

并联谐振腔光子晶体单通道侧面耦合波导

崔乃迪^{1,2} 梁静秋¹ 梁中翥¹ 王维彪^{1*}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 分析了多光子晶体谐振腔的并联耦合模理论,并根据该理论设计了单通道光子晶体侧面耦合波导以实现光子晶体器件与光源间的高效耦合。理论研究表明并联谐振腔的耦合效率与谐振腔数量、间距以及品质因子相关。经优化耦合面积和耦合效率,最终选择了 5 个谐振腔并联作为单通道侧面耦合波导的耦合部分。通过设置谐振腔间距改变其对称性,从而实现侧面耦合波导的单通道传播。在 1.55 μm 工作波长下,单通道侧面耦合波导的耦合效率可达 94.49%。

关键词 光学器件;耦合模理论;光子晶体;侧面耦合波导

中图分类号 O472; O436; O734

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201232.0223001

Photonic Crystal Single Channel Side-Coupled Waveguide with Parallel Resonators

Cui Naidi^{1,2} Liang Jingqiu¹ Liang Zhongzhu¹ Wang Weibiao¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The coupled mode theory of parallel photonic crystal resonators is analyzed, based on which, a side-coupled waveguide to achieve the efficient coupling between photonic crystal devices and the light source is proposed. The theory analysis indicates that the coupling efficiency is sensitive to the total number, the interval and the quality factors of the resonators. By the optimization of the coupling efficiency and the coupling region, five parallel resonators are selected to construct the coupling part of the single channel side-coupled waveguide. Single channel propagation of the side coupled waveguide is realized through changing the interval of the resonators. The single channel side-coupled waveguide achieves the coupling efficiency of 94.49% at the wavelength of 1.55 μm .

Key words optical devices; coupled mode theory; photonic crystal; side-coupled waveguide

OCIS codes 230.5298; 160.5293; 160.5298

1 引 言

光子晶体又被称为光半导体,具有控制光在其中传播的特性。研究认为光子晶体对全光网络及全光功能器件的实现有积极作用^[1~6]。光子晶体已被广泛应用于实现高集成光电器件,如光子晶体波导^[7~9]、全光开关^[10,11]和耦合器^[12~14]等。

实现光子晶体器件与光源间的高效耦合对于未来全光网络的实现有着重要的意义^[15~19]。然而,由于光子晶体器件尺寸较小,在光子晶体器件与传统光学器件或光源的耦合过程中,耦合面积和耦合效率均难以增加和提升。近年来,几何光学方法^[18,19]及倏逝波耦合^[20,21]等方法被纷纷提出。几何光学

收稿日期: 2011-08-08; **收到修改稿日期:** 2011-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(60877031)资助课题。

作者简介: 崔乃迪(1983—),男,博士研究生,主要从事光子晶体微器件设计及制备等方面的研究。

E-mail: cuinaidi@163.com

导师简介: 梁静秋(1962—),女,博士,研究员,博士生导师,主要从事微光机电系统与光通信等方面的研究。

E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

* **通信联系人.** E-mail: wangwbt@126.com

方法是通过使用聚焦透镜以及透镜光纤等外置几何光学器件,将光聚焦到光子晶体器件入射端面以实现耦合的方法。然而,将光聚焦到光子晶体器件尺度上是非常困难的。另外,几何光学耦合方法从根本上讲并没有增加系统的耦合面积,而且过多外置器件的引入会使系统结构复杂化,不利于与其他器件的集成。同时,外置光学器件所引起的反射损耗、散射损耗以及插值损耗都会降低系统的耦合效率。倏逝波耦合方法利用倏逝波产生及耦合的原理将光从器件的顶端耦合到器件中,从而大大增加了耦合面积。倏逝波方法也面临着一些问题,例如特定渐变光纤的加工、耦合过程中渐变光纤与光子晶体器件的距离参数的控制、对精密的外置校准和调节系统的依赖性以及外置的校准调节系统对集成度的影响等,这些问题都限制了倏逝波耦合方法的应用。因此,迫切需要一种效率高、集成度高、操作简单的方法来实现光子晶体器件与光源间的高效耦合。

