

文章编号: 1001-3806(2018)01-0083-06

具有谐振腔的弯折光子晶体波导特性研究

田存伟, 吴立恒, 王明红

(聊城大学 物理科学与信息工程学院, 聊城 252059)

摘要: 为了研究基于光子晶体波导的高性能滤波器, 采用调节谐振腔结构和优化耦合结构等方法, 基于耦合模理论, 在正方格光子晶体中设计了3种光子晶体弯折波导, 并进行了理论分析和仿真验证, 利用时域有限差分法取得了3种波导在S波段及C波段上的工作特性数据。结果表明, 3种波导在不同波段表现出良好的带阻或带通特性, 且其结构截止传输波长和通带传输波长随整体介质柱相对介电常数增加向长波方向移动, 介电常数 ϵ_r 每增加0.3, 截止传输波长和通带传输波长均增加6nm左右。这一结果对微型光传感器、微型光通信器件、集成光路等方面的设计都是有帮助的。

关键词: 材料; 光子晶体波导; 耦合模理论; 时域有限差分法; 谐振腔

中图分类号: TN252 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.01.016

Study on characteristics of bent photonic crystal waveguides with resonant cavities

TIAN Cunwei, WU Liheng, WANG Minghong

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

Abstract: In order to study high performance filters based on photonic crystal waveguide, some methods such as adjusting the structures of resonant cavities and optimizing the coupling regions were adopted in the paper. Three kinds of bent photonic crystal waveguides were designed based on the coupled-mode theory in square dielectric rod photonic crystal. After theoretical analysis and experimental verification, the performance characteristics in the S-band and C-band were studied by the time-domain finite-difference method. The results show that, 3 kinds of waveguides have good band stop or band pass characteristics at different wavelengths. Cutoff transmission wavelength and passband transmission wavelength shift toward longer wavelengths with the increase of relative dielectric constant of the overall dielectric column. Cutoff wavelength and transmission wavelength are increased by about 6nm with the increase of dielectric constant ϵ_r by 0.3. The study has potential value in the designs of micro optical sensors, micro optical communication devices, optical integrated circuits, etc.

Key words: materials; photonic crystal waveguide; coupled-mode theory; finite-difference time-domain method; resonant cavity

引言

光子晶体能把带隙中的电磁波信号约束在设定好的波导内传输^[1-4], 并将其传输到指定位置, 以便对传送的信号进行分析处理。因此, 设计高品质工作性能的波导结构在信号接收与传递、超低功耗、高带宽等方面具有重要的研究意义^[5-6]。近年来, 很多研究都是围绕着解决2维光子晶体波导弯折角设计开展的, 有的学者^[7-8]采用了改变弯折处空气孔或介质棒半径的方法来改变通过性能; 有的研究^[9-10]同时改变了光子通道半径及弯折处介质棒的位置, 达到了更佳通过性;

还有学者^[11-12]提出引入孔洞缺陷的方法, 通过缺陷产生共振频率实现了窄带滤波或宽带滤波的良好效果。经典集成光学通过在波导弯折处采用隅角反射镜结构或开放式谐振腔结构来改善其传输性能, 其类似结构也可以应用于改善光子晶体波导对电磁波的传输性能^[13-18]。在上述研究的基础上, 在正方格介质柱光子晶体中通过设置谐振腔等结构来调节波导的工作性能, 通过耦合模理论优化设计了L型、U型、S型弯折波导。有学者应用时域有限差分法^[19-20]编程研究了这3种波导结构对平行极化波的传输特性, 通过分析3种波导结构的传输谱、输入反射谱、电场强度分布图发现, 3种结构在不同的波段均具有良好的带阻滤波特性和带通滤波特性, 且其截止传输波长和通带传输波长随整体介质柱相对介电常数增加向长波方向移动。这些性质在微型光滤波器设计、微型光传感器、微型光通信器件设计及集成光路设计中具有较大研究意义。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11375081); 山东省高等学校科技计划资助项目(J14LN29)

