

doi: 10.3788/gzxb20164508.0823003

# 不同沉积层的纳米波导谐振腔特性测试

臧俊斌<sup>1,2</sup>, 赵国英<sup>1</sup>, 韦丽萍<sup>2</sup>, 薛晨阳<sup>2</sup>

(1 中北大学(朔州校区), 山西 朔州 036000)

(2 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

**摘要:**为确定硅基片上系统半导体光电器件集成中绝缘层材料对器件整体性能的影响,设计并制备了带有覆层的纳米波导谐振腔.谐振透射谱功率测试表明顶层覆盖  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜和  $\text{SiO}_2$  薄膜绝缘层没有削弱环形谐振腔的品质因素,沉积后的最佳耦合间距为 70~110 nm.覆层为  $\text{SiO}_2$  时谐振点波长附近的谐振峰消光比达 16.5 dB,3 dB 带宽为 0.12 nm;覆层为  $\text{Si}_3\text{N}_4$  时谐振点波长附近的谐振峰消光比达 13.9 dB,3 dB 带宽为 0.18 nm.该研究为片上系统集成设计中最佳绝缘层材料的选择提供参考.

**关键词:**光电器件;片上系统;纳米光波导;微环谐振腔

中图分类号:TN256

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)08-0823003-5

## Test of Nano-waveguide Resonator with Different Deposition Layers

ZANG Jun-bin<sup>1,2</sup>, ZHAO Guo-ying<sup>1</sup>, WEI Li-ping<sup>2</sup>, XUE Chen-yang<sup>2</sup>

(1 North University of China, Shuozhou, Shanxi 036000, China)

(2 Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement,  
Ministry of Education North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to confirm the effect of semiconductor photoelectric device integration's insulating layer on the overall performance in system on chip, the resonator with insulating layer was designed and prepared. By the transmission spectrum measurement, it is demonstrated that depositing  $\text{Si}_3\text{N}_4$  thin-film and  $\text{SiO}_2$  thin-film on the resonator have no effect on the quality factor of the resonator. By further analysis, it is found that after deposition, the optimal coupling gap is between 70 nm and 110 nm. For the resonator with  $\text{SiO}_2$  thin-film, the extinction ratio is 16.5 dB and 3 dB bandwidth is 0.12 nm at the resonant peak. While for the resonator with  $\text{Si}_3\text{N}_4$  thin-film, the extinction ratio is 13.9 dB and the 3 dB bandwidth is 0.18 nm at the resonant peak. The energy efficient coupling and high density integration in the system on chip integration would be achieved by selecting the best insulation material.

**Key words:** Photoelectric device; System on Chip (SoC); Nanophotonic waveguide; Microring resonator

**OCIS Codes:** 230.5750; 230.7370; 120.4570; 120.4610

## 0 引言

随着物联网国家发展战略概念的提出,以及各种新型技术产业的需求与应用,高度集成芯片技术、高速带宽传输的信息载体、云存储和云计算等技术推动了物联网产业的迅速崛起<sup>[1-2]</sup>,其中,光电集成器件作为未来物联网产业发展中感知层部件的关键起到了至关重要的作用<sup>[3]</sup>.而硅基集成光学中的绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator, SOI)材料器件因具有较高的折

射率差、良好的集成性、低成本以及制备中的光电子工艺与 CMOS 工艺完全兼容等优点成为物联网感知层中光电子器件集成的首选<sup>[4]</sup>.同时,基于 SOI 材料的纳米波导微环谐振腔,拥有良好的电学和光学品质特性,可作为新生代物联网感知器件集成中的滤波器、探测器、光开关以及光调制器等重要组成部件<sup>[5-7]</sup>.脊型纳米波导微环谐振腔无与伦比的结构优点可用于集成光学器件中的光调制器.集成技术微型化和集成化的要求促使光波导器件朝着高集成度和微小型化的方向发

基金项目:山西省青年基金项目(No. 2015021095)和国家自然科学基金(No. 61127008)资助

第一作者:臧俊斌(1987-),男,助教,硕士,主要研究方向为光电 MEMS 物联网类传感器器件. Email: zangjunbin@163.com

收稿日期:2016-02-18;录用日期:2016-05-31

<http://www.photon.ac.cn>

展<sup>[8-9]</sup>. 要实现对光调制器、滤波器等光器件的高密度集成, 要求脊型纳米波导谐振腔作为关键部件必须突破传统平面结构集成的限制, 实现三维空间立体集成. 而目前制约立体空间集成的主要瓶颈为器件彼此之间的隔离性与绝缘性, 本文针对空间高密度器件集成中面临的绝缘问题, 选择制备了沉积有  $\text{Si}_3\text{N}_4$  和  $\text{SiO}_2$  不同薄膜材料的脊型纳米波导谐振腔, 并对其进行了谐振品质特征的测试分析.

