

基于微谐振器的光子晶体光信号分离器

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 为获得超宽可调谐光波长信号分束,在二维光子晶体结构中设计了基于微谐振器的光信号分离器;通过耦合模理论定性分析了不同设计情况下光信号分离器的工作性能;用时域有限差分方法研究了两个输出端对称的光信号分离器的工作特性,通过调节 5×5 微型谐振器的结构和整体柱的相对介电常数,分别得到了29个和38个通带,信道波导提取峰值波长与通带宽度的范围分别为 $1310.0 \sim 1655.5$ nm和 $2.0 \sim 7.4$ nm;该结构具有宽调谐通频带、有效滤除噪声信号以及同一峰值波长光信号等功率分束的特性;提出的结构在粗波分解复用设计、光信号功率均分设计、光学设计集成化等领域具有潜在的应用价值。

关键词 集成光学;光信号分离器;微型谐振器;时域有限差分法;耦合模理论;粗波分解复用;宽调谐通带

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.031301

Photonic Crystal Optical Signal Splitter Based on Micro Resonator

Wu Liheng, Wang Minghong

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

Abstract In order to obtain ultra-broadly tunable optical wavelength signal splitting, we design optical signal splitter based on micro resonator in the two-dimensional photonic crystal structure. The performance of the optical signal splitter is qualitatively analyzed by coupled-mode theory under different design conditions. Operating characteristics of optical signal splitter with two symmetrical outputs are studied by the finite-difference time-domain method. The results show that the splitter achieves 29 and 38 passbands by adjusting the structures of micro resonators of 5×5 and relative dielectric constants of the whole rods, respectively. Channel waveguide dropping peak wavelength and bandwidth ranges are $1310.0 \sim 1655.5$ nm and $2.0 \sim 7.4$ nm, respectively. The structure has characteristics of broadly tunable passband, effectively removing noise signals, optical signal equal power splitting at the same peak wavelength. The proposed signal splitter structure has potential application value in the fields of coarse wavelength division demultiplexing design, optical signal equal power splitting design, integration of optical design, etc.

Key words integrated optics; optical signal splitter; micro resonator; finite-difference time-domain method; coupled-mode theory; coarse wavelength division demultiplexing; broadly tunable passband

OCIS codes 130.3990; 130.3120; 130.6010; 130.7408

1 引言

为了在光纤两端获得比目前通信网络更高的信号传送速率,可在单模光纤中传送更多光信号波长来实现,在光纤末端用光解复用技术为每一位用户分开各自的信号波长,可以解决为每位用户分配一

根光纤而耗费过多资金的问题。在信道空间,实现单模光纤多信道波分复用的技术分为两种类型:粗波分复用(CWDM)和密集型波分复用(DWDM)。国际电信联盟-电信标准局推荐的CWDM系统支持 $1260 \sim 1675$ nm波段、信道间隔为20 nm的CWDM,可用于设计较多数量的波分复用信道;可

收稿日期: 2017-08-29; 收到修改稿日期: 2017-10-07

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,主要从事电磁波理论与技术方面的研究。E-mail: wulihenglctu@163.com

导师简介: 王明红(1967—),男,教授,博士,主要从事高功率微波与器件方面的研究。

E-mail: wangminghong@lcu.edu.cn(通信联系人)

选择的信道波长在 DWDM 系统中的窄信道间隔有 0.4, 0.8, 1.6 nm 利用 C 波段(1530~1565 nm)可以设计更多数量的波分复用信道。光解复用器在工作方式上有两种类型:有源解复用器和无源解复用器,其中:有源解复用器通过有源元器件与可调谐探测器组合而成;无源解复用器由衍射光栅、滤波器件等组成。目前,光解复用器技术局限于低正规化光传输功率、高串扰、低品质因子、尺寸大小在厘米数量级、不能用于集成光路设计等方面。光子晶体减小了技术上的设计问题,可将解波分复用器尺寸减小到微米量级。光子晶体是设计解波分复用系统的最佳选择,受到了极大关注^[1]。已有文献报道了利用光子晶体环型谐振器^[2-4]、光子晶体 H 型谐振器^[5]、光子晶体线缺陷谐振腔^[6]、光子晶体耦合谐振腔^[7]、光子晶体中心长方形介质柱谐振腔^[8]、光子晶体 T 型结构谐振腔等^[9]设计的波分多路复用(WDM)系统及其相关的光复用和解复用设计^[10]、光耦合器件设计^[11-12]、光传感器件设计^[13]。本文利用光子晶体波导与微型谐振器设计了光信号分离器,分析了波导与微型谐振器耦合结构及其工作状态,用时域有限差分(FDTD)方法^[14]研究了两输出端结构对称时波长信号的分离特性,设计的光信号分离器可用于设计宽波长段 CWDM 更多波长信号的解复用设计。

2 耦合模理论在光信号分离器工作状态下的分析及其在设计上的应用

图 1 所示光子晶体中设计的光信号分离器结构由 3 支波导和 5×5 微型谐振器(矩形框)组成。在结构中,用 S_{+1} 、 S_{-1} 分别描述输入波导端口处输入和输出的电磁波能量,用 S_{+2} 、 S_{+3} 分别描述两输出波导端口处输入的电磁波能量,用 S_{-2} 、 S_{-3} 分别描述两输出波导端口处输出的电磁波能量。利用时域耦合模理论(CMT)^[15-18]对该结构中谐振器与波导之间的耦合性能进行定性分析。瞬时 CMT 基于输入、输出电磁场通量平衡瞬时的微分方程,设谐振器的腔内场振幅为 $a(t)$,对应的谐振频率为 ω_0 。当 $S_{+2}=0$ 、 $S_{+3}=0$ 时,根据 CMT 对 $a(t)$ 求时间的导数:

$$\frac{da(t)}{dt} = j\omega_0 a(t) - \left(\frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_3} \right) a(t) + K_1 S_{+1}, \quad (1)$$

