

文章编号: 1672-8785(2020)06-0017-13

基于近长方环腔谐振器设计的光子晶体带阻滤波器

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: 根据时域耦合模理论(Coupled-Mode Theory, CMT)分析了基于近长方环腔谐振器与波导侧边耦合结构的光子晶体带阻滤波器(Photonic Crystal Stop-Band Filter, PCSBF)的工作状况, 得到了其正规化带阻损耗率 L 、腔失谐因子 $|\omega - \omega_0| \tau_0$ 、腔正规化损耗率 L_c 、正规化反射率 R 以及正规化传输率 T 之间的函数关系, 并探索了 PCSBF 的带阻损耗工作机制。用时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)法研究了 1450~1750 nm 波段的 PCSBF 滤波性能。通过改变 PCSBF 结构中 $3 \times n$ ($3 \leq n \leq 9$) 近长方腔的大小或腔内部柱半径都能调节该结构输出的正规化功率谱带阻波段。在输出的功率谱中采集了 34 个平均宽度为 58.17 nm 的较宽带阻波段。信号传输强度损耗的平均值不小于 8.035 dB。结果表明, 该结构的波长阻带具有可调性宽、正规化带阻损耗率高等特点。根据实际需求, 通过改变 PCSBF 结构设计来调节功率输出谱, 可以有效滤除不需要的波长信号, 从而保证光纤通信系统和集成光路工作的稳定性。因此, 这种微型带阻元件在光集成和光通信等领域具有潜在应用价值。

关键词: 近长方环腔谐振器; 带阻损耗机制; 腔失谐因子; 时域有限差分; 耦合模理论

中图分类号: 248.1 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.06.004

Photonic Crystal Stop-Band Filter Based on Approximate Rectangular Ring Cavity Resonator Designs

WU Li-heng, WANG Ming-hong*

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

Abstract: According to the time domain coupled mode theory, the working conditions of the photonic crystal stop-band filter with a side coupling structure of the waveguide and the approximate rectangular ring cavity resonator are analyzed. The function relationships of normalized stop-band loss L , cavity detuning factor $|\omega - \omega_0| \tau_0$, cavity normalized loss L_c , normalized reflection R and normalized transmission T are obtained, and

收稿日期: 2020-05-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(11375081)

作者简介: 吴立恒(1980-), 男, 山东临沂人, 在读研究生, 主要从事电磁场理论与技术以及物理教学理论方面的研究。

*通讯作者: E-mail: wangminghong@luc.edu.cn

the stop-band loss mechanism of PCSBF is explored. The filtering performance of PCSBF within the wavelength range of 1450–1750 nm is studied by using the finite difference time domain method, which shows that the stop-bands of the output normalized power spectrum can be adjusted by changing the size of $3 \times n$ ($3 \leq n \leq 9$) approximate rectangular ring cavities or by changing the radius of inner rods in this PCSBF structure. 34 wide stop-bands whose average width is 58.17 nm are collected from the PCSBF power spectrum, and the average value of these stop-bands signal strength decay is not less than 8.035 dB. The results show that the stop-band of the structure has the characteristics of wide tenability, high normalized loss and so on. According to the actual demand, changing the PCSBF structure design to adjust the power output spectrum can effectively filter the unwanted wavelength signal, thus ensuring the stability of optical fiber communication system and integrated optical path. Therefore, this miniature stop-band component has potential application value in the optical integration, the optical communication and other fields.

Key words: approximate rectangular ring cavity resonator; stop-band loss mechanism; cavity detuning factor; FDTD; CMT

0 引言

光学滤波器是光通信网络、光逻辑以及光学开关设计等方面不可或缺的元件。研究人员基于谐振腔、环形谐振器、环形缺陷结构等设计了类型多样且具有不同输出特性的滤波器,为其在各个领域的广泛应用提供了基础保障。比如它可以应用于以下几个方面:基于法诺共振等离子体环谐振器设计的全光 XOR 和 XNOR 逻辑门^[1],基于硅波导微环谐振器光开关设计的全光时钟 JK、SR 和 T 触发器^[2],全光等离子体金属-介质-金属 MIM 分束方形环谐振器开关^[3],光子晶体量子点半导体光学放大器全光 AND 门^[4]以及基于光子晶体环形谐振器的全光解码开关^[5]等。其中,光子晶体光学滤波器具有自身灵活的结构设计优势,通过设计结构参数等多种途径可以调节波导与谐振器耦合系统的输出性能^[6]。

目前,基于微环谐振器和光子晶体环形谐振器设计的具有不同工作特性的滤波器被相继提出。例如,光子晶体环形谐振器在谐振波长 1491 nm 处的耦合下载传输率达到近 100%,下载通带宽度为 13 nm, Q 因子为 114.7^[7];高灵敏度光子晶体八边形内核环形谐振器在 1551 nm 波长处的带宽、Q 因子和传输率依次为 0.3 nm、5170 和 99.6%^[8];在光子晶体环型谐振器内部使用超级缺陷来降低腔损耗,其 Q 因子高达 18000^[9];具有不同内部介质柱的

两个谐振环解复用器在 1590.8 nm 和 1593.8 nm 波长处的 Q 因子分别为 7954 和 3984,相应串扰值分别为 -22 dB 和 -11 dB^[10];平面 O 型环谐振器结构设计经优化后, Q 因子高达 500000^[11]。

在密集型波分复用光通信系统和片上光谱集成设计中,利用光子晶体滤波器可选择或阻止某一信道或几个信道。其中,带阻滤波器在工作波段进行信号处理时能通过大多数信号的波长分量,并可得到某些范围衰减的波长分量。它们包括光子晶体环形谐振器的粗波分解复用信道下载滤波器^[12]、光子晶体环形缺陷密集型波分解复用信道下载滤波器^[13]、基于光子晶体 L3-缺陷谐振腔设计的光学滤波器^[14]以及基于硅介质光子晶体环形谐振器的超紧凑型可调谐窄带带阻器件^[15]等。

在波长带阻设计中,硅微环谐振器的环半径为 2 μm 时滤波器的最大自由谱范围(Free Spectral Range, FSR)为 47 nm^[16]。基于微环谐振器构造设计滤波器的短板在于 FSR 难以满足大的带阻波段需求。为得到更大的 FSR,环半径需要制作得更小。这会导致弯曲损耗增加,并限制了 FSR。微环谐振器存在的另一问题是极化敏感性。光信号的极化态随时间的变化限制了光通信的稳定性。

由于光子晶体带隙的存在,光子晶体滤波器可解决微环谐振器的问题。它的典型带隙波

长宽度范围为 300~400 nm。将其用于带阻滤波器设计时能有效保证带阻宽度。本文给出了近长方形环腔谐振器设计的光子晶体滤波器结构的功率输出谱, 并探讨了其工作机制。

