

光子晶体波导定向耦合功分器的设计

高永锋¹ 周 明² 周 骏³ 许孝芳¹

¹ 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013
² 江苏大学光子制造科学与技术中心, 江苏 镇江 212013
³ 宁波大学理学院物理系, 浙江 宁波 315211

摘要 将相互耦合的 3 平行光子晶体单模波导看成一个多模干涉系统, 通过研究二维正方晶格光子晶体波导多模干涉的自映像效应, 优化设计了一种新型 1×2 光子晶体波导定向耦合分束器, 采用时域有限差分法对其传输特性进行模拟分析。设计过程中, 根据多模干涉耦合区中周期出现的双重像的位置确定两个单模输出波导的位置, 通过改变输出波导和耦合区连结的一个介质柱位置构成波导微腔结构, 改变耦合区中的模场分布, 实现模式匹配, 从而明显减小分束器的反射损耗。计算结果表明, 移动介质柱距离输出单模波导和多模波导连结处 $1.85a$ 位置处时, 对于波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的入射光, 该分束器的透射率可高达 99.04% 。

关键词 集成光学; 光子晶体波导; 功分器; 自成像效应; 多模干涉; 微腔

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0505003

Design of Power Splitter by Directional Coupling between Photonic Crystal Waveguides

Gao Yongfeng¹ Zhou Ming² Zhou Jun³ Xu Xiaofang¹

¹ School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China
² Center for Photon Fabrication Science and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China
³ Department of Physics, Faculty of Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

Abstract In the design process of a novel photonic crystal 1×2 power splitter, the coupling of three parallel photonic crystal waveguides can be considered as a multimode interference system in the two-dimensional square photonic crystal. The positions of output waveguides are decided by the positions of periodic twofold image which are formed by the self-imaging effect of multimode interference. The transmission characteristics of the splitter are investigated by using the finite-difference time-domain method. The reflective losses obviously decrease by shifting a dielectric rod in the junction between the multimode waveguide and single-mode output waveguide, and microcavity is constituted, which varies and matches the mode field of the coupling zone. The results show that the transmittance of this splitter can be as high as 99.04% for $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ when the shifted dielectric rod is in the position of $1.85a$ from the junction between the multimode waveguide and single-mode output waveguide.

Key words integrated optics; photonic crystal waveguide; power splitter; self-imaging effect; multimode interference; microcavity

OCIS codes 130.5296; 230.0230; 230.7390

收稿日期: 2011-01-04; 收到修改稿日期: 2011-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(50975129)、江苏高校优势学科建设工程、宁波市自然科学基金(2008A610001)和江苏大学高级人才基金(07JDG074)资助课题。

作者简介: 高永锋(1969—), 男, 博士研究生, 主要从事光子晶体波导、光通信器件设计与制备技术等方面的研究。

E-mail: absygf69@163.com

导师简介: 周 明(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事超快超强激光应用、光电子技术与器件、微/纳制造与测试技术等方面的研究。E-mail: zm2109@126.com

1 引言

光子晶体是按晶体的对称性制备的周期性介电结构^[1,2],其最基本特征是具有光子带隙,频率落在带隙内的光不能通过。在完整的光子晶体中引入线缺陷成为光子晶体波导,光沿着线缺陷传播且可以在弯曲处实现零损耗传输^[3]。当光子晶体中有两个或两个以上线缺陷波导时,这些波导之间会发生定向耦合^[4,5]。

光分束器是复杂光子集成电路中重要的光学组成元器件,利用波导定向耦合结构可以设计高效的光分束器。光子晶体波导定向耦合器与传统波导定向耦合器相比,具有体积小、性能优异,更利于大规模的集成,可用来制作光功分器、光开关、波分复用或解复用器等。近年来,光子晶体波导分束器成为国内外众多学者研究的热点,通过多种方法提高其透射率、带宽等特性。于天宝等^[6]通过改变耦合区的介质柱半径的方法得到3 dB分束器。本课题组已发表的研究论文^[7]采用基于自映像效应的多模干涉光波导分束器,通过只改变一个介质柱半径的方法,使其透射率得以提高。郭浩等^[8]提出了一种基于光子晶体环形谐振腔的大角度超微四分支光分束器结构。国外通过在Y结处引入半径小的介质柱提高其传输特性的光子晶体分束器^[9]已有报道,A. Ghaffari等^[10]采用光子晶体波导和环形谐振腔的耦合实现T型分束器,M. K. Moghaddam等^[11]通过改变定向耦合光子晶体波导间孔的排列结构和孔的大小来实现减小耦合长度的目的。

