

文章编号: 1004-4213(2010)01-0100-5

# 聚合物波导微环谐振器的无热化设计\*

韩秀友<sup>a,c</sup>, 张佳宁<sup>a,c</sup>, 金婷婷<sup>a,c</sup>, 王凌华<sup>a,c</sup>, 赵明山<sup>a,c</sup>, 王锦艳<sup>b,c</sup>, 蹇锡高<sup>b,c</sup>

(大连理工大学 a. 物理与光电工程学院; b. 化工学院 高分子材料系; c. 光子技术研究中心, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**从波导微环谐振器的谐振方程出发, 推导出了波导微环谐振器的无热化条件和谐振波长温度依赖特性表达式, 分析了硅衬底 PSQ 聚合物波导微环谐振器滤波功能的温度特性. 通过选择合适的聚合物衬底来取代传统的硅衬底, 可极大地减小聚合物波导微环谐振器的温度敏感性, 给出了聚合物衬底选择的方法. 研究表明, 所设计的全聚合物波导微环谐振器, 在温度从 20~65 °C 范围内谐振波长漂移量最大值为 -0.008 5 nm, 温度依赖波长漂移率最大值为 -0.000 90 nm/K, 实现了无热化.

**关键词:** 聚合物波导微环谐振器; 温度依赖性; 无热化; 热光系数; 热膨胀系数

**中图分类号:** TN252

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103901.000

## 0 引言

波导微环谐振器具有优异的滤波性能、紧凑的结构、高度的集成性等优点, 以它为主体可以构成各种不同功能的集成光子学器件, 如色散补偿器、光分插复用器、陷波滤波器、高速调制器、光开关、波导传感器等, 在实现新一代全光通信系统和集成光学传感器系统中, 具有十分重要和广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>. 由于聚合物材料具有成本低、制备工艺简单、易于集成、折射率易调控等优点, 基于聚合物材料的波导微环谐振器及其功能器件的设计与制备成为近年来聚合物集成光子学领域研究的热点<sup>[3-8]</sup>.

波导微环谐振器的性能紧密地依赖于器件的温度敏感性或热稳定性<sup>[9-12]</sup>. 通常在硅衬底上制备的聚合物波导微环谐振器, 由于硅衬底的热膨胀系数较小 ( $\sim 2.63 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), 无法补偿聚合物波导材料较大的负热光系数 ( $-10^{-4} \text{ K}^{-1}$  量级), 因此硅衬底聚合物波导微环谐振器的温度依赖波长漂移率较大 ( $-0.1 \sim -0.3 \text{ nm} \cdot \text{K}^{-1}$ ), 对环境温度的变化非常敏感, 这将大大影响波导微环谐振器的性能. 要实现硅衬底聚合物波导微环谐振器的无热化工作, 则需要外加温控装置, 而这将增加系统的复杂性和成本. 如果在聚合物波导微环谐振器的设计过程中就可以消除温度的依赖性, 进而实现聚合物波导微环谐振

器的无热化工作, 这将是实用和十分必要的.

聚合物材料除了具有较大的负热光系数外, 还具有较高的正热膨胀系数 ( $\sim 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ )<sup>[13]</sup>, 通过选择合适的聚合物材料作为衬底取代传统的硅衬底从而构成全聚合物波导微环谐振器, 利用聚合物材料正热膨胀系数与负热光系数之间的补偿<sup>[14]</sup>, 可实现聚合物波导微环谐振器的无热化工作.

本文首先从波导微环谐振器的谐振方程出发, 推导出波导微环谐振器的无热化条件和谐振波长温度依赖特性的表达式. 以 PSQ 聚合物波导微环谐振器为研究对象, 分析了硅衬底聚合物波导微环谐振器的温度特性, 表明该器件对温度的变化十分敏感, 温度变化会引起谐振波长较大的漂移. 然后采用聚合物材料衬底取代硅衬底, 分析了全聚合物波导微环谐振器的温度特性, 给出了聚合物衬底材料的优化选择方法. 通过合理选择一定热膨胀系数的聚合物衬底材料使得聚合物波导微环谐振器的温度依赖漂移率由硅衬底的  $-0.228 5 \text{ nm} \cdot \text{K}^{-1}$  减小到全聚合物结构的  $-0.000 90 \text{ nm} \cdot \text{K}^{-1}$ , 在 20~65 °C 范围内的基本上实现了无热化工作.

