

# 带有光子晶体U-型谐振器的反射式分束器

吴立恒 王明红

聊城大学物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059

**摘要** 为从波长信道中实现信号优良的选择性输出,设计了带有光子晶体U-型谐振器(PCUR)的反射式分束器结构。利用时域有限差分(FDTD)方法研究了其结构电磁波功率分束特性。设计的4种对称结构可用于输入波长的功率二等分,在第三通信窗口都具有传输率高的特性;设计的5种的非对称结构具有峰值波长信号串扰弱的特性。根据设计需求,在带有 $3\times 2$  PCUR的对称结构中分别调整其结构的两个PCURs的散射介质柱半径,或其内部介质柱半径,能设计出不同信道波长间隔的高传输率分束器。研究表明:这些微型波长分束器件具有波长选择性优良、设计灵活、峰值波长处串扰弱等优点。在低损耗光路集成设计、波长密集型光通信系统设计等方面存在潜在应用价值。

**关键词** 集成光学;反射式分束器;光子晶体U-型谐振器;时域有限差分法;弱串扰;传输率高

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.022301

## A Reflecting Splitter Based on Photonic Crystal U-Shaped Resonators

Wu Liheng Wang Minghong

School of Physics Science & Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China

**Abstract** In order to obtain excellent output signals from wavelength channels, the structures of reflecting splitters based on photonic crystal U-shaped resonators (PCUR) are designed. Electromagnetic wave power splitting characteristics of these structures are studied by the time-domain finite-difference method. Four symmetrical structures can split wavelength power into two equal parts, and all of them have the characteristic of high transmission efficiency in the third communication window. Five asymmetrical structures have the characteristic of low signal crosstalk at the peak wavelength. According to our needs of designs, high transmission efficiency splitters with different channel wavelength intervals can be obtained by changing radii of scattering dielectric rods or  $3\times 2$  inner rods of the two PCURs in the symmetrical structure of reflecting splitters based on  $3\times 2$  PCURs. The results show that these micro reflecting splitters based on PCURs have the advantages of excellent wavelength selectivity, flexible designs, low crosstalk at peak wavelength and so on. These structures have potentially applicable value in the fields of low loss optical integrated circuits, high density wavelength optical communication systems etc.

**Key words** integrated optics; reflecting splitter; photonic crystal U-shaped resonator; time-domain finite-difference method; low crosstalk; high transmission efficiency

**OCIS codes** 130.7408; 130.1750; 130.3120; 130.3990; 130.5296

### 1 引言

随着光纤通信网络技术的进步发展,研究者们集中于设计超紧凑光器件,对超快通信网络的研究活动正在积极开展。波分复用(WDM)和密集型波分复用(DWDM)技术的发展,为用一条光纤传输不同波长的超快大容量的网络通信提供了可行性。光子晶体的具有优异的带隙特性<sup>[1]</sup>,目前,基于光子晶体谐振器的光波长解复用器<sup>[2]</sup>、多信道下载滤波器<sup>[3]</sup>、光插分滤波器<sup>[4-5]</sup>、光分束器<sup>[6-8]</sup>、光子晶体波导<sup>[9]</sup>等方面开展的研究极为活跃。在列举的这些光学器件<sup>[2-6]</sup>中采用了光子晶体环形谐振器(PCRR),其谐振腔都具有环状的连通,其环

收稿日期: 2015-07-29; 收到修改稿日期: 2015-09-06; 网络出版日期: 2016-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(11375081)

作者简介: 吴立恒(1980—),男,硕士研究生,主要从事微波理论与技术,物理教学理论等方面的研究。

E-mail: wulihenglctu@163.com

导师简介: 王明红(1967—),男,教授,主要从事高功率微波与器件等方面的研究。E-mail: wangminghong@lcu.edu.cn

状的连通谐振腔结构可利用光子晶体四边形结构、光子晶体六边形结构、光子晶体环形跑道结构、准光子晶体环形结构设计。本文提出了一种新型的谐振器结构,反射式光子晶体U-型谐振器(PCUR),用U-型反射腔结构取代了PCRR的环状连通腔结构。在介质柱正方格光子晶体中设计了两种类型的反射式分束器结构,有利用时域有限差分法(FDTD)<sup>[10]</sup>编程研究了其工作性能。

## 2 反射式PCUR

图1为反射式PCUR结构,其内部结构已用大写英文字母作了标注,并用带有箭头的黑色长方框或椭圆画出。在正方格介质柱光子晶体中分别从水平方向取出两行介质柱、竖直方向取出一列介质柱,然后在腔的两个拐角半个晶格常数处分别放置了散射介质柱,形成了反射式U-型谐振腔结构E。其中A为耦合区域介质柱,B散射介质柱,用于改善谐振腔滤波工作性能,C为U-型腔内部3×5介质柱,D为有两行介质柱组成的U-型腔反射器,用以反射耦合到腔中的电磁波。

