

# 基于光子晶体空气孔阵列的反对称多模干涉型 超微 $2 \times 2$ 光功分器

张 军<sup>1</sup> 于天宝<sup>1,2</sup> 胡爱荣<sup>1</sup> 王同标<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 南昌大学物理系, 江西 南昌 330031; <sup>2</sup> 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** 在空气孔阵列型平板光子晶体多模波导中, 探索了反对称多模干涉条件下的二重像特性, 并基于此研究和设计了一种新型的  $2 \times 2$  超微光功分器。通过调制多模干涉区内一对空气孔的有效折射率, 可以获得任意的光功率分配比。作为示例, 设计了一款 3 dB  $2 \times 2$  光功分器, 时域有限差分法的模拟结果表明, 该器件不仅具有  $16 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$  的超微尺寸, 而且具有 97% 的高输出效率。这种方法可以推广到  $M \times N$  光功分器, 在光集成回路中具有潜在的应用价值。

**关键词** 集成光学; 功分器; 多模干涉; 光子晶体波导

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s105006

## Ultracompact $2 \times 2$ Power Splitter Based on Asymmetric Multimode Interference Effect in Photonic Crystal Slab with an Air Holes Array

Zhang Jun<sup>1</sup> Yu Tianbao<sup>1,2</sup> Hu Airon<sup>1</sup> Wang Tongbiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China  
<sup>2</sup> State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

**Abstract** The properties of two-fold images based on asymmetric interference in PC slab multimode waveguide with an air holes array are investigated. With these image properties, a new kind of  $2 \times 2$  ultracompact power splitters (PSs) is designed and studied. Arbitrary splitting ratio can be achieved by modifying the effective refractive indices of one pair of air holes in the multimode region. As an example, a 3 dB ultracompact  $2 \times 2$  power splitter with a size of  $16 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ , with output efficiency as high as 97% is presented with finite-difference time-domain simulations. The method can be extended for the design of  $M \times N$  PSs and have potential application for photonic integrated circuits applications.

**Key words** integrated optics; power splitter; multimode interference; photonic crystal waveguides

**OCIS codes** 130.3120; 230.1360

## 1 引 言

光子晶体是一种介电常数在空间呈周期性变化的人工微结构材料<sup>[1,2]</sup>, 其优越特性为基于光子晶体的大规模光子集成提供了优越的功能特性, 为实现光子集成回路(PIC)带来了新的机遇。与半导体

材料中的电子在周期性势场作用下存在能带相类似, 光子晶体也具有光子能带及带隙, 频率落在带隙范围内的光将不能在其内部传播。若在光子晶体内引入某种程度的线缺陷, 光子带隙内会形成缺陷模<sup>[3]</sup>, 与缺陷模的频率相吻合的光子可以沿着线缺

**收稿日期**: 2011-06-09; **收到修改稿日期**: 2011-09-05

**基金项目**: 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(IOSKL-KF200901)、江西省教育厅科学研究课题(GJJ11301)资助课题。

**作者简介**: 张 军(1987—), 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。

zhangjun.dongguan@163.com

**导师简介**: 于天宝(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事集成光子学器件方面的研究。E-mail: yutianbao@ncu.edu.cn (通信联系人)

陷进行传播,这就是光子晶体波导。光子晶体波导由于具有传输效率高、体积小和拐弯处损耗几乎为零等优点<sup>[4]</sup>,使其在设计和制作光子器件方面受到了广泛的关注。当波导支持多个传输导模时形成光子晶体多模波导,并展现出自映像效应<sup>[5, 6]</sup>,即输入场沿着波导的传播方向被周期性地复制成单重像和多重像。多模波导具有低损耗、结构紧凑、制作简单和容差性好等优点<sup>[5]</sup>。

