

doi: 10.3788/gzxb20144301.0123002

# 基于光子晶体的双波长太赫兹波功分器研究

程伟, 李九生

(中国计量学院 信息工程学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 太赫兹波技术和光子晶体技术相结合为设计太赫兹波功能器件提供了新的思路和方法. 本文提出了一种基于二维光子晶体的双波长太赫兹波功分器. 在光子晶体中引入由三个相互平行的单模波导形成的定向耦合型分束器和 Y 型结构的  $1 \times 2$  型分束器, 同时, 在 Y 型结构的分支处分别引入两个介质柱. 利用平面波展开法和定向耦合原理计算了在不同入射波频率下, 耦合波导的耦合长度, 并采用时域有限差分法对功分器的传输特性进行了模拟仿真分析. 结果表明, 在频率  $f_1 = 1.0$  THz 时, 实现了端口 1 和端口 2 的能量均分输出; 在频率  $f_2 = 0.893$  THz 时, 通过非对称改变两个介质柱的折射率, 可以实现端口 3 和端口 4 输出能量的自由分配.

**关键词:** 光学器件; 太赫兹波; 时域有限差分法; 光子晶体; 光子禁带; 波导; 双波长功分器; 能量分配

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)01-0123002-5

## A Dual-wavelength Terahertz Wave Power Splitter Based on Photonic Crystal

CHENG Wei, LI Jiu-sheng

(Institute of Information Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The combination of photonic crystal technology and THz technology provides a new approach to design novel THz wave functional devices. A dual-wavelength THz power splitter based on two-dimensional photonic crystals was proposed. A directional coupler was formed by introducing three parallel single mode waveguides, and a  $1 \times 2$  Y-shaped waveguide was introduced as well. Two additional rods were added at the branch of the Y-shaped structure. The coupling lengths for coupled waveguides at different frequencies were calculated by the plane wave expansion method and the principle of directional coupling, and the transmission characteristics of the power splitter were analyzed and investigated by using the finite-difference time-domain method. The results show that the power splitter can split the input field into output port1 waveguide and output port2 waveguide with equal power at frequency of 1.0 THz. However, the input beam can even be split into output port3 waveguide and output port4 waveguide with an arbitrary output energy ratio at frequency of 0.893 THz by asymmetrically changed the refractive index of the two additional rods.

**Key words:** Optical devices; Terahertz waves; Finite-difference time-domain; Photonic crystals; Photonic band gap; Waveguides; Dual-wavelength power splitter; Power distribution

**OCIS Codes:** 230.0230; 230.5298; 230.7370; 230.1360

## 0 引言

太赫兹 (Terahertz, THz) 波是指频率在  $0.1 \sim 10$  THz (波长  $30 \mu\text{m} \sim 3 \text{mm}$ ) 的电磁波, 在电磁波谱中位于毫米波和红外光之间, 是电子学与光子学之间的

过渡区域. 由于太赫兹波在电磁波谱的特殊位置, 科学研究和技术应用上的空白点很多, 因此太赫兹波段也被称为“太赫兹空白”. 近年来, 为填补这一空白人们进行了大量的研究工作并取得了一定的进展, 其中, 光子晶体的迅速发展为人们研究太赫兹波的控制方法开辟

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 60971027, 61131005) 和浙江省自然科学基金 (No. LR12F05001) 资助

第一作者: 程伟 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光子晶体理论和太赫兹功能器件. Email: cwhappy2007@163.com

导师 (通讯作者): 李九生 (1976-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光通信、太赫兹波通信及器件. Email: lijsh@cjlu.edu.cn