本文提出了多谐振腔并联耦合模理论,并基于该理论提出了一种能实现光子晶体波导和外置光源间高效耦合的光子晶体单通道侧面耦合波导。光子晶体单通道侧面耦合波导结构上主要由耦合部分和波导部分组成,其中耦合部分基于多个并联的高品质光子晶体谐振腔。与几何光学耦合以及倏逝波耦

合方法相比,光子晶体侧面耦合波导引入多个并联谐振腔,并在谐振腔侧面对电磁波进行耦合,从而增加耦合面积。另外光子晶体侧面耦合波导耦合部分和波导部分集成在同一基片上,不需要外置的光学元件,从而使得波导结构更紧凑、体积更小并具有更高的集成度。若将其波导部分与其他光子晶体器件连接在一起,光子晶体侧面耦合波导可以作为器件的输入端,从而实现将电磁波从外界光源或其他光学器件到光子晶体器件的耦合,体现了光子晶体侧面耦合波导良好的兼容性和扩展性。

2 并联谐振腔耦合模理论

图1为含有 $l+1$ 个并联谐振腔的侧面耦合波导的结构示意图。其中前 l 个谐振腔间距为 d ,第 l 个和第 $l+1$ 个谐振腔间距为 d' 。在传统耦合方式中,耦合宽度仅为波导的宽度 W ,对于工作波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 的光子晶体器件,其典型宽度仅为几百纳米。而侧面耦合波导中耦合宽度 W_s 由并联谐振腔的个数决定。所以通过引入多个并联谐振腔制作的侧面耦合器件,其耦合面积($S_s = W_s \times h$,其中 h 为光子晶体波导的厚度)要远大于传统耦合方式的耦合面积($S = W \times h$)。

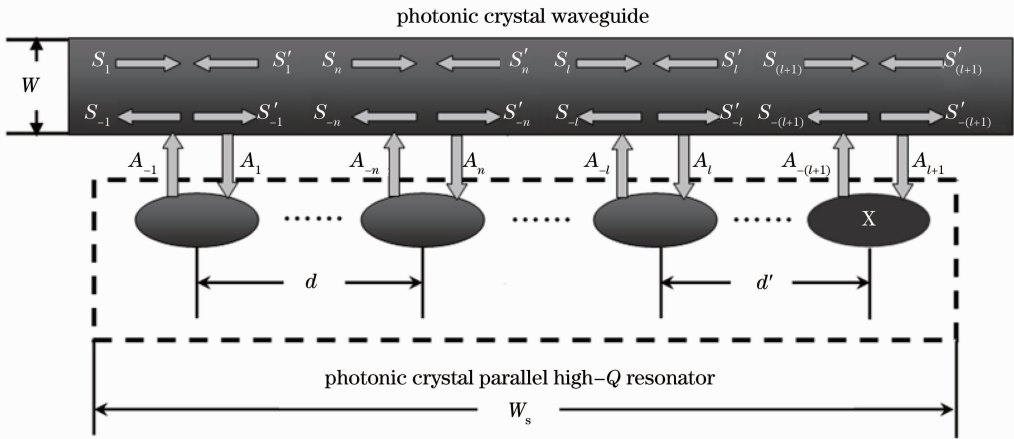


图1 并联谐振腔的结构示意图

Fig.1 Schematic of the parallel resonators

这里令入射波的振幅为 a ,谐振腔的谐振频率及代表谐振腔本征损耗的品质因子分别由 ω_0 和 Q_0 表示。图中第 n 个谐振腔($1 \leq n \leq l$)的入射及出射波振幅分别由 $S_n, S'_n, S'_n, S_n, A_n$ 和 A_n 表示。

根据波导耦合腔理论有^[22~25]

$$\frac{da}{dt} = \left(j\omega_0 - \frac{\omega_0}{Q_0} - \frac{\omega_0}{2Q_b} - \frac{\omega_0}{2Q_d} \right) a + \exp(j\theta_b) \sqrt{\frac{\omega_0}{2Q_b}} S'_n + \exp(j\theta_b) \sqrt{\frac{\omega_0}{2Q_b}} S_n + \exp(j\theta_d) \sqrt{\frac{\omega_0}{2Q_d}} A_n, \quad (1)$$

