

doi: 10.3788/lop47.051301

基于绝缘体上硅脊型纳米线光波导方向耦合器的 TE/TM 偏振分束器

王剑威 戴道锌 时尧成 杨 柳

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室光及电磁波研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要 利用有限元方法和时域有限差分方法, 优化设计了一种结构紧凑的基于绝缘体上硅脊型纳米线光波导方向耦合器的 TE/TM 偏振分束器。考虑到方向耦合器的波导间隙较小时制作工艺较为困难, 且模式失配会引入一些损耗, 因此波导间隙取约 100 nm 较为合适。通过优化脊型纳米线光波导的几何尺寸(脊高和脊宽)、耦合区波导间隙, 使得偏振分束器长度最短。数值计算结果表明经过优化的偏振分束器最短长度大约为 17.3 μm , 偏振分束器的消光比大于 15 dB 时, 波导宽度制作容差为 $-20\sim 10$ nm, 带宽约为 50 nm。

关键词 集成光学; 偏振分束器; 方向耦合器; 绝缘体上硅

中图分类号 O436 OCIS 130.5440 230.1360 文献标识码 A

Design of Compact TE/TM Polarization Beam Splitter Based on Silicon-on-Insulator Ridge Nanowire Directional Coupler

Wang Jianwei Dai Daoxin Shi Yaocheng Yang Liu

(Centre of Optical and Electromagnetic Research, State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract A compact TE/TM polarization beam splitter (PBS) based on a silicon-on-insulator (SOI) ridge nanowire directional coupler is designed and optimized by using a finite-element method (FEM) and a finite difference time domain (FDTD) method. Considering the fabrication precision and the mode mismatching loss in a directional coupler, a gap width about 100 nm is chosen. The ridge height, the ridge width and the gap of two parallel nanowires are optimized to have the shortest length for the polarization splitter. The numerical simulations show that the optimized PBS has a short length of about 17.3 μm , and the waveguide width has a fabrication tolerance of about $-20\sim 10$ nm, and the bandwidth is about 50 nm when the extinction ratios for both polarizations are larger than 15 dB.

Key words integrated optics; polarization beam splitter; directional coupler; silicon-on-insulator

1 引 言

近年来, 基于绝缘体上硅(SOI)材料的硅纳米线光波导已成为集成光学领域的研究热点。硅纳米线光波导具有折射率差大、弯曲半径小(约 2 μm)、与 CMOS 制造工艺兼容、可实现超高集成度等优点^[1,2]。目前已经研制了很多种超小尺寸硅纳米光波导器件, 如阵列波导光栅^[3,4]、微环谐振器^[5,6]、功分器^[7,8]等。偏振

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(60607012)(和浙江省自然科学基金(J20081048))资助课题。

作者简介: 王剑威(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事硅基集成光子器件及其在光通信、光传感以及光互联等方面的研究。E-mail: wangjianwei@coer.zju.edu.cn

导师简介: 戴道锌(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事硅基集成光子器件及其在光通信、光传感以及光互联等方面的研究。E-mail: dxdai@zju.edu.cn(通信联系人)

分束器(PBS)是一种很重要的器件,尤其是在偏振复用系统^[9,10]、偏振不敏感系统^[7,8]不可或缺。实现偏振分束功能的方法通常有倏逝耦合型偏振分束器^[10,11]、光栅型偏振分束器^[9, 12]、多模干涉器型偏振分束器^[13,14]等。其中倏逝耦合型偏振分束器具有结构简单、设计优化方便、尺寸小、损耗小、带宽大等优点。本文重点研究基于 SOI 纳米线光波导的超小型偏振分束器。为了优化设计方便,采用有限元方法(FEM)求解平行直波导的奇对称模和偶对称模的有效折射率,通过优化偏振分束器的结构参数,并考虑实际制作工艺以及模式失配损耗等问题,获得小型化偏振分束器。在此基础上,还利用三维时域有限差分(FDTD)对其进一步验证和修正结构参数。最后还给出了偏振分束器的频谱特性及容差分析。