作者简介: 田存伟(1981-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事微波理论与技术的研究。

E-mail: tiancunwei@lcu.edu.cn

收稿日期: 2017-01-22; 收到修改稿日期: 2017-04-13

1 耦合模理论设计弯折波导上的应用

运用时域耦合模理论 (coupled-mode theory, CMT)^[21-24]进行了谐振腔与波导之间理论上的耦合特性分析,设计了3种带有谐振腔的弯折波导结构。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,在理想传输状况下没有损耗,设在谐振腔内场的振动频率是 ω_0 , 振幅是 $a(t)$, S_{+1} 描述了波导端口 P_1 的电磁波输入能量, S_{-1}, S_{-2} 分别描述了波导端口 P_1 和 P_2 的电磁波输出能量。取振幅 $a(t)$ 时间导数得:

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

式中, $1/\tau_1, 1/\tau_2$ 为耦合到输入和输出两波导模式振幅衰减率, $1/\tau_0$ 为腔损耗衰减率, K_1 为耦合系数。相关的外部耦合因子为:

$$Q_{e,1} = \omega_0 \tau_1 / 2 \quad (2)$$

$$Q_{e,2} = \omega_0 \tau_2 / 2 \quad (3)$$

谐振腔固有品质因子为:

$$Q_0 = \omega_0 \tau_0 / 2 \quad (4)$$

固有品质因子 Q_0 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 $Q_{e,1}$ 和 $Q_{e,2}$ 描述了腔与波导耦合作用时能量的泄露。耦合系数 K_1 依赖于输入波导模式振幅衰减率 $1/\tau_1$, 两个量之间的关系为:

$$K_1 = \sqrt{2/\tau_1} \quad (5)$$

$$S_{-1} = -S_{+1} + \sqrt{2/\tau_1} a(t) \quad (6)$$

$$S_{-2} = \sqrt{2/\tau_2} a(t) \quad (7)$$

通过波导模式与谐振器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,耦合模理论为这个概念提供了一种定性描述。按照耦合模理论能获得如下的关系式,端口 P_1 的反射率为:

$$R = \left| \frac{S_{-1}}{S_{+1}} \right|^2 = \left| \frac{-j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_0}}{j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_0}} \right|^2 \quad (8)$$

式中, ω 为腔外频率。端口 P_2 的传输率为:

$$T = \left| \frac{S_{-2}}{S_{+1}} \right|^2 = \left| \frac{\frac{2}{\sqrt{\tau_1 \tau_2}}}{j(\omega - \omega_0) + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_0}} \right|^2 \quad (9)$$

在一无损耗介质和对称的系统中, $1/\tau_0 = 0, 1/\tau_1 = 1/\tau_2 = 1/\tau_e = \omega_0 / (2Q_e)$, 系统具有 100% 的传输率, $1/\tau_0 \neq 0$ 时,数值比 $\tau_e / \tau_0 = Q_e / Q_0$ 决定最大传输率与

最小反射率,得到如下的公式:

$$R = \left| \frac{Q_e / Q_0}{2 + Q_e / Q_0} \right|^2 \quad (10)$$

$$T = \left| \frac{2}{2 + Q_e / Q_0} \right|^2 \quad (11)$$

传输损耗率为:

$$L = 1 - T - R \quad (12)$$

图 1 中给出传输率、反射率、传输损耗率随 Q_0 / Q_e 变化的关系图像。很明显,如果谐振器无辐射损耗,在谐振频率上能实现没有反射的完全传输,然而辐射损失是不可避免的,将会减小传输率,通过制作非常大的 Q_0 / Q_e , 来实现波导模式与谐振腔模式间的强耦合作用,以提高传输率。

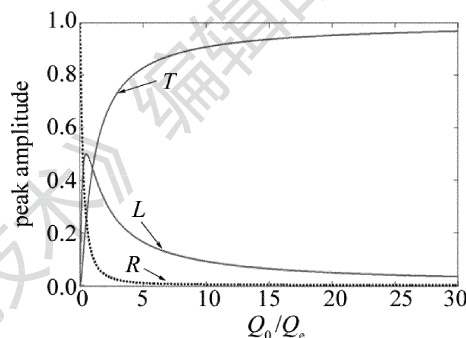


Fig. 1 Transmission, reflection and losses with the change of Q_0 / Q_e .

