

耦合间距对绝缘体上硅微环谐振腔的性能影响

李明慧 马可贞 骆亮 郭泽彬 张安富 薛晨阳 张文栋 闫树斌*

(中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要 运用微机电系统(MEMS)工艺制备了不同耦合间距的微环谐振腔, 针对耦合间距对耦合系数、谐振深度的影响, 进行了理论分析与仿真, 并对结构进行耦合实验测试。测试结果表明, 随着微环耦合间距的增加, 耦合系数减小, 谐振深度变浅, 这与理论仿真一致。实际计算了相应的耦合效率、3 dB 带宽及品质因数, 随着耦合间距增大, 耦合效率降低, 3 dB 带宽也随之变窄, 微环谐振腔的品质因数逐渐提高。研究结果为微环谐振腔的进一步优化设计及其在相关领域中的研究与应用提供了依据。

关键词 集成光学; 微环谐振腔; 耦合实验; 耦合间距

中图分类号 TN252; TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0610001

Influence of Coupling Gap on the Performance of Silicon-no-Insulator Microring Resonator

Li Minghui Ma Kezhen Luo Liang Guo Zebin Zhang Anfu Xue Chenyang
Zhang Wendong Yan Shubin

(Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement (Ministry of Education),
Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory,
North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Abstract Microring resonators with different coupling gaps are fabricated by micro-electro-mechanical-systems (MEMS) technology. To acquire the relationships of coupling gap with coupling coefficient and resonance depth, the theoretical analysis, simulation and coupling experiment are carried out. The test results show that, with the increase of the coupling gap, coupling coefficient decreases and coupling depth becomes shallower, which are consistent with simulation. Actual calculation of the coupling efficiency, 3 dB bandwidth and quality factor show that, as the gap increasing, the coupling efficiency becomes lower, 3 dB bandwidth turns narrower and the quality factor increases. The results provide a foundation for further design and optimization of microring resonator and its research and application in related fields.

Key words integrated optics; microring resonator; coupling experiment; coupling gap

OCIS codes 130.3120; 130.7408; 230.3990; 230.7370

1 引言

基于绝缘体上硅(SOI)的光波导谐振腔器件由于其结构简单、集成度高、灵敏度高等特点而广泛应用于滤波器^[1-4]、激光器^[5-6]、光调制器^[7-8]、光开

关^[9-11]、生物传感检测^[12-13]和光学陀螺^[14-15]等领域。目前对于微环谐振腔耦合间距的研究大多基于理论层面,且研究方向主要集中在间距与耦合系数的关系上^[16-19],关于耦合间距对微环谐振谱线影响

收稿日期: 2013-11-07; 收到修改稿日期: 2013-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(91123036, 61178058, 61275166)

作者简介: 李明慧(1988—),女,硕士研究生,主要从事微纳器件光波导与系统集成等方面的研究。

E-mail: liminghui1207@163.com

导师简介: 张文栋(1962—),男,博士,教授,主要从事纳米光波导器件、微型机电系统等方面的研究。

E-mail: wdzhang@nuc.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: shubin_yan@nuc.edu.cn

的报道较少。在实际的光波导微环谐振器中,耦合间距对谐振系统各个性能参数都有着重要的影响,耦合间距的优化将有助于器件性能的改善。

本文对微环谐振腔结构中耦合间距与其耦合系数、传输性能的影响关系进行了理论分析与仿真,通过微机电系统(MEMS)工艺制备了耦合间距不同的微环谐振腔。通过耦合实验测试,得到了不同耦合间距下的谐振响应谱线,并全面分析了耦合间距对耦合深度、耦合效率、3 dB 带宽及品质因数 Q 的影响关系,为环形微腔的进一步优化设计提供了依据,避免了优化过程的盲目性,同时对微环谐振腔在改善滤波性能、提高品质因数以及其他相关领域中的研究具有重要的意义。

2 微环腔耦合理论与仿真

2.1 微环传输特性分析

在不考虑背向反射影响的情况下,微环谐振腔的光场传输示意图如图 1 所示。其中微环与直波导宽度相同,半径为 R ,耦合间距为 d ,微环与直波导光场耦合系数为 k ,在耦合区域,输入光场(a_1, a_2)与输出光场(b_1, b_2)的传数矩阵^[20]可以表示为

