

# 高品质因子聚合物波导微环谐振腔滤波器

恽斌峰 胡国华 崔一平\*

(东南大学先进光子学中心, 江苏 南京 210096)

**摘要** 基于紫外固化胶和聚砜聚合物材料体系,采用脊形单模波导结构,理论设计并优化了聚合物波导环形谐振腔滤波器的波导截面参数、弯曲半径和耦合区波导间距等结构参数,分析了其滤波响应特性。并在此基础上,结合光刻、反应离子刻蚀等传统的微加工工艺制备了聚合物环形谐振腔滤波器,并进行了光谱测试,器件测试结果与设计基本符合。结果表明,该聚合物微环谐振腔滤波器在通信波段 1550 nm 附近的自由光谱范围为 0.21 nm, 3 dB 带宽为 0.04 nm, 插入损耗为 26 dB, 消光比达到了 11 dB, 品质因子达到了  $3.87 \times 10^4$ 。该聚合物微环谐振腔滤波器可以用于光通信及光传感集成芯片。

**关键词** 光学器件; 聚合物; 微环谐振腔; 品质因子; 消光比

**中图分类号** TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1013002

## Polymer Micro-Ring Resonator Filter with High Quality Factor

Yun Bin Feng Hu Guo Hua Cui Yi Ping

(Advanced Photonics Center, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract** Based on the ultraviolet resist (ZPU) and polysulfone polymer materials, the structure parameters of the polymer ring resonator such as waveguide cross section, bending radius, waveguide gap in the coupling region are designed and optimized, and the filtering characteristic is analyzed. The polymer micro-ring resonator is fabricated using the traditional micro-fabrication techniques including contact lithography and reactive iron etching. The experimental results agree well with the simulation results. Results show that around the telecom wavelength of 1550 nm, the free spectral range, 3 dB bandwidth, insertion loss, extinction ratio and quality factor of the polymer micro-ring resonator are 0.21 nm, 0.04 nm, 26 dB, 11 dB,  $3.87 \times 10^4$ , respectively. The polymer micro-ring resonator is very useful for telecom and integrated sensor chips.

**Key words** optical devices; polymer; micro-ring resonator; quality factor; extinction ratio

**OCIS codes** 130.5460; 130.7408; 130.3120

## 1 引言

波导微环谐振腔滤波器是集成光学的重要单元器件之一,在光通信波分复用(WDM)系统中作为滤波器和分路器有着广泛的应用,具有体积小、结构简单和易于大规模集成等优点。除了在光通信领域的应用<sup>[1,2]</sup>外,由于其带宽窄、灵敏度高等优点,近年来在生化传感领域也得到了特别关注<sup>[3~6]</sup>。传统的基于半导体材料的集成波导环形腔滤波器的设计与制作已经比较成熟,如基于硅基二氧化硅(SOI)<sup>[6,7]</sup>、砷化镓(GaAs)<sup>[8]</sup>等,但是制备工艺复

杂、设备昂贵和成本高。相对于半导体材料,基于聚合物材料的波导微环谐振腔滤波器的制备设备、工艺相对简单,成本也大大降低,因而成为了研究热点<sup>[9~14]</sup>。然而,对于高折射率差的芯/包层材料,为了在耦合区得到较大的耦合系数,一般都需要把耦合区的波导间距控制在几百纳米量级<sup>[6~12]</sup>,这样高的加工精度是传统的接触式光刻无法实现的,需要采用电子束光刻、纳米压印等高精度的纳米加工技术才能实现,大大增大了加工成本。且微环谐振腔滤波器的品质因子Q值也是器件应用的关键参数,

收稿日期: 2011-03-18; 收到修改稿日期: 2011-04-25

作者简介: 恽斌峰(1979—),男,博士,副教授,主要从事聚合物波导方面的研究。E-mail: ybf@seu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: cyp@seu.edu.cn