$$S_{-1} = -S_{+1} + \sqrt{\frac{2}{\tau_1}} a(t), \quad (2)$$

$$S_{-i} = \sqrt{\frac{2}{\tau_i}} a(t), \quad i = 2, 3 \quad (3)$$

式中 $1/\tau_1$ 为谐振腔 $a(t)$ 耦合到输入波导的模式振幅衰减率, $1/\tau_2$ 、 $1/\tau_3$ 为谐振腔 $a(t)$ 耦合到两输出波导的模式振幅衰减率, $1/\tau_0$ 为谐振腔 $a(t)$ 的损耗衰减率。相关的外部耦合因子为: $Q_1 = \omega\tau_1/2$ 、 $Q_2 = \omega\tau_2/2$ 、 $Q_3 = \omega\tau_3/2$, 谐振腔固有品质因子为: $Q_0 = \omega\tau_0/2$, 其中 ω 为电磁波角频率。固有品质因子用于描述谐振腔向周围结构传输功率时因泄漏而造成的能量固有损耗,外部耦合因子用于描述腔与波导耦合作用时能量的泄漏。输入波导与谐振腔 $a(t)$ 的耦合系数 K_1 依赖于 $1/\tau_1$, 两者之间的关系为: $K_1 = \sqrt{2/\tau_1}$ 。该结构工作于谐振状态时,按照 CMT 可得到输入端口处的正规化反射率 R 、输出端口 P_1 处正规化传输率 T_1 、输出端口 P_2 处正规化传输率 T_2 、输出端口 P_1 和 P_2 总正规化传输率 T 及谐振腔正规化损耗率 L 分别为

$$R = \left| \frac{S_{-1}}{S_{+1}} \right|^2 = \frac{\left| \frac{Q_3}{Q_1} - \frac{Q_3}{Q_0} - \frac{Q_3}{Q_2} - 1 \right|^2}{\frac{Q_3}{Q_1} + \frac{Q_3}{Q_0} + \frac{Q_3}{Q_2} + 1}, \quad (4)$$

$$T_1 = \left| \frac{S_{-2}}{S_{+1}} \right|^2 = \frac{\left| \frac{2Q_3}{\sqrt{Q_1 Q_2}} \right|^2}{\frac{Q_3}{Q_1} + \frac{Q_3}{Q_0} + \frac{Q_3}{Q_2} + 1}, \quad (5)$$

$$T_2 = \left| \frac{S_{-3}}{S_{+1}} \right|^2 = \frac{\left| \frac{2\sqrt{Q_3}}{Q_1} \right|^2}{\frac{Q_3}{Q_1} + \frac{Q_3}{Q_0} + \frac{Q_3}{Q_2} + 1}, \quad (6)$$

$$T = T_1 + T_2 = \frac{\left| \frac{2\sqrt{Q_3(Q_3+1)}}{Q_1(Q_2+1)} \right|^2}{\frac{Q_3}{Q_1} + \frac{Q_3}{Q_0} + \frac{Q_3}{Q_2} + 1}, \quad (7)$$

$$L = 1 - R - T_1 - T_2 = \frac{\left| \frac{2Q_3}{\sqrt{Q_1 Q_0}} \right|^2}{\frac{Q_3}{Q_1} + \frac{Q_3}{Q_0} + \frac{Q_3}{Q_2} + 1}. \quad (8)$$

图 2~6 依次给出了信号分离器输入端口处正规化反射率 R 、输出端口 P_1 和 P_2 处正规化传输率、两输出端口总正规化传输率 T 、谐振腔正规化损耗率 L 随结构工作参数 Q_0/Q_3 变化的特征曲线,各个分图用不同颜色的线对应标出了结构工作参数 Q_3/Q_2 。根据 CMT 研究了基于微型谐振器的光子晶体光信号分离器在不同设计状况下的工作性能,针对

结构实现输入信号 100% 提取输出的强耦合传输条件, 信号能量由输入端全部反射的条件以及信号能量由谐振腔全部辐射损耗的条件, 通过调整纵坐标或横坐标的取值范围来选取反映其性能变化明显的典型设计结构的工作参数 (Q_3/Q_1 的值分别为 0.01、

0.1、0.5、1、2、40)。当 Q_3/Q_1 的值分别为 0.01、0.1、0.5 时, 工作参数对器件各输出参数 (反射率、传输率等) 的影响趋势基本一致, 且对其工作性能的影响比较明显, 便于针对性地说明器件在不同设计状况下工作性能变化的规律。

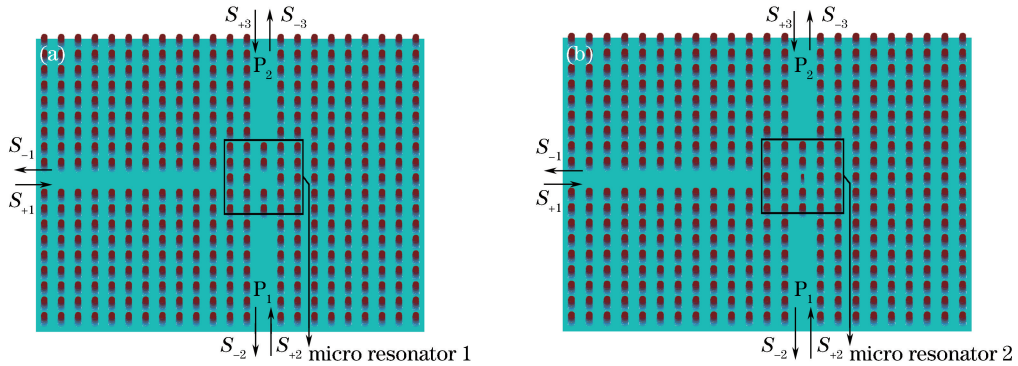


图 1 光子晶体光信号分离器的结构 I 和结构 II。(a) 具有空气谐振腔的结构 I；(b) 具有介质柱谐振腔的结构 II
Fig. 1 Structure I and structure II of photonic crystal optical signal splitter. (a) Structure I with an air cavity; (b) structure II with a dielectric rod cavity

