

# 基于二维光子晶体的偏振选择 TE/TM 波功率分配器

林 密<sup>1,2</sup> 邱文标<sup>1,2</sup> 郝 翔<sup>1,2</sup> 欧阳征标<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>深圳大学电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060

<sup>2</sup>深圳市微纳光子信息技术重点实验室, 广东 深圳 518060

**摘要** 提出了基于二维光子晶体的具有偏振选择功能的横电(TE)和横磁(TM)波三等分功率分配器, 功分器结构构建于正方晶格的十字形光子晶体波导中。利用有限元法计算结构的性质, 利用 Nelder-Mead 算法进行了参数优化。结果表明, 在输入通道引入不同的偏振选择缺陷, 可使功分器具有偏振选择功能。对于 TE 功分器, TE 波能够进入并在其中传输, TM 波则不能进入; 对于 TM 功分器, 情况则刚好相反。在波导的十字交叉区域引入功率控制缺陷, 可使各输出端功率相等。合理选择参数, TE 和 TM 功分器的总传输效率分别可达 99.48% 和 95.53%。波长扫描发现两种功分器都可工作在相对较大的波长范围内。

**关键词** 光学器件; 功率分配器; 二维光子晶体; 光子晶体波导; 偏振选择

**中图分类号** TN626 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1223001

## Polarization Selective Power Splitters for TE and TM Waves Based on Two-Dimensional Photonic Crystals

Lin Mi<sup>1,2</sup> Qiu Wenbiao<sup>1,2</sup> Xi Xiang<sup>1,2</sup> Ouyang Zhengbiao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

<sup>2</sup>Shenzhen Key Laboratory of Micro-Nano Photonic Information Technology, Shenzhen, Guangdong 518060, China

**Abstract** We propose polarization selective three-equal-power splitters for transverse-electric (TE) and transverse-magnetic (TM) waves based on two-dimensional photonic crystals. The structures are constructed by square-lattice cross-shaped photonic crystal waveguides. The finite element method and the Nelder-Mead optimization method are used to calculate the properties of the structures and obtain the optimized parameters, respectively. The results show that the power splitters are polarization selective when different polarization-selective defects are set in the input channels. For the TE power splitter, TE waves can enter the splitter and transmit in it, while TM waves cannot enter it; for the TM power splitter, the situation is just reversed. In addition, the power splitters can obtain the identical power output at various ports when power-control defects are set at the cross junction of the waveguides. With optimized parameters, the total transmission efficiency of the TE and TM power splitters can be up to 99.48% and 95.53%, respectively. Moreover, it is found by wavelength scanning of the structures that these two splitters can work in a relatively wide wavelength range while keeping good performance.

**Key words** optical devices; power splitter; two-dimensional photonic crystals; photonic crystal waveguide; polarization selection

**OCIS codes** 230.5298; 230.5440; 230.1360

## 1 引 言

光子晶体是一种介电常数、磁导率或者电导率等物理参量呈空间周期性排列分布的人工电磁材料, 由 Yablonovitch 和 John 几乎在同一时间提出<sup>[1-2]</sup>。光子晶体具有许多独特的性质, 如光子禁带、光子局域特性、表面态模式等。正是由于这些特性, 许多基于光子晶体结构的功能器件已经应用于实际的光通信系统中<sup>[3-6]</sup>。

**收稿日期:** 2016-05-24; **收到修改稿日期:** 2016-07-24

**基金项目:** 国家自然科学基金(61307048, 61275043)

**作者简介:** 林 密(1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光子晶体及其应用方面的研究。E-mail: linfengas111@163.com

**通信联系人:** E-mail: zhouyang@szu.edu.cn

在众多的功能器件中,基于光子晶体结构的功率分配器由于其结构简单、能量传输效率高、易于集成等优点受到越来越多的关注<sup>[7-12]</sup>。其中,基于光子晶体结构的二端口功分器已经被广泛报道<sup>[7-8]</sup>,三端口功分器也具有非常重要的应用<sup>[9-12]</sup>。在光互联网络中,三端口功分器中的一个输出端可作为监控端口,用于监测其余两个输出端的输出功率是否正常。目前实现三等分功率分配器较常见的方法有三种,第一种是利用多模干涉效应<sup>[9]</sup>,第二种是利用波导耦合效应<sup>[10-11]</sup>,第三种是通过插入结构性缺陷,再利用级联的方法实现三端口功率分配<sup>[12]</sup>。其中多模干涉和波导耦合的方法需要较长的波导来实现匹配,所以这两种方法实现的功分器尺寸较大,不利于集成。而通过级联方法实现的功分器,结构较为复杂,而且只能工作在设定的个别频率上。