而目前聚合物微环谐振腔滤波器的  $Q$  值还不是很高。如文献[9~12]中分别报道的  $1.3 \times 10^4$ ,  $5.8 \times 10^3$  和  $2.6 \times 10^4$ , 而文献[13, 14]没有给出  $Q$  值参数。虽然文献[15]通过制作具有 SiN 缓冲层的压印模具, 采用纳米压印技术实现了  $1.038 \times 10^5$  的  $Q$  值, 但是需要化学气相沉积(CVD), 设备昂贵, 工艺相对复杂。为了降低工艺难度和成本, 在现有传统微加工工艺的基础上进一步提高器件  $Q$  值十分重要。 $Q$  值主要取决于波导的传输损耗(吸收损耗、弯曲损耗、散射损耗)和微环谐振腔的腔长。本文选择紫外固化胶聚砜(ZPU/polysulfone)聚合物材料体系, 在满足传统接触式光刻工艺精度要求的前提下, 设计单模脊形波导结构增大波导模场尺寸, 从而增大耦合区波导间距, 降低加工工艺难度。并在此基础上通过优化波导弯曲半径降低弯曲损耗、优化制备工艺降低散射损耗以提高器件品质因子, 设计并制备了聚合物波导微环谐振腔滤波器。

## 2 微环谐振腔滤波器设计与优化

选择 Chemoptics 公司的紫外固化胶 ZPU-45 作为波导包层材料, 聚砜作为波导芯层材料, 它们在

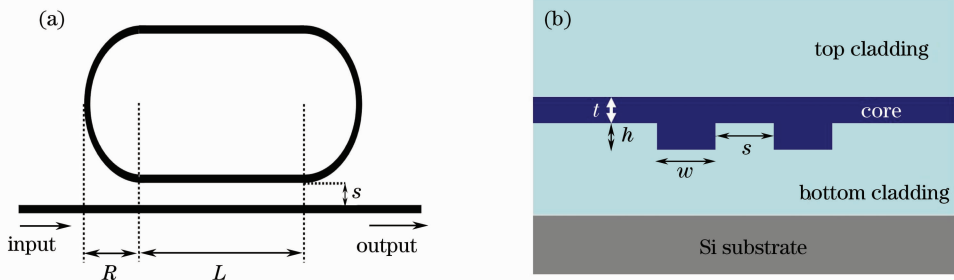


图 1 (a) 环形谐振腔结构图; (b) 耦合区脊形波导截面图

Fig. 1 (a) Schematic of ring resonator; (b) cross section of the ridge in coupling region

首先, 根据确定的材料折射率, 计算符合单模条件的脊形波导结构尺寸。但是由于聚合物波导制作工艺的特殊性, 若采用正脊形波导结构, 那么势必需要在聚合物芯层上旋涂光刻胶进行光刻, 而光刻胶与芯层聚合物材料会发生互溶和化学反应, 导致芯层被破坏, 所以采用倒脊形的波导截面结构, 这样可以在不与光刻胶反应的下包层紫外固化材料(ZPU-45)上光刻、刻蚀, 然后直接旋涂芯层, 从而增加了工艺兼容性并大大降低工艺复杂度。但是倒脊形波导也存在一定的限制, 即倒脊形的脊高  $h$  一般不能超过  $1 \mu\text{m}$ , 否则在芯层涂覆时会由于倒脊区波导的下陷导致波导形状严重变形, 以致器件失效。

1550 nm 波长处的折射率分别为  $n_{\text{cladd}} = 1.45$  和  $n_{\text{core}} = 1.6$ 。为了增大耦合区直波导与环形波导的耦合系数, 采用“跑道”型环形腔, 如图 1(a)所示, 其中  $R, L, s$  分别为环形波导半径、“跑道”区直波导长度以及耦合区直波导与环形波导的间距; 由于芯、包层折射率差相对较大, 所以选择脊形波导截面结构以保证在单模条件的基础上增大模式尺寸, 如图 1(b)所示, 其中  $w$  为脊形波导宽度,  $h$  为脊高,  $t$  为平板波导厚度,  $s$  为耦合区直波导与环形波导的间距。采用脊形截面波导结构有以下两个优点: 1) 可以降低单模条件的尺寸限制, 可以增大单模波导的截面尺寸, 即增大模式尺寸, 降低高折射率差波导与光纤耦合时由于模式失配引起的损耗; 2) 通过增大模式尺寸可以大大增大耦合区波导间距  $s$  (从矩形波导情况下的几百纳米量级到脊形波导情况的几微米量级), 因此可以大大降低制作难度与成本, 中间距  $s$  选择一般接触式光刻机容易达到的光刻精度  $2 \mu\text{m}$ 。而在满足传统接触式光刻精度要求的脊形波导的模式尺寸较大, 所以对应的波导弯曲损耗相对矩形波导大, 因此需要通过合理设计弯曲半径  $R$  来降低弯曲损耗, 以实现高  $Q$  值的波导微环谐振腔。