1836年,H. F. Talbot^[12]发现用一单色平面波照明具有周期结构的透明物体时,在物体后面周期性距离的平面上,形成与该物相似的条纹或波带图样,人们把这种因物体横向周期结构所产生的衍射场在纵向所表现出的周期现象称为塔尔博特效应,又称自成像现象^[13]。1973年O. Bryngdan^[14]提出均匀折射率平板波导的自映像效应,在此基础上人们研制了多模干涉耦合器,自映像效应是多模波导的一个重要特性^[15,16]。本文以多模干涉原理为基础,研究3个平行光子晶体单模波导的相互耦合,根据自成像效应产生周期性多重像的位置确定输出波导位置,通过在耦合区设置介质柱构成微腔结构,改变耦合区中的模场分布,实现模式匹配,减小分束器的反射损耗,提高功分器的透射率。设计完成带有微腔结构光子晶体波导定向耦合1×2功分器,不仅对波长为1.55 μm的入射波透射率高达99.04%,而且在1.50~1.60 μm宽波谱范围内都具有很高的透射率。

2 平行单模光子晶体波导间耦合特性

基本结构参数为:采用空气中的二维正方晶格光子晶体,晶格常数 $a = 0.62 \mu\text{m}$,介质柱(GaAs)折射率为3.4,介质柱半径 $r = 0.18a$,移去一排介质柱形成单模光子晶体波导。选取合适的超原胞,采用平面波展开法^[17],图1给出了该单模光子晶体波导TM模式(电场平行于介质柱)的色散关系曲线,黑色部分为允许带,白色部分为光子禁带,对应归一化频率 $a/\lambda = \omega a/(2\pi c)$,光子带隙分布在0.302~0.444之间,其中 λ 为真空中的波长, β 为波矢, $\beta a/(2\pi)$ 为归一化波矢。从图1中还可以看到,由 $\omega a/(2\pi c) = 0.314$ 延伸到 $\omega a/(2\pi c) = 0.440$ 只存在一种传播模式。

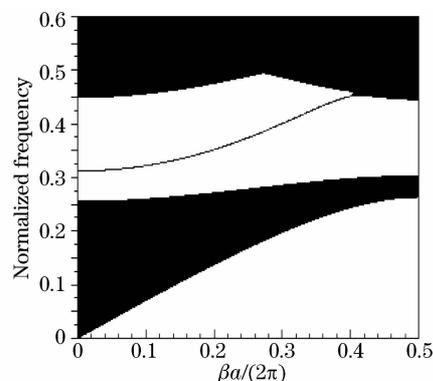


图1 光子晶体单模波导色散关系曲线图

Fig. 1 Dispersive curves of photonic crystal monomode waveguide

考虑如图2所示的3个邻近且平行的光子晶体波导的相互耦合,组成多模干涉型光子晶体波导,其对应的色散关系如图3所示。由于各光子晶体波导的缺陷模之间相互耦合,1个缺陷模分裂成3个本征传播模式,其中零阶模和二阶模的模式具有偶对称性(相对于入射位置),一阶模具有奇对称性。

