

# 基于定向耦合效应设计可以任意弯曲的二维光子晶体分束器

郑改革<sup>1</sup> 李国萍<sup>2</sup> 蒋立勇<sup>1</sup> 李海鹏<sup>1</sup> 王海林<sup>1</sup> 李相银<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094  
<sup>2</sup>中国电子科技集团第二十八研究所莱斯大型电子系统工程有限公司, 江苏 南京 210007)

**摘要** 利用二维光子晶体的自准直和定向耦合效应设计了一种由一个自准直区域、耦合区和两个周期性介质波导组成分束器,利用平面波展开法从理论上研究了耦合区的色散关系,计算得到了耦合长度,同时使用时域有限差分方法模拟了电磁波在其中的传输特性,得到了稳态的电场分布,讨论了光波从自准直区域到光子晶体波导高效耦合的技术。结果表明:在相位匹配条件下,从自准直区域传播到耦合区域的电磁波可以有有效的分束到两个周期性介质波导中,同时能够弯曲任意角度,而且透射率保持在 90% 以上。最后,在设计的分束器基础上提出了一种增大点源和像点之间距离的方法。

**关键词** 集成光学; 光子晶体分束器; 同向耦合; 自准直

**中图分类号** TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092906.1649

## Arbitrarily Bent Beam Splitter Using Photonic Crystal Co-directional Coupling Mechanism

Zheng Gaige<sup>1</sup> Li Guoping<sup>2</sup> Jiang Liyong<sup>1</sup> Li Haipeng<sup>1</sup> Wang Hailin<sup>1</sup> Li Xiangyin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)  
<sup>2</sup> Nanjing Large Scale Electronics System Engineering Co., Ltd., The 28th Research Institute,  
China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

**Abstract** By utilizing the self-collimation and co-directional coupling mechanism, an arbitrarily bent beam splitter is designed and analyzed theoretically, which is composed of a self-collimation zone, a coupled zone and two periodic dielectric waveguides. Dispersion relation in the coupled zone is analyzed theoretically using plane-wave expansion method, and the coupled length is calculated. The transmission character of electromagnetic wave in splitter is simulated by finite-difference time-domain simulations, and the steady electric field distribution is obtained. Effective coupling technique of coupling lightwave from self-collimation zone to coupled zone is discussed. The result shows that if the phase matching conditions are satisfied the light can be injected into the coupling section and transferred into the two output branches efficiently, the angle can be bent to arbitrary value, and the transmittance is above 90%. A new method which enlarges the distance of point source and image point based on the designed splitter is proposed.

**Key words** integrated optics; photonic crystal beam splitter; co-directional coupling; self-collimation

## 1 引 言

如今,越来越多的研究人员研发了各种基于二维光子晶体<sup>[1,2]</sup>的光电元件,例如波导<sup>[3~5]</sup>、功率分离器<sup>[6,7]</sup>、微腔滤波器<sup>[8,9]</sup>、光纤<sup>[10,11]</sup>等,这些基于光

子晶体的光学元器件同传统的器件比较,显示出了尺寸小、结构更紧凑的优点。例如:光子晶体波导(PCW),可以在微纳米尺寸导光并且保持着很高的传输效率,这是传统的电介质波导不能做到的。但

收稿日期: 2008-08-25; 收到修改稿日期: 2008-11-19

作者简介: 郑改革(1984—),男,博士研究生,主要从事二维光子晶体器件设计方面的研究。E-mail: eriot@126.com

导师简介: 李相银(1949—),男,教授,博导,主要从事半导体激光器和纳米材料的光学特性研究。

E-mail: xyl@mail.njust.edu.cn

是,PCW 也有其缺点:第一,大角度弯曲导致内部反射,影响传输效率;第二,PCW 的取向必须同光子晶体的晶格方向一致,致使它不能够任意弯曲;第三,PCW 必须有很大的光子晶体区域作为基底(至少有几个晶格常量)来减少损耗,占据很大的空间。这些对于纳米集成光路的实现都是不利的。

