

基于内全反射微环空气孔型光子晶体光分插滤波器

蒋俊贞 强则焯* 许晓赋 陈志勇 邱怡申

(福建师范大学激光与光电子技术研究所福建省光子技术重点实验室,
医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建 福州 350007)

摘要 提出一种基于内全反射微环和光子晶体带隙相结合的混合结构空气孔型二维三角晶格光子晶体光分插滤波器,通过压缩及移位围绕线缺陷波导的上下两排光子晶体阵列,实现空气孔型线缺陷波导单模的有效调控,进而影响信道的下路效率,并且利用二维时域有限差分法系统分析不同波导宽度以及不同移位量 δ 时滤波器的下路效率。模拟计算表明,当波导宽度为 $0.8\sqrt{3}$ 晶格常数,耦合强度为 0 个晶格常数,移位量为 0.5 个晶格常数,信道波长为 1464 nm 时,下路效率为 -0.11 dB,品质因子 Q 为 1100;当波导宽度为 $0.8\sqrt{3}$ 晶格常数,耦合强度为 1 个晶格常数,移位量为 0 个晶格常数时,下路效率为 -0.89 dB,品质因子 Q 为 2100。

关键词 非线性光学;光子晶体微环;内全反射;空气孔;分插滤波器

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0505001

Air-Hole Type Photonic Crystal Add-Drop Filters Based on Total-Internal-Reflection Ring Resonators

Jiang Junzhen Qiang Zexuan Xu Xiaofu Chen Zhiyong Qiu Yishen

(Fujian Provincial Key Laboratory for Photonics Technology, Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine of Ministry of Education, Institute of Laser and Optoelectronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)

Abstract A hexagonal-lattice air-hole photonic crystal add-drop filter (OADF) is proposed combining the hybrid effect of total-internal-reflection (TIR) ring resonators and photonic crystal band gap. The mode profile of line defect waveguide can be effectively operated in single mode by either compressing or dislocating the two rows of photonic crystal above and below the line defect waveguide, which further affects the dropped efficiency. Dropped efficiencies of proposed filter with different widths of Bus-waveguide and dislocations δ are then numerically analyzed by using two-dimensional finite-difference time-domain (FDTD) numerical technique. The results show that -0.11 dB dropped efficiency and 1100 quality factor Q can be obtained with 1464 nm signal channel when the width of Bus-waveguide, coupling strength and dislocation are $0.8\sqrt{3}$ periodicity, 0 periodicity and 0.5 periodicity. On the other hand, dropped efficiency of 0.89 dB and quality factor of 2100 can be also provided when the width of Bus-waveguide, coupling strength and displacement are $0.8\sqrt{3}$ periodicity, 1 periodicity and 0 periodicity.

Key words nonlinear optics; photonics crystal ring resonators; total internal reflection; air-hole; add-drop filter

OCIS codes 230.5298; 230.7408; 230.7380

1 引 言

光分插滤波器(OADF)是组成波分复用系统(WDM)中广泛使用的诸如光分插复用器、光调制器及光开关等的核心元件。光波导微环由于可以提

供很高的自由谱范围、品质因子以及波长选择性,目前基于它的 OADF 屡见报道^[1~4],但这种传统光波导微环受全反射导光原理限制,无法在尺寸上进一步缩小以满足将来纳米尺度的需要。另一方面,光

收稿日期: 2011-11-30; 收到修改稿日期: 2012-01-10

基金项目: 福建省教育厅基金(JB10025)资助课题。

作者简介: 蒋俊贞(1979—),女,硕士,讲师,主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: jzjiang@fjnu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: qiangzx@fjnu.edu.cn

子晶体微环(PCRR)^[5]具有耦合效率高、环尺寸大小易缩放、传输损耗独立于环大小、整体结构紧凑及模式耦合配置多样性等优点^[5,6],为解决上述技术瓶颈提供了一个有效技术方案,自报道以来已引起人们的广泛关注。近年来基于PCRR的OADF鲜有报道^[7~13],报道的结构大部分是基于介质柱型,这种介质柱型PCRR容易获得工作范围很宽的单模谐振,耦合效率高,但实际生产工艺难度大,且在垂直上没有很好的限制,传输损耗很大^[7~10]。与之相比,空气孔型PCRR生产工艺相对简单,但容易在转弯区形成多模谐振,下路效率较低,旁瓣不好^[11~13]。