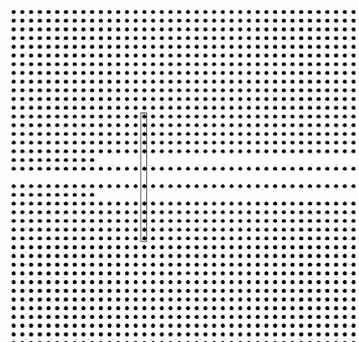


图2 三平行单模光子晶体波导

Fig. 2 Diagram of three paralleling photonic crystal waveguides

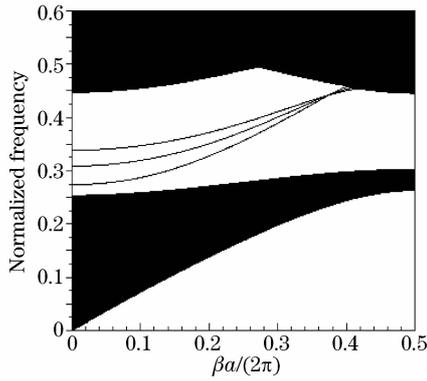


图3 光子晶体多模波导色散关系曲线图

Fig. 3 Dispersive curves of photonic crystal

3 多模干涉光子晶体波导理论分析

考虑入射光波从 $z=0$ 处进入多模波导后,将在波导中激发多个本征模式,并发生模间干涉。根据导模传输法,将导模展开成所有波导本征模式的叠加

$$\Psi(z, x) = \sum_{i=0}^{m-1} c_i \phi_i(x) \exp(-j\beta_i z), \quad (1)$$

$(i = 0, 1, \dots, m-1)$

式中 c_i 为场激励系数, $\phi_i(x) \exp(-j\beta_i z)$ 为传播常数 β_i 的模场, i 为模式的阶数, m 为模式数。在输出端 $z=L$ 处,由于各本征模产生不同相移,叠加光场在 $z=L$ 处的分布为

$$\Psi(L, x) = \sum_{i=0}^{m-1} c_i \phi_i(x) \exp(-j\beta_i L), \quad (2)$$

可见由于多个模式间发生干涉,光场将形成新的分布,因此能量在空间的分布情况也随相干长度发生变化。如果 Ψ 满足

$$\Psi = \Psi(L, x) = \Psi(0, x), \quad (3)$$

则输入场单重像出现在 L 处。由于模场分布的对称性可以得到单重像分布的位置为

$$L = 2\pi k / (\beta_0 - \beta_2), \quad (k = 1, 2, 3 \dots) \quad (4)$$

同理可以得到双重像位置的分布为

$$L = (2k-1)\pi / (\beta_0 - \beta_2). \quad (k = 1, 2, 3 \dots) \quad (5)$$

由图3可知,在频率为 $0.4[\omega a / (2\pi c)]$ 处,零阶模和二阶模的传播常数 $\beta_0 = 0.315 \times 2\pi/a$, $\beta_2 = 0.275 \times 2\pi/a$ 。由(4)和(5)式可以得到单重像第一次出现在距单模波导和多模波导相交处 $24.75a$ 的地方,双重像第1次出现在 $12.37a$ 的地方。

当一束归一化频率 $\omega a / (2\pi c) = 0.4$ 的高斯光束进入多模波导区时,采用时域有限差分法模拟多模波导内时间平均坡印亭矢量分布如图4所示。从

图4可以看到在二维光子晶体多模波导内交替出现单重像和双重像:单重像第一次出现在距单模波导和多模波导相交处 $15.43 \mu\text{m}$, 即 $24.88a$ 的地方,双重像第一次出现在距单模波导和多模波导相交处 $7.69 \mu\text{m}$, 即 $12.4a$ 的地方,可见理论计算得到的数值和模拟结果吻合。

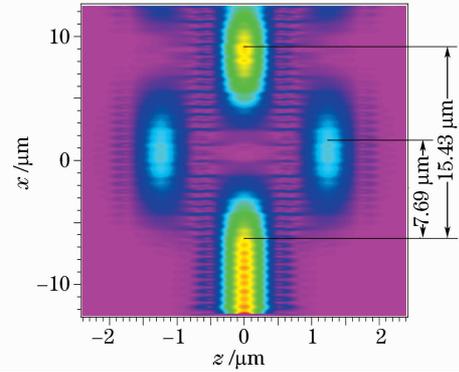


图4 光子晶体多模波导在归一化频率为0.4处的坡印亭矢量

Fig. 4 Poynting vector distribution of photonic crystal when normalized frequency is 0.4

4 光子晶体波导微腔定向耦合 1×2 功分器的设计及性能优化

设计的光子晶体波导定向耦合 1×2 分束器结构如图5所示,该结构由一个单模输入波导、多模干涉耦合波导及二单模输出波导3部分构成,单模输入波导位于多模波导的中心处,即对称进入多模区,多模干涉波导的长度为 $13a$, 宽度为 $6a$, 两个单模输出波导间距为 $3a$ 。

