

硅基纳米波导的双模干涉

王智 张丽梅 陈颖川 王健

(北京交通大学光信息科学与技术研究所, 发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要 硅基(SOI)波导是近年集成光电子和集成波导的重要方向。对硅基纳米波导进行数值计算,讨论了空气包层和 SiO₂ 包层两种情况的双模传输特性,得到两种包层结构的双模工作区域和双模拍长与波导结构的关系。研究了 SOI 纳米波导中双模干涉现象以及双折射和温度对双模干涉的影响。

关键词 光电子学;硅基波导;模式截止;双模干涉;拍长

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0705003

Two Mode Interference for Nano SOI Waveguides

Wang Zhi Zhang Limei Chen Yinchuan Wang Jian

(Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education,
Institute of Optical Information, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract The cutoff properties of some lower-order modes of some nano silicon-on-insulator (SOI) waveguides with air cladding or SiO₂ cladding are analyzed. Operation regimes of no mode, single mode, and two modes are obtained and demonstrated by using the cutoff wavelength and the waveguide width. The beat length, between the two modes with the same polarization in the two-mode regime, are shown as a function of the waveguide parameters. Two-mode interference and the effects of the birefringence as well as the temperature are discussed to show the potential applications of the SOI waveguides.

Key words optoelectronics; silicon-on-insulator waveguides; mode cutoff; two mode interference; beat length

OCIS codes 250.5300; 130.0250

1 引言

人们已经利用光纤型双模干涉仪实现了模式变换、光开关、温度检测和电压监测等功能^[1~5],但是,光纤型的结构易受环境温度、湿度和应力等影响,工作不稳定。因此,人们开始关注基于集成波导结构的双模干涉仪。硅基(SOI)波导因其具有模场束缚能力强、集成度更高、与 CMOS 工艺兼容等优点^[6~8]得到广泛而深入的研究,是目前光电子集成领域较有前景的一种波导,被广泛用于无源、有源光电子器件的单片集成和混合集成^[6,7,9,10]。从现有文献报道看,关于单模传输特性^[11~15]、基模双折射特性^[16~20]等基本内容已经有大量研究,关于多模特性尤其是多模干涉(MMI)^[21]的理论与应用研究较多,但是关于双模特性的研究较少。

Ruege 等^[21]利用双模直波导和单模环形腔耦合,研究谐振输出谱的线型与双模传输特性的关系,获得了 Fano 线型输出谱,同时研究了谱线形状与耦合系数、两个输入模式的相对功率分布和相对相位差的关系,并在 SiO₂ 衬底上采用光刻工艺研究聚合物波导及器件的传输特性。

Li 等^[22]在 Si 衬底上制作 SiGe 波导,研究了基于双模干涉和自由载流子等离子体色散效应的双模干涉型波导光开关,包括单模输入/输出 Y 分支脊型波导和双模干涉波导,得到双模区波导宽度是单模区的 2 倍,最快开关时间达到 30 ns。

但是,仍然没有详尽的关于双模传输特性和双模干涉特性的研究报道。本文通过对硅基纳米波导进行大量数值计算,分别讨论了空气包层和 SiO₂ 包

收稿日期: 2012-02-01; **收到修改稿日期**: 2012-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(61077048)、北京市自然科学基金(4092031)和基本科研业务费(2009JBM103)资助课题。

作者简介: 王智(1971—),男,博士,教授,主要从事光纤通信、集成光电子器件和全光信号处理等方面的研究。

E-mail: zhiwang@bjtu.edu.cn

层两种情况的双模工作区域和双模干涉拍长与波导结构的关系,研究波导结构、双折射和环境温度对双模干涉过程的影响。

2 硅基纳米波导

2.1 波导结构与模式

研究的硅基纳米波导基本结构如图 1 所示。SOI 晶片的 Si 厚度为 H , 即波导高度, 目前广泛研究的 SOI 晶片有几种不同的厚度, 如 220、500、700 nm 等。利用成熟的光刻工艺即可制作宽度为 W 的波导。制作的波导通常直接暴露在空气中, 或者覆盖氧化层 SiO_2 。本文对这两种不同包层情况分别讨论, SiO_2 和 Si 的折射率分别取为 $n_{\text{SiO}_2} = 1.445$ 和 $n_{\text{Si}} = 3.45$ 。