本文提出了基于正方晶格光子晶体十字形波导的具有偏振选择功能的横电(TE)和横磁(TM)波三等分功率分配器。在输入通道引入不同的偏振选择缺陷,使功分器具有偏振选择功能,对于 TE 功分器,TE 波能够进入并且在该功分器中传输,TM 波则不能进入;对于 TM 功分器,TM 波能够进入并且传输,TE 波则不能进入。此外,在波导的十字交叉区域引入功率控制缺陷,使得三个输出端具有相等的功率输出。不论是 TE 还是 TM 功分器,在保证输出端的功率相等的同时,总传输效率可以保持在较高的水平。两种功分器都可以工作在较大的波长范围内。提出的功分器具有结构简单,易于级联,工作带宽较大等优势。

## 2 结构模型及分析

提出的 TE 和 TM 三端口功率分配器结构如图 1 所示,采用笛卡儿直角坐标系, $x$  轴沿水平方向, $y$  轴沿垂直方向, $z$  轴为垂直于纸面方向。这两种功分器都构建于正方晶格的十字形光子晶体波导中,其中红色杆为介质柱阵列,其半径设为  $r_T$ ,晶格常数为  $a$ ,端口 1 为输入端,端口 2、3、4 为输出端。当没有偏振选择缺陷时,TE 和 TM 波都可以在波导中传输。当输入通道引入不同的偏振选择缺陷时,功分器具有偏振选择功能,对于 TE 功分器而言,TE 波能够进入并且在其中传输,TM 波则不能进入;对于 TM 功分器而言,情况则刚好相反。蓝色杆表示 TE 选择缺陷,由一组  $2 \times 2$  正方形介质柱组成,柱体之间的间距皆为  $a$ ,边长设为  $d_{TE}$ ;绿色杆表示 TM 选择缺陷,由一组  $3 \times 1$  圆形介质柱组成,圆柱之间的距离为  $a$ ,半径设为  $r_{TM}$ 。此外,为了实现对输出功率的控制,在十字形波导的中间区域插入两个对称位置的功率控制缺陷,用灰色杆表示,其中  $r_d$  表示缺陷的半径, $x_d$  表示沿  $x$  方向的位移, $y_d$  表示沿  $y$  方向的位移。显然,功率控制缺陷的设置保持功分器结构沿  $y$  轴对称。