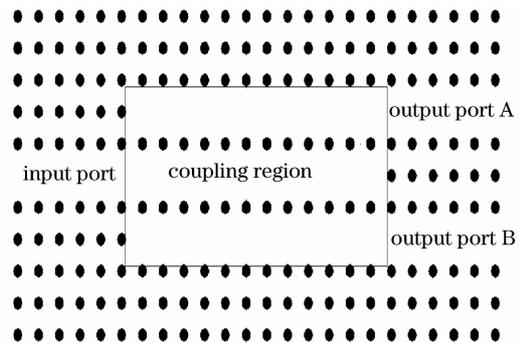


图5 光子晶体波导功分器结构

Fig. 5 Diagram of photonic crystal waveguide power splitter waveguide

采用时域有限差分法和完全匹配层吸收边界条件,对该结构的透射谱特性进行计算,结果如图6所示。由图6可知存在透射率较大的 $1.5 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 和 $1.7 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 两个波带,其中对于光通信波长为

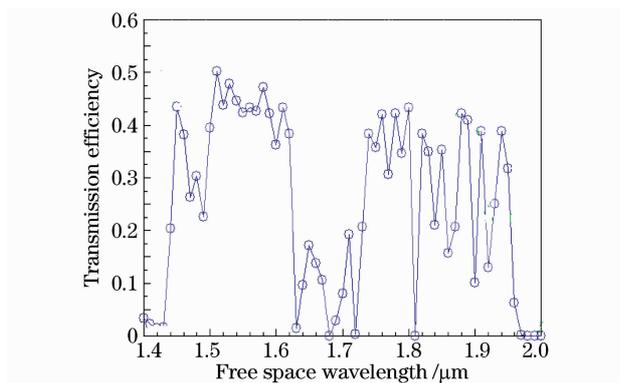


图 6 光子晶体波导方向耦合功分器优化前的透射谱
Fig.6 Transmission spectrum of photonic crystal waveguide directional coupling power splitter before optimizing

1.55 μm 的入射光,每个输出端口透射率为42.4%,总的透射率为84.8%,可见反射损耗较大,主要是由于双重像第一次出现在多模波导7.69 μm ,即12.4a的地方,而在光子晶体分束器的结构设计中,由于光子晶体的周期性,采用13a作为多模波导的长度,这样由于模式之间的失配引起的多模波导和单模波导连结处的反射致使透射率不高。

耦合区的3个平行单模光子晶体波导通过相邻介质柱实现相互耦合,耦合特性由介质柱的性质决定,一种方法^[6]可通过调节耦合区两排介质柱的折射率和半径来改变耦合区电磁场的相位分布,实现模式匹配,控制输出端口的能量分布,提高其透射特性。采用通过在耦合区中插入一个介质柱C,如图7所示,可减小模式失配带来的损耗。图8是插入一个介质柱C在不同位置处对归一化频率 $\omega a/(2\pi c) = 0.4$ (即波长为1.55 μm) 的入射光透射率曲线,可以看出,透射率随介质柱在不同位置处的变化情况,当介质柱C在距离输入单模波导和多模波导连结处5.5a位置处时,每个输出端口透射率

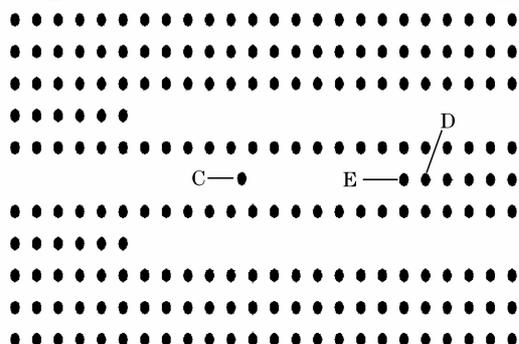


图 7 光子晶体波导微腔功分器结构
Fig.7 Diagram of photonic crystal waveguide microcavity power splitter