收稿日期: 2013-06-08; 录用日期: 2013-08-19

<http://www.photon.ac.cn>

了一条新的道路. 光子晶体是由两种或者两种以上介电常量不同的介质周期性排布构成的人工材料, 它最基本的特性就是具有光子禁带, 频率落在禁带内的电磁波不能在光子晶体中传播. 光子晶体的晶格常量要求与波长相当, 可见光和近红外波段的光子晶体晶格在纳米量级, 制作困难; 而微波波段的光子晶体晶格尺寸虽然在厘米量级容易制作, 但是其尺寸太大局限了其实际应用价值; 太赫兹波的波长在微米波段, 所以太赫兹波段光子晶体的制作相对容易得多, 而且物理尺寸也比微波波段小, 具有很好的实用价值. 作为一类新型的光学材料, 光子晶体已被理论和实验证实可以用于传输和控制太赫兹波<sup>[1-2]</sup>. 各种基于光子晶体的太赫兹波器件不断涌现, 例如: 太赫兹波导<sup>[3-4]</sup>、太赫兹波滤波器<sup>[5]</sup>、太赫兹波调制器<sup>[6-8]</sup>、太赫兹波开关<sup>[9-10]</sup>、太赫兹波隔离器<sup>[11]</sup>等. 太赫兹波功分器是一种重要的功能器件, 是太赫兹应用系统中不可缺少的组成部分. 目前, 基于光子晶体定向耦合结构的功分器大多工作在光通信频段<sup>[12-16]</sup>, 工作在太赫兹波段的功分器相关文献报道较少, 因此非常有必要研究一种高效率、结构紧凑的太赫兹波功分器来满足太赫兹波技术发展的需要.

本文在平行光子晶体波导间耦合特性的基础上, 设计了一种双波长太赫兹波功分器. 该功分器包括一个由相互耦合的三个平行光子晶体单模波导组成的定向耦合分束器和一个 Y 型结构光子晶体波导分束器. 在 Y 结上下分支处引入两个小半径的介质柱, 通过改变小半径介质柱的折射率, 可以实现对某一特定频率太赫兹波能量按照不同的比例从端口 3 和端口 4 输出; 而对另一特定频率的入射太赫兹波而言, 无论是否改变介质柱的折射率, 能量按照均分的原则从端口 1 和端口 2 输出.

## 1 双波长太赫兹波功分器设计

设计的双波长太赫兹波功分器结构如图 1, 该器件由一个单模输入波导、一个多模干涉耦合波导、一个 Y 型结构波导和四个单模输出波导构成. Y 型结构波导上下分支处分别引入了两个介质柱 A 和 B. 利用光子晶体的线缺陷可以形成波导通道, 移除一排介质柱形成单模光子晶体波导. 引入三个相互平行的单模光子晶体波导, 每两个波导之间隔有一排介质柱, 构成一个三波导定向耦合器. 单模输入波导位于多模波导的中心, 即对称进入多模区. 圆形介质柱按正方晶格周期性排列在空气背景中, 构成完整的光子晶体. 光子晶体的结构参量为: 介质柱的折射率  $n=3.4$ , 半径  $r=0.2a$ , 介质柱 A 和 B 的半径均为  $r_A=r_B=0.07a$ , 其中  $a$  为晶格常量. 由于  $r=0.2a$  时, 对于 TM 波, 上述结构参量的完整正方晶格光子晶体具有一个范围较大的光子禁带, 其对应的归一化频率禁带范围为  $a/\lambda =$

$0.2859 \sim 0.4207$ , 因此本文考虑的是 TM 波从输入波导入射的情况.

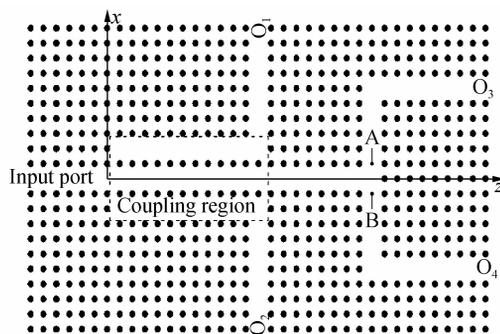


图 1 双波长太赫兹波功分器结构

Fig. 1 Diagram of dual-wavelength terahertz wave power splitter

选取合适的超原胞, 采用平面波展开法, 可以得到单模光子晶体波导和三波导定向耦合器的色散关系曲线. 图 2 给出了单模光子晶体波导的色散关系曲线, 图中的长方形框为选取的超原胞, 在归一化频率  $a/\lambda = 0.40$  和  $a/\lambda = 0.357$  处, 单模波导均只存在一种传播模式. 考虑如图 1 所示的三个相邻且平行的光子晶体的相互耦合, 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, 图中的长方形框为选取的超原胞;