## 1 波导微环谐振器的无热化条件和温度特性

波导微环谐振器由环形波导和直波导耦合构成, 其环波导可以是圆环形, 也可以是跑道形, 谐振条件均可表示为<sup>[15]</sup>

$$n_{\text{eff}}L = m\lambda_R \quad (1)$$

式中  $n_{\text{eff}}$  为波导导模的有效折射率,  $L$  为环形波导的周长,  $m$  为谐振级数 ( $m=1, 2, 3, \dots$ ),  $\lambda_R$  为谐振光波的波长 (亦可称为中心波长). 波导微环谐振器对温

\* 国家自然科学基金 (60807015, 60577014)、教育部高校博士点新教师基金 (200801411037)、大连理工大学青年教师培养基金 (893210) 和大连理工大学引进人才启动基金 (893322) 资助

Tel: 0411-84706492

Email: xiuyouhan@gmail.com

收稿日期: 2008-12-03

修回日期: 2009-01-09

度的依赖关系可以通过将式(1)两边分别对温度  $T$  求得

$$\frac{d\lambda_R}{dT} = \frac{L}{m} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + \frac{n_{\text{eff}}}{m} \frac{dL}{dT} \quad (2)$$

对于谐振波长满足公式(1),因此波导微环谐振器谐振波长随温度的漂移率为

$$\frac{d\lambda_R}{dT} = \frac{\lambda_R}{n_{\text{eff}}} \left( \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + n_{\text{eff}} \alpha_{\text{sub}} \right) \quad (3)$$

式中  $\alpha_{\text{sub}} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT}$  为衬底材料的热膨胀系数 (Coefficient of Thermal Expansion, CTE). 因为波导微环谐振器的芯层和包层都是在衬底上形成的,与这些介质层相比,通常衬底都是很厚的,当温度发生变化时,整个波导的热膨胀主要是由衬底的热膨胀引起的,因此微环谐振器的热膨胀特性依赖于衬底材料的热膨胀系数.

要使波导微环谐振器的谐振波长不随温度的变化而漂移,就是要使式(3)的右边为 0,因此波导微环谐振器的无热化条件为

$$\frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + n_{\text{eff}} \alpha_{\text{sub}} = 0 \quad (4)$$

通常聚合物光波导材料的热光系数  $dn/dT$  为  $\sim -10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ,因此只有选择具有正热膨胀系数的衬底材料和合适的波导结构,才可能实现波导微环谐振器无热化.

将式(3)变形,使其两边分别为谐振波长  $\lambda_R$  和波导有效折射率  $n_{\text{eff}}$  对温度  $T$  的关系式,然后对温度从  $T_0$  到  $T$  进行积分,整理可得

$$\lambda_R = \frac{\lambda_{R0}}{n_{\text{eff0}}} n_{\text{eff}} \exp [\alpha_{\text{sub}} (T - T_0)] \quad (5)$$

式中  $\lambda_{R0}$  和  $n_{\text{eff0}}$  分别为参考温度  $T_0$  下波导微环谐振器的谐振波长及其导模的有效折射率.由式(5)可得温度变化引起谐振波长的漂移量为

$$\Delta\lambda_R = \lambda_R - \lambda_{R0} = \frac{\lambda_{R0}}{n_{\text{eff0}}} \{ n_{\text{eff}} \exp [\alpha_{\text{sub}} (T - T_0)] - n_{\text{eff0}} \} \quad (6)$$

## 2 硅衬底聚合物波导微环谐振器的温度依赖性

以本课题组研发的聚合物 PSQ<sup>[16]</sup> 为波导微环谐振器芯层和包层的材料作为研究对象,PSQ 聚合物波导材料的热光系数为  $-2.2 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ . 综合考虑波导材料的折射率、波导材料损耗以及波导弯曲损耗、散射损耗、单模传输等对波导微环谐振器光学特性的影响,本文设计了跑道形微环谐振器<sup>[17]</sup>,结构如图 1,其具体结构参量为:芯层折射率  $n_{\text{core}} = 1.52$ ,包层折射率  $n_{\text{cladding}} = 1.45$ ,波导宽度  $W =$