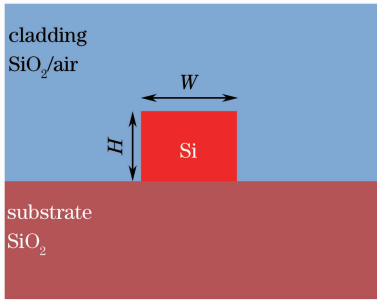


图 1 硅基纳米波导结构

Fig. 1 Structure of nano SOI waveguide

取波导高度 $H = 300$ nm, 宽度 $W = 1.0$ μm , 利用 Comsol 软件设置完美匹配层 (PML) 边界, 图 2 是包层为空气、波长 $\lambda = 1550$ nm 时几个低阶束缚模的模场分布, SiO_2 包层结构的模场分布与图 2 非常相近, 不重复列出。本文采用的模式命名方式与普通矩形波导类似, 为简单起见, 仍用 TE 和 TM 表示两组不同模式, 模式标号为从 0 开始的整数。本

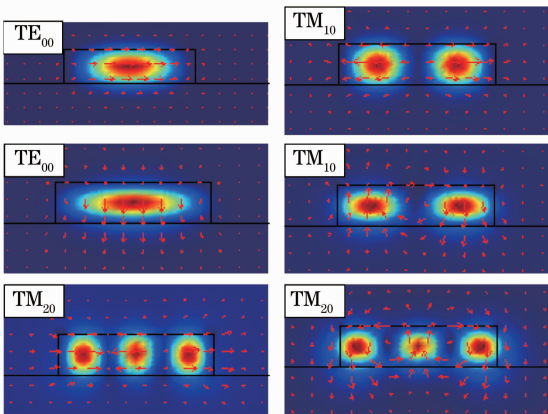


图 2 几个低阶模式场分布

Fig. 2 Mode pattern of some lower-order modes

文将重点讨论基模双折射 L_{00} 和两个偏振态的双模拍长 L_{TE} 和 L_{TM} , 定义为

$$L_{00} \equiv \frac{\lambda}{|n_{\text{TE}_{00}} - n_{\text{TM}_{00}}|}, L_{\text{TE}} \equiv \frac{\lambda}{n_{\text{TE}_{00}} - n_{\text{TE}_{10}}},$$

$$L_{\text{TM}} \equiv \frac{\lambda}{n_{\text{TM}_{00}} - n_{\text{TM}_{10}}}, \quad (1)$$

按照 Maxwell 方程的比例性质^[23,24], 将拍长对波导高度进行归一化, 可得比例性质为

$$\frac{L_{00}(\lambda, MW, MH)}{MH} = \frac{L_{00}(\lambda/M, W, H)}{H},$$

$$\frac{L_{\text{TE, TM}}(\lambda, MW, MH)}{MH} = \frac{L_{\text{TE, TM}}(\lambda/M, W, H)}{H}. \quad (2)$$

2.2 双模传输特性

通过数值计算, 得到几个较低阶模式的截止波长与波导结构的关系, 将它们对波导高度 H 归一化, 得到如图 3, 4 所示的结果。为简洁, 将本文关注的各区域分别编号, 如表 1 所示。区域 A 内 TE 和 TM 基模均截止, 因此区域 A 内的波导不支持任何束缚模式。区域 B1 内 TM 基模仍截止, TE 基模是唯一的导模, 区域 B2 内 TM 基模是唯一导模, 因此, 区域 B1 和 B2 内波导工作在单模单偏振状态, 非常适合于对偏振态稳定性要求很高的器件, 或者用于偏振态的控制。区域 B 内两个偏振态的基模都成为束缚模, 是通常的单模区域。区域 C1 内 TE_{10} 模成为导模, 区域 C2 内 TM_{10} 模成为导模, 因此, C1 和 C2 分别代表 TE 偏振和 TM 偏振的双模状态。区域 C 内两个偏振的一阶模都是导模, 更高阶模式仍截止, 因此, 区域 C 代表两个偏振态同时存在的双模工作状态, 可以通过偏振控制实现某一偏振的双模工作。