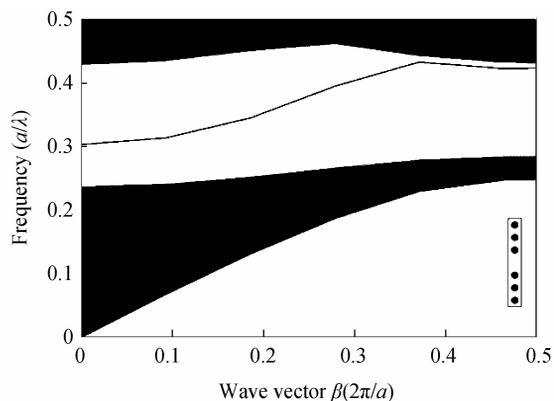


图 2 光子晶体单模波导色散关系

Fig. 2 Dispersive curves of photonic crystal single-mode waveguide

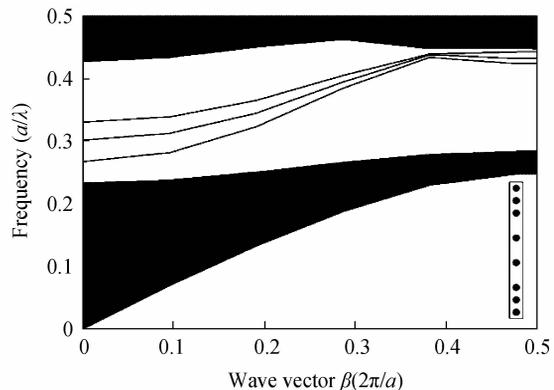


图 3 光子晶体多模波导色散关系

Fig. 3 Dispersive curves of photonic crystal multimode waveguides

由于各光子晶体波导之间的相互耦合,一个传播模式分裂成三个本征传播模式.因此,在归一化频率  $a/\lambda=0.40$  和  $a/\lambda=0.357$  处,三波导定向耦合器均支持三种传播模式,其中零阶模和二阶模相对于入射位置具有偶对称性,一阶模式具有奇对称性.

当电磁波由单模波导对称入射到多模波导时,将在多模波导中激发多个本征模式,但由于一阶模式具有奇对称性,在对称轴上没有场强分布,因而在对称位置的场激励系数为零,该模式不能被激发,只有具有偶对称性的模式被激发.这两个模式(即零阶模和二阶模)在多模区发生干涉,引起电磁场在多模区的重新分布.自成像效应是多模波导中被激励起来的模式间干涉的结果,通过这个效应,沿波导的传播方向将周期性地产生输入场的一个或多个像,即:输入场的单重像和多重像在多模区沿传播方向周期性交替分布.根据多模干涉自成像理论,输入场可以展开为耦合区所有波导本征模式的叠加,即

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

式中,  $c_i$  为场激励系数,  $\varphi_i(x) e^{-i\beta_i z}$  为传播常量为  $\beta_i$  的模场分布,  $i$  为模式的阶数 ( $i=0, 1, 2, \dots, m-1$ ),  $m$  为模式的最高阶数.在这里只有偶模被激发,故  $i$  为偶数,  $m$  为偶模的最高阶数.传播到  $z=L$  处,场分布可以表示为

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

由式(2)可见,由于多个模式间发生干涉,电磁场将形成新的分布,如果满足

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

则输入场的单重像出现在  $L$  处.由于模场分布的对称性,可以得到单重像的分布位置为

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

同理可以得到双重像的分布位置为

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

式中  $\beta_0$  和  $\beta_2$  分别为零阶模和二阶模的传播常量.

由图3可知,在归一化频率  $a/\lambda=0.40$  处,  $\beta_0 = 0.316 \times (2\pi/a)$ ,  $\beta_2 = 0.274 \times (2\pi/a)$ ,由式(4)和式(5)可以得到,单重像第一次出现在距离单模波导和多模波导相交处  $23.81a$  的地方,双重像第一次出现在  $11.90a$  的地方.在归一化频率  $a/\lambda = 0.357$  处,  $\beta_0 = 0.243 \times (2\pi/a)$ ,  $\beta_2 = 0.160 \times (2\pi/a)$ ,单重像第一次出现在距离单模波导和多模波导相交处  $12.05a$  的地方,双重像第一次出现在  $6.02a$  的地方.

