

光子晶体波导与微谐振器耦合特性的研究

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 在利用耦合模理论(CMT)研究了谐振器与波导之间耦合工作特性的基础上,在二维正方格子光子晶体中设计了两种对称的带有 5×5 微谐振器的弯折波导。采用时域有限差分法(FDTD)研究了波导的传输特性,结果表明:通过改变微谐振器中心缺陷柱半径大小,波导与微谐振器之间引入了不同的耦合谐振模式,得到了9个通带;这两种波导结构都具有窄带通的特性,其带通频率随微谐振器缺陷柱半径增加向低频移动;微谐振器相同时,侧向耦合波导输出端口通带中心频率强度衰减较直接耦合波导的小,实现了波导与谐振腔之间更强的耦合作用。这两种微型波导均可作为信号处理接口,用于窄带滤波及网络互连器件设计,在光通信、集成光路、光谱传感等领域具有潜在应用价值。

关键词 光学器件;信号处理接口;窄带滤波;耦合模理论;时域有限差分法;光子晶体波导;微谐振器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0923003

Study on the Coupling Characteristics between Photonic Crystal Waveguide and Micro Resonator

Wu Liheng Wang Minghong

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

Abstract Coupling characteristics between photonic crystal waveguide and micro resonator have been studied by using coupled-mode theory, and then two types of symmetrical waveguides based on 5×5 micro resonator are designed in the two dimensional square-lattice photonic crystal. The transmission characteristics of the waveguides are studied by the time domain finite difference method. The results show that different resonant coupling modes between waveguide and micro resonator are introduced by changing radius of the defect rod at the center of the resonator. Finally, nine pass bands are achieved. Both of the waveguides have the characteristics of narrow pass bands which shift towards lower frequency as radius of the defect rod increases. For the same resonator, the side coupling waveguide has lower output signal strength decay at central frequency than the directional coupling waveguide, and the side coupling waveguide has achieved more strength resonant coupling between waveguide and micro resonator. As signal processing interfaces, the two micro waveguides can be used to design narrow pass band filters, network interconnection devices, and they have applicable value in the fields of optical communications, integrated optical circuits, spectral sensors, etc.

Key words optical devices; signal processing interfaces; narrow pass-band; coupled-mode theory; time domain finite difference method; photonic crystal waveguide; micro resonator

OCIS codes 230.5298; 230.7370; 230.4910; 130.5296

1 引 言

光子晶体主要有两种不同相对介电常数的材料周期分布形成,在其结构中能获得到TM波或TE波的光

收稿日期: 2015-03-23; 收到修改稿日期: 2015-05-07

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,主要从事微波理论与技术等方面的研究。

E-mail: wuliheng@lctu@163.com

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

子带隙(PBG)结构^[1-4]。无论光的极化还是传输方向如何,光子晶体不允许某一频段的光在其结构中传播,这一频率范围被叫做完全PBG^[1]。在理想介质柱阵列光子晶体中通过调节介质柱的有效相对介电常数、或半径大小、或直接取出其中的介质柱引入缺陷,PBG中将产生一个或多个传输模式^[5-6],用于引导或提取光路信号,涵盖了当今光学功能器件制造的重要部分,如光子晶体光纤低损耦合、光开关、滤光片、波导等^[7-10]。本文在理想光子晶体中调节单个介质柱半径或将其取出,形成光子晶体微谐振器结构,使其与波导耦合。根据耦合模理论(CMT)^[11-14]编程计算,定性分析了波导与谐振器耦合工作特性,并用时域有限差分法(FDTD)^[15]编程定量计算了麦克斯韦电磁波传输方程在波导与谐振器耦合结构中的传输特性。

