

硅纳米槽微环谐振器温度特性研究

宋世娇 安俊明 赵雷 吴远大 胡雄伟

(中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点实验室, 北京 100083)

摘要 理论上模拟分析了硅基绝缘(SOI)槽波导微环谐振腔加盖 SiO₂ 包覆层情况下的温度稳定特性。对比了槽微环和纳米线微环,以及不同结构的槽微环谐振腔的温度稳定性。得到在室温下,5 μm 半径槽微环在 1.55 μm 附近的谐振波长随温度变化为 0.049 nm/°C,而相同温度、半径以及折射率情况下纳米线微环谐振波长随温度变化为 0.092 nm/°C,是槽微环的 1.88 倍。而且改变槽微环的槽宽和两侧 Si 条的宽度也会对微环的温度特性有影响,增加槽宽或者减小 Si 条宽度都会使谐振波长随温度的变化进一步减小。通过采用负温度系数聚合物材料 WIR30-490 和优化槽波导的结构参数,使得温度对微环谐振波长的影响降低到 0.0023 nm/°C。

关键词 集成光学;槽波导;微环;温度稳定性

中图分类号 TN252

OCIS 130.3120 230.3120 230.7370 230.7408

文献标识码 A

Temperature Characteristics of Slot-Waveguide Ring Resonators

Song Shijiao An Junming Zhao Lei Wu Yuanda Hu Xiongwei

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract The temperature stability of the slot-waveguide ring resonators which are based on silicon on insulator (SOI) and embedded with SiO₂ is simulated and analyzed theoretically. The temperature dependence of the nano-wire ring, slot-waveguide ring, and the slot rings with different structure parameters are compared. In room temperature, near the wavelength of 1.55 μm, the temperature dependence of the 5 μm-radius slot waveguide ring is 0.049 nm/°C, while the temperature dependence of the nano-wire ring is 0.092 nm/°C at the same case, which is 1.88 times of that of the slot-waveguide ring. The widths of the slot and Si will also affect the temperature characteristic of the slot-waveguide ring resonators, when the slot width increases or the Si width decreases, the slot-waveguide ring resonators' temperature dependence will decrease further. By using negative temperature coefficient material WIR 30-490 and optimizing the structure parameters of the slot waveguide, the temperature dependence of the resonate wavelength has decreased to 0.0023 nm/°C

Key words integrated optics; slot waveguides; micro-ring; temperature stability

1 引言

基于硅基绝缘(SOI)的光波导器件成为近些年广大科研人员的研究热点,由于在这种基片中作为波导芯层的硅与埋氧层 SiO₂ 之间的高折射率差,可以在波导中实现强的光学限制,从而大大减小了光学器件的尺寸,随着平面微纳加工工艺的不断提高,硅纳米线微环已经可以大规模集成制作^[1],这提高了器件的集成度,降低了成本。光微环谐振器作为集成光学中一个非常重要的元件,具有谐振原理简单稳定,器件尺寸极小,容易与其他光电子器件进行光学芯片上的集成等优点。微环结构不仅制作简单,而且其应用也相当广泛,除了基本的滤波特性^[1],还可以作为传感器,调制器,光开关和慢光器件,甚至在光子晶体等领域也有重要应用^[2~6]。

收稿日期: 2010-08-19; 收到修改稿日期: 2010-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(60776057,60837001,60877014)和国家 863 计划(2006AA03Z420)资助课题。

作者简介: 宋世娇(1985—),女,硕士研究生,主要从事光波导理论与器件设计等方面的研究。

E-mail: songshijiao@semi.ac.cn

导师简介: 安俊明(1969—),男,博士,副研究员,主要从事硅基光波导及 PLC 混合集成方面的研究。

E-mail: junming@semi.ac.cn

而槽波导结构能将准 TE 模式的近 40% 的光功率^[7]限制在中间低折射率的槽中,使得其微环结构相比于纳米线的微环结构又有许多特殊的性质。槽波导微环的有效折射率小于纳米线微环的有效折射率,有较宽的自由光谱范围;槽微环还对槽内材料的变化有更大的灵敏性,可以作为传感器件探测填充到槽内材料的变化^[8]。作为滤波器和传感器都要求器件有较好的热稳定特性,普通的纳米线波导微环,由于硅材料具有较高的热光系数(折射率随温度的变化),使得硅纳米线微环的谐振光谱会随环境温度的改变有较大的移动,器件的热稳定性较差,而槽波导微环的光场有很大一部分是限制在槽内传播,温度对其谐振光谱的影响就会大大减小。本文对 SOI 基硅纳米线微环和槽微环的温度稳定性进行了对比,对不同结构参数情况下的槽微环谐振器的温度稳定性进行了分析,对硅槽微环结构的设计和应用具有重要的指导意义。

