。从图可以清晰地看出，在 3-PCRR 分束器中，环形谐振腔 I 和 II 中的耦合介质柱半径调整为 $R_1 = R_2 = 0.148a$

时，位于中央的输出波导(记为 F)的能流比两侧的输出波导(记为 E 和 G)中的能流大， E, F 和 G 的透射率分别为为 30%，34% 和 30%，如图 4(a) 所示。在 4-PCRR 分束器中，当环形谐振腔 I 和 II 中的耦合介质柱半径调整为 $R_1 = R_2 = 0.148a$ 时，位于前

面的两个输出波导(记为 E 和 H)中的能流比位于后面的两个输出波导(分别记为 F 和 G)中的能流大, E, F, G 和 H 的透射率分别约为 24%, 21%, 21% 和 24%, 如图 5(a) 所示。以上结果表明, 对 3-PCRR 分束器和 4-PCRR 分束器, 在调整环形谐振腔的耦合介质柱半径之前, 从各个输出波导输出的能量并不均分。在实际应用中, 通常需使分束器输出能量达到均分。通过改变耦合区介质柱的有效折射率分布, 使光波在环形谐振腔中耦合区的耦合强度发生改变, 这样可以在不改变耦合长度和器件尺寸的条件下, 便可改变光场的分布和传输, 从而实现输出端能量的均分或自由分配。本文就是采用改变环形谐振腔中耦合介质柱的半径, 来实现输出能量的均分或自由分配。根据图 3 计算的结果, 对于 3-PCRR 分束器, 环形谐振腔 I 和 II 中的耦合介质

柱半径调整为 $R_1 = R_2 = 0.147a$ 时, 输出端的能量就可达到均分, 如图 4(b) 所示。而对于 4-PCRR 分束器, 当 $R_1 = R_3 = 0.149a$, $R_2 = R_4 = 0.148a$ 时, 输出端 E, F, G 和 H 的透射率均为 23%, 4 个输出端的能量同样也实现了均分, 如图 5(b) 所示。只调整了环形谐振腔中可调耦合介质柱半径 R , 事实上, 可调介质柱不仅仅局限于耦合介质柱, 还可以是散射介质柱或者内部介质柱。进一步的研究还表明, 改变介质柱的折射率也可以实现输出端能量的重新分布。所以在环形谐振腔耦合区中, 只要有场分布的地方, 改变介质柱的有效折射率分布, 都可使光场能量在横向上发生重新分布, 从而实现输出能量的均分或自由分配。研究的双直角 3, 4 通道 M-PCRR 显然可以推广到具有更多输出端的分束器中。

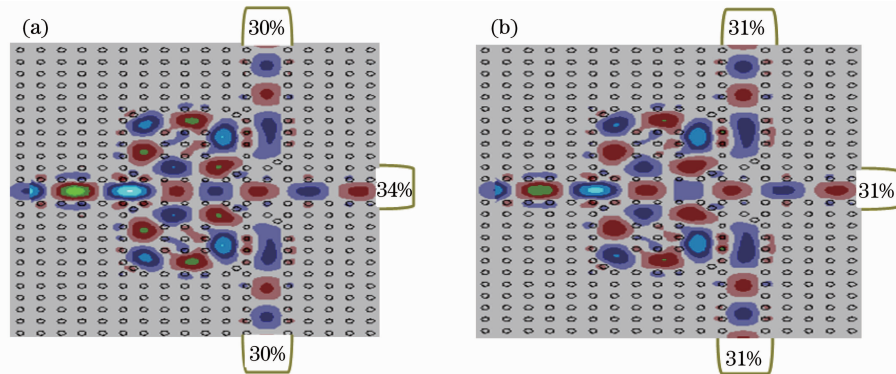


图 4 3-PCRR 分束器中光波达到稳定状态时的电场幅度分布图

Fig. 4 Electric-field intensity distribution of the 3-PCRR beam splitter in which light wave yeaches stationary state