2 基本原理

光波导的双折射效应主要包括材料双折射和器件横截面非对称性引起的双折射效应。对于硅纳米线光波导而言,其材料双折射效应可以忽略不计,而应主要考虑波导横截面非对称性带来的双折射。由于硅纳米线光波导的高折射率差及其亚微米横截面尺寸,其双折射效应非常显著。利用其高双折射效应有助于实现基于倏逝波耦合的超短偏振分束器。为了增强倏逝波耦合,以进一步减小器件尺寸,采用硅纳米脊型光波导结构,如图 1 所示。其中,绝缘层(SiO₂)、芯层(Si)和上包层(SiO₂)的折射率分别为 1.46, 3.455 和 1.46。偏振分束器的结构参数主要包括:芯层高 H ,脊高 h (定义比值 $R=h/H$),芯层宽度 w ,耦合区平行直波导狭缝宽度 G 以及平行直波导长度 L 。

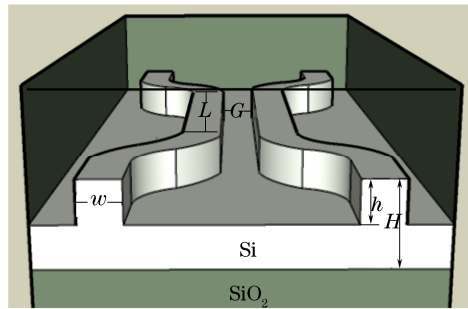


图1 基于硅纳米脊型光波导结构的偏振分束器结构示意图

Fig.1 Schematic configuration of PBS based on Ge SOI ridge nanowire directional coupler

根据传统耦合模理论,输入波导中的光能量通过倏逝场耦合到相邻波导,光能量在这两根波导之间相互耦合并遵循正弦变化规律。当光能量从输入波导完全转移到相邻波导时的波导长度称为此方向耦合器的耦合长度 L_c ,

$$L_c = \frac{\pi}{(n_e - n_o)k_0}, \quad (1)$$

式中 k_0 为真空中的波矢量大小, n_e , n_o 分别为两根平行直波导的偶对称模和奇对称模的等效折射率。由于横电模(TE)和横磁模(TM)的奇对称模和偶对称模的等效折射率各不相同,TE 偏振光和 TM 偏振光的耦合长度也不同。为了实现偏振分束,方向耦合器长度 L 应满足

$$L = mL_{c(TE)} = (m+l)L_{c(TM)}, \quad (2)$$

式中 $L_{c(TE)}$, $L_{c(TM)}$ 为 TE, TM 的耦合长度, m 为整数, l 为奇数(可取正负值)。因此,需要合理选择偏振分束器的结构参数以满足偏振分束条件。

3 计算结果及讨论

首先考虑长度为 L 的两根邻近的平行直波导。当光场从其中一条光波导输入时,会激发起奇对称模、偶对称模两个超模(supermode)。图 2 给出了 TE 和 TM 偏振的奇对称模、偶对称模(光波导参数为: $w=500$ nm,

$h=240\text{ nm}$, $H=300\text{ nm}$, $G=100\text{ nm}$)。当其狭缝宽度 G 较小($G=50\text{ nm}$)时, 由于硅纳米线的超小截面尺寸和超高折射率差, 其 TE 偏振的偶对称模表现为狭缝波导模式^[15,16], 即狭缝中光场强度增强(由于电场垂直分量不连续)。此时, 输入光场与平行直波导的超模存在一定模式失配而引起损耗^[16,17]。

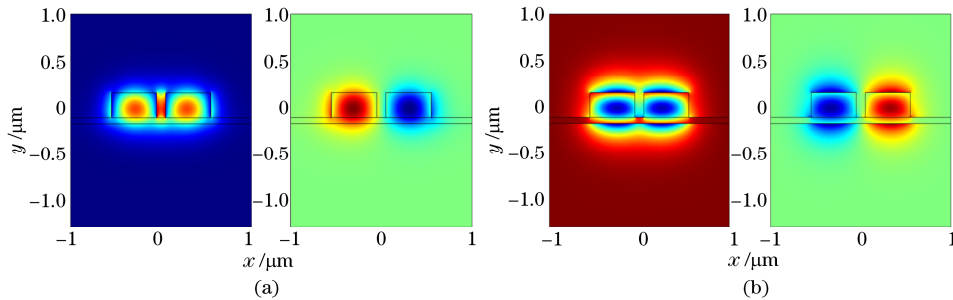


图2 两根邻近的平行直波导的偶对称、奇对称模场分布。(a)TE 偏振; (b)TM 偏振
Fig.2 Even and odd supermodes of two straight waveguides. (a)TE polarization; (b) TM polarization