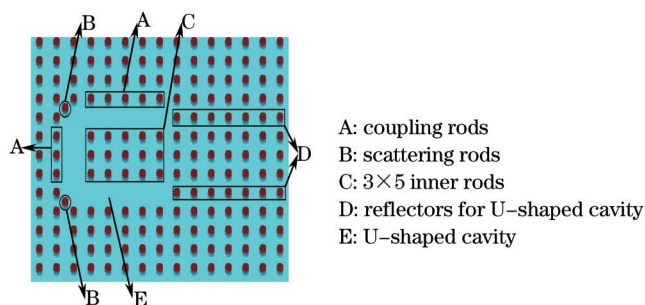


图1 反射式PCUR

Fig.1 Reflecting PCUR

## 3 带有PCUR的反射式分束器

以空气为背景的介质柱正方格光子晶体,其晶格常数 $a$ 为580 nm,介质柱的半径为 $0.2a$ ,结构大小为 $23a \times 20a$ 。其结构中柱的相对介电常数为12,空气的相对介电常数近似为1。在该结构中设计了两种类型的分束器,如图2(a)所示对称反射式分束器和图2(b)不对称反射式分束器,其结构已用英文字母标注,并用带有箭头的黑色长方框或椭圆画出。在结构中光子晶体波导与反射式PCUR的一角紧邻,以利用PCUR的滤波特性提取所需信号波长。其中 $P_0$ 为分束器输入端口, $P_1$ 和 $P_2$ 为分束器输出端口;E为沿着分束器输入端口方向的 $1 \times 11$ 介质柱所形成的波导反射器结构,用于反射信号源输入的电磁波;A为沿着输出端口方向的 $5 \times 1$ 介质柱所形成的对称波导反射器结构,用于反射PCUR和波导耦合输出的部分电磁波信号,进一步提高其结构的整体工作性能。把该结构的每个正方格子原胞分成 $40 \times 40$ 等分,在数值计算满足Courant稳定性条件<sup>[11]</sup>情况下,用FDTD法<sup>[10]</sup>计算了麦克斯韦方程TM波在其结构中的传输特性。并在结构周围设置了吸收边界完全匹配层<sup>[12]</sup>,将进入的电磁波吸收掉。根据输出端口与输入端口处传输功率比值即得到结构的电磁波功率传输特性曲线。

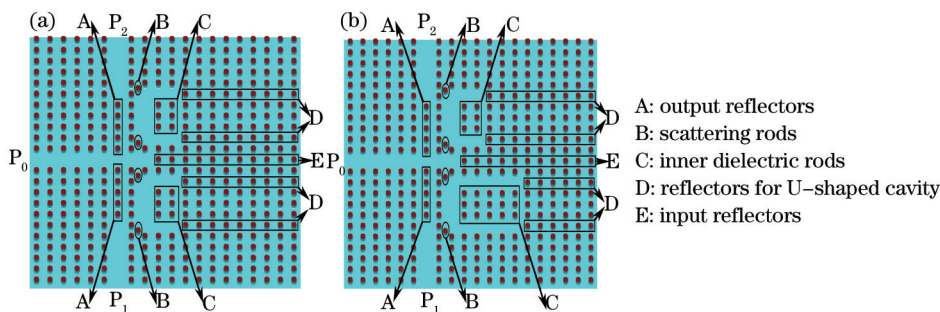


图2 带有PCURs的反射式分束器。(a) 对称;(b) 非对称

Fig.2 Reflecting splitter based on PCURs. (a) Symmetric; (b) asymmetric

这两种类型的反射式分束器,在图3~图21中分别用两种颜色的曲线标出了其输出端口 $P_1$ 和 $P_2$ 处对不

同波长的电磁波功率分束特性曲线。其中图(a)和(b)的横坐标都表示该结构的工作波长,纵坐标分别表示对不同信号波长的传输率、及其信号强度衰减分贝(dB)。图上已用对应的颜色标注了通带波长的峰值、通带峰值半峰全宽、及其峰值处传输信号强度相对于输入端口处强度衰减分贝值。

图2(a)所示对称结构的反射式分束器带有两个相同 $3 \times 2$  PCURs,通过改变U型腔大小分别研究了带有 $3 \times 2$ 、 $3 \times 3$ 、 $3 \times 4$ 、 $3 \times 5$  PCURs的对称反射式分束器结构。图3~图21给出了其结构工作于 $1390 \sim 1720$  nm波长的功率分束特性曲线,可知:对应端口 $P_1$ 和 $P_2$ 处的波长功率分束特性曲线黑色实线、红色点画线几乎重合;输出峰值波长半峰全宽在 $1.2 \sim 5.5$  nm,工作波长偏离峰值时输出信号强度将迅速衰减,能够有效地滤除不需要的信号波长,将提取信号波长功率二等分;随U-型谐振腔结构的增大,相邻峰值波长间隔有变小的趋势;在第三通信窗口中心波长 $1550$  nm附近有 $1542.5$ 、 $1548.6$ 、 $1551.3$ 、 $1556.1$  nm波长,这些波长在两输出端口处信号强度衰减在 $-3.28$  dB $\sim$  $-3.54$  dB。因此该类对称结构具有多传输通带、带宽窄、信号波长功率二等分特性优异,第三通信窗口波长传输率高的特点。

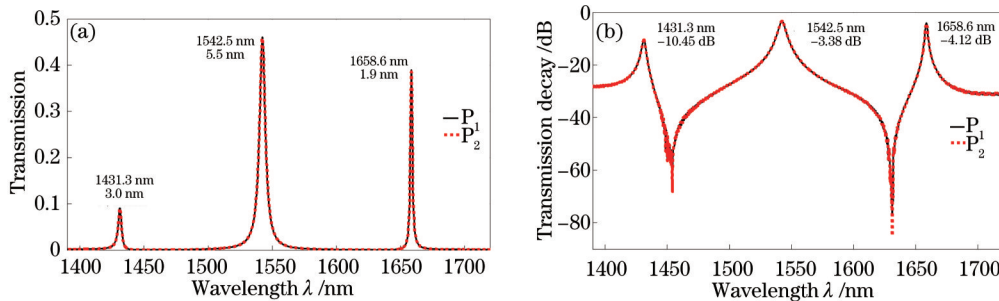


图3 带有 $3 \times 2$  PCURs的对称结构反射式分束器两输出端口波长功率分束特性。(a) 传输特性;(b) 传输衰减  
Fig.3 Wavelength power splitting characteristics of the two outputs of symmetrical reflecting splitters based on  $3 \times 2$  PCURs. (a) Transmission; (b) transmission decay