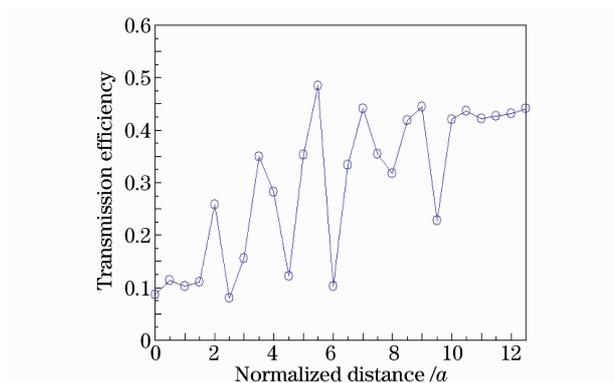


图 8 光子晶体波导功分器透射率随介质柱 C 位置的变化
Fig.8 Transmission of photonic crystal waveguide power splitter as a function of the positions of rod C

为48.61%,总的透射率高达97.22%。可见,通过在耦合区特定位置处插入介质柱,可以明显提高其透射率。从图8可以看出,透射特性随插入位置剧烈变化,为此研究介质柱C在5.5a位置处时在1.50~1.60 μm 范围内的透射谱特性,结果如图9所示。其透射带宽较窄,只是在很窄波谱范围内有高的透射率,透射率的增加以牺牲带宽为代价。当然,其潜在的应用可以构成窄带滤波分束器,考虑宽带宽分束器的设计,为此考虑去掉介质柱C,而只改变介质柱D的半径,这样构成具有微腔结构的分束器。图10是介质半径改变时,分束器的一个端口透射率随半径的变化关系,横坐标是介质柱D半径与其他介质半径的比值,纵坐标为不同归一化半径时,入射波长为1.55 μm 的透射率。由图10可知,介质柱D的半径为零,即移去介质柱D时,透射率最大为50%,即总的透射率最大为100%,其波谱特性如图11所

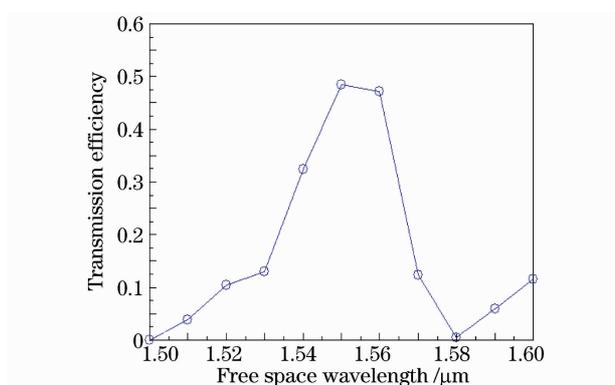


图 9 插入介质柱 C 在 5.5a 位置处光子晶体波导方向耦合功分器的透射谱
Fig.9 Transmission spectrum of photonic crystal waveguide directional coupling power splitter after inserting rod C at the position of 5.5a

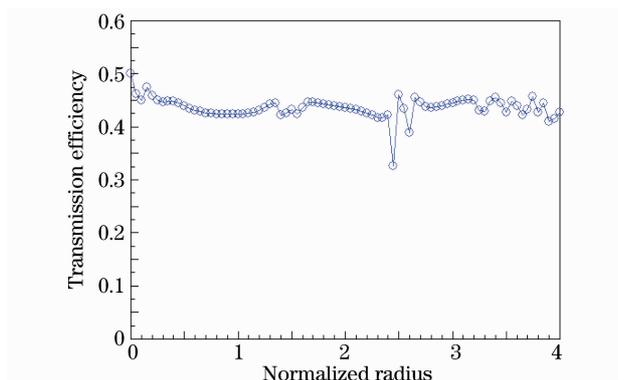


图 10 光子晶体波导功分器透射率随介质柱 D 归一化半径的变化

Fig. 10 Transmission of photonic crystal waveguide power splitter varying with the normalized radius of rod D