绝大多数文献都是讨论某个波长 (如 1310 nm 或 1550 nm) 的单模条件, 本文给出的模式截止波长与波导结构的关系具有更普遍意义。例如, 要讨论某波长 λ 的单模条件, 对不同的波导高度 H , 可以算出归一化截止波长 λ/H , 从而可以得到单模条件对应的波导归一化宽度 W/H , 继而得到不同波导高度时波导宽度 W 的取值范围。

图 3(a)、(b) 分别显示空气包层硅基纳米波导的 TE 偏振和 TM 偏振的归一化拍长等高线。显然, 波导归一化宽度越大, L_{TE} 和 L_{TM} 越大, 波长越小时 L_{TE} 和 L_{TM} 越大。在图中所示的双模区域 C1、C2 和 C 内, 大部分位置的两个偏振拍长 L_{TE} 和 L_{TM} 都与波导高度有相同量级 (归一化拍长小于 10), 如果 $H = 220$ nm, 拍长大约为亚微米或微米量级。

表 1 各区域编号对应的波导工作模式(单模和双模工作区域)
Table 1 Codes of no mode, single mode and two mode operation regimes

Regions	A	B1	B2	B	C1	C2	C	
Operation regimes	TE ₀₀		TM ₀₀	TE ₀₀ + TM ₀₀		TE ₀₀ + TE ₁₀ + TM ₀₀	TM ₀₀ + TM ₁₀ + TE ₀₀	TE ₀₀ + TE ₁₀ + TM ₀₀ + TM ₁₀
Mode amount	No mode		Single mode		Two mode of TE pol.		Two mode of TM pol.	

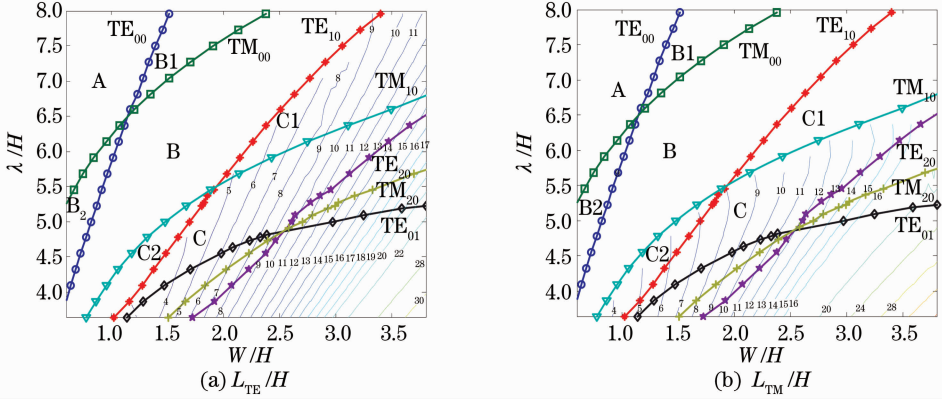


图 3 空气包层双模归一化拍长

Fig. 3 Normalized beat length of air cladding nano SOI waveguides

图 4(a)、(b)分别给出了 SiO₂ 包层硅基纳米波导的 TE 偏振和 TM 偏振的归一化拍长等高线。SiO₂ 包层没有 C2 区域,即没有单一的 TM 双模工作状态。C1 和 C 双模工作区域内,拍长 L_{TE}、L_{TM}大