2 带有谐振腔的弯折光子晶体波导

2.1 光子晶体环形结构谐振腔

从正方格介质柱光子晶体中抽取其中的部分介质柱,形成介质柱围绕的环形结构腔,并在环形腔的4个拐角半个晶格常数处分别放置一支相同散射介质柱^[25],形成图2所示的一种典型的近圆环形结构谐振腔。腔内有一个 3×3 介质柱结构,画在圆角长方框内部,腔外侧两排耦合区域介质柱画在两个长方框内部。也可在光子晶体结构内部直接抽取其中的一排介质柱,形成形式上更为简化的线形谐振腔结构。

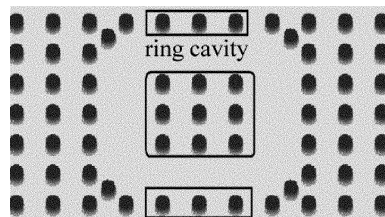


Fig. 2 Ring cavity of photonic crystal

在晶格常数 $a = 541\text{nm}$ 、介质柱半径 $r = 0.2a$, 30×30 的 2 维正方格子介质柱光子晶体中,通过调节环形谐振腔和线形谐振腔结构、波导与谐振腔耦合区域、谐振腔间耦合区域及其介电常数设置等,优化设计了波导的工作特性。根据耦合模理论设计了具有轴对称、

中心对称结构的弯折波导。图 3 ~ 图 11 是在光子晶

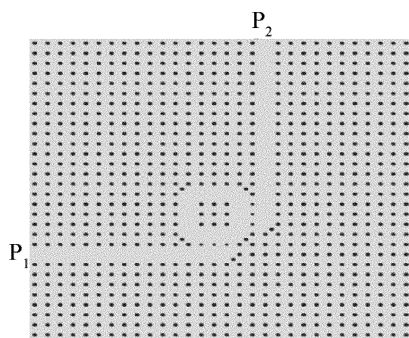


Fig. 3 Structure block of L-shaped bent photonic crystal waveguide

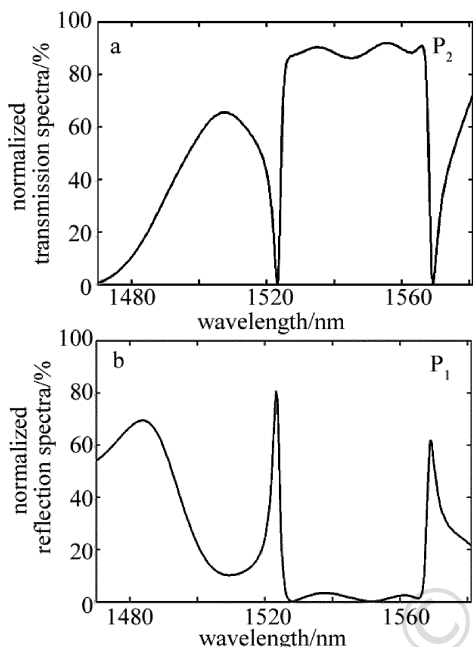


Fig. 4 Normalized spectra of L-shaped bent photonic crystal waveguide
a—transmission spectra at the port P₂ b—reflection spectra at the port P₁

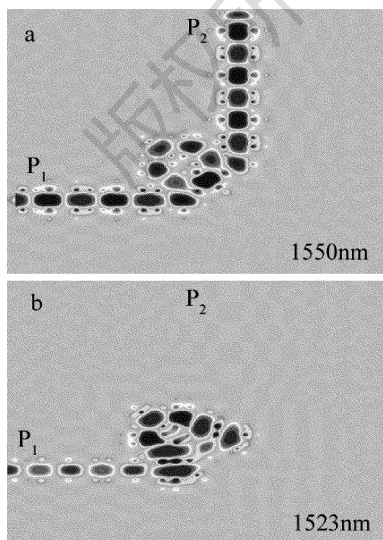


Fig. 5 Structure block and characteristic graph of L-shaped bent photonic crystal waveguide
a—electric field pattern of propagation b—electric field pattern of cutoff propagation