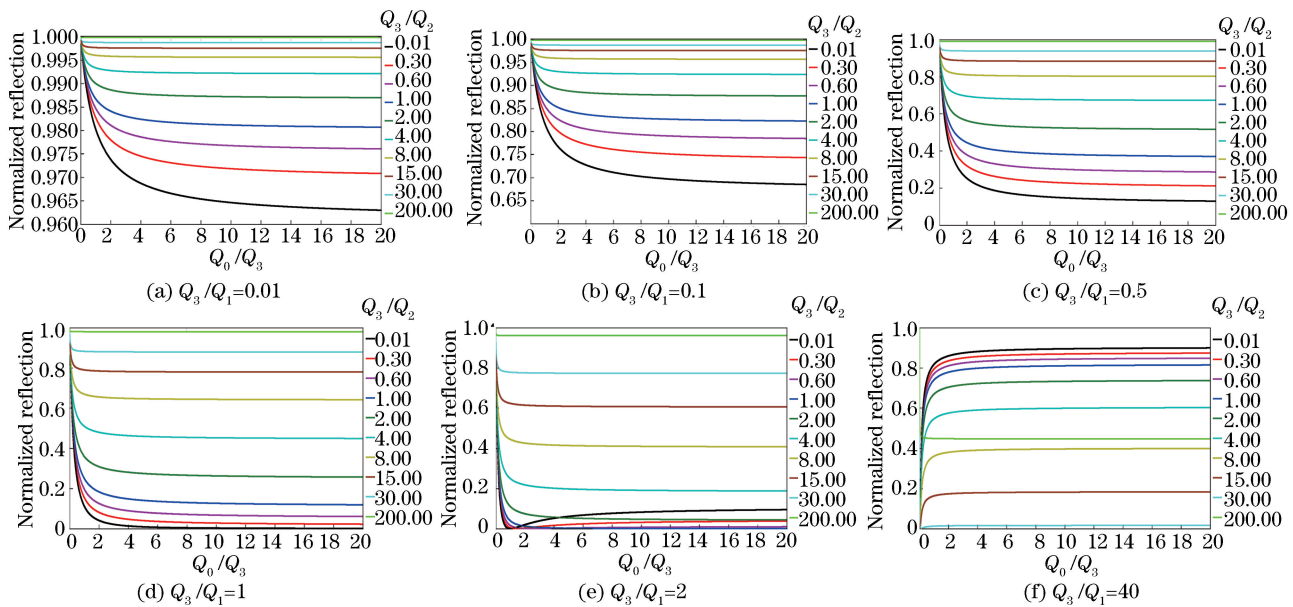


图 2 不同 Q_3/Q_1 光信号分离器输入端口正规化反射率

Fig. 2 Normalized reflection of the input port of optical signal splitter with different ratios of Q_3/Q_1

图 2 表明: 当 $Q_3/Q_1 \rightarrow 0$ 时, 输入信号能量通过腔与波导模式耦合使得谐振腔损耗及输出端口传输完全被抑制, 输入端口信号能量的正规化反射率 $R \rightarrow 100\%$; 当 $Q_3/Q_0 = Q_3/Q_1 - Q_3/Q_2 - 1$ 时, 输入端口处正规化反射率 $R = 0$, 输出端口 P_1 处的正规化传输率 $T_1 = Q_1/Q_2$, 输出端口 P_2 处的正规化传输率 $T_2 = Q_1/Q_3$, 谐振腔正规化损耗率 $L = Q_1/Q_0$; 由 $Q_3/Q_0 = Q_3/Q_1 - Q_3/Q_2 - 1$ 得 $Q_1/Q_2 + Q_1/Q_3 = 1 - Q_1/Q_0$, 当 $Q_1/Q_0 \rightarrow 0$ 时, $T_2 + T_2 \rightarrow$

100%。可知在非对称输出结构中, 当反射率 $R = 0$, 谐振腔损耗率 $L \rightarrow 0$ 时, 理论上在腔与波导模式强耦合的状况下, 输入信号能量谐振腔损耗及输入端口反射完全被抑制, 输入信号能量 100% 耦合输出, 实现了输入信号从两输出端口无损耗的输出。

图 3 表明: 当 $Q_3/Q_1 \rightarrow 0$ 时, $T_1 \rightarrow 0$; 当 $Q_3/Q_1 \rightarrow \infty$ 时, $T_1 = \left[\frac{2\sqrt{Q_1/Q_2}}{Q_1/Q_0 + Q_1/Q_2 + 1} \right]^2$, 若 $Q_2/Q_1 = 1$, $Q_0/Q_1 \rightarrow \infty$, 则 $T_1 \rightarrow 100\%$, 实现了输入信号在输出

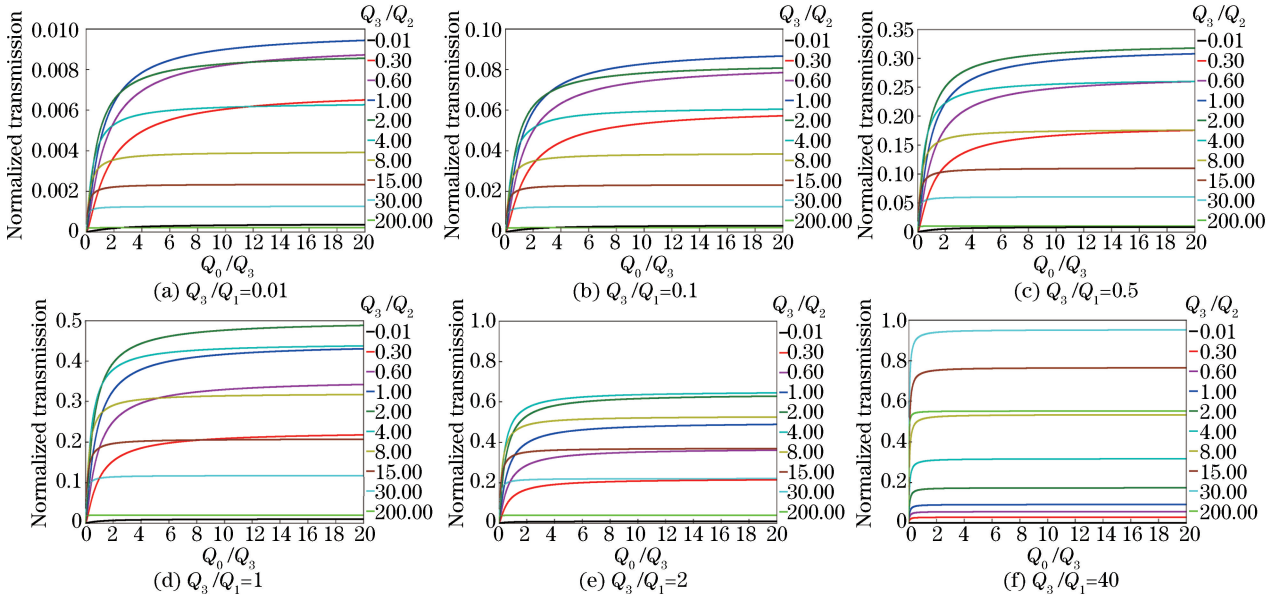


图 3 不同 Q_3/Q_1 光信号分离器输出端口 P_1 的正规传输率

Fig. 3 Normalized transmission of the output port P_1 of optical signal splitter with different ratios of Q_3/Q_1