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-k^2)^{1/2} & ik \\ ik & (1-k^2)^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$b_1 = (1-k^2)^{1/2} a_1 + ika_2, \quad (2)$$

$$b_2 = (1-k^2)^{1/2} a_2 + ika_1, \quad (3)$$

微环谐振腔内的传输光波为

$$a_2 = b_2 \exp[-(\alpha_L + i\phi)], \quad (4)$$

式中 $\alpha_L = L\alpha$ 表示光在微环谐振腔内传播一周的损耗, L 为微环周长, α 为损耗系数。 $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} L$ 表示光在微环谐振腔内传播一周的相位变化, λ 表示传输波长, n_{eff} 表示微环谐振腔的有效折射率。由以上各式可以得出输出光场和输入光场的对应关系:

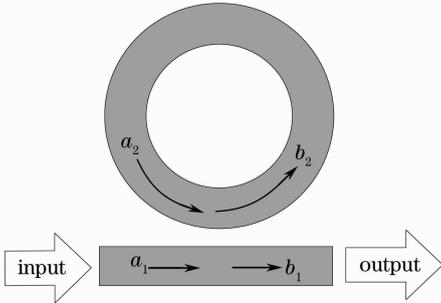


图 1 典型单环谐振腔光场传输示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical field transmission of a typical single ring resonator

$$b_1 = \frac{(1-k^2)^{1/2} - \exp[-(\alpha_L + i\phi)]}{1 - (1-k^2)^{1/2} - \exp[-(\alpha_L + i\phi)]} a_1. \quad (5)$$

由以上分析可知,微环谐振系统的传输性能与传输波长和耦合系数均有关系,利用 Matlab 软件对系统传输性能与传输波长、耦合系数等参量进行仿真,结果分别如图 2、图 3 所示。图 2 为半径 $R=20 \mu\text{m}$, 宽度 $w=0.5 \mu\text{m}$ 的谐振腔在耦合系数 $k=0.2$ 时的系统传输特性图,随着传输波长的改变,谐振系统在一定的波长处发生谐振,从而形成如图所示的透射谱线;图 3 为该微环谐振腔在耦合系数 k 分别为 0.09, 0.11, 0.13, 0.2 时,在 1544.1~1544.6 nm 波长范围内的传输曲线,显然,随着耦合系数的增加,透射谱线 3 dB 带宽变大,谐振深度也随之变大。因此,耦合系数是影响微环谐振系统性能的一个重要因素。

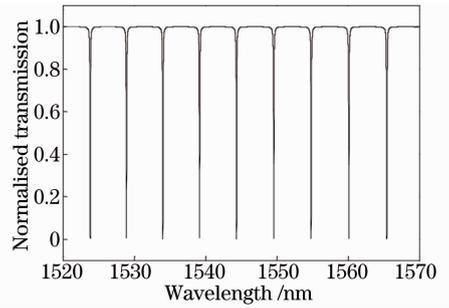


图 2 微环谐振腔谐振谱线 ($R=20 \mu\text{m}$)

Fig. 2 Resonance spectrum of microring resonator ($R=20 \mu\text{m}$)

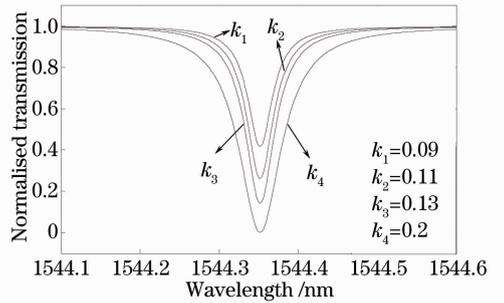


图 3 耦合系数与谐振谱线的关系 ($R=20 \mu\text{m}$)

Fig. 3 Relationship between coupling coefficients and resonance spectrums ($R=20 \mu\text{m}$)

2.2 耦合间距对耦合系数的影响

在微环谐振腔系统中,耦合区域为直波导-弯曲波导的耦合方式(直-弯侧向耦合),如图 4 所示,其中, a 为波导宽度, d 为耦合间距, k 为耦合系数,耦合长度为 $2L$ 。