其中 Q_b 和 Q_d 是与耦合进和泄漏出谐振腔电磁波能量有关的品质因子, θ_b 和 θ_d 分别为谐振腔与主波导和入射波的耦合系数的相位差。根据能量守恒定律及光的可逆性,各谐振腔入射及出射波的强度表达式为

$$S'_{-n} = \frac{1}{2}A_n + S_n - \exp(-j\theta_b) \sqrt{\frac{\omega_0}{2Q_b}} a, \quad (2)$$

$$S_{-n} = \frac{1}{2}A_n + S'_{-n} - \exp(-j\theta_b) \sqrt{\frac{\omega_0}{2Q_b}} a, \quad (3)$$

$$S_{(n+1)} = S'_{-n} r, \quad S'_n = S_{-(n+1)} r, \quad (4)$$

式中 $r = \exp(-j\beta d)$, $r' = \exp(-j\beta d')$, β 是主波导中的传播常数。设计目标为端口 1 通光的单通道侧

面耦合波导,故定义其耦合效率为

$$\eta = \frac{|S_{-1}^2|}{\left|\sum_1^l A_n\right|^2}. \quad (5)$$

在本耦合系统中,电磁波从波导侧面入射,故有 $S_1 = 0$, $S'_{l+1} = 0$, 对于给定波长,振幅 a 有 $\exp(j\omega t)$ 因子。解(2) ~ (4) 式, S_n 和 S'_n 可写为

$$S_n = \frac{1}{2}(A_1 r^{n-1} + A_2 r^{n-2} + \cdots + A_{n-1} r) - \exp(-j\theta_b) \sqrt{\frac{\omega_0}{2Q_b}} (r + r^2 + \cdots + r^{n-1}) a, \quad (6)$$

$$S'_n = \frac{1}{2}(A_{n+1} r + A_{n+2} r^2 + \cdots + A_l r^{l-n}) - \exp(-j\theta_b) \sqrt{\frac{\omega_0}{2Q_b}} (r + r^2 + \cdots + r^{l-n}) a. \quad (7)$$

当 $n = 1$ 和 $n = l$ 时, 解(4), (6), (7) 式可以得到 S_{-1} 和 S'_{-l} :

$$S_{-1} = S'_{-l} = \frac{1}{2}(A_1 r^{l-1} + A_2 r^{l-2} + \cdots + A_l) - \exp(-j\theta_b) \sqrt{\frac{\omega_0}{2Q_b}} (r + r^2 + \cdots + r^{l-1} + 1) a. \quad (8)$$

把(6)式和(7)式代入(1)式中,可写为

$$Ha + \frac{\omega_0}{2Q_b} Ia = \frac{1}{2}(A_1 r^{n-1} + \cdots + A_{n-1} r + A_{n+1} r + \cdots + A_l r^{l-n}) \tau_b + \tau_d A_n, \quad (9)$$

式中 $H = j\omega - j\omega_0 + \frac{\omega_0}{Q_0} + \frac{\omega_0}{2Q_b} + \frac{\omega_0}{2Q_d}$, $I = r + r^2 + \cdots + r^{n-1} + r + r^2 + \cdots + r^{l-n}$.

由(4)式可知,波导传播系数 r 为在 $-1 \sim 1$ 之间取值的实数,要想让波导具有更小的传输损耗,则 r 应取 -1 或 1 , 此时波导传输效率最高,侧面耦合波导才可能具有更高的耦合效率。图 2 所示为侧面耦合波导的耦合效率在谐振频率下随 βd 的变化曲线。可见耦合效率在 $\beta d = 2m\pi$ ($m = 0, 1, 2, \cdots$) 时,即 $r = 1$ 时侧面耦合波导有最大耦合效率。

