

文章编号: 1000-7032(2012)11-1241-06

高品质因子和高传输效率的 二维光子晶体耦合腔波导研究

吕冬妮^{1*}, 沈宏君¹, 余建立²

(1. 宁夏大学 物理电气信息学院, 宁夏 银川 750021;
2. 巢湖学院 电子工程与电气自动化学院, 安徽 巢湖 238000)

摘要: 基于时域有限差分方法, 通过仿真计算设计了一种具有较高品质因子和传输效率的二维光子晶体耦合腔波导结构。通过改变二维光子晶体波导微腔结构中隔绝波导与微腔的空气孔的半径和数量, 在获得近似90%的传输效率的同时, 使得品质因子达到了 8.20×10^4 。为了使品质因子在大幅度提高的同时, 传输效率只有小幅度的降低, 在波导微腔结构中引入了链式微腔。将链式微腔结构与传统的波导微腔结构相结合, 使这种新形式的耦合腔结构的品质因子提高了1个数量级, 传输效率仅下降了约40%。

关键词: 二维光子晶体耦合腔波导; 品质因子; 传输特性

中图分类号: O431.1 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20123311.1241

The Study on High Q Factor and High Transmission Efficiency of Two-dimensional Photonic Crystal Coupled Cavity Waveguide

LV Dong-ni^{1*}, SHEN Hong-jun¹, YU Jian-li²

(1. School of Physics and Electrical Information Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;
2. School of Electronic Engineering and Electrical Automation Institute, Chaohu College, Chaohu 238000, China)

* Corresponding Author, E-mail: ldn05409@163.com

Abstract: We present a design of 2D photonic crystal coupled-cavity waveguide with a high transmission efficiency and a quality factor simultaneously. By optimizing the structural parameters such as amount and radius of air holes between microcavities and waveguide, a 90% transmission efficiency is obtained with a Q factor of 8.20×10^4 . In order to increase Q factor without sacrificing too much efficiency, a new kind of coupled-cavity waveguide is formed by introducing microcavity chains. Photons hop in adjacent microcavities. For this new kind of waveguide, Q factor is improved one order higher and transmission efficiency only decrease by 40%. The result has a practical guiding significance for application of photonic crystal in various different fields such as slow light, light trap, optical transmission.

Key words: two dimensional photonic crystal coupled cavity waveguide; Q factor; transport property

收稿日期: 2012-07-06; 修订日期: 2012-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(61167002); 安徽省高校科学研究项目(KJ2012B115); 安徽巢湖学院博士科研启动基金资助项目

作者简介: 吕冬妮(1986-), 女, 吉林长春人, 主要从事光子晶体的研究。

E-mail: ldn05409@163.com

1 引 言

光子晶体具有光子带隙以及光子局域性,可以对在介质中传播的光进行控制,在光学、光电子学和微波领域有广泛的应用^[1-2]。光子带隙可以反映光子晶体器件的许多优良特性,如低损耗辐射、慢光、非线性效应、较高的品质因子、较高的传输效率等。光子带隙的位置和宽窄可以通过调整参数来改变,这对于光子晶体的应用有重大意义^[3-7]。理想的光子晶体中存在绝对光子带隙,具有局限电磁波的能力;但就实际而言,存在缺陷的光子晶体更有应用价值。在完整的光子晶体中引入缺陷,光子带隙中会出现缺陷态,与缺陷态频率相吻合的光子将被局域在缺陷位置,若偏离缺陷位置,光子能量将迅速衰减;而与缺陷态频率不吻合的光子将不能在缺陷中传播,即入射后光子能量迅速衰减^[8]。通过设计光子晶体的缺陷参数可以实现对缺陷态的调控,从而使光子晶体器件满足各种设计需求。

在二维光子晶体中移走或改变一个(或几个)空气孔或介质柱的尺寸、调整距离以及引入杂质缺陷等可以形成光子晶体微腔。光子晶体微腔具有很强的局域性,一般含有一个或几个共振频率,可以将处于共振频率上的光子局限在一个很小的空间内,这使光子晶体微腔具有很高的品质因子(Quality factors, Q)。在理论上, Q 可以高达 10^9 ,而实验上也已经证明 Q 超过了 2×10^6 ^[9]。但是较高的品质因子通常意味着较低的传输率,如何通过调整结构参数等因子,进而调控微腔的品质因子和传输效率是一个非常重要的研究课题。

