

文章编号:1004-4213(2010)07-1198-5

# 光子晶体环形谐振腔异质结构超微多路光分束器\*

郭浩<sup>1</sup>, 方利广<sup>1</sup>, 吴小华<sup>1</sup>, 于天宝<sup>1</sup>, 廖清华<sup>1,†</sup>, 黄永箴<sup>2</sup>

(1 南昌大学 物理系, 南昌 330031)

(2 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘要:**基于直波导和环形谐振腔的耦合特性,设计了一种新型、高效的二维光子晶体异质结构光分束器.时域有限差分法模拟表明,该设计仅仅通过改变介质柱的折射率,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.在通信波长范围,该设计结构尺寸小、分束角度大、分束率高,这些特性使其在光通信领域具有重要的应用前景.

**关键词:**光子晶体波导;分束器;能量均分;环形谐振腔

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103907.1198

## 0 引言

光子晶体是一种折射率呈空间周期性变化的新型微结构材料,由于其具有控制光子流动的奇特物理性质而备受人们的关注<sup>[1-2]</sup>.入射到光子晶体内的光波受到布拉格散射形成能带结构,能带间有带隙存在.只有频率在光子带内的光才能在光子晶体中传播,频率落在光子带隙内的光则被禁止.目前利用光子带隙已制造出多种高性能光子晶体元器件,例如光分束器<sup>[3-5]</sup>、光开关<sup>[6]</sup>、光功分器<sup>[7]</sup>、波分复用或解复用器<sup>[8]</sup>、偏振光分束器<sup>[9]</sup>和光微腔滤波器<sup>[10]</sup>.这些元器件与传统结构的光电器件相比,具有体积小、便于与激光器、探测器等有源器件集成制造光子集成电路(Photonic Integrated Circuits, PIC),而且光波在光子晶体波导转弯处传播时能实现零损耗传输及整个系统不受外界电磁场干扰等优点<sup>[11-12]</sup>.

基于环形谐振腔的光学特性而设计的各种光学元器件是 PIC 的重要组成部分,也是近两年研究的热点.基于正方晶格的环形谐振腔最早是由 Kumar<sup>[13]</sup>提出来的,它是以矩形为基本单元的正方晶格环形谐振腔,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<sup>[14-16]</sup>对基于正方晶格环形谐振腔结构做了进一步的分析.

他们主要研究了环形谐振腔中各主要参量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来实现波分解复用器.

本文以 3、4 通道为例,分析与研究了基于此结构的三角晶格光子晶体环形谐振腔光分束器.通过改变区域介质柱的有效折射率,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,可实现输出端能量的均分或自由分配.和已报道的常规波导定向耦合型分束器相比,该结构在同样保证多路和高传输效率的条件下,还可实现光束的大角度分离,而且同样可以推广到具有更多输出通道的光分束器中.这种基于光子晶体环形谐振腔异质结构超微多路光分束器的设计无疑在未来的集成光回路中具有重要的理论意义和应用价值.

## 1 数值分析

无限长介质柱按三角晶格周期性地排列在空气背景中,构成完整光子晶体.整个结构的参量选取为:背景空气折射率为 1,介质柱半径  $r=0.185a$ ,耦合介质柱  $R=0.8r$ ,其中,  $a$  为晶格常量.光子晶体的理论研究可归结为光在光子晶体中的传播问题,可以由宏观麦克斯韦方程组来求解.本文对电介质做出假设:电介质是各向同性的,于是介电常量可以看成标量;同时电介质是无磁性的,其中没有电流或电荷.经上述处理,可以得到适合于光子晶体的麦克斯韦方程组

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} + J_m \quad (2)$$

\* 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(2008GZ0006, 2007GQW2057)资助

