

基于光子晶体方形谐振器的可调谐光信号分离器

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: 在二维光子晶体结构中通过调节光子晶体方形谐振器 PCSRs (Photonic Crystal Square Resonators) 与波导的耦合长度、耦合宽度、及其耦合柱半径优化设计了光信号分离器. 借助于 CMT (Coupled-Mode Theory) 理论定性分析了两个 PCSRs 存在相互作用时, 结构中波导与谐振腔之间的电磁波耦合性能, 用 FDTD 方法研究了两信道传输工作特性. 表明在设计的参数范围中, 基于 PCSRs 的信号分离器具有高正规化传输率、窄带宽、平稳的信号传输强度, 中心波长调谐范围宽的特性. 该类结构可用于同一中心波长信号的功率二等分, 也可用于不同中心波长信号的分离. 该微型结构在片上的光路设计将是一类有潜力的构筑模块, 适于光通信领域波分解复用设计、光路集成设计等方面.

关键词: 光子晶体方形谐振器; 光信号分离器; 时域有限差分法; 耦合模理论; 平稳的传输强度

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Optical signal tunable splitter based on photonic crystal square resonators

WU Li-Heng, WANG Ming-Hong

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

Abstract: Optical signal splitter was optimized by adjusting the coupling length, coupling width, coupling rod radius between PCSR and waveguide in the two-dimensional photonic crystal structure. As the interactions between PCSRs were considered, electromagnetic wave coupling performances between waveguide and cavity in the structure were analyzed qualitatively by using coupled-mode theory. The transmission characteristics of the two output ports were studied by the FDTD method. It shows that the optical signal splitter based on PCSRs has the characteristics of high normalized transmission ratios, narrow bandwidth, stable signal transmission intensity, broadly tunable ranges of central wavelength in the ranges of design parameters. This structure can separate transmission signal power into two equal parts at the same central wavelength, and it can also separate signals of different central wavelengths. The micro optical signal splitter promises a potential building block of photonic circuits on chip. It is suitable for the designs of wavelength division demultiplexing optical communication systems and photonic integrated circuits etc.

Key words: photonic crystal square resonator, optical signal splitter, FDTD method, coupled-mode theory, stable transmission intensity

PACS: 42.79.Sz, 42.79.Gn

引言

利用光通信网络光信号可在光纤中向相距遥远的地方以极快数据流量传送信息, 为数百万人口的

居民区的每个人分配一根光纤, 覆盖所有的网络用户将应用大量的光缆, 这是一项耗资巨大的工程项目. 解决这个问题的方案是用一根光纤为许多用户传送信息, 波分复用 WDM (Wavelength Division

收稿日期: 2017-01-25, 修回日期: 2017-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(11375081)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (11375081)

作者简介 (Biography): 吴立恒 (1980-), 男, 硕士研究生, 临沂平邑人, 主要从事电磁波理论与技术, 物理教学理论研究. E-mail: wuliheng@leu.edu.cn

163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: wangminghong@leu.edu.cn

Received date: 2017-01-25, **revised date:** 2017-03-22

Multiplexing)为解决这一问题成为现实,具有不同波长的光波可在同一根光纤中传送.在一根光纤中传输多个波长信道,网络末端需要波分解复用器将这些信号分离,供给相应的用户使用.解复用器设计的关键要素有:信道个数、信号传输效率、谐振腔品质因数、串扰、信道带宽等.现存的加工设计局限于低正规化传输功率,高串扰,低品质因数器件,其尺寸在厘米量级,此因不能适于密集型光路设计,可利用光子晶体设计的光器件可弥补上述缺陷,光子晶体具有光子带隙 PBG (Photonic Bandgap) 结构^[1]可实现密集型微器件内对光的控制传输,如光学滤波器^[2],信号解复用器^[3]等.最近几年,研究人员集中于高传输效率和优良波长选择特性的 WDM 解复用器研究.粗波分复用 CWDM (Coarse Wavelength-Division Multiplexing) 类型信道间距在 20 nm 左右,密集型波分复用 DWDM (Density Wavelength Division-Multiplexing) 解复用信道间距在 0.2 nm 左右可提供更多信道波长.由 Bouamami 和 Naoum 提出了输出 7 个波段的 CWDM 解复用器^[4],其波长的选择基于移动波导模式连续区域光子带隙的截止频率实现,它的中心波长间距大,其中第一波段中心波长在 1 590 nm,第七波段中心波长在 1 400 nm,另一个缺点是它的传输效率低. Alipour Banaei 等人^[5]提出了一种共振缺陷结构的 DWDM 解复用器,结构设计了八个波段,最小的传输效率为 40%. Mehdizadeh 和 Sorosh 设计了基于光子晶体谐振腔的解复用器^[6],结构设计了八个波段,中心波长传输效率在 94% 以上,带宽在 0.4 ~ 1 nm,工作于 1 536.9 ~ 1 551.4 nm. 鉴于上述解复用器,为实现光信号解复用及其功率分配本文提出了基于光子晶体方形谐振器 PC-SRs (Photonic Crystal Square Resonators) 的光信号分离器,通过结构优化设计和物理结构参数设置调节两个 PC-SRs 的工作状态,研究分析了信道传输光信号变化的规律.