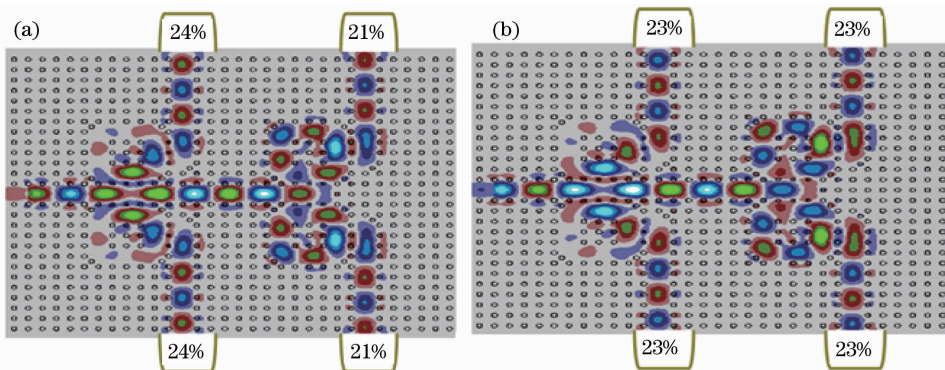


图 5 4-PCRR 分束器中光波达到稳定状态时的电场幅度分布图

Fig. 5 Electric-field intensity distribution of the 4-PCRR beam splitter in which light wave yeaches stationary state

4 结 论

提出了一种新型的基于光子晶体环形谐振腔的大角度超微多路光分束器, 仅仅通过改变耦合介质柱的有效折射率分布, 使光场发生重新分布, 便可实现输出能量的均分或自由分配。这种方法所需调制

的介质柱数目少、调节方法多样、制作简便, 更重要的是这种结构在同样满足高输出效率和多路的前提, 还可以实现光束的大角度分离。显然, 双直角 3, 4 通道 M-PCRR 可以推广到具有更多输出端的分束器中。

参 考 文 献

- 1 Eli. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission on solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 Sajeev. John. Strong localization of photons on certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 Attila. Mekis. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(18): 3787~3790
- 4 I. Park, H. S. Lee, H. J. Kim *et al.*. Photonic crystal power-splitter based on directional coupling[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(15): 3599~3604
- 5 Yu Tianbao, Wang Minghua, Jing Xiaoqing *et al.*. Ultracompact and wideband power splitter based on triple photonic crystal waveguides directional coupler [J]. *Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2007, **9**(1): 37~42
- 6 S. Boscolo, M. Midrio, T. F. Krauss. Y junctions in photonic crystal channel waveguides: high transmission and impedance matching[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(12): 1001~1003
- 7 S. Fan, S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos *et al.*. Waveguides branches in photonic crystals[J]. *Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(2): 162~165
- 8 Zhang Yao, Li Zhangjian, Li Baojun. Multimode interference effect and self-imaging principle in two-dimensional silicon photonic crystal waveguides for terahertz waves [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2679~2689
- 9 Yin Jianling, Huang Xuguang, Liu Songhao. A variable optical attenuator based on the photonic crystal waveguide[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 671~674
- 10 Zhong Yanhong, Xin Jianguo. Radio frequency excited gain waveguide array CO₂ laser with compressed single peak intensity distribution[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1030~1032
- 11 钟艳红, 辛建国. 射频激励增益波导 CO₂ 激光器的光强分布 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1030~1032
- 12 Wan Zhujun, Wu Yaming, Li Sihua. Experimental research on integrated thermo-optic switch based on multimode interference couplers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1187~1191
- 13 万助军, 吴亚明, 李四华. 基于多模干涉耦合器的集成热光开关实验研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1187~1191
- 14 Sun Yiling, Jiang Xiaoqing, Yang Jianyi *et al.*. Characteristic analysis of spatial multiwaveguide system based on weakly coupled-mode theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1781~1786
- 15 孙一翎, 江晓清, 杨建义 等. 基于弱耦合模理论的空间多波导耦合特性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(12): 1781~1786
- 16 V. Dinesh Kumar, T. Srinivas, A. Selvarajan. Investigation of ring resonators in photonic crystal circuits [J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2004, **2**(3): 199~206
- 17 M. Djavid, F. Monifi, A. Ghaffari *et al.*. Heterostructure wavelength division demultiplex using photonic crystal ring resonators[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(15,16): 4028~4032
- 18 A. Ghaffari, F. Monifi, M. Djavid *et al.*. Photonic crystal bends and power splitters based on ring resonators[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(23): 5929~5934
- 19 M. Djavid, A. Ghaffari, F. Monifi *et al.*. T-shaped channel-drop filters using photonic crystal ring resonators[J]. *Physica E*, 2008, **40**(10): 3151~3154