体中设计的 L 型、U 型、S 型波导结构示意图。圆斑代表介质柱,其相对介电常数 $\epsilon_r = 11.6$,介质柱周围区域为空气,其 ϵ_r 值近似为 1。为改善其传输特性^[26],在光子晶体中波导拐角和线形谐振腔拐角的半个晶格常数处分别放置了半径为 r 的介质柱,且使波导与谐振腔耦合区域,及谐振腔之间的耦合区域介质柱半径为 $r_c = 0.8r$ 。将该结构的每个正方格子原胞分成 20×20 等分,使其数值计算满足 Courant 稳定性条件^[27],并在其结构周围使用了完全匹配层 (perfectly matched layer, PML)^[28] 作为吸收边界,以便将透射的电磁波吸收掉。

2.2 带有谐振腔的 L 型光子晶体波导

利用一个环形结构谐振腔和 2 支波导,设计了图 3 所示 L 型波导结构。图 4a 和图 4b 给出了 L 型波导 P₂ 端口归一化功率传输谱和 P₁ 端口归一化功率反射谱,即波导中归一化传输功率和归一化反射功率随波长的变化关系。如图 4a 所示,在 1523nm 波长处传输率为 0.3%,波导工作于截止传输状态。该波长左侧有一 S 波段 (1460nm ~ 1523nm) 上的通带,其传输率最大值与对应传输波长分别为 66.7%,1502nm;该波长右侧有一传输通带 1525nm ~ 1568nm,在整个 C 波段 (1525nm ~ 1568nm) 上其反射率最大值为 3.4%、传输率最小值为 86.1%。图 5a 和图 5b 给出了 L 型光子晶体波导传输状态和截止传输状态的电场强分布图,其输出波长 1550nm 与截止传输波长 1523nm 在图中已标出。图 5 所示波导结构工作于传输状态,该波通过环形腔弯折 90° 后输出;图 5b 所示其结构工作于截止传输状态,由图 4a 和图 4b 可知:输入的波经环形谐振腔后绝大部分沿输入波导返回。

2.3 带有谐振腔的 U 型光子晶体波导

在两环形结构谐振腔上下端水平方向放置了两支波导,并在其右侧放置了一个线形结构谐振腔,组成了图 6 所示的 U 型波导结构。图 7a 和图 7b 给出了 U 型光子晶体波导的功率传输谱及其反射谱。由图可得输出端口在 1522nm 波长处传输率为 1.4%,该波导工作于截止传输状态。该波长左侧有一 S 波段上的通

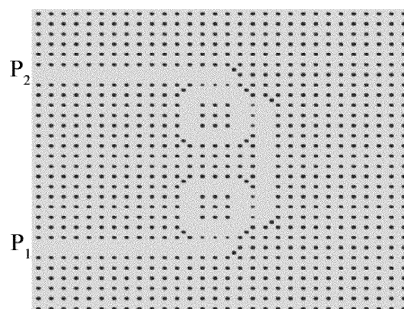


Fig. 6 Structure block of U-shaped bent photonic crystal waveguide

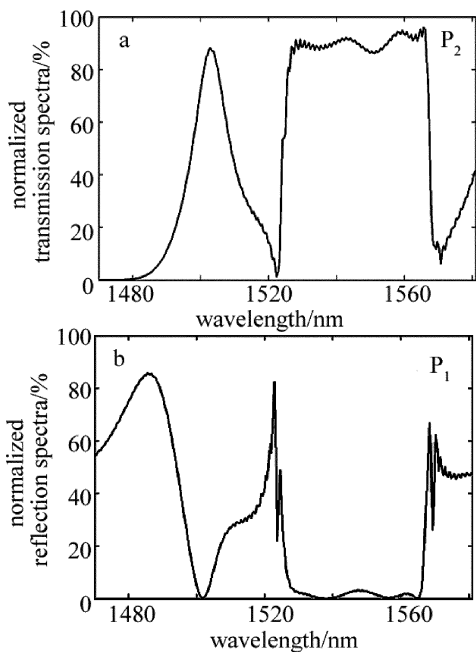


Fig. 7 Normalized spectra of U-shaped bent photonic crystal waveguide
a—transmission spectra at the port P_2 b—reflection spectra at the port P_1