† Tel: 0791-3969512

Email: lqhua@ncu.edu.cn

收稿日期: 2009-10-26

修回日期: 2010-01-08

以 TM 模为研究对象,采用中心差分代替式(1)、(2)中的微分,可以将麦克斯韦方程转化为迭代形式的时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)方程

$$H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) = CP(m)H_x^{n-1/2}(i, j+1/2) - CQ(m) \frac{E_z^n(i, j+1) - E_z^n(i, j)}{\Delta y} \quad (3)$$

$$H_y^{n+1/2}(i+1/2, j) = CP(m)H_y^{n-1/2}(i+1/2, j) + CQ(m) \frac{E_z^n(i+1, j) - E_z^n(i, j)}{\Delta x} \quad (4)$$

$$E_z^{n+1}(i, j) = CA(m)E_z^n(i, j) + CB(m) \cdot \frac{H_y^{n+1/2}(i+1/2, j) - H_y^{n+1/2}(i-1/2, j)}{\Delta x} - CB(m) \frac{H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - H_x^{n+1/2}(i, j-1/2)}{\Delta y} \quad (5)$$

此处, FDTD 网格尺寸是  $\Delta x = \Delta y = a/21$ , 时间步长是  $\Delta t = \Delta x / (2c)$ , 其中  $c$  为光速,  $a$  是晶格常量. 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. 因此, 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式(6)

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

这就是数值稳定条件(也称为 Courant 稳定条件), Courant 条件给出了时间步长与空间步长的关系. 为了保证迭代收敛得到稳定解, 时间步长与空间步长的选择应满足 Courant 稳定条件. 本文用有限时域差分法分别计算该光子晶体对于 TM 模和 TE 模的光子带隙, 计算发现, 对 TM 模(电场平行于介质柱), 该光子晶体在归一化频率  $a/\lambda = 0.4$  附近存在较大的光子带隙, 而对 TE 模在此归一化频率附近则不存在光子带隙.

## 2 二维三角晶格 $1 \times 3$ 环形谐振腔分束器

本文侧重对基于三角晶格环形谐振腔的多路光分束器进行研究. 通过研究光波在三角晶格环形谐振腔中的传播和耦合特性, 同时结合时域有限差分法和平面波展开法, 提出并讨论了一种新型高效的异质结构超微多路光分束器. 三角晶格环形谐振腔见图 1, 整个分束器由环形谐振腔对称临近放置在直波导的两侧构成, 如图 2. 为了减少传输模式在输出波导转弯处的衰减与损耗, 设计此结构时, 有意在输出波导的顶端额外添加了一个散射介质柱, 见图 2 中用圆圈标记的介质柱即为散射介质柱. 对弯曲波导来说, 这正如添加了一个反射镜, 可以减少向后

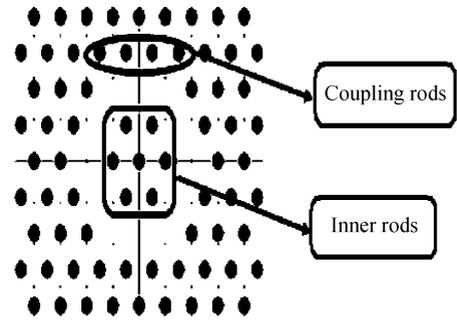


图 1 二维三角晶格光子晶体环形谐振腔  
Fig. 1 Two dimensional triangular lattice ring photonic crystal ring resonator

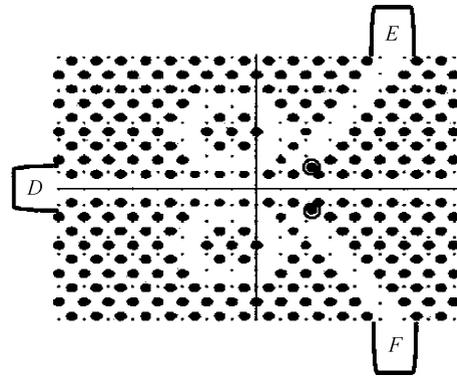


图 2 由两种介电常量的材料组成的异质结构 3-PCRR 分束器结构图

Fig. 2 Schematic diagram of beam splitters which consist of two kinds of dielectric constants for 3-PCRR

的能量反射, 计算结果表明: 添加此散射介质柱能够大大提高光束的传输效率.