采用 FDTD 方法对此模式失配损耗进行计算。图 3(a)和(b)分别为 TE 和 TM 情况下, 三维 FDTD 计算模式失配损耗随狭缝宽度变化的曲线($\Delta x=10\text{ nm}$, $\Delta y=30\text{ nm}$, $\Delta z=50\text{ nm}$)。由图可见: TM 偏振光的模式失配损耗较小, 而 TE 偏振光的模式失配损耗较大。这是因为 TE 偏振模横向电场不连续导致其失配度高于 TM 偏振模(见图 2 的模场分布)。随着狭缝宽度变小, 激发的狭缝波导模式能量越大, 因而模式损耗越大。以 500 nm 波导宽度为例, 狭缝宽度大于 100 nm 时, TE 模式失配损耗大于 0.13 dB , TM 模式失配损耗大于 0.064 dB 。图 3(c)所示为波导宽度 500 nm 时, 三维 FDTD($\Delta x=10\text{ nm}$, $\Delta y=20\text{ nm}$)和二维 FDTD 计算模式失配损耗的差异曲线。由图可知, 二维 FDTD 和三维 FDTD 的计算结果差异较小, 且随狭缝宽度变化基本保持不变($G>40\text{ nm}$)。因此, 可以利用二维 FDTD 对模式失配损耗进行大致的估算, 大大缩短了计算时间。此外, 输入输出弯曲波导的纵向长度 L_s 也会影响模式失配损耗的大小。若固定其横向距离为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$, 模式失配损耗随着 L_s 的增大而迅速减小, 如图 3(d)所示。只有当弯曲波导长度大于 $4.0\text{ }\mu\text{m}$ 时, 损耗较小且趋于稳定。因此, 偏振分束器的输入输出弯曲波导的长度选取需满足一定的长度从而使得模式失配损耗较小。

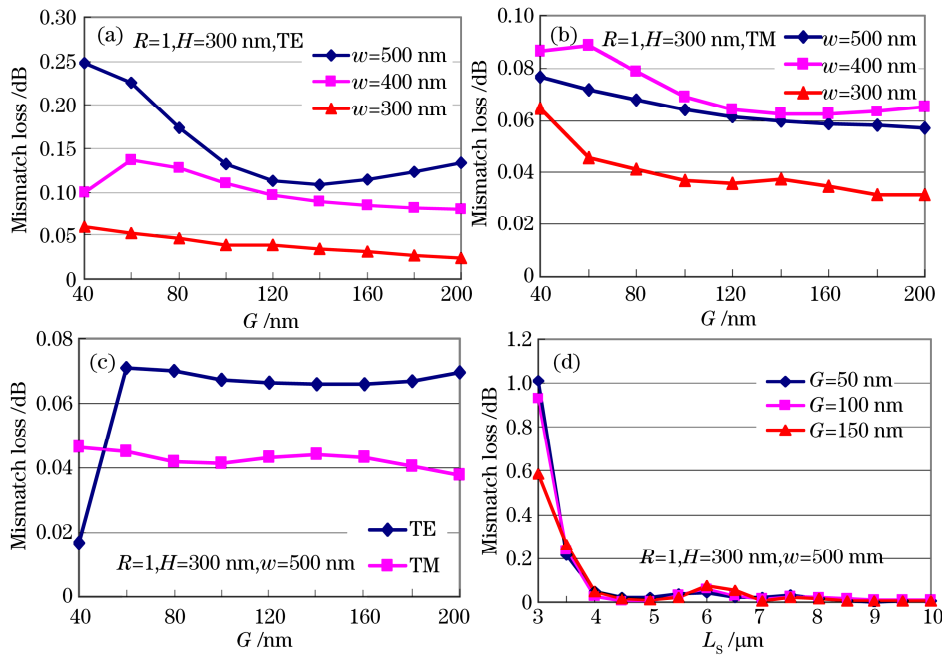


图3 不同波导宽度下 TE 偏振(a)和 TM 偏振(b)失配损耗随狭缝宽度的变化曲线。(c)利用三维 FDTD 和二维 FDTD 计算模式失配损耗差异曲线(波导宽度 500 nm); (d)模式失配损耗随 S 型弯曲波导长度 L_s 变化曲线
Fig.3 Mode mismatch loss as the gap increases for different waveguide width (3D FDTD). (a)TE; (b)TM; (c)mode mismatch loss difference between 2D FDTD and 3D FDTD(with waveguide with 500 nm); (d) mode mismatch loss as the length of the S-bend (L_s) increases