1 耦合模理论设计光信号分离器上的应用

在基于两个光子晶体方形谐振器 PC-SRs 的光信号分离器结构中,利用时域耦合模理论 CMT (Coupled-Mode Theory)^[7-9]对结构中 PC-SRs 与波导之间的耦合性能进行了定性分析.瞬时 CMT 理论基于输入及输出的电磁场通量平衡的一瞬时微分方程,在理想状态下没有能量传输损耗,设靠近端口 P_2 和 P_3 的谐振腔内场的振幅分别为 $a_1(t)$ 、 $a_2(t)$,对应的谐振频率为 ω_1 、 ω_2 .用 S_{+1} 、 S_{+2} 、 S_{+3} 分别描述

光信号分离器的端口 P_1 、 P_2 、 P_3 的电磁波输入能量,用 S_{-1} 、 S_{-2} 、 S_{-3} 描述对应端口的电磁波输出能量.当 $S_{+2}=0$ 、 $S_{+3}=0$,根据 CMT 理论取振幅 $a_1(t)$ 、 $a_2(t)$ 时间导数得:

$$\frac{da_1(t)}{dt} = j\omega_1 a_1(t) - \left(\frac{1}{\tau_{01}} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_3}\right) a_1(t) + K_1 S_{+1} - K_{12} a_2 \quad (1)$$

$$\frac{da_2(t)}{dt} = j\omega_2 a_2(t) - \left(\frac{1}{\tau_{02}} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_4}\right) a_2(t) + K_2 S_{+1} - K_{21} a_1 \quad (2)$$

其中 $\frac{1}{\tau_1}$ 、 $\frac{1}{\tau_2}$ 分别为谐振腔 $a_1(t)$ 、 $a_2(t)$ 耦合到输入波

导模式振幅衰减率, $\frac{1}{\tau_3}$ 、 $\frac{1}{\tau_4}$ 分别为谐振腔 $a_1(t)$ 、 a_2

(t), 耦合到输出波导模式振幅衰减率, $\frac{1}{\tau_{01}}$ 、 $\frac{1}{\tau_{02}}$ 分别

为谐振腔 $a_1(t)$ 、 $a_2(t)$ 的腔损耗衰减率.相关的外部

耦合因子为: $Q_{e1} = \frac{\omega_1 \tau_1}{2}$ 、 $Q_{e2} = \frac{\omega_2 \tau_2}{2}$ 、 $Q_{e3} = \frac{\omega_1 \tau_3}{2}$ 、 $Q_{e4} =$

$\frac{\omega_2 \tau_4}{2}$, 谐振腔固有品质因子为: $Q_{01} = \frac{\omega_1 \tau_{01}}{2}$ 、 $Q_{02} =$

$\frac{\omega_2 \tau_{02}}{2}$. 固有品质因子描述了由于谐振腔可向周围结

构传输功率泄露而造成的能量固有损耗,外部耦合

因子描述了腔与波导耦合作用时能量的泄露.输入

波导与谐振腔 $a_1(t)$ 、 $a_2(t)$ 的耦合系数分别为 K_1 、

K_2 , 其耦合系数依赖于输入波导模式振幅衰减率 $\frac{1}{\tau_1}$ 、

$\frac{1}{\tau_2}$, 其关系为: $K_1 = \sqrt{\frac{2}{\tau_1}}$ 、 $K_2 = \sqrt{\frac{2}{\tau_2}}$. K_{12} 、 K_{21} 为两个

PCSRs 谐振腔之间的相互耦合系数,依赖于输入波

导模式振幅衰减率 $\frac{1}{\tau_1}$ 和 $\frac{1}{\tau_2}$, K_{12} 、 K_{21} 两个量之间的关

系为: $K_{12} = K_{21} = \sqrt{\frac{1}{\tau_1 \tau_2}}$. 通过波导模式与谐振腔模

式的强耦合作用辐射效应被削弱,在腔与波导模式

强耦合的状况下, CMT 理论为这个概念能提供定性

描述. $a_1(t)$ 工作于谐振状态时,按照 CMT 理论得:

$$\text{信道输出端口 } P_2 \text{ 处传输率 } T_1 = \left| \frac{S_{-2}}{S_{+1}} \right|^2 = \frac{4}{\tau_1 \tau_3} \left[(\omega_1 - \omega_2)^2 + \left(\frac{1}{\tau_{02}} + \frac{1}{\tau_4} \right)^2 \right] \left(\frac{1}{\tau_{01}} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_3} \right)^2 (\omega_1 - \omega_2)^2 + \left[\left(\frac{1}{\tau_{01}} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_3} \right) \left(\frac{1}{\tau_{02}} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_4} \right) - \frac{1}{\tau_1 \tau_2} \right]^2 \quad (3)$$

$$\text{信道输出端口 } P_3 \text{ 处传输率 } T_2 = \left| \frac{S_{-3}}{S_{+1}} \right|^2 =$$

$$\frac{\frac{4}{\tau_2\tau_4} \left[\left(\frac{1}{\tau_{01}} + \frac{1}{\tau_3} \right)^2 \right]}{\left(\frac{1}{\tau_{01}} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_3} \right)^2 (\omega_1 - \omega_2)^2 + \left[\left(\frac{1}{\tau_{01}} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_3} \right) \left(\frac{1}{\tau_{02}} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_4} \right) \frac{1}{\tau_1\tau_2} \right]^2} \quad (4)$$

输入波导端口 P_1 处反射率 $R = \left| \frac{S_{-1}}{S_{+1}} \right|^2 = (\omega_1 - \omega_2)^2 \frac{1}{\tau_{01}^2} +$

$$\left[- \left(\frac{1}{\tau_{01}} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_3} \right) \left(\frac{1}{\tau_{02}} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_4} \right) \frac{2}{\tau_2} \left(\frac{1}{\tau_{01}} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_3} \right) \right. \\ \left. \frac{2}{\tau_1} \left(\frac{1}{\tau_{02}} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_4} \right) \frac{3}{\tau_1\tau_2} \right]^2 / \left(\frac{1}{\tau_{01}} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_3} \right)^2 (\omega_1 - \omega_2)^2 + \\ \left[\left(\frac{1}{\tau_{01}} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_3} \right) \left(\frac{1}{\tau_{02}} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_4} \right) \frac{1}{\tau_1\tau_2} \right]^2 \quad (5)$$

谐振腔损耗率: $L = 1 - R - T_1 - T_2$. (6)

若两个 PCSRs 相位差因子 $(\omega_1 - \omega_2)^2 \tau_e^2 = 0$, 则

$\omega_1 = \omega_2$, 两个 PCSRs 工作于相同的谐振状态, 当 $\frac{1}{\tau_1}$

$= \frac{1}{\tau_3} = \frac{1}{\tau_2} = \frac{1}{\tau_4} = \frac{1}{\tau_e} = \frac{\omega_0}{2Q_e}$, $Q_{01} = Q_{02} = Q_0$ 时, 数值比