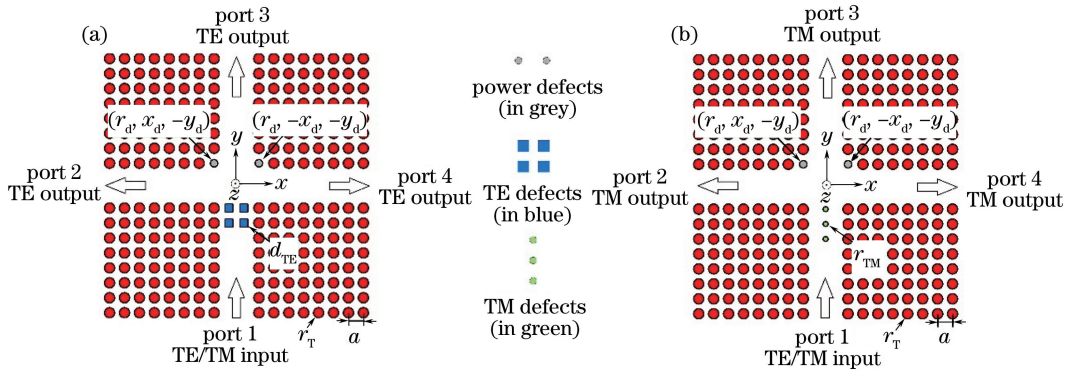


图 1 三端口功率分配器结构示意图。(a) TE 功分器; (b) TM 功分器

Fig. 1 Schematics of three-port (a) TE and (b) TM power splitters

介质柱阵列、偏振选择缺陷、功率控制缺陷都选用各向异性砷材料<sup>[13-15]</sup>。由于希望在同一基础结构(即无任何缺陷的完美光子晶体)中构建 TE 和 TM 功分器,所以结构必须有完全禁带以保证 TE 和 TM 波都可以在结构中传输,各向异性材料比各向同性材料在形成完全禁带方面更具优势<sup>[14]</sup>。此外,砷材料在中远红外波段的损耗非常小,甚至可以忽略不计;中远红外波段在军事及医疗领域具有非常重要的应用。考虑砷材料的色散模型,其 o 光折射率  $n_o$  和 e 光折射率  $n_e$  可分别表示为<sup>[15]</sup>

$$n_o = \sqrt{18.5346 + 4.3289\lambda^2 (\lambda^2 - 3.9810)^{-1} + 3.7800\lambda^2 (\lambda^2 - 11813)^{-1}}, \quad (1)$$

$$n_e = \sqrt{29.5222 + 9.3068\lambda^2 (\lambda^2 - 2.5766)^{-1} + 9.2350\lambda^2 (\lambda^2 - 13521)^{-1}}, \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为波长,其单位为  $\mu\text{m}$ ,并且考虑材料为非磁性(即相对磁导率  $\mu=1$ )。介质柱阵列、TM 选择缺陷和功率控制缺陷的光轴选为平行于  $z$  轴方向,TE 选择缺陷的光轴为平行于  $x$  轴方向。

对于 TE 波而言,电场平行于  $z$  轴方向,即电场只有  $E_z$  分量;对于 TM 波而言,电场平行于  $x$ - $y$  平面,如果假设 TM 波沿  $y$  方向传播,则电场只有  $E_x$  分量。由于 e 光折射率  $n_e$  比 o 光折射率  $n_o$  大,结合上述 TE 和 TM 波的电场分布,上述偏振选择缺陷光轴方向的选择可以使 TM 波与 TE 选择缺陷发生强烈的相互作用,TE 波与 TM 选择缺陷发生强烈的相互作用,从而导致 TE 波只能通过 TE 选择缺陷而不能通过 TM 选择缺陷,TM 波只能通过 TM 选择缺陷而不能通过 TE 选择缺陷,这就是偏振选择缺陷的工作原理。

此外,为了讨论结构的特性,定义波导中的偏振消光比( $P_{\text{ER}}$ )及偏振度( $D_{\text{OP}}$ )分别为

$$P_{\text{ER}}^{\text{TE}} = 10 \times \lg(I_{\text{TE}}/I_{\text{TM}}), \quad (3)$$

$$P_{\text{ER}}^{\text{TM}} = 10 \times \lg(I_{\text{TM}}/I_{\text{TE}}), \quad (4)$$

$$D_{\text{OP}} = |(I_{\text{TE}} - I_{\text{TM}}) / (I_{\text{TE}} + I_{\text{TM}})|, \quad (5)$$

式中  $P_{\text{ER}}^{\text{TE}}$  和  $P_{\text{ER}}^{\text{TM}}$  分别为 TE 和 TM 功分器的偏振消光比, $I_{\text{TE}}$  和  $I_{\text{TM}}$  分别为输出端 TE 和 TM 波的场强。

### 3 数值计算及分析

构建 TE 和 TM 功分器的完美二维光子晶体必须有完全禁带。以前的研究中采用碲材料作为介质柱阵列构建正方晶格的完美光子晶体<sup>[6]</sup>,碲介质柱的半径为  $r_{\text{T}}$ ,晶格常数为  $a$ ,材料的色散关系如(1)和(2)式所述,通过计算其能带结构发现该基础结构的最大完全禁带出现在半径  $r_{\text{T}} = 0.3431a$  处,禁带范围为  $\lambda = 3.893a \sim 4.223a$ 。基础结构的能带结构图不再重复给出。在下面的计算中,固定碲介质柱的半径为  $0.3431a$ 。当晶格常数  $a = 1 \mu\text{m}$  时(即碲介质柱的半径为  $0.3431 \mu\text{m}$ ),波长范围为  $3.893 \sim 4.223 \mu\text{m}$ ,该频段位于中红外波段,在此频率范围内碲材料的损耗非常小,可以忽略不计<sup>[15]</sup>。