如何有效提高空气孔型PCRR的下路效率,是亟待解决的问题。本文基于内全反射微环和光子晶体带隙相结合的混合结构,提出了一种新型的空气孔型光子晶体光分插滤波器,利用压缩及移位围绕线缺陷波导的上下两排光子晶体阵列,实现空气孔型线缺陷波导单模调控改善,并应用二维时域有限差分法数值分析了压缩及移位对下路效率的影响。

2 结构设计及理论分析

图1为基于内全反射微环和光子晶体带隙相结合的混合结构空气孔型二维三角晶格光子晶体光分插滤波器的结构示意图。背景材料为硅,厚度为 $0.5a$,空气孔半径 r 为 $0.35a$,这里 a 为晶格常数。对于 $1.55\ \mu\text{m}$ 通信窗口,硅的折射率为 3.48 。结构中Bus波导W1由沿 ΓK 方向移除一排空气孔形成,PCRR则由边长为 $3a$ 六边形外围与半径为 $1.5a$ 的圆形空气孔内围组成。将微环内围圈住的光子晶体用一个等效大空气孔来代替,在光子晶体带隙和内全反射的相互制约下工作,微环谐振模式会相对简单。定义A为输入端口,B、C、D为输出端口,W1波导和环形腔的外围周期数记为 $d=16a$ 和 $L=16a$;取耦合强度 L_c 。即W1波导和PCRR之间的耦合周期数为 $L_c=1a$ 。精确分析该结构的各输出端口的传输特性需要用三维时域有限差分(FDTD)法,这种方法耗费时间而且需要大量的计算资源。学者们常用等效折射率法将三维问题近似成二维问题进行分析,可以快速有效地进行理论分析,并取得很好的预测结果^[12,14]。然而,对于高折射率对比度的结构如绝缘衬底上的硅(SOI),用等效折射率法求得的结果误差相对大些。本课题组在早期的工作中提出了一种折射率微扰有效指数扰动(EIP)法^[15]可以有效地克服上述问题,因而本实验同样采用

EIP法进行分析。因此,上述结构将变成有效背景折射率为 2.7 的二维三角晶格PCRR结构,进而可以利用二维FDTD进行分析。

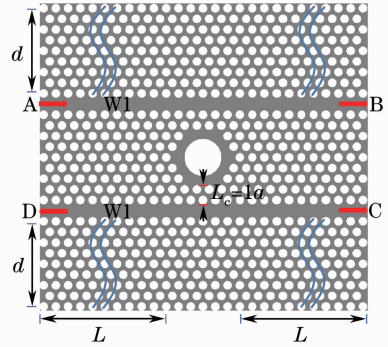


图1 空气孔型二维三角晶格光子晶体光分插滤波器结构示意图

Fig. 1 Schematic of proposed two-dimensional hexagonal-lattice air-hole PCRR with coupling strength $L_c = 1a$

图2为Bus波导在横电模(TE)偏振光激励下,基于平面波展开(PWE)法结合超原胞求得的色散关系,其中图2(a)为宽度为 $\sqrt{3}a$ 的W1波导 $\omega-k$ 的色散曲线。由图可知空气孔型线缺陷波导为多模模式。压缩围绕线缺陷波导的上下两排光子晶体阵列,将波导宽度压缩为 $0.9\sqrt{3}a$ 、 $0.8\sqrt{3}a$ 、 $0.7\sqrt{3}a$,分别表示为W0.9、W0.8、W0.7,其相应的色散曲线为图2(b)、图2(c)和图2(d)。分析4幅色散曲线图可得,波导宽度改变,其色散曲线也发生变化。波导宽度为 $0.8\sqrt{3}a$ 时波导为单模模式,存在一个较宽的单模归一化频率范围 $[0.294a/\lambda, 0.356a/\lambda]$,对于 $1550\ \text{nm}$ 中心通信波长, a 不妨取 $504\ \text{nm}$ 。