耦合间距 d 对耦合系数 k 的影响关系可以表示为^[21]

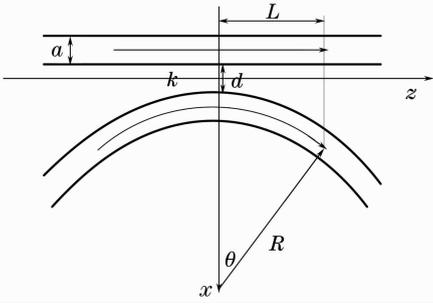


图4 直波导-弯曲波导耦合

Fig. 4 Straight-bend waveguides coupling

$$k = \frac{2\Gamma_y \gamma_1^2 \gamma_2^2}{\beta k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) (2 + \gamma_2 a)} \exp\left[-\gamma_2 \left(d + 2R \sin^2 \frac{\theta}{2}\right)\right], \quad (6)$$

式中 Γ_y 为功率限制因子,描述光波导对光的限制程度, n_1 和 n_2 分别为波导和其包层的折射率, β 为 TE 模的传播常数, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为真空中的波数(λ_0 为光在真空中的波长), 并且有:

$$k_0 n_2 < \beta < k_0 n_1, \quad (7)$$

$$\gamma_1^2 = k_0^2 n_1^2 - \beta^2, \quad \gamma_2^2 = \beta^2 - k_0^2 n_2^2. \quad (8)$$

由于耦合区域较小,令 $\theta = 20^\circ$, 在耦合间距 $0 \sim 500$ nm 范围内对半径 $R = 20 \mu\text{m}$ 的微环谐振腔系统进行仿真,得到了谐振系统耦合系数与耦合间距的关系图,如图 5 所示。分析图 5 曲线图,耦合系数随着间距的增大呈指数式衰减,且在 50 nm 到 200 nm 耦合间距范围内,耦合系数 k 大约从 0.5 降低到 0.1 ,这一改变对透射谱线的宽度和深度都有着显著的影响,进而影响着整个谐振系统的传输性

能。通过设置合理的耦合间距,改变微环耦合系统的耦合系数,这对于微环谐振腔的优化设计和传输性能的提高有着重要的意义。

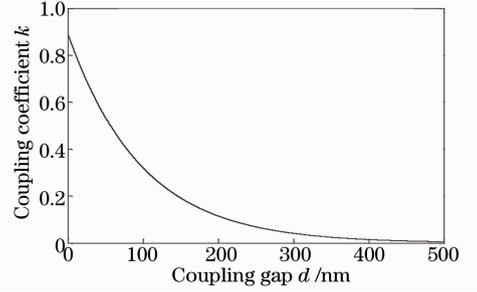


图5 耦合系数与耦合间距对应关系

Fig. 5 Corresponding relationship between coupling coefficient and coupling gap

3 实 验

3.1 微环谐振腔的设计与制备

根据上一节的理论基础,利用 MEMS 工艺制备了半径 $R = 20 \mu\text{m}$, 宽度 $a = 0.5 \mu\text{m}$, 耦合间距 d 分别为 $50, 90, 130, 170$ nm 的 SOI 纳米光波导微环谐振腔。SOI 由顶层硅,中间二氧化硅衬底层和基底硅三层材料组成,其折射率差大,约束光场能力强,是制作微环谐振腔的常用材料。运用 MEMS 工艺,通过 SOI 基片预处理、涂覆聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)光刻胶、电子束光刻、显影、电感耦合等离子体(ICP)深硅刻蚀、去胶等工艺得到了高度为 220 nm 的硅波导微环谐振腔基本结构,其扫描电子显微镜(SEM)图及波导截面尺寸示意图如图 6 所示。