为了得到 TE 选择缺陷的边长  $d_{\text{TE}}$  和 TM 选择缺陷的半径  $r_{\text{TM}}$ ,采用有限元法计算偏振消光比  $P_{\text{ER}}$  和偏振度  $D_{\text{OP}}$  随  $d_{\text{TE}}$  和  $r_{\text{TM}}$  的变化,如图 2 所示,图中工作波长选为  $4.058a$  (即完全禁带的中心波长)。

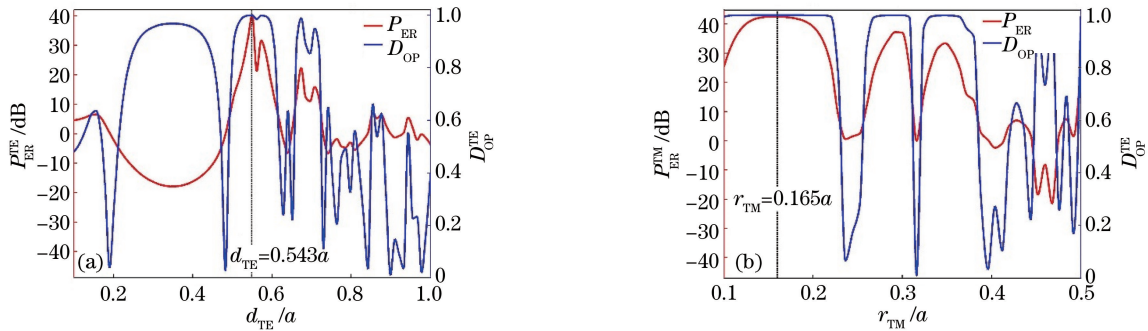


图 2 偏振消光比  $P_{\text{ER}}$  以及偏振度  $D_{\text{OP}}$  随(a)  $d_{\text{TE}}$  和 (b)  $r_{\text{TM}}$  的变化

Fig. 2  $P_{\text{ER}}$  and  $D_{\text{OP}}$  versus (a)  $d_{\text{TE}}$  for the TE power splitter and (b)  $r_{\text{TM}}$  for the TM power splitter

由图 2 可以看出,对于 TE 功分器而言,当 TE 选择缺陷的边长  $d_{\text{TE}}$  为  $0.543a$  时,偏振度  $D_{\text{OP}}$  以及偏振消光比  $P_{\text{ER}}$  都达到了极大值,其中  $D_{\text{OP}}$  接近于 1,而  $P_{\text{ER}}$  则接近 40 dB;对于 TM 功分器而言,当 TM 选择缺陷的半径  $r_{\text{TM}}$  为  $0.165a$  时,偏振度  $D_{\text{OP}}$  以及偏振消光比  $P_{\text{ER}}$  最佳,其中  $D_{\text{OP}}$  仍然接近于 1,而  $P_{\text{ER}}$  则超过 40 dB。换言之,如果 TE 和 TM 选择缺陷的结构参数为  $0.543a$  和  $0.165a$  时,TE 选择缺陷只允许 TE 波通过而阻止 TM 波通过,该缺陷的作用好似一道门,这道门只对 TE 波打开而对 TM 波关闭,TM 选择缺陷则只允许 TM 波通过而阻止 TE 波通过。该结果表明 TE 和 TM 功分器实现了偏振选择功能,同时也验证了偏振选择缺陷光轴方向选择的正确性。

为了更好地理解 TE 和 TM 波在两种功分器中的传播规律,模拟了功分器结构中的场分布图,如图 3 所示,图中 TE 选择缺陷的边长  $d_{\text{TE}}$  为  $0.543a$ ,TM 选择缺陷的半径  $r_{\text{TM}}$  为  $0.165a$ ,功率控制缺陷的初值  $r_d = 0.25a, x_d = 0, y_d = 0$ ,工作波长仍然是  $4.058a$ 。由图可见,TE 和 TM 功分器确实具有偏振选择功能,TE 波只能在 TE 功分器中传输,而 TM 波只能在 TM 功分器中传输。计算输出端的归一化功率发现,对于