3 数值模拟及讨论

如图1所示,在A、B、C、D4个端口分别放置功率监视器,并以A端口为输入端口,利用二维FDTD计算方法,选用各向异性完全匹配层(PML)为吸收边界条件,注入覆盖上述感兴趣光谱范围的TE偏振高斯脉冲光束,将B、C、D端口监测到的功率与输入端口A的功率相比,即可求得其他3个端口的归一化强度谱,C、D端口的归一化强度谱即为C、D端的下路效率。图3(a)和(b)为相同耦合强度 L_c 为 $0a$ 下,波导宽度为W1和波导宽度为W0.8的传输谱,而图3(c)和(d)则为相同耦合强度 L_c 为 $1a$ 下,波导宽度为W1和波导宽度为W0.8的传输谱。由图3可知,耦合强度 L_c 为 $0a$ 或 $1a$ 时,波导宽度为W0.8的PCRR结构的D端口在 $1464\ \text{nm}$ 信道下路效率均远大于波导宽度为W1的PCRR

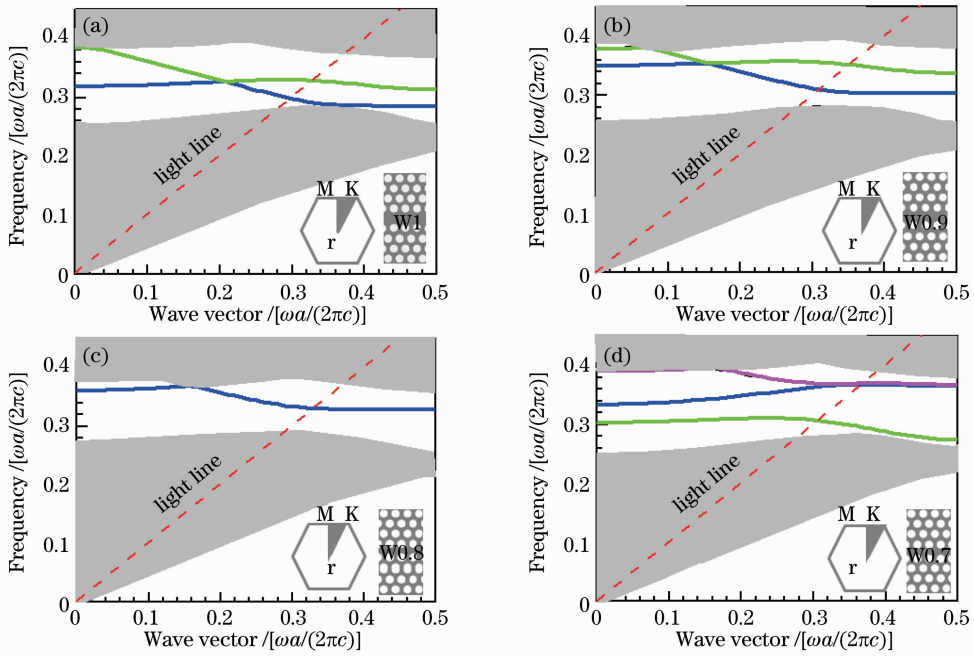


图 2 Bus 波导在 TE 偏振光激励下的色散关系。(a)宽度为 $\sqrt{3}a$ 的 W1 波导;(b)宽度为 $0.9\sqrt{3}a$ 的 W0.9 波导;
(c)宽度为 $0.8\sqrt{3}a$ 的 W0.8 波导;(d)宽度为 $0.7\sqrt{3}a$ 的 W0.7 波导

Fig. 2 Dispersion plot and the corresponding Bus-waveguide mode with TE polarization incidence. (a) W1 Bus-waveguide with $\sqrt{3}a$ width; (b) W0.9 Bus-waveguide with $0.9\sqrt{3}a$ width; (c) W0.8 Bus-waveguide with $0.8\sqrt{3}a$ width; (d) W0.7 Bus-waveguide with $0.7\sqrt{3}a$ width