光子晶体定向耦合器(PCW-DC)是利用两段并列光子晶体波导实现耦合功能的器件。最近,基于定向耦合效应的光子晶体的分束器和光开关被设计出来<sup>[12~15]</sup>。文献[12]基于多模干涉,设计了一种  $1 \times 2$  波导分束器。文献[14]设计并且理论分析了一种由三个周期介质波导分支结构组成的分束器。但 these 文章中都没有详细讨论输入波导的结构,以及所用光源的类型。

在此基础上,本文设计了一种可以任意弯曲的二维光子晶体分束器。基于平面波展开法(PWE)研究了并列 PCW 的色散特性和光波的工作模式,确定了 PCW 的耦合长度;使用时域有限差分(FDTD)法模拟仿真了光波在该定向耦合器中传输和工作模式的演变过程,讨论了光波从自准直区域到光子晶体波导高效耦合的技术,给出了能够任意弯转的光子晶体分束器的单元结构。

## 2 分束器设计

图 1 为所设计的分束器的示意图。无需引入线缺陷或非线性材料,自准直效应能有效地限制光子晶体中传输光波的空间展宽,使其无衍射的准直传播。基于自准直效应很容易实现光波的低损耗传输<sup>[16]</sup>、大角度折弯和任意分束比的光分束<sup>[17]</sup>,因而这里选取自准直光子晶体区域做为分束器的输入端。自准直区域可以由空气中的介质柱或介质上的空气孔组成,这里我们考虑空气中二维正方格子排列的圆柱体系,圆柱半径  $R=0.35a$ ,介电常数为 11.56,其中  $a$  为晶格常数,文中只选择  $E$  偏振模式来分析。为了寻找自准直发生的频率范围以及光传播的方向,我们利用平面波展开法计算了光子晶体的等频图,如图 2 所示。

在光子晶体中,群速度的定义为  $V_g = \nabla_k \omega(\mathbf{k})$ ,  $\mathbf{k}$  为布洛赫波矢。从该定义可知,群速度矢量垂直与等频图并指向频率增加的方向。可以证明,能流矢量  $V_e = V_g$ ,光子晶体中折射波的传播方向也即群速度的方向。

平坦的等频图表明在频率  $f=0.194(c/a)$  时,TE 模可以在此结构中沿着  $\langle 11 \rangle$  方向无发散的准直

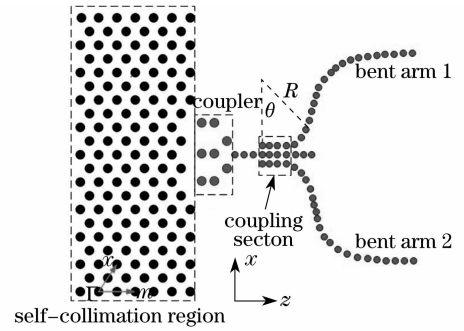


图 1 分束器结构,包含一个自准直区域、一个耦合器、一个耦合区以及两个任意弯曲的波导, $\theta$  代表弯曲的角度  
Fig. 1 Structure of the PDWBS. It consists of a self-collimation region, a coupler, a coupling section, and two arbitrarily bent arms

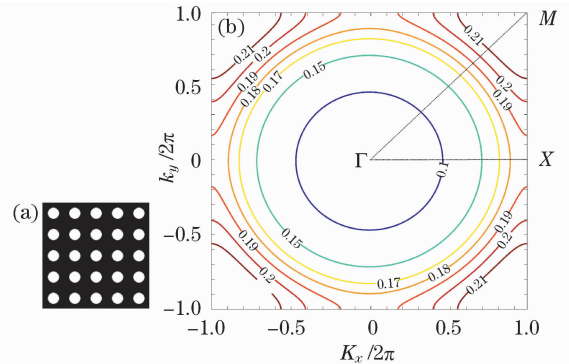


图 2 (a) 二维光子晶体结构。(b) 第一能带波矢量空间中的等频线图

Fig. 2 (a) 2D photonic crystal consisting of a square lattice of cylindric air holes in silicon. (b) Equal frequency contours of the first band in the wave-vector space for TE modes