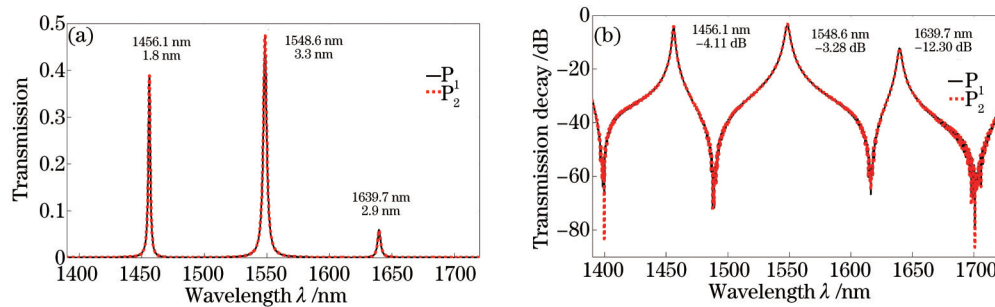


图4 带有 $3 \times 3$  PCURs的对称结构反射式分束器两输出端口波长功率分束特性。(a) 传输特性;(b) 传输衰减  
Fig.4 Wavelength power splitting characteristics of the two outputs of symmetrical reflecting splitters based on  $3 \times 3$  PCURs. (a) Transmission; (b) transmission decay

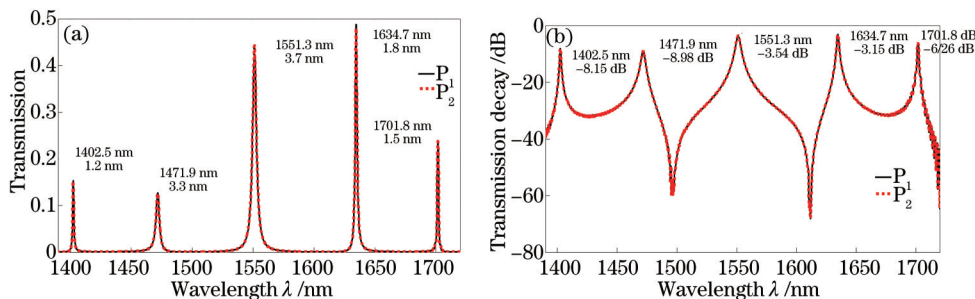


图5 带有 $3 \times 4$  PCURs的对称结构反射式分束器两输出端口波长功率分束特性。(a) 传输特性;(b) 传输衰减  
Fig.5 Wavelength power splitting characteristics of the two outputs of symmetrical reflecting splitters based on  $3 \times 4$  PCURs. (a) Transmission; (b) transmission decay

如图2(b)所示非对称反射式分束器结构邻近 $P_1$ 和 $P_2$ 端口处分别通过使用了 $3 \times 5$  PCUR和 $3 \times 2$  PCUR的组合结构。在其非对称结构中,研究了U-型腔大小的改变对其工作特性的影响,邻近 $P_1$ 和 $P_2$ 端口处分别依次使用下列5组PCURs的组合结构 $3 \times 3$ 与 $3 \times 2$ 、 $3 \times 4$ 与 $3 \times 2$ 、 $3 \times 5$ 与 $3 \times 2$ 、 $3 \times 5$ 与 $3 \times 3$ 、 $3 \times 5$ 与 $3 \times 4$ 设计了5种

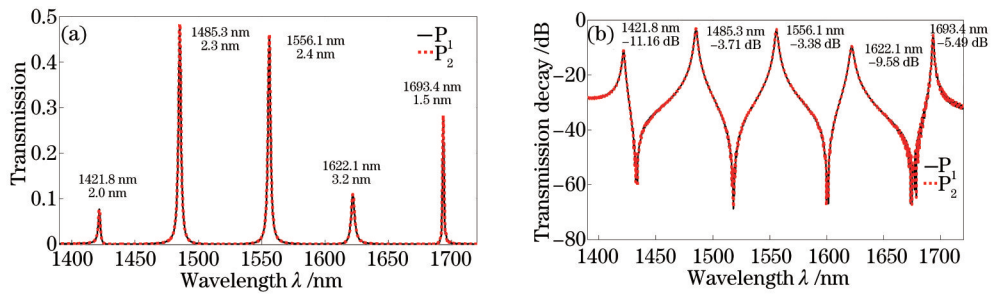


图6 带有 $3 \times 5$  PCURs的对称结构反射式分束器两输出端口波长功率分束特性。(a) 传输特性; (b) 传输衰减

Fig.6 Wavelength power splitting characteristics of the two outputs of symmetrical reflecting splitters based on  $3 \times 5$  PCURs. (a) Transmission; (b) transmission decay

非对称反射式分束器结构。图7~图11给出了这些结构工作于1410~1680 nm波长段的功率分配特性图,已用蓝色实线、红色实线标出了输出端口 $P_1$ 和 $P_2$ 处波长功率分配特性曲线,且每一图上标注了6个峰值波长。

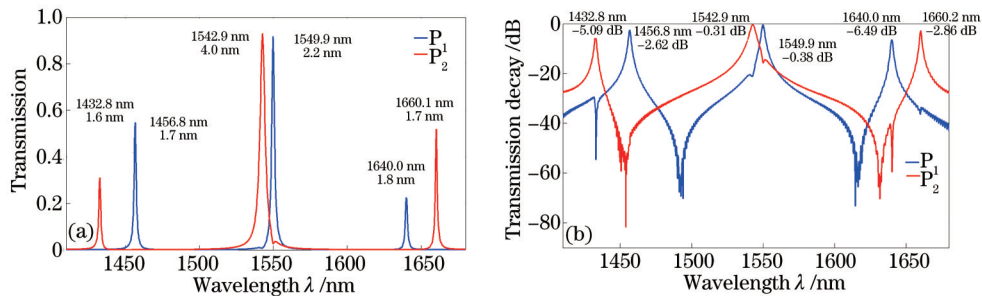


图7 带有 $3 \times 3$ 和 $3 \times 2$  PCURs的非对称结构反射式分束器两输出端口波长功率分束特性。(a) 传输特性; (b) 传输衰减