结合以上工艺限制和波导单模条件, 经过优化的脊形波导尺寸为  $t = 1 \mu\text{m}$ ,  $h = 1 \mu\text{m}$ ,  $w = 3 \mu\text{m}$ , 通过光束传播法(BPM)可以得到基模的有效折射率为  $n_{\text{eff}} = 1.5646$ , 对应的模场分布如图 2 所示。

然后, 对该尺寸的脊形波导构成的弯曲波导半径  $R$  与弯曲损耗的关系进行了分析, 得到了如图 3 所示的关系。从图中可以看出弯曲损耗随  $R$  的增大而减小并逐渐趋于稳定, 且当  $R > 1000 \mu\text{m}$  时, 弯曲损耗已经接近  $0.01 \text{ dB/cm}$ , 基本可以忽略。

结合以上设计优化结果, 选择的器件参数为  $t = 1 \mu\text{m}$ ,  $h = 1 \mu\text{m}$ ,  $w = 3 \mu\text{m}$ ,  $s = 2 \mu\text{m}$ ,  $L = 400 \mu\text{m}$ ,  $R = 1000 \mu\text{m}$ 。

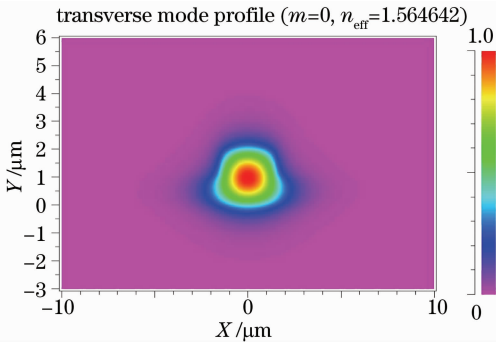


图 2 脊形波导基模的模场分布图

Fig. 2 Fundamental-mode field of ridge waveguide

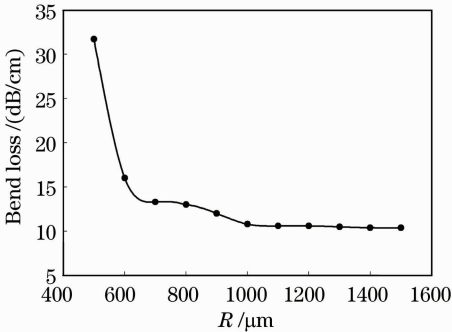


图 3 波导弯曲半径  $R$  与弯曲损耗的关系图

Fig. 3 Relation between bend radius and bend loss

### 3 微环谐振腔滤波器制作与测试

基于以上设计参数,对聚合物波导微环腔滤波器进行了制备,具体的制备工艺流程如图 4 所示。首先,在清洁的硅片上旋转涂覆 ZPU-45 下包层,转速为 2000 r/min,经紫外固化后厚度约为  $6\ \mu\text{m}$ ;然后在下包层上旋涂正性光刻胶(苏州瑞红 RZJ-306 型),转速为 3000 r/min,厚度为  $2\ \mu\text{m}$ ,经  $110\ \text{C}$  加