## 1 理论分析与结构设计

基于波导耦合谐振理论<sup>[10]</sup>, 选取环形谐振腔作为耦合谐振模型基本结构, 见图 1, 图中  $a_1$ 、 $a_2$  为波导和微环的输入光信号,  $b_1$ 、 $b_2$  为波导和微环的输出光信号,  $d$  为环半径.

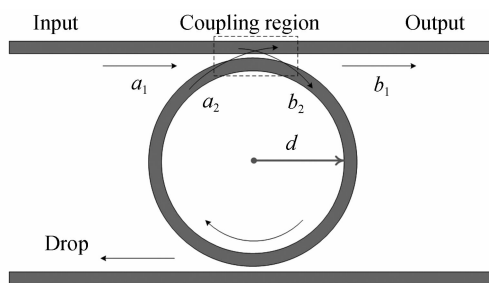


图 1 环形谐振腔耦合结构

Fig. 1 Coupling structure schematic of microring resonator

对图 1 所示的脊型纳米波导环形谐振腔, 采用 Rsoft 进行沉积层高光场局域性仿真分析, 结果见图 2. 从图中可以看出对于波导层厚度为  $0.22 \mu\text{m}$ 、宽度为  $0.5 \mu\text{m}$ 、脊高为  $0.17 \mu\text{m}$  的波导谐振腔结构光场局域性良好, 可满足结构设计的需要.



图 2 不同绝缘覆层下对应的器件结构与光场分布

Fig. 2 Device structure deposited different insulation layer and light field simulated by Rsoft software

根据 Rsoft 截面光场强度仿真结果, 采用 Optiwave-FDTD 对谐振腔环形半径  $d = 25 \mu\text{m}$  的纳米波导耦合谐振腔进行仿真分析以确定此半径下的耦合特性. 设置 Optiwave-FDTD 条件: Input Field Properties 为  $1.55 \mu\text{m}$  Gaussian Modulated Continuous Wave; Mesh Parameters 为  $x = 0.05 \mu\text{m}$ ,  $y = 0.03 \mu\text{m}$ ,

$z = 0.05 \mu\text{m}$ ; Boundary Conditions 为各向异性完全匹配层 (Anisotropic Perfectly Matched Layer, APM), 得到的环形谐振腔的谐振耦合输出特性曲线如图 3. 从图中可以看出, 此纳米波导谐振腔的谐振耦合效能较高 ( $\text{ER}(\text{Extinction Ratio}) \approx 18.2 \text{ dB}$ )、品质良好 ( $Q \approx 1.5 \times 10^4$ ), 可作为集成光调制结构的基础部件.

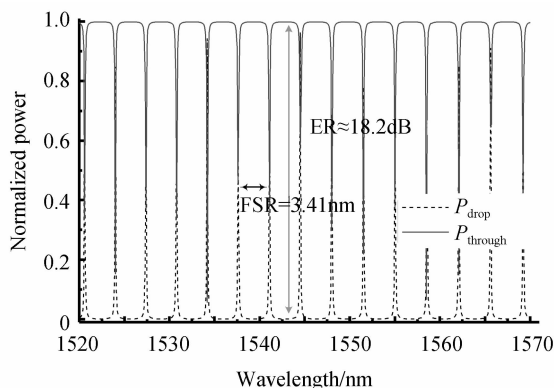


图 3 仿真所得输出谐振透射谱线

Fig. 3 Simulation output transmission spectrum

综合仿真分析和理论计算并结合国内 CMOS 工艺制备的可实现性, 最终确定的脊型纳米波导谐振腔结构如图 4. 其中, 波导层厚度  $H = 0.22 \mu\text{m}$ , 波导环半径  $R = 25 \mu\text{m}$ , 波导宽度  $d = 0.5 \mu\text{m}$ , 间距  $\text{gap} \approx 0.1 \mu\text{m}$ , 脊高  $h = 0.17 \mu\text{m}$ .