2 耦合模理论在设计波导中的应用

输入波导和输出波导分别与同一个谐振器耦合连接,在其输入端口处设置了波导源 S_{+1} ,根据 CMT 理论详细分析了谐振器与波导之间理论上的耦合特性。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,在理想耦合传输状况下没有损耗,设在谐振腔内场的振动的频率是 ω_0 ,其振幅 $a(t)$ 是时间 t 的函数。用 S_{+1} 、 S_{+2} 描述波导两端口处输入电磁波能量, S_{-1} 、 S_{-2} 描述波导两端口处输出电磁波能量。根据 CMT 理论,当 $S_{+2} = 0$ 时,得:

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

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

$$S_{-2} = \sqrt{\frac{2}{\tau_2}} a(t), \quad (3)$$

其中 $1/\tau_1$ 、 $1/\tau_2$ 为耦合到输入波导、输出波导模式振幅的衰减率, $1/\tau_0$ 为腔损耗衰减率。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: $K_1 = \sqrt{2/\tau_1}$ 。腔与波导耦合作用能量泄露用外部耦合因子 $Q_{e1} = \omega_0 \tau_1 / 2$, $Q_{e2} = \omega_0 \tau_2 / 2$ 描述;谐振腔向周围传输功率因泄露造成的能量固有损耗用谐振腔品质因数 $Q_0 = \omega_0 \tau_0 / 2$ 描述。由 CMT 理论得谐振腔与波导耦合作用中输入端口处正规化反射率为

$$R = \left| \frac{S_{-1}}{S_{+1}} \right|^2 = \left| \frac{\frac{Q_{e2}}{Q_{e1}} - \frac{Q_{e2}}{Q_0} - 1}{\frac{Q_{e2}}{Q_{e1}} + \frac{Q_{e2}}{Q_0} + 1} \right|^2, \quad (4)$$

输出端口处正规化传输率为

$$T = \left| \frac{S_{-2}}{S_{+1}} \right|^2 = \left| \frac{2 \sqrt{\frac{Q_{e2}}{Q_{e1}}}}{\frac{Q_{e2}}{Q_{e1}} + \frac{Q_{e2}}{Q_0} + 1} \right|^2, \quad (5)$$

谐振腔辐射正规化损耗率为

$$L = 1 - T - R. \quad (6)$$

为便于研究波导与谐振器耦合工作特性,根据 CMT 理论给出了 T 、 R 、 L 随波导工作参数 Q_0/Q_{e2} 、 Q_0/Q_{e1} 变化的三维曲面及二维曲线图。

图 1 依次给出了 T 、 R 、 L 在波导工作参数变化范围 $0 \leq Q_0/Q_{e2} \leq 15$ 、 $0 \leq Q_0/Q_{e1} \leq 30$ 中的三维曲面关系图,其右侧彩色条的颜色表示 T 、 R 、 L 的强度,能直观地从整体上反映出工作参数对波导与谐振器的耦合工作特性影响。

图 2 所示右侧用带有颜色的短线标注了波导不同工作参数值,用对应的相同颜色给出了波导此时的工作特性曲线。

图 2(a) 给出 Q_0/Q_{e2} 取不同值时波导传输率 T 随 Q_{e2}/Q_{e1} 变化的特性曲线。当 Q_0/Q_{e2} 分别为 0.1、1.0、