热固化后,由接触式光刻机光刻、显影,参数为(曝光能量密度为  $10\ \text{mW}/\text{cm}^2$ ,曝光时间为 5 s,显影时间为 40 s);然后经过反应离子刻蚀(RIE)将光刻胶上的图形转移到下包层[RIE 参数为:射频(RF)功率为 150 W, $\text{O}_2$  流量为 30 mL/min,压强为 3 Pa],然后将多余的光刻胶去除并烘干,并对刻蚀过后的下包层进行热回流( $170\ \text{C}$ ,10 min),从而降低 RIE 引起的表面粗糙度,以降低波导散射损耗;其次,以环戊酮作为溶剂,将配制好的聚砜的溶液通过旋涂方法直接在下包层上形成厚度为  $1\ \mu\text{m}$  的芯层,并且烘干;然后在芯层上涂涂厚度约为  $6\ \mu\text{m}$  的 ZPU-45 上包层,并紫外固化;最后,对硅片进行切割和端面研磨得到聚合物波导微环腔滤波器芯片。

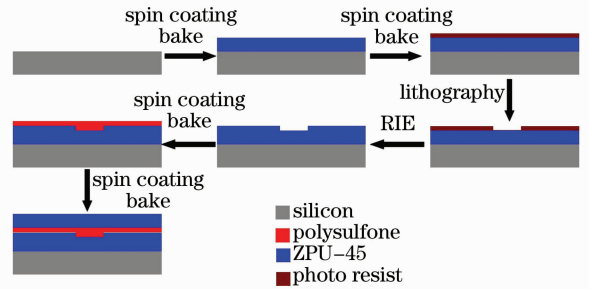


图 4 聚合物波导微环腔滤波器的制作工艺流程图

Fig. 4 Fabrication process of polymer ring resonator filter

在器件测试过程中,首先采用高倍率的视频显微镜对器件的端面尺寸和耦合区间隔  $s$  进行了测试,如图 5 所示,测试得到的器件参数分别为  $w \approx 2.86\ \mu\text{m}$ ,  $h \approx 0.9\ \mu\text{m}$ ,  $t \approx 1\ \mu\text{m}$ ,  $s \approx 1.86\ \mu\text{m}$ ,基本符合设计参数。

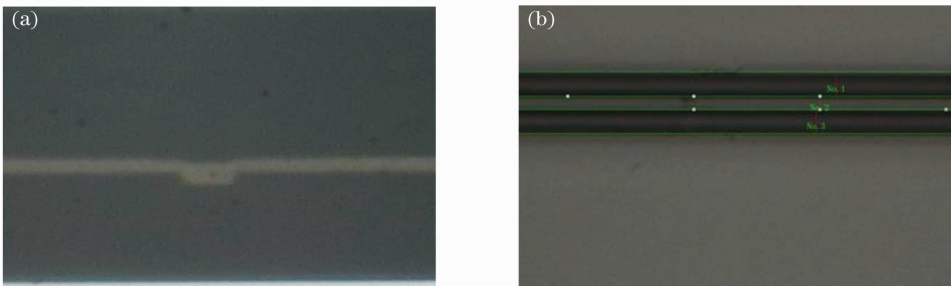


图 5 (a)倒脊形波导端面;(b)波导耦合区图

Fig. 5 (a) Cross section of invert ridge waveguide; (b) waveguides coupling region

为了对制作的聚合物波导微环腔滤波器进行透光测试,采用可调谐半导体激光器(Aglient8164)、偏振控制器(PC)、保偏光纤(PMF)、六维精密光波导耦合系统和光电探测器(PD)组成的测试平台[图 6(a)]对其进行了滤波特性测试。由可调谐激

光器发出的波长可调谐激光经偏振控制器和保偏光纤后的 TM 光耦合进微环腔滤波器芯片,输出光通过光纤耦合到光电探测器,通过扫描光波长与光电探测器的输出即可得到器件的透射光谱特性。