现今,光子晶体微腔已被广泛的应用到如超小型激光器、强光介质耦合器、滤波器、低阈值半导体激光器、腔量子动力学、光开关、单光子源、生物传感等电磁和光电子领域^[10-11]。本文通过对二维光子晶体耦合腔波导的几何结构参数进行设计,同时获得了相对较高的品质因子和传输效率。

2 二维光子晶体耦合腔波导的能带结构

我们提出如图 1 所示的二维光子晶体耦合腔波导结构的基本模型。该模型是由半径 $r = 0.45a$ 的空气孔,在背景材料 Si(介电常数为 12)上按三

角晶格的形式进行周期排布,然后沿着 x 方向去掉一排空气孔形成波导结构,再在波导内部通过半径为 r_c 的空气孔隔绝波导和微腔,形成耦合腔波导结构。其中 a 为晶格常数,在计算过程中归一化为 $1 \mu\text{m}$,隔绝波导和微腔结构的空气孔个数记为 s 。

由空气孔形成的二维三角晶格光子晶体,其 TE 模的带隙要大于 TM 模带隙。为了获得大带隙材料,在后面的研究中,我们只对二维光子晶体的 TE 模进行研究。利用由 MIT 开发的开源科学计算软件 MPB,采用如图 2(a) 所示的波导超胞结构,对图 1 所示的波导结构的能带进行计算,其结果如图 2(b) 所示。

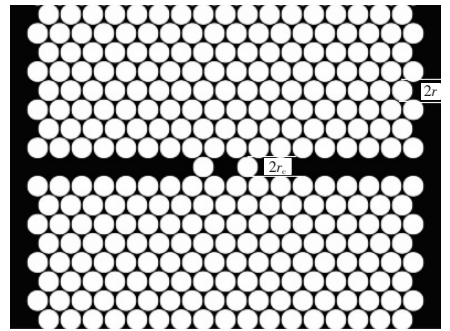


图 1 二维光子晶体耦合腔波导结构模型示意图

Fig. 1 The structure model of 2D photonic crystal coupled with cavity waveguide

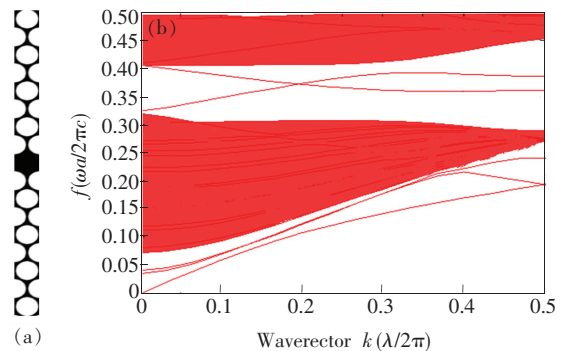


图 2 (a) 波导超胞结构示意图; (b) 波导结构的 TE 模能带结构图。

Fig. 2 (a) The structure of waveguide super cell. (b) Band gaps for TE polarizations for 2D waveguide.

该样品光子带隙的频率范围为 $(0.3203 \sim 0.4055)\omega a/2\pi c$,带隙宽度为 $0.0825\omega a/2\pi c$,中心频率为 $0.3629\omega a/2\pi c$,相对带隙宽度为 23%。在后续工作中,我们主要考察耦合腔波导结构在波导模范围内的品质因子 Q 和传输效率。

3 二维光子晶体耦合腔波导的传输特性

在完整光子晶体中引入线缺陷后, 会形成光子晶体波导结构, 同时在光子带隙中引入一个或几个波导导模。频率落于导模处的光子可以被限制在光子晶体波导内部, 实现低损耗传输。而在完整光子晶体中引入点缺陷后, 会形成光子晶体微腔结构, 其具有较高的品质因子, 并在微腔中存在一个或几个共振模, 对频率位于共振模处的光子将被限制在微腔中。现将微腔置于波导内部, 对于波导导模而言, 频率位于微腔共振模附近的光子, 在经过微腔时将被分离出来, 并驻留在微腔中, 而其它频率的光能继续在波导中传播。这一特性被广泛的应用到了滤波器、传感器、低阈值半导体激光器、光电路等光学器件中^[1,12]。