Fig.7 Wavelength power splitting characteristics of the two outputs of asymmetrical reflecting splitters based on  $3 \times 3$  and  $3 \times 2$  PCURs. (a) Transmission; (b) transmission decay

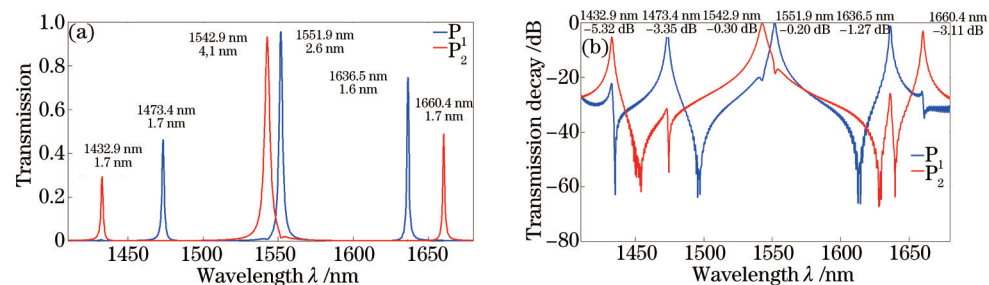


图8 带有 $3 \times 4$ 和 $3 \times 2$  PCURs的非对称结构反射式分束器两输出端口波长功率分束特性。(a) 传输特性; (b) 传输衰减

Fig.8 Wavelength power splitting characteristics of the two outputs of asymmetrical reflecting splitters based on  $3 \times 4$  and  $3 \times 2$  PCURs. (a) Transmission; (b) transmission decay

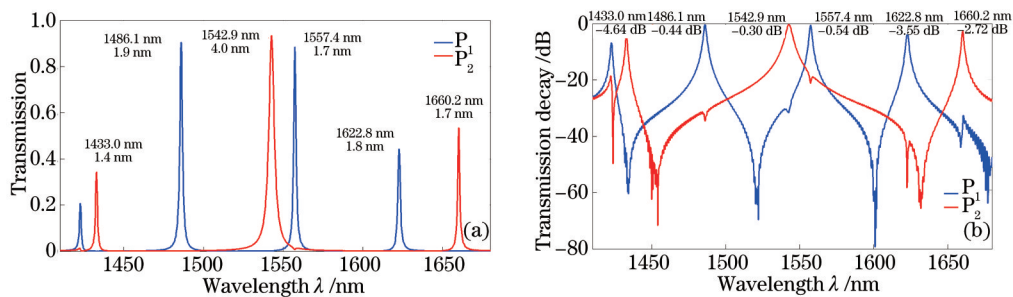


图9 带有 $3 \times 5$ 和 $3 \times 2$  PCURs的非对称结构反射式分束器两输出端口波长功率分束特性。(a) 传输特性; (b) 传输衰减

Fig.9 Wavelength power splitting characteristics of the two outputs of asymmetrical reflecting splitters based on  $3 \times 5$  and  $3 \times 2$  PCURs. (a) Transmission; (b) transmission decay



由图可知:其结构两输出信道峰值波长处的串扰强度在-13.74 dB~-53.04 dB,峰值半峰全宽在1.4~4.1 nm,其工作波长偏离峰值时输出信号强度将迅速衰减,能够有效地滤除不需要的波长。可知其结构具有优良的波长选择性和多通带分束性,可用于不同波长信号的分离。

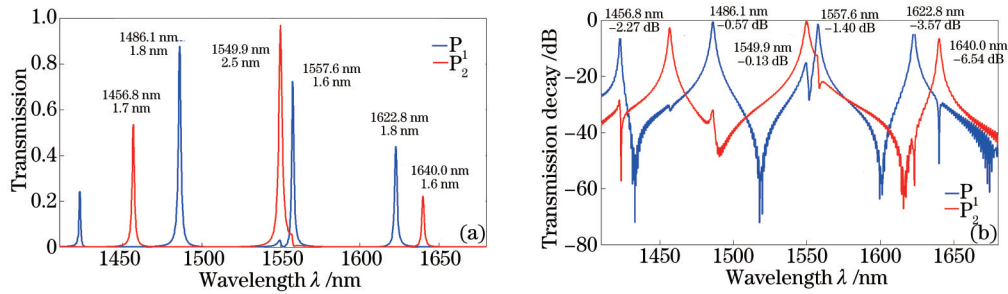


图 10 带有 3×5 和 3×3 PCURs 的非对称结构反射式分束器两输出端口波长功率分束特性。(a) 传输特性; (b) 传输衰减  
Fig.10 Wavelength power splitting characteristics of the two outputs of asymmetrical reflecting splitters based on 3×5 and 3×3 PCURs. (a) Transmission; (b) transmission decay