选取工作频率为归一化频率  $a/\lambda = 0.4$  的高斯脉冲(若取晶格常量  $a = 0.62 \mu\text{m}$ , 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). 如果将两个环形谐振腔对称临近放置在直波导的两侧, 同时在环形谐振腔的另一侧引入一个输出波导便构成了一个有三个输出端的环形谐振腔光分束器(Photonic Crystal Ring Resonators, PCRR), 如图 2.

在 3-PCRR 分束器中, 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. 输出波导 E 和 G 中的能流相等. 图 3 给出了它的透射率与耦合介质柱材料介电常量  $\epsilon$  的关系. 对 3-PCRR 分束器, 根据计算和模拟的结果发现, 仅仅通过选择适当的材料介电常量  $\epsilon$ , 便可以实现各个端口能量的均分. 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 给出了 3-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, 当耦合介质柱材料的介电常量  $\epsilon$  为 12.04 时, 输出端 E, F 和 G 的透射率均为 30%. 需要指出的是, 为满足本文所讨论的介电常量要求, 在通信波长范围内, 介质柱材料可以选用 Si 或者 GaAs.

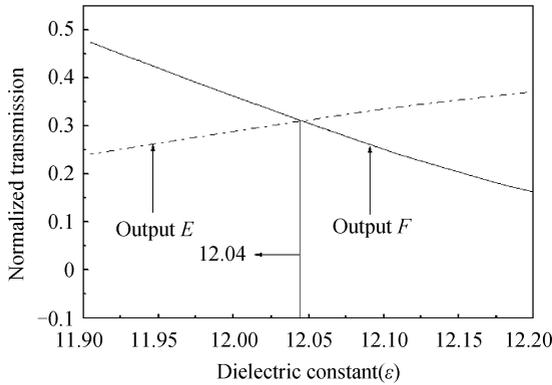


图 3 3-PCRR 分束器输出端 E 和 F 的透射率和耦合介质柱材料介电常量  $\epsilon$  的关系  
 Fig. 3 The relations between dielectric constant of the coupling rods  $\epsilon$  and transmittance of the output channels E and F in 3-PCRR beam splitter

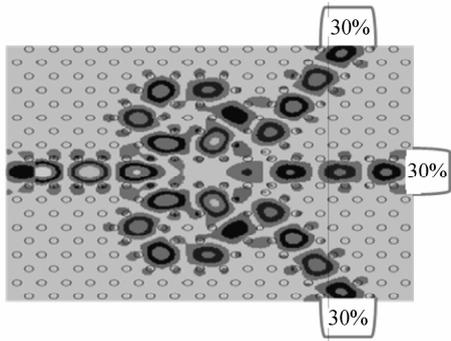


图 4 介电常量  $\epsilon$  为 12.04 且光场达到稳定状态时, 3-PCRR 分束器中的电场幅度分布图  
 Fig. 4 Electric field intensity of the 3-PCRR beam splitter when the value of dielectric constant  $\epsilon$  is 12.04

### 3 二维三角晶格 $1 \times 4$ 异质结构环形谐振腔分束器

现在进一步设计一种有四个输出端的异质结构光分束器, 它由两种折射率的介质组成(如图 5)。区域 1 和 2 材料的介电常量  $\epsilon$  分别为 11.26 和 11.97, 由于不同介质有不同的光学特性, 所以为了避免光波在两种介质的分界面产生反射, 必须考虑禁带的

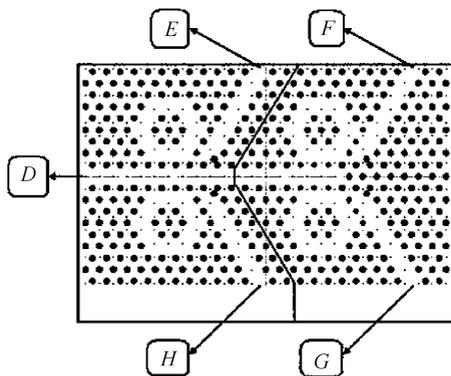


图 5 由两种介电常量的材料组成的异质结构 4-PCRR 分束器结构图  
 Fig. 5 Schematic diagram of beam splitters which consist of two kinds of dielectric constants for 4-PCRR

