

doi: 10.3788/gzxb20144302.0213004

类电磁诱导透明效应在硅基微环谐振腔中的实现与优化

王永华¹, 韦丽萍¹, 臧俊斌³, 崔丹凤¹, 李艳娜¹, 刘耀英¹, 薛晨阳^{1, 2}

(1 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

(2 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051)

(3 中北大学 朔州校区, 山西 朔州 036000)

摘 要:为在硅基光波导上实现类电磁诱导透明效应, 设计并加工了基于绝缘体上硅的串联双环结构. 通过 300 °C 到 1 200 °C 热氧化退火、缓冲刻蚀液湿法腐蚀以及 1 000 °C 高温氮气退火等波导结构的后期处理, 利用垂直光栅耦合的方式输入及输出信号, 观测到了类电磁诱导透明效应. 分析了两环间不同间距对类电磁诱导透明效应的影响, 结果表明: 工艺中单环 Q 值达到 5.1×10^4 , 类电磁诱导透明效应透明峰的带宽约为 500 MHz.

关键词: 集成光学; 硅基光波导; 热氧化退火; 垂直光栅耦合; 类电磁诱导透明; 微环谐振腔; 绝缘体上硅
中图分类号: TN252 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2014)02-0213004-5

Electromagnetically Induced Transparency-like Effect in the Optimized Silicon Micro Ring Resonators

WANG Yong-hua¹, WEI Li-ping¹, ZANG Jun-bin³, CUI Dan-feng¹, LI Yan-na¹,
LIU Yao-ying¹, XUE Chen-yang^{1,2}

(1 Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan 030051, China)

(2 Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China,
Taiyuan 030051, China)

(3 North University of China, Shuozhou, Shanxi 036000, China)

Abstract: To realize the electromagnetically induced transparency-like effect on the silicon waveguide, a double ring resonators structure based on silicon-on-insulator was designed and fabricated. By post processing of thermal oxidation annealing under the temperature from 300 °C to 1 200 °C, wet chemical etching with buffered oxide etch and N₂ annealing under the temperature of 1 000 °C, the electromagnetically induced transparency-like curve via the vertical grating coupling method was observed. The effect of different distance between the two resonators to the electromagnetically induced transparency-like curve was analyzed. The Q factor of a single ring in this fabrication was 5.1×10^4 . The measured spectral width of the transparency window was as narrow as 500 MHz.

Key words: Integrated optics; Optical waveguides; Oxidizing annealing; Vertical grating coupling; Electromagnetically Induced Transparency; Ring resonator; Silicon-on-insulator

OCIS Codes: 130.0130; 140.3945; 230.4555

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61076111)和山西省科技厅(No. 2011011013-2)资助

第一作者: 王永华(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为硅基光波导. Email: huazai@foxmail.com

导师(通讯作者): 薛晨阳(1971-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为半导体薄膜光学、新型微米纳米器件. Email: xuechenyang@nuc.edu.cn

收稿日期: 2013-10-24; 录用日期: 2013-12-05

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

电磁诱导透明 (Electromagnetically Induced Transparency, EIT)^[1] 是一种通过光场同原子组成的相互作用系统中发生的量子干涉效应. 通过 EIT 技术可以控制光速, 这种效应在量子信息处理、光信息储存以及量子通信等方面具有巨大的应用前景. 耦合谐振腔诱导透明效应^[2-7] 是通过耦合光学谐振腔的相干耦合实现类 EIT 效应. 这种光学微腔中的类 EIT 效应在光信号延迟器、光缓存器、滤波器等方面有潜在的应用价值. 在微球腔中^[3]、光纤系统中^[4] 和盘形微腔中^[5], 通过不同结构实现过光学微腔中的类 EIT 现象, 但在硅基微环谐振腔上实现类 EIT 现象的实验却不多. 主要原因是要产生类 EIT 现象, 对两环的参量准确度要求较高, 工艺的误差很容易导致类 EIT 现象的湮没, 而且测试时波导与光纤的耦合对准也是个难题, 但是对于不断朝着集成化、芯片化发展的集成光学来说, 硅基微腔又有着其它光学微腔不可比拟的优势.