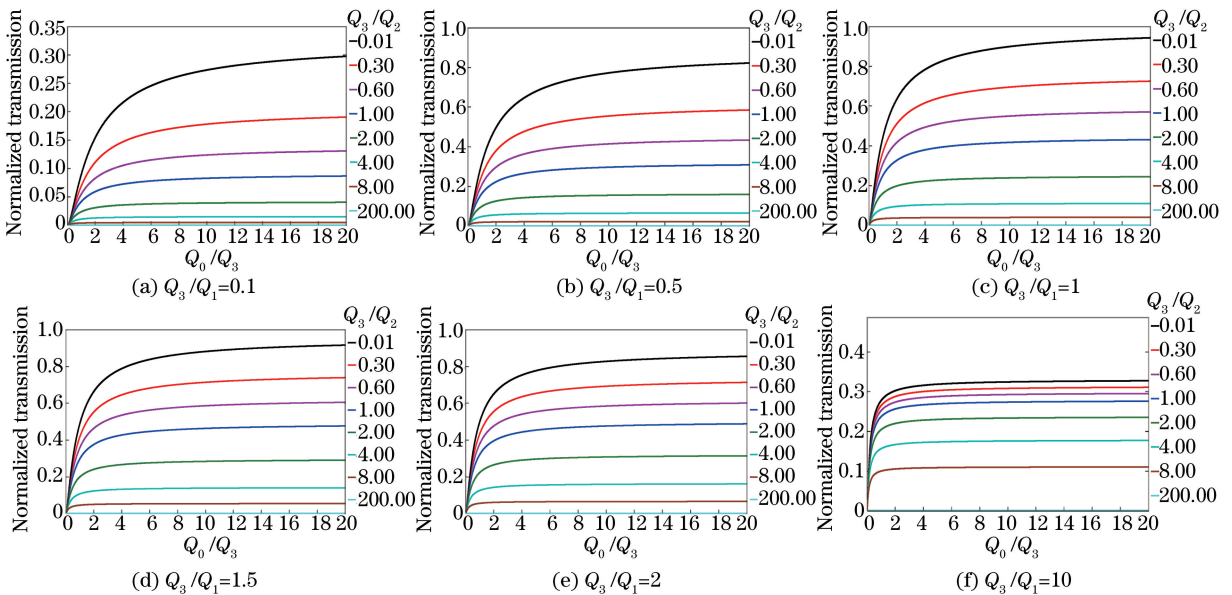


图 4 不同 Q_3/Q_1 光信号分离器输出端口 P_2 的正规化传输率

Fig. 4 Normalized transmission of the output port P_2 of optical signal splitter with different ratios of Q_3/Q_1

端口 P_1 无损耗的传输,此时谐振腔损耗、输入端口反射和输出端口 P_2 信号传输完全被抑制。

图 4 表明:当 $Q_3/Q_1 \rightarrow 0$ 时, $T_2 \rightarrow 0$; 当 $Q_3/Q_2 \rightarrow 0$ 时, $T_2 = \left| \frac{2\sqrt{Q_3/Q_1}}{Q_3/Q_1 + Q_3/Q_0 + 1} \right|^2$, 当 $Q_3/Q_1 = 1$, $Q_0/Q_3 \rightarrow \infty$ 时, 输入信号同样可从输出端口 P_2 实现无损耗的传输。

图 5 表明:当 $Q_3/Q_1 \rightarrow 0$ 时, $T \rightarrow 0$; 当两输出端对称时, $Q_2/Q_3 = 1$, $T = \left| \frac{2\sqrt{2Q_3/Q_1}}{Q_3/Q_1 + Q_3/Q_0 + 2} \right|^2$, 正

规化反射率 $R = \left| \frac{Q_3/Q_1 - Q_3/Q_0 - 2}{Q_3/Q_1 + Q_3/Q_0 + 2} \right|^2$, $L = \left| \frac{2\sqrt{Q_3/Q_0}}{Q_3/Q_1 + Q_3/Q_0 + 2} \right|^2$; 当 $Q_3/Q_1 = 2$, $Q_0/Q_3 \rightarrow \infty$ 时, $T \rightarrow 100\%$, $R \rightarrow 0$, $L \rightarrow 0$ 。理论上,在腔与波导模式强耦合的状况下,谐振腔损耗及输入端口反射完全被抑制,实现了输入信号从两输出端口无损耗的传输。

图 6 表明:当 $Q_3/Q_1 \rightarrow 0$ 时, $L \rightarrow 0$; 当 $Q_3/Q_0 = Q_3/Q_1 + Q_3/Q_2 + 1$ 时, 谐振腔正规化损耗率取极大值 $L_{\max} = Q_0/Q_1 = 1 - Q_0/Q_2 - Q_0/Q_3$, 两输出端口

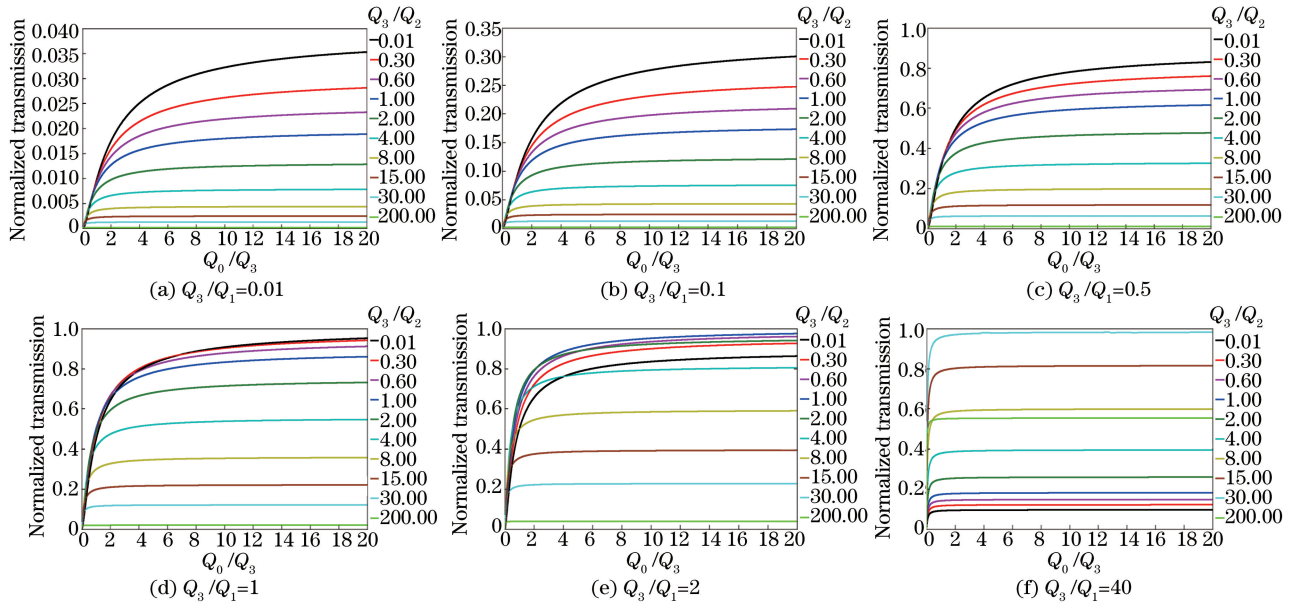


图 5 不同 Q_3/Q_1 光信号分离器两输出端口的总规范化传输率

Fig. 5 Total normalized transmission of the output ports of optical signal splitter with different ratios of Q_3/Q_1