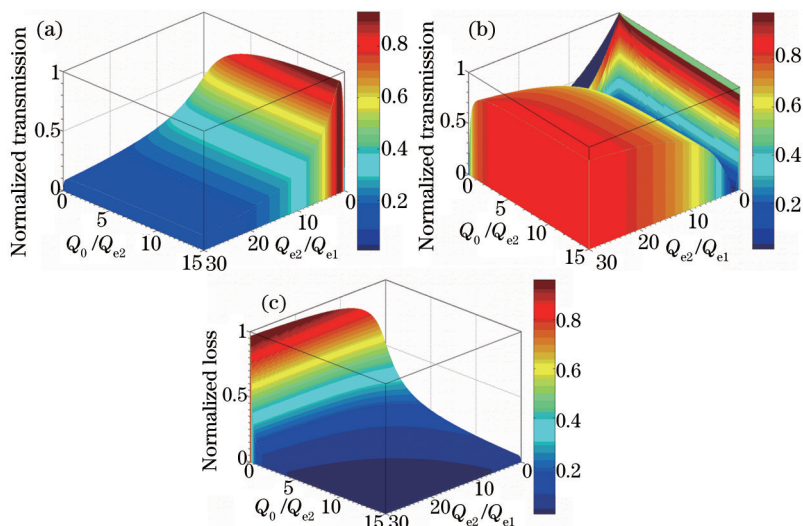


图 1 (a) 正规化传输率; (b) 正规化反射率; (c) 正规化损耗率

Fig.1 (a) Normalized transmission; (b) normalized reflection; (c) normalized losses

15、1000时,由图得最大传输率处坐标值依次为(15.00, 0.091)、(2.00, 0.500)、(1.065, 0.9375)、(1.000, 0.999)。因此设计的波导结构随 Q_0/Q_{e2} 值增大, Q_{02} 与 Q_{e1} 趋于相等, 且 T 趋于 100%, 这种定性描述提供了设计高传输率波导的一种方案, 要求波导设计对称, 且具有很高的 Q_0/Q_{e2} 值, 以满足工作参数 $Q_{e2}/Q_{e1}=1$ 。图 2(b) 给出不同 Q_{e2}/Q_{e1} 值时波导传输率 T 随 Q_0/Q_{e2} 变化的特性曲线。由图可知 Q_{e2}/Q_{e1} 值不同时, T 随 Q_0/Q_{e2} 值增大而增大, 最终趋于稳定值(其中 $Q_{e2}/Q_{e1}=1$ 时, T 随 Q_0/Q_{e2} 增大最终趋于稳定值 1), 这为高传输率类型的波导设计提供了明确的描述。波导传输率特性曲线对不同工作参数状况中的波导传输率大小, 及其调节提供了设计描述。

图 2(c) 给出 Q_{e2}/Q_{e1} 取不同比值时微腔辐射损耗率 L 随 Q_0/Q_{e2} 变化的特性曲线。由图可知当参数 Q_{e2}/Q_{e1} 取值分别为 0.1、1.0、40 时, 谐振腔辐射损耗率 L 峰值坐标依次为 (0.909, 0.0909)、(0.500, 0.500)、(0.0244, 0.9756)。