1 基于近长方环腔光子晶体谐振器设计的带阻滤波器

在晶格常数 a 为 560 nm 的 25×26 正方格介质圆柱光子晶体中, 连续去除介质柱后可以形成一个长方形环腔。在环腔 4 个拐角的半个晶格常数处分别放置一个介质柱, 并在其左侧放置一个光子晶体波导, 此时便形成了 PCSBF 结构(见图 1)。其中, 绿色区域代表空气, 紫色区域代表介质柱; 环形腔内部的 $3 \times n$ ($3 \leq n \leq 9$) 介质柱处于长方框 b 中; 光子晶体波导与腔耦合区域介质柱处于长方框 a 中(3 个耦合柱在图中用黄色圆斑标出)。为改善 PCSBF 结构的带阻波长选择性能, 优化了腔与波导之间的耦合结构。该结构中整体介质柱的相对介电常数都为 12。除耦合区域介质柱的半径为 $0.1a$ 外, 其它柱半径都等于 $0.2a$ 。在 PCSBF 结构的输入端口 P_1 处放置了波导源(发射电磁波), 在 P_2 处放置了电磁波接收器, 并在该结构周围使用吸收边界完全匹配层来吸收传入的电磁波^[17]。其中, 每个正方格原胞被分成 40×40 等分。在数值计算满足 Courant 稳定性条件^[18]的情况下, 本文设计的正方格介质柱二维光子晶体对 TM 波有宽阔的带隙。利用 FDTD 法^[19]直接在时域上对麦克斯韦方程进行二阶精度差分近似, 计算了该结构对 TM 波的传输特性。落在二维光子晶体带隙结构上的电磁波段传输特征与三维光子晶体符合得很好, 能节约大量的计算空间, 因此可用二维光子晶体结构来指导三维器件设计。

2 利用耦合模理论对 PCSBF 结构工作状态性能的分析

根据 CMT^[20-21]对 PCSBF 结构(见图 1)的工作状态进行了理论分析。图 1 中用 S_{+1} 和 S_{+2} 描述波导 P_1 和 P_2 两端口处输入的电磁波能

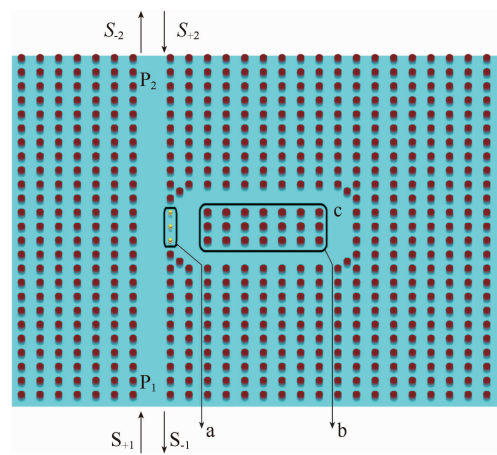


图 1 基于 $3 \times n$ 近长方环腔谐振器设计的光子晶体带阻滤波器结构(a为耦合介质柱, b为内部 $3 \times n$ 介质柱, c为近长方环腔)

量, 并用 S_{-1} 和 S_{-2} 描述 P_1 和 P_2 两端口处输出的电磁波能量。CMT 以输入及输出的电磁场通量平衡的瞬时微分方程为基础。设 ω_0 为腔谐振角频率, 根据 CMT 可得:

$$\frac{da(t)}{dt} = j\omega_0 a(t) - \left(\frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) a(t) + K_1 S_{+1} + K_2 S_{+2} \quad (1)$$

式中, $\frac{1}{\tau_0}$ 为光子晶体谐振腔的损耗衰减率; $\frac{1}{\tau_1}$

和 $\frac{1}{\tau_2}$ 分别为谐振腔场振幅 $a(t)$ 耦合到波导输入端和输出端的模式振幅衰减率, 其耦合系数 K_1 和 K_2 依赖于波导输入端与输出端的模式振幅衰减率。由 PCSBF 结构设计的对称性可知, $\tau_1 = \tau_2$ 。根据该理论, 输出端口 P_2 的正规化带阻损耗率 L (即 PCSBF 输出端对输入信号强度的损耗率) 取决于输入端口 P_1 的正规化反射率 R 和谐振腔的正规化损耗率 L_c 两个方面。当 $S_{+2} = 0$ 时, 由 CMT 可得输出端口 P_2 处的正规化传输率:

$$T = \left| \frac{S_{-2}}{S_{+1}} \right|^2 \quad (2)$$

输入端口 P_1 处的正规化反射率为

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

当谐振腔的工作角频率为 ω 时, 腔正规化损耗率 L_c ($0 \leq L_c \leq 50\%$) 与输出端的正规化带

阻损耗率 L ($0 \leq L \leq 100\%$) 满足以下关系式:

$$L_c = 2 \frac{-(1-L) + \sqrt{(1-L)(1+L(\omega-\omega_0)^2\tau_0^2)}}{(\omega-\omega_0)^2\tau_0^2+1} \quad (4)$$

正规化反射率 R ($0 \leq R \leq 100\%$) 与正规化带阻损耗率 L 满足以下关系式:

$$R = \sqrt{\frac{1+L(\omega-\omega_0)^2\tau_0^2}{(\omega-\omega_0)^2\tau_0^2+1}} - \sqrt{\frac{1-L}{(\omega-\omega_0)^2\tau_0^2+1}} \quad (5)$$

式中, $(\omega-\omega_0)\tau_0$ 为腔失谐因子, 用于描述谐振腔所处的工作状态。由式(4)和式(5)可得其正规化带阻损耗率:

$$L = R + L_c \quad (6)$$

输出端口的正规化传输率 T ($0 \leq T \leq 100\%$) 与 L 满足以下关系式:

$$T = 1 - L \quad (7)$$

当谐振腔的正规化损耗率满足 $0 \leq L_c \leq -2(1-L) + 2\sqrt{(1-L)}$ 时, 腔失谐因子大小 $|\omega-\omega_0|\tau_0$ 与 L_c 及 L 满足以下关系式:

$$|\omega-\omega_0|\tau_0 = \sqrt{4(L-L_c)\frac{1-L}{L_c^2}-1} \quad (8)$$

根据式(4), 腔失谐因子 $|\omega-\omega_0|\tau_0$ 取值不同时, 腔正规化损耗 L_c 随正规化带阻损耗率 L 的变化曲线如图 2 所示。可以看出, 当腔失谐因子不变时, 腔损耗率随着正规化带阻损耗率的增大而先增大后减小。腔正规化损耗率有一个峰值。 $|\omega-\omega_0|\tau_0$ 越大, 相应的腔正规化损耗率峰值 L_{cmax} 越小。在极大值点两侧, $L \rightarrow 100\%$ 时为无腔损耗的理想带阻滤波器, 相应 $R \rightarrow 100\%$, $T \rightarrow 0$; $L \rightarrow 0$ 时为无带阻损耗的滤波器, 相应 $R \rightarrow 0$, $T \rightarrow 100\%$ 。当 $|\omega-\omega_0|\tau_0 > 0$ 时, L_c 随 L 变化的各条曲线都有一个极值点

(L, L_{cmax})。其中,

$$L = \frac{|\omega-\omega_0|^2\tau_0^2-1 + \sqrt{1+(\omega-\omega_0)^2\tau_0^2}}{2(\omega-\omega_0)^2\tau_0^2} \quad (9)$$

腔正规化损耗率的最大值 L_{cmax} 为

$$L_{cmax} = \frac{-1 + \sqrt{1+(\omega-\omega_0)^2\tau_0^2}}{(\omega-\omega_0)^2\tau_0^2} \quad (10)$$