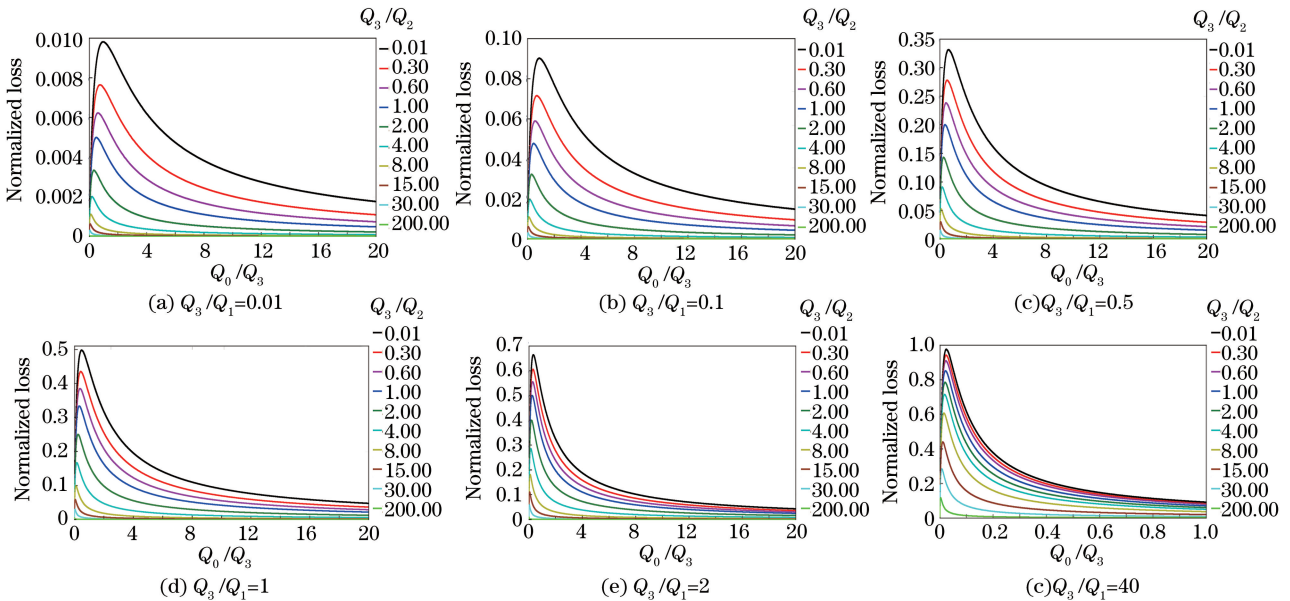


图 6 不同 Q_3/Q_1 光信号分离器的规范化谐振腔损耗率

Fig. 6 Normalized cavity loss of optical signal splitter with different ratios of Q_3/Q_1

处规范化传输率分别为 $T_1 = Q_2^2 / (Q_1 Q_2)$, $T_2 = Q_3^2 / (Q_1 Q_3)$, 输入端口处的规范化反射率 $R = (Q_0 / Q_2 + Q_0 / Q_3)^2$, 若 $Q_0 / Q_2 \rightarrow 0$, $Q_0 / Q_3 \rightarrow 0$, 则 $L \rightarrow 100\%$, $T_1 \rightarrow 0$, $T_2 \rightarrow 0$, $R \rightarrow 0$ 。理论上, 在腔与波导模式耦合谐振腔强辐射损耗状况下, 输入端口反射和输出端口传输完全被抑制, 输入信号能量 100% 由谐振腔辐射损耗。

3 基于微型谐振器的光子晶体光信号分离器

如图 1 所示, 在以空气为背景的正方格介质柱

光子晶体中设计了基于微型谐振器的光信号分离器结构 I 和结构 II, 整体介质柱的相对介电常数为 12, 空气的相对介电常数近似为 1, 晶格常数 a 为 530 nm, 结构横截面积大小为 $122.75 \mu\text{m}^2$ 。图 1(a)、(b) 分别用矩形框画出了光子晶体 5×5 区域缺陷形成的微型谐振器结构 1 和结构 2, 其中结构 1 中心具有空气谐振腔, 结构 2 中心具有半径为 $0.08a$ 的介质柱谐振腔。在设计结构中, 水平方向有 1 个输入波导, 垂直方向有 2 个输出波导, 波导的开口都正对着谐振器中心。在输入端口 $S_{\pm 1}$ 处设置了发射横磁波(TM 波)的信号源, 并在信道

波导输出端口 $S_{\pm 2}$ 、 $S_{\pm 3}$ 分别设置了接收器,以探测输出波长信号功率强度。为了吸收结构向周围发出的电磁波,设置了完全匹配层^[19]吸收边界,将进入的电磁波吸收掉。每个正方格原胞分成 40×40 等份,在数值计算满足 Courant 稳定性的条件^[20]下,用 FDTD 方法^[14]研究结构的光信号分离特性。

CMT 为设计不同工作性能的光信号分离器结构提供了指导思想,图 1 所示光子晶体光信号分离器结构两输出端结构对称时, $Q_2/Q_3=1$,当满足波导与谐振腔模式的强耦合作用条件($Q_3/Q_1=2$, $Q_0/Q_3 \rightarrow \infty$)时,可实现输入信号从两输出端口无损耗地传输,CMT 能为这个概念提供定性描述。在现实中,谐振腔的品质因数为有限值,工作参数 Q_3/Q_1 和 Q_0/Q_3 随结构设计而变化,结构提取的信号波长传输性能也随着变化,输入端口反射和谐振腔损耗降低了两输出端口对输入信号的正规化传输率。调节图 1 所示矩形框内谐振腔外的柱半径,改变谐振腔与波导的耦合模式,分别得到图 7(a)、(b) 所示的光子晶体光信号分离器结构 I 和结构 II 两个输出端口的正规化传输谱,横坐标表示信号分离器的工作波长,纵坐标表示正规化传输率(0~0.5)。输出谱特性曲线表明:信号分离器结构 I 和结构 II