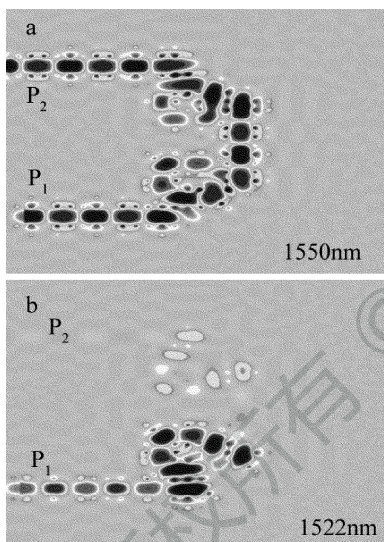


Fig. 8 Structure block and characteristic graph of U-shaped bent photonic crystal waveguide
a—electric field pattern of propagation b—electric field pattern of cutoff propagation

带,其传输率最大值与对应传输波长分别为 88.2%, 1503nm;该波长的右侧通带也处于 1525nm ~ 1568nm,在整个 C 波段上,其反射率最大值为 3.2%,传输率最小值为 86.2%。图 8a 所示 U 型波导工作于 1550nm 波长的传输状态,两次通过环形腔,弯折 180°后输出。图 8b 所示在 1522nm 波长,波导工作于截止传输状态。

2.4 带有谐振腔的 S 型光子晶体波导

在两环形结构谐振腔上下端水平方向放置了两支波导,并在其中间放置了一个线形结构谐振腔,组成了图 9 所示的 S 型波导结构。图 10a 和图 10b 给出了 S 型光子晶体波导的功率传输谱及其反射谱。由图可

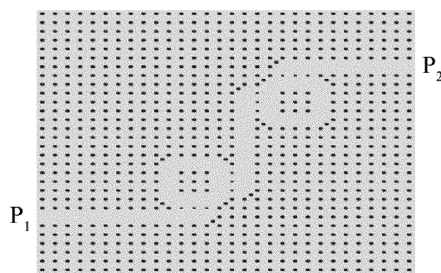


Fig. 9 Structure block of S-shaped bent photonic crystal waveguide

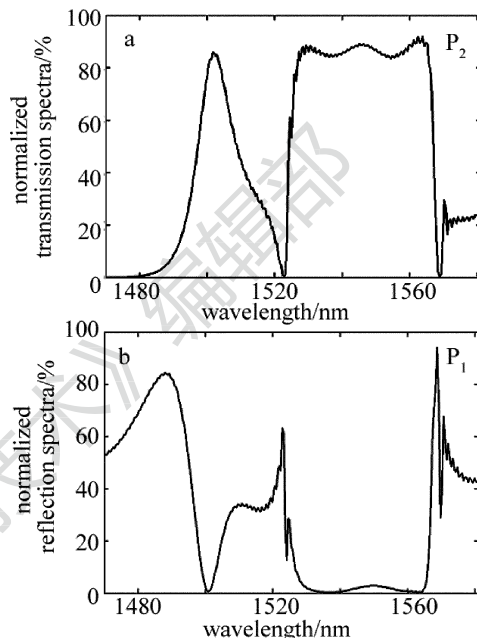


Fig. 10 Normalized spectra of S-shaped bent photonic crystal waveguide
a—transmission spectra at the port P_2 b—reflection spectra at the port P_1

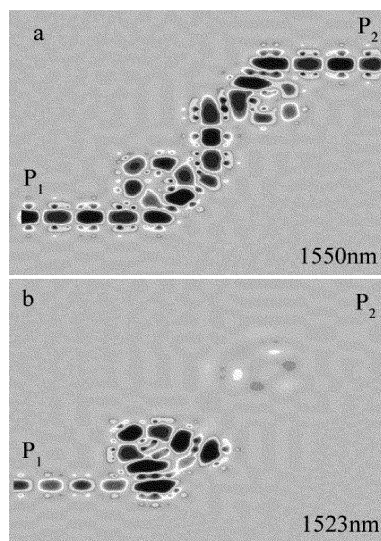


Fig. 11 Structure block and characteristic graph of S-shaped bent photonic crystal waveguide
a—electric field pattern of propagation b—electric field pattern of cutoff propagation