$\frac{\tau_e}{\tau_0} = \frac{Q_e}{Q_0}$ 决定了光信号分离器端口 P_1 反射率 R 、信道

输出端口 P_2 、 P_3 传输率、谐振腔损耗率 L , 公式如下:

$$T_1 = \left| \frac{S_{-2}}{S_{+1}} \right|^2 = \frac{4}{\left(\frac{Q_e}{Q_0} + 3 \right)^2} \quad , \quad (7)$$

$$T_2 = \left| \frac{S_{-3}}{S_{+1}} \right|^2 = \frac{4}{\left(\frac{Q_e}{Q_0} + 3 \right)^2} \quad , \quad (8)$$

$$R = \left| \frac{S_{-1}}{S_{+1}} \right|^2 = \frac{\left(1 - \frac{Q_e}{Q_0} \right)^2}{\left(\frac{Q_e}{Q_0} + 3 \right)^2} \quad , \quad (9)$$

$$L = \frac{8 \frac{Q_e}{Q_0}}{\left(\frac{Q_e}{Q_0} + 3 \right)^2} \quad . \quad (10)$$

图 1 根据式(7-10)给出了两个 PCSRs 工作于同一谐振状态时光信号分离器输出信道传输率 T_1 、 T_2 、输入端口反射率 R 、谐振腔损耗率 L 随 Q_e/Q_0 比值变化的函数曲线. 其横坐标表示 Q_e/Q_0 比值, 纵坐标表示正规化功率(相对于输入信号功率强度). 由图得: 理想对称的光信号分离器结构中两信道传输率曲线重合, 当 $Q_0 \rightarrow \infty$ 时, $Q_e/Q_0 \rightarrow 0$, 两输出信道传输率取最大值 $T_{1\max} = T_{2\max} = 44.4\%$, 输入端口 P_1 处反射率取值为 $R = 11.1\%$, 谐振腔损耗率取最小值 $L_{\min} = 0$; 现实中 Q_0 为有限值, 谐振腔存在损耗, 当 Q_e/Q_0

$Q_0 = 1$ 时, 两输出信道传输效率都为 $T_1 = T_2 = 25\%$, 端口 P_1 处反射率取最小值 $R_{\min} = 0$, 谐振腔损耗率 $L = 50\%$; $Q_e/Q_0 = 3$ 两输出信道传输率都为 $T_1 = T_2 = 11.1\%$, 端口 P_1 处反射率取值 $R = 11.1\%$, 谐振腔损耗率取最大值 $L_{\max} = 66.6\%$; $Q_e/Q_0 \rightarrow \infty$ 两输出信道传输率 $T_1 \rightarrow 0, T_2 \rightarrow 0$, 端口 P_1 处反射率 $R \rightarrow 1$, 谐振腔损耗率 $L \rightarrow 0$.

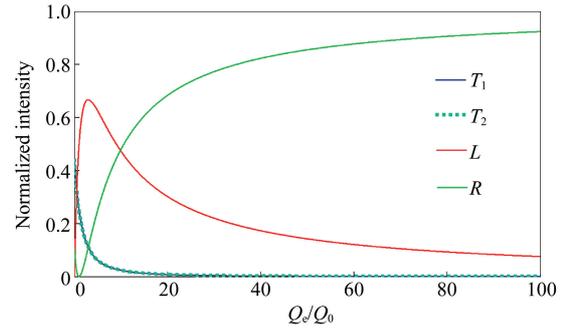


图 1 谐振状态输出信道传输率 T_1 、 T_2 、输入端口反射率 R 、谐振腔损耗率 L 随 Q_e/Q_0 比值变化的函数曲线

Fig. 1 Output channel transmission T_1 , T_2 , input port reflection R , cavity loss L at resonance as a function of the ratio Q_e/Q_0

当 $\omega_1 \neq \omega_2$, 为方便分析两个 PCSRs 之间的相互

作用对信号分离器工作状态的影响, 设 $\frac{1}{\tau_{01}} = \frac{c}{\tau_{02}} = \frac{1}{\tau_0}$

$= \frac{\omega_0}{2Q_0}$, $\frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{\tau_3} = \frac{c}{\tau_2} = \frac{c}{\tau_4} = \frac{1}{\tau_e} = \frac{\omega_0}{2Q_e}$, 其中 c 为常数,

数值比 $\frac{\tau_e}{\tau_0} = \frac{Q_e}{Q_0}$ 决定了输出信道传输率 T_1 、 T_2 、输入

端口反射率 R 、谐振腔损耗率 L , 公式如下:

$$T_1 = \left| \frac{S_{-2}}{S_{+1}} \right|^2 = \frac{4 \left[(\omega_1 - \omega_2)^2 \tau_e^2 + \left(\frac{Q_e}{Q_0} + 1 \right)^2 \right]}{\left(\frac{Q_e}{Q_0} + 2 \right)^2 (\omega_1 - \omega_2)^2 \tau_e^2 + \left(\frac{Q_e}{Q_0} + 1 \right)^2 \left(\frac{Q_e}{Q_0} + 3 \right)^2} \quad , \quad (11)$$

$$T_2 = \left| \frac{S_{-3}}{S_{+1}} \right|^2 = \frac{4 \left(\frac{Q_e}{Q_0} + 1 \right)^2}{\left(\frac{Q_e}{Q_0} + 2 \right)^2 (\omega_1 - \omega_2)^2 \tau_e^2 + \left(\frac{Q_e}{Q_0} + 1 \right)^2 \left(\frac{Q_e}{Q_0} + 3 \right)^2} \quad , \quad (12)$$

$$R = \left| \frac{S_{-1}}{S_{+1}} \right|^2 = \frac{\left(\frac{Q_e}{Q_0} \right)^2 (\omega_1 - \omega_2)^2 \tau_e^2 + \left[1 - \left(\frac{Q_e}{Q_0} \right)^2 \right]^2}{\left(\frac{Q_e}{Q_0} + 2 \right)^2 (\omega_1 - \omega_2)^2 \tau_e^2 + \left(\frac{Q_e}{Q_0} + 1 \right)^2 \left(\frac{Q_e}{Q_0} + 3 \right)^2} \quad , \quad (13)$$

$$L = \frac{4 \frac{Q_e}{Q_0} (\omega_1 - \omega_2)^2 \tau_e^2 + 8 \left(\frac{Q_e}{Q_0} + 1 \right)^2 \frac{Q_e}{Q_0}}{\left(\frac{Q_e}{Q_0} + 2 \right)^2 (\omega_1 - \omega_2)^2 \tau_e^2 + \left(\frac{Q_e}{Q_0} + 1 \right)^2 \left(\frac{Q_e}{Q_0} + 3 \right)^2} \quad (14)$$