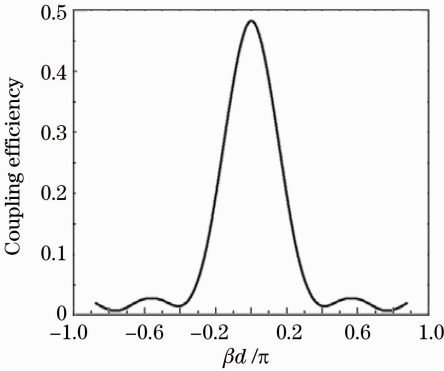


图 2 在谐振频率下耦合效率随 βd 变化曲线
Fig. 2 Curve of coupling efficiency versus βd at the resonance frequency

由于耦合波导为左右对称结构,故电磁波以相同的能量从左右两端口出射,根据(5)式计算,耦合效率只有 50% 左右。为了实现侧面耦合波导的单通道出射,引入谐振腔 X, 即图 1 中的第 $l+1$ 个谐振

腔。这里令 $r' = -1$, 此时波导传输对称性发生变化,电磁波反向传输,即谐振腔 X 充当放射镜,可将传输到端口 2 的电磁波反射回端口 1。当 $\beta d = 2m\pi$, $\beta d' = (2m+1)\pi$ ($m = 0, 1, 2, \cdots$), 且入射波为高斯波时,(8)式可以写为

$$S_{-1} = \sum_{-\frac{l+2}{2}}^{\frac{l+2}{2}} A_n - 2(l+1) \exp(-j\theta_b) \sqrt{\frac{\omega_0}{2Q_b}} a. \quad (10)$$

解(9)式可得

$$A_n = \exp[-(x)^2] \times$$

$$\frac{2H + l \frac{\omega_0}{Q_b}}{l \exp(j\theta_b) \sqrt{\frac{\omega_0}{2Q_b}} + 2 \exp(j\theta_d) \sqrt{\frac{\omega_0}{2Q_d}}} a, \quad (11)$$

式中 $\exp[-(x)^2]$ 为高斯因子。将(10)式及(11)式代入(5)式,耦合效率的最终表达式为

$$\eta = \left[\frac{S_{-1}}{\sum_{-(l+2)/2}^{(l+2)/2} A(x)} \right]^2 = \left\{ 1 - \frac{l+1}{\sum_{-(l+2)/2}^{(l+2)/2} \exp[-(x)^2]} \times \frac{lQ_0Q_d + 2Q_0\sqrt{Q_bQ_d}}{2Q_bQ_d + Q_0Q_b + (l+1)Q_0Q_d} \right\}^2. \quad (12)$$

如(12)式所示,并联谐振腔的总数量; Q_0 、 Q_b 以及 Q_d 会对侧面耦合波导的耦合效率产生影响。定义 $k = Q_b/Q_d$ 。图 3(a) 为耦合效率随 Q_0 以及 k 值的变化曲线。可见,随着 Q_0 的增加,单通道侧面耦合波导

的耦合效率呈下降趋势,而这种下降趋势随 k 值的增加而变缓。当 $k = 10^4$ 时,耦合效率随 Q_0 增加而下降 7%。而同样的情况下若 $k = 10$,耦合效率则会下降 89%。图 3(b) 为耦合效率随谐振腔数量及 k 值的变化曲线。耦合效率会随并联谐振腔数量的增加而降低。与图 3(a) 相似,这种降低的趋势会随着 k 值

的增加而变缓。当谐振腔数量增加到 30 个时,若 $k = 10$,耦合效率会从 97% 下降到 77%; 而若 $k = 10^4$,则耦合效率仅会从 99.5% 下降到 98.9%。由图 3 及其讨论可知,为了获得高耦合效率,必须平衡好谐振腔数量、 Q_0 以及 k 值三者之间的关系。