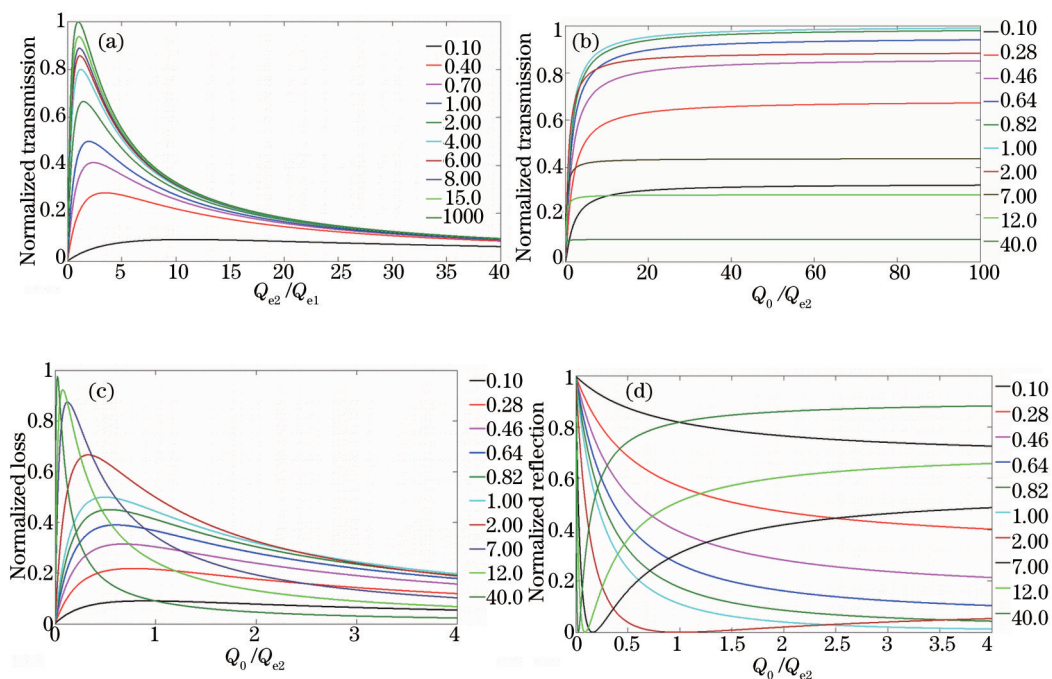


图 2 (a) 不同 Q_0/Q_{e2} 值对正规化传输率的影响; (b) 不同 Q_{e2}/Q_{e1} 值对正规化传输率的影响; (c) 不同 Q_{e2}/Q_{e1} 值对正规化损耗率的影响; (d) 不同 Q_{e2}/Q_{e1} 值对正规化反射率的影响

Fig.2 (a) Normalized transmission for different ratios of Q_0/Q_{e2} ; (b) normalized transmission for different ratios of Q_{e2}/Q_{e1} ; (c) normalized loss for different ratios of Q_{e2}/Q_{e1} ; (d) normalized reflection for different ratios of Q_{e2}/Q_{e1}

因此设计波导时若为减小谐振腔辐射损耗率 L ,波导结构参数 Q_0/Q_{e2} 取值应在离峰值较远的两侧;若需要增加谐振腔辐射损耗率 L ,结构参数 Q_{e2}/Q_{e1} 增大的同时,适当减小 Q_0/Q_{e2} 取值,使辐射损耗率恰好处于峰值处。谐振腔损耗率特性曲线对不同工作参数状况中的谐振腔辐射损耗大小,及其调节提供了设计描述。

图 2(d)给出 Q_{e2}/Q_{e1} 取不同值时波导反射率 R 随 Q_0/Q_{e2} 变化的特性曲线。计算表明 $Q_{e2}/Q_{e1}=1$, $Q_0/Q_{e2}=4$, 反射率 R 为 1.23%, 随 Q_0/Q_{e2} 增大趋于零; $Q_{e2}/Q_{e1} \neq 1$ 时反射率随 Q_0/Q_{e2} 增大趋于稳定值; Q_{e2}/Q_{e1} 远小于 1 时, 随 Q_0/Q_{e2} 增大, 输入波导反射率趋于 1; 当 Q_{e2}/Q_{e1} 远大于 1 时, 且满足 Q_0/Q_{e2} 趋于 0 或很大时, 输入波导反射率趋于 1。反射率特性曲线对不同工作参数状况的波导反射率大小, 及其调节提供了设计描述。由上述可知 CMT 理论对设计波导结构的传输特性、反射特性、腔辐射损耗特性提供了一种理论上的定性描述。在一无介质损耗、对称的波导与谐振器耦合传输系统中, 理想状况下具有 100% 的传输率, 而现实中为设计高效率传输波导结构, 其工作参数应满足 $Q_{e2}/Q_{e1}=1$, 并通过制作非常大的 Q_0/Q_{e2} , 来实现波导模式与谐振腔模式间的强耦合作用, 使其谐振腔辐射效应被减弱, 反射率趋于零, 进而提高了传输率。这种定性描述可用于指导高传输率类型的波导结构设计。