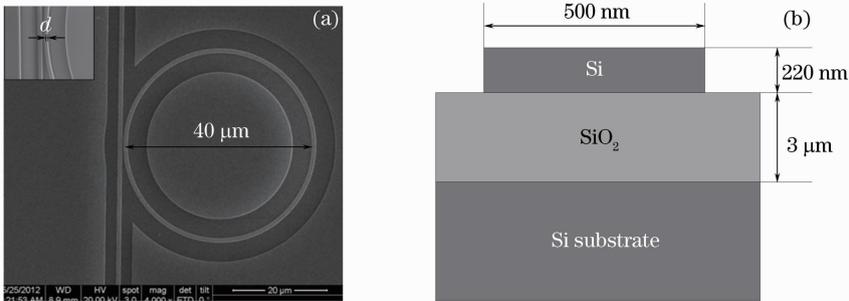


图6 微环谐振腔。(a) SEM 图示; (b) 横截面示意图

Fig. 6 Microring resonator. (a) Picture of SEM; (b) diagram of cross-section

3.2 耦合测试

微环谐振腔测试平台的搭建主要由光纤与波导的耦合方式来决定,系统主要包括可调谐激光控制器,红外激光器,单模透镜光纤,高精度三维调节平台,光电探测器以及示波器。系统结构示意图和实拍图如图 7 所示。

选用 New Focus 公司的可调谐激光器作为激

光光源,该激光器具有优越的光学特性, $1520 \sim 1570$ nm 连续可调,可以满足对平面环形微腔传输特性的测试。如图 7 所示,将激光器与可调谐激光控制器配合使用,作为系统输入光源,设定扫描范围为 $1520 \sim 1570$ nm,为提高测试精度,将扫描步长设置为 0.1 nm/s。

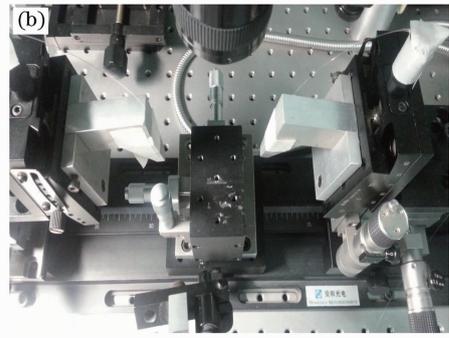
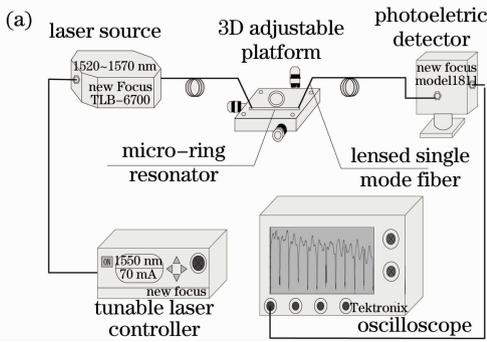


图 7 耦合测试系统。(a) 系统框图；(b) 实验装置图

Fig. 7 Coupling test system. (a) System diagram; (b) experimental installation

将单模透镜光纤分别固定于三维精密调节平台上,在微环腔的输入输出端进行近似垂直光栅耦合,在实验过程中通过实时观察 CCD 成像,不断调节光纤位置,以达到最优耦合。耦合信号通过光纤导出被光电探测器接收后由示波器显示,最终得到微环谐振系统的透射谱线。

4 结果与分析

对半径 $R=20 \mu\text{m}$, 耦合间距 d 分别为 50、90、130、170 nm 的微环谐振腔进行耦合实验测试,通过示波器对谐振系统的输出进行观测。将得到的透射谱线通过数据处理整合到一个窗口,得到了如图 8 所示的不同耦合间距下微环谐振腔系统的传输谱线。从图 8 可以看出,随着耦合间距的增大,对应透射谱线最低点的数值分别为 0.014, 0.035, 0.107, 0.113。同时可以看出,与仿真曲线相比,在谱线平坦部分,有微小幅度的纹波抖动,主要是由于在测试过程中,测试系统的不稳定以及光在波导端面、光栅和光纤间、光栅之间反射形成的法布里-珀罗模式所致^[22]。