光功分器是组成 PIC 的重要光学元器件。已有研究提出了一款超微的基于光子晶体介质柱型多模波导的多路光功分器<sup>[7]</sup>,该功分器基于对称多模干涉(MMI)效应,2010年丹麦科研人员在光子晶体平板结构中实验证实了这类 $1 \times 3$ 光功分器<sup>[8]</sup>。但是,这种基于对称多模干涉效应受限于单路输入多路输出,难以实现多路输入输出。而反对称多模干涉效应能用来实现多路输入输出,应用于 $M \times N$ 光功分器。对于反对称 MMI 型光子器件的研究相对较少,因为当光场反对称入射到 MMI 区时能激发所有可能的模式,被激发的奇模和偶模之间的干涉效应比对称入射要复杂得多。最近,已有文献报道了光子晶体反对称多模干涉型 $2 \times 2$ 光功分器<sup>[9]</sup>。与仅具有一个输入端口的 $1 \times N$ 光功分器相比而言, $2 \times 2$ 光功分器在 PIC 结构中的应用更加重要,这种 $2 \times 2$ 耦合结构还可以用来设计环形激光器、Mach-Zehnder 干涉仪、光开关和光衬底等集成光子学器件<sup>[10~14]</sup>。

文献[9]报道的 $2 \times 2$ 光子晶体光功分器,采用的是介质柱阵列,并且提出基于空气孔阵列的该种功分器的设计思想,相比而言,光子晶体平板结构在实际的制备和应用中更广泛<sup>[8, 15, 16]</sup>。本文将详细讨论基于光子晶体空气孔阵列的超微 $2 \times 2$ 光功分器,它的

原理亦是基于光子晶体多模波导中的反对称 MMI 效应。通过调制多模干涉区内的一对空气孔的有效折射率,可以获得任意的光功率分配比。作为示例,设计了一款 3 dB  $2 \times 2$  光功分器,时域有限差分法(FDTD)的模拟结果表明,该器件不仅结构超微,而且输出效率高达 97%。这种方法可以推广到 $M \times N$ 光功分器,在 PIC 中具有潜在的应用价值。

## 2 模型与分析

图 1 给出了基于反对称 MMI 原理设计的 $2 \times 2$ 光子晶体光功分器的结构模型,由输入波导、MMI 区和输出波导构成。MMI 区的耦合长度为 $20a$ 。两个圆圈表示的半径为 $R$ 的调制空气孔用来实现光功率的自由分配。为了与实际应用相接近,采用光子晶体平板结构,由空气孔按三角晶格周期性地排列在介质平板形成。空气孔的半径 $r$ 为 $0.32a$ ,其中 $a$ 为晶格常数。采用文献[15]中已经通过实验验证的结构,介质平板为 GaAs,厚度为 250 nm。这是三维结构,采用等效折射率法将其等效为二维结构进行计算<sup>[15, 16]</sup>,介质的有效介电常数等效为 8.7025。整个功分器由三部分构成:两输入单线缺陷波导、一个多模干涉区和两单线缺陷波导。单线缺陷波导是通过光子晶体平板中沿 $\Gamma K$ 方向去除一排空气孔而形成;MMI 区是由三个耦合单缺陷波导构成,每两个波导之间用一排空气孔隔开,整个 MMI 区的耦合长度为 $L$ 。两输出波导之间由三排空气孔隔开,它们之间的耦合效应可以忽略不计。由理论计算可知,该光子晶体结构仅对横电场(TE)模式具有禁带,禁带位于归一化频率 $a/\lambda=0.247 \sim 0.33$ 范围内。

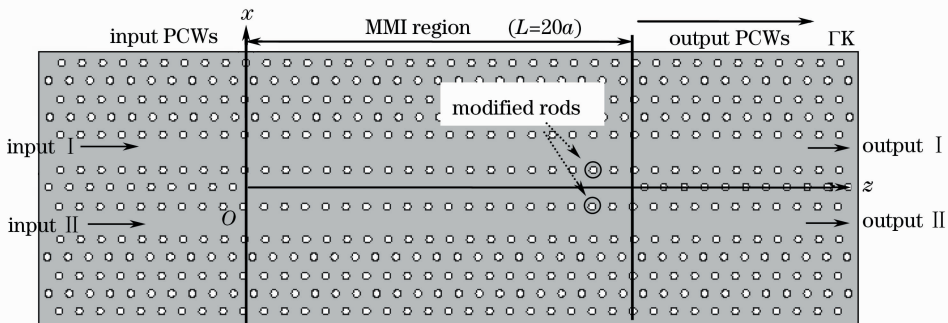


图 1 基于平板光子晶体 MMI 型 $2 \times 2$ 光功分器

Fig. 1 Diagram of the proposed multimode interference-based  $2 \times 2$  photonic crystal waveguide power splitter