3 带有微谐振器的光子晶体波导

利用 CMT 理论定性描述指导波导设计, 其结构及其参数应具有对称性, 以保证输入波导和输出波导的外部耦合因子相等, 优化设计结构提高谐振腔品质因数与外部耦合因子比值, 以实现导模式与谐振腔模式之间的强耦合作用, 进而达到高效率提取与传输电磁波信号的目的。为此, 设计了图 3 所示两种波导, 其结构都在晶格常数为 $a=494 \text{ nm}$ 、尺寸大小为 $20 a \times 20 a$ 的理想正方格介质柱光子晶体中, 与波导想耦合的 5×5 微谐振器在图中已用黑色方框标出。图 3(a)所示微谐振器中心正好位于水平方向波导和竖直方向波导交叉处, 组成波导与谐振器的直接耦合结构; 图 3(b)所示, 微谐振器放置在水平方向波导和竖直方向波导交叉的拐角内侧, 并在拐角附近半个晶格常数处放置了散射介质柱(图中以用黑色的椭圆圈标出), 以改善波导与谐振器耦合传输性能, 组成波导与谐振器的侧向耦合结构。除了谐振器中心引入的介质柱半径不同之外, 结构中都使用相同介质柱, 柱半径 r 为 98.8 nm , 有效介电常数 ϵ_r 为 12。柱周围蓝色区域为空气, 其 ϵ_r 值近似为 1。把该结构的每个正方格子原胞分成 40×40 等分, 使其数值计算满足 Courant 稳定性条件^[16], 并在其结构周围使用了完全匹配层(PML)^[17]作为吸收边界, 利用 FDTD 方法研究了波导对 TM 波传输特性。

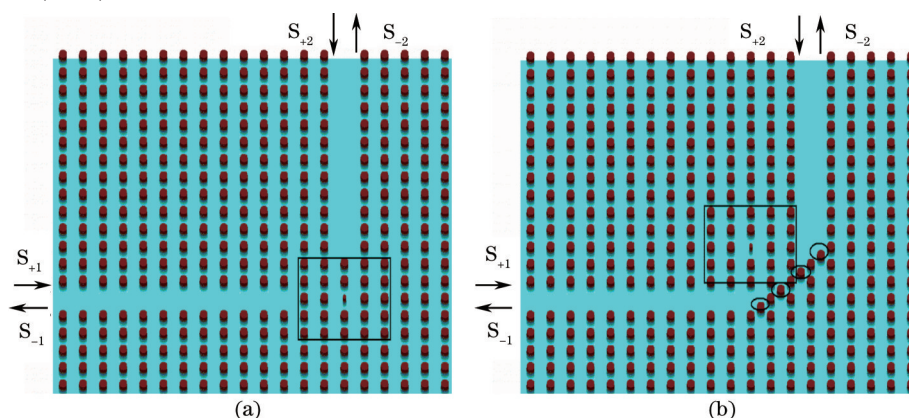


图 3 带有 5×5 微谐振器结构弯折波导。(a) 直接耦合; (b) 侧向耦合

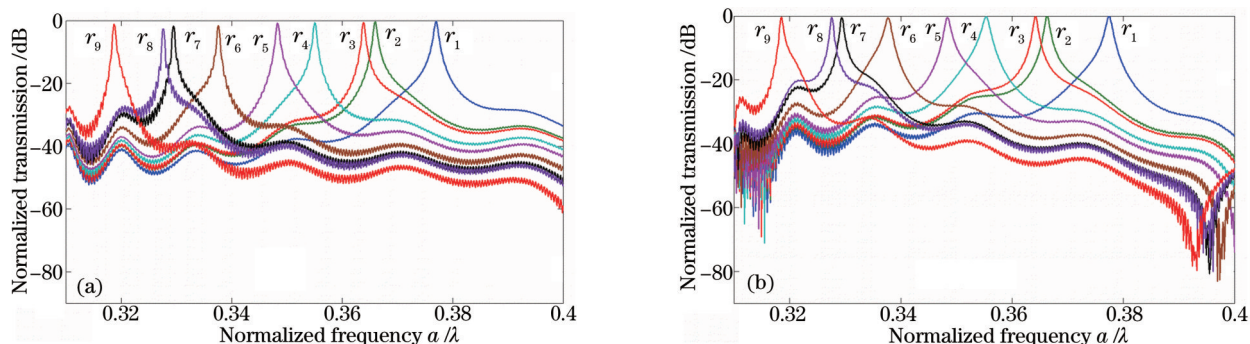
Fig.3 Bent waveguides based on 5×5 micro resonator. (a) Direct coupling; (b) lateral coupling