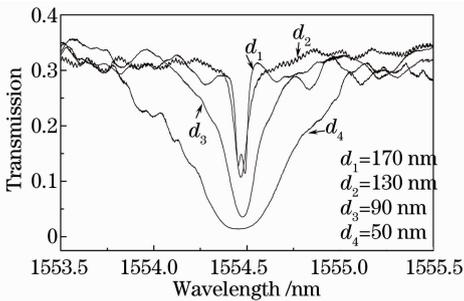


图 8 不同耦合间距下系统传输谱线图

Fig. 8 Transmission spectrums with different coupling gaps of the system

分别对间距 $d=50, 90, 130, 170 \text{ nm}$ 的传输曲线进行分析,计算 1550 nm 附近微环腔谐振谱线的 3 dB 带宽和品质因数 Q ,由此得到耦合间距与谐振

系统相关性能参数的关系图,如图 9 所示。通过对图 9 的数据分析可以得出,随着耦合间距的增加,透射谱的 3 dB 带宽从 0.75 nm 下降到 0.2 nm,明显变窄;品质因数 Q 从 2.067×10^3 增大到 7.75×10^3 ;同时,耦合效率从 0.958 下降到 0.612,呈明显的降低趋势,可以理解为随着微环腔耦合间距的增大,耦合系数呈指数式衰减,而耦合系数的改变,对系统的传输性能有着很大的影响。这一实验结果与第二章节的理论仿真结果基本一致。

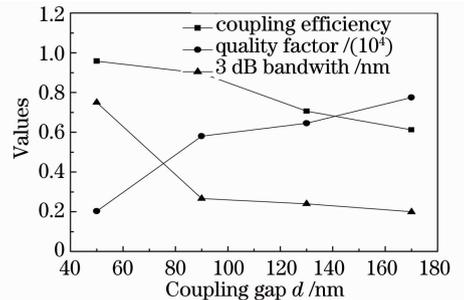


图 9 耦合间距与传输性能参数的关系图
Fig. 9 Relationship between coupling gaps and transmission performance parameters

同时值得注意的是,在图 8 中,对应耦合间距 $d=170 \text{ nm}$ 的透射谱线中,出现了共振劈裂的现象,这是由于工艺缺陷等因素,微环侧壁出现了类似布拉格光栅的褶皱,使得微环腔中出现互耦合现象,微环腔理论上的最佳互耦合品质因数 Q_{im} 与实际的互耦合品质因数 Q_u 存在较大差异造成的^[23],并不影响研究结论。

5 总 结

对微环谐振腔的传输性能进行了理论分析,对耦合间距与耦合系数,耦合系数与透射谱线的深度和宽度的影响进行了理论仿真。制备了不同耦合间距的微环谐振腔,并进行了耦合实验测试与数据处

理。结果显示,在 50~170 nm 的耦合间距范围内,随着间距增加,微环的耦合系数减小,耦合效率降低,3 dB 带宽变窄,品质因数增加。这一结果为 SOI 微环谐振腔的结构设计提供了依据,增强了设计的灵活性,对于滤波性能良好、高 Q 值微环谐振腔的获得具有重要的研究意义和研究价值。