## 2 计算与分析

为了保证整个晶格周期的完整性,耦合区的长度选择必须是晶格常量的整数倍,所以选取多模干涉波导的长度为  $12a$ ,宽度为  $6a$ ,如图1.取晶格常量  $a =$

$120 \mu\text{m}$ ,则归一化频率  $a/\lambda=0.40$  对应的频率为  $f_1 = 1.0 \text{ THz}$ ;归一化频率  $a/\lambda=0.357$  对应的频率为  $f_2 = 0.893 \text{ THz}$ .由前面的理论分析可知,对于频率为  $f_1 = 1.0 \text{ THz}$  ( $a/\lambda=0.40$ ) 的太赫兹波,双重像第一次出现在距离单模波导和多模波导相交处  $11.90a$  的地方,此时太赫兹波的能量从端口1和端口2输出,且这两个端口输出的能量相等.对于频率为  $f_2 = 0.893 \text{ THz}$  ( $a/\lambda=0.357$ ) 的太赫兹波,单重像第一次出现在距离单模波导和多模波导相交处  $12.05a$  的地方,此时太赫兹波不会从端口1和端口2输出,太赫兹波到达多模波导的尾端后继续向前传播,最后到达Y型结构波导上下分支处,从端口3和端口4输出;根据耦合理论<sup>[17]</sup>,当  $1/\tau_1 = 1/\tau_2 + 1/\tau_3$  时 ( $\tau_1, \tau_2$  和  $\tau_3$  分别为Y型波导三个分支的振幅衰减率),电磁波具有接近于零的反射率,因此,在这里选择介质柱A和介质柱B的半径均为  $r_A = r_B = 0.07a$ ;而且当  $1/\tau_2 = 1/\tau_3$  时,能量均分到这两个输出端口.因此,当介质柱A和介质柱B的折射率相等时,端口3和端口4输出的能量相等,当介质柱A和介质柱B的折射率不相等时,端口3和端口4输出的能量不相等,实现输出能量的自由分配.

为了模拟电磁波在该设计结构中的传播情况,采用基于时域有限差分法的Rsoft软件进行电磁仿真.计算区域的四周采用完全匹配层作为理想吸收边界.频率  $f_1 = 1.0 \text{ THz}$  ( $a/\lambda = 0.40$ ) 的连续电磁波从输入波导端口输入,得到的稳态太赫兹波场强  $E_y$  分布如图4所示.由于介质柱A和介质柱B的折射率对端口1和端口2输出能量的大小没有影响,在仿真计算时设置介质柱A和介质柱B的折射率均为3.4(与其他介质柱的折射率相等).由图4可知,绝大部分能量从端口1和端口2输出,仅有非常微弱的能量从端口3和端口4输出;而且由于结构的对称性,端口1和端口2输出的能量相等.此外,双重像第一次出现在距离单模波导和多模波导相交处约  $12a$  的位置,与理论计算结果近似相等,这说明模拟结果和理论分析结果相一致.

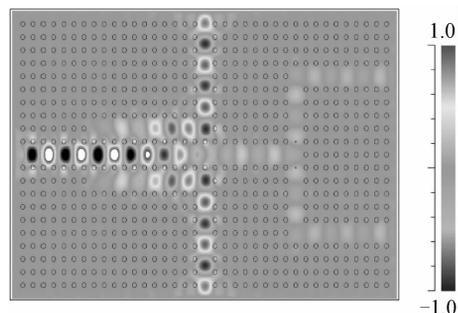


图4 太赫兹波功分器的稳态电场分布 ( $f_1 = 1.0 \text{ THz}$ )  
Fig. 4 Steady electric field distribution at  $f_1 = 1.0 \text{ THz}$

对于频率为  $f_2 = 0.893 \text{ THz}$  ( $a/\lambda = 0.357$ ) 的太赫兹波,计算了介质柱A和介质柱B具有不同折射率时,端口3和端口4的透射率.图5给出了两个端口的

透射率与介质柱 B 的折射率的关系,在这里保持介质柱 A 的折射率不变(即  $n_A = n = 3.4$ ),仅改变介质柱 B 的折射率.从图 5 可以看出,当介质柱 B 的折射率  $n_B = n_A = 3.4$  时,端口 3 和端口 4 的透射率相等,均为 43.77%.当介质柱 B 的折射率  $n_B$  从 3.4 减小到 2.4 时,端口 3 的透射率从 43.77% 减小到 37.17%;端口 4 的透射率从 43.77% 逐渐增大到 52.10%.当介质柱 B 的折射率  $n_B$  从 3.4 增大到 4.0 时,端口 3 的透射率从 43.77% 增大到 49.78%;端口 4 的透射率从 43.77% 逐渐减小到 37.25%.介质柱 B 的折射率  $n_B$  在 2.4~4.0 之间的整个变化过程中,功分器总的透射率达到 85% 以上,说明该功分器具有较高的能量透射率,其中,电磁波的主要损耗可能来源于  $90^\circ$  直角波导处的反射.因而,可以通过添加或去掉直角波导处的介质柱来优化该功分器结构,从而获得更高的透射率.从以上分析可知,改变介质柱 B 的折射率  $n_B$  的大小,可以实现端口 3 和端口 4 输出能量的自由分配,介质柱 B 可以为铁氧体材料,其折射率可以通过外加磁场加以调节<sup>[11]</sup>.