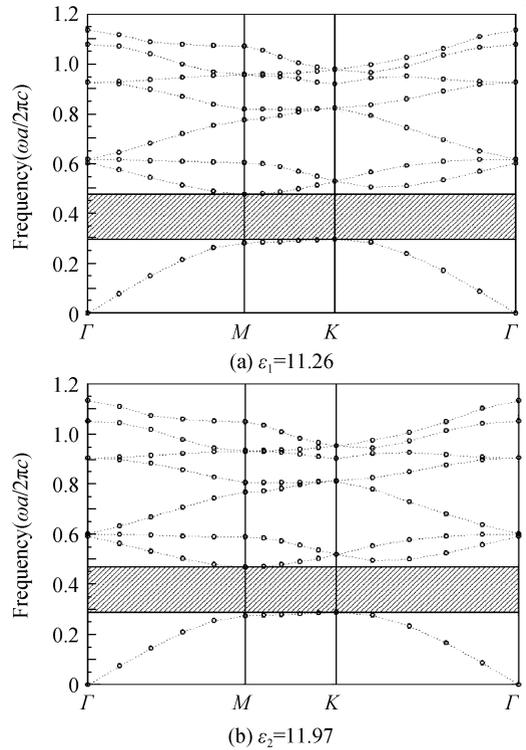


图 6 当  $\epsilon_1 = 11.26$  与  $\epsilon_2 = 11.97$  时, 二维三角晶格介质柱光子晶体 TM 模的禁带图  
 Fig. 6 Band diagrams of TM mode in two dimensional triangular lattice photonic crystal for  $\epsilon_1 = 11.26$  and  $\epsilon_2 = 11.97$

匹配问题. 对 TM 模, 用平面波展开法计算了区域 I 和区域 II 两种介质的禁带(如图 6), 分别为

$$\begin{cases} 0.2964 < a/\lambda < 0.4795 & \text{区域 I} \\ 0.2905 < a/\lambda < 0.4705 & \text{区域 II} \end{cases} \quad (7)$$

如式(6)所示, 尽管这两种介质都有自己的禁带, 但是这两个禁带有重叠的区域:  $0.2964 < \epsilon_1 < 0.4705$ , 称它为等效禁带. 在等效禁带内, 光波沿着波导在两区域内传播没有任何反射, 从而使光波在波导中的传输损耗降低到最小. 本文就是通过改变区

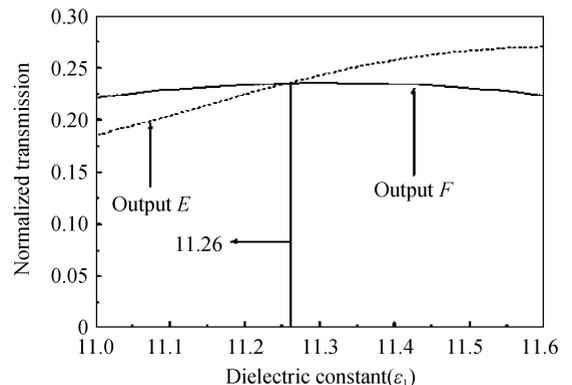


图 7 在 4-PCRR 分束器中, 输出端 E 和 F 的透射率和区域 I 介电常量  $\epsilon_1$  的关系  
 Fig. 7 The relations between dielectric constant  $\epsilon_2$  and transmittance of the output channels E and F in 4-PCRR beam splitter