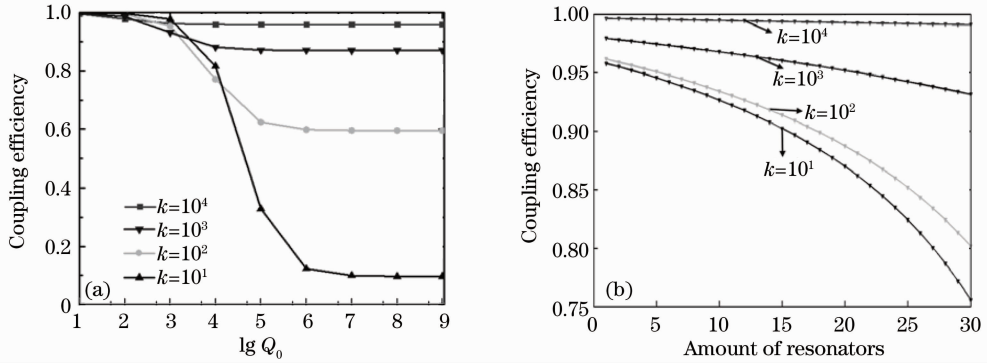


图 3 k 的不同取值下谐振腔的耦合效率随(a) Q_0 和(b)谐振腔数量的变化曲线

Fig. 3 Curves of (a) the coupling efficiency versus Q_0 and (b) the coupling efficiency versus the amount of resonators with different k

对于在足够大光子晶体材料上合理设计的谐振腔,其本征损耗 Q_0 仅来自于谐振腔内外表面的反射损失以及材料的吸收^[26~28];谐振腔的数量一方面会影响单通道侧面耦合波导的耦合效率,另一方面也决定着器件的耦合面积。适当大小的耦合面积能够降低耦合前的预聚焦以及对准操作的难度。选择 5 个谐振腔并联作为单通道侧面耦合波导的耦合部分,这是因为当谐振腔数量为 5 且 $k = 10^4$ 时,耦合效率从 1 个谐振腔到 5 个谐振腔仅下降 0.5% 左右,如图 3(b) 所示,也就是说谐振腔增加到 5 个所造成的效率下降可以通过提高 k 值做出一定的补偿。另外此时器件的耦合长度在 15 μm 左右,可为光源预聚焦以及对准等操作提供便利; k 值由 Q_b 和 Q_d 决定,而 Q_b 和 Q_d 又由谐振腔耦合进入波导及泄

漏出谐振腔电磁波的能量表征,可以通过对器件结构参数的优化来调节 Q_b 和 Q_d 。

3 光子晶体单通道侧面耦合波导

以正方晶格硅柱阵列光子晶体结构为基础,设计了单通道侧面耦合波导结构。光子晶体晶格周期 $p = 510 \text{ nm}$,填充率 $f = 0.4$ ($f = D/p$, 其中 D 为硅柱直径)。利用平面波展开法,计算得其具有归一化频率 0.24~0.42 的 TM 禁带。根据归一化频率定义 [$F = \omega a / (2\pi c) = a/\lambda$], 可计算得该禁带对应电磁波波长范围为 1214~2125 nm。

如图 4 所示,单通道侧面耦合波导由耦合部分和波导部分构成,其中耦合部分基于 5 个并联光子晶体谐振腔。构成谐振腔的点缺陷半径 $r_p = 0.1p$,利用平

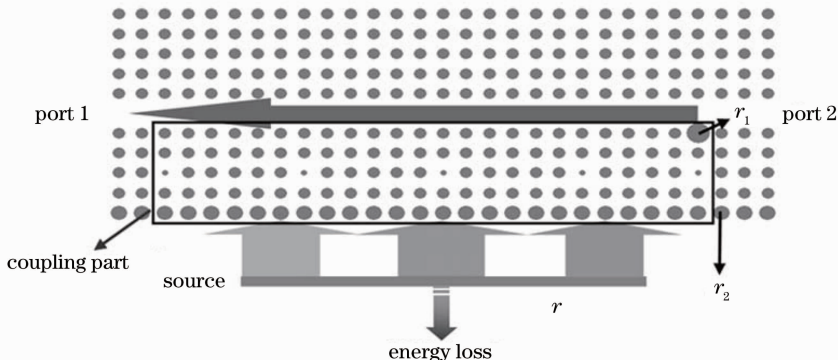


图 4 单通道侧面耦合波导的结构

Fig. 4 Structure of the single channel side-coupled waveguide

面波展开法计算得其具有归一化频率为 0.329 的缺陷态,对应响应波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 。根据对于并联谐振腔理论的讨论,为满足 $\beta d = 2m\pi, \beta d' = (2m+1)\pi (m = 0, 1, 2, \dots)$,设定谐振腔 1~4 间的距离皆为 $d = 6p$,谐振腔 4 和谐振腔 5 间的距离为 $d' = 5p$ 以达到单通道传输的目的。为了达到更高的传输效率,对单通道侧面耦合波导的结构参数进行了优化。