图 4 给出了微谐振器中心缺陷柱半径取不同值时波导(a)和波导(b)的耦合传输特性曲线。图中横坐标为晶格常数 a 与波长 λ 比值定义的正规化频率 a/λ , 其范围在 $0.31 \sim 0.40$; 纵坐标表示波导传输信号从输入端口到输出端口强度衰减范围在 $0 \text{ dB} \sim 90 \text{ dB}$ 。在图中已用相同颜色标出了曲线与对应的缺陷柱半径 $r_1 \sim r_9$, 按从小到大的标号顺序, 缺陷柱半径依次为 $0 r$ (表示直接将介质柱取出)、 $0.250 r$ 、 $0.275 r$ 、 $0.325 r$ 、 $0.375 r$ 、 $0.425 r$ 、 $0.475 r$ 、 $0.500 r$ 、 $0.525 r$ 。由传输特性图可知: 这 2 种弯折波导结构通带中心频率随微谐振器中心缺陷柱半径值增加向低频移动, 且每个通带中心频率向高频或低频移动时输出信号强度迅速衰减, 具有优良的频率选择特

性,可作为性能优良窄带通传输元件。波导微腔品质因数^[18]为

$$\omega = \frac{2\pi c}{a} \times \frac{a}{\lambda}, Q_0 = \frac{\omega}{\Delta\omega}, \quad (7)$$

其中 c 为光速, ω 为角频率, $\Delta\omega$ 为输出信号 3 dB 宽度。经计算得到波导(a)和(b)微腔品质因数取值范围 $273.4 \leq Q_0 \leq 659.0$ 。为便于对这 2 种弯折波导传输特性进行分析,在表 1 中列出了微谐振器中心缺陷柱半径 r_c 取值为 $r_1 \sim r_9$ 时所对应的波导通带中心归一化频率 a/λ 、中心频率衰减强度、通频带 3 dB 处的宽度 $\Delta a/\lambda$ 、通带中心波长 λ , 及微腔品质因数 Q_0 。从表 1 所列数据可知:这两种波导结构适于提取与传输单模光纤(O)波段 1260~1360 nm、(E)波段 1360~1460 nm、(S)波段 1460~1530 nm、(C)波段 1530~1565 nm 中电磁波信号。波导(a)输出端口通频带 3 dB 处的宽度范围在 0.0005~0.0008,其 9 个通带中心频率信号传输强度衰减为 -2.6683 dB~ -0.2609 dB;波导(b)输出端口通频带 3 dB 处的宽度范围在 0.0006~0.0013,其 9 个通带中心频率信号传输强度衰减为 -0.5461 dB~ -0.0443 dB;微谐振器相同,在两种耦合结构中,其侧向耦合谱带半宽度较大、微腔品质因数较低、且通带中心频率信号强度衰减较小,其波导模式与谐振腔模式间具有更强耦合作用,因而在高传输率波导设



计方面侧向耦合是更具有优势的一种设计结构。

图 4 带有不同缺陷介质柱半径微谐振器弯折波导(a)、(b)传输特性

Fig.4 Propagation characteristics of bent waveguides (a), (b) based on micro resonator with different defect rod radii