知,输出端口在 1523nm 波长处传输率为 1.4%,该波导工作于截止传输状态。该波长左侧有一 S 波段上的通带,其传输率最大值与对应传输波长分别为

85.9%, 1503nm; 该波长的右侧通带也处于 1525nm ~ 1568nm, 在整个 C 波段上, 其反射率最大值为 2.9%, 传输率最小值为 83.6%。图 11a 所示 S 型波导工作于 1550nm 波长的传输状态, 先后两次通过环形谐振腔, 逆时针方向和顺时针方向各弯折 90° 后输出。图 11b 所示波导工作于 1523nm 波长, 处于截止传输状态。

当 L 型、U 型、S 型波导结构的整体介质柱相对介电常数值为 11.6, 通过计算给出了 TM 波在波导输出端口 P₂ 处功率传输谱和输入端口 P₁ 处功率反射谱及其电场强度分布图。通过对比 L 型、U 型、S 型 3 种波导的输出谱曲线和反射谱曲线, 不难发现在 1460nm ~ 1523nm 波段 (属 S 波段), 3 种波导均具有一定的带通滤波特性。其中, L 型波导曲线变化更缓, 具有较大的通带, 而 U 型和 S 型因发生了两次 90° 弯折, 因此传输谱曲线变化更陡峭, 具有更好的选频特性, 通带较窄。在 1522nm ~ 1523nm 波长附近, 3 种波导结构均具有优良的窄带带阻滤波特性, 使波导处于截止传输状态。其中, L 型带阻滤波通带较窄, 传输率为 0.3%, U 型和 S 型带阻通带较宽, 传输率均为 1.4%。在第三通信窗口 1525nm ~ 1568nm 波段 (属 C 波段), 3 种波导的传输谱特性相似, 具有优良的带通滤波特性, 波导工作与传输状态, 所在的通带具有带边沿陡峭、幅度平稳、通带波长宽裕、传输率高、大角度弯折传输等特性。其中, L 型和 U 型波导传输率最小值分别为 86.1% 和 86.2%, 而 S 型波导略低, 为 83.6%。它们工作时产生的电场强度分布图, 在其背景上都有轻微的波纹, 这是一小部分电磁波泄露产生的结果, 最后被设置在周围 PML 层吸收掉。因此, 可根据上述 3 种波导传输特性的不同, 在对通带及滤波效果不同的需求中选择使用。

3 整体介质柱介电常数改变对波导传输特性的影响

图 12 依次给出了 L 型、U 型、S 型波导整体介质柱不同相对介电常数 ϵ_r 值时端口 P₂ 输出功率传输谱的变化特征 (其不同相对介电常数值已用不同线型标出)。图 12a 给出了 L 型波导整体介质柱 ϵ_r 值分别为 11.0, 11.3, 11.6, 11.9, 12.2 时, 输出端口对应的传输通带波长为 1512nm ~ 1555nm, 1518nm ~ 1561nm, 1525nm ~ 1568nm, 1531nm ~ 1574nm, 1537nm ~ 1580nm, 且变化过程中 1550nm 波长的传输率位于 86.9% 到 91.8% 之间; 对图 12b 和图 12c 可进行同样的分析。结果表明: 这 3 种波导在设置的介电常数取值范围中, 对 1550nm 波长始终保持高传输率, 及其通带边沿陡峭、幅度平稳的工作特性, 且波导的通带波长