约比波导高度大 1 个量级(归一化拍长为 10 左右),若 H=220 nm,拍长大约为数微米。显然,与空气包层结构类似,波导归一化宽度增大,归一化拍长就越大。

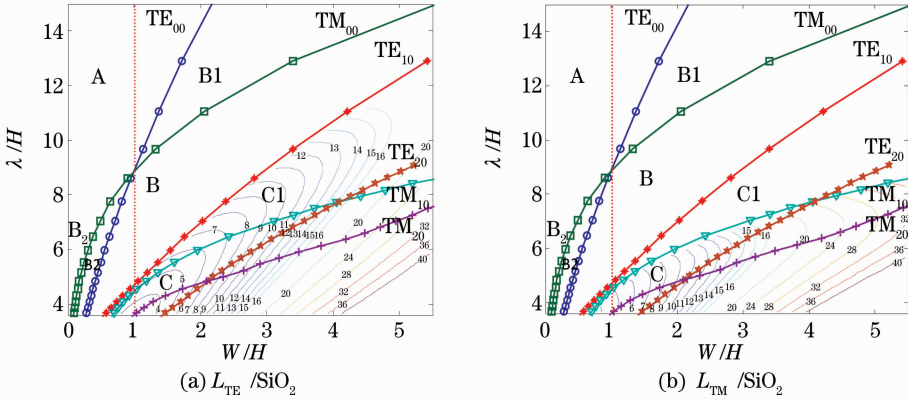


图 4 SiO₂ 包层双模归一化拍长

Fig. 4 Normalized beat length of SiO₂ cladding nano SOI waveguides

但是,归一化拍长随波长的变化关系稍复杂一些。图 4 的等高线都有一个拐弯的极值点,也就是说,对于某一宽度的波导,存在一个波长,此波长处的拍长最小。图 5 给出从图 4 读出的 TE 和 TM 偏振的拍长极小处的波长和波导宽度,并按幂函数分别拟合:

$$(\lambda/H)_{TM} = 4.111 \times (W/H)^{0.361}, \quad R^2 = 0.992 \quad (3a)$$

$$(\lambda/H)_{TE} = 3.398 \times (W/H)^{0.730}, \quad R^2 = 0.998 \quad (3b)$$

3 双模干涉

3.1 双模干涉现象

假定波导工作在 TE 双模区域 C1 或 C 区 (TM: C2 或 C, 以下讨论同样成立),波导输入端激

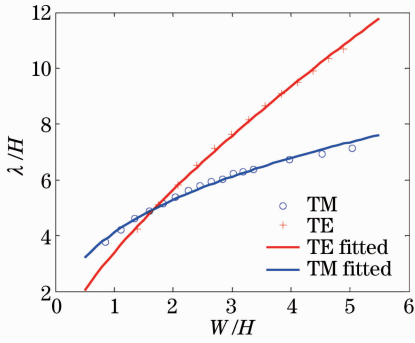


图 5 拍长极小时的波长与波导宽度的关系

Fig. 5 Relationship between the wavelength and the waveguide width when the two-mode beat length is minimum

励的 TE_{00} 和 TE_{10} 电场峰值幅度相同,那么在波导中传输时,由于这两个模式的传输常数不同,即它们之间的拍长 L_{TE} 约微米量级,波导中的总场光斑沿波导传输方向周期性变化。图 6 是波导高度 $H=220\text{ nm}$ 、波导宽度 $W=780\text{ nm}$ 、包层为空气、工作波长 $\lambda=1550\text{ nm}$ 时(工作在 C1 区域,支持 3 个束缚模式 TE_{00} 、 TE_{10} 和 TM_{00})双模干涉的空间光场图样沿传输方向按相位关系周期性变化的情况。如果观察波导横截面内部分区域的光功率,将得到它随波导长度周期变化的结果。如没有特别说明,本文用波导左半区域内总光功率的变化来描述空间双模干涉结果。