利用式(6)和式(7)可以算得相应的 R 和 T 。由图 2 可知, 当 $|\omega-\omega_0|\tau_0 = 0$ 时, $L = 75\%$, $L_{cmax} = 50\%$ 。此时, $R = 25\%$, $T = 25\%$, 也可根据洛必达法则得极值点为(75%, 50%)。随着腔失谐因子的增大, 相应正规化带阻损耗率的腔损耗变小。当 $|\omega-\omega_0|\tau_0 \rightarrow \infty$ 时, 算得 $L_{cmax} = 0$ 。根据式(4), 当正规化带阻损耗率取不同值时, 腔正规化损耗率随腔失谐因子的变化曲线如图 3(a)和图 3(b)所示。可以看出, 腔损耗率随着腔失谐因子的增大而减小; 在正规化带阻损耗率不变的情况下, $|\omega-\omega_0|\tau_0 \rightarrow 0$ 时, 腔正规化损耗率越大; 当 $|\omega-\omega_0|\tau_0 = 0$ 且 $L = 75\%$ 时, $L_{cmax} = 50\%$; 在给定的取值区间, L 离 75% 越远, 腔损耗率越小, 且当 L 为 0 或 100% 时, $L_c = 0$ 。

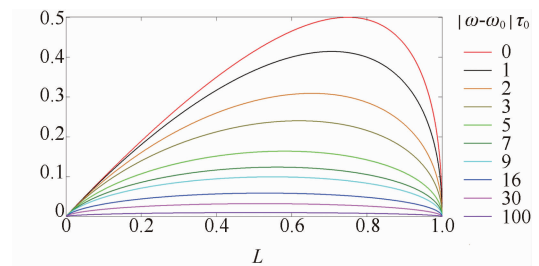


图 2 腔失谐因子 $|\omega-\omega_0|\tau_0$ 取不同值时, 腔正规化损耗率随正规化带阻损耗率 L 的变化曲线

根据式(5), 腔失谐因子取不同值时, 正规化反射率随 PCSBF 输出端口正规化带阻损

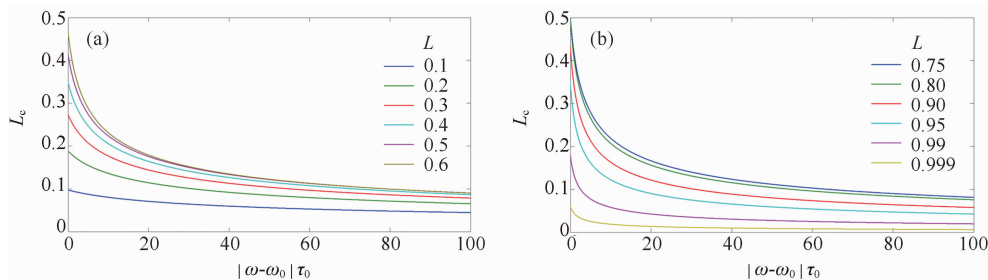


图 3 正规化带阻损耗率取不同值时, 腔正规化损耗率随腔失谐因子的变化曲线

耗率的变化曲线如图 4 所示。可以看出, 正规化反射率随着正规化带阻损耗率的增大而增大, 并且也随着腔失谐因子的增大而增大。由图 5 可知, 当正规化带阻损耗率取不同值时, 正规化反射率随腔失谐因子的增大而增大。当 $|\omega - \omega_0| \tau_0 = 0$ 时, 输入端口的正规化反射率 R 取最小值。当 $L = 99.9\%$ 且 $|\omega - \omega_0| \tau_0 = 0$ 时, 输入端口的正规化反射率 $R_{min} = 93.78\%$ 。当 $L = 100\%$ 时, $R = 100\%$, 表明理想 PCSBF 结构的带阻波段信号经过谐振器后被完全反射回输入端口; 当 $L = 0$ 时, $R = 0$, 表明信号经过谐振器后无损耗输出。

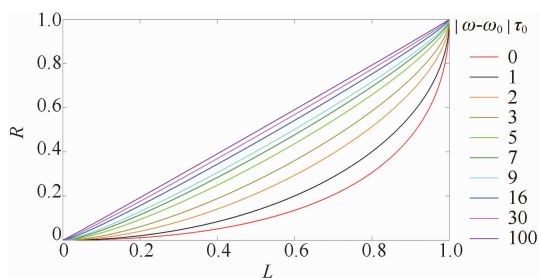


图 4 腔失谐因子 $|\omega - \omega_0| \tau_0$ 取不同值时, 正规化反射率随正规化带阻损耗率 L 的变化曲线

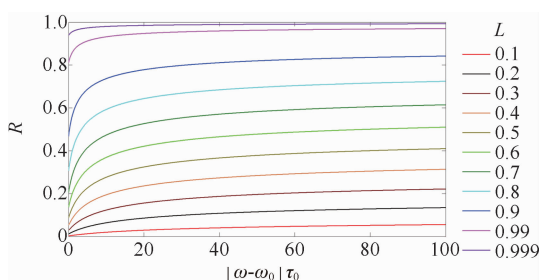


图 5 正规化带阻损耗率取不同值时, 正规化反射率随腔失谐因子的变化曲线

根据式(8), PCSBF 结构的腔正规化损耗率取不同值时, 腔失谐因子随正规化带阻损耗率的变化曲线如图 6 所示。该曲线上有腔失谐因子的极大值点, 其两侧腔失谐因子 $|\omega - \omega_0| \tau_0$ 相等处所对应的正规化带阻损耗率有意义的范围为 $[L_1, L_2]$ 。若腔损耗率为 L_c , 则腔失谐因子的最大值为

$$|\omega - \omega_0| \tau_0 = \frac{\sqrt{1 - 2L_c}}{L_c} \quad (11)$$

根据 CMT, 当波导中传输的信号能量耦

合进入谐振腔内, 然后从腔中再次进入波导并向同一方向继续传输时, 该结构处于较低的正规化带阻损耗率输出状态, 相应的正规化带阻损耗率为

$$L_1 = \frac{(1 + L_c) - \sqrt{(1 - 2L_c) - (\omega - \omega_0)^2 \tau_0^2 L_c^2}}{2} \quad (12)$$

当波导中传输的信号能量耦合进入谐振腔内, 然后从腔中再次进入波导并向反方向传输时, 该结构处于较高的正规化带阻损耗率输出状态, 相应的正规化带阻损耗率为

$$L_2 = \frac{(1 + L_c) + \sqrt{(1 - 2L_c) - (\omega - \omega_0)^2 \tau_0^2 L_c^2}}{2} \quad (13)$$