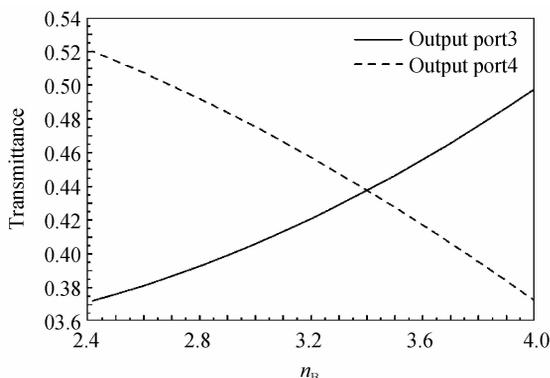


图 5 端口 3 和端口 4 的透射率与介质柱 B 的折射率的关系 ( $f_2 = 0.893$  THz)

Fig. 5 Transmittance of output port3 and 4 varying with index of rod B while  $n_A = 3.4$  at  $f_2 = 0.893$  THz

图 6~图 8 给出了介质柱 B 的折射率  $n_B$  分别为 2.7、3.4 和 3.9 时,对于频率  $f_2 = 0.893$  THz 的太赫兹波,该功分器的稳态电场分布.从图 6~图 8 可以看出,对于频率  $f_2 = 0.893$  THz 的太赫兹波而言,绝大部分能量从端口 3 和端口 4 输出,几乎没有能量泄露到端口 1 和端口 2.此外,单重像第一次出现在在距离单模波导和多模波导相交处约  $12a$  的位置,与理论计算结果近似相等,这说明模拟结果和理论分析结果相吻合.当介质柱 B 的折射率  $n_B = 2.7$  时,端口 4 的透射率为 50.01%,端口 3 的透射率为 38.69%;当介质柱 B 的折射率  $n_B = 3.4$  时,端口 3 的透射率和端口 4 的透射率相等,均为 43.77%;当介质柱 B 的折射率  $n_B = 3.9$  时,端口 3 的透射率为 48.67%,端口 4 的透射率为 38.41%.因此,当介质柱 B 的折射率  $n_B$  取不同的值时,端口 3 和端口 4 的能量输出比出现不同的变化,这

说明实现了对于频率为  $f_2 = 0.893$  THz 的太赫兹波输出能量的自由分配.

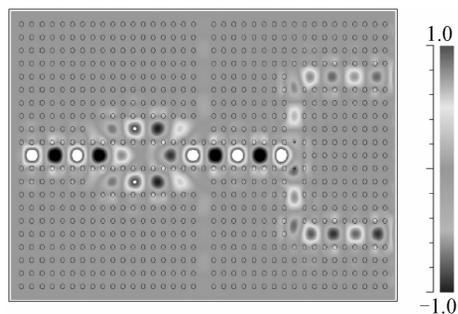


图 6  $n_B = 2.7$  时太赫兹波功分器的稳态电场分布  
Fig. 6 Steady electric field distribution with  $n_B = 2.7$  at  $f_2 = 0.893$  THz

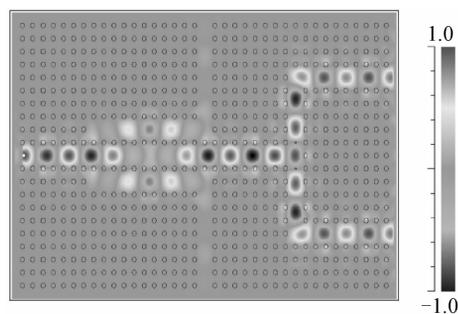


图 7  $n_B = 3.4$  时太赫兹波功分器的稳态电场分布  
Fig. 7 Steady electric field distribution with  $n_B = 3.4$  at  $f_2 = 0.893$  THz