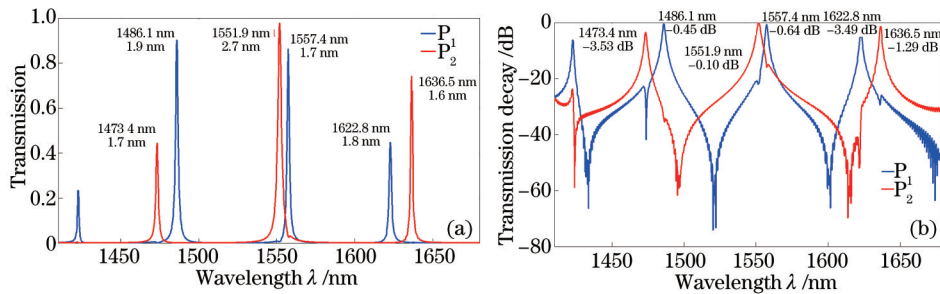


图 11 带有 3×5 和 3×4 PCURs 的非对称结构反射式分束器两输出端口波长功率分束特性。(a) 传输特性; (b) 传输衰减  
Fig.11 Wavelength power splitting characteristics of the two outputs of asymmetrical reflecting splitters based on 3×5 and 3×4 PCURs. (a) Transmission; (b) transmission decay

在图 2(a)所示带有 3×2 PCURs 的反射式分束器结构中分别调整靠近 P<sub>1</sub> 端口和 P<sub>2</sub> 端口的两 PCURs 拐角处的散射介质柱半径,或两 PCURs 3×2 内部介质柱半径,使其半径值分别取下列 5 组数据(0.21a, 0.19a)、(0.22a, 0.18a)、(0.23a, 0.17a)、(0.24a, 0.16a)、(0.25a, 0.15a)。图 12~图 16 在给出了其结构散射介质柱半径大小改变对两输出端口波长功率分束特性的影响。表明:随着靠近 P<sub>1</sub> 端口的两散射介质柱半径增加,靠近 P<sub>2</sub> 端口的两散射介质柱半径变小,两输出信道峰值波长向相反的方向移动,两峰值波长间隔变宽,从 6.1 nm 增加到 26.8 nm,传输强度衰减由 -0.80 dB, -0.50 dB 降低为 -0.24 dB, -0.22 B,信道串扰由 -10.83 dB, -10.62 dB 逐渐削弱到 -23.99 dB, -30.12 dB。

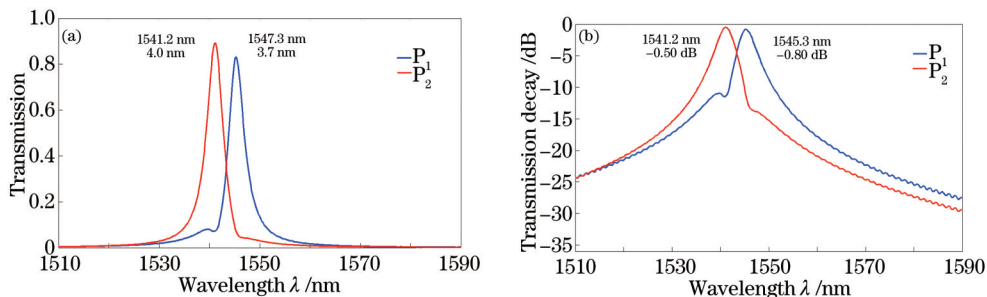


图 12 带有 3×2 PCURs 分束器中两 PCUR 的散射介质柱半径分别为 0.21a, 0.19a 对其波长功率分束特性的影响。  
(a) 传输特性; (b) 传输衰减

Fig.12 Wavelength power splitting characteristics of reflecting splitter based on 3×2 PCURs when radii of scattering dielectric rods are 0.21a, 0.19a in the two PCURs, respectively. (a) Transmission; (b) transmission decay

图 17~图 21 在给出了其结构 3×2 内部介质柱半径大小改变对两输出端口波长功率分束特性的影响。表明:随着靠近 P<sub>1</sub> 端口的 3×2 内部介质柱半径增加,靠近 P<sub>2</sub> 端口的 3×2 内部介质柱半径变小,两输出信道峰值

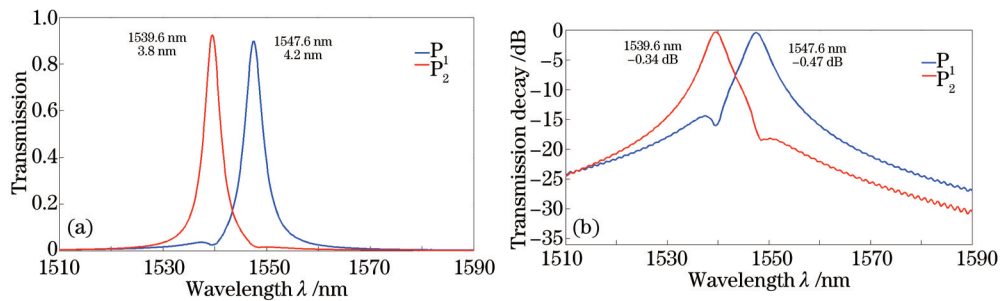


图 13 带有  $3 \times 2$  PCURs 分束器中两 PCUR 的散射介质柱半径分别为  $0.22a, 0.18a$  对其波长功率分束特性的影响。

(a) 传输特性; (b) 传输衰减

Fig.13 Wavelength power splitting characteristics of reflecting splitter based on  $3 \times 2$  PCURs when radii of scattering dielectric rods are  $0.22a, 0.18a$  in the two PCURs, respectively. (a) Transmission; (b) transmission decay

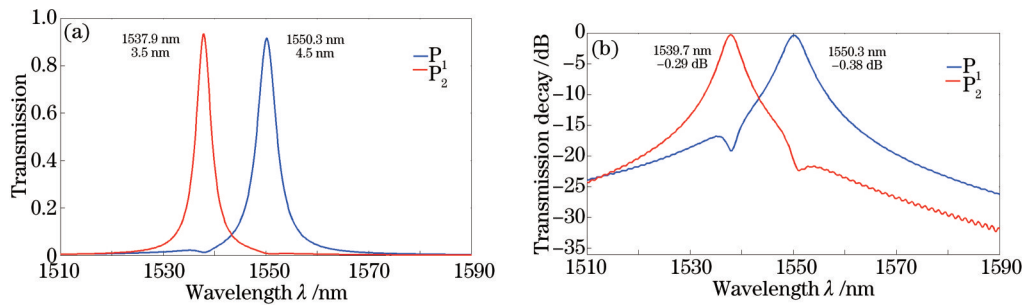


图 14 带有  $3 \times 2$  PCURs 分束器中两 PCUR 的散射介质柱半径分别为  $0.23a, 0.17a$  对其波长功率分束特性的影响。