采用平面波展开法计算得到的单线缺陷波导和 MMI 区的色散分布如图 2 所示,内插图 of 计算所用

的超原胞,两虚线框图为 $a/\lambda=0.264$ 时,单缺陷波导和三波导 MMI 区内模式的场分布。各模式的模场关

于  $x=0$  的镜面可以分为偶模和奇模<sup>[8]</sup>, 分别如图 2 的实线和虚线所示。从图 2(a)、(b)、(c) 可以看到, 输入区的单线缺陷波导支持两个模式: 一个偶模和一个奇模, MMI 区的三个耦合波导支持三个偶模和三个奇模, 输出区的两波导系统支持两偶模和两奇模。选择归一化频率 0.264 (如图 2 中的虚直线所示) 作为工作频率, 可以看到, 单线缺陷波导位于单模区, 多模干涉区支持多个模式。其中图 2(a) 和 (b) 中的虚线框表

示的是在该工作频率下, 单缺陷波导内和三波导 MMI 区内模式的场强分布。单缺陷波导内的模式为偶模, 但在 MMI 区的模式既有偶模又有奇模。与文献<sup>[10]</sup>中的对称多模干涉效应不同的是, 本文考虑的结构中输入波导与 MMI 区是反对称连结, TE 模场是反对称入射, 因此将激发所有可能的模式, 被激发的奇模和偶模之间产生反对称干涉效应, 进而改变输出光场的重新分布。

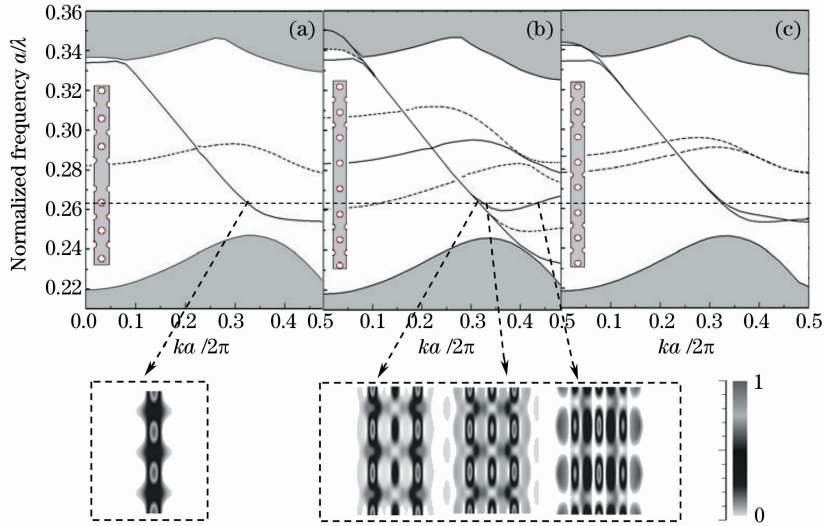


图 2 TE 模式的色散关系曲线。(a) 光子晶体单线缺陷波导; (b) 三波导 MMI 区; (c) 输出波导系统

Fig. 2 Dispersion diagram for TE polarization of (a) single line-defect PCW, (b) three MMICWs region, (c) output PCW system

利用 FDTD 方法和完全匹配层吸收边界相结合模拟光场的分布行为<sup>[17]</sup>, 空间步长设置为  $a/32$ 。模拟结果表明, 在光子晶体多模波导耦合区  $L=20a$  的位置时, 输入光功率经过多模干涉后, 分布在多模干涉区两外侧的两波导中, 因此发生功分现象, 这说明由于 MMI 效应, 光子晶体多模波导在该位置展现了入射场的二重像。选择晶格常数为  $0.41 \mu\text{m}$ ,

工作波长为  $1.55 \mu\text{m}$ , 图 3 给出了未调制前该分束器中磁场的稳态分布图。可以看到, 输入场反对称进入多模区后, 光场在 MMI 区内进行重新分布, 在  $L=20a$  处, 能量不均等地被分配到两输出通道内, 在输出波导 I 和输出波导 II 内的能量分别为 65% 和 32%, 剩余的约 3% 的能量被反射。与对称干涉时各偶模式叠加形成的对称分布的二重像不同<sup>[6]</sup>, 本文提出的反对称 MMI 结构中, 由于偶模式和奇模式均被激发, 导致了分布在两输出波导中的像不对称分布。