利用由 MIT 开发的开源科学计算软件 MEEP, 基于如图 1 所示的耦合腔波导的基本结构, 考察了 $r_c = 0.45, 0.39, 0.33, 0.27, 0.21a$, $s = 1, 2, 3, 4$ 时的品质因子(表 1) 以及传输效率(图 3)。图 3 中黑色虚线对应着相应的微腔共振频率, 分别为 $(0.408, 0.4, 0.398, 0.396, 0.394)$ $\omega a/2\pi c$ 。微腔的共振频率会随着 r_c 的减小而发

表 1 二维光子晶体波导-微腔结构的品质因子

Table 1 Q -factor for 2D photonic crystal waveguide-microcavity

r_c	s	Q -factor
$0.45a$	1	5.45×10^2
$0.45a$	2	2.02×10^7
$0.45a$	3	2.00×10^5
$0.45a$	4	1.56×10^6
$0.39a$	1	4.50×10^3
$0.39a$	2	1.56×10^4
$0.39a$	3	1.12×10^5
$0.39a$	4	1.38×10^6
$0.33a$	1	2.07×10^5
$0.33a$	2	2.34×10^4
$0.33a$	3	3.82×10^3
$0.33a$	4	2.90×10^4
$0.27a$	1	8.20×10^4
$0.27a$	2	2.93×10^4
$0.27a$	3	2.73×10^5
$0.27a$	4	3.31×10^4
$0.21a$	1	2.14×10^4
$0.21a$	2	2.59×10^3
$0.21a$	3	5.02×10^3
$0.21a$	4	2.60×10^3

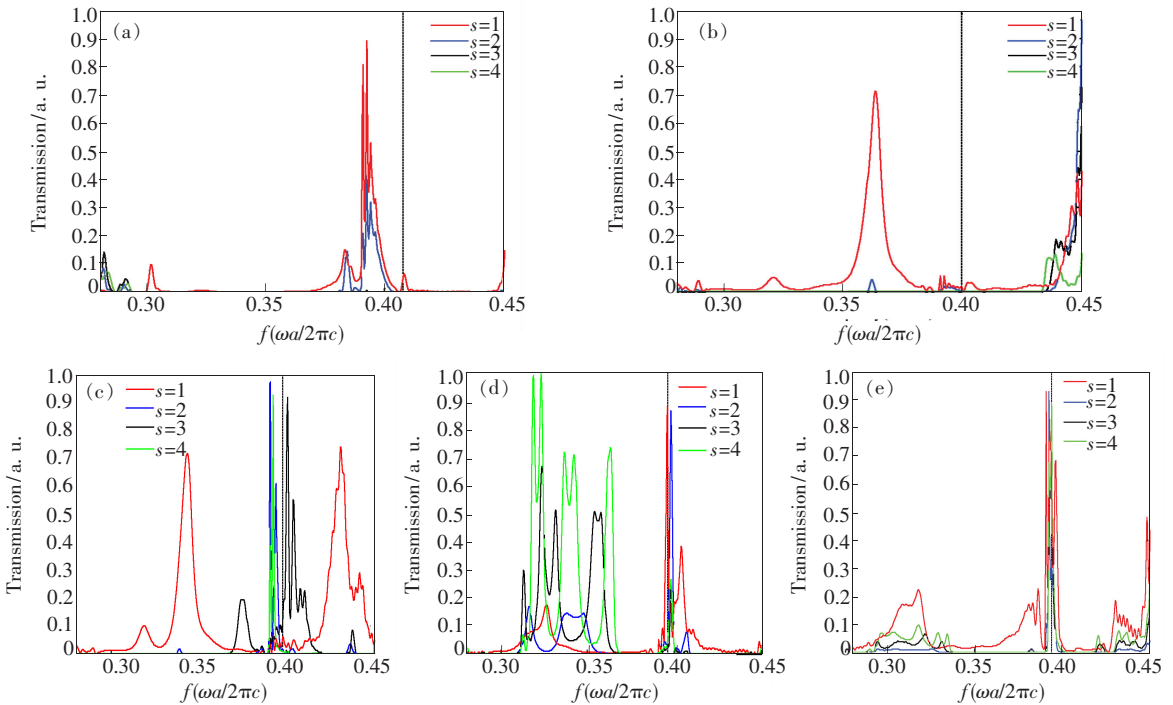


图 3 二维光子晶体波导微腔结构的传输光谱。(a) $r_c = 0.45a$; (b) $r_c = 0.39a$; (c) $r_c = 0.33a$; (d) $r_c = 0.27a$; (e) $r_c = 0.21a$ 。

Fig. 3 Transmission spectrum for 2D photonic crystal waveguide microcavity. (a) $r_c = 0.45a$. (b) $r_c = 0.39a$. (c) $r_c = 0.33a$. (d) $r_c = 0.27a$. (e) $r_c = 0.21a$.