2 理论模型结构

理论模型采用 SOI 材料,顶层 Si 厚度 $H=320$ nm,室温下折射率设为 3.47,与衬底 Si 之间的 SiO_2 的厚度为 $1\ \mu\text{m}$,室温下折射率设为 1.45。槽微环结构如图 1 所示,以圆心与圆周槽波导的中心之间的距离作为中心半径, $R=5\ \mu\text{m}$;直波导与微环的波导参数相同,槽波导两侧 Si 条的宽度相同 $W_h=180$ nm,槽宽 $W_s=120$ nm,直波导与微环之间的距离 $G=200$ nm。

采用有效折射率算法(EIM)与二维时域有限差分方法(FDTD)^[9,10]相结合的方法对不同结构进行模拟。格点选择: $\Delta x=10$ nm, $\Delta z=10$ nm。边界条件:完全匹配层(PML)吸收边界条件。通过 input 端输入一个以 $1.55\ \mu\text{m}$ 为中心波长有限频谱范围的无限长脉冲信号到微环结构的直波导,部分耦合进微环,部分从 through 端输出,耦合进微环的光功率在微环右侧又有一部分耦合到 drop 端输出,光脉冲在微环中经过多次循环,分别在 through 端和 drop 端监视到的光场随时间的变化 $\varphi(t)$ 。对 through 端和 drop 端监视到的随时间变化的光场进行傅里叶变换得到最终的微环的 through 端和 drop 端的谐振光谱:

$$\varphi(\omega) = \int \varphi(t) \exp(-i\omega t) dt. \quad (1)$$

3 结果与讨论

Si 材料在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处的热光系数在温度 $300\sim 600$ K 时的经验公式为^[11]

$$\frac{dn}{dT} = 9.45 \times 10^{-5} + 3.47 \times 10^{-7} \times T - 1.49 \times 10^{-10} \times T^2 + \dots (\text{K}^{-1}), \quad (2)$$

式中 T 为热力学温度,单位是 K。而 SiO_2 在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处折射率随温度的变化关系为^[12]

$$\frac{dn}{dT} = 0.53 \times 10^{-5} + 1.8 \times 10^{-8} \times T + \dots (\text{K}^{-1}), \quad (3)$$

微环的温度从室温 $27\ ^\circ\text{C}$ (即 $T=300$ K) 上升 $100\ ^\circ\text{C}$ 时, Si 材料的折射率变化约为 0.01852 , 而 SiO_2 的折射率变化约为 0.00107 , 于是近似认为室温下 Si 的折射率随温度线性变化为 $1.852 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, SiO_2 的折射率随温度线性变化为 $1.07 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。而且 Si 和 SiO_2 的热膨胀系数均为 10^{-6} 量级, $100\ ^\circ\text{C}$ 的温度变化对结构的几何参数影响很小,可以忽略。

首先对比并分析了槽微环和纳米线微环的谐振谱随温度改变的移动情况。其中槽微环的结构参数如上所述,而纳米线微环的波导宽度为 450 nm,直波导与微环之间的距离为 250 nm,波导层厚度同样为 320 nm,微环半径为 $5\ \mu\text{m}$ 。

图 2 是不同温度情况下在槽和纳米线微环的 through 端监测到的光谱图, T_0 是室温情况下的光谱图, $\Delta T=100\ ^\circ\text{C}$, $T_0+\Delta T$ 是上升 $100\ ^\circ\text{C}$ 之后的光谱图。两种结构的谐振波长随器件温度的升高产生了红移,图 2(a)为槽微环的谐振谱移动情况,波长从 $1.5623\ \mu\text{m}$ 移动到 $1.5672\ \mu\text{m}$, $\Delta\lambda=4.9$ nm,而同样温度情况

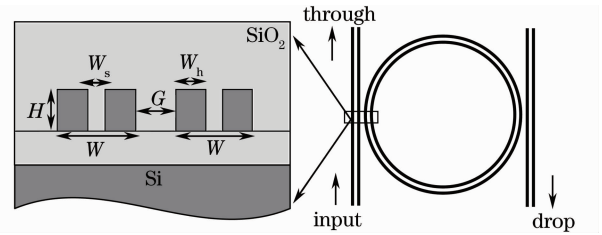


图 1 槽微环的截面及平面示意图

Fig. 1 Sectional and plane view of the slot-waveguide ring resonator

下,图 2(b)Si 纳米线波导的波长从 $1.5495 \mu\text{m}$ 移动到了 $1.5587 \mu\text{m}$, $\Delta\lambda = 9.2 \text{ nm}$, 是槽微环的 1.88 倍。