具有优异的单通带选择输出特性,能有效隔离其他不需要的波长;当结构 I 工作于 1280~1460 nm 波段,结构 II 工作于 1420~1460 nm 波段,各自的两输出端口 P_1 和 P_2 传输同一峰值波长时,其正规化传输率、通带带宽等光学性能完全相同,在设计结构参数上分别给出了 15 个、14 个不同峰值波长的传输通带。为了便于观察信号分离器输出的光学特性,在表 1 中列出图 1 所示光信号分离器结构中矩形框内谐振腔外的柱半径 r_i 及其对应的光学输出谱特性参数:峰值波长 λ 及其通带带宽 $\Delta\lambda$ 、端口 P_1 和 P_2 的总正规化传输率 T 。表中列出了柱半径值和对应的顺序号,并在图 7 中用带有相同顺序号但不同颜色的线对应设计结构的输出谱特性曲线。由表 1 所列的光信号分离器工作时输出的重要光学参数可知:通过调节 5×5 微型谐振器结构介质柱半径改变光子晶体区域的缺陷态,使波导与微型谐振腔在不同工作模式下实现分离不同波长的功能,在 1280~1600 nm 波段得到结构 I 和结构 II 两输出端口各自的传输峰值波长范围分别为 1310.0~1429.4 nm、1459.7~1582.6 nm,各自峰值波长的总正规化传输率范围分别为 81.2%~94.1%、82.2%~98.1%,各自的通带带宽范围分别为 4.0~5.0 nm、2.4~6.5 nm。

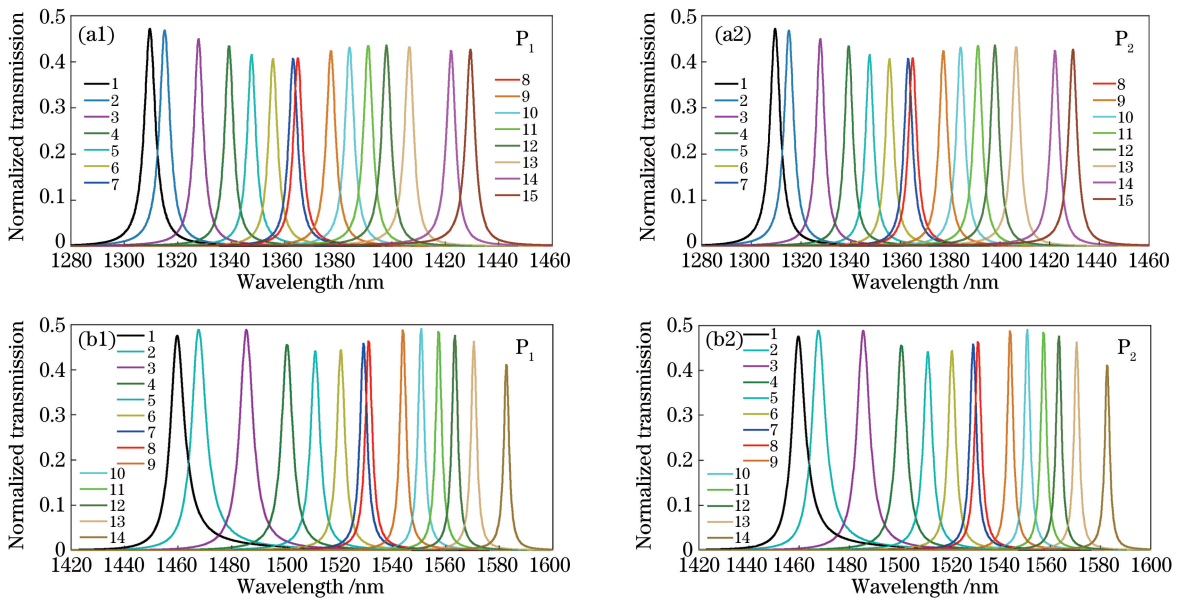


图 7 光子晶体光信号分离器结构 I 和结构 II 各自的正规化传输谱。(a) 结构 I 微型谐振器柱半径取值不同时两输出端口 P_1 和 P_2 正规化传输谱;(b) 结构 II 微型谐振器柱半径取值不同时两输出端口 P_1 和 P_2 正规化传输谱
Fig. 7 Normalized transmission spectra of the photonic crystal optical signal splitter structure I and structure II .

(a) Normalized transmission spectra of the two outputs P_1 and P_2 for different rod radii of micro resonator in the structure I ; (b) normalized transmission spectra of the two outputs P_1 and P_2 for different rod radii of micro resonator in the structure II

表 1 结构 I 和结构 II 微型谐振器柱半径取值不同时两输出端口 P_1 和 P_2 的重要光学参数
 Table 1 Significant optical parameters of the two outputs P_1 and P_2 for different rod radii of micro resonators in the structure I and structure II

Structure I					Structure II				
Line No.	r_i /nm	λ /nm	$\Delta\lambda$ /nm	T /%	Line No.	r_i /nm	λ /nm	$\Delta\lambda$ /nm	T /%
1	0.140a	1310.0	5.0	94.3	1	0.140a	1459.7	6.5	95.1
2	0.145a	1315.1	4.7	93.7	2	0.145a	1467.6	6.5	97.7
3	0.150a	1327.8	4.2	90.0	3	0.150a	1485.5	6.0	97.7
4	0.155a	1339.1	4.0	86.8	4	0.155a	1500.7	5.0	91.1
5	0.160a	1347.6	4.0	83.0	5	0.160a	1511.4	3.7	88.1
6	0.165a	1355.6	4.0	81.2	6	0.165a	1521.0	3.6	88.7
7	0.170a	1363.1	4.0	86.5	7	0.170a	1529.3	3.2	91.6
8	0.175a	1364.8	4.1	81.5	8	0.175a	1531.2	3.1	92.6
9	0.180a	1377.2	4.2	84.6	9	0.180a	1544.0	2.8	97.5
10	0.182a	1384.2	4.2	86.2	10	0.182a	1550.9	2.8	98.1
11	0.190a	1391.1	4.3	86.9	11	0.190a	1557.3	2.7	96.8
12	0.195a	1398.0	4.2	87.1	12	0.195a	1563.5	2.6	95.3
13	0.200a	1406.5	4.2	86.2	13	0.200a	1570.6	2.5	92.5
14	0.205a	1422.1	4.1	84.8	14	0.205a	1582.6	2.4	82.2
15	0.210a	1429.4	4.2	85.3					