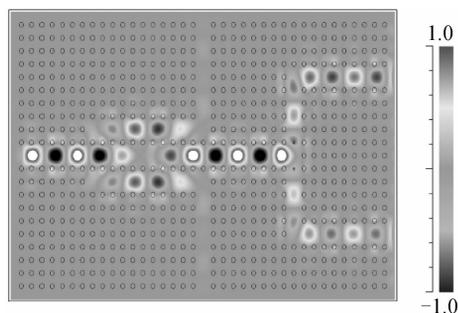


图 8  $n_B = 3.9$  时太赫兹波功分器的稳态电场分布  
Fig. 8 Steady electric field distribution with  $n_B = 3.9$  at  $f_2 = 0.893$  THz

### 3 结论

本文设计了基于二维正方晶格光子晶体波导的双波长太赫兹波功分器.根据多模干涉耦合的自成像理论计算确定输出波导的位置,实现对第一个频率太赫兹波的能量均分输出;通过控制介质柱的折射率,实现对第二个频率太赫兹波的能量自由分配.利用平面波展开法对该功分器的特性进行了数值计算与分析,采用时域有限差分法验证了该功分器的功能.这种双波长太赫兹波功分器对未来太赫兹波应用系统的设计有一定的参考价值,有助于基于光子晶体的新型太赫兹开关、太赫兹波滤波器及其它太赫兹波功能器件的研究.

## 参考文献

- [1] ZHAO Y, GRISCHKOWSKY D. Terahertz demonstrations of effectively two-dimensional photonic bandgap structures[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(10): 1534-1536.
- [2] ZHANG Y, LI Z J, LI B J. Multimode interference effect and self-imaging principle in two-dimensional silicon photonic crystal waveguides for terahertz wave[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(7): 2679-2689.
- [3] LIN C C, CHEN C H, SCHNEIDER G, *et al.* Wavelength scale terahertz two-dimensional photonic crystal waveguides [J]. *Optics Express*, 2004, **12**(23): 5723-5728.
- [4] BINGHAM A, ZHAO Y G, GRISCHKOWSKY D. THz parallel plate photonic waveguides [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **87**(5): 051101(1)-051101(3).
- [5] DRYSDALE T D, BLAIKIE R J, CUMMING D R S. Calculated and measured transmittance of a tunable metallic photonic crystal filter for terahertz frequencies[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **83**(26): 5362-5364.
- [6] LI J S. Terahertz modulator using photonic crystal[J]. *Optics Communications*, 2007, **269**(1): 98-101.
- [7] SU Jian, CHEN He-ming. Terahertz wave modulator based on liquid-crystal-filled photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2710-2713.  
苏坚, 陈鹤鸣. 基于液晶光子晶体的太赫兹波调制器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2710-2713.
- [8] CHEN H M, SU J, WANG J L, *et al.* Optically-controlled high-speed terahertz wave modulator based on nonlinear photonic crystals[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(4): 3599-3603.
- [9] LI Z J, ZHANG Y, LI B J. Terahertz photonic crystal switch in silicon based on self-imaging principle[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(9): 3887-3892.
- [10] LI J S, HE J L, HONG Z. Terahertz wave switch based on silicon photonic crystals[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(22): 5034-5037.
- [11] FAN F, CHANG S J, NIU C, *et al.* Magnetically tunable silicon-ferrite photonic crystals for terahertz circulator[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(18): 3763-3769.
- [12] LIU T, ZAKHARIAN A R, FALLAHI M, *et al.* Multimode interference-based photonic crystal waveguide power splitter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(12): 2842-2846.
- [13] CHEN Shu-wen, ZHU Gui-xin, YU Tian-bao, *et al.*  $1 \times 3$  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  $1 \times 3$  光分束器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2898-2904.
- [14] GAO Yong-feng, ZHOU Ming, ZHOU Jun, *et al.* Design of power splitter by directional coupling between photonic crystal waveguides[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(5): 0505003.  
高永锋, 周明, 周骏, 等. 光子晶体波导定向耦合功分器的设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0505003.
- [15] PARK I, LEE H S, KIM H J, *et al.* Photonic crystal power-splitter based on directional coupling[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(15): 3599-3604.
- [16] ZHU Gui-xin, YU Tian-bao, CHEN Shu-wen, *et al.* A new ultracompact polarizing beam splitter based on photonic crystal directional coupler[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 450-454.  
朱桂新, 于天宝, 陈淑文, 等. 一种新型光子晶体波导定向耦合型超微偏振光分束器[J]. *光子学报*, 2010, **39**(3): 450-454.
- [17] FAN S H, JOHNSON S G, JOANNOPOULOS J D, *et al.* Waveguide branches in photonic crystals[J]. *Journal of the Optical Society America. B*, 2001, **18**(2): 162-165.