Q_b 和 Q_d 是与耦合进和泄漏出谐振腔能量有关的品质因子,要想获得高的耦合效率就必须谋求更大的 Q_b 以及更小的 Q_d 。单通道侧面耦合波导输出能量的大小与 Q_b 相关。而位于谐振腔与波导间硅柱

的结构参数(即图 4 所示的 r_1) 对 Q_b 和 Q_d 有极大的影响。图 5(a) 为单通道侧面耦合波导 Q_b 和 Q_d 随 r_1 的变化曲线,当 $r_1 = 0.26 \mu\text{m}$ 时, Q_b 有最高值, $Q_b = 1.47 \times 10^4$,而此时代表能量损耗的 Q_d 为 5000,意味着系统存在着较高的能量损失。为了得到更好的耦合效率,可以对 r_2 进行优化以得到更大的 k 值。图 5(b) 为 Q_b 和 Q_d 随 r_2 的变化曲线。可见当 $r_1 = 0.26 \mu\text{m}, r_2 = 0.16 \mu\text{m}$ 时, $Q_b = 1.91 \times 10^4$,而 Q_d 接近 0,满足第 2 节中讨论的侧面耦合波导高效耦合条件。

图 6(a) 为当 $r_1 = 0.26 \mu\text{m}, r_2 = 0.16 \mu\text{m}$ 时,两

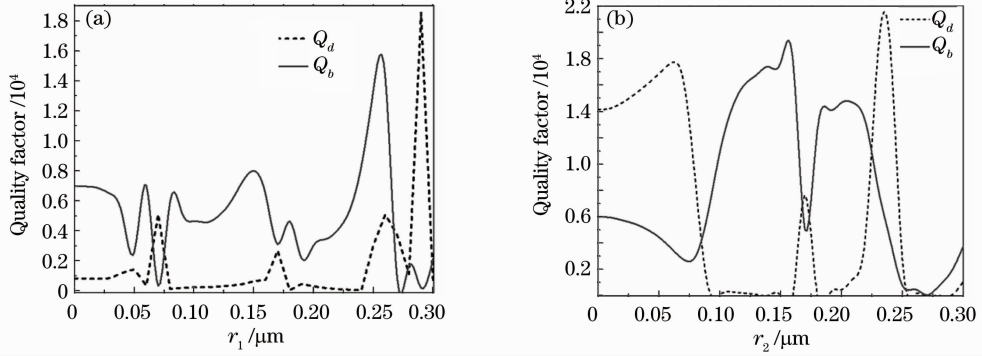


图 5 对单通道侧面耦合波导优化后 Q_b 和 Q_d 随 (a) r_1 和 (b) r_2 的变化曲线

Fig. 5 Curves of Q_b and Q_d versus (a) r_1 and (b) r_2 with the optimization of the structure parameters for the single channel side-coupled waveguide