表 1 微型谐振器中心缺陷柱半径取不同值时光子晶体波导(a)和(b)工作特性

Table 1 Operating characteristics of photonic crystal waveguides (a) and (b) for different defect rod radii r_c at the center of the micro resonator

r_c	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	r_9
(a)	a/λ	0.3188	0.3277	0.3295	0.3376	0.3483	0.3551	0.3638	0.3770
	dB	-1.2124	-2.6683	-1.8055	-1.5836	-0.8179	-0.6672	-0.6676	-0.3538
	$\Delta a/\lambda$	0.0005	0.0005	0.0005	0.0006	0.0007	0.0006	0.0006	0.0008
	λ/nm	1549.6	1507.5	1499.3	1463.3	1418.3	1391.2	1357.9	1310.3
	Q_0	637.6	655.4	659.0	652.7	497.6	591.8	606.3	471.3
(b)	a/λ	0.3186	0.3276	0.3294	0.3377	0.3484	0.3554	0.3642	0.3775
	dB	-0.3453	-0.4753	-0.4664	-0.5461	-0.4314	-0.1962	-0.2195	-0.0809
	$\Delta a/\lambda$	0.0006	0.0006	0.0007	0.0011	0.0010	0.0013	0.0008	0.0011
	λ/nm	1550.6	1507.9	1499.7	1462.8	1417.9	1390.0	1356.4	1308.6
	Q_0	531.0	546.0	470.6	307.0	348.4	273.4	455.3	343.2

波导(a)和(b)的微谐振器中心缺陷柱半径都为 $0.525 r$ 时,由表 1 可知两波导都可用于传输归一化频率 $a/\lambda = 0.3187$, 由于晶格常数 $a = 494 \text{ nm}$, 此时两波导输出端传输波长为 1550 nm , 正处于第三通信窗口中心波长,其传输场强分布如图 5 所示。

4 结 论

根据 CMT 理论研究了谐振器与波导之间理论上的耦合特性,给出了传输率 T 、反射率 R 、谐振器腔辐射损耗率 L 随工作参数 Q_0/Q_{c2} 、 Q_{c2}/Q_{c1} 变化的三维曲面图与二维曲线图,表明在对称的波导系统中通过制作非常大的 Q_0/Q_c , 能实现波导模式与谐振腔模式之间的强耦合作用,用以减少谐振腔辐射损耗率、降低输入耦

合和侧向耦合波导结构。通过FDTD方法研究了这2种波导的传输特性,结果表明:改变微谐振器中心缺陷端口处反射率、提高输出端口处传输率。进而在正方形二维光子晶体中设计了带有 5×5 微谐振器的直接

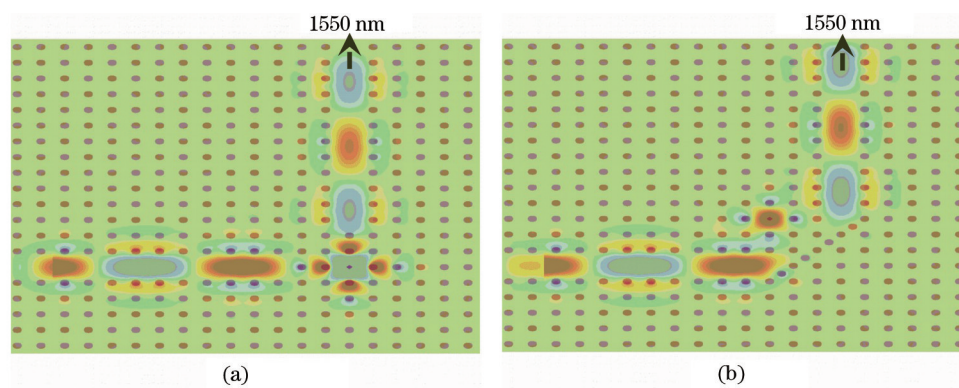


图5 带有微谐振器波导(a)、(b)在第三通信窗口中心波长 1550 nm 处的传输场强分布图
Fig.5 Electric field patterns of waveguides (a)、(b) based on micro resonator at central wavelength
1550 nm of the third communication window