$3 \mu\text{m}$ ,波导高度  $H = 1.8 \mu\text{m}$ ,弯曲波导半径  $R = 400 \mu\text{m}$ ,耦合区直波导长度  $L = 52 \mu\text{m}$ ,直波导间距  $\text{Gap} = 1 \mu\text{m}$ , $1550 \text{ nm}$  附近交叉强度耦合系数为  $\kappa = 0.21202$ ,波导表面粗糙度取为  $0.05 \text{ nm}$ ,相关长度  $0.15 \text{ nm}$ . 相应的损耗分别为:弯曲损耗为  $0.0048 \text{ dB/cm}$ ,模式匹配损耗为  $0.12 \text{ dB}$ ,散射损耗为  $0.43 \text{ dB/cm}$ ,材料损耗取为  $0.7 \text{ dB/cm}$ ,则总的周损耗为  $0.45 \text{ dB}$ .

通常聚合物光波导器件制备于硅衬底上,硅材料的热膨胀系数为  $\alpha_{\text{sub}} = 2.63 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ <sup>[9]</sup>. 取温度  $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  为参考温度,根据以上给出的跑道形波导微环谐振器的参量计算基于硅衬底的聚合物波导微环谐振器在不同温度下的谐振波长及下载端口 (Drop port) 的输出光谱绘于图 2. 由图可以看出随着温度的升高,谐振波长向短波方向漂移,这是由于

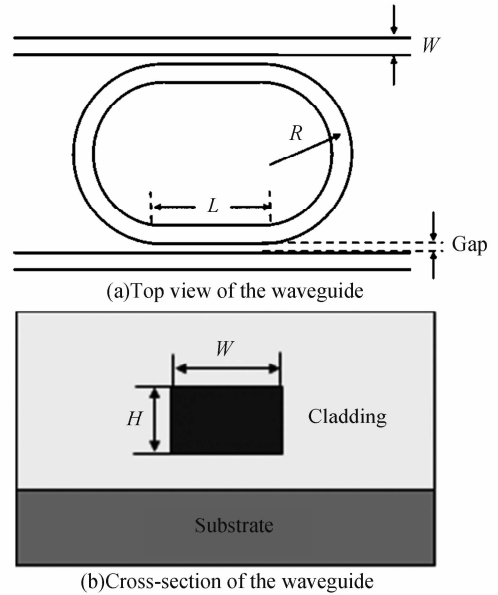


图 1 跑道形波导微环谐振器结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of racetrack waveguide microring resonator

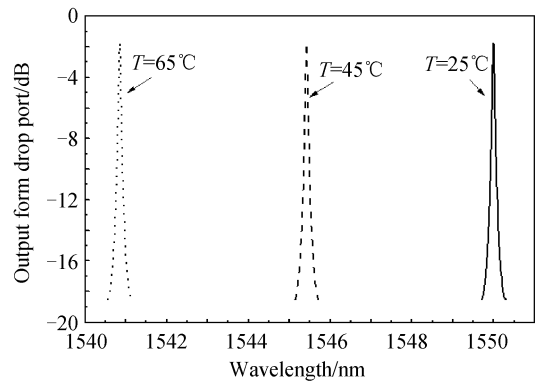


图 2 硅衬底聚合物波导微环谐振器在不同温度下的谐振输出光谱

Fig. 2 Resonant output spectrum of silicon substrate polymer waveguide microring resonator at different temperatures

聚合物波导材料具有负的热光系数造成的,温度升高使得波导有效折射率减小,由式(1)可以看出具有相同谐振级数的谐振波长将会减小. 温度  $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $T=45\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $T=65\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,谐振波长的漂移量分别为  $0\text{ nm}$ 、 $-4.571\text{ }25\text{ nm}$  和  $-9.143\text{ }21\text{ nm}$ .