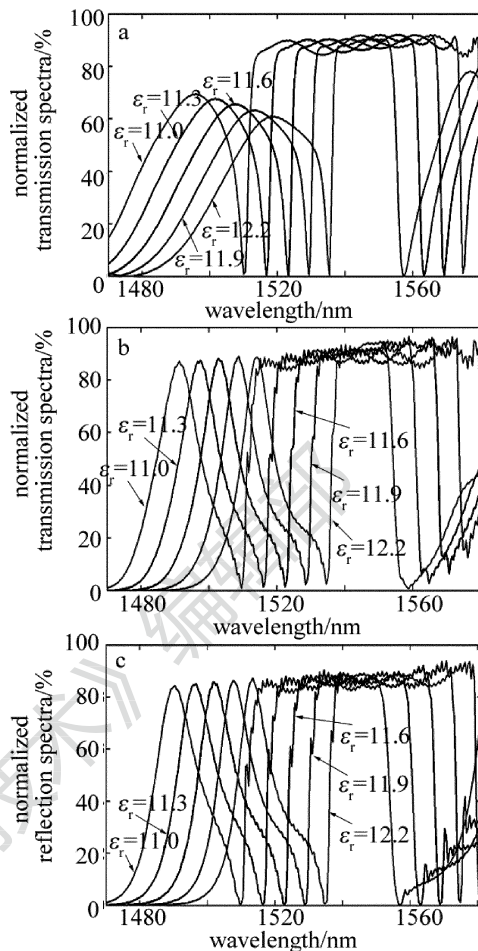


Fig. 12 Normalized transmission spectra at the output port P₂
a—L-shaped b—U-shaped c—S-shaped

移动和截止传输波长移动随 ϵ_r 值每增加 0.3 向长波方向移动 6nm 左右, 近似成正比例关系。在 1510nm ~ 1536nm 波长上, 两紧邻传输率峰值之间具有优良的窄带带阻滤波特性, 使波导截止传输其对应波长。制作波导材料的介电常数受到外界环境的影响 (如温度、电磁场等) 会产生变化, 可利用外界环境变化产生的影响 (热光效应、电光效应等) 去调制结构中 ϵ_r 的值, 使端口 P₂ 截止输出波长发生移动。因此, 其波导结构可作为微型带阻传感器、或光学开关来使用, 以检测周围的环境状况。

4 结论

根据耦合模理论在 2 维正方形格子介质柱光子晶体中, 通过调节谐振腔结构、波导与谐振腔耦合区域、谐振腔间耦合区域、介电常数设值等方式优化设计了 L 型、U 型、S 型波导的工作特性。利用时域有限差分法研究了其结构整体介质柱相对介电常数 ϵ_r 在 11.0 ~ 12.2 时波导结构对 TM 波的传输特性。结果表明: 在结构整体介质柱 $\epsilon_r = 11.6$ 时, 在 1460nm ~ 1523nm 波段, 3 种波导均具有一定的带通滤波特性。其中, L 型

波导具有较大的通带,而 U 型和 S 型波导具有更好的选频特性,通带较窄。在 1522nm ~ 1523nm 波长附近,3 种波导结构均具有优良的窄带带阻滤波特性。其中,L 型带阻滤波通带较窄,传输率为 0.3%,U 型和 S 型带阻通带较宽,传输率均为 1.4%。在 1525nm ~ 1568nm 波段,3 种波导的传输谱特性相似,具有良好的带通滤波特性。其中,L 型和 U 型波导传输率最小值分别为 86.1% 和 86.2%,而 S 型波导略低,为 83.6%。因此,可根据 3 种波导的传输特性,设计成不同需求的滤波器。此外,这 3 种波导在设置的 ϵ_r 取值范围中对 1550nm 波长始终保持高传输率、及其通频带左右边沿陡峭的工作特性,且波导的截止传输波长和通带传输波长随 ϵ_r 值每增加 0.3 向长波方向移动 6nm 左右,其变化近似成正比例关系。其结构在微型光传感器制作、微型光通信器件制作、集成光路的设计等方面具有潜在价值。

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] SAJEEV J. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Physical Review Letters, 1987, 58 (23): 2486-2489.

[3] HEMANT S D, AMIT K G, VARUN S, et al. Coupling light in photonic crystal waveguides: A review [J]. Photonics and Nanostructures Fundamentals and Applications, 2016, 20(1): 41-58.

[4] BABA T. Slow light in photonic crystals [J]. Nature Photonics, 2008, 2(8): 465-473.

[5] ZHOU J, TIAN H P, YANG D Q, et al. Ultra-broadband and ultra-low-loss photonic crystal with band-flatness waveguide 60 bend obtained based on lattice-shifted optimization [J]. Optics Communications, 2014, 322(1): 227-233.

[6] YUAN J H, YANG J, SHI D, et al. Design optimization of a low-loss and wide-band sharp 120° waveguide bend in 2-D photonic crystals [J]. Optics Communications, 2016, 367(1): 356-363.