绝缘体上硅结构 (Silicon-On-Insulator, SOI) 材料中硅芯层与二氧化硅的覆盖层之间具有很高的折射率差, 光被限制在很小的范围内, 器件的尺度很小, 是制造纳米光波导的理想材料^[8-16]. SOI 器件可有效减小回音壁模式 (Whispering Gallery Mode, WGM) 系统中的复杂性^[17], 并且加工技术可以和互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, COMS) 工艺相兼容^[18], 有利于光电子回路的单片集成. 本文设计加工了基于 SOI 材料的串联双微环谐振腔结构, 并进行了后期表面结构优化处理, 减小了波导损耗. 利用垂直光栅耦合输入和输出信号方式在实验中观测到了类 EIT 效应的产生, 并分析了两环之间不同间距对类 EIT 效应的影响.

1 理论分析

与 EIT 现象做类比, 在微环谐振腔系统中, 利用耦合传输理论^[19] 分析双环系统中的类 EIT 现象. 谐振系统中各处场强如图 1 所示, 整个系统的吸收率为

$$\tilde{A} \equiv 1 - \tilde{T} = \frac{\tilde{A}_2^{(\text{env})}}{1 + \tilde{F}_2 \sin^2\left(\frac{\tilde{\varphi}_1^{(\text{eff})} + \varphi_2}{2}\right)} \quad (1)$$

式中

$$\tilde{A}_2^{(\text{env})} \equiv \frac{(1-r_2^2)(1-a_2^2|\tilde{\tau}_1|^2)}{(1-r_2a_2|\tilde{\tau}_1|^2)^2} \quad (2)$$

为环 2 的包络函数.

$$\tilde{F}_2 \equiv \frac{4r_2a_2|\tilde{\tau}_1|^2}{(1-r_2a_2|\tilde{\tau}_1|^2)^2} \quad (3)$$

为环 2 的精细度, r_1, r_2 为两环的反射系数, 它表征了两环间和环与波导间的耦合及插入损耗, φ_1, φ_2 为两环的相移, 由于两环是相同的, 取 $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi, \varphi_j = \beta_j L_j$,

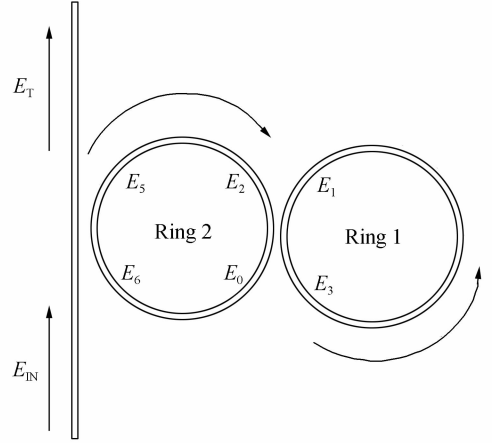


图 1 耦合双环 WGM 系统

Fig. 1 System of the two coupled WGMs

$a_j = e^{-\alpha_j L_j/2}$ 是两环的衰减因子, α_j, L_j, β_j 分别为两环的吸收系数, 腔长和传播常量, $\tilde{\tau}_1, \tilde{\tau}_2$ 分别为光经过环 1 和环 2 后的传输系数.

$$\tilde{\tau}_1 = \frac{E_2}{E_0} = \frac{r_1 - a_1 e^{i\varphi_1}}{1 - r_1 a_1 e^{i\varphi_1}}, \quad \tilde{\tau}_2 = \frac{E_T}{E_{IN}} = \frac{r_2 - a_2 \tilde{\tau}_1 e^{i\varphi_2}}{1 - r_2 a_2 \tilde{\tau}_1 e^{i\varphi_2}} \quad (4)$$

式中 $\tilde{T} = |\tilde{\tau}_2|^2$ 为整个系统的透射率.

$$\varphi_1^{(\text{eff})} \equiv \arg(\tilde{\tau}_1) = \pi + \varphi_1 + \arg\left(\frac{a_1 - r_1 e^{-i\varphi_1}}{1 - r_1 a_1 e^{i\varphi_1}}\right) \quad (5)$$

为环 1 的有效相移.