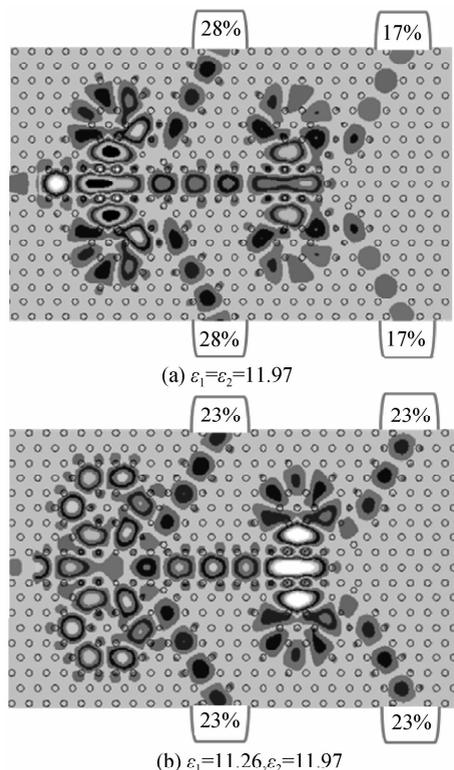


图 8 当  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 11.97$  与  $\epsilon_1 = 11.26, \epsilon_2 = 11.97$ , 光场达到稳定状态时 4-PCRR 分束器中的电场幅度分布图

Fig. 8 Electric field intensity of the 4-PCRR beam splitter with region I and II at the values of dielectric constant  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 11.97$  and  $\epsilon_1 = 11.26, \epsilon_2 = 11.97$

域 I 材料的折射率来改变光波在耦合区的耦合程度,从而实现能量的均分或自由分配.采用时域有限差分法计算和模拟光在这种 4-PCRR 分束器中的传播行为,图 7 给出了输出端 E 和 F 的透射率和区域 I 介电常量  $\epsilon_2$  的关系.假设区域 I 和区域 II 中材料的介电常量相同,即介质柱材料采用单一介质,它们均为  $\epsilon_1$ ,则当光场达到稳定状态时,4-PCRR 分束器中的电场幅度分布如图 8(a),位于前面的输出波导(分别记为 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 28%、17%、17%和 28%.

本文研究结果表明,对 4-PCRR 分束器,如果区域 I 和区域 II 的折射率相同(即由单一介质组成),各个输出波导输出的能量并不均分.在实际应用中,通常需要使分束器输出能量达到均分.现在改变区域 I 的折射率,使光波在环形谐振腔中耦合区的耦合程度发生改变,这样可以在不改变耦合长度的条件下,便可改变光场的传输和分布,从而实现输出端的能量均分或自由分配.对于 4-PCRR 分束器,维持区域 II 中的介电常量  $\epsilon_2 = 11.97$  不变,根据图 7 的计算结果,当调整区域 I 的介电常量为  $\epsilon_1 = 11.26$  时,输出端 E、F、G 和 H 的透射率均达到约 23%,三个输出端的能量达到了均分.调整介电常量后的

异质结构分束器中的电场幅度分布图如图 8(b),4-PCRR 分束器中三个输出端的能流达到了均分.

通过研究还发现:为了使各个输出端的输出能量达到均分或自由分配,区域 I 和区域 II 的折射率的取值并不是唯一的,当选择其他适当的取值时,同样可以实现能量的均分,这样就增加了对实际材料的选择范围;与此同时,对于 3-PCRR 分束器和 4-PCRR 分束器而言,在通信波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  处,整个器件的长度分别仅为  $10.54 \mu\text{m}$  和  $16.12 \mu\text{m}$ .即使该结构的光分束器在输出波导数增大的情况下,器件仍可保持尺寸微型化.由此可见,在保证尺寸微型化和能量的高效传输的前提下,嵌入了环形谐振腔的设计还可以实现光束的大角度分离.

## 4 结论

基于直波导和环形谐振腔的耦合特性,结合平面波展开法和时域有限差分法,提出并讨论了一种新型的、高效的异质结构光分束器.它是由两种或者两种以上有效折射率的介质组成,由于光波在不同折射率介质中的传输特性不同,利用异质结构的设计便可实现光场的重新分布,达到能量的均分或自由分配.和已报道的分束器相比,这种分束器具有较大的分束角度、较高的分束率和传输效率.在高密度集成光路和光通信领域可能会发挥重要作用.