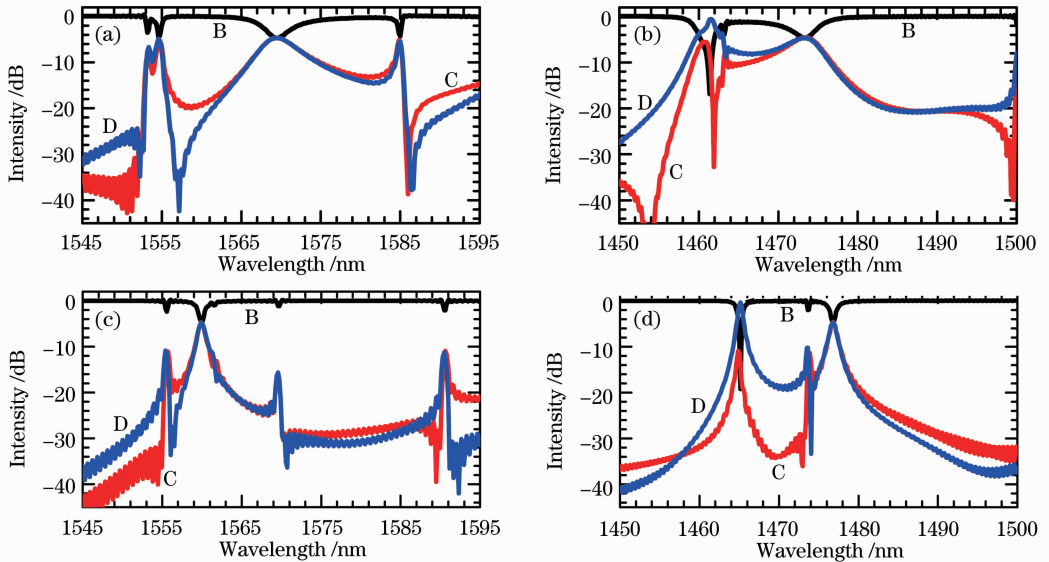


图 3 不同耦合强度和波导宽度下三角晶格光子晶体光分插滤波器的归一化强度谱。(a) $L_c=0a$, W1;
(b) $L_c=0a$, W0.8;(c) $L_c=1a$, W1;(d) $L_c=1a$, W0.8

Fig. 3 Normalized intensity of proposed two-dimensional hexagonal-lattice air-hole PCRR with different coupling strengths and Bus-waveguide widths. (a) $L_c=0a$, W1; (b) $L_c=0a$, W0.8; (c) $L_c=1a$, W1; (d) $L_c=1a$, W0.8

结构的 D 端口在 1565 nm 信道下路效率,特别是“ $L_c=1a, W0.8$ ”的 B 端口在波长为 1464 nm 时串扰指标可达 -19.7 dB。这是由于前者波导为单模模式而后者波导为多模模式,故波导模式特性直接

影响微环的下路效率。作为滤波器,除了微环下路效率外,品质因子 Q [定义为 中心波长 λ 和全谱最大半峰全宽(FWHM) $\delta\lambda$ 的比值]也是一个重要的指标,其能反映滤波器灵敏度。图 4(a)为 4 种不同波

导宽度,即 $W1$ 、 $W0.9$ 、 $W0.8$ 和 $W0.7$ 的 PCRR 结构的 D 端口在 L_c 分别为 $0a$ 与 $1a$ 时的下路效率以及品质因子 Q 。该图进一步说明波导模式特性直接影响微环的下路效率,波导宽度为 $W1$ 、 $W0.9$ 和 $W0.7$ 的三种多模模式 PCRR 结构,其 D 端口下路效率均在 -8 dB 以下。而波导宽度为 $W0.8$ 的单模模式 PCRR 结构,其 D 端口下路效率则提高到

-1.3 dB,故波导为单模模式时下路效率远高于波导为多模模式时下路效率。同时,在相同波导宽度下,耦合强度 L_c 为 $1a$ 的 PCRR 结构的品质因子 Q 大于耦合强度 L_c 为 $0a$ 的 PCRR 结构的品质因子 Q ,即耦合强度会影响下路波的品质因子,耦合强度越大的 PCRR 结构具有更高的品质因数。