当信号分离器结构输出端对称时,只改变其整体介质柱的相对介电常数 ϵ_r ,得到了两输出端口 P_1 和 P_2 的正规化传输谱,如图 8(a)、(b)所示。图 8 表明:当结构 I 工作于 1300~1480 nm 波段,结构 II 工作于 1400~1690 nm 波段时,各自的两输出端

口 P_1 和 P_2 传输同一峰值波长时的光学性能完全相同,在设计结构参数上分别都给出了 19 个不同峰值波长的传输通带。为了便于观察信号分离器结构两信道波导的输出光学特性,在表 2 中列出了整体介质柱相对介电常数取值和对应的顺序号,并在图

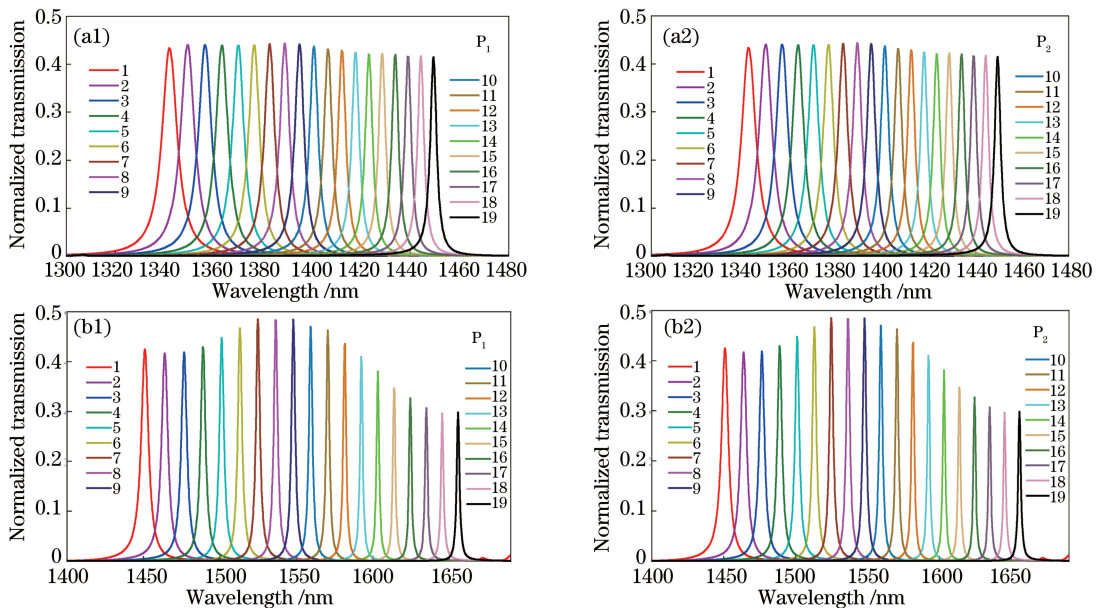


图 8 光子晶体光信号分离器结构 I 和结构 II 各自的正规化传输谱。(a)结构 I 整体介质柱的相对介电常数取值不同时两输出端口 P_1 和 P_2 的正规化传输谱;(b)结构 II 整体介质柱的相对介电常数取值不同时两输出端口 P_1 和 P_2 的正规化传输谱

Fig. 8 Normalized transmission spectra of the photonic crystal optical signal splitter structure I and structure II.

(a) Normalized transmission spectra of the two outputs P_1 and P_2 for different dielectric constants of the whole rods in the structure I; (b) normalized transmission spectra of the two outputs P_1 and P_2 for different dielectric constants of the whole rods in the structure II

8 中用带有相同顺序号不同颜色的线对应设计结构的输出谱特性曲线。由表 2 列出的光信号分离器的重要光学参数可知,通过改变整体介质柱的相对介电常数 ϵ_r (9.0~14.4) 调节波导与微型谐振腔的耦合模式,在 1300~1690 nm 波段得到的结构 I 和结

构 II 两输出端口各自的传输峰值波长范围分别为 1342.1~1449.5 nm 和 1450.9~1655.6 nm,各自峰值波长的总正规化传输率范围分别为 82.9%~88.6%、59.3%~97.0%,各自的通带带宽范围分别为 3.1~7.4 nm,2.0~5.7 nm。

表 2 结构 I 和结构 II 整体介质柱的相对介电常数取值不同时两输出端口 P_1 和 P_2 的重要光学参数
Table 2 Significant optical parameters of the two outputs P_1 and P_2 for different dielectric constants of the whole rods in the structure I and structure II

Structure I					Structure II				
Line No.	ϵ_r	λ /nm	$\Delta\lambda$ /nm	T /%	Line No.	ϵ_r	λ /nm	$\Delta\lambda$ /nm	T /%
1	9.0	1342.1	7.4	86.7	1	9.0	1450.9	5.7	84.9
2	9.3	1349.5	7.0	88.1	2	9.3	1464.0	5.1	83.3
3	9.6	1356.5	6.5	88.1	3	9.6	1476.6	4.5	83.6
4	9.9	1363.3	6.2	87.8	4	9.9	1488.9	4.0	85.7
5	10.2	1369.9	5.8	87.7	5	10.2	1501.1	3.6	89.5
6	10.5	1376.6	5.5	87.9	6	10.5	1513.2	3.3	93.5
7	10.8	1382.8	5.1	88.5	7	10.8	1524.8	3.2	97.0
8	11.1	1388.8	4.9	88.6	8	11.1	1536.3	3.1	96.6
9	11.4	1394.9	4.6	88.4	9	11.4	1548.0	2.9	96.8
10	11.7	1400.8	4.4	87.4	10	11.7	1559.2	2.8	94.0
11	12.0	1406.5	4.2	86.2	11	12.0	1570.6	2.5	92.5
12	12.3	1412.1	4.0	85.7	12	12.3	1581.7	2.3	87.2
13	12.6	1417.8	3.8	84.8	13	12.6	1592.4	2.2	81.9
14	12.9	1423.1	3.7	84.1	14	12.9	1603.2	2.1	76.1
15	13.2	1428.6	3.5	84.3	15	13.2	1613.8	2.0	69.2
16	13.5	1433.9	3.4	84.0	16	13.5	1624.5	2.0	65.3
17	13.8	1439.0	3.3	83.1	17	13.8	1635.0	2.0	61.4
18	14.1	1444.4	3.2	83.3	18	14.1	1645.2	2.1	59.3
19	14.4	1449.5	3.1	82.9	19	14.4	1655.6	2.1	59.6