图 2 是类 EIT 效应曲线. 由图 2 可以看出整个系统的透射谱在谐振点附近产生了类似原子能级系统 EIT 现象的透明峰, 在单环系统中由于谐振, 透射率降低, 在谐振点处透射率最低, 即吸收最大. 而在双环结构中, 在谐振点处发生了透射率的谱线分裂, 在单环透射率最低点的位置出现了透射率的突变, 而在谐振波长的两边出现透射率最低波谷的现象, 在很多材料或结构中有利用价值的频率波段会正好处在吸收波段中, 这种现象的产生恰好可以打破这种限制, 使其从吸收变成透明, 这就是耦合谐振腔中的诱导透明现象.

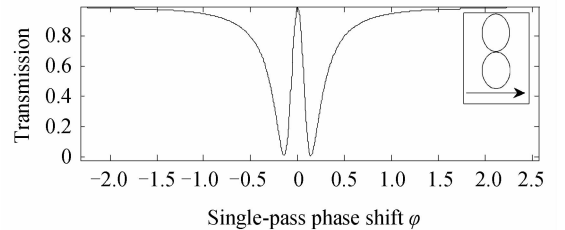


图 2 类 EIT 效应曲线

Fig. 2 The EIT-like curve

2 制备工艺

前期主要通过 SOI 基片预处理、涂覆聚甲基丙烯酸甲酯 (Polymethyl Methacrylate, PMMA) 光刻胶、电子束光刻、显影、深硅刻蚀 (Inductively Coupled Plasma, ICP)、波导芯区湿法去胶等工艺得到光波导基本结构. ICP 刻蚀技术由于结合了化学物理刻蚀方

法的优点,不但可以获得好的刻蚀方向性和选择性,而且其刻蚀速度也得到了很大提高,使得最终制备的波导陡直度将达 $(89 \pm 1)^\circ$. 后期表面结构优化处理主要步骤为 300°C 到 $1\ 200^\circ\text{C}$ 热氧化退火、缓冲刻蚀液(Buffered Oxide Etch, BOE)湿法腐蚀以及 $1\ 000^\circ\text{C}$ 高温 N_2 退火等,图3为 885°C 热氧化退火BOE湿法腐蚀和 $1\ 000^\circ\text{C}$ 高温 N_2 退火后的SEM图,由图可见波导表面粗糙度大大减小. 制备中光波导使用的SOI顶层硅的厚度为 $220\ \text{nm}$,中间层二氧化硅厚度为 $3\ \mu\text{m}$. 流片中采用的电子束光刻机为直写式JBX5500ZA, 硅刻蚀设备为STS HRM ICP (Inductively Coupled Plasma etching)深硅刻蚀机. 经过两次电子束两次刻蚀首先做出波导结构,然后在波导的输入和输出端上刻出光栅,以进行红外光的耦合输入和输出. 图3(b)是电镜下的波导结构和光栅结构. 图3中,波导宽度为 $445\ \text{nm}$,微环半径为 $20\ \mu\text{m}$,微环与波导耦合的间隙为 $151\ \text{nm}$,光栅的周期为 $600\ \text{nm}$,占空比约为 $1:1$.