陷柱半径大小,使其微腔中产生不同的谐振模式,在波导与微谐振器耦合作用下形成了9个通频带;这2种波导都具有高品质因数谐振腔、优良的窄带通传输、且随微谐振器中心缺陷柱半径增加通带中心频率移向低频的特性,适于提取与传输单模光纤(O)波段、(E)波段、(S)波段、(C)波段内的电磁波。直接耦合波导端口输出9个通带的中心频率信号传输强度衰减为 -2.6683 dB \sim -0.2609 dB,而侧向耦合波导其输出强度衰减为 -0.5461 dB \sim -0.0443 dB,表明波导与谐振器的侧向耦合,及其结构优化提高了谐振腔品质因数与外部耦合因子比值,在高传输率波导设计方面侧向耦合是更具有优势的一种设计结构。这两种微型的波导都可作为信号处理接口,用于窄带滤波及网络互连器件设计,在光通信、集成光路、光谱传感等领域具有潜在应用价值。

参 考 文 献

- 1 B K Min, J E Kim, H Y Park. Channel drop filters using resonant tunneling processes in two dimensional triangular lattice photonic crystal slabs[J]. Opt Commun, 2004, 237(1-3): 59-63.
- 2 M Moghimi, S Mirzakuchaki, N Granpayeh, et al.. Modification of photonic crystals for obtaining common band gaps for TE and TM waves[J]. Canadian J Phys, 2012, 90(2): 175-180.
- 3 Md Masruf Khan. Nano structure based power splitter design by using 2D photonic crystals[J]. Journal of Modern Science and Technology, 2013, 1(1): 176-187.
- 4 Mehdi Saffari, Mohammad Ali Mansouri-Birjandi, Mohammad Reza Rakhshani. Tuning of photonic crystal ring resonators for application in analog to digital converter systems[J]. Intl Res J Appl Basic Sci, 2013, 4(12): 4242-4247.
- 5 Mohammad Ali Mansouri-Birjandi, Mohammad Reza Rakhshani. Wavelength demultiplexer using heterostructure ring resonators in triangular photonic crystals[J]. Telkomnika: Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2013, 11(4): 1721-1724.
- 6 Po-Yi Lee, Chih-Hsien Huang, Wen-Feng Hsieh. Design of photonic directional couplers as phase selectors[J]. J Opt Soc Am B 2013, 30(6): 1631-1636.
- 7 Zhang Lu. Low loss lens coupling technology of photonic crystal fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0106006.
张 璐. 光子晶体光纤的低损耗透镜耦合技术[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0106006.
- 8 Li Lei, Liu Guiqiang, Chen Yuanhao. Heterostructure photonic crystal coupling waveguide optical switch[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0123002.
黎 磊, 刘桂强, 陈元浩. 光子晶体异质结构耦合波导光开关[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0123002.
- 9 He Zhiyu, Jiao Hongfei, Cheng Xinbin, et al.. Design of reflective multichannel filter based on characteristics of photonic band gap [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0231002.
贺芝宇, 焦宏飞, 程鑫彬, 等. 基于光子晶体带隙特性的反射式多通道滤光片设计[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0231002.
- 10 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.

- 11 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.
- 12 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: Pure and Applied Optics*, 2008, 10(7): 75203–75209.
- 13 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.
- 14 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.
- 15 Zhu Z, Brown T G. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers[J]. *Opt Express*, 2002, 10(17): 853–864.
- 16 Goldberg M. Stability criteria for finite difference approximations to parabolic systems[J]. *Applied Numerical Mathematics*, 2000, 33(1–4): 509–515.
- 17 J P Berenger. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. *Comput Phys*, 1994, 114(2): 185–200.
- 18 Cheng S C, Wang J Z, Chen L W, *et al.*. Multichannel wavelength division multiplexing system based on silicon rods of periodic lattice constant of hetero photonic crystal units[J]. *Optik-Int J Light Electron Opt*, 2012, 123: 1928–1933.

栏目编辑: 韩 峰