通过调节两个谐振 PCSRs 相位差因子 $(\omega_1 - \omega_2)^2 \tau_e^2$ 的取值,图 2(a-d) 根据公式(11-14) 给出了光子晶体信号分离器输出信道传输率 T_1 、 T_2 、输入端口反射率 R 、谐振腔损耗率 L 随 Q_e/Q_0 比值变化的函数曲线. 图中用带有颜色的线段注明了相位差因子取值 0、1、2、4、10、20、50、1000,从图中能够观察到相位差因子对其工作性能的影响. 图 2(a) 随相位差因子的增大, Q_e/Q_0 取相同值时信道端口 P_2 传输率逐渐增大;当相位差因子为 1 000, $Q_e/Q_0 = 0$ 时,信道传输率取极大值. 图 2(b) 相位差因子和 Q_e/Q_0 都为 0 时,信道端口 P_3 传输率取最大值 $T_{2\max} = 44.4\%$;随相位差因子的增大, Q_e/Q_0 取相同值时信道端口 P_3 传输率逐渐减小;当相位差因子为 1 000 时,信道传输率最大值为 $T_{2\max} = 0.3\%$. 图 2(c) 相位差因子为 0, $Q_e/Q_0 = 1$ 时,输入端口 P_1 反射率取最小值 $R_{\min} = 0$;当 $Q_e/Q_0 = 0$,相位差因子为 0 时,输入端口反射率为 11.1%,随相位差因子增大,反射率趋于 0. 图 2(d) 当相位差因子为 0, $Q_e/Q_0 = 3$ 时,谐振腔损耗率取最大值 $L_{\max} = 66.7\%$;随着相位差因子的增大, Q_e/Q_0 取相同值时谐振腔损耗率逐渐减小; $Q_e/Q_0 = 0$ 时,谐振腔损耗率始终为 0.

相位差因子为无穷大时,图 3 所示输出信道传输率 T_1 、 T_2 、输入端口反射率 R 、谐振腔损耗率 L 随 Q_e/Q_0 比值变化的函数曲线. 当 $Q_e/Q_0 = 0$,信道端口 P_2 传输率为 $T_1 = 100\%$,随着 $Q_e/Q_0 \rightarrow \infty$, $T_1 \rightarrow 0$;信道端口 P_3 传输率始终为 $T_2 = 0$;当 $Q_e/Q_0 = 0$ 时,输入端口 P_1 反射率 $R = 0$,随着 $Q_e/Q_0 \rightarrow \infty$, $R \rightarrow 100\%$;当 $Q_e/Q_0 = 0$ 时,谐振腔损耗率取最小值 $L_{\min} = 0$,当 $Q_e/Q_0 = 2$ 时,谐振腔损耗率取最大值 $L_{\max} = 50\%$,随着 $Q_e/Q_0 \rightarrow \infty$, $L \rightarrow 0$.

借助于 CMT 理论分析了有 PCSRs 和光子晶体波导组成的光信号分离器在理想和一般情况下的工作性能,根据需要设置外部耦合因子与固有品质因子比值 Q_{c1}/Q_{01} 、 Q_{c3}/Q_{01} 、 Q_{c2}/Q_{02} 、 Q_{c4}/Q_{02} 得到对应的工作状态,用于指导由谐振腔和波导组成器件的工作性能分析和结构设计. 如:理想对称系统中两 PCSRs 谐振于同一个波长,考虑到两谐振腔间的相互作用,在谐振状态下两输出信道功率传输总相对强度不大于 88.9%,当 $Q_e/Q_0 = 0$ 时,波导输入端口

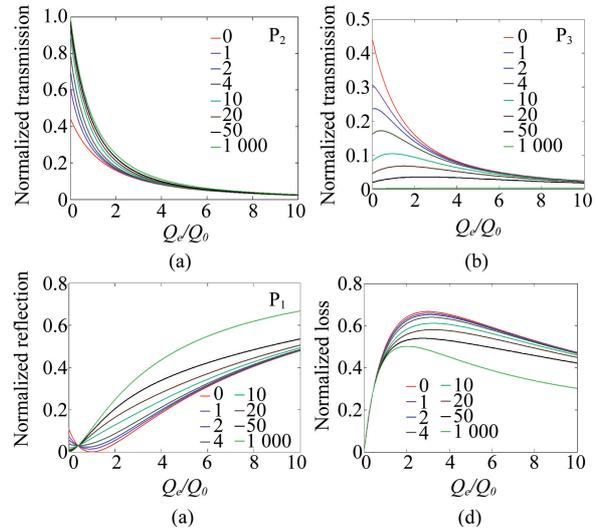


图 2 调节相位差因子 $(\omega_1 - \omega_2)^2 \tau_e^2$ 数值,输出信道传输率 T_1 、 T_2 、输入端口反射率 R 、谐振腔损耗率 L 随 Q_e/Q_0 比值变化的函数曲线 (a) 输出信道传输率 T_1 , (b) 输出信道传输率 T_2 , (c) 输入端口反射率 R , (d) 谐振腔损耗率 L