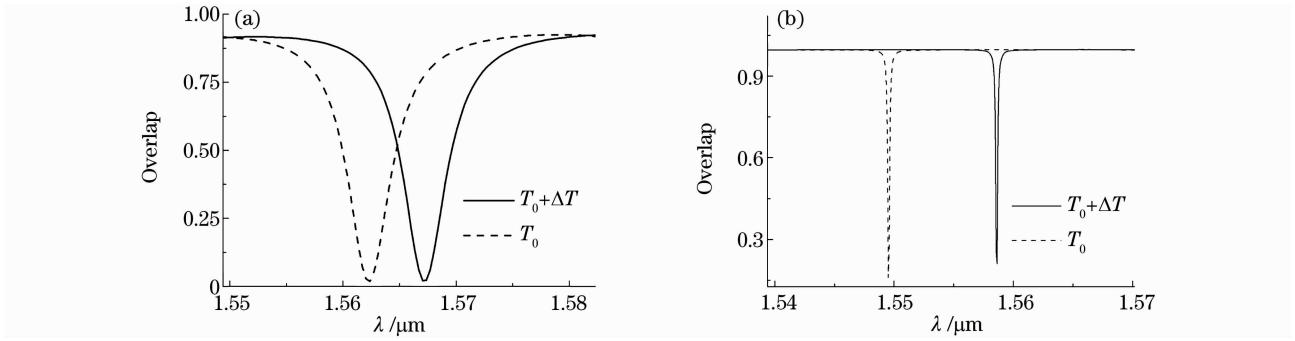


图 2 室温 T_0 和升温 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 之后 $T_0 + \Delta T$ 情况下槽微环(a)和纳米线微环(b)的光谱图

Fig. 2 Resonator spectra of the slot ring (a) and nano-wire ring (b) in room temperature (T_0) and after increasing the temperature by $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_0 + \Delta T$)

图 3 是槽微环以及纳米线微环从室温 $27 \text{ }^\circ\text{C}$ 逐渐升高 $10 \text{ }^\circ\text{C}$, $30 \text{ }^\circ\text{C}$, $60 \text{ }^\circ\text{C}$, $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 情况下, $1.55 \mu\text{m}$ 附近谐振波长漂移量随温度变化的关系。可以看出槽微环和纳米线微环的波长漂移量随温度的增加而增加,且槽波导微环的波长漂移量随温度变化的斜率远小于纳米线微环。

根据微环的谐振条件

$$m\lambda_m = 2\pi R n_{\text{eff}}, \quad (4)$$

式中 λ_m 是微环的谐振波长, m 是对应谐振波长 λ_m 在微环中稳定存在时的周期数, R 是微环半径, n_{eff} 是微环的有效折射率。由(4)式知,对于同一级次的谐振波长, m 相同,波长漂移量由微环的有效折射率的变化决定,波长移动与微环的有效折射率的变化以及温度变化之间的关系为

$$\Delta\lambda_m = \frac{2\pi R}{m} \Delta n_{\text{eff}} = \frac{2\pi R}{m} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} \Delta T. \quad (5)$$

Si 纳米线波导光场主要限制在 Si 内, Si 的热光系数较大,温度变化对 Si 的折射率影响大,从而对整个微环的有效折射率影响大,根据(5)式可知温度对谐振波长的影响也较大。

而槽波导在两侧的 Si 内引入了一个低折射率的槽,由于槽波导可以将相当部分光功率限制在槽内 SiO_2 中, SiO_2 的热光系数要小于 Si 的热光系数,所以当温度升高时,槽微环的有效折射率变化量就小于纳米线波导的有效折射率的变化量,因此同样温度变化条件下,槽微环的波长漂移量就小于纳米线微环。

另外还对相同 SOI 基片,相同半径 $R = 5 \mu\text{m}$,不同 W_h 和 W_s 的槽波导微环的温度特性进行了分析。图 4 为温度在室温以及升高 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 情况下, $1.55 \mu\text{m}$ 附近的同级次槽微环谐振波长的改变量。图 4(a)为微环的槽宽 W_s 均为 120 nm , W_h 分别为 $160, 180, 200, 220, 240 \text{ nm}$,图 4(b)微环的 W_h 均为 180 nm ,改变 W_s 分别为 $60, 80, 100, 120, 140 \text{ nm}$ 。可以看出,谐振波长的漂移量会随着 W_h 的增加或者 W_s 的减小而变大,这是因为增加 W_h 和减小 W_s 都会使得限制在槽内的 SiO_2 中的光功率减少,而 Si 条内的光功率比例增大, Si 的热光系数大于 SiO_2 的热光系数,升高相同温度情况下,微环中更大比例的光功率受温度的影响变大,也就导致整个微环的温度稳定性变差。