图 3 给出了硅衬底聚合物波导微环谐振器谐振波长漂移量  $\Delta\lambda_R$  及温度依赖谐振波长漂移率  $d\lambda_R/dT$  随温度变化的关系曲线. 由图 3 可以看出在温度从  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  变化到  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  的过程中,聚合物波导微环谐振器的谐振波长的漂移量  $\Delta\lambda_R$  为  $+1.14\text{ nm}$  ~  $-9.1\text{ nm}$ ,谐振波长随温度变化的漂移率基本保持不变,约为  $-0.228\text{ }5\text{ nm}\cdot\text{K}^{-1}$ . 由此可以看出,基于硅衬底的聚合物波导微环谐振器对温度的变化非常敏感;如果该器件用于温度的传感检测时,则具有较高的传感灵敏度;然而在用于光学滤波时,外界环境温度的微小变化将会引起滤波中心波长的漂移,从而影响到器件的滤波性能.

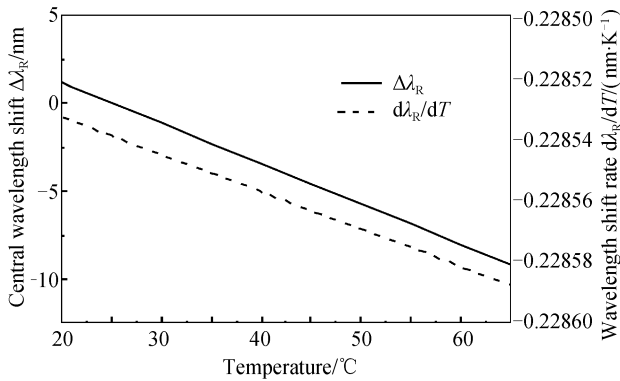


图 3 硅衬底聚合物波导微环谐振器谐振波长温度依赖性

Fig. 3 Resonant wavelength temperature dependence of silicon substrate polymer waveguide microring resonator

### 3 全聚合物波导微环谐振器的无热化

由于聚合物芯层和包层材料具有较大的负热光系数 (PSQ 波导材料的热光系数为  $-2.2 \times 10^{-4}\text{ K}^{-1}$ ),为了实现波导微环谐振器的无热化功能,必须选择具有较大热膨胀系数的衬底材料,以抵消温度变化导致的波导有效折射率改变而引起谐振波长的漂移. 本文考虑采用全聚合物结构,即衬底亦是聚合物材料. 由式(4)可得无热化条件下衬底材料的热膨胀系数要求为

$$\alpha_{\text{sub}} = -\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} \quad (7)$$

根据式(7)计算出在  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  到  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度范围内为实现聚合物波导微环谐振器无热化所需的衬底热膨胀系数,其随温度的变化关系曲线绘于图 4,可以看出无热化条件对衬底热膨胀系数的要求是  $1.499 \sim 1.510 \times 10^{-4}/\text{K}$ .

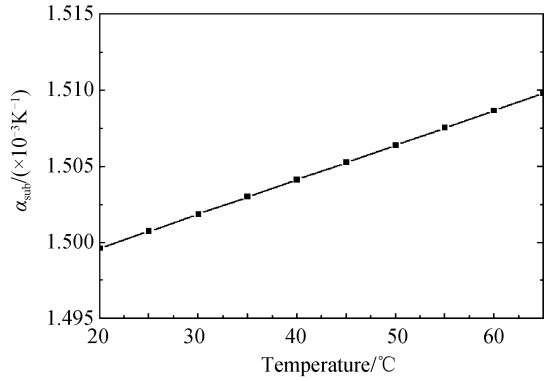


图 4 不同温度下实现无热化所需的衬底热膨胀系数  
Fig. 4 Required CTE of substrate for athermalization at different temperatures

图 5 给出了衬底材料的热膨胀系数取  $\alpha_{\text{sub}} = 1.500 \times 10^{-4}\text{ K}^{-1}$  附近值时谐振波长漂移量随温度的变化关系曲线,可以看出当热膨胀系数为  $\alpha_{\text{sub}} = 1.504 \times 10^{-4}\text{ K}^{-1}$  时,温度从  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  变化到  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  聚合物波导微环谐振器的谐振波长漂移量在  $0.005\text{ nm}$  ~  $-0.01\text{ nm}$  范围内,十分接近无热化.