根据式(6)和式(7)可得, 曲线极值点左侧的 PCSBF 输出状况为 $R_1 = L_1 - L_c$, $T_1 = 1 - L_1$; 曲线极值点右侧的 PCSBF 输出状况为 $R_2 = L_2 - L_c$, $T_2 = 1 - L_2$ 。根据式(12)和式(13), 当 $|\omega - \omega_0| \tau_0 = 0$ 时, PCSBF 结构的最小正规化带阻损耗率 L_{1min} 为 $\frac{1}{2}(1 + L_c) - \frac{1}{2}\sqrt{1 - 2L_c}$, $L_{1min} \in [0, 75\%]$; 最大正规化带阻损耗率 L_{2min} 为 $\frac{1}{2}(1 + L_c) + \frac{1}{2}\sqrt{1 - 2L_c}$, $L_{2min} \in [75\%, 100\%]$ 。PCSBF 腔在谐振状态时, 若 $L_c = 50\%$, 则 $L_{1min} = L_{2max} = 75\%$, $R = 25\%$, $T = 25\%$ 。这表明高损耗腔设计的 PCSBF 输入信号耦合进入谐振腔内时, 一半的输入信号能量被损耗, 另外一半则向波导两端口输出(均为总能量的 25%)。若 $L_c = 0$, 可得 $L_{max} = 100\%$, $L_{min} = 0$, 表明理想无损耗腔可实现 PCSBF 理想带阻设计。图 6(a)中, 当 $L_c = 0.001$ 时, 横坐标有意义的取值范围为 $L \in [0.001, 1]$, 腔失谐因子的取值范围为 $|\omega - \omega_0| \tau_0 \in [0, 998.999]$; 图 6(b)中, 当 $L_c = 49\%$ 时, $L \in [0.674289, 0.815711]$, $|\omega - \omega_0| \tau_0 \in [0, 0.2886]$, 表明 $L_c \rightarrow 50\%$ 时, PCSBF 输出正规化带阻损耗率和腔失谐因子的取值区间都变窄了。由于光子晶体谐振腔 ϵ_0 为有限值, 若 $L_c \rightarrow 0$, 则 $|\omega -$

$\omega_0|\tau_0 = \frac{\sqrt{1-2L_c}}{L_c} \rightarrow \infty$, 工作角频率区域 $|\omega-\omega_0|$ 和输出正规化带阻损耗率范围 $[L_{1min}, L_{2max}]$ 都得到了展宽。这表明腔损耗越低, 工作时腔失谐因子范围越宽阔, 因此一个无损耗的理想谐振腔的工作频段可无限展宽。

PCSBF 结构的正规化带阻损耗率取不同值时, 腔失谐因子随腔正规化损耗率的变化曲线如图 7 所示。其中, 纵坐标 ($0 \leq |(\omega-\omega_0)\tau_0| \leq 110000$) 为指数形式, 在曲线与横坐标的交点处可认为腔处于谐振状态, 即 $|\omega-\omega_0|\tau_0 = 0$ 。由图 7(a) 可知, 随着正规化带阻损耗率的增大, 曲线与横坐标的交点对应的腔正规化损耗率增大; 由图 7(b) 可知, 随着正规化带阻损耗率的增大, 变化情况与图 7(a) 相反。这与图 2 中 $|\omega-\omega_0|\tau_0 = 0$ 时的红色曲线 L_{cmax} 最大值点相对应。当横坐标 $L = 75\%$ 时, $L_{cmax} = 50\%$ 。在该极值点左侧, $L \in [0, 75\%]$; 随着正规化带阻损耗率的增大, 曲线与横坐标交点处的腔正规化损耗率增大。在该极值点右侧, $L \in [75\%, 100\%]$; 随着正规化带阻损耗率的增大, 变化情况相反。

当腔工作于谐振状态 $\omega = \omega_0$ 时, 由式(6)~式(8)可得, 该 PCSBF 结构中腔失谐因子 $|\omega$

$-\omega_0|\tau_0$ 与腔正规化损耗率 L_c 、输入端正规化反射率 R 和输出端正规化传输率 T 满足以下关系式:

$$|\omega-\omega_0|\tau_0 = \sqrt{\frac{4RT}{L_c^2} - 1} = 0, \text{ 即 } L_c^2 = 4RT \quad (14)$$

根据 CMT 得到了侧向耦合结构的工作状态参量 L 、 $|\omega-\omega_0|\tau_0$ 、 L_c 、 R 以及 T 之间的函数关系式。当 $L_c \rightarrow 0$ 时, PCSBF 腔的工作角频率区域 $|\omega-\omega_0|$ 和输出正规化带阻损耗率 L 的范围 $[L_{1min}, L_{2max}]$ 都得到了展宽。当 $L_c = 0$ 时, 一个理想无损耗腔的工作频段可无限展宽, 输出 L 的范围展宽为 $[0, 100\%]$ 。CMT 为 PCSBF 结构工作状况的分析提供了理论指导。

3 基于近长方环腔谐振器设计的 PCSBF 结构

图 8 和图 9 所示为 PCSBF 结构输出的正规化功率特性谱。其中, 横坐标表示工作波段 1450~1750 nm, 纵坐标表示输出端口传输电磁波的正规化功率, 蓝色虚线表示输出端口对波长信号的正规化传输率 T , 黑色实线代表输出端口对波长信号的正规化带阻损耗率 L 。在每一个子图的右侧均标注了该结构正规化带阻