(a) 传输特性; (b) 传输衰减

Fig.14 Wavelength power splitting characteristics of reflecting splitter based on  $3 \times 2$  PCURs when radii of scattering dielectric rods are  $0.23a, 0.17a$  in the two PCURs, respectively. (a) Transmission; (b) transmission decay

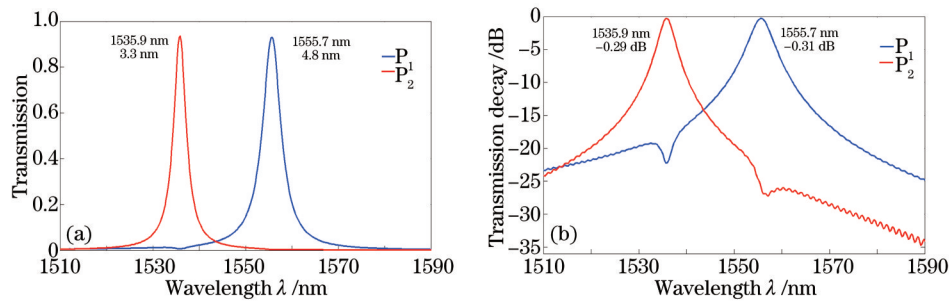


图 15 带有  $3 \times 2$  PCURs 分束器中两 PCUR 的散射介质柱半径分别为  $0.24a, 0.16a$  对其波长功率分束特性的影响。

(a) 传输特性; (b) 传输衰减

Fig.15 Wavelength power splitting characteristics of reflecting splitter based on  $3 \times 2$  PCURs when radii of scattering dielectric rods are  $0.24a, 0.16a$  in the two PCURs, respectively. (a) Transmission; (b) transmission decay

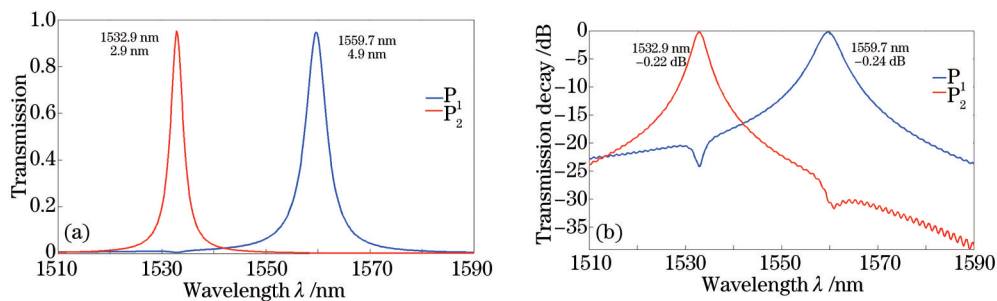


图 16 带有  $3 \times 2$  PCURs 分束器中两 PCUR 的散射介质柱半径分别为  $0.25a, 0.15a$  对其波长功率分束特性的影响。

(a) 传输特性; (b) 传输衰减

Fig.16 Wavelength power splitting characteristics of reflecting splitter based on  $3 \times 2$  PCURs when radii of scattering dielectric rods are  $0.25a, 0.15a$  in the two PCURs, respectively. (a) Transmission; (b) transmission decay

波长向相反的方向移动,两峰值波长间隔变宽,从7.2 nm增加到47.1 nm,传输强度衰减由-0.52 dB,-0.30 dB降低为-0.05 dB,-0.22 dB,信道串扰由-15.73 dB,-14.61 dB逐渐削弱到-33.83 dB,-30.09 dB。在分别调整散射介质柱半径和 $3\times 2$ 内部介质柱半径时,都具有随信道波长间隔增加,峰值处信号串扰削弱和传输损耗降低的特性。在第三通信窗口1530~1565 nm波长及其附近波长上可根据需要设计其信道波长间隔,此为弱串扰、低传输损耗光路设计、光通信器件设计等提供了灵活性。

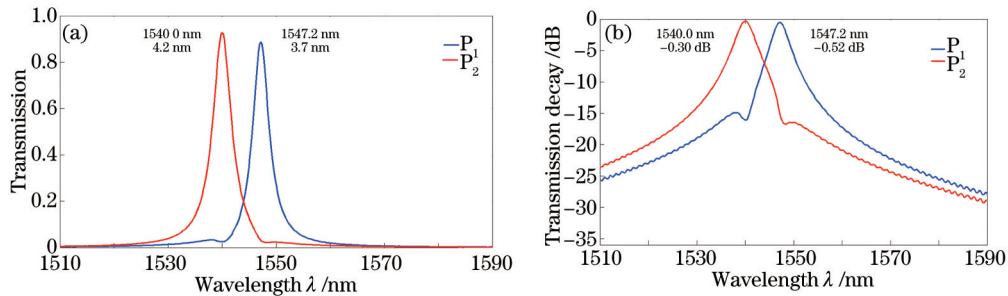


图 17 带有  $3\times 2$  PCUR 分束器中两 PCURs 的散射介质柱半径为  $0.21a, 0.19a$  对其两输出端口波长功率分束特性的影响。