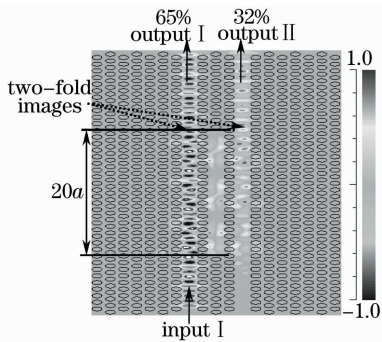


图 3 波长为  $1.55 \mu\text{m}$  的光波在未调制  $2 \times 2$  光子晶体功分器中的磁场稳态分布

Fig. 3 Steady-state magnetic field patterns at  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  in the  $2 \times 2$  PS without modulation

### 3 多功率分配比例的 $2 \times 2$ 光功分器

为了实现  $2 \times 2$  光功分器任意的光功率分配比, 引入一对半径为  $R$  的对称的有效折射率可调空气孔 (如图 1 中 MMI 区域内两个圆圈所示)。通过调制空气孔的有效折射率 (本文改变其半径  $R$ ) 可以获得任意的光功率功分比例。图 4(a) 给出了两个输出口 I 和 II 的透射率随调制空气孔半径  $R$  的变化关系。从图中可以看出, 几乎任意的光功分比例都可以得到; 当  $R$  为  $0.09a$  时, 输出口 I 与输出

端口 II 的光功率之比为 90:10,当  $R$  增加到  $0.115a$ 、 $0.165a$  和  $0.35a$  时,这一光功率比分别为 50:50、50:50和 10:90。随着  $R$  值在  $0.05\sim 0.35$  范围内变化,两输出光功率比可以覆盖任意的功分比值。实现任意光功率分配比的原因如下:MMI 区域内所有导模的叠加决定了入射场在输出通道内的场分布,通过改变调制空气孔半径  $R$  的大小(也就是改

变了调制区域的有效折射率的大小),从而使得导模在耦合区实现重新分布。值得注意的是,MMI 区内共有 20 对对称可调的空气孔,因此可以根据实际需要,选择任意一对空气孔或者组合任意对空气孔作为调制对象,实现不同的输出分光比,该结构和调制方法为实际应用的需要带来了很大的灵活性。

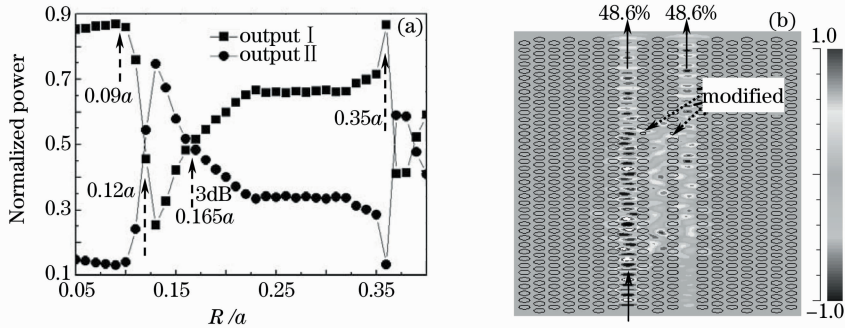


图 4 (a) 输出波导 I, II 的归一化能量与可调空气孔半径  $R$  的关系; (b) 波长为  $1.55 \mu\text{m}$  光波在优化的 3 dB  $2\times 2$  光子晶体光功分器( $R/a=0.165$ )中的磁场稳态分布图

Fig. 4 (a) Normalized power from the outputs I and II versus modified radius  $R/a$ ; (b) steady-state magnetic field patterns at  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  in an optimized 3 dB MMIPCWs-based  $2\times 2$  PS ( $R/a=0.165$ )