TE 功分器而言,三个输出端的功率分别为  $P_2=23.1\%$ ,  $P_3=26.4\%$ ,  $P_4=23.1\%$ ,总的传输效率为  $72.6\%$ ;对于 TM 功分器而言,  $P_2=21.7\%$ ,  $P_3=42.6\%$ ,  $P_4=21.7\%$ ,总的传输效率为  $86\%$ 。不论是 TE 功分器还是 TM 功分器,三个输出端的功率并不相等,而且总的传输效率不高。因此,必须对功率控制缺陷的参数进行优化,以得到相等的输出功率以及较高的传输效率。

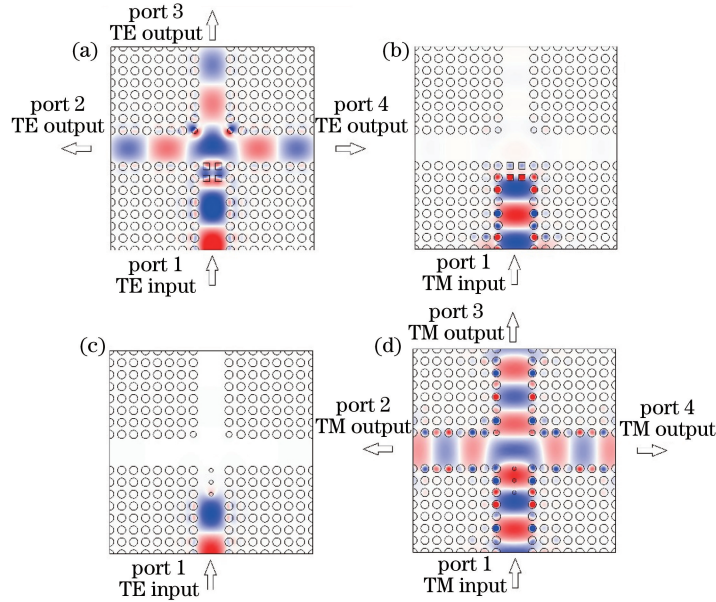


图 3 TE 及 TM 功分器的场分布图。(a)(c) TE 波输入; (b)(d) TM 波输入

Fig. 3 Field distributions of TE and TM power splitters. (a)(c) TE input; (b)(d) TM input

为了优化功率控制缺陷,研究了  $r_d$ ,  $x_d$  和  $y_d$  对输出功率的影响,如图 4 所示。值得一提的是,对功率控制缺陷的位移依然保持结构沿  $y$  轴对称,端口 2 和 4 的输出功率始终保持相等,即  $P_2 = P_4$ ,所以只需讨论