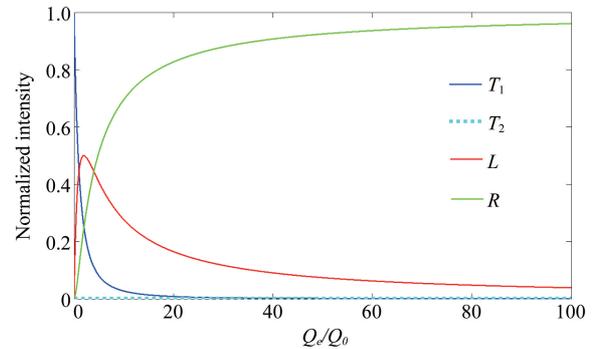


图 3 相位差因子 $(\omega_1 - \omega_2)^2 \tau_e^2 \rightarrow \infty$ 时输出信道传输率 T_1 、 T_2 、输入端口反射率 R 、谐振腔损耗率 L 随 Q_e/Q_0 比值变化的函数曲线

反射率为 11.1%,谐振腔损耗率为 0;理想光信号分离器中两个 PCSRs 处于不同谐振状态,若相位差因子 $(\omega_1 - \omega_2)^2 \tau_e^2 \rightarrow \infty$,两个 PCSRs 的相互作用对两输出端口的影响将忽略,当 $Q_e/Q_0 = 0$,在各自的谐振波长上波导输入端口反射率为 0,谐振腔损耗率为 0,每一个输出信道将达到 100% 的信号功率传输

强度,现实中谐振腔固有因子 Q_0 和相位差因子为有限值,信号功率传输强度不可能达到 CMT 理论所描述的理想工作状态.

2 基于 PCSRs 的光信号分离器

在通信领域光信号解复用器可调谐振波长设计依赖于结构设计参量,热学参量,机械调谐机构等^[17-18].对于大容量光互联通信,微型谐振器工作性能直接关系到光信号分离系统的整体性能.在晶格常数为 $a = 564 \text{ nm}$,以空气为背景的 27×20 正方格介质圆柱二维光子晶体结构中把两个 3×3 PCSRs 放置在垂直方向光子晶体波导的两侧,在两个 PCSRs 各自的一侧沿着水平方向放置一支光子晶体波导作为光信号分离器的输出信道.方形谐振腔拐角处对电磁波的散射作用可用于改善其信道输出波长的可调谐特性,为进一步改善光信号分离选择性适当增加 PCSRs 与波导耦合长度和耦合宽度,垂直方向输入波导与谐振腔之间的两个耦合区域 a 都采用 5×2 介质柱,并调节谐振腔 e 与输出信道之间的耦合介质柱 c 半径大小,用于平衡光信号信道传输率和信道中心波长带宽.其结构中绿色区域为空气,紫色区域为介质圆柱,柱的相对介电常数为 12.除两个耦合介质柱 c 半径大小为 $0.192a$ 外,其它介质柱半径都为 $0.22a$.在设计的光信号分离器结构输入端口 P_1 处设置了波导源发射电磁波,信道输出端口 P_2 、 P_3 处设置了接收器以探测波长信号功率强度.为吸收结构向周围发出的电磁波设置了完全匹配层^[10]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 等分,在数值计算满足 Courant 稳定性条件^[11]情况下,用时域有限差分法 FDTD (Finite-Difference Time-Domain)^[12] 研究了结构对 TM 波的波长信号分离特性.

2.1 基于两个相同谐振状态 PCSRs 的光信号分离器

以图 4 光信号分离器结构为研究对象,图中 a 为耦合区域 5×2 介质柱, b 为 3×3 内部介质柱, c 为耦合介质柱, d 为反射器, e 为方形谐振腔,垂直方向波导两侧使用相同的两个 PCSRs 结构,同时改变其方形谐振腔内 3×3 介质柱半径研究其结构对光波长信号分离变化的规律.其 3×3 介质柱半径 r_i 取值从 $0.13a$ 到 $0.27a$,每次均使半径值增加 $0.01a$,图 5 给出了这一过程中两信道端口 P_2 、 P_3 输出的 15 个不同中心波长光信号功率传输谱,其横坐标表示波长,纵坐标表示正规化功率.为区分两输出

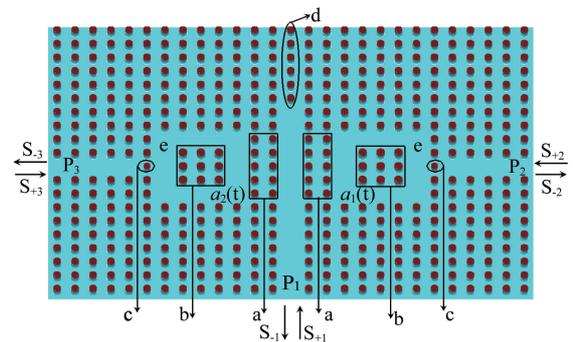


图 4 基于 PCSRs 的光信号分离器
Fig. 4 Optical signal splitter based on PCSRs

信道的 15 个不同中心波长的功率传输谱,图中已按从左到右顺序进行依次用不同颜色曲线(1~15)标出,由图可知该对称结构的光信号分离器两信道传输特性相同.表 1(I)根据图 5.中标注数字的顺序列出了随方形谐振腔内介质柱半径取值不同光信号分离器信道传输的中心波长 λ ,及对应的正规化传输率 T_1 、 T_2 ,信道带宽 $\Delta\lambda$,谐振腔品质因数 Q (由公式 $Q = \lambda / \Delta\lambda$ 计算).从表中所列的数据得:随方形谐振腔内介质柱半径增大该结构输出中心波长向长波方向移动,在这一过程中输出信道中心波长调谐范围在 $1517.6 \sim 1588.3 \text{ nm}$,其平均间隔为 5.1 nm ;两输出信道中心波长总正规化传输率、中心波长带宽及方形谐振器品质因数的变化范围分别为 $83.2 \sim$