为了使脊型纳米线光波导满足单模条件, 需要合理选择波导的结构参数。参考文献[18]中的单模条件(工作波长为 1550 nm), 假设波导芯层高 $H=300$ nm。考虑到狭缝宽度小于 100 nm 时损耗较大, 且狭缝宽度越小则制作难度越高, 在此选取狭缝宽度为 100 nm。利用 FEM 模式解方法计算了 $R=0.7, 0.8, 0.9, 1$ 这 4 种情况下 TE 和 TM 偏振光的耦合长度, 如图 4(a)和(b)所示。由图可知, TM 偏振光的耦合长度小于 TE 偏振光的耦合长度, 波导宽度和波导高度比的变化对 TM 偏振光的影响均小于 TE 偏振光。

只有当器件结构参数满足(2)式才能使得 TE 和 TM 偏振分束实现, TE 和 TM 偏振光的耦合长度之比随波导宽度的变化曲线如图 4(c)所示, 这里只考虑 $L=L_{c(TE)}=2L_{c(TM)}$ 和 $L=2L_{c(TE)}=3L_{c(TM)}$ 以获得器件尺寸最小化。由图 4(c)可知, 当 $R=0.9$ 且 $w=450$ nm 时, 对应的 TE 偏振光耦合长度为 10.68 μm , TM 偏振光耦合长度为 5.34 μm , 此时, 偏振分束器长度为 10.68 μm 。利用三维 FDTD 的计算验证此结构参数下的耦合情况为($\Delta x=10$ nm, $\Delta y=30$ nm, $\Delta z=50$ nm), TE 偏振光耦合长度为 9.38 μm , TM 偏振光耦合长度为 5.34 μm 。图 4(d)为 $R=1$ 时, 利用三维 FDTD 和 FEM 两种数值方法计算的耦合长度的差别曲线。由图可知, 对于 TM 偏振光, 三维 FDTD 和 FEM 计算结果吻合得很好, 而 TE 偏振光则在波导宽度较大时略有偏差。另外, 由图 4(a)和(b)可知, TE 偏振光的耦合长度随 R 的增大而增大, 而 TM 偏振光的耦合长度随 R 的增大而减小。因此, 增加 R 值可以使得方向耦合器更好地满足偏振分束条件。例如取 $R=1$, $w=450$ nm, 三维 FDTD 计算结果为: TE 偏振光耦合长度为 11.4 μm , TM 偏振光耦合长度为 5.3 μm , 此时能更好地实现偏振分束功能, 且大大减小了器件精确控制刻蚀深度的要求。