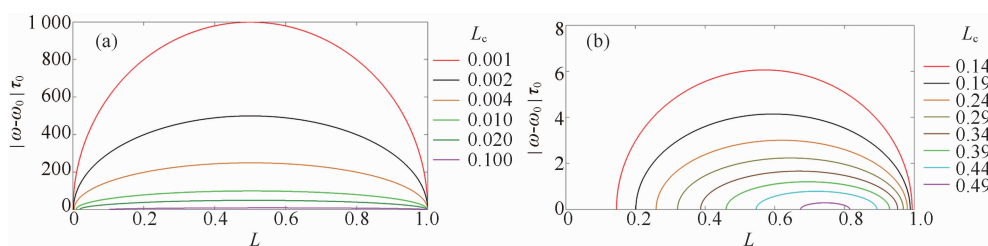


图 6 腔正规化损耗率取不同值时, 腔失谐因子随正规化带阻损耗率的变化曲线

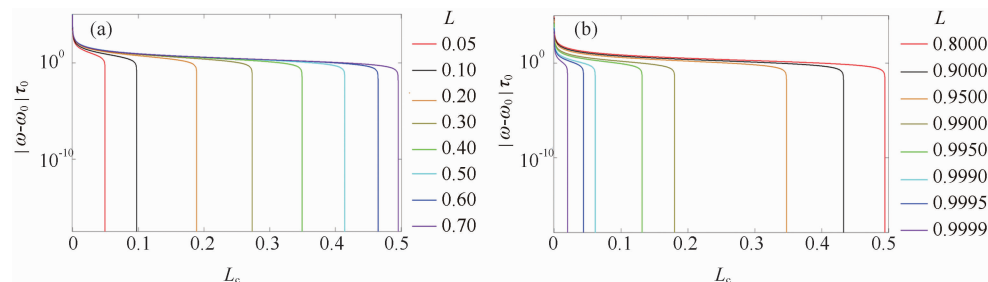


图 7 正规化带阻损耗率取不同值时, 腔失谐因子随腔正规化损耗率的变化曲线

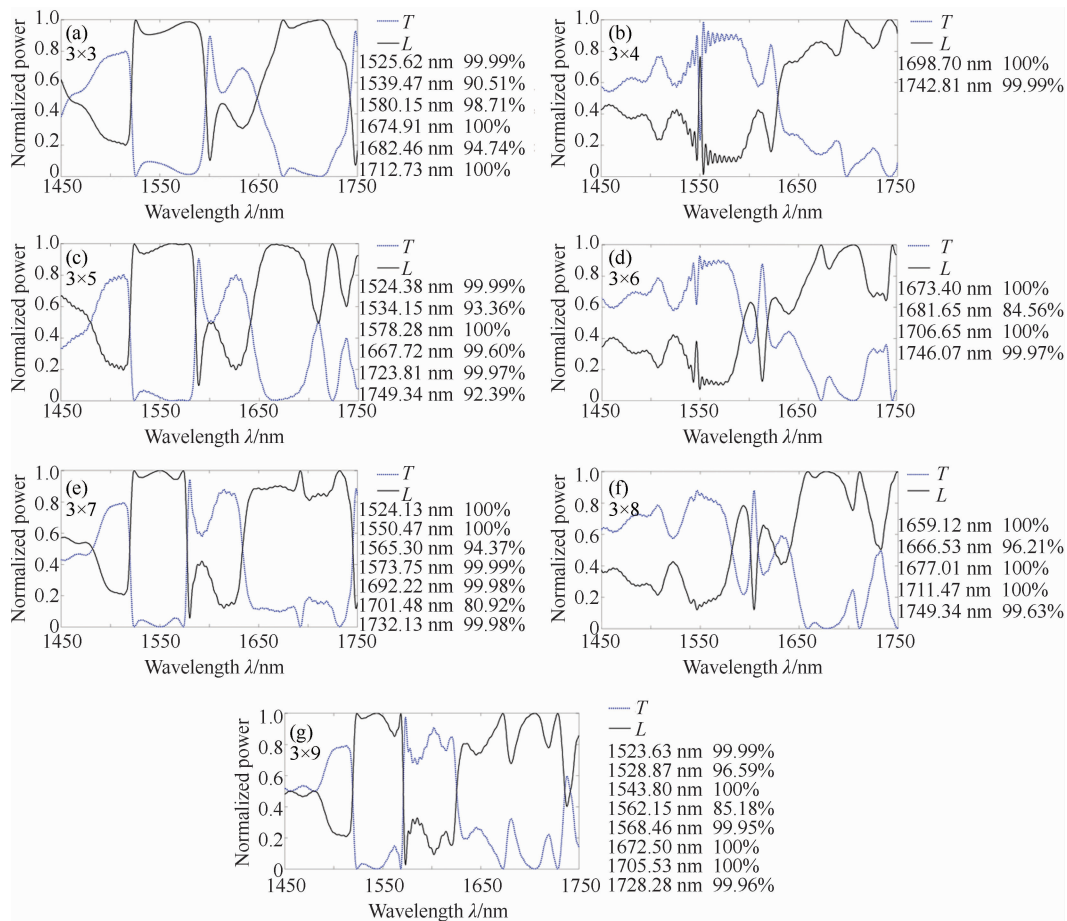


图 8 改变近长方环腔大小时 PCSBF 的功率输出谱

损耗率的极值点及其对应的波长。为兼顾结构紧凑性及带阻输出性能,耦合结构保持不变。通过改变近长方环腔的水平长度或只改变近长方环腔内部介质柱的半径,研究了基于 $3 \times n$ ($3 \leq n \leq 9$) 近长方环腔谐振器设计的 PCSBF 结构,并给出了正规化功率特性谱(见图 8 和图 9)。图 8 中所有子图的左上侧依次标注了 PCSBF 结构设计所用谐振腔的大小(3×3 、 3×4 、 3×5 、 3×6 、 3×7 、 3×8 和 3×9)及其对应的字母标号 a~g;图 9 中所有子图的左上侧依次标注了 PCSBF 结构 3×7 内部介质柱的半径 ($0.14a$ 、 $0.15a$ 、 $0.16a$ 、 $0.17a$ 、 $0.18a$ 、 $0.19a$ 、 $0.20a$ 、 $0.21a$ 、 $0.22a$ 、 $0.23a$ 、 $0.24a$ 和 $0.25a$)及其对应的字母标号 a~l。图 8(a)~图 8(g)标注了 38 个正规化带阻损耗率极值点对应的波长,其正规化带阻损耗率范围为 80.92%~100%。功率特性谱表明,通过改变谐振腔

的大小可调节输出通带之间的带阻波段位置和带阻宽度。为便于分析输出带阻损耗特性,表 1 根据图 8 列出了 PCSBF 结构输出的较宽带阻波段。其中, $3 \times n$ 代表 PCSBF 结构的谐振腔大小, L_{\min} 代表输出带阻波段的正规化带阻损耗率最小值, $\lambda_{L,\min}$ 代表正规化带阻损耗率最小值所对应的波长, $\Delta\lambda$ 代表阻带宽度。由表 1 中所列的 11 个带阻波段可得,平均带宽为 58.19 nm,最小正规化带阻损耗率的平均值为 88.38%。随着谐振腔尺寸的增大,基于 3×3 、 3×5 、 3×7 和 3×9 近长方环腔谐振器设计的 PCSBF 结构在光纤通信 C 波段(1530~1565 nm)及附近具有边沿陡峭的高带阻损耗率(平均值高于 90.86%)的输出波段(1521.25~1591.35 nm),始终为整个 C 波段信号提供全带阻输出的特性。