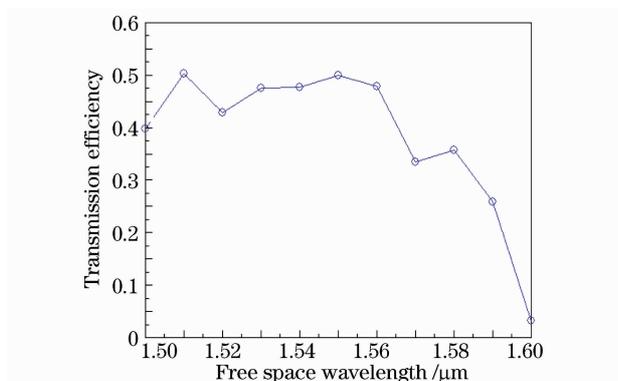


图 11 介质柱 D 半径为 0 时光子晶体波导方向耦合功分器的透射谱

Fig. 11 Transmission spectrum of photonic crystal waveguide directional coupling power splitter when the radius of rod D is 0

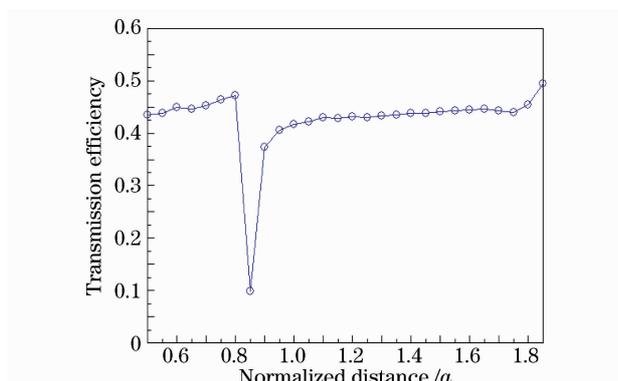


图 12 光子晶体波导功分器透射率随介质柱 E 位置的变化

Fig. 12 Transmission of photonic crystal waveguide power splitter varying with the position of rod E

示,结果显示此时透射率和带宽都比采用插入介质柱 C 的方法要大,但在 $1.56\sim 1.60\ \mu\text{m}$ 范围内,透射

率仍然很小。为了在 $1.50\sim 1.60\ \mu\text{m}$ 范围都要有很高的透射率,经过多次优化发现只采用将介质柱 E 前移一段距离构成微腔结构,即不采用插入介质柱 C 和不改变介质柱 D 的办法得到微腔,得到对波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 入射波透射率与介质柱 E 位置的关系曲线结果如图 12 所示。由图 12 可知,在介质柱位置向前移动 $1.85a$ 的距离透射率最大为 49.52% ,即总透射率为 99.04% 。同样需要考虑其在 $1.56\sim 1.60\ \mu\text{m}$ 范围内的透射率,结果如图 13 所示,在 $1.50\sim 1.60\ \mu\text{m}$ 波长范围内其透射率均有很高的值,明显好于以上两种方案。

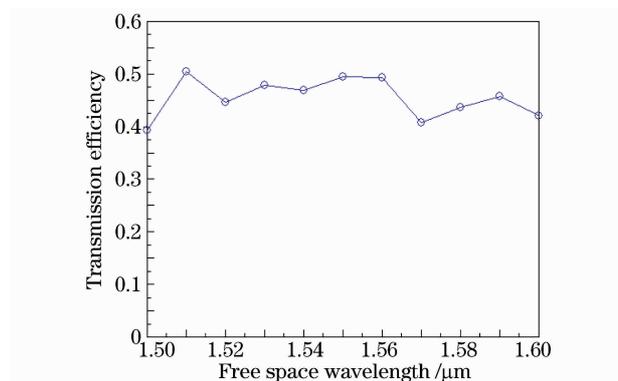


图 13 介质柱 E 在 $1.85a$ 位置光子晶体波导方向耦合功分器的透射谱

Fig. 13 Transmission spectrum of photonic crystal waveguide directional coupling power splitter when the position of rod E is $1.85a$

图 14 是优化后,即介质柱前移 $1.85a$ 的距离时,分束器对波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 的入射波的时间平均坡印亭矢量分布。A, B 两个端口均有 49.52% 的能量从端口输出,实现能量高效均分。