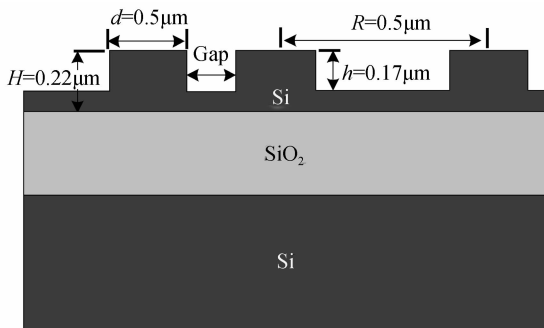


图 4 脊型纳米波导环形谐振腔截面

Fig. 4 Cross-sectional picture of rib nano-waveguide ring resonator

## 2 制备

根据设计的脊型纳米光波导的结构尺寸, 在埋层  $\text{SiO}_2$  为  $3 \mu\text{m}$ 、顶层 Si 为  $220 \text{ nm}$  的 SOI 材料基片上采用电子束光刻 (Electron Beam Lithography, EBL)、电感耦合等离子体刻蚀 (Inductively Coupled Plasma, ICP) 和等离子体增强化学气相沉积 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) 等工艺制备脊型纳米光波导和微环谐振腔, 详细的制备流程如图 5. 其中, 标准 CMOS 工艺制备中采用的光刻胶为 PMMA 光刻胶且其涂覆厚度为  $450 \text{ nm}$ ; EBL 光刻采用直写式的 JBX5500ZA 光刻系统; EBL 曝光后的器件基片在显

影液(IPA:MIBK=3:1)中显影40s再经IPA定影后完成EBL光刻;采用STS MPXHRM的ICP深硅刻蚀系统刻蚀顶部的波导Si层,最后采用OXFORD SYSTEM 100系统在顶层PECVD沉积约1 $\mu\text{m}$ 厚的绝缘隔离层,完成器件的整体制备。

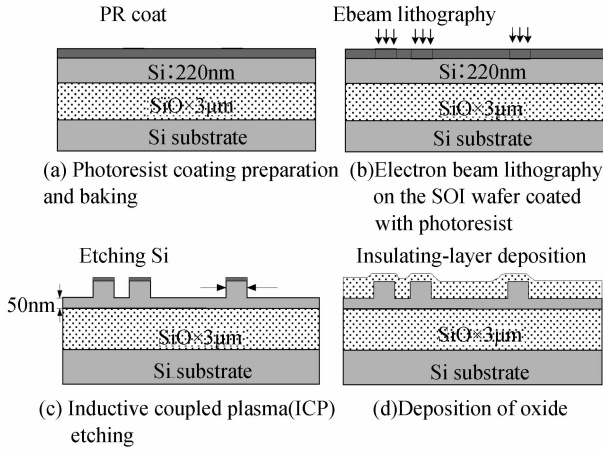


图5 结构工艺制备流程

Fig. 5 Fabrication process flow

此外,EBL和ICP刻蚀工艺相结合能极大地提高纳米波导结构图像化转移的准确度和波导线刻蚀的精细度。而对于JBX5500ZA系统的EBL光刻来说,由于采用了高斯型束斑和矢量扫描方式的直写式光刻技术,能突破传统光刻工艺中光学衍射极限的限制,使其制备的波导线横纵误差低于10nm<sup>[11]</sup>。ICP刻蚀技术是集化学刻蚀和物理刻蚀方法优点为一体的刻蚀工艺,对于Si和SiO<sub>2</sub>之间的高刻蚀选择比,可在SOI材料结构刻蚀中实现良好的方向性和选择性,并且刻蚀速率也得到成倍提高,最终制备的纳米波导截面具有较好平滑性和较高陡直度。OXFORD SYSTEM 100系统的PECVD技术成膜质量良好、致密性强、不易龟裂的优点可极大地提高工艺制备的可实现性。最终制备的脊型纳米光波导的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)图如图6。