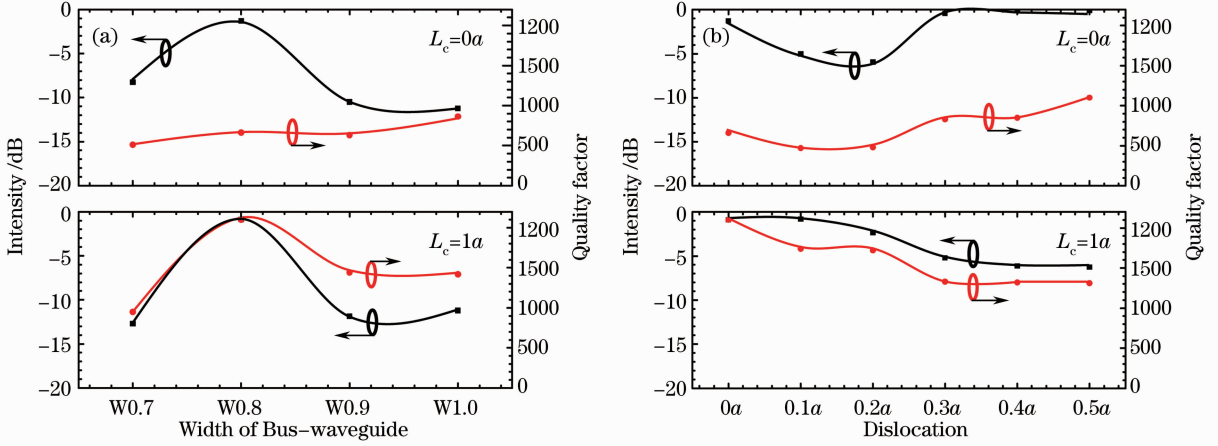


图 4 (a) Bus 波导宽度改变对 D 端口下路效率和品质因子 Q 的影响;(b)移位量改变对 D 端口下路效率和品质因子 Q 的影响

Fig. 4 Dropped efficiency and quality factor Q of Port D affected by (a) the change of Bus-waveguide width and (b) the dislocation along ΓK direction

通过以上分析可知,通过有效压缩空气孔型线缺陷波导宽度来调控波导模式特性,可影响信道的下路效率。实验中进一步讨论了其他途径如平移围绕线缺陷波导的上下两排光子晶体阵列即沿着 ΓK 方向移位 δ ,对 D 端口下路效率和品质因子 Q 的影响。如图 4(b)所示,耦合强度 L_c 为 $0a$ 时,随着移位量的增加,D 端口在 1464 nm 信道下路效率和 Q 值是先减小后增加,移位量 δ 为 $0.2a$ 时 D 端口下路效率和 Q 值最小分别为 -5.96 dB 和 470 ,移位量 δ 为最大值即 $0.5a$ 时 D 端口下路效率和 Q 值最大分别为 -0.11 dB 和 1100 ;耦合强度 L_c 为 $1a$ 时,随着移位量的增加,D 端口在 1464 nm 信道下路效率和 Q 值为递减,移位量 δ 为最小值即 $0a$ 时 D 端口下路效率和 Q 值最大分别为 -0.89 dB 和 2100 ,移位量 δ 为最大值即 $0.5a$ 时 D 端口下路效率和 Q 值最小分别为 -6.26 dB 和 1300 。耦合强度 L_c 为 $0a$ 、波导宽度为 $W0.8$ 、移位量 δ 为 $0.5a$ 的 PCRR 结构光分插滤波器,D 端口在 1464 nm 处的传输峰值为 -0.11 dB,其他两个端口 B 和 C 基本趋于零,因此 D 端口可以很好地用于上下信号。