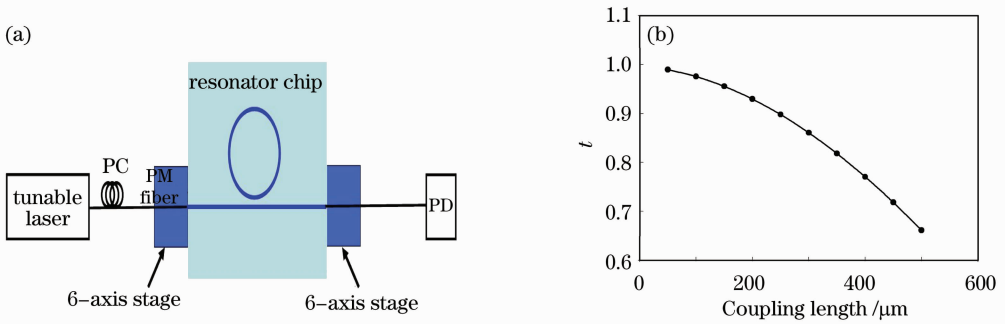


图 6 (a) 器件测试系统图; (b) 耦合常数  $t$  与耦合区长度关系图

Fig. 6 (a) Device measurement system; (b) relation between coupling constant  $t$  and coupling length

经测试,得到的透射光谱如图 7(a) 所示。波导环形谐振腔的传输率  $T$  可表示为<sup>[11]</sup>

$$T = \frac{\alpha^2 + |t|^2 - 2\alpha|t|\cos\theta}{1 + \alpha^2|t|^2 - 2\alpha|t|\cos\theta}, \quad (1)$$

$$\theta = \beta L_{\text{cavity}} = 2\pi n_{\text{eff}} L_{\text{cavity}} / \lambda, \quad (2)$$

式中  $L_{\text{cavity}}$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $t$  分别是“跑道”型环形腔的腔长,光在环形腔中环行一周引起的相位差,光在环形腔中环行一周引起的损耗和耦合区的耦合常数。因为实验中无法得到环形腔损耗  $\alpha$  和耦合常数  $t$ ,故采用 BPM 算法对制作的微环谐振腔中耦合区的耦合常数  $t$  进行了分析,得到的结果如图 6(b) 所示,可见当耦合区长度  $L=400 \mu\text{m}$  时对应的  $t \approx 0.77$ ,为了将理论与实验曲线比较,优化选择  $\alpha=0.65$ ,  $t=0.78$  代入(1)式可以

得到如图 7(b) 中的理论透射谱(虚线),可以看出理论与实验结果基本一致,很小的偏差可能是由于制作工艺的误差导致,  $\alpha=0.65$  换算后对应的微环波导的单位长度传输损耗约为  $5.28 \text{ dB/cm}$ 。经测量,该聚合物波导环形谐振腔滤波器在通信波段  $1550 \text{ nm}$  附近的自由光谱范围约为  $0.21 \text{ nm}$ ,  $3 \text{ dB}$  带宽约为  $0.04 \text{ nm}$ ,插入损耗为  $26 \text{ dB}$  左右(主要是由于波导模式尺寸与光纤尺寸不匹配造成,可以通过使用锥形光纤降低插入损耗),消光比达到了  $11 \text{ dB}$ ,品质因子约为  $3.87 \times 10^4$ ,分别约为文献[9, 10, 12] 中的 3 倍, 6.7 倍和 1.5 倍。

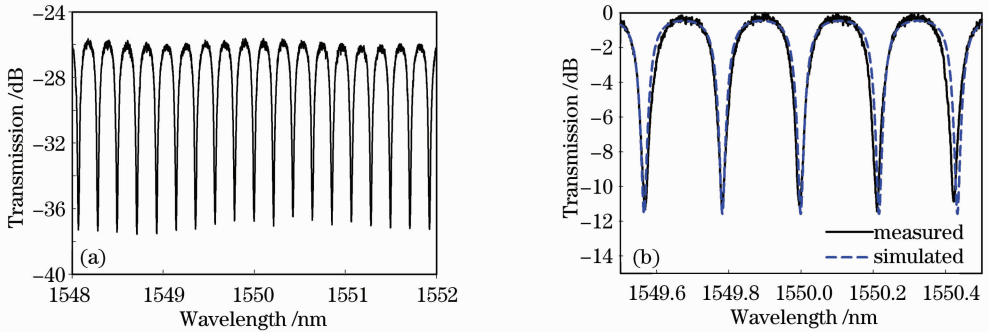


图 7 (a) 透射光谱图; (b) 归一化测量透射光谱与模拟光谱比较图

Fig. 7 (a) Transmission spectrum; (b) normalized transmission spectrum and simulated spectrum