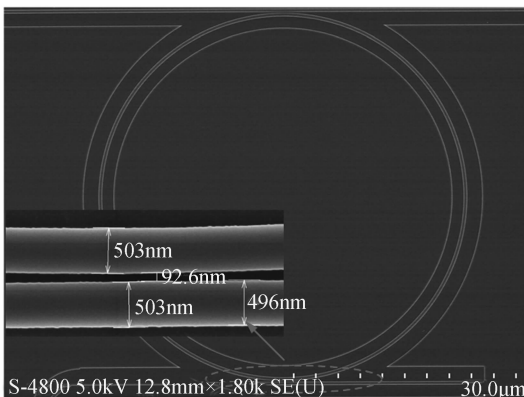


图6 脊型纳米波导环形谐振腔SEM图

Fig. 6 SEM images of rib waveguide microring resonators

### 3 实验测试与结果

实验测试平台如图7,其中光信号发生器为中心波长1550nm的NewFocus可调谐激光器。激光器发射的光信号由掺铒光纤放大器放大后经单模光纤连接到光纤偏振控制器,最后经垂直纳米波导光栅耦合导入SOI脊型纳米波导中传输<sup>[12]</sup>。此外,在纳米波导光栅垂直输入耦合结构中选择单模光纤为透镜光纤,其优点是可以很好地把光信号聚集输入到纳米波导光栅上,能极大地提高垂直光栅耦合效率。在输出端,采用与输入端相同的光栅耦合结构,由透镜单模光纤导光输出后经光电转换器转换为电信号,再通过信号放大器放大后输出显示。在此测试过程中,采用高度精密的三维光学微调架对输入和输出的单模透镜光纤进行固定和调节,以保证实验测试的准确性和稳定性。所有的输出信号由示波器采集记录显示。

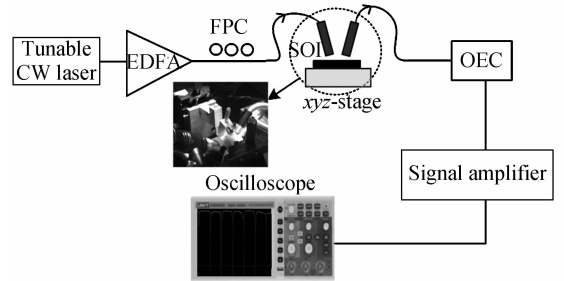


图7 测试平台

Fig. 7 Testing platform

采用图7中的测试平台,对图6中制备得到的脊型纳米波导环形谐振腔结构进行谐振输出特性测试,输出谐振透射谱线如图8。从图8中可以看出在谐振半径一定的条件下,谐振腔品质对波导与环的耦合距离有一定的依赖性,这与文献[13-14]的描述是一致的。进一步分析可看出,沉积隔离绝缘层后的最佳范围压缩至70~110nm,图8(a)与8(d)中的扩展或压缩距离造成谐振品质特性的下降或丧失。

数据归一化处理,从图8(b)中可以看出:当覆层为SiO<sub>2</sub>薄膜时,在1545nm谐振点波长附近的谐振峰消光比达16.5dB,3dB带宽为0.12nm;而覆层为Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>薄膜时,最佳耦合谐振点波长1540nm附近的谐振峰消光比达13.9dB,3dB带宽为0.18nm,与没有覆层的结构相比,品质都有较高的提升。

谐振腔的品质因子 $Q$ 和精细度 $F$ 的计算公式为

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{\lambda_m}{\text{FWHM}} = \frac{\lambda_m}{\Delta\lambda_{3\text{dB}}} \quad (1)$$

$$F = \frac{\text{FSR}}{\text{FWHM}} = \frac{\text{FSR}}{\Delta\lambda_{3\text{dB}}} \quad (2)$$

式中,FSR为自由频谱范围(Free Spectral Range, FSR),FWHM为谐振点全高半宽(Full Width at Half Maximum, FWHM), $\lambda_m$ 是谐振点处的谐振波长, $\Delta\lambda_{3\text{dB}}$

为 3 dB 带宽. 当覆层为 SiO<sub>2</sub> 薄膜和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 薄膜时, 求得的谐振腔的谐振品质 Q 和 F 分别为 12800 与 27 和

9000 与 18.