(a) 传输特性; (b) 传输衰减

Fig.17 Wavelength power splitting characteristics of the two outputs of reflecting splitter based on  $3\times 2$  PCURs when radii of dielectric rods are  $0.21a, 0.19a$  in the two PCURs, respectively. (a) Transmission; (b) transmission decay

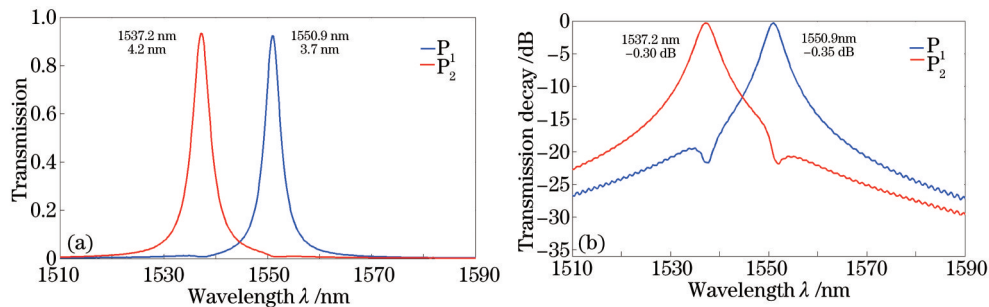


图 18 带有  $3\times 2$  PCUR 分束器中两 PCURs 的散射介质柱半径为  $0.22a, 0.18a$  对其两输出端口波长功率分束特性的影响。

(a) 传输特性; (b) 传输衰减

Fig.18 Wavelength power splitting characteristics of the two outputs of reflecting splitter based on  $3\times 2$  PCURs when radii of dielectric rods are  $0.22a, 0.18a$  in the two PCURs, respectively. (a) Transmission; (b) transmission decay

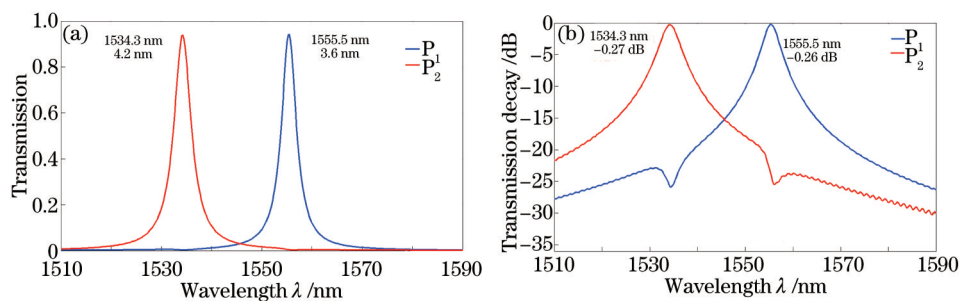


图 19 带有  $3\times 2$  PCUR 分束器中两 PCURs 的散射介质柱半径为  $0.23a, 0.17a$  对其两输出端口波长功率分束特性的影响。

(a) 传输特性; (b) 传输衰减

Fig.19 Wavelength power splitting characteristics of the two outputs of reflecting splitter based on  $3\times 2$  PCURs when radii of dielectric rods are  $0.23a, 0.17a$  in the two PCURs, respectively. (a) Transmission; (b) transmission decay

设计的对称结构反射式分束器可用于输入波长的功率二等均分,在第三通信窗口的输出波长都具有高传输率,且随其U-型腔体积增大,相邻峰值波长间隔有变小的趋势,根据这一特性利用两个不同大小的U-型腔可设计第三通信窗口不同波长的功率分束器。PCUR谐振频率随着内部介质柱半径增加,或散射介质柱径变大,谐振波长向长波方向移动,反之谐振波长向短波方向移动,根据这一特性也可在同一PCUR中调节其结构参数改变其谐振频率,用来设计第三通信窗口及其附近波段的高传输率信道分路器件。所给的同一光子晶体结构,晶格常数为  $a = 580$  nm,介质柱半径为  $r = 0.2a = 116$  nm,介质柱相对介电常数为

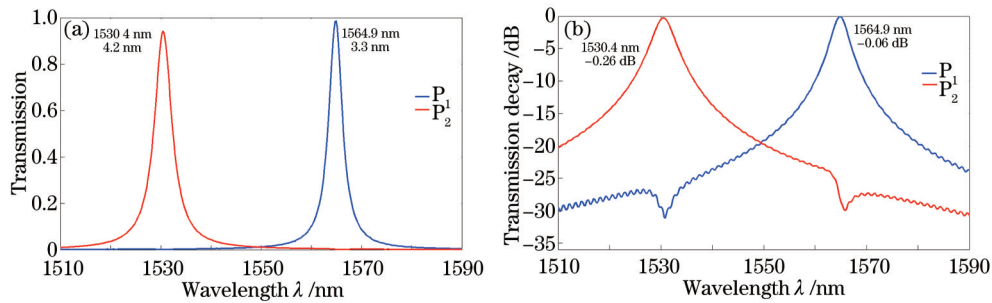


图20 带有  $3 \times 2$  PCUR分束器中两PCURs的散射介质柱半径为  $0.24a, 0.16a$  对其两输出端口波长功率分束特性的影响。(a) 传输特性; (b) 传输衰减

Fig.20 Wavelength power splitting characteristics of the two outputs of reflecting splitter based on  $3 \times 2$  PCURs when radii of dielectric rods are  $0.24a, 0.16a$  in the two PCURs, respectively. (a) Transmission; (b) transmission decay