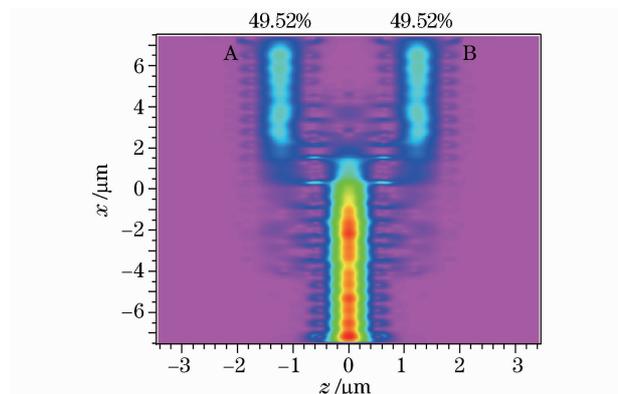


图 14 优化后光子晶体波导方向耦合 1×2 功分器的坡印亭矢量分布

Fig. 14 Poynting vector distribution of photonic crystal waveguide directional coupling 1×2 power splitter after optimizing

5 结 论

把3个平行光子晶体单模波导的相互耦合看成一个多模干涉系统,根据多模干涉耦合的自成像效应产生周期性二重像的位置,确定输出波导位置,通过在耦合区只需改变一个介质柱的位置相较改变整个耦合区介质柱的半径的方法,不仅制备上容易实现,而且传输效率高。通过优化设计,得到不需插入介质柱C和改变介质柱D的半径,而只需通过将介质柱E前移 $1.85a$ 的距离构成带有微腔结构的分束器,设计完成的光子晶体波导定向耦合 1×2 功分器,对于波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的入射光,该分束器的透射率不仅由优化前的84.8%提高到优化后的99.04%,而且在 $1.50 \sim 1.60 \mu\text{m}$ 波长范围内均有很高的透射率。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 S. Johns. Strong localization of photon in certain disordered dielectric super lattice [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 A. Mekis, J. C. Chen, I. Kurland *et al.*. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(18):3787~3790
- 4 Chen Shuwen, Zhu Guixin, Yu Tianbao *et al.*. 1×3 beam splitter based on photonic crystal waveguides directional coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10):2898~2904
陈淑文,朱桂新,于天宝等. 光子晶体波导定向耦合型 1×3 光分束器[J]. 光学学报, 2009, **29**(10):2898~2904
- 5 Song Junfeng, Chang Yuchun, Wang Haisong *et al.*. Transmission characteristic of photonic crystal waveguide [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):711~713
宋俊峰,常玉春,王海嵩等. 光子晶体光波导传输特性研究[J]. 中国激光, 2002, **A29**(8):711~713
- 6 Yu Tianbao, Wang Minghua, Jiang Xiaoqing *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
- 7 Gao Yongfeng, Zhou Jun. Design of photonic crystal waveguide splitter based on self-imaging effect [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(9):2160~2164
高永锋,周 骏. 基于自映像光子晶体波导分束器的设计[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(9):2160~2164
- 8 Guo Hao, Wu Ping, Yu Tianbao *et al.*. Design of large separating angle ultracompact multiway beam splitter based on photonic crystal ring resonators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5):1501~1505
郭 浩,吴 评,于天宝等. 光子晶体环形谐振腔大角度超微多路光分束器的设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(5):1501~1505
- 9 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
- 10 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
- 11 M. K. Moghaddam, A. R. Attaria, M. M. Mirsalehi. Improved photonic crystal directional coupler with short length [J]. *Photonics and Nanostructures—Fundamentals and Applications*, 2010, **8**(1):47~53
- 12 H. F. Talbot. Facts relating to optical science No. IV [J]. *Philos. Mag. J. Sci.*, 1836, **9**(56):401~407
- 13 Lord Rayleigh. On copying diffraction-gratings, and on some phenomenon connected therewith [J]. *Philos. Mag.*, 1881, **11**(67):196~205
- 14 O. Bryngdanl. Image formation using self-imaging techniques [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1973, **63**(4):416~419
- 15 R. Ulrich. Image formation by phase coincidences in optical waveguides [J]. *Opt. Commun.*, 1975, **13**(3):259~264
- 16 R. Ulrich, G. Ankele. Self-imaging in homogeneous planar optical waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **27**(6):337~339
- 17 S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos. Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis [J]. *Opt. Express*, 2001, **8**(3):173~190