生红移。之所以发生红移是因为随着空气孔半径的减小,构成光子晶体的材料的等效介电常数增大,根据电磁变分原理,光子晶体的各模发生红移。

分析比对图 3(a) ~ (e) 和表 1 可知,对于 $r_c > 0.33a$ 的微腔结构,其品质因子普遍偏大,选择合适的 s 值可获得高于文献[9]中所提到的实验所得的最大品质因子 2×10^6 ;而对于 $r_c \leq 0.33a$ 的微腔结构,品质因子普遍要偏低,最大不超过 2×10^5 ,但此时的传输效率普遍偏高。

在 $r_c = 0.45a, s = 2$ 时,微腔的品质因子最大,可高达 2×10^7 ,高于文献[9]中所提到的实验可得的最大品质因子 1 个数量级,但此时的传输效率近似为 0,其共振频率下的场分布情况如图 4 所示。由于微腔具有极大的品质因子,所以处于共振频率附近的光子能量被完全局域在微腔结构中,造成了传输效率近似为 0。这说明品质因子与光子晶体微腔的结构参数相关,选择合适的结构参数,可以获得极大的品质因子,但相应的传输效率会极低,甚至达到 0。这在实际中对于实现慢光、光捕获、光缓存等是很有应用价值的。

在 $r_c = 0.27a, s = 1$ 和 $r_c = 0.21a, s = 4$ 时,均可得到极大的传输效率(近似达到 90%),但前者的品质因子相较于后者高了 1 个数量级。这说明通过改变 r_c 和 s 的值,可以在获得较大的品质因子的同时得到较高的传输效率。对于 $r_c = 0.27a, s = 1$ 的情况,品质因子为 82 019,传输效率近似可达 90%,其共振频率下的场分布情况如图 5 所示。由于同时具有较大的品质因子和较高的传输效率,我们可以看出,处于共振频率附近的光子能量仍然有大部分被局域到了微腔结构中,但最终仍能近乎无损的进入波导结构中进行传播。这对于光子晶体微腔器件在光通信、分频器、滤波器中

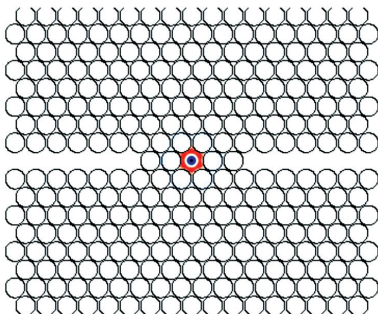


图 4 $r_c = 0.45a, s = 2$ 时的场分布情况。

Fig. 4 Field distribution for $r_c = 0.45a, s = 2$.

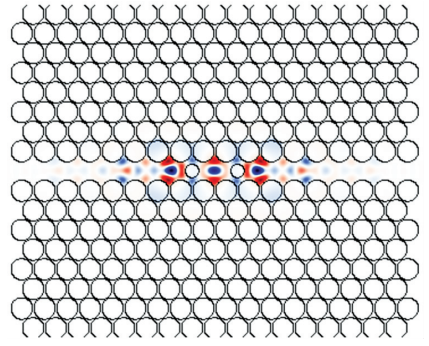


图 5 $r_c = 0.27a, s = 1$ 时的场分布情况。

Fig. 5 Field distribution for $r_c = 0.27a, s = 1$.