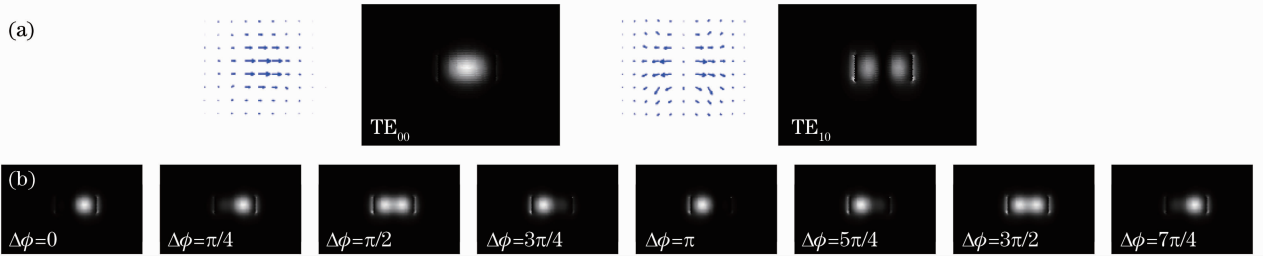


图 6 双模干涉空间光场图样随相位差的变化。(a)输入端 TE_{00} 和 TE_{10} 模式的电场和光斑;(b)双模干涉图样随 TE_{00} 和 TE_{10} 模之间相位差的变化

Fig. 6 Electric field and mode pattern of the two-mode interference. (a) Electric field and pattern of TE_{00} and TE_{10} at the input facet; (b) spatial pattern of the two-mode interference varies with the phase difference between TE_{00} and TE_{10}

3.2 双折射对双模干涉的影响

如果波导中同时支持 TE_{00} 、 TE_{10} 和 TM_{00} 、 TM_{10} 这两个偏振的双模传输,那么干涉光斑图样的变化将受到基模双折射的影响。本文以 $H=300\text{ nm}$ 、 $W=780\text{ nm}$ 的空气包层结构为例,温度 $T=25^\circ$ 、 $\lambda=1550\text{ nm}$ 时,波导仅支持上述 4 个束缚模式, $L_{TE} \approx 2.77\text{ }\mu\text{m}$, $L_{TM} \approx 3.46\text{ }\mu\text{m}$, $L_{00} \approx 3.27\text{ }\mu\text{m}$ 。图 7 给出波导左半区域输出光功率与波导长度的变化关系。显然,单一偏振的双模干涉时,光功率变化规律简单且按各自的拍长周期性变化,但是,如果波导中存在两个偏振态的双模干涉,输出会成为它们之间的拍变化,非常不利于反映波导长度方向的变化。因此,双模干涉结构用于光开关或检测时,一般只允许单一偏振态存在,以提高开关比或检测灵敏度。

3.3 温度对双模干涉的影响

Si 的折射率温度系数约为 $2 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$,比 SiO_2 约高 2 个数量级,因此,对基于 Si 基波导的温度控制引起了人们的重视,如对波导进行温度调谐^[25]、测温等。图 8(a) 给出不同波导宽度时拍长 L_{TE} 、

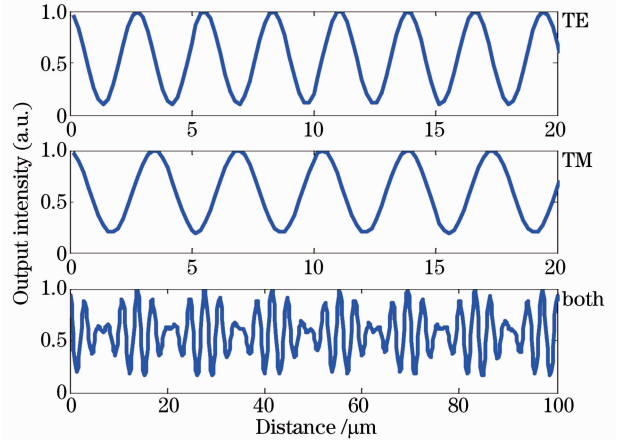


图 7 双模干涉输出光功率与波长长度变化的关系

Fig. 7 Optical power in the left half cross-section varies with the distance along the waveguide for different polarizations

L_{TM} 和 L_{00} 随温度的变化,波导高度 $H=300\text{ nm}$,宽度 W 从 570 nm 变到 780 nm ,间隔 30 nm ,图中箭头方向表示宽度增大的方向。图 8(b) 给出不同温度时拍长随波导宽度变化情况,因温度变化引起的拍长变化很小,因此,图中不同温度的数据几乎重