## 4 结 论

结合传统的微加工工艺,优化设计了聚合物波导环形腔滤波器的结构参数,设计了倒脊形单模波导结构,通过优化弯曲半径降低弯曲损耗,采用环形谐振腔理论分析了其光谱特性;并采用 ZPU-45 为包层材料、聚砜作为芯层材料制备了波导环形腔滤波器,测试了其滤波特性,得到了自由光谱范围为  $0.21 \text{ nm}$ ,  $3 \text{ dB}$  带宽为  $0.04 \text{ nm}$ ,插入损耗为  $26 \text{ dB}$ ,消光比为  $11 \text{ dB}$ ,品质因子为  $3.87 \times 10^4$  的聚合物波

导环形腔滤波器,且器件测试结果与设计基本符合,该器件在集成光通信和集成光传感芯片领域具有很好的应用前景。

## 参 考 文 献

1 Zhang Xiaobei, Ding Yunhong, Zhang Xinliang *et al.*. Analytical study of spectral and delaying characteristics of lossy series cascaded dual microring resonators [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 147~154  
 张小贝, 丁运鸿, 张新亮等. 有损串联双微环谐振器谱线与延迟特性的解析研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 147~154

- 2 Zhang Bin, Mao Luhong, Xie Sheng *et al.*. A new spice model of silicon-based micro-ring resonator and application for optical filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 537~541  
张彬, 毛陆虹, 谢生等. 一种基于 Spice 的硅基微环光学谐振器模型及其在光学滤波器中的应用 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 537~541
- 3 A. Ksendzov, Y. Lin. Integrated optics ring-resonator sensors for protein detection [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(24): 3344~3346
- 4 Min-Suk Kwon, William H. Steier. Microring-resonator-based sensor measuring both the concentration and temperature of a solution [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(13): 9372~9377
- 5 Fufei Pang, Xiyou Han, Fenghong Chu *et al.*. Sensitivity to alcohols of a planar waveguide ring resonator fabricated by a sol-gel method [J]. *Sensor Actuator B*, 2007, **120**(2): 610~614
- 6 Katrien De Vos, Irene Bartolozzi, Etienne Schacht *et al.*. Silicon-on-insulator microring resonator for sensitive and label-free biosensing [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(12): 7610~7615
- 7 W. Bogaerts, D. Taillaert, B. Luyssaert *et al.*. Basic structures for photonic integrated circuits in silicon-on insulator [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(8): 1583~1591
- 8 M. K. Chin, C. Youtsey, W. Zhao *et al.*. GaAs microcavity channel-dropping filter based on a race-track resonator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(12): 1620~1622
- 9 W. Y. Chen, R. Grover, T. A. Ibrahim *et al.*. High-finesse laterally coupled single-mode benzocyclobutene microring resonators [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 470~472
- 10 Chung-yen Chao, L. Jay Guo. Polymer microring resonators fabricated by nanoimprint technique [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2002, **20**(6): 2862~2866
- 11 Yanyi Huang, George T. Paloczi, Jacob Scheuer *et al.*. Soft lithography replication of polymeric microring optical resonators [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(20): 2452~2458
- 12 Joyce K. S. Poon, Yanyi Huang, George T. Paloczi *et al.*. Wide-range tuning of polymer microring resonators by the photobleaching of CLD-1 chromophores [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(22): 2584~2586
- 13 Kong Guangming, E Shulin, Deng Wenyuan *et al.*. Study on polymer double-ring resonant filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 134~138  
孔光明, 鄂书林, 邓文渊等. 聚合物双环谐振滤波器的研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 134~138
- 14 Pang Fufei, Han Xiyou, Cai Haiwen *et al.*. An integrated optical waveguide ring resonator by using sol-gel technology [J]. *Chinese J. 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
- 15 Do-Hwan Kim, Jung-Gyu Im, Sang-Shin Lee *et al.*. Polymeric microring resonator using nanoimprint technique based on a stamp incorporating a smoothing buffer layer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(11): 2352~2354