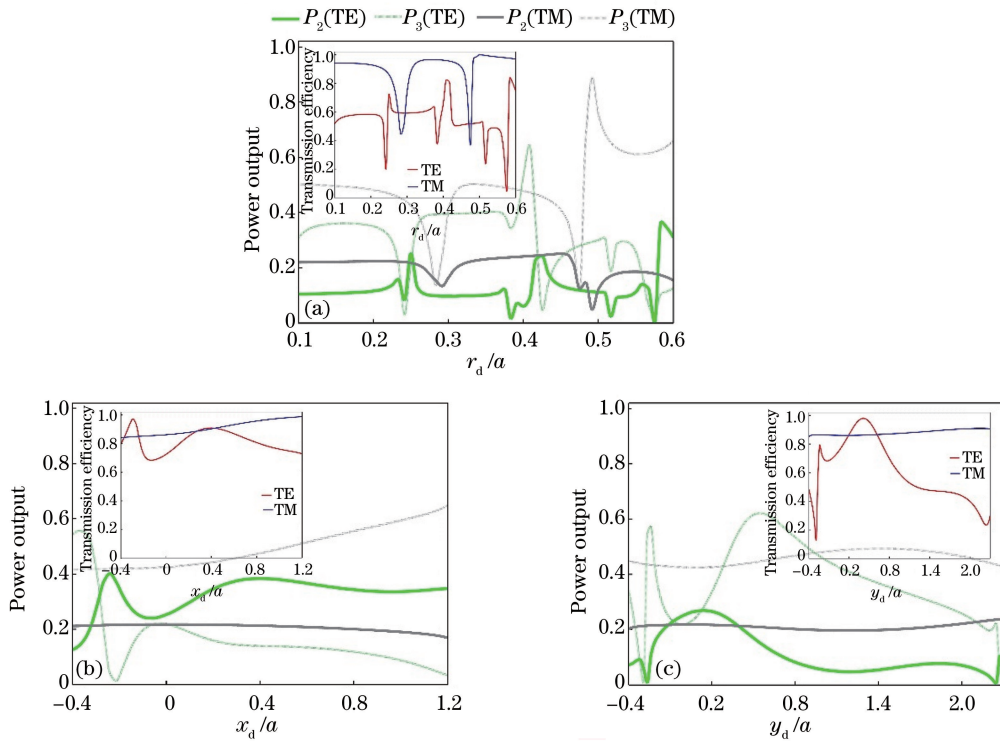


图 4 各端口输出功率及总的传输效率(插图)随(a)  $r_d$ , (b)  $x_d$  以及 (c)  $y_d$  的变化

Fig. 4 Output power and total transmission efficiency (insets) versus (a)  $r_d$ , (b)  $x_d$ , and (c)  $y_d$



参数对  $P_2$  和  $P_3$  的影响即可。此外,在讨论某一参数对输出功率的影响时,固定其余两个参数为初值,如讨论  $r_d$  的影响时,固定  $x_d=0, y_d=0$ 。图 4 的其他参数与图 3 一致。

由图 4 可得,对于 TE 功分器,  $r_d$  和  $y_d$  对各端口的输出功率及总的传输效率都有较大的影响,  $x_d$  对总的传输效率影响较小,仅有小的波动并且传输效率维持在较高的水平,当  $x_d$  大于  $0.4a$  时,各输出端特别是端口 2 的功率趋于平稳;对于 TM 功分器,仅有  $r_d$  对各端口的输出功率及总的传输效率有较大的影响,总的传输效率随  $x_d$  和  $y_d$  的变化不大,端口 2 的功率几乎不随  $x_d$  和  $y_d$  变化。因此,在后面的参数优化过程中,需要综合考虑各参数对输出功率及总的传输效率的影响。

采用 Nelder-Mead 优化算法分别得到了 TE 和 TM 功分器的优化参数。对于 TE 功分器,  $r_d, x_d, y_d$  分别为  $0.1703a, 0.4528a, 0.7286a$ ;对于 TM 功分器,  $r_d, x_d, y_d$  分别为  $0.2904a, 0.1730a, 1.6342a$ 。优化后的场分布如图 5 所示,图 5 的其他参数与图 3 一致。其中 TE 功分器三个输出端的归一化功率分别为  $P_2=P_4=33.13\%, P_3=33.22\%$ ,总的传输效率为  $99.48\%$ ;对于 TM 功分器,  $P_2=P_4=31.84\%, P_3=31.85\%$ ,总的传输效率为  $95.53\%$ 。可见,这两种功分器特别是 TE 功分器,结果较优化前都有非常大的改善。在保证总的传输效率超过  $95\%$  的同时,三个输出端输出功率之比非常接近于  $1:1:1$ ,即实现了功率等分的功能。

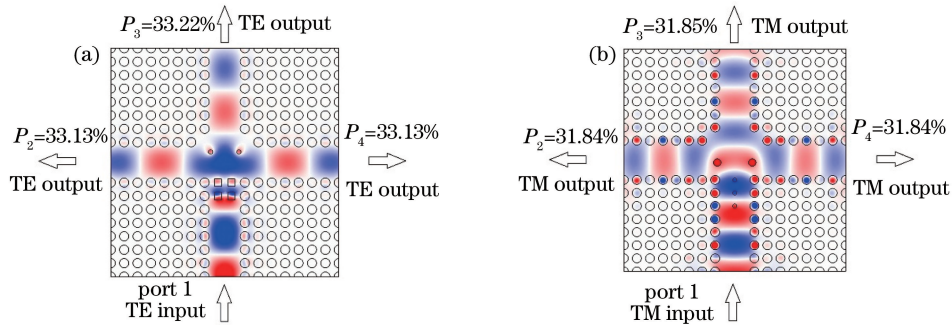


图 5 优化后 (a) TE 功分器和 (b) TM 功分器的场分布图

Fig. 5 Field distributions after optimization for (a) TE and (b) TM power splitters