合。尽管如此,也使输出端检测到的光功率发生明显变化。

图 9 为温度变化时,左半区域光功率变化情况,波导结构与图 7 相同,图 9(a)和(b)的波导长度分别为 1 mm 和 1 cm。显然,单偏振双模干涉时,温

度变化灵敏度很高,而两个偏振态共同传输时检测到的光功率灵敏度大幅降低。因为相位变化是传输光路的累积效应,所以长度为 1 cm 的波导的灵敏度是 1 mm 的 10 倍。

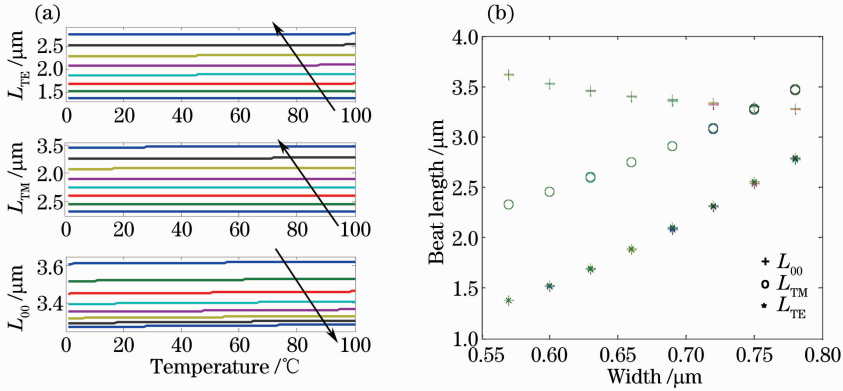


图 8 双模干涉拍长与(a)温度和(b)波导宽度的关系

Fig. 8 Dependence of the beat length of the two-mode interference on the temperature (a) and the waveguide width (b)

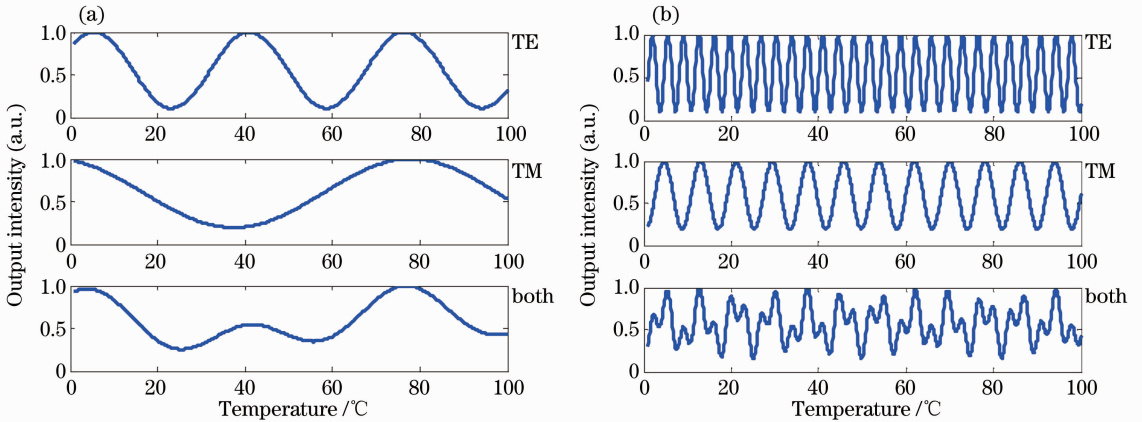


图 9 干涉输出光功率(左半区域)随温度的变化

Fig. 9 Optical power detected in the left half cross-section at the output facet as a function of the temperature

4 结 论

在大量数值计算的基础上,讨论了空气包层和 SiO_2 包层两种硅基纳米线波导的双模工作区域与波导结构的关系。得到 TE 双模、TM 双模和二者共存这三种不同双模工作状态下双模拍长与波导结构的关系,一般情况下,双模拍长为微米或亚微米量级。最后,讨论了硅基波导中的双模干涉现象,研究了双模干涉输出与双折射和温度的关系,对实现集成波导型的温度、应变等敏感元件具有重要的理论意义。