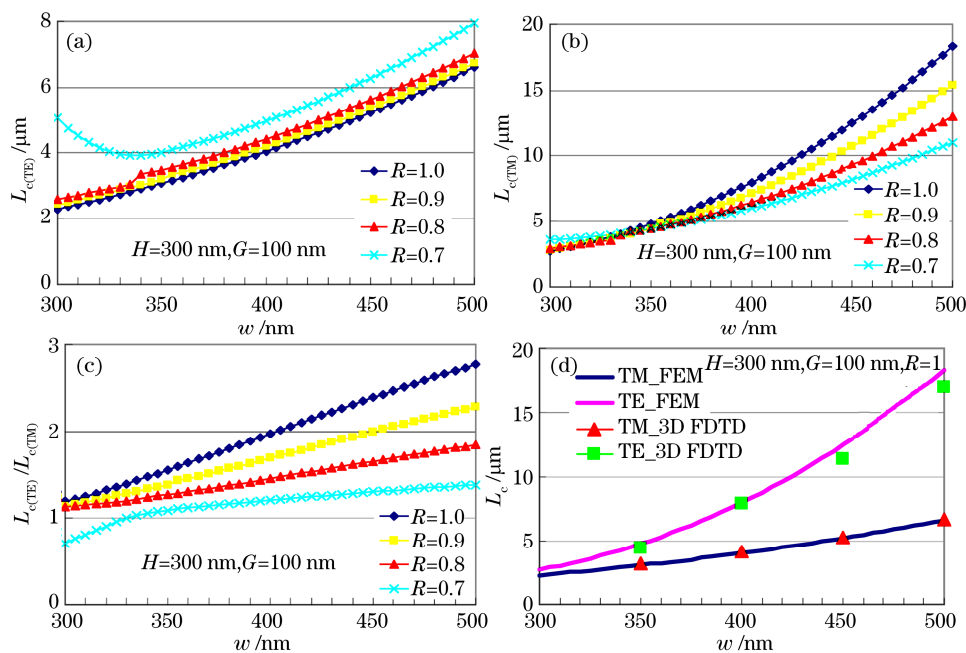


图 4 TE 偏振光的耦合长度(a), TM 偏振光的耦合长度(b)和 TE, TM 偏振光的耦合长度之比(c)随波导宽度的变化曲线; (d) 三维 FDTD 和 FEM 两种数值方法计算的耦合长度的差别曲线($R=1$)

Fig.4 Couple length as the waveguide width increases for TE (a) and TM (b) polarization; (c) couple length ratio of TE and TM as the waveguide width increases; (d) couple length difference between 3D FDTD and FEM for TE and TM

此外, 通常利用 S 型弯曲波导使 TE 和 TM 偏振光分别从不同的输出端口输出, 而相互靠近的弯曲波导之间也会发生耦合。因此, 图 1 所示的基于方向耦合器的偏振分束器需要在平行直波导偏振分束器的设计基础上, 调节直波导耦合区的长度 L , 使之满足偏振分束条件。假定 S 型弯曲波导半径为 10 μm , 弯曲角度 12° , 此时 S 型弯曲波导长度约为 4.44 μm [满足图 3(d)的条件]。图 5(a)所示为利用三维 FDTD 计算不同直波导耦合区的长度 L 时, 偏振分束器 TE/TM 的消光比变化情况。由图可知, TE, TM 的消光比峰

值略微错开。这是由于,当 $R=1$, $w=450$ nm 时,并不完全满足 $L = L_{c(TE)} = 2L_{c(TM)}$ 的偏振分束条件。当取直波导耦合区的长度 $L=8.4$ μm , TE、TM 消光比分别为 25 dB 和 27 dB, TE 偏振光的插入损耗约为 0.1 dB, TM 偏振光的插入损耗约为 0.02 dB(偏振分束器的插入损耗定义为输出光总能量与输入光总能量之比)。倘若需要进一步提高器件消光比,可以通过进一步调整结构参数来实现。

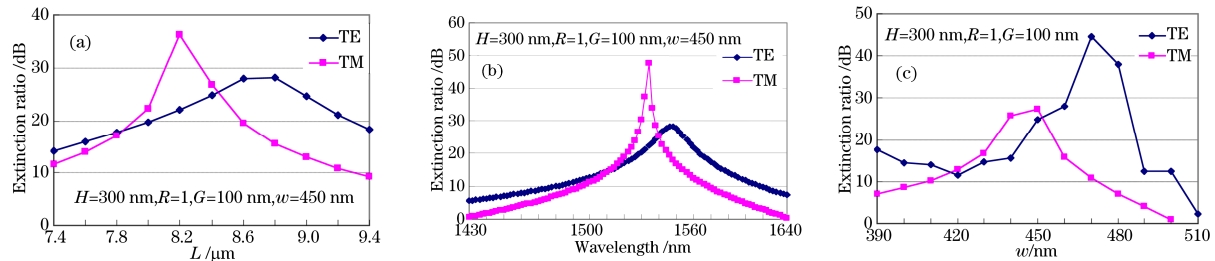


图 5 消光比随直波导耦合区长度 L (a)、波长(b)和波导宽度(c)变化曲线
Fig.5 Extinction ratio versus the length of direct coupler (a), wavelength (b) and waveguide width (c)

图 5(b)为优化设计的偏振分束器的消光比随波长的变化曲线,在 1520~1570 nm 波长范围内,两种偏振光的消光比均大于 15 dB。此外在 1470~1620 nm 波长范围内,该偏振分束器 TE 偏振光的插入损耗小于 0.2 dB, TM 偏振光的插入损耗小于 0.1 dB。图 5(c)所示为偏振分束器的消光比随波导宽度变化曲线,当波导宽度在 430~460 nm 范围内时,两种偏振消光比均大于 15 dB。利用现有电子束曝光技术可以达到这一精度要求。