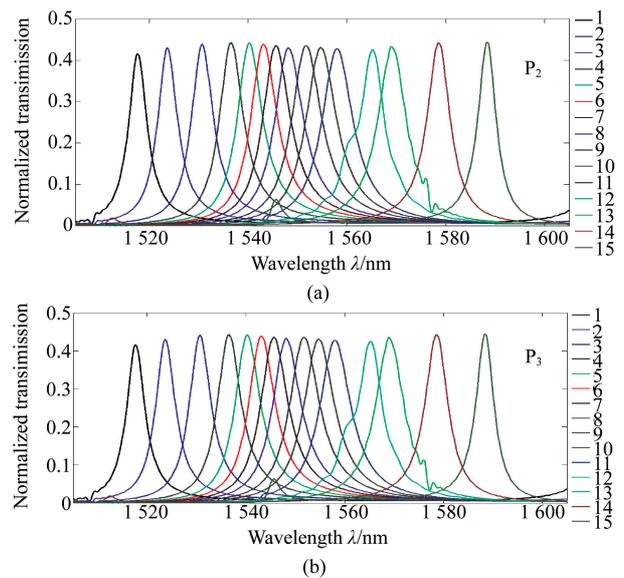


图 5 改变 3×3 内部介质柱半径(r_i)得到光信号分离器两输出信道正规化功率传输谱
Fig. 5 Normalized power transmission spectra of the optical signal splitter's two output channels at various radius (r_i) of 3×3 inner dielectric rods

88.6%、4.5~7.6 nm、205~353.

图4所示光信号分离器结构中除两个耦合介质柱c半径大小为0.192a外,其它介质柱半径都为0.22a,只改变结构的整体介质柱相对介电常数研究光波长信号分离变化的规律.柱的相对介电常数 ϵ_r 从8.8到14.4,每次均增加0.4,给出了如图6.所示两信道端口 P_2 、 P_3 输出的15个不同中心波长的功率传输谱,以同样的方法在图中用不同颜色曲线(1~15)标出,由图可知两信道传输特性也完全相同.表1(II)根据图6.中标注数字的顺序列出了结构整体介质柱相对介电常数 ϵ_r 取不同值时两信道传输中心波长 λ ,及其对应的正规化传输率 T_1 、 T_2 ,信道带宽 $\Delta\lambda$,方形谐振器品质因数 Q .从表中所列的数据得:随介质柱相对介电常数增大该结构输出中心波长向长波方向移动,在这一过程中输出信道中波长调谐范围在1501.1~1590.4 nm,中心波长平均间隔为6.4 nm;两输出信道中心波长总正规化传输率、信道带宽及方形谐振器品质因数的变化范围分别为84.2~88.2%、5.7~14.4 nm、104~279.

表1(I)中的 Q 值先减小再增加,而表(II)中的 Q 值单调增加,其物理原因是光子晶体谐振腔品质因数 $Q = \frac{4\pi^2 F_p}{3} \left(\frac{n}{\lambda_0}\right)^3 V_{\text{eff}}^m$ 主要受到谐振波长本征模式有效模体积 V_{eff}^m (第 m 个本征模式体积)、腔本征模式对应的真空波长 λ_0 、构成谐振腔的介质折射率 n 、腔自发辐射增强因子(Purcell因子) F_p 的影响.表(I)中的 Q 值先减小再增加的原因是:介质折射率 $n = \sqrt{\epsilon_r}$ 不变,随着本征模式波长向长波方向

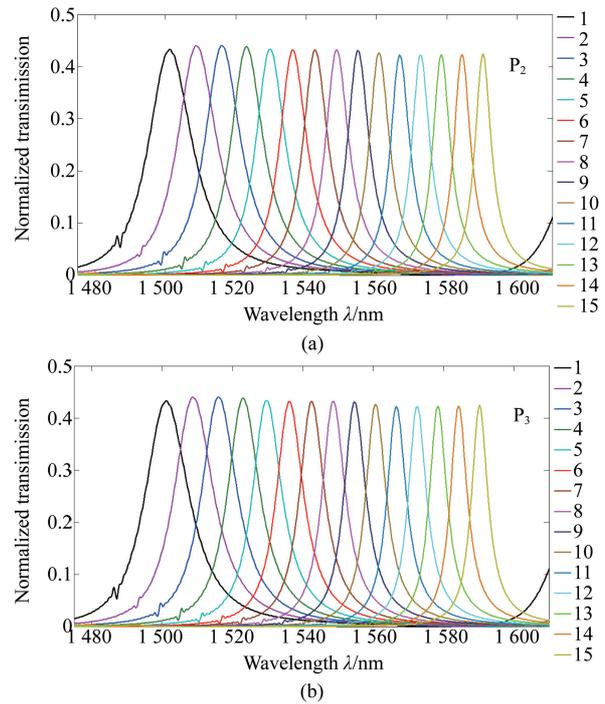


图6 改变光信号分离器整体介质柱相对介电常数得到两输出信道正规化功率传输谱
Fig.6 Normalized power transmission spectra of the optical signal splitter's two output channels at different dielectric constant of the whole rods

移动,最先因 $(n/\lambda_0)^3$ 值减小使 Q 值减小,然后继续随着本征模式波长向长波方向移动, $(n/\lambda_0)^3$ 继续减小,但 $V_{\text{eff}}^m F_p$ 值增长的快使 Q 值增加;表(II)中 Q 值单调增加的原因是随着介质柱相对介电常数 ϵ_r 值的增大,介质折射率 $n = \sqrt{\epsilon_r}$ 也在变大,虽然本征模式波长向长波方向移动,但从表所列的数据可知