传输。耦合器部分我们选取同样的介电材料以及相同的介质柱半径,目的是为了提提高耦合效率。

可以通过平行对称波导的本征模式理论来分析同向耦合效应<sup>[18]</sup>。平行波导的本征模由于对称性可以分解为奇偶模

$$\Psi_{\pm}(x, z) = f_{\pm}(x, z)e^{ik_{\pm}z}, \quad (1)$$

其中“ $\Psi_{+}$ ”,“ $\Psi_{-}$ ”分别代表偶模和奇模。 $f_{\pm}(x, z)$  是一个实函数,所以其强度满足下式: $f_{\pm}(x, z) = \pm f_{\pm}(-x, z)$ 。对于光子晶体波导, $f_{\pm}(x, z)$  相对于  $z$  来说是一个周期函数, $k_{\pm}$  则是偶模和奇模在传播方向上的波数。耦合区域介质柱的半径为  $0.245a$ ,当宽度  $L_y = 1.6a$ ,计算的色散关系如图 3 所示。导播模式数同介质柱的行数是相同的,当自准直区域的一个模式传播到耦合区时,就会发生模式交换现象。

对于这样一个定向耦合模型,从自准直区域传播过来的模式会被激发为有着不同波矢量的两个模

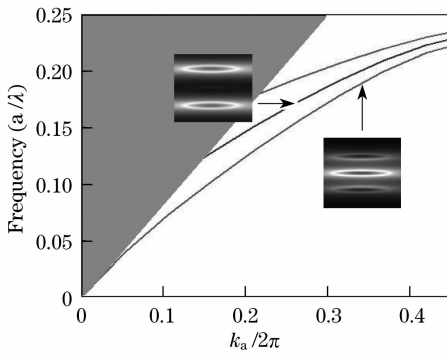


图 3 定向耦合模型的能带结构( $L_y = 1.6a$ ),小插图是模式图样

Fig. 3 Band structure of the directional coupling model (Choosing  $L_y = 1.6a$ ). The mode patterns are shown in the insets

式,  $k_1, k_2$  分别代表激发的第一和第二模式。这两个模式在传播方向上存在相位差就会相干涉。通过一个耦合长度后,能量就会从一个周期性介质波导传播到另一个周期性介质波导。耦合长度  $L_c$  定义为

$$L_c = \frac{\pi}{|k_1 - k_2|} \tag{2}$$

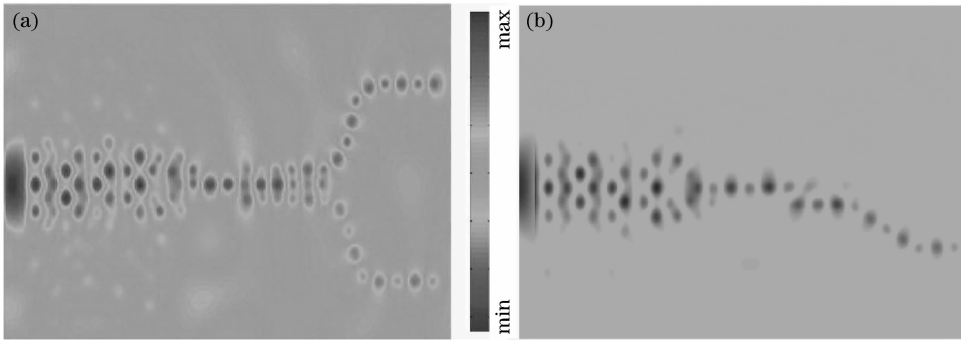


图 4 TE 模在设计的光子晶体分束器中传播时的场分布( $f = 0.194c/a$ )。(a) 双臂且  $\theta = 60^\circ$ ; (b) 单臂且  $\theta = 30^\circ$