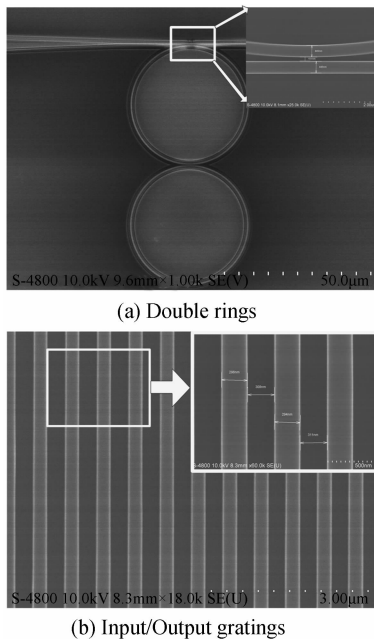


图3 扫描电镜下的微环和光栅
Fig.3 SEM of resonators and gratings

3 实验及测试分析

实验采用垂直光栅耦合输入及输出方式测试谱线特性. 首先激光器会产生 $1\ 520\sim 1\ 570\ \text{nm}$ 的红外光, 经过光纤到达波导的输入端, 光纤末端采用 75° 透镜光纤与波导输入端的光栅进行耦合, 耦合时入射角倾斜 10° 左右, 通过红外光CCD和可见光CCD对透镜光纤位置及高度进行调整, 这样能使耦合效率达到最大值. 通过光栅耦合进波导的光会与微环发生谐振, 之后产生的光谱会在输出端再次通过光栅耦合出来, 然后通过光电探测器转换为电信号, 最后在示波器上输出谱线, 实验装置如图4.

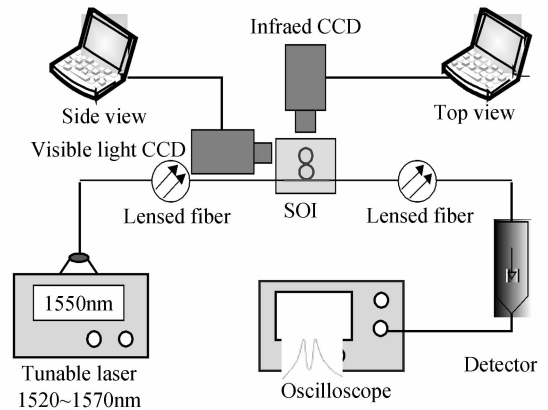
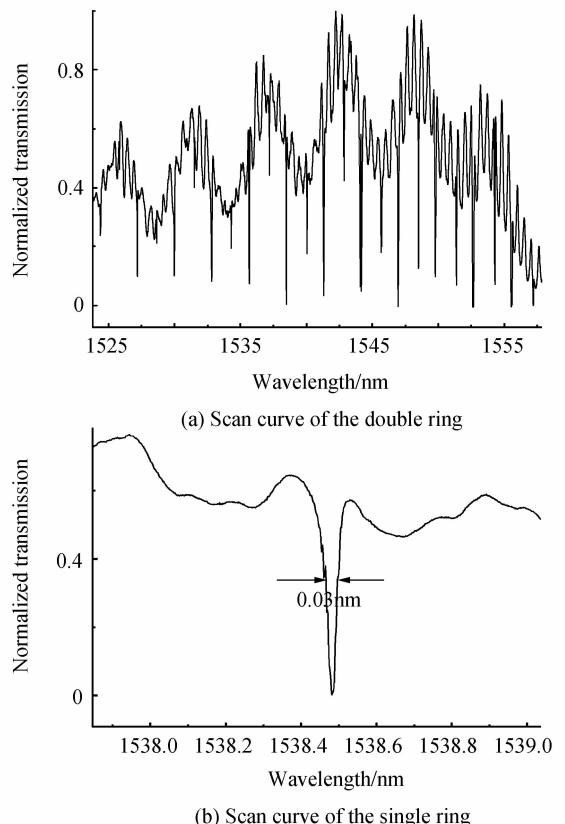
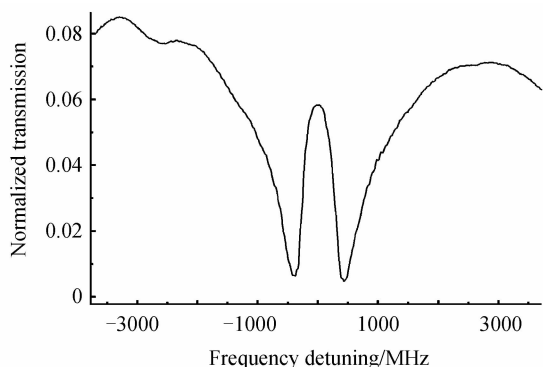


图4 测试装置
Fig.4 Experimental installation

测试所使用的激光器(New Focus TLB-6728-P)波长覆盖范围为 $1\ 520\sim 1\ 570\ \text{nm}$, 线宽小于 $200\ \text{kHz}$, 装置接通后激光器由 $1\ 520\ \text{nm}$ 开始以 $0.01\ \text{nm/s}$ 的速度进行线性扫描, 随即微环谐振腔会在特定波长处发生谐振, 输出光谱经过一个 $125\ \text{MHz}$ 低噪声光电探测器(New Focus 1811)转换后在示波器中输出, 输出谱线如图5(a).