表1 光信号分离器具有的光学特性

Table 1 Optical properties of the signal splitter

光信号分离器改变3×3内部柱半径(I)							光信号分离器改变整体介质柱相对介电常数(II)					
	r_i	λ/nm	T_1	T_2	$\Delta\lambda/\text{nm}$	Q	ϵ_r	λ/nm	T_1	T_2	$\Delta\lambda/\text{nm}$	Q
1	0.13a	1517.6	41.6%	41.6%	4.6	330	8.8	1501.1	43.3%	43.3%	14.4	104
2	0.14a	1523.6	43.7%	43.7%	4.9	311	9.2	1508.6	44.1%	44.1%	13.4	113
3	0.15a	1530.8	43.9%	44.1%	5.4	283	9.6	1516.2	44.0%	44.0%	12.2	124
4	0.16a	1536.6	44.3%	44.3%	5.9	260	10.0	1523.0	43.9%	43.9%	11.1	137
5	0.17a	1540.3	44.2%	44.2%	6.3	244	10.4	1529.7	43.4%	43.4%	10.2	150
6	0.18a	1543.1	43.9%	43.9%	6.6	234	10.8	1536.1	43.2%	43.2%	9.4	163
7	0.19a	1545.6	43.6%	43.6%	6.8	227	11.2	1542.5	43.2%	43.2%	8.7	177
8	0.20a	1548.2	43.1%	43.3%	7.1	218	11.6	1548.7	43.3%	43.3%	8.1	191
9	0.21a	1551.9	43.6%	43.6%	7.4	210	12.0	1554.7	43.1%	43.1%	7.6	205
10	0.22a	1554.7	43.1%	43.1%	7.6	205	12.4	1560.7	42.7%	42.7%	7.1	220
11	0.23a	1558.1	42.8%	42.7%	7.6	205	12.8	1566.5	42.3%	42.3%	6.8	230
12	0.24a	1565.3	42.5%	42.5%	7.2	217	13.2	1572.6	42.1%	42.1%	6.5	242
13	0.25a	1569.0	43.4%	43.6%	7.0	224	13.6	1578.5	42.3%	42.3%	6.2	255
14	0.26a	1578.5	44.3%	44.3%	5.7	277	14.0	1584.4	42.3%	42.3%	5.9	269
15	0.27a	1588.3	44.3%	44.3%	4.5	353	14.4	1590.4	42.4%	42.4%	5.7	279

$(n/\lambda_0)^3$ 值在变大 ($0.001\ 976 \leq n/\lambda_0 \leq 0.002\ 386$), 随着本征模式波长向长波方向移动, V_{eff}^m 值也随着增长, 因此表 (II) 中的 Q 值单调增加。

在设计结构参数和工作波长段上基于两个相同谐振状态 PCSRs 的光信号分离器两信道输出中心波长始终保持优异的功率二等均分、高正规化传输率、宽波长段单峰谐振、窄带宽、平稳的信号传输强度、输出中心波长可调谐范围宽的特性。该结构正规化功率传输谱表明: 两信道输出总效率在 83.2 ~ 88.6%, 这与 CMT 理论描述的不大于 88.9% 的现实情况相符合。信道中心波长调谐范围大于第三通信窗口 (1 530 ~ 1 560 nm) 波长范围, 能有效的滤除其它不需要的信号波长。该结构可用作波长信号功率均分器, 也可用作宽调谐波长范围的波分解复用器, 适于光路集成设计, WDM 解复用光通信系统设计。

2.2 基于两个不同谐振状态 PCSRs 的光信号分离器

在图 4 所示的光信号分离器结构中调节两个方形谐振腔内介质柱半径使两个 PCSRs 处于不同谐振状态研究信道传输光信号的变化规律。图 7 (a-c) 用红色曲线和蓝色曲线分别标出了其信道端口 P_2 和 P_3 的正规化功率传输谱。图中注明了出了两个方形谐振腔内 3×3 介质柱半径取值的三组数据 (0.19a, 0.21a)、(0.18a, 0.22a)、(0.17a, 0.23a), 两个信道的中心波长、及其对应的正规化传输率和信道带宽。由图 6 (a-c) 可得随着两个 PCSRs 谐振波长的远离, 邻近端口 P_2 的 PCSR 处于非谐振波长 1 546.7 nm, 1 544.2 nm, 1 541.1 nm 上的传输率依次为 4.2%, 1.3%, 0.6%, 邻近端口 P_3 的 PCSR 工作于对应的谐振波长上传输率依次为 88.3%, 89.3%, 88.9%; 邻近端口 P_3 的 PCSR 处于非谐振波长 1 552.4 nm, 1 555.3 nm, 1 558.4 nm 上的传输率依次为 7.5%, 2.1%, 0.9%, 邻近端口 P_2 的 PCSR 工作于对应的谐振波长上传输率依次为 83.5%, 92.1%, 94.9%。考虑到现实中谐振腔 Q_0 因子为有限值, 且受到谐振腔结构的影响, 两个 PCSRs 的谐振波长的远离或相位差因子变大时, 两信道输出波长信号传输率变化趋势与 CMT 理论描述的情况相符合。图 7, P_3 的小次峰产生原因是谐振结构中有两个耦合波长模式, 其中一个波长模式耦合效率较低, 在其结构传输谱中出现了一个小次峰。通过调节谐振腔内柱半径或整体介质柱的相对介电常数改变 PCSRs 与波导耦合输出状态, 可灵活设计中心波