Fig. 4 Steady-state field distribution for the proposed PDWBS at  $f = 0.194c/a$ . (a)  $\theta = 60^\circ$ ; (b)  $\theta = 30^\circ$

在此基础上,我们还用这种可以任意弯曲的分束器就行光互连。从自准直区域传播过来的模式会被激发为有着不同波矢量的两个模式,这两个模式同样又可以输入到光子晶体中,并且在其中传播,如图 5 所示。可以发现所设计的分束器能够任意弯转而且损耗小,很容易实现容易光学集成,这在高密度集成光路和光通讯领域可能会发挥重要作用。

从图 5(b)可以看出,从耦合区传播出来的两个模式在光子晶体中又可以准直的传输。在图 5(c)中,只留下一个臂,而且将其水平放置,电场分布如图 5(d)。在光子晶体的另一侧可以看到一个清晰的像,这也提供了一种增大物点和像点之间距离的一种方法。而增大物点和像点之间距离通常有两种

为了缩短耦合长度,就必须增大  $k_1$  和  $k_2$  之间的差值,对于我们设计的结构,在频率  $f = 0.194(c/a)$  处,可以计算出  $L_c = 11.1a$ ,比文献 12 和 14 中的都要小,十分有利于紧凑型光子器件的制作。

### 3 分析与模拟

利用时域有限差分法对 TE 模在偏振分束器中的传播和分束进行了模拟。在偏振分束器结构四周采用完美匹配边界条件(PML),一个束腰为  $5a$  的连续高斯光束自左侧沿 $\langle 11 \rangle$ 方向垂直入射到偏振分束器,入射光的频率为  $f = 0.194(c/a)$ 。FDTD 计算参数选取如下: $\Delta x = \Delta z = a/21$ ,时间步长  $\Delta t = 1/2c \sqrt{(\Delta x)^{-2} + (\Delta y)^{-2}}$ ,时间步为 30000 步,其中  $\Delta x, \Delta z$  为 X、Z 方向的步长。图 4 为稳态下 TE 模的电场分量在分束器中的场分布。可以看出自准直传输和分束效果非常明显。基于定向耦合效应的波导其中一个非常大的优点就是可以任意弯曲而且损耗非常小,这是光子晶体波导不可比拟的。数值计算结果显示所涉及的分束器的两个臂的传输效率都大于 45.8%。

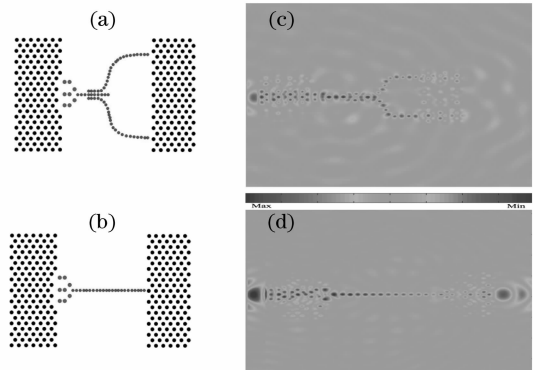


图 5 两种利用定向耦合机制实现的光学互连接以及相应的场分布

Fig. 5 Structures ((a), (b)) and field distributions ((c), (d)) for the two proposed optical interconnections

方法:一是增大光子晶体的厚度,而是用多块光子晶体进行像点传递。在这里,我们可以看出利用自准直特性和同向耦合机制是实现远场成像的另一种方法。基于光子晶体定向耦合的多模干涉耦合器比用普通的多模干涉耦合器的器件尺寸大为减小,这使得器件可以进行大规模的集成。虽然由单列介质柱组成的波导区别与传统的线缺陷构成的光子晶体波导,但是计算结果表明该定向耦合器具有普通介质波导定向耦合器的一般性质。