4 结 论

利用时域有限差分法研究基于内全反射微环和光子晶体带隙相结合的混合结构空气孔型二维三角晶格光子晶体光分插滤波器的滤波特性。分析不同波导宽度的色散曲线以及归一化功率谱可知,通过压缩线缺陷波导宽度可实现波导单模调控并对信道下路效率产生影响。同时移位围绕线缺陷波导的上下两排光子晶体阵列,也影响信道下路效率。通过数值模拟,得到两种单模谐振,耦合效率高的空气孔型光分插滤波器结构,其结构参数分别为 $W0.8$ 、 $L_c = 0a$ 、 $\delta = 0.5a$ 和 $W0.8$ 、 $L_c = 1a$ 、 $\delta = 0a$,其相应 D 端口在 1464 nm 的下路效率分别为 -0.11 dB 和 -0.89 dB,品质因子 Q 分别为 1100 和 2100 。耦合强度 L_c 为 $0a$ 时,通过压缩波导宽度以及平移围绕线缺陷波导的上下两排光子晶体阵列相结合的方法可以得到最优的 D 端口下路效率;耦合强度 L_c 为 $1a$ 时,通过压缩波导宽度的方法可以得到最优的 D 端口下路效率。

参 考 文 献

1 Zhou Linjie, Andrew W. Poon. Fan resonance-based electrically

- reconfigured add-drop filters in silicon microring resonator-coupled Mach-Zehnder interferometers[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(7): 781~783
- 2 Sasikanth Manipatruni, Chen Long, Michal Lipson. Ultra high bandwidth WDM using silicon microring modulators[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(16): 16858~16867
- 3 Li Chao, Zhou Linjie, Andrew W. Poon. Silicon microring carrier-injection-based modulators/switches with tunable extinction ratios and OR-logic switching by using waveguide cross-coupling[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(8): 5069~5076
- 4 Han Xiyou, Pang Fufei, Geng Jianxin *et al.*. Design of tunable optical add-drop multiplexer based on photonic crystal ring resonators [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35** (10): 1475~1477
韩秀友, 庞拂飞, 耿建新 等. 跑道形玻璃波导谐振腔滤波器的研制[J]. *光子学报*, 2006, **35**(10): 1475~1477
- 5 Qiang Zexuan, Zhou Weidong, Richard A. Soref. Optical add-drop filters based on photoniccrystal ring resonators[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(4): 1823~1831
- 6 Qiang Zexuan, A Soref Richard, Zhou Weidong. Photonic crystal ring resonators: characteristics and applications[J]. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2010, **10**(3): 1495~1507
- 7 Chiu Weiyu, Huang Taiwei, Wu Yenhsiang *et al.*. A photonic crystal ring resonator formed by SOI nano-rods [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(23): 15500~15506
- 8 Qiang Zexuan, Qiu Yishen, Jiang Junzhen *et al.*. Design of tunable optical add-drop multiplexer based on photonic crystal ring resonators [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38** (12): 3088~3092
- 强则焯, 邱怡申, 蒋俊贞 等. 可调谐光子晶体微环腔型光分叉复用器的设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(12): 3088~3092
- 9 Mehrdad Djavid, Afshin Ghaffari, Mohammad Sadegh Abrishamian. Coupled-mode analysis of photonic crystal add-drop filters based on ring resonators[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(11): 1829~1832
- 10 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
- 11 Ma Zetao, Kazuhiko Ogusu. Channel drop filters using photonic crystal Fabry-Perot resonators [J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(5): 1192~1196
- 12 Seokhwan Jeong, Noritsugu Yamamoto, Junichiro Sugisaka *et al.*. GaAs-based two-dimensional photonic crystal slab ring resonator consisting of a directional coupler and bent waveguides [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8): 1951~1959
- 13 Yu Tianbao, Huang Jiehui, Liu Nianhua *et al.*. Design of a compact polarizing beam splitter based on a photonic crystal ring resonator with a triangular lattice [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(11): 2168~2172
- 14 Qiu Min. Effective index method for heterostructure-slab-waveguidebased two-dimensional photonic crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(7): 1163~1165
- 15 Qiang Zexuan, Zhou Weidong. Fast calculation of cavity-mode characteristics of photonic crystal cavities [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(18): 1940~1942

栏目编辑: 韩峰