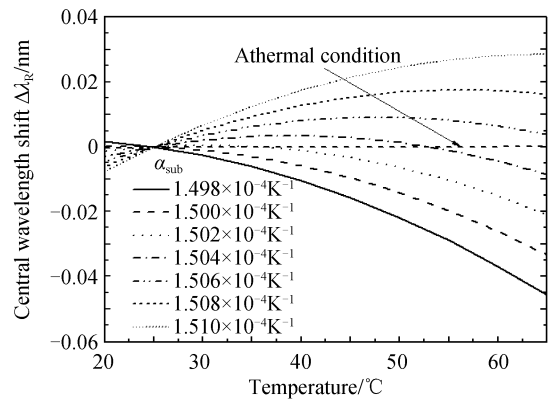


图 5 不同衬底热膨胀系数谐振波长漂移量随温度的变化关系

Fig. 5 Resonant wavelength shift versus temperature at different substrate CTEs

图 6 给出了聚合物衬底的热膨胀系数为  $\alpha_{\text{sub}} = 1.504 \times 10^{-4}\text{ K}^{-1}$  的条件下,全聚合物波导微环谐振器的谐振波长及温度依赖波长漂移率随温度的变化关系曲线. 可以看出温度从  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  变化到  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  的过程中,当温度为  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  时谐振波长漂移量达到正的极大值  $0.003\text{ }5\text{ nm}$ ,当温度为  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  时谐振波长漂移量达到负的极大值  $-0.008\text{ }5\text{ nm}$ ,温度依赖波长漂移率由  $+0.000\text{ }68\text{ nm}/\text{K}$  变化到  $-0.000\text{ }90\text{ nm}\cdot\text{K}^{-1}$ ,与硅衬底聚合物波导微环谐振器相比温度依赖波长漂移率减小了约 3 个数量级. 图 7 给出了全聚合物波导微环谐振器 (衬底热膨胀系数为  $\alpha_{\text{sub}} = 1.504 \times 10^{-4}\text{ K}^{-1}$ ) 在不同温度下的谐振光谱,可以看出温度  $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $T=45\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $T=65\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,谐振波长的漂移量分别为  $0\text{ nm}$ 、 $0.002\text{ }87\text{ nm}$  和  $-0.008\text{ }54\text{ nm}$ ,十分微小,表明在  $25 \sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$  的环境

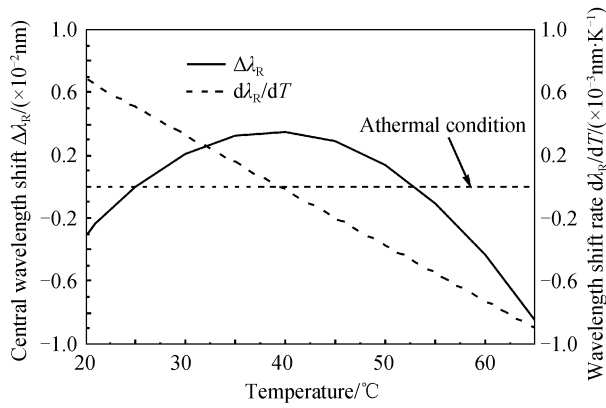


图6 全聚合物波导微环谐振器谐振波长及温度依赖波长漂移率随温度变化的关系

Fig. 6 Resonant wavelength and temperature dependent wavelength shift slope of all polymer waveguide microring resonator versus temperature

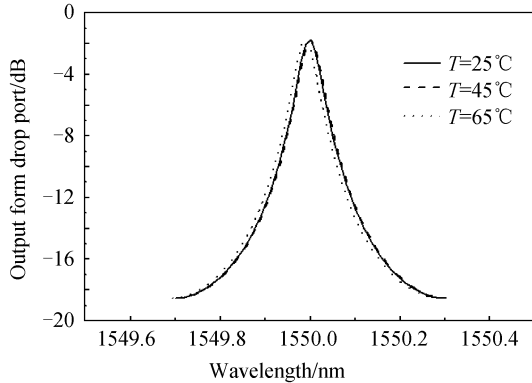


图7 全聚合物波导微环谐振器在不同温度下谐振输出光谱

Fig. 7 Resonant output spectrum of all polymer waveguide microring resonator at different temperatures