参 考 文 献

- Li Shuai, Wu Yuanda, Yin Xiaojie, *et al.*. Tunable filters based on SOI microring-resonator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(8): 1143-1148.
李 帅, 吴远大, 尹小杰, 等. 基于绝缘硅的微环谐振可调谐滤波器[J]. *光子学报*, 2011, 40(8): 1143-1148.
- Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Shuisheng. Characteristic analyses of series-coupled multiple-ring resonator filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(2): 207-211.
董小伟, 裴 丽, 简水生. 集成串联环型谐振光滤波器特性的数值分析[J]. *光学学报*, 2006, 26(2): 207-211.
- Li Zhiqian, Li Xiaoyun, Sun Yuchao, *et al.*. Doubled free spectral range of single micro-ring resonator filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0723001.
李志全, 李晓云, 孙宇超, 等. 自由光谱范围加倍的单微环谐振滤波器[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0723001.
- Han Xiuyou, Wang Linghua, Wang Yu, *et al.*. Research of notch filter based on polymer micro-ring waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706006.
韩秀友, 王凌华, 王 瑜, 等. 聚合物波导微环陷波滤波器研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706006.
- S Matsuo, S H Jeong, T Segawa, *et al.*. Digitally tunable ring laser using ladder filter and ring resonator[J]. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE*, 2005, 11(5): 924-930.
- D G Rabus, Z X Bian, A Shakouri. A GaInAsP-InP double-ring resonator coupled laser [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2005, 17(9): 1770-1772.
- Y C Li, L Zhang, M P Song, *et al.*. Coupled-ring-resonator-based silicon modulator for enhanced performance [J]. *Opt Express*, 2008, 16(17): 13342-13348.
- Yan Lu, Xiao Zhisong, Zhang Feng, *et al.*. Advances of silicon-based integrated photonics devices and applications in optical gyroscope and optical communication [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(3): 547-553.
燕 路, 肖志松, 张 峰, 等. 硅基光子器件研究进展及其在光陀螺与光通信中的应用[J]. *中国激光*, 2009, 36(3): 547-553.
- Wang Shijun. Research on the Integration of the Optical Ring Resonator[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. 1-5.
王世军. 集成光学环形谐振腔的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. 1-5.
- C Kochar, A Kodi, A Louri. Proposed low-power high-speed microring resonator-based switching technique for dynamically reconfigurable optical interconnect [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2007, 19(17): 1304-1306.
- Liu Yi, Tong Xiaogang, Yu Jinlong, *et al.*. All-optical switching in silicon-on-insulator serially coupled double-ring resonator based on thermal nonlinear effect[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0205006.
刘 毅, 仝晓刚, 于晋龙, 等. 基于热非线性效应的硅基串联双微环谐振腔全光开关[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0205006.
- L Jin, M Y Li, J J He. Highly-sensitive silicon-on-insulator sensor based on two cascaded micro-ring resonators with vernier effect[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(1): 156-159.
- D Faktorová, A Savin, R Grimberg. Enhancement of waveguide sensor for biological tissues dielectric properties investigation with metamaterials[C]. *Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 2012. 544-548.
- H L Ma, X L Zhang, Z H Jin, *et al.*. Waveguide-type optical passive ring resonator gyro using phase modulation spectroscopy technique[J]. *Opt Eng*, 2006, 45(8): 080506.
- Y Z Yan, Z Ji, S B Yan, *et al.*. Integrated micro-and nano optical cavities on a chip for supersensitive sensing [C]. *International Nanoelectronics Conference (INEC)*, 2010. 783-784.
- C W Tseng, C W Tsai, K C Lin, *et al.*. Narrow gap width induced radiation loss on waveguide coupled microring[C]. *Group IV Photonics (GFP)*, 2012. 291-293.
- X Z Zheng, S B Ivan, G L Li, *et al.*. A tunable 1×4 silicon CMOS photonic wavelength multiplexer/demultiplexer for dense optical interconnects [J]. *Opt Express*, 2010, 18(5): 5151-5160.
- C W Tseng, C W Tsai, K C Lin, *et al.*. Study of coupling loss on strongly-coupled, ultra compact microring resonators [J]. *Opt Express*, 2013, 21(6): 7250-7257.
- Wang Wei, Yang Lijun, Yang Keng, *et al.*. Characteristic analysis of ultra-small silicon-on-insulator micro-ring resonator notch filter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3298-3304.
王 巍, 杨丽君, 杨 铿, 等. 超小绝缘硅微环陷波滤波器特性分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3298-3304.
- I Kiyat, C Kocabas, A Aydinli. Integrated micro ring resonator displacement sensor for scanning probe microscopies [J]. *J Micromech Microeng*, 2004, 14(3): 374-381.
- Ma Chunsheng, Qin Zhengkun, Zhang Daming. *The Design and Simulation of Waveguide Devices*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012. 70-77.
马春生, 秦政坤, 张大明. *光波导器件设计与模拟*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012. 70-77.
- Wang Shijun, Huang Yongzhen. Eight-channel add-drop microring filters on SOI wafer[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, 21(8): 1125-1128.
王世君, 黄永箴. 基于 SOI 结构的 1×8 阵列上下微环滤波器[J]. *光电子 • 激光*, 2010, 21(8): 1125-1128.
- Z Y Zhang, M Dainese, L Wosinski, *et al.*. Resonance-splitting and enhanced notch depth in SOI ring resonators with mutual mode coupling[J]. *Opt Express*, 2008, 16(7): 4621-4630.

栏目编辑: 韩 峰