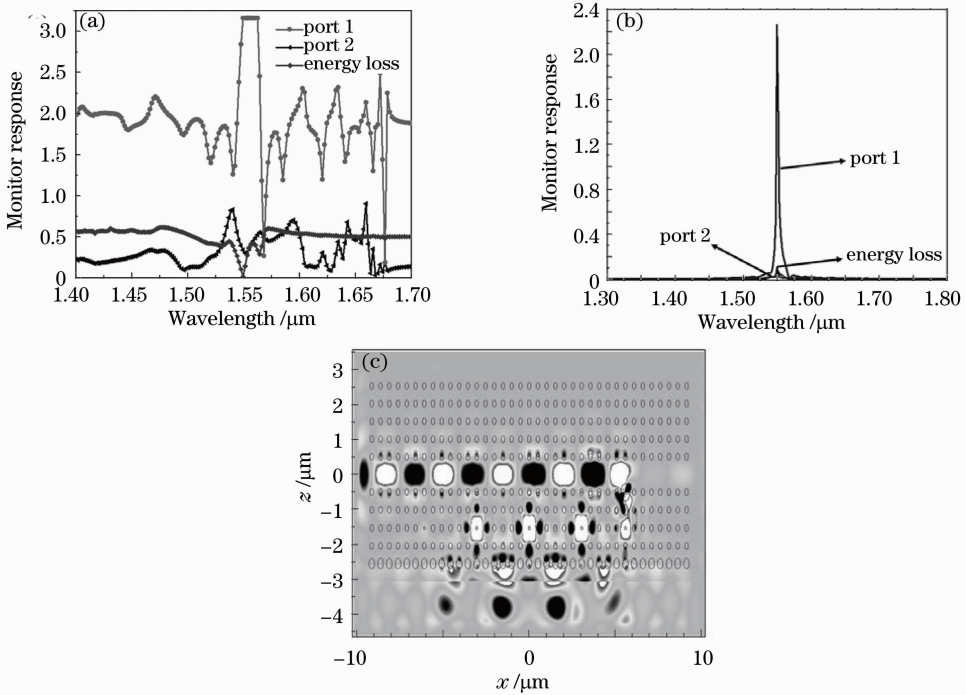


图 6 单通道侧面耦合波导的 (a) 出射谱, (b) 耦合效率和 (c) 场分布图

Fig. 6 (a) Transmission spectrum, (b) coupling efficiency and (c) field pattern of the single channel side-coupled waveguide

个端口以及反射损失的传输谱线,可见在目标波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处,能量损失接近零值,同时端口 2 出射光强也相对较小,而端口 1 在 $1.55 \mu\text{m}$ 附近接近 20 nm 的一个较宽的频段上具有极高的出射值。图 6(b)为各探测器响应随波长变化曲线,可见在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处,端口 1 探测器响应为 2.23,端口 2 探测器响应为 0.02,能量损失 0.11。定义耦合效率为端口 1 出射能量值除以总能量,而总能量为两端口出射能量及能量损失之和,计算可得单通道侧面耦合波导的耦合效率为 94.49%。图 6(c)给出了单通道侧面耦合波导的场分布图,由于谐振腔 X 的反射作用, TM 波从左侧通道出射,而右侧通道出射极小。单通道侧面耦合波导可以实现光子晶体器件与传统光学器件及光源的高效耦合,同时由于电磁波入射方向与波导呈 90° 夹角,单通道侧面耦合波导还可以用作一种高效的 90° 转弯波导。

4 结 论

分析了多光子晶体高品质谐振腔的并联耦合模理论,并根据该理论设计了光子晶体侧面耦合波导以实现光子晶体器件与光源的高效耦合。选择了 5 个谐振腔并联,此时器件的耦合长度约为 $15 \mu\text{m}$,可以在保证耦合效率的同时为光源预聚焦及对准操作提供便利。其中 1~4 号谐振腔间距为 $6p$,第 5 个谐振腔与第 4 个谐振腔间距为 $5p$ 。第 5 个谐振腔在单通道侧面耦合波导中起反射作用,以实现器件的单通道传播。为了得到更高的耦合效率,优化了器件结构参数,当 $r_1=0.26 \mu\text{m}$, $r_2=0.16 \mu\text{m}$ 时,单通道侧面耦合波导可实现 94.49% 的耦合。与其他耦合方法相比,单通道侧面耦合波导耦合效率高、器件体积小、结构简单并且集成度高。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 T. Tada, V. V. Poborchii, T. Kanayama. Channel waveguides fabricated in 2D photonic crystals of Si nanopillars [J]. *Microelectron. Eng.*, 2002, **63**(1-3): 259~265
- 4 Gao Yongfeng, Zhou Ming, Zhou Jun *et al.*. Design of power splitter by directional coupling between photonic crystal waveguides[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505003
高永锋,周明,周骏等.光子晶体波导定向耦合功分器的设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0505003
- 5 Li Zhiquan, Kang Lili, Su Fengyan *et al.*. Design on photonic crystal gain flatness filters[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3):