由模拟得出的谐振谱,可以确定谐振波长 λ_m ,由 λ_m 连续输入情况下在环中形成的稳定的周期数可以得到 m ,再由(4)式,可以得到微环的有效折射率 $n_{\text{eff}} = 2\pi R / m\lambda_m$,从而得到不同谐振波长的有效折射率在升高 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 情况下的变化量,如图 5 所示。观察图 5 可以得到, W_s 增加或者 W_h 减小都会使得微环在升高相同温度情况下有较小的有效折射率的改变,波长的漂移量减小,微环的温度稳定性进一步改善。模拟结果与前面的理论分析相符。

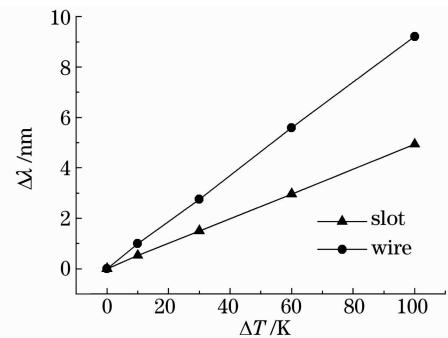


图 3 槽微环和纳米线微环 $1.55 \mu\text{m}$ 附近的谐振波长随温度的改变

Fig. 3 Temperature dependences of the resonate wavelength of the slot ring and the nano-wire ring near $1.55 \mu\text{m}$

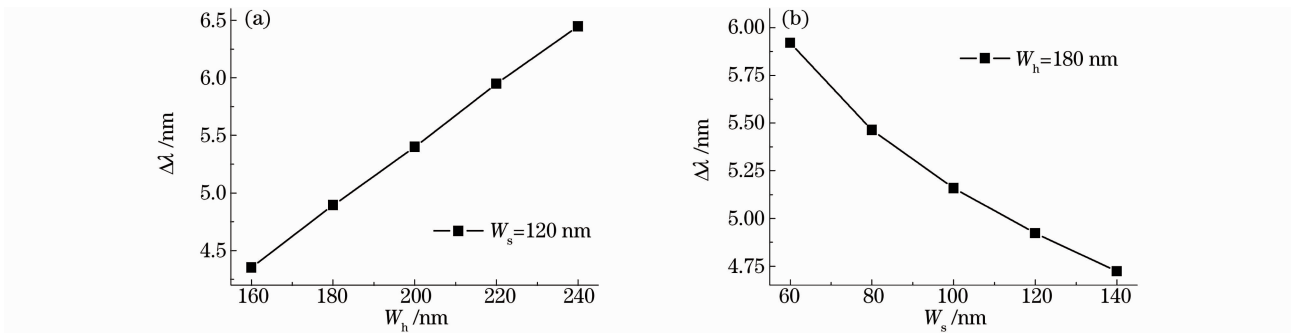


图 4 1.55 μm 附近不同结构参数情况下,温度升高 100 $^{\circ}\text{C}$,谐振波长漂移量的变化

Fig. 4 Resonate wavelengths near 1.55 μm of the slot ring resonators with different structure parameters shift after increasing temperature by 100 $^{\circ}\text{C}$