在图5(a)中传输谱线的峰值随着波长的变化而上下波动, 这是由于光栅对不同波长红外光的吸收不同, 它反映了光波导光栅与光纤的耦合特性^[20]. 图5(b)为本文SOI中单环结构的谐振谱线, 经过波导结构优化后 Q 值为 5.1×10^4 , 而之前没做过后期处理的微环由于波导侧壁和表面粗糙度太高, Q 值最高仅为几千. 图





(c) EIT-like curve of the double ring

图5 传输谱线

Fig. 5 Transmission curve

5(c)是两环间距 $d = 151$ nm 时传输谱线,由于两环的相消干涉可以看出透射光谱产生了明显的类 EIT 现象,这是由于两环同时在此处满足了谐振方程 $2\pi Rn_{\text{eff}} = m\lambda$ 而发生了相消干涉,谐振级数 m 为 122. 此透明峰的 3 db 带宽约为 500 MHz.

为了验证两环间距对类 EIT 效应的影响,在其他参量相同的情况,分别加工了 70~400 nm 的间距,图 6(a)~图 6(f)是测量间距与测试曲线,由图 6 可以看出间距 $d = 151$ nm 时类 EIT 效应最明显,随着两环间

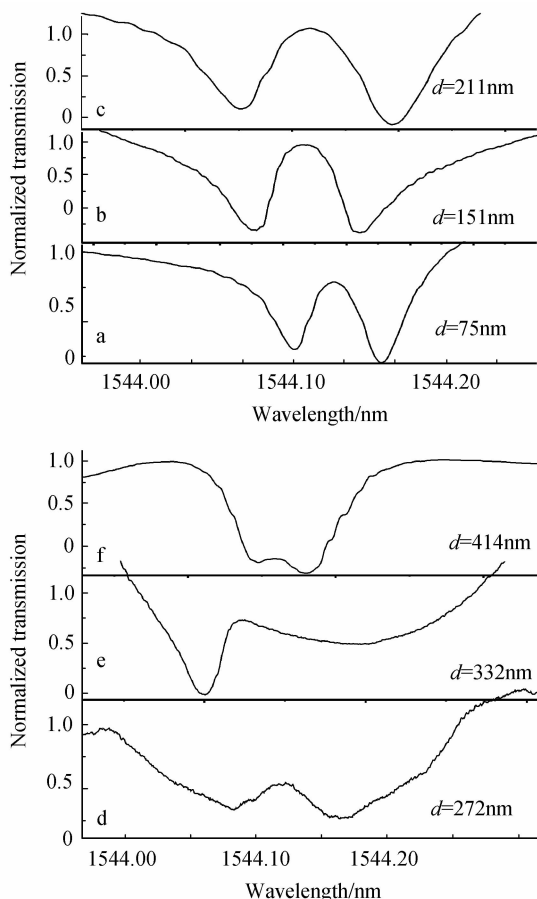


图6 两环间距对透明峰的影响

Fig. 6 The transparency window of different distance between the two resonators

距的增大,类 EIT 效应逐渐减弱,这是由于两环间的相互作用逐渐减弱,它与方程(4)中的反射系数 r 密切相关. 当间距 $d > 400$ nm 时,类 EIT 效应逐渐消失.

4 结论

本文针对硅基波导产生类 EIT 效应困难的问题,利用电子束光刻和 ICP 刻蚀技术在 SOI 材料上制备出了串联双环波导结构,并做了波导结构的后期处理,测试时利用垂直光栅耦合进行光波的输入和输出,并利用波长扫描的方式观察到了明显的类 EIT 现象,最后分析了两环的间距对类 EIT 效应的影响,工艺中用 SOI 材料制备出的微环经优化后 Q 值高达 5.1×10^4 . 这种类 EIT 效应的全光结构对于不断朝着集成化、微型化发展的集成光学具有重要的意义.