温度下内全聚合物波导微环谐振器可以稳定工作,基本上实现了聚合物波导微环谐振器的无热化。

Zhiyi Zhang<sup>[13]</sup>和 N. Keil<sup>[18]</sup>等人研究测量了不同聚合物材料的热膨胀系数,其范围在  $0.5 \sim 3.9 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  之间,具体数值取决于聚合物材料的成分。这一范围覆盖了实现全聚合物波导微环谐振器无热化所需的衬底热膨胀系数的数值,因此本文所设计的全聚合物无热化波导微环谐振器在工艺制备上是可实现的。

## 4 结论

本文从波导微环谐振器的谐振方程出发,推导出了波导微环谐振器的无热化条件和谐振波长温度依赖特性表达式。据此分析了硅衬底 PSQ 聚合物波导微环谐振器的温度特性,表明该器件对温度的变化十分敏感,在  $25 \sim 65 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度变化范围内,谐振波长漂移量为  $1.14 \sim -9.1 \text{ nm}$ ,温度依赖谐振波长漂移率为  $-0.2285 \text{ nm} \cdot \text{K}^{-1}$ 。采用聚合物衬底取代硅衬底构成全聚合物波导微环谐振器来改善其温度依赖特性。通过合理选择聚合物衬底材料的热膨

胀系数,在  $25 \sim 65 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度变化范围内,谐振波长漂移量为  $0.0035 \sim -0.0085 \text{ nm}$ ,温度依赖谐振波长漂移率极大值为  $-0.00090 \text{ nm} \cdot \text{K}^{-1}$ ,基本上实现了全聚合物波导微环谐振器的无热化。

## 参考文献

- [1] OTTO S. A decade of progress in microring and microdisk based photonic circuits; a personal selection[C]. *SPIE*, 2008, **6872**:68720H1-14.
- [2] KATRIEN D V, IRENE B, ETIENE S, *et al.* Silicon-on-Insulator microring resonator for sensitive and label-free biosensing[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(12):7610-7615.
- [3] PAYAM R, WILLIAM H S, ZHANG C, *et al.* Polymer microring filters and modulators[J]. *IEEE J Lighthwave Tech*, 2002, **20**(11):1968-1975.
- [4] E Shu-lin, DENG Wen-yuan, WANG Peng-fei, *et al.* Polymer microring resonator wavelength multiplexer [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2005, **26**(4):538-541.  
鄂书林, 邓文渊, 王鹏飞, 等. 聚合物微型谐振环波分复用器[J]. *发光学报*, 2005, **26**(4):538-541.
- [5] PANG Fu-fei, HAN Xiu-you, CAI Hai-wen, *et al.* An integrated optical waveguide ring resonator by using Sol-Gel technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(5):591-595.  
庞拂飞, 韩秀友, 蔡海文, 等. 利用有机-无机溶胶-凝胶方法制备平面波导环形谐振腔[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5):591-595.
- [6] PAN Jian-xia, WANG Fan, YANG Jian-yi. Linearity of microring assisted Mach-Zehnder optical modulators[J]. *Acta Photonica sinica*, 2008, **37**(8):1511-1515.  
潘剑侠, 王帆, 杨建义. 微环辅助 Mach-Zehnder 光调制器的线性特性[J]. *光子学报*, 2008, **37**(8):1511-1515.
- [7] YAN Xin, MA Chun-sheng, WANG Xian-yin, *et al.* Simulation and optimization of polymer electro-optic microring resonator switches[J]. *Acta Photonica sinica*, 2008, **37**(12):2374-2378.  
闫欣, 马春生, 王现银, 等. 聚合物微环电光开关的模拟和优化[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12):2374-2378.
- [8] PARK J, LEE T, LEE D, *et al.* Widely tunable coupled-ring-reflector filter based on planar polymer waveguide[J]. *IEEE Photonics Tech Lett*, 2008, **20**(12):988-990.
- [9] KOKUBUN Y, YONEDA S, MATSUURA S. Temperature-independent optical filter at  $1.55 \mu\text{m}$  wavelength using a silica-based athermal waveguide[J]. *Electron Lett*, 1998, **34**(4):367-369.
- [10] CHU S T, PAN W G, SUZUKI S, *et al.* Temperature insensitive vertically coupled microring resonator add/drop filters by means of a polymer overlay[J]. *IEEE Photonics Tech Lett*, 1999, **11**(9):1138-1140.
- [11] KOBAYASHI N, ZAIZEN N, KOKUBUN Y. Athermal and polarization-independent microring resonator filter using stress control[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, **46**(8B):5465-5469.
- [12] LEE Jong-Moo, KIM Duk-Jun, AHN Hokyun, *et al.* Temperature dependence of silicon nanophotonic ring resonator with a polymeric overlayer[J]. *IEEE J Lighthwave Tech*, 2007, **25**(8):2236-2243.