[7] DANAIE M, ATTARI A R, MIRSALEHI M M, et al. Design of a high efficiency wide-band 60° bend for TE polarization [J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2008, 6(3): 188-193.

[8] ROSA L, SAITOH K, KAKIHARA K, et al. Genetic-algorithm assisted design of C-band CROW-miniaturized PCW interleaver [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(14): 2678-2687.

[9] LU M F, YANG Y L, HUANG Y T. Numerical study of transmission improvement in a photonic crystal waveguide bend by mode-matching technique [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(24): 2114-2116.

[10] BETTINI P, BOSCOLO S, SPECOGNA R B, et al. Design optimization of waveguide bends in photonic crystals [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(3): 1630-1633.

[11] TEE D C, YU G, SHEE N Z, et al. Structure tuned, high transmission 180° waveguide bend in 2-D planar photonic crystal [J]. IEEE

Photonics Technology Letters, 2013, 25(15): 1443-1446.

[12] LIU Y F, LIU B, CHEN J, et al. Study on filtering characteristics based on tooth-shaped photonic crystal waveguide [J]. Laser Technique, 2016, 40(2): 237-240 (in Chinese).

[13] ESPINOLA R, AHMAD R, PIZZUTO F, et al. A study of high-index-contrast 90° waveguide bend structures [J]. Optics Express, 2001, 8(9): 517-528.

[14] PEI H Ch, LI B, DANNER A J, et al. Design and modeling of 2-D photonic crystals based hexagonal triple-nano-ring resonators as biosensors [J]. Microsystem Technologies, 2013, 19(1): 53-60.

[15] POPESCU D, STERIAN P. FDTD analysis of photonic crystals with square and hexagonal symmetry [J]. Journal of Advanced Research in Physics, 2011, 2(2): 1-5.

[16] CHANG K, LIU Ch Y. Electro-optical channel drop switching in a photonic crystal waveguide-cavity side-coupling system [J]. Optics Communications, 2014, 316(7): 10-16.

[17] HUANG H, OUYANG Zh B. General method for eliminating wave reflection in 2-D photonic crystal waveguides by introducing extra scatterers based on interference cancellation of waves [J]. Optics Communications, 2016, 370(9): 55-59.

[18] PILEHVAR E, KAATYZIAN H, DANAIE M. Design of a high-transmission waveguide bend for Kagome photonic crystal lattice [J]. Optik—International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(19): 1914-1917.

[19] ZHU Zh M, BROWN T G. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers [J]. Optics Express, 2002, 10(17): 853-864.

[20] LÜ Sh Y, ZHAO H. Design and research of wavelength division demultiplexer based on slow light waveguides [J]. Laser Technology, 2015, 39(5): 617-620 (in Chinese).

[21] HALL K, LENZ G, DARWISH M A, et al. Subpicosecond gain and index nonlinearities in InGaAsP diode lasers [J]. Optics Communications, 1994, 111(5): 589-612.

[22] GHAFFARI A, DJAVID M, MONIFI F, et al. Photonic crystal power splitter and wavelength multi/demultiplexer based on directional coupling [J]. Journal of Optics, 2008, A10(7): 75203-75209.

[23] GHAFFARI A, MONIFI F, DIAVID M, et al. Photonic crystal bends and power splitters based on ring resonators [J]. Optics Communications, 2008, 281(23): 5929-5934.

[24] GHAFFARI A, MONIFI F, DIAVID M, et al. Analysis of photonic crystal power splitters with different configurations [J]. Journal of Applied Sciences, 2008, 8(8): 1416-1425.

[25] DINESH K V, TALABUTTULA S, SELVARAJAN A. Investigation of ring resonators in photonic crystal circuits [J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2004, 2(3): 199-206.

[26] GHAFARI A, DJAVID M, MONIFI F, et al. A numeric analysis of photonic crystal tunable add-drop filters based on ring resonators [C]// IEEE LEOS Annual Meeting. New York, USA: IEEE, 2007: 351-352.

[27] GOLDBERG M. Stability criteria for finite difference approximations to parabolic systems [J]. Applied Numerical Mathematics, 2000, 33(1/4): 509-515.

[28] BERENGER J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. Journal of Computational Physics, 1994, 114(2): 185-200.