### 参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission on solid-state physics and electronics[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(20): 2059-2062.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons on certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(23): 2486-2489.
- [3] YU T B, WANG M H, JIANG X Q, *et al.* Ultracompact and wideband power splitter based on triple photonic crystal waveguides directional coupler[J]. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2007, **9**(1): 37-42.
- [4] YU T B, ZHOU H F, GONG Z, *et al.* Ultracompact multiway beam splitters using multiple photonic crystal waveguides[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, **41**(9): 095101.
- [5] YANG Rui, XIE Yong-jun, JIANG Jun, *et al.* Characteristics of H-guides with bianisotropic split ring resonator metamaterials[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5):1062-1068.  
杨锐,谢拥军,蒋俊,等.含有异向介质 H 形波导的特性研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5):1062-1068.
- [6] SHARKANY A, SHI S, PRATHER D W. Electro-optical switch using coupled photonic crystal waveguides[J]. *Opt Exp*, 2002, **10**(20):048-1059.
- [7] WANG Xin-hua, WANG Bin-ke, QU Shao-bo, *et al.* Simulation of power distribution and combination in two-dimensional photonic crystals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6):1423-1426.  
王新华,王斌科,屈绍波,等.二维光子晶体功率分配与合成的仿真[J]. *光子学报*, 2009, **38**(6):1423-1426.

- [8] CHIEN F S S, HSU Y J, HSIEH W F, *et al.* Dual wavelength demultiplexing by coupling and decoupling of photonic crystal waveguides[J]. *Opt Exp*, 2004, **12**(6): 1119-1125.
- [9] LIU T, ZAKHARIAN A R, FALLAHI M, *et al.* Design of a compact photonic-crystal-based polarizing beam splitter[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, **17**(7): 1435-1437.
- [10] HITOMICHI T, YOSHIHIRO A, TAKASHI A, *et al.* In plane type channel drop filter in a two dimensional photonic crystal slab[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **84**(13): 2226-2228.
- [11] MEKIS A. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides[J]. *Phys Rev Lett*, 1996, **77**(18): 3787-3790.
- [12] LIU T, ZAKHARIAN A R, FALLAHI M, *et al.* Design of a compact photonic-crystal-based polarizing beam splitter[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, **17**(7): 1435-1437.
- [13] KUMAR V D, SRINIVAS T, SELVARAJAN A. Investigation of ring resonators in photonic crystal circuits [J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2004, **2**(3):199-206.
- [14] DJAVID M, MONIFI F, GHAFARI A, *et al.* . Heterostructure wavelength division demultiplex using photonic crystal ring resonators[J]. *Opt Commun*, 2008, **281**(15-16):4028-4032.
- [15] GHAFARI A, MONIFI F, DJAVID M, *et al.* . Photonic crystal bends and power splitters based on ring resonators [J]. *Opt Commun*, 2008, **281**(23): 5929-5934.
- [16] DJAVID M, GHAFARI A, MONIFI F, *et al.* T-shaped channel-drop filters using photonic crystal ring resonators [J]. *Physica E*, 2008, **40**(10):3151-3154.

## Heterostructure Ultracompact Multiway Beam Splitter Using Photonic Crystal Ring Resonator

GUO Hao<sup>1</sup>, FANG Li-guang<sup>1</sup>, WU Xiao-hua<sup>1</sup>, YU Tian-bao<sup>1</sup>, LIAO Qing-hua<sup>1</sup>, HUANG Yong-zhen<sup>2</sup>

(1 Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

(2 Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The design and simulation of a new and high efficiency heterostructure beam splitter are proposed based on the coupling characteristics between the waveguide and ring resonator in two dimensional photonic crystals. The splitting properties of the beam splitter are numerically studied using the finite difference time domain method. By simply tuning dielectric constant of dielectric rods and inducing the redistribution of the power of the optical field, uniform or free splitting can be achieved. It is shown that a small dimension, a large separating angle and a high beam rate are extended to have more light output channels in the beam splitter at optical communication wavelength. These features of the proposed heterostructure ultracompact multiway beam splitter make it a promising candidate in optical communications application.

**Key words:** Photonic crystal waveguides; Beam-splitter; Uniform energy distribution; Ring resonator



**GUO Hao** was born in 1984. He is graduate student and his research interests focus on photonic crystal theory and the device design based on the photonic crystals.



**LIAO Qing-hua** was born in 1968. He received his Ph. D. degree from Nanchang University in 2005. Now his research interests mainly focus on the theory and application of photonic crystals.