参考文献

- [1] HARRIS S E. Electromagnetically induced transparency [J]. *Physics Today*, 1997, **50**(7): 36-42.
- [2] SMITH D D, CHANG H, K A FULLER, *et al.* Coupled-resonator-induced transparency[J]. *Physical Review A*, 2004, **69**(6): 063804(1-6).
- [3] NAWEED A, FARCA G, SHOPOVA S I, *et al.* Induced transparency and absorption in coupled whispering-gallery micro resonators [J]. *Physical Review A*, 2005, **71**(4): 043804(1-4).
- [4] SMITH D D, LEPESHKIN N N, SCHWEINSBERG A. Coupled-resonator-induced transparency in a fiber system[J]. *Optics Communications*, 2006, **264**(1): 163-168.
- [5] TOTSUKA K, KOBAYASHI N, TOMITA M. Slow light in coupled-resonator-induced transparency[J]. *Physical Review Letters*, 2007, **98**(21): 213904(1-4).
- [6] YANIK M F, SUH W, WANG Zheng, *et al.* Stopping light in a waveguide with an all-optical analogue of electromagnetically induced transparency[J]. *Physical Review Letters*, 2004, **93**(23): 233903(1-4).
- [7] WANG Nan, WAN Jing, YUAN Ping. Slow-light in ring-in-ring structure based on coupled-resonator-induced transparency [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 33-36.
- [8] FÖRST M, NIEHUSMANN J, PLÖTZING T, *et al.* High-speed all-optical switching in ion-implanted silicon-on-insulator microring resonators[J]. *Optic Letters*, 2007, **32**(14): 2046-2048.
- [9] NIEHUSMANN J, VÖRCKEL A, BOLIVAR P H, *et al.* Ultrahigh-quality-factor silicon-on-insulator microring resonator[J]. *Optic Letters*, 2004, **29**(24): 2861-2863.
- [10] DUMON P, BOGAERTS W, WIAUX V, *et al.* Low-loss SOI photonic wires and ring resonators fabricated with deep UV lithography[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(5): 1328-1330.
- [11] LI Shuai, WU Yuan-da, YIN Xiao-jie, *et al.* Tunable filters based on an SOI nano-wire waveguide microring resonator [J]. *Semiconductors*, 2011, **32**(8): 084007.
- [12] IRACE A, BREGLIO G. All-silicon optical temperature sensor based on multi-mode interference[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(22): 2807-2812.
- [13] DONG Po, FENG Ning-ning, FENG Da-zeng, *et al.* GHz-bandwidth optical filters based on high-order silicon ring resonators[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(23): 23784-23789.
- [14] WANG Wei, YANG Li-jun, WU Wei, *et al.* Design of

- silicon-on-insulator ultra-small micro-ring resonator microwave photonics phase shifter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(6): 631-636.
- 王巍, 杨丽君, 武透, 等. 基于绝缘硅超小微环谐振器的微波光子相移器设计[J]. *光子学报*, 2013, **42**(6): 631-636.
- [15] LI Shuai, WU Yuan-da, YIN Xiao-jie, *et al.* Tunable filter 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.
- [16] SUN Fei, CHEN Shao-wu, YU Jin-zhong. Comparison of loss and crosstalk characteristics of SOI based intersecting waveguides with different bend structures [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11): 1649-1653.
- 孙飞, 陈少武, 余金中, 等. 不同结构 SOI 交叉波导的损耗及串扰特性研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(11): 1649-1653.
- [17] XIAO Shi-jun, KHAN M H, SHEN Hao, *et al.* A highly compact third-order silicon microring add-drop filter with a very large free spectral range, a flat pass band and a low delay dispersion[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(22): 14765-14771.
- [18] JALALI B, FATHPOUR S. Silicon photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(12): 4600 - 4615.
- [19] STOKES L F, CHODOROW M. All-single-mode fiber resonator[J]. *Optics Letters*, 1982, **7**(6): 288-290.
- [20] TAILLAERT D, BOGAERTS W. An out-of-plane grating coupler for efficient butt-coupling between compact planar waveguides and single-mode fibers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, **38**(7): 949-955.