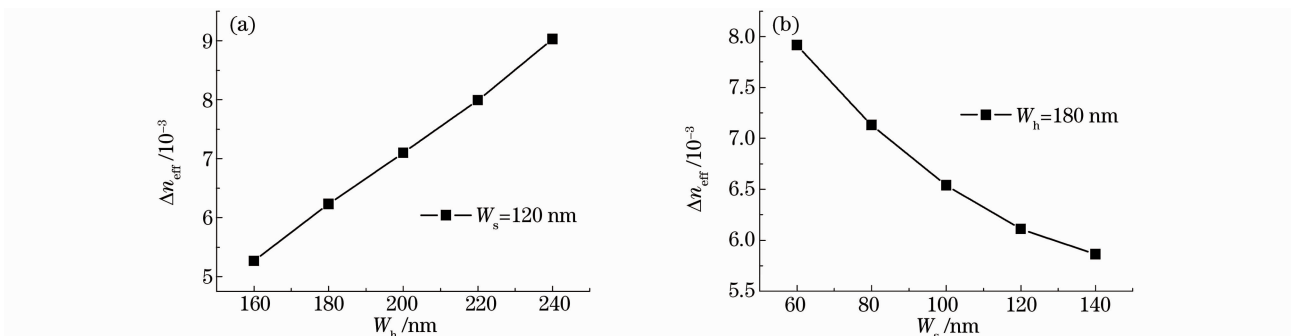


图 5 温度升高 100 $^{\circ}\text{C}$ 时,不同结构的槽微环谐振波长对应的有效折射率的改变

Fig. 5 n_{eff} of the resonate wavelengths near 1.55 μm of the slot ring resonators with different structure parameters shift after increasing temperature by 100 $^{\circ}\text{C}$

如果用负温度系数的材料作为槽波导的覆盖层还可以对其进行温度补偿,从而实现温度不敏感器件。这里采用了文献[13]中提到的一种(聚全氟丙烯酸)紫外固化树脂的材料 WIR30-490,这种材料在室温下的折射率为 1.49,热光系数为 $-1.8 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 。通过模拟优化得到,当槽波导及微环的 $W_h = 230$ nm, $W_s = 60$ nm 的情况下,波长随温度的变化关系减小到 0.0023 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。

4 结 论

理论研究了工作环境温度的改变对槽波导微环的影响,结果表明,槽波导微环结构的温度稳定性优于纳米线波导微环结构。通过增大槽的宽度 W_s 和减小槽波导中 Si 条的宽度 W_h 进一步降低了温度对槽微环的影响,但是减小 W_h 和增大 W_s 都很可能使弯曲波导的损耗增大,所以应该考虑到实际应用来确定波导的优化参数。另外,采用负温度系数材料作为波导的覆盖层可以更有效地对器件进行温度补偿,适当调节波导的结构参数甚至可以使温度对器件的影响降为零。

参 考 文 献

- 1 Shijun Xiao, Maroof H. Khan, Hao Shen *et al.*. Multiple-channel silicon micro-resonator based filters for WDM applications[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(12): 7489~7498
- 2 N. A. Yebo, D. Taillaert, J. Roels *et al.*. Silicon-on-insulator ring resonator based integrated optical hydrogen sensor[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(14): 960~962
- 3 Vishnupriya Govindan, Steve Blair. Nonlinear pulse interaction in microresonator slow-light waveguides[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(12): C23~C30
- 4 Long Chen, Kyle Preston, Sasikanth Manipatruni *et al.*. Integrated GHz silicon photonic interconnect with micrometer-scale modulators and detectors[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(17): 15248~15256
- 5 Benjamin G. Lee, Aleksandr Biberman, Nicolás Sherwood-Droz *et al.*. High-speed 2-2 switch for multiwavelength silicon-

- photonic networks-on-chip[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(14): 2900~2906
- 6 Minming Geng, Lianxi Jia, Lei Zhang *et al.*. Four-channel reconfigurable optical add-drop multiplexer based on photonic wire waveguide[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(7): 5502~5516
- 7 Q. F. Xu, V. R. Almeida, R. R. Panepucci *et al.*. Guiding and confining light in void nanostructures[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(11): 1209~1211
- 8 Tom Claes, Jordi Girones Molera, Katrien De Vos *et al.*. Label-free biosensing with a slot-waveguide-based ring resonator in silicon on insulator[J]. *IEEE Photon. J.*, 2009, **1**(3): 197~204
- 9 Fang Junxin, Gao Zhuangqi, Yang Fuzi. Physical Foundation of Optical Waveguide Technology[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1987. 51~60
方俊鑫, 曹庄琪, 杨傅子. 光波导技术物理基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1988. 51~60
- 10 Allen Taflove, Susan C. Hagness. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method [M]. 2nd edition, London: Artech House, 2000
- 11 G. Cocorullo, F. G. D. Corte, I. Rendina. Temperature dependence of the thermo-optic coefficient in crystalline silicon between room temperature and 550 K at the wavelength of 1523 nm[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(22): 3338~3340
- 12 Achyut K. Dutta, Niloy K. Dutta, Masahiko Fujiwara. WDM Technologies Passive Optical Components Colume II [M]. San Diego: Academic Press, 2003. 155
- 13 Jong-moo Lee, Duk-jun Kim, Gwan-ha Kim *et al.*. Controlling temperature dependence of silicon waveguide using slot structure[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 1645~1652