图 9(a)~图 9(l)采集了 75 个正规化带阻

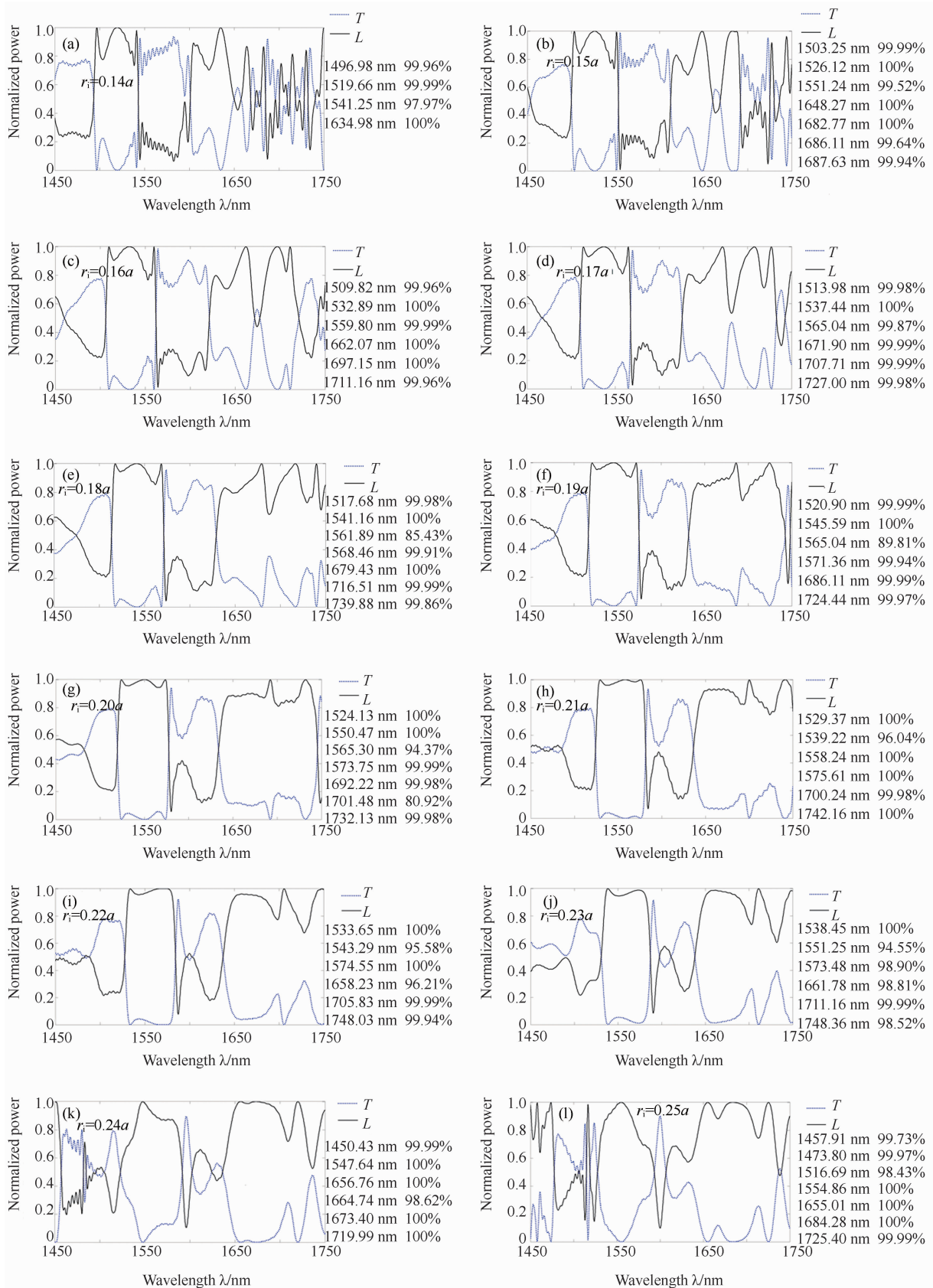


图 9 改变 3×7 近长方环腔内部介质柱半径时 PCSBF 的规范化功率输出谱

表 1 近长方环腔大小不同时 PCSBF 的带阻损耗特性

$3 \times n$	L_{\min}	$\lambda_{L_{\min}}/\text{nm}$	λ/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$
(a) 3×3	90.51%	1539.47	1523.56~1591.35	67.79
	94.74%	1682.46	1671.50~1721.28	49.78
(b) 3×4	77.14%	1687.94	1654.81~1750.00	95.19
(c) 3×5	93.36%	1534.15	1522.48~1582.40	59.92
	97.31%	1682.46	1658.13~1684.28	26.15
(d) 3×6	84.56%	1681.55	1663.33~1717.30	53.97
(e) 3×7	94.37%	1565.30	1522.37~1575.42	53.05
	80.92%	1701.48	1639.86~1741.99	102.13
(f) 3×8	96.21%	1666.53	1655.25~1691.08	35.83
(g) 3×9	85.18%	1562.16	1521.25~1569.85	48.6
	77.88%	1719.36	1685.17~1732.87	47.7

表 2 改变 3×7 近长方环腔内部介质柱半径时 PCSBF 的带阻损耗特性

r_i	L_{\min}	$\lambda_{L_{\min}}/\text{nm}$	λ/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$
(a) 0.14a	73.31%	1538.45	1494.60~1542.56	47.96
(b) 0.15a	73.12%	1548.41	1500.97~1552.71	51.74
(c) 0.16a	76.63%	1553.05	1507.44~1561.24	53.80
	82.39%	1706.78	1685.29~1714.10	28.81
(d) 0.17a	80.98%	1558.50	1511.78~1566.42	54.64
	74.25%	1646.25	1629.98~1676.82	46.84
	71.13%	1718.73	1688.55~1731.12	42.57
(e) 0.18a	85.43%	1561.89	1515.42~1570.07	54.65
	79.40%	1647.98	1635.06~1683.64	48.64
	72.68%	1729.56	1692.61~1743.65	51.04
(f) 0.19a	89.81%	1565.04	1518.84~1572.97	54.13
	73.56%	1693.45	1635.60~1737.16	101.56
(g) 0.20a	94.37%	1565.30	1522.37~1575.42	53.05
	80.92%	1701.48	1639.86~1741.99	102.13
(h) 0.21a	96.04%	1539.21	1527.60~1578.39	50.79
	74.78%	1723.81	1640.81~1750.00	109.19
(i) 0.22a	95.58%	1543.29	1531.59~1580.32	48.73
	77.28%	1698.39	1642.72~1721.06	78.34
(j) 0.23a	94.55%	1551.25	1535.82~1581.60	45.78
	73.63%	1703.04	1642.86~1724.68	81.82
(k) 0.24a	86.61%	1573.22	1541.20~1581.76	40.56
	98.62%	1664.74	1652.98~1684.96	31.98
(l) 0.25a	88.20%	1667.12	1646.84~1705.75	58.91

率极值点及相应波长, 其正规化带阻损耗率范围为 85.43%~100%。结果表明, 通过改变谐

振腔内部介质柱的半径能调节端口输出通带之间的带阻波段位置和带阻宽度, 并可获得较宽

的输出带阻波段。为便于分析输出带阻损耗特性,表 2 根据图 9 列出了 PCSBF 结构输出的较宽带阻波段。其中, r_i 代表 PCSBF 结构的 3×7 内部介质柱半径,其它参数与表 1 中列出的相同。此外,表 2 还列出了 23 个阻带。这些阻带的最小正规化带阻损耗率和带宽的平均值分别为 82.32% 和 58.16 nm。调节 PCSBF 结构的 3×7 内部柱半径 r_i (0.14a~0.24a) 时,在光纤通信 C 波段(1530~1565 nm)及其附近具有可连续调节且边沿陡峭的带阻波段(1494.60~1581.76 nm)。此波段上带阻损耗率 L_{\min} 的平均值高于 86.04%。该光子晶体带阻滤波器的信号传输强度损耗值 l 可通过式(15)得到。

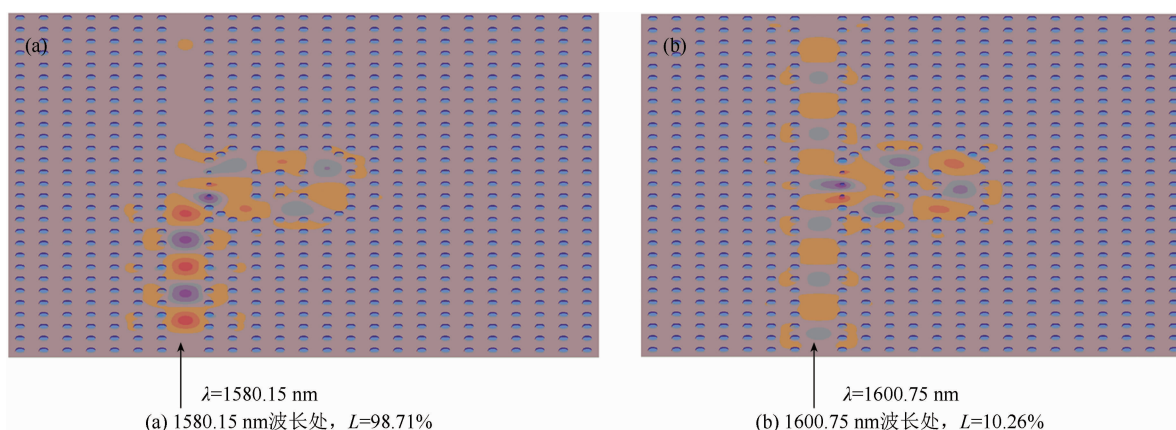
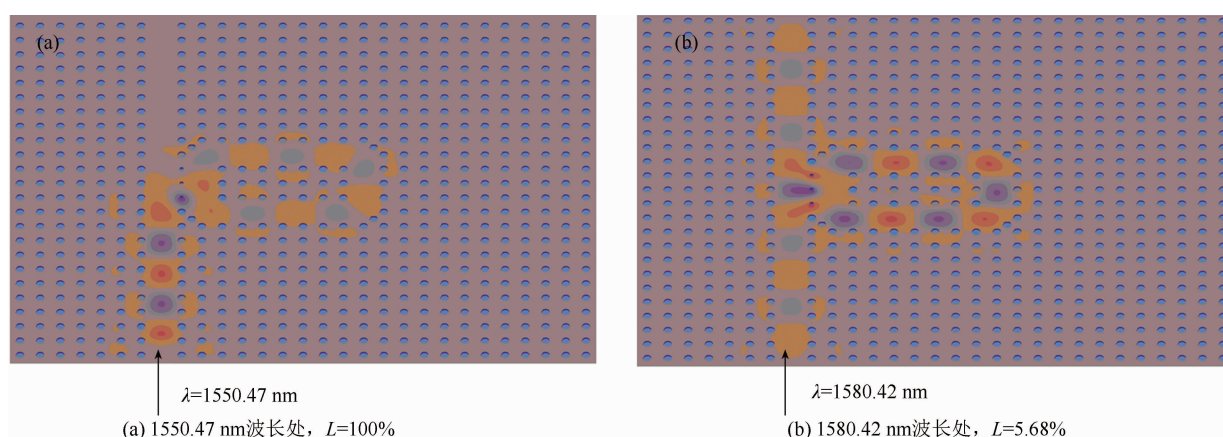
$$l = -10 \log(1-L) \quad (15)$$