- 710~712
李志全,康莉莉,苏凤燕等.光子晶体增益平坦滤波器的设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 710~712
- 6 Su Jian, Chen Heming. Terahertz wave modulator based on liquid-crystal-filled photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2710~2713
苏坚,陈鹤鸣.基于液晶光子晶体的太赫兹波调制器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2710~2713
- 7 E. H. Khoo, T. H. Chen, A. Q. Liu. Transmitting light efficiently on photonic crystal surface waveguide bend[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **86**(17): 171109
- 8 X. Zhang, H. Tian, Y. Ji. Group index and dispersion properties of photonic crystal waveguides with circular and square air-holes[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(9): 1768~1772
- 9 Zhang Man, Pan Wei, Yan Lianshan *et al.*. Research of slow light in the two-dimensional triangular rods photonic crystal line defected waveguide [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 857~861
张曼,潘炜,闫连山等.二维三角晶格介质柱光子晶体线缺陷波导慢光研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 857~861
- 10 T. Tanabe, M. Notomi, S. Mitsugi *et al.*. Fast bistable all-optical switch and memory on a silicon photonic crystal on-chip [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(19): 2575~2577
- 11 Tan Chunhua, Huang Xuguang. An all-optical switch based on the tunable bandgap of a two-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2714~2718
谭春华,黄旭光.基于带隙可调的二维光子晶体全光开关[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2714~2718
- 12 C. Liu. Efficient omnidirectional couplers achieved by anisotropic photonic crystal waveguides[J]. *Phys. Lett. A*, 2009, **373**(34): 3061~3066
- 13 K. Hennessy, C. Reese, A. Badolato *et al.*. Square-lattice photonic crystal microcavities for coupling to single InAs quantum dots[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(18): 3650~3652
- 14 A. Faraon, E. Waks, D. Englund *et al.*. Efficient photonic crystal cavity-waveguide couplers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(7): 073102
- 15 W. Yang, X. Chen, X. Shi *et al.*. Design of a high transmission Y-junction in photonic crystal waveguides[J]. *Physica B*, 2010, **405**(7): 1832~1835
- 16 T. Matsumoto, S. Fujita, T. Baba. Wavelength demultiplexer consisting of photonic crystal superprism and superlens[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(26): 10768~10776
- 17 H. Takano, Y. Akahane, T. Asano. In-plane-type channel drop filter in a two dimensional photonic crystal slab [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(13): 2226~2228
- 18 F. Naoyuki, O. Daisuke, B. Toshihiko. Two dimensional photonic crystal waveguides with 60° bends in thin slab structure [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2000, **39**(5A): 2619~2623
- 19 C. Lin, X. Wang, S. Chakravarty *et al.*. Wideband group velocity independent coupling into slow light silicon photonic crystal waveguide [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(18): 183302
- 20 P. E. Barclay, K. Srinivasan, M. Borselli *et al.*. Efficient input and output fiber coupling to a photonic crystal waveguide [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(7): 697~699
- 21 C. Martijn de Sterke, K. B. Dossou, T. P. White *et al.*. Efficient coupling into slow light photonic crystal waveguide without transition region; role of evanescent modes [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(20): 17338~17343
- 22 Y. Xu, Y. Li, R. K. Lee *et al.*. Scattering-theory analysis of waveguide-resonator coupling [J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **62**(5): 7389~7403
- 23 H. Ren, C. Jiang, W. Hu *et al.*. Photonic crystal channel drop filter with a wavelength-selective reflection micro-cavity [J]. *Opt.*

- Express*, 2006, **14**(6): 2446~2458
- 24 Z. Zhang, M. Qiu. Compact in-plane channel drop filter design using a single cavity with two degenerate modes in 2D photonic crystal slabs[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(7): 2596~2604
- 25 C. Manolatou, M. J. Khan, S. Fan *et al.*. Coupling of modes analysis of resonant channel add-drop filters [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(9): 1322~1331
- 26 M. G. Nanaee, Jeff F. Young. Squeezed state generation in photonic crystal microcavities[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(25): 20908~20919
- 27 Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song *et al.*. High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal [J]. *Nature*, 2003, **425**(6961): 944~947
- 28 A. Faraon, E. Waks, D. Englund *et al.*. Efficient photonic crystal cavity-waveguide couplers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(7): 073102

栏目编辑:韩 峰