的实际应用具有很大的指导意义。

近年来,一种在光子晶体波导结构中加入链状微腔组成的新型光子晶体耦合腔波导结构备受人们瞩目,其构成微腔一般具有极大的品质因子^[13]。因此,基于上面得到的同时具有较高品质因子和较大传输效率的耦合腔波导结构 $r_c = 0.27a, s = 1$,我们对如图 6 所示结构的品质因子和传输效率进行计算,设链状微腔的个数(n)分别取为 1、3、5、7,其品质因子如表 2 所列,传输效率如图 7(a) ~ (d) 所示。

分析比对表 2 和图 7,在 $n = 3, r_c = 0.27a, s =$

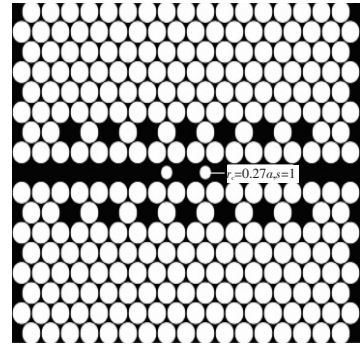


图 6 具有链状微腔的耦合腔波导结构

Fig. 6 The structure of coupled cavity waveguide with chain microcavity

表 2 具有链状微腔的耦合腔波导结构的品质因子
Table 2 Q -factor for coupled cavity waveguide with chain microcavity

链状微腔的个数 n	品质因子 Q
1	150 249
3	176 103
5	11 896
7	2 055

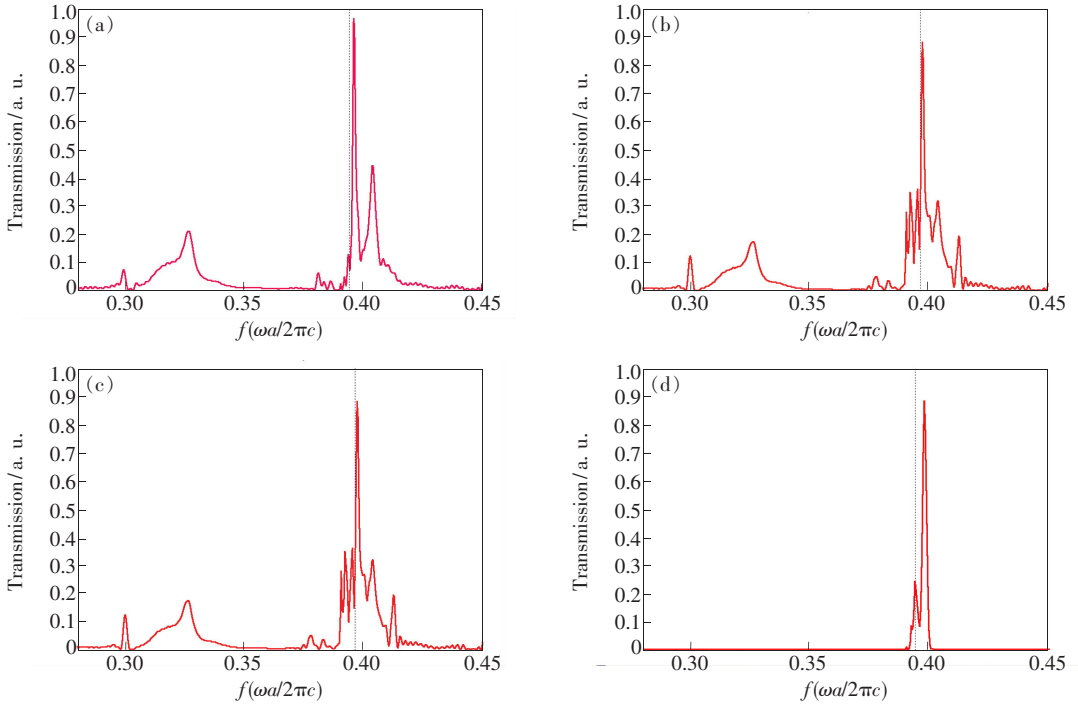


图 7 具有链状微腔的耦合腔波导结构的传输光谱。(a) $n=1$; (b) $n=3$; (c) $n=5$; (d) $n=7$ 。

Fig. 7 Transmission spectra for coupled cavity waveguide with chain microcavity. (a) $n=1$. (b) $n=3$. (c) $n=5$. (d) $n=7$.