4 结 论

利用 FEM 和 FDTD 方法,设计了一种结构紧凑的基于 SOI 脊型纳米线光波导的 TE/TM 偏振分束器,分析了狭缝宽度对狭缝波导模式和输入波导模式之间的模式失配损耗的影响。结果表明,当狭缝间距大于 100 nm 时模式失配损耗较小。通过优化器件结构参数,偏振分束器耦合部分长度约为 8.4 μm , TE 偏振光的插入损耗约为 0.1 dB, TM 偏振光的插入损耗约为 0.02 dB。两种偏振模式的消光比均大于 15 dB 时,波导宽度制作容差为 $-20\sim 10$ nm,带宽约为 50 nm。

参 考 文 献

- 1 W. Bogaerts, R. Baets, P. Dumon *et al.*. Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology[J]. *J. Lightwave. Technol.*, 2005, **23**(1): 401~412
- 2 T. Tsuchizawa, K. Yamada, H. Fukuda *et al.*. Microphotonics devices based on silicon. microfabrication technology[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 2005, **11**(1): 232~240
- 3 D. Dai, L. Liu, L. Wosinski *et al.*. Design and fabrication of ultra-small overlapped AWG demultiplexer based on alpha-Si nanowire waveguides[J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(7): 400~402
- 4 K. Sasaki, F. Ohno, A. Motegi *et al.*. Arrayed waveguide grating of $70*60$ μm^2 size based on Si photonic wire waveguides[J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(14): 801~802
- 5 Jan Niehusmann, Andreas Vörckel, Peter Haring Bolivar. Ultrahigh-quality-factor silicon-on-insulator microring resonator[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(24): 2861~2863
- 6 Fengnian Xia, Lidija, Sekaric and Yurii Vlasov. Ultracompact optical buffers on a silicon chip[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**: 65~71
- 7 Daoxin Dai, Sailing He. Optimization of ultracompact polarization-insensitive multimode interference couplers based on Si nanowire waveguides[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(19): 2017~2019
- 8 D. Dai, S. He. Proposal for diminishment of the polarization dependency in a Si-nanowire multimode interference (MMI) coupler by tapering the MMI section[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(8): 599~601
- 9 Wim Bogaerts, Dirk Taillaert, Pieter Dumon *et al.*. A polarization-diversity wavelength duplexer circuit in silicon-on-insulator

- photonic wires[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(4): 1567~1578
- 10 Hiroshi Fukuda, Koji Yamada, Tai Tsuchizawa *et al.*. Silicon photonic circuit with polarization diversity[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(7): 4872~4882
- 11 Isa Kiyat, Atilla Aydinli, Nadir Dagli. A compact silicon-on-insulator polarization splitter[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2005, **17**(1): 100~102
- 12 Daoxin Dai, Yaocheng Shi, Sailing He. Theoretical investigation for reducing polarization sensitivity in si-nanowire-based arrayed-waveguide grating (de)multiplexer with polarization-beam-splitters and reflectors[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2009, **45**(6): 654~660
- 13 T. K. Liang, H. K. Tsang. Integrated polarization beam splitter in high index contrast silicon-on-insulator waveguides[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(2): 393~395
- 14 Byungki Yang, Sangyung Shin, Daming Zhang. Ultrashort polarization splitter using two-mode interference in silicon photonic wires[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(7): 432~434
- 15 Vilson R. Almeida, Qianfan Xu, Carlos A. Barrios *et al.*. Guiding and confining light in void nanostructure[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(11): 1209~1211
- 16 Fengnian Xia, Lidija Sekaric, Yurii A. Vlasov. Mode conversion losses in silicon-on-insulator photonic wire based racetrack resonators[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(9): 3872~3886
- 17 Zhechao Wang, Ning Zhu, Yongbo Tang *et al.*. Ultracompact low-loss coupler between strip and slot waveguides[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(10): 1498~1550
- 18 Daoxin Dai, Zhen Sheng. Numerical analysis of silicon-on-insulator ridge nanowires by using a full-vectorial finite difference method mode solver[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(11): 2853~2859