- [13] ZHANG Zhi-yi, ZHAO Ping, LIN Peng, *et al.* Thermo-optic coefficients of polymers for optical waveguide applications [J]. *Polymer*, 2006, **47**(14):4893-4896.
- [14] NAM S H, KANG J W, KIM J J. Temperature-insensitive flexible polymer wavelength filter fabricated on polymer substrates[J]. *Appl Phy Lett*, 2005, **87**(23):233504.
- [15] NISHIHARA H, HARUNA M, SUHARA T. Optical integrated circuits[M]. New York: McGraw-Hill, 1989, 43-44.
- [16] ZHANG Hong-bo, WANG Jin-yan, LI Lin-ke Li, *et al.* Synthesis of liquid polysilisiuioxane resins and properties of cured films[J] *Thin Solid Films*, 2008, **517**(2):857-862.
- [17] LI Lin-ke. Study of novel-polymer-based microring resonator [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007: Chapter 6.  
李林科. 基于新型聚合物材料的微环谐振器的基础研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007: 第六章.
- [18] KEIL N, YAO H H, ZAWADZKI C. Athermal polarization-independent arrayed-waveguide grating (AWG) multiplexer using an all-polymer approach[J]. *Appl Phys B*, 2001, **73**: 619-622.

## Design of Athermal Polymer Waveguide Microring Resonator

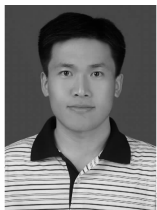
HAN Xiu-you<sup>a,c</sup>, Zhang Jia-ning<sup>a,c</sup>, JIN Ting-ting<sup>a,c</sup>, WANG Ling-hua<sup>a,c</sup>,

ZHAO Ming-shan<sup>a,c</sup>, WANG Jin-yan<sup>b,c</sup>, JIAN Xi-gao<sup>b,c</sup>

(*a. School of Physics & Optoelectronic Engineering; b. Department of Polymer Science and Materials; c. Photonics Research Center, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China*)

**Abstract:** According to the resonant equation of waveguide microring resonator, the athermal condition and the temperature-dependence of resonant wavelength are deduced. The temperature-dependent properties of PSQ polymer based waveguide microring resonator are analyzed. By choosing proper polymer substrate to substitute the traditional silicon substrate, the temperature sensitivity of polymer waveguide microring resonator can be suppressed greatly, and the choice method for optimal polymer substrate is given. The results show that the designed all polymer waveguide microring resonator has the maximal resonant wavelength shift of  $-0.0085$  nm and the maximal wavelength shift slope of  $-0.00090$  nm  $\cdot$  K<sup>-1</sup> during the temperature variation from 20 °C to 65 °C, and the athermalization is achieved.

**Key words:** Polymer waveguide microring resonator; Temperature dependence; Athermalization; Thermal optical coefficient; Coefficient of thermal expansion



**HAN Xiu-you** was born in 1977. He received his Ph. D. degree from Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences in 2006. Now, he is an associate professor, and his current research interests focus on integrated optics, optical communications and microwave photonics.