1 时,其品质因子最大,且传输效率相对较大(近似为 50%)。相比于图 1 所示结构中 $r_c=0.27a$, $s=1$ 的情况,品质因子增大了 1 个数量级,虽然传输效率下降,但其下降的最少(近似下降了 40%),其共振频率处的场分布特性如图 8 所示。由于链状耦合腔传递光子的过程是跳跃式的,所以,虽然使传输效率有所下降,但其品质因子明显增大,表现在图中就是,落于微腔共振频率附近的

光子能量大部分被局域在各个微腔结构中,只有少部分进入波导进行传播。

4 结 论

利用 MPB 计算得到 $r=0.45a$ 时的二维三角晶格光子晶体波导的能带结构,并利用 MEEP 对二维光子晶体耦合腔波导结构的品质因子和传输效率进行了计算。在 $r_c=0.45a$, $s=2$ 时,获得的品质因子要高于文献[9]中所提到的实验所得的最大品质因子 1 个数量级,可达 2×10^7 ,但此时传输效率近似为 0。而在 $r_c=0.27$, $s=1$ 时,同时获得了相对较大的品质因子(82 019)和较高的传输效率(近似可达 90%)。在此基础上,由于链状微腔具有极大的品质因子,我们对具有链状微腔的耦合腔波导结构的品质因子和传输效率进行了考察,在链状微腔个数 $n=3$, $r_c=0.27a$, $s=1$ 时,微腔的品质因子提高了 1 个数量级,而其传输效率仅下降了约 40%。我们的研究对于光子晶体器件在慢光、光捕获、光传输等领域的实际应用,具有一定的指导意义。

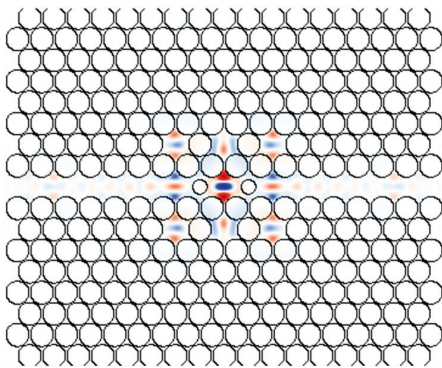


图 8 $n=3$, $r_c=0.27a$, $s=1$ 时的场分布特性。

Fig. 8 Field distribution for $n=3$, $r_c=0.27a$, $s=1$.

参 考 文 献:

- [1] Benmerkhi A, Bouchemat M, Bouchemat T, *et al.* Numerical optimization of high- Q -factor photonic crystal microcavities with a graded air lattice [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2011, 28(2):336-341.
- [2] Erchak A A, Ripin D J, Fan S H, *et al.* Enhanced coupling to vertical radiation using a two-dimensional photonic crystal in a semiconductor light-emitting diode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78(5):563-565.
- [3] Johnson S J, Fan S H, Mekis A, *et al.* Multipole-cancellation mechanism for high- Q cavities in the absence of a complete photonic band gap [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78(22):3388-3390.
- [4] Chen H B, Hu S M, Gao Y J. Multiple channeled filters and optical switches using compound photonic crystal with two symmetrical defect layer at the two ports [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(1):7-11 (in Chinese).
- [5] Wei H, Underwood D F, Han S E, *et al.* The role of stress in the time-dependent optical response of silicon photonic band gap crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(5):051910-1-3.
- [6] Bria D, Assouar M B, Oudich M, *et al.* Opening of simultaneous photonic and phononic band gap in two-dimensional square lattice periodic structure [J]. *J. Appl. Phys.*, 2011, 109(1):014507-1-3.
- [7] Yang C Y, Xu X M. A new multi channels WDM based on photonic crystal heterostructures [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(5):757-761 (in Chinese).
- [8] Notomi M, Shinya A, Mitsugi S, *et al.* Waveguides, resonators and their coupled elements in photonic crystal slabs [J]. *Opt. Exp.*, 2004, 12(8):1551-1561.
- [9] Tanaka Y, Asano T, Noda S. Design of photonic crystal nanocavity with Q -factor of $\sim 10^9$ [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(11):1532-1539.
- [10] Qiu S L, Li Y P. Q -factor instability and its explanation in the staircased FDTD simulation of high- Q circular cavity [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2009, 26(9):1664-1674.
- [11] Liu G Y, Ning Y Q, Zhang L S, *et al.* Two-dimension photonic crystal complete bandgap [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(2):169-173 (in Chinese).
- [12] Mahmoodian S, McPhedran R C, Sterke C M D, *et al.* Single and coupled degenerate defect modes in two-dimensional photonic crystal band gaps [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, 79(1):013814-1-12.
- [13] Xua Q, Xiea K, Ranb Y H, *et al.* 3 dB power splitter design based on coupled cavity waveguides [J]. *Optik*, 2011, 122(2):156-158.