## 4 结 论

在理论分析二维光子晶体自准直和同向耦合效应的基础上,设计了一种可以任意弯曲的分束器,运用平面波展开法理论分析了耦合区域的色散关系,计算了耦合长度,使用时域有限差分方法数值计算得到了稳态的电场分布。结果显示,在特定的结构下,选取合适的耦合长度,从自准直区域传来的电磁波可以高效的分束到两个周期性介质波导中,而且能够弯曲任意角度。由于光子晶体具有在波长量级上控制光路的特性,这已经使其成为实现紧凑型光子集成芯片的首选,而光子晶体定向耦合器是实现各类集成平面光波光路的关键部件之一。这种结构可以有效提高光源的利用率和光波导的传播效率,方便的实现光学互连,可以用在光弯折、光分束器设计中,以实现全光弯折和全光分束器,这在高密度集成光路中可能发挥很大的作用。

## 参 考 文 献

- 1 Yablonovich E. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2486~2489
- 3 Zhu Zhihong, Ye Weimin, Yuan Xiaodong *et al.*. Photonic crystal waveguide directional coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10):1237~1240  
朱志宏,叶卫民,袁晓东等.光子晶体波导定向耦合器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10):1237~1240

- 4 Attila 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
- 5 Marko Loncar, Dusan Nedeljkovic, Theodor Doll *et al.*. Wave guiding in planar photonic crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(13):1937~1939
- 6 Jun Yonekura, Mit sutaka Ikeda, Toshihiko Baba. Analysis of finite 2D photonic crystals of columns and lightwave devices using the scattering matrix method [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(8):1500~1508
- 7 Mehmet Bayindir, B. Temelkuran, E. Ozbay. Photonic crystal based beam splitters [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(24): 3902~3904
- 8 Shanhuai Fan, Pierre R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos. Channel drop tunneling through localized states [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **80**(5):960~963
- 9 Hitomichi Takano, Yoshihiro Akahane, Takashi Asano *et al.*. In-plane-type channel drop filter in a two-dimensional photonic crystal slab [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(13):2226~2228
- 10 Yuan Jinhui, Hou Lantian, Zhou Guiyao *et al.*. Investigation of a step-structure photonic crystal fiber with flattened dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6):1167~1171  
苑金辉,侯蓝田,周桂耀等.一种阶梯结构的色散平坦光子晶体光纤的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6):1167~1171
- 11 Song Junfeng, Wang Haisong, Zhang Jian *et al.*. Study of dispersion in photonic crystal fiber using mode symmetry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7):800~803  
宋俊峰,王海嵩,张健等.利用模式的对称性研究光子晶体光纤的色散[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7):800~803
- 12 T. Liu, A. R. Zakharian, M. Fallahi *et al.*. Multimode interference-based photonic crystal waveguide power splitter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(12):2842~2846
- 13 N. Yamamoto, T. Ogawa, K. Komori. Photonic crystal directional coupler switch with small switching length and bandwidth [J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(3):1223~1229
- 14 PiGang Luan, Kao-Der Chang. Periodic dielectric waveguide beam splitter based on co-directional coupling [J]. *Opt. Exp.*, 2007, **15**(8):4536~4545
- 15 H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita *et al.*. Self-collimating phenomena in photonic crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(9):1212~1214
- 16 Yu X. F., Fan S. H. Bends and splitters for self-collimated beams in photonic crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(16):3251~3253
- 17 Lee S. G., Oh S. S., Kim J. E *et al.*. Line-defect-induced bending and splitting of self-collimated beams in two-dimensional photonic crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(18): 181106-1~181106-3
- 18 Noritsugu Yamamoto, Yoshinori Watanabe, Kazuhiro Komori. Design of photonic crystal directional coupler with high extinction ration and small coupling length [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2005, **44**(4B):2575~2578