在实际应用中希望功分器具有一定的工作带宽,在带宽范围内功分器应具有较高的传输效率和各端口相等的输出功率。于是,对 TE 和 TM 功分器进行波长扫描,考察总的传输效率以及各端口输出功率的差值随波长的变化情况,结果如图 6 所示。在计算各端口输出功率的差值时,由于  $P_2$  与  $P_4$  始终相等,所以只需考虑  $P_2$  和  $P_3$  之间的差值即可,图中用  $|P_2 - P_3|$  来表示。图 6 采用优化后的参数取值,各参数与图 5 一致。由图 6 可知,对于 TE 功分器,当波长范围为  $3.994a \sim 4.073a$  时,总的传输效率大于  $85\%$ ,输出端功率差小于  $0.015$ ,工作带区占完全禁带的  $24\%$ ;对于 TM 功分器,当波长为  $4.028a \sim 4.123a$  时,总的传输效率大于  $95\%$ ,输出端功率之差小于  $0.015$ ,工作带区占完全禁带的  $29\%$ 。TM 功分器的效果略好于 TE 功分器,不论是 TE 还是 TM 功分器,都可以工作在相对较宽的波长范围内,保持较高的传输效率和几乎相等的各端口输出功率。

需要指出的是,本文的研究采用了二维光子晶体模型,但实际器件都是三维结构,介质柱的长度是有限的,如何实现光在介质柱轴线方向上的限制是更受关注的问题。以前都倾向于采用等效折射率较大的孔状结构光子晶体,有利于将光约束在光子晶体内部<sup>[16]</sup>。但是,在光子晶体波导中,需要去掉一系列空气孔来获得波导,这样波导光是沿介质传播的,由于介质的损耗总是存在,这势必会带来较大的插入损耗。当然,对于孔状结构光子晶体,也可以在其中将孔和介质一起切出一个空气波导,但这样会使空气波导所在区域的等效折射率较低,难以实现光在平行于介质柱轴线方向上的约束。介质柱结构光子晶体的优势是带隙宽度大,带隙深,禁带效果好,工作频带宽,波导中的波在空气中传播损耗小;其缺点是光子晶体的等效折射率较小,不利于光在平行于介质柱方向上的约束。为解决这一问题,可以采取两个措施:一是控制入射光的波矢,使入射光只有垂直于介质柱轴线方向的传播波矢,则光自然不会向平行于介质柱轴线的方向传播,或者使入射光平行于介质柱轴线方向的波矢分量比较小,以至于波在光子晶体中传播完成后还是在光子晶体内部;二是在二

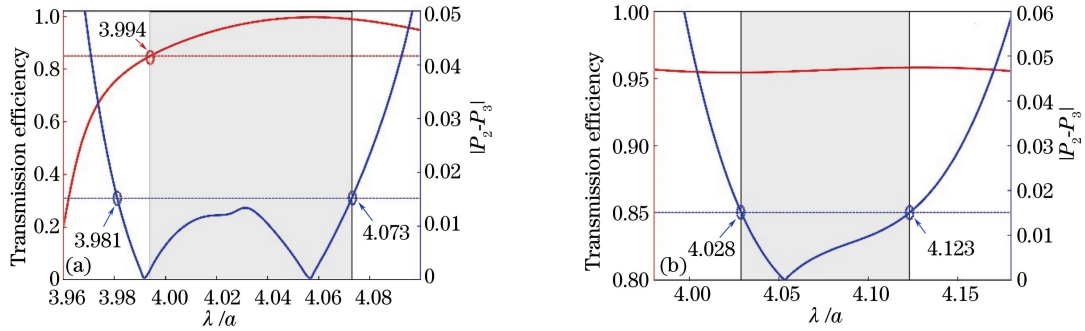


图 6 功分器总的传输效率及输出端功率差值的带宽扫描。(a) TE 波输入; (b) TM 波输入

Fig. 6 Wavelength scan on total transmission efficiency and absolute difference between  $P_2$  and  $P_3$ . (a) TE input; (b) TM input