式中, L 为正规化带阻损耗率。表 1 和表 2 中所采集的 34 个较宽带阻波段的波长信号正规化带阻损耗率的最小值高于 73.12%,正规化带阻损耗率最小值的平均值高于 84.28%。根据式(15)算得信号传输强度损耗值 $l \geq 5.076$ dB,其平均值 $\bar{l} \geq 8.035$ dB。结果表明,这种微型 PCSBF 结构输出的带阻波段具有波长可调节范围宽、平均带阻损耗率高等特点。在波长信号带阻设计中,该结构能有效滤除不需要的信号,从而保证集成光路和光通信系统工作的稳定性。

CMT 分析结果表明,在理想的无损耗腔谐振时,PCSBF 有两种输出状态:低正规化带阻损耗率($L=0$)和高正规化带阻损耗率($L=100\%$)。这说明理想无损耗腔可实现 PCSBF 理想的带阻设计。但现实中腔存在损耗,其输出状态不能达到理想情况。表 1 和表 2 采集了 34 个较宽的带阻波段,这些阻带的平均宽度为 58.17 nm,平均正规化带阻损耗率高于 84.28%。这表明根据实际需求,可通过调节 PCSBF 结构设计来改变功率输出谱,从而将其用于波长信号带阻滤除设计。从表 1 中可以看出,在工作于 1523.56~1591.35 nm 波段时,基于 3×3 环腔设计的 PCSBF 结构的正规

化带阻损耗率高于 90.51%,带阻宽度为 67.79 nm,比表 1 中所列的 3×5 、 3×7 和 3×9 环腔设计的 PCSBF 阻带更宽。随着腔体积的增大,正规化带阻损耗率先增大后减小且 $L \in [75\%, 100\%]$ 。根据式(13)可知,这是腔正规化损耗率 L_c 和腔失谐因子 $|\omega - \omega_0| \tau_0$ 的变化共同调节的结果。若 $|\omega - \omega_0| \tau_0 > 0$,且已知式(4)~式(8)中 PCSBF 两个独立的状态参量(例如 $|\omega - \omega_0| \tau_0$ 和 T),则可方便地算得另外的工作状态参量。为讨论问题的方便,文中仅对 $|\omega - \omega_0| \tau_0 = 0$ 时的情况进行分析。PCSBF 有低、高正规化带阻损耗率两种工作状态。输出谱上采集的正规化带阻损耗率曲线的峰值 L_{\max} 或最小值 L_{\min} 处, $|\omega - \omega_0| \tau_0 = 0$ 。由 CMT 可算得 PCSBF 所对应的工作状态参量 L_c 、 R 和 T 。

以图 8(a)和图 8(e)中 PCSBF 输出功率谱的设计结构为例:图 8(a)中,在 3×3 环腔 PCSBF 结构输出功率谱的 1580.15 nm 波长处,正规化带阻损耗率有一个峰值 $L_{\max} = 98.71\%$,信号处于高正规化带阻损耗率状态,算得 $L_c = 20.136\%$, $R = 78.574\%$, $T = 1.29\%$;在 1600.75 nm 波长处有一个最小值 $L_{\min} = 10.26\%$,信号处于低正规化带阻损耗率状态,算得 $L_c = 9.982\%$, $R = 0.278\%$, $T = 89.74\%$ 。在图 8(e)所示的 3×7 环腔 PCSBF 结构输出功率谱中,1550.47 nm 波长处有一个峰值 $L_{\max} = 100\%$,算得 $L_c = 0$, $R = 100\%$, $T = 0$ 。此时腔处于理想谐振状态,输入波长信号全部被反射回输入端口。在 1580.42 nm 波长处有一个最小值 $L_{\min} = 5.68\%$,算得 $L_c = 5.597\%$, $R = 0.083\%$, $T = 94.32\%$ 。图 10 和图 11 分别为 3×3 和 3×7 环腔 PCSBF 结构工作于各自的两个不同波长时的稳态电场传输分布图。如图 10(a)所示, 3×3 环腔 PCSBF 结构工作于 1580.15 nm 波长时,对该信号的正规化带阻损耗率高,导致输入信号几乎不能通过此滤波器;如图 10(b)所示,当工作于 1600.75 nm 波长时,对该信号的正规化带阻损耗率低,因此输入信号能通过此滤波器。如图 11(a)所示, 3

图 10 3×3 环腔 PCSBF 结构工作于两个不同波长时的稳态电场强度传输分布图图 11 3×7 环腔 PCSBF 结构工作于两个不同波长时的稳态电场强度传输分布图

$\times 7$ 环腔 PCSBF 结构工作于 1550.47 nm 波长时, 对该信号的正规化带阻损耗率高, 导致输出端的输入信号强度损耗率为 100%; 如图 11 (b) 所示, 当工作于 1580.42 nm 波长时, 对该信号的正规化带阻损耗率低, 因此输入信号能通过输出端口。稳态电场传输分布图特征表明, 在 PCSBF 输出谱的正规化带阻损耗率曲线极值处, 腔都处于谐振状态 $\omega = \omega_0$, 该结构的电场传输强度分布状况与 CMT 分析结果符合得很好。

4 结论

本文根据 CMT 得到了 PCSBF 侧向耦合结构的正规化带阻损耗率 L 、腔失谐因子 $|\omega - \omega_0| \tau_0$ 、腔正规化损耗率 L_c 、输入端口正规化反射率 R 和输出端口正规化传输率 T 等工作状态参量之间的函数关系式; 优化了 PCSBF 结构, 改变了结构参数设计并使用 FDTD 方法

对功率输出谱进行了研究, 另外还借助于 CMT 分析了其工作状态。相关结果如下:

(1) 随着 L 的增大, L_c 有一个极大值 L_{cmax} 。当 $|\omega - \omega_0| \tau_0 = 0$ 时, 若 $L \in [0, 75\%]$, 随着 L 的增大, L_c 增大; 若 $L = 75\%$, $L_{cmax} = 50\%$; 若 $L \in [75\%, 100\%]$, 随着 L 的增大, L_c 变小。当 $|\omega - \omega_0| \tau_0 > 0$ 时, 有着类似规律, 且随着 $|\omega - \omega_0| \tau_0 \rightarrow \infty$, 腔正规化损耗率峰值 L_{cmax} 变小。在极大值点两侧, 若 $L = 100\%$, 则成为一个理想的带阻滤波器, 此时 $L_c = 0$, $R = 100\%$, 带阻波段信号经过谐振器后完全被反射回输入端口; 当 $L = 0$ 时, $L_c = 0$, $R = 0$, $T = 100\%$, 波长信号经过谐振器后无能量损耗地输出。

(2) 随着 L 的增大, 输入端口的正规化反射率 R 增大。随着 $|\omega - \omega_0| \tau_0 \rightarrow \infty$, R 增大; 当 $|\omega - \omega_0| \tau_0 = 0$ 时, R 取最小值。当 $L = 0$ 时, R

$=0$; 当 $L=100\%$ 时, $R=100\%$, 输入信号不能输出, 完全被反射回输入端口。

(3) 光子晶体谐振腔的损耗衰减率为有限值。当 $L_c \rightarrow 0$ 时, PCSBF 腔的工作角频率区域 $|\omega - \omega_0|$ 和正规化带阻损耗率 L 的范围 $[L_{1\min}, L_{2\max}]$ 都得到了展宽; 当 $L_c = 0$ 时, 一个理想腔的工作频段可无限展宽, 输出 L 的范围展宽为 $[0, 100\%]$ 。当 $L_c \rightarrow 50\%$ 时, $|\omega - \omega_0| \tau_0 \rightarrow 0$, 腔工作频段和 L 范围逐渐变窄为一点; 当 $L_c = 50\%$ 时, $\omega = \omega_0$, $L_{1\min} = L_{2\max} = 75\%$ 。

(4) 根据 CMT 分析可得, 该 PCSBF 结构在谐振状态下, 谐振腔的正规化损耗率 L_c 满足以下关系式: $L_c^2 = 4RT$ 。

(5) 通过调节 PCSBF 结构中 $3 \times n$ ($3 \leq n \leq 9$) 近长方环腔的大小得到 11 个阻带(平均带宽为 58.19 nm)。随着谐振腔的增大, 基于 3×3 、 3×5 、 3×7 和 3×9 近长方环腔谐振器设计的 PCSBF 结构在光纤通信 C 波段附近具有边沿陡峭的可调带阻波段(1521.25 ~ 1591.35 nm), 始终为整个 C 波段提供高正规化带阻损耗率。调节 3×7 近长方环腔的内部柱半径 ($0.14a \sim 0.24a$), 得到的 23 个阻带的平均带宽为 58.16 nm。该结构在 1494.60 ~ 1581.60 nm 波段连续可调且保持边沿陡峭的带阻输出特性。这 34 个阻带信号的传输强度损耗平均值不小于 8.035 dB。

(6) PCSBF 有低、高正规化带阻损耗率两种工作状态。通过输出谱采集得到正规化带阻率极值 $L_{1\min}$ 或 $L_{2\max}$, 相应的 $|\omega - \omega_0| \tau_0$ 等于 0。由 CMT 可算得状态参量 L_c 、 R 和 T , 其结果与 PCSBF 结构的稳态电场传输强度分布图特征符合得很好。当 $|\omega - \omega_0| \tau_0 > 0$ 时, 已知 PCSBF 的两个独立的状态参量, 根据 CMT 也能算得另外的工作状态参量。

(7) PCSBF 结构输出的带阻波长具有可调性宽、正规化带阻损耗率高等特点。在带阻设计中, 该微型元件能有效滤除不需要的波长信号, 有利于提高集成光路和光纤通信系统传输信号的稳定性, 因此在光集成和光通信等领域

具有潜在应用价值。

参考文献

- [1] Marziyeh M, Mohammad D, Ali A O. Design of all-optical XOR and XNOR logic gates based on Fano resonance in plasmonic ring resonators [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, **51**(154): 1-18.
- [2] Bharti G K, Rakshit J K. Design of all-optical JK, SR and T flip-flops using micro-ring resonator-based optical switch [J]. *Photonic Network Communications*, 2018, **35**(21): 1-11.
- [3] Negahdari R, Rafiee E, Emami F. Realization of all-optical plasmonic MIM split square ring resonator switch [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, **51**(7): 1924.
- [4] Takuma M, Kousuke K, Hiroyuki Y, et al. Performance of all-optical AND gate using photonic-crystal QDSOA at 160 Gb/s [J]. *Electronics Letters*, 2018, **54**(9): 580-582.
- [5] Hamed A B, Farhad M, Somaye S, et al. A 2×4 all optical decoder switch based on photonic crystal ring resonators [J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2015, **62**(6): 430-434.
- [6] Alipourbanaei H, Mehdizadeh F. High sensitive photonic crystal ring resonator structure applicable for optical integrated circuits [J]. *Photonic Network Communications*, 2016, **33**(2): 1-7.
- [7] Robinson S, Nakkeeran R. Two dimensional photonic crystal ring resonator based add drop filter for CWDM systems [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, **124**(18): 3430-3435.
- [8] Alipourbanaei H, Mehdizadeh F. High sensitive photonic crystal ring resonator structure applicable for optical integrated circuits [J]. *Photonic Network Communications*, 2016, **33**(2): 1-7.
- [9] Sreenivasulu T, Kolli V R, Tarimala B, et al. Super defect inside photonic crystal ring resonator to enhance Q factor [J]. *Optical engineer-*

- ing, 2016, **55**(3): 035103.
- [10] Ghorbanpour H, Makouei S. 2-channel all optical demultiplexer based on photonic crystal ring resonator [J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2013, **6**(2): 224–227.
- [11] An P, Kovalyuk V, Golikov A, et al. Experimental optimisation of O-ring resonator Q-factor for on-chip spontaneous four wave mixing [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2018, **1124**(5): 051047.
- [12] Divya J, Selvendran S, Raja A S. Two-dimensional photonic crystal ring resonator-based channel drop filter for CWDM application [J]. *Photonic Network Communication*, 2017, **35**(23): 1–11.
- [13] Dideban A, Habibiyan H, Ghafoorifard H. Photonic crystal channel drop filter based on ring-shaped defects for DWDM systems [J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2017, **87**: 77–83.
- [14] Zavvari M, Mehdizadeh F. Photonic Crystal Cavity with L3-Defect for Resonant Optical Filtering [J]. *Frequenz*, 2014, **68**(11–12): 519–523.
- [15] Brunetti G, Dell’Olio F, Conteduca D, et al. Ultra-compact tuneable notch filter using silicon photonic crystal ring resonator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, **37**(13): 2970–2980.
- [16] Nawrocka M S, Liu T, Wang X, et al. Tunable silicon microring resonator with wide free spectral range [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(7): 1–3.
- [17] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. *Comput Phys*, 1994, **114**(2): 185–200.
- [18] Goldberg M. Stability criteria for finite difference approximations to parabolic systems [J]. *Applied Numerical Mathematics*, 2000, **33**(1–4): 509–515.
- [19] Zhu Z, Brown T G. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers [J]. *Opt Express*, 2002, **10**(17): 853–864.
- [20] 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.
- [21] 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.