利用光子晶体 5×5 缺陷区域设计了具有空气谐振腔和介质柱谐振腔的两种微型谐振器结构,分别用于光子晶体光信号分离器结构 I 和结构 II 的设计,结果表明:通过改变两结构整体介质柱的相对介电常数,以及调节 5×5 微型谐振器结构介质柱半径,可以改变光子晶体区域的缺陷态,使波导与微型谐振腔在不同工作模式下实现了分离不同波长的功能,且光信号分离器输出结构设计的对称性可以对同一峰值波长光信号进行等功率分束,在所给结构设计参数上信道空间提取峰值波长为 1310.0~1655.5 nm,具有优异的宽波段单通带选择输出和有效滤除噪声信号的特性,该结构能很好地实现分离波长的功能,可以应用于粗波分解复用设计;与光子晶体环型谐振器、光子晶体 H 型谐振器、光子晶体线缺陷谐振腔、光子晶体耦合谐振腔、光子晶体中心长方形介质柱谐振腔、光子晶体 T 型结构谐振腔相比,微型谐振器结构的设计尺寸更小,有利于器件的集成化;通过光子晶体波导与微型谐振腔的耦合,该

结构输入波长信号的传输方向改变了 90° ,并由两信道波导等功率反向输出。通过进一步调节介质柱的相对介电常数及微型谐振器结构设计,该光信号分离器信道波导可以传输更多不同的峰值波长信号,可用于国际电信联盟-电信标准局推荐的 CWDM 系统 1260~1675 nm 波段更多波长信号的波分解复用设计。

4 结 论

借助 CMT 分析了基于微型谐振器的光子晶体光信号分离器在不同结构设计状况下的工作性能,给出了非对称输出结构和对称输出结构实现输入信号能量 100% 提取的强耦合传输条件、实现输入信号能量 100% 谐振腔损耗的强辐射条件、输入信号能量 100% 反射的强反射条件,以及这些条件下对应的 CMT 公式。用 FDTD 方法研究了两输出端对称的光信号分离器的输出波长信号特性,在设计的参数上调节 5×5 微型谐振器结构和光信号分离器

整体介质柱的相对介电常数,分别得到了29个和38个传输通带,其工作信道空间提取峰值波长为1310.0~1655.5 nm,可满足调谐通带波段宽以及有效滤除噪声信号的要求,并具有优异的峰值波长信号功率二等分、单通带选择输出特性。该结构可应用于光波长信号功率均分设计、CWDM系统解复用设计、光学集成化设计等领域。

参 考 文 献

- [1] Keiser G E. A review of WDM technology and applications[J]. *Optical Fiber Technology*, 1999, 5(1): 3-39.
- [2] Mansouri-Birjandi M A, Rakhshani M R. A new design of tunable four-port wavelength demultiplexer by photonic crystal ring resonators[J]. *Optik*, 2013, 124(23): 5923-5926.
- [3] Alipour-Banaei H, Jahanara M, Mehdizadeh F. T-shaped channel drop filter based on photonic crystal ring resonator[J]. *Optik*, 2014, 125(18): 5348-5351.
- [4] Rashki Z, Chabok S J S M. Novel design of optical channel drop filters based on two-dimensional photonic crystal ring resonators [J]. *Optics Communications*, 2017, 395(15): 231-235.
- [5] Rezaee S, Zavvari M, Alipour-Banaei H. A novel optical filter based on H-shape photonic crystal ring resonators[J]. *Optik*, 2015, 126(20): 2535-2538.
- [6] Mehdizadeh F, Soroosh M. A novel proposal for all optical demultiplexers based on photonic crystal[J]. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 2015, 9(3): 324-328.
- [7] Bendjelloul R, Bouchemat T, Bouchemat M. Channel drop filter based on coupled cavity in photonic crystals [J]. *Journal of New Technology and Materials*, 2014, 4(1): 81-85.
- [8] Feng S, Gan L. Multi-channel slow light coupled-resonant waveguides based on photonic crystal with rectangular microcavities [J]. *Optics Communications*, 2015, 341(15): 257-262.
- [9] Balajia V R, Murugan M, Robinson S. Design of four-channel drop filter based on square resonant nanocavity [J]. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 2016, 7(2): 1133-1137.
- [10] Fu P D, Chen H M. Design and performance analysis of three-mode division multi/demultiplexer based on two-dimensional photonic crystals [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(2): 020602. 付培栋, 陈鹤鸣. 基于二维光子晶体三模式模分复用/解复用器的设计与性能分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(2): 020602.
- [11] Qian C J, Xie X, Yang J N, *et al.* Coupling of two-dimensional slab photonic crystal micro-cavities and waveguides [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 030001. 钱琛江, 谢昕, 杨静南, 等. 二维平板光子晶体微腔与波导的耦合[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 030001.
- [12] Su K, Wang Z M, Liu J J. Three waveguides directional coupler based on two dimensional square lattice photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0323002. 苏康, 王梓名, 刘建军. 二维正方晶格光子晶体三光波导方向耦合器[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0323002.
- [13] Li C S, Yan B B, Wang D P, *et al.* Fiber Bragg grating sensing by ultra-broadband light source based on bismuth-erbium co-doped fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0110003. 李春生, 颜纷纷, 王大朋, 等. 基于超宽带铋铒共掺光纤光源的光纤光栅传感[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0110003.
- [14] Zhu Z, Brown T G. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers [J]. *Optics Express*, 2002, 10(17): 853-864.
- [15] Hall K L, Lenz G, Darwish A M, *et al.* Subpicosecond gain and index nonlinearities in InGaAsP diode lasers [J]. *Optics Communications*, 1994, 111(5/6): 589-612.
- [16] Ghaffari A, Djavid M, Monifi F, *et al.* Photonic crystal power splitter and wavelength multi/demultiplexer based on directional coupling [J]. *Journal of Optics A*, 2008, 10(7): 75203-75209.
- [17] Ghaffari A, Monifi F, Djavid M, *et al.* Photonic crystal bends and power splitters based on ring resonators [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(23): 5929-5934.
- [18] Ghaffari A, Monifi F, Djavid M, *et al.* Analysis of photonic crystal power splitters with different configurations [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2008, 8(8): 1416-1425.
- [19] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. *Journal of Computational Physics*, 1994, 114(2): 185-200.
- [20] Goldberg M. Stability criteria for finite difference approximations to parabolic systems [J]. *Applied Numerical Mathematics*, 2000, 33(1/4): 509-515.