维光子晶体的顶部和底部各设置一个一维或三维光子晶体<sup>[17]</sup>, 这会增加一定的成本, 但为了提高器件的性能还是有必要的, 而且随着工艺技术的进步和大规模生产的发展, 成本会逐步下降。

## 4 结 论

提出了基于二维光子晶体的具有偏振选择功能的 TE 和 TM 波三等分功率分配器。通过引入偏振选择缺陷及功率控制缺陷, 提出的两种功分器都具有偏振选择功能。在相对较宽的波长范围内, 三等分功分器具有相等的各端口功率输出和较高的传输效率。与以往的功分器相比, 提出的功分器具有结构简单, 易于级联和集成, 工作带宽较大等优势。

## 参 考 文 献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2062.
- 2 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.
- 3 Wang Yong, Zhang Dengguo, Ouyang Zhengbiao, *et al.* Four-port cross-shaped circulator based on two-dimensional magneto-photonic crystals[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1023001.  
王 勇, 张登国, 欧阳征标, 等. 四端口十字型二维磁性光子晶体环形器[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1023001.
- 4 Wan Yong, Li Changhong, Yun Maojin, *et al.* Realization of slow light effect for photonic crystal waveguide using graded eye-shaped scatterers[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1016003.  
万 勇, 李长红, 云茂金, 等. 采用渐变圆弓形散射元实现光子晶体结构慢光效应[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1016003.
- 5 Wang Jingli, Chen Heming. Single-polarization single-mode rhombic-hole terahertz photonic crystal fibers [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0906002.  
汪静丽, 陈鹤鸣. 菱形空气孔的单一偏振单模太赫兹光子晶体光纤[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0906002.
- 6 Jin X, Sesay M, Ouyang Z B, *et al.* Photonic-crystal structures with polarized-wave-guiding property and their applications in the mid and far infrared wave bands[J]. Optics Express, 2013, 21(21): 25592-25606.
- 7 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.
- 8 Jia W, Deng J, Wu H, *et al.* Design and fabrication of high-efficiency photonic crystal power beam splitters[J]. Optics Letters, 2011, 36(20): 4077-4079.
- 9 Zhang M, Malureanu R, Krüger A C, *et al.*  $1 \times 3$  beam splitter for TE polarization based on self-imaging phenomena in photonic crystal waveguides[J]. Optics Express, 2010, 18(14): 14944-14949.
- 10 Djavid M, Ghaffari A, Monifi F, *et al.* Photonic crystal power dividers using L-shaped bend based on ring resonators[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2008, 25(8): 1231-1235.
- 11 Liu C Y. Fabrication and optical characteristics of silicon-based two-dimensional wavelength division multiplexing splitter with photonic crystal directional waveguide couplers[J]. Physics Letters A, 2011, 375(28): 2754-2758.

- 12 Tee D C, Tamchek N, Shee Y G, *et al.* Numerical investigation on cascaded  $1 \times 3$  photonic crystal power splitter based on asymmetric and symmetric  $1 \times 2$  photonic crystal splitters designed with flexible structural defects[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24241-24255.
- 13 Loferski J J. Infrared optical properties of single crystals of tellurium[J]. *Physical Review*, 1954, 93(4): 707-716.
- 14 Shi P, Huang K, Kang X, *et al.* Creation of large band gap with anisotropic annular photonic crystal slab structure[J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 5221-5228.
- 15 Bass M. *Handbook of optics*[M]. New York: McGraw-Hill Press, 1994.
- 16 Joannopoulos J D, Johnson S G, Winn J N, *et al.* *Photonic crystals: molding the flow of light* [M]. 2<sup>nd</sup> edition. Princeton: Princeton University Press, 2008.
- 17 Chutinan A, John S. Diffractionless flow of light in two- and three-dimensional photonic band gap heterostructures: Theory, design rules, and simulations[J]. *Physical Review E*, 2005, 71(2): 026605.