参 考 文 献

1 W. Jin, Z. Wang, J. Ju. Two-mode photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(6): 2082~2088

2 Z. Wang, J. Ju, W. Jin. Properties of elliptical-core two-mode fiber[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(11): 4350~4357
 3 K. Bohnert, P. Pequignot. Inherent temperature compensation of a dual-mode fiber voltage sensor with coherence-tuned interrogation[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(4): 598~604
 4 A. M. Vengsarkar, W. C. Michie, L. Jankovic *et al.*. Fiber-optic dual-technique sensor for simultaneous measurement of strain and temperature [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(1): 170~177
 5 J. Ju, Z. Wang, W. Jin *et al.*. Temperature sensitivity of a two-mode photonic crystal fiber interferometric sensor[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(20): 2168~2170
 6 D. Liang, J. E. Bowers. Recent progress in lasers on silicon[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(8): 511~517
 7 D. Liang, G. Roelkens, R. Baets *et al.*. Hybrid integrated platforms for silicon photonics[J]. *Materials*, 2010, **3**(3): 1782~1802
 8 Chen Yuanyuan. Silicon-on-Insulator Optical Waveguide Devices

- [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010
陈媛媛. SOI 光波导器件[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010
- 9 Y. Kang, H. D. Liu, M. Morse *et al.*. Monolithic germanium/silicon avalanche photodiodes with 340 GHz gain-bandwidth product[J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**(1): 59~63
 - 10 H. Rong, A. Liu, R. Jones *et al.*. An all-silicon Raman laser [J]. *Nature*, 2005, **433**(20): 292~294
 - 11 R. A. Soref, J. Schmidtchen, K. Petermann. Large single-mode rib waveguides in GeSi and Si-on-SiO₂ [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(8): 1971~1974
 - 12 K. Petermann. Properties of optical rib-guides with large cross-section[J]. *Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik*, 1976, **30**: 139~140
 - 13 S. P. Pogossian, L. Vescan, A. Vonsovici. The single-mode condition for semiconductor rib waveguides with large cross section[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(10): 1851~1853
 - 14 O. Powell. Single-mode condition for silicon rib waveguides[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(10): 1851~1855
 - 15 J. Lousteau, D. Furniss, A. B. Seddon *et al.*. The single-mode condition for silicon-on-insulator optical rib waveguides with large cross section [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(8): 1923~1929
 - 16 L. Vivien, S. Laval, B. Dumont *et al.*. Polarization-independent single-mode rib waveguides on silicon-on-insulator for telecommunication wavelengths [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **210**: 43~49
 - 17 D. Dai, Y. Shi, S. He. Characteristic analysis of nanosilicon rectangular waveguides for planar light-wave circuits of high integration[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(20): 4941~4946
 - 18 M. M. Milosević, P. S. Matavulj, B. D. Timotijević *et al.*. Design rules for single-mode and polarization-independent silicon-on-insulator Rib waveguides using stress engineering [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(13-16): 1840~1846
 - 19 D. Dai, S. He. Analysis of the birefringence of a silicon-on-insulator rib waveguide [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(5): 1156~1159
 - 20 D. Dai, J. E. Bowers. Novel ultra-short and ultra-broadband polarization beam splitter based on a bent directional coupler[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(19): 18614~18620
 - 21 A. C. Ruege, R. M. Reano. Sharp fano resonances from a two-mode waveguide coupled to a single-mode ring resonator[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(20): 2964~2968
 - 22 B. Li, S. Chua. Two-mode interference photonic waveguide switch[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(7): 1685~1690
 - 23 J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Winn. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light[M]. New York: Princeton University Press, 1995
 - 24 W. Zhi, J. Jian, W. Jin *et al.*. Scaling property and multi-resonance of PCF-based long period gratings[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6252~6257
 - 25 H. Chen, A. W. Fang, J. D. Peters *et al.*. Integrated microwave photonic filter on a hybrid silicon platform[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 2010, **58**(11): 3213~3219

栏目编辑: 韩 峰