长高传输率, 窄带宽, 调谐波长范围宽的信号分离器。

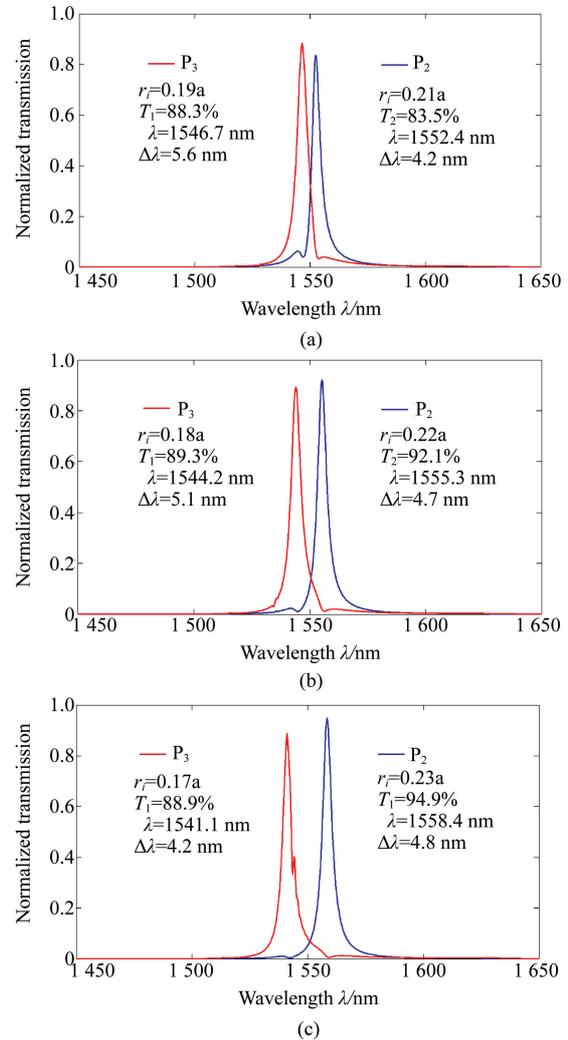


图 7 基于不同谐振波长的两个 PCSRs 光信号分离器两输出信道正规化功率传输谱

Fig. 7 Normalized power transmission spectra of the optical signal splitter's two output channels when the two PCSRs operate at resonant wavelengths

光信号分离器工作于 1 554.7 nm 波长的稳态光场分布如图 8 所示, 由表 1 所列数据得该波长信号两输出端口总的正规化传输率为 86.2%, 输入信号功率由输入端口反射损耗和谐振腔损耗造成 13.8% 的传输强度损耗。

PCSRs 谐振状态波长模式传输损耗由耦合模理论定性分析得, 在理想对称结构情况下光子晶体光信号分离器的谐振腔品质因数无穷大, 传输损耗为输入端口反射损耗, 传输损耗最小; 现实情况下其谐振腔品质因数为有限值, 传输损耗主要有输入端口反射损耗和谐振腔损耗降低了光信号分离器传输信

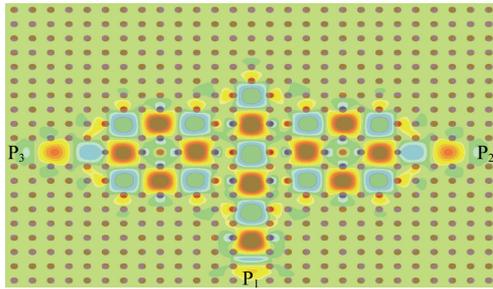


图8 光信号分离器工作于1554.7 nm波长时稳态场分布
Fig. 8 Steady-state field distributions of the optical signal splitter operating at the wavelength of 1554.7 nm

号强度. 在理想非对称结构情况下光信号分离器中两个 PCSRs 处于不同谐振状态,若谐振腔品质因数和相位差因子趋于无穷大,在各自的谐振波长上每一个输出信道将达到 100% 的信号功率传输强度;现实中谐振腔固有因子和相位差因子为有限值,输入端口反射损耗和谐振腔损耗降低了光信号分离器传输信号强度.

3 结论

在以空气为背景的正方格介质圆柱二维光子晶体结构中优化设计了光信号分离器.借助于 CMT 理论分析了两个 PCSRs 存在相互作用时,其相位差因子对光信号分离器工作性能的影响.通过改变结构设计参量,调节两个 PCSRs 谐振状态,用 FDTD 方法数值模拟了其信道功率传输谱,两个 PCSRs 谐振波长相同或远离时两信道输出信号变化规律与 CMT 理论定性分析的结果相符.表明两个 PCSRs 处于同一谐振波长上,在设计的结构参数和工作波长段上光信号分离器两信道输出中心波长信号始终保持优异的功率二等均分,高正规化传输率、平稳的信号传输强度、宽波长段单峰谐振、窄带宽、中心波长可调谐范围宽的特性;两个不同谐振状态 PCSRs 光信号分离器两信道传输不同中心波长信号具有高正规化传输率、窄带宽、中波长可调谐范围宽等特性.基于

PCSRs 的光波长信号分离器在片上的光路设计将是具有潜力的一类微型器件,可用于光通信领域 WDM 解复用及光路集成设计等方面.

References

- [1] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric supper lattices [J]. Physical review letters, 1987, **58**(23):2486-2489.
- [2] Alipour-Banaei H, Mehdizadeh F. Significant role of photonic crystal resonant cavities in WDM and DWDM communication tunable filters [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2013, **124**(17):2639-2644.
- [3] Mehdizadeh F, Soroosh M, Alipour-Banaei H. An optical demultiplexer based on photonic crystal ring resonators[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, **127**(20):8706-8709.
- [4] Bouamami S, Naoum R. Compact WDM demultiplexer for seven channels in photonic crystal [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2013, **124**(16):2373-2375.
- [5] Alipour-Banaei H, Mehdizadeh F, Hassangholizadeh-Kashitiban M. A novel proposal for all optical PhC-based demultiplexers suitable for DWDM applications [J]. Optical and Quantum Electronics, 2013, **45**(10):1063-1075.
- [6] Mehdizadeh F, Soroosh M. A new proposal for eight-channel optical demultiplexer based on photonic crystal resonant cavities [J]. Photonic Network Communications, 2016, **31**(1):65-70.
- [7] 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):589-612.
- [8] Ghaffari A, Djavaid M, Monifi F, et al. Photonic crystal power splitter and wavelength multi/demultiplexer based on directional coupling [J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2008, **10**(7):75203-75209.
- [9] Ghaffari A, Monifi F, Djavaid M, et al. Photonic crystal bends and power splitters based on ring resonators [J]. Optics Communications, 2008, **281**(23):5929-5934.
- [10] J P Berenger, A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. Comput. Phys. 1994, **114**(2):185-200.
- [11] Goldberg M. stability criteria for finite difference approximations to parabolic systems [J]. Applied Numerical Mathematics, 2000, **33**(1-4):509-515.
- [12] Zhu Z, Brown T G. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers [J]. Opt. Express, 2002, **10**(17):853-864.