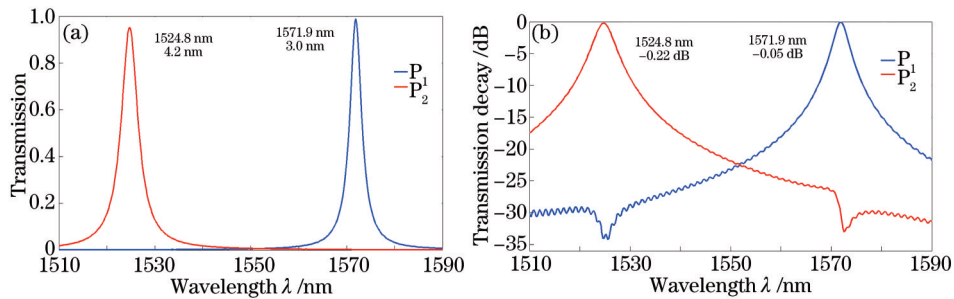


图21 带有  $3 \times 2$  PCUR分束器中两PCURs的散射介质柱半径为  $0.25a, 0.15a$  对其两输出端口波长功率分束特性的影响。(a) 传输特性; (b) 传输衰减

Fig.21 Wavelength power splitting characteristics of the two outputs of reflecting splitter based on  $3 \times 2$  PCURs when radii of dielectric rods are  $0.25a, 0.15a$  in the two PCURs, respectively. (a) Transmission; (b) transmission decay

$\epsilon_r = 12$ 。如设计  $1553 \text{ nm}$  波长的等分器件, 可通过调节结构的晶格常数, 及其介质柱半径来实现。如文中带有  $3 \times 2$  PCURs 反射式波长功率均分器结构晶格常数  $a_1 = 580 \text{ nm}$ , 在第三通信窗口工作波长为  $\lambda_1 = 1542.5 \text{ nm}$ , 如果设计  $1553 \text{ nm}$  的等分器件,  $\lambda_2 = 1553 \text{ nm}$ , 可由公式  $a_1/\lambda_1 = a_2/\lambda_2$  求得此时结构的晶格常数  $a_2 \approx 584 \text{ nm}$ , 对应介质柱半径大小为  $r_2 = 0.2a_2$ 。也可通过调节 PCUR 内部介质柱半径, 或散射介质柱半径等参数来设计  $1553 \text{ nm}$  的等分器件。为扩展信道空间, 设计串扰弱、传输率高、波长选择性强、紧凑型波长分束器件, 用于高密度波长信道的分离提取提供了可行性。

## 4 结 论

使用不同结构的 PCURs, 在介质柱正方格光子晶体中设计了对称结构和非对称结构反射式分束器, 并通过波导反射器结构进一步提高其工作的整体性能。利用 FDTD 方法研究了反射式分束器两输出端口波长功率分配特性。结果表明: 4 种对称结构具有优良的波长选择性和多通带分束性, 可用于同种波长的功率二等分, 在第三通信窗口都具有传输率高的特性; 不同大小 U-型腔的 PCURs 设计的 5 种非对称结构具有优良的波长选择性和多通带分束性, 可用于不同波长信号的分离, 在峰值波长处且具有信号串扰弱的特性; 在带有  $3 \times 2$  PCURs 的反射式分束器结构中分别调整两 PCURs 结构中散射介质柱半径、或其内部介质柱半径, 在第三通信窗口  $1530 \sim 1565 \text{ nm}$  波长及其附近波长上可根据需要设计其信道波长间隔, 这为低损耗、弱串扰光路设计、光通信器件设计等提供了灵活性。该反射式分束器可用作波分复用器、多波长下载滤波器、波长功率分配器等, 在低损耗光路集成设计、波长密集型光通信系统设计等方面存在潜在应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2062.
- 2 Alipour-Banaei H, Serajmohammadi S, Mehdizadeh F. Optical wavelength demultiplexer based on photonic crystal ring resonators[J]. Photonic Network Communications, 2015, 29(2): 146-150.



- 3 Djavid M, Abrishamian M S. Multi-channel drop filters using photonic crystal ring resonators[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2012, 123(2): 167-170.
- 4 Qiang Z, Zhou W, Soref R A. Optical add-drop filters based on photonic crystal ring resonators[J]. *Opt Express*, 2007, 15(4): 1823-1831.
- 5 Abolfazl Abbaspour, Hamed Alipour Banaei, Alireza Andalib. The new design and simulation of an optical add Drop filter based on hexagonal photonic crystal single ring race track resonator[J]. *Artificial Intelligence in Electrical Engineering*, 2013, 2(7): 44-48.
- 6 Sohrabi F, Mahinroosta T, Hamidi S M. Design of 1×3 power splitter based on photonic crystal ring resonator[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(11): 115104-115104.
- 7 Mao Yangping, Ji Minning, Xie Qingming, *et al.*. Reseach of twin-core optical fiber polarization beam splitter with input and output waveguides[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0505001.  
毛艳萍, 季敏宁, 解清明, 等. 带输入、输出端口的双芯光纤偏振分束器研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0505001.
- 8 Li Xuyou, Xu Zhenglong, Liu Pan, *et al.*. Short porlarization splitter based on dual-core photonic crystal fiber with ultra-high extinction ratio[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0605006.  
李绪友, 许振龙, 刘攀, 等. 短长度超高消光比双芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0605006.
- 9 Wang Xianwang, Zhang Wei, Han Jintao *et al.*. Investigation of structure design and transmission characteristic of GeSbSe photonic crystal waveguides[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1):0105001.  
王贤旺, 张巍, 韩金涛, 等. GeSbSe 光子晶体波导结构设计及传输特性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0105001.
- 10 Zhu Z, Brown T G. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers[J]. *Opt Express*, 2002, 10(17): 853-864.
- 11 Goldberg M. Stability criteria for finite difference approximations to parabolic systems[J]. *Applied Numerical Mathematics*, 2000, 33(1- 4): 509-515.
- 12 J P Berenger, A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. *Comput Phys* 1994, 114(2): 185-200.

栏目编辑: 韩峰