作为示例,选取一款 3 dB  $2\times 2$  光功分器,此时的可调空气孔半径  $R$  选择为  $0.165a$ 。图 4(b)给出了波长为  $1.55 \mu\text{m}$  的输入场在 3 dB  $2\times 2$  光子晶体光功分器中的磁场稳态分布图。经过调制后,输入场的能量在输出通道实现了平均分配,两输出通道内的输出效率均高达 48.6% (反射能量约为 2.8%)。在文献[7]提出的  $1\times N$  光功分器中,通过对称地调制耦合区两排介质柱的半径(改变其有效折射率),实现各输出通道内能量的均分和高传输效率。对比发现,本文提出的基于空气孔介质板的  $2\times 2$  光功分器,仅需调制耦合区内一对空气孔的半径就可以获得输出能量的均分和很高的传输效率。

本文提出的  $2\times 2$  光功分器结构关于  $x$  轴对称,所有以上的分析同样适用于光波从另外一个输入端口 II 入射。该光功分器的总尺寸约为  $16 \mu\text{m}\times 8 \mu\text{m}$ ,在未来光集成回路中具有潜在的应用价值。

## 4 结 论

基于光子晶体多模波导中的反对称多模干涉原理,研究了一种新型的基于光子晶体平板结构的  $2\times 2$  超微光功分器。通过调制该功分器多模干涉区内的一对空气孔的有效折射率,可以获得任意的光功率分配比。时域有限差分法的模拟结果表明,该器件的结构尺寸和输出效率分别为  $16 \mu\text{m}\times 8 \mu\text{m}$

和 97%。这种方法可以推广到  $M\times N$  光功分器,在 PIC 中具有潜在的应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission on solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 S. John. Strong localization of photons on certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 N. H. Liu. Defect modes of stratified dielectric media[J]. *Phys. Rev. B*, 1997, **55**(7): 4097~4100
- 4 A. Mekis. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(18): 3787~3790
- 5 L. B. Soldano, E. C. M. Pennings. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(4): 615~627
- 6 Yu Tianbao, Wang Minghua, Jiang Xiaoqing *et al.*. Coupling characteristics of electromagnetic waves in parallel three photonic crystal waveguides and its application[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(4): 1851~1856  
于天宝,王明华,江晓清等.三平行光子晶体单模波导的耦合特性及其应用[J]. *物理学报*, 2006, **55**(4): 1851~1856
- 7 T. B. Yu, H. Zhou, Z. Gong *et al.*. Ultracompact multiway beam splitters using multiple coupled photonic crystal waveguides [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, **41**: 095101
- 8 M. Zhang, R. Malureanu, A. C. Kruger *et al.*.  $1\times 3$  beam splitter for TE polarization based on self-imaging phenomenon in photonic crystal waveguides[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(14): 14944~14949
- 9 T. B. Yu, Q. J. Wang, J. Zhang *et al.*. Ultracompact  $2\times 2$  photonic crystal waveguide power splitter based on self-imaging

- effect realized by asymmetric interference[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(16): 1151~1153
- 10 D. S. Levy, K. H. Park, R. Scarmozzino *et al.*. Fabrication of ultracompact 3 dB  $2 \times 2$  MMI power splitters[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(8): 1009~1011
- 11 S. Y. Tseng, C. Fuentes-Henandez, D. Owens *et al.*. Variable splitting ratio  $2 \times 2$  MMI coupler using multimode waveguide holograms[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(14): 9015~9021
- 12 T. Liu, Y. Zhang. All-fiber Fourier filter flat-top interleaver design with specified performance parameters[J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(11): 3172~3178
- 13 Q. J. Wang, Y. Zhang, Y. C. Soh. Efficient structure for optical interleavers using superimposed chirped fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(2): 387~389
- 14 Y. Dong, H. He, W. Hu *et al.*. Photonic microwave phase shifter/modulator based on a nonlinear optical loop mirror incorporating a Mach-Zehnder interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(7): 745~747
- 15 Y. Tanaka, H. Nakamura, Y. Sugimoto *et al.*. Coupling properties in a 2-D photonic crystal slab directional coupler with a triangular lattice of air holes[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(1): 76~84
- 16 M. Qiu. Effective index method for heterostructure-slab-waveguide-based two-dimensional photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(7): 1163~1165
- 17 A. Taflove, S. C. Hagness. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method [M]. Second Edition, Boston: Artech House, 2000

栏目编辑：殷建芳