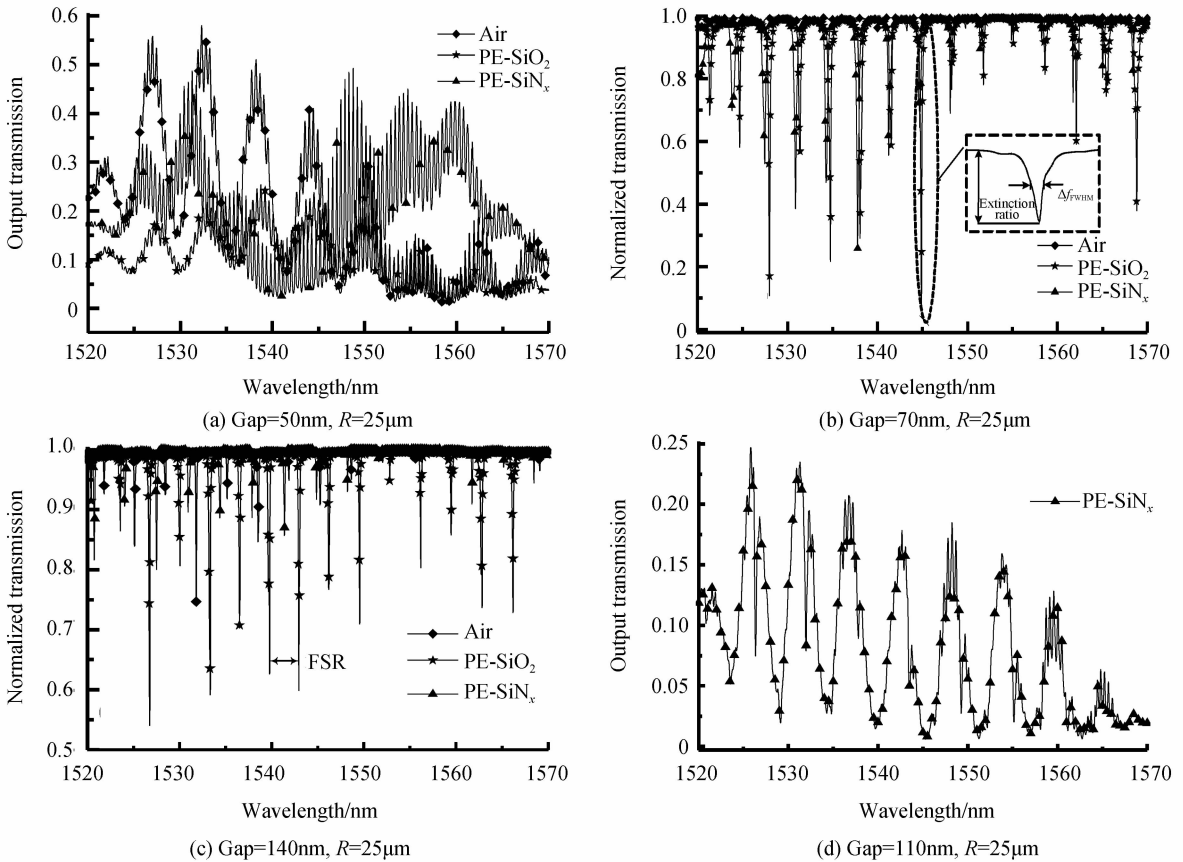


图 8 环形谐振腔的测试输出透射谱线

Fig. 8 Transmission spectrum of ring resonator with different insulation layer

## 4 结论

采用 Yariv 波导散射矩阵理论并结合 Optiwave-FDTD、Rsoft 等光学仿真软件对环形纳米波导谐振腔结构进行理论计算与仿真分析, 得到合理可行的拥有不同绝缘层材料的纳米波导谐振腔结构. 利用 ICP 深硅刻蚀、PECVD、EBL 等标准 CMOS 工艺制备得到脊型纳米波导谐振腔结构. 搭建实验测试平台进行性能测试. 测试结果表明: 与裸露结构相比, 沉积 SiO<sub>2</sub> 和 SiN<sub>x</sub> 绝缘薄膜层的波导谐振腔结构品质特性有一定程度的提高; 覆层为 SiO<sub>2</sub> 薄膜时的谐振峰消光比达 16.5 dB, 3 dB 带宽为 0.12 nm; 覆层为 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 时的谐振峰消光比达 13.9 dB, 3 dB 带宽为 0.18 nm. 涂覆隔离层后的脊型纳米波导谐振腔的高品质耦合间距为 70~110 nm. 该研究为确定波导结构设计的合理性以及纳米波导器件集成工艺的可行性提供参考, 为未来物联网感知层的光电器件集成提供实验指导.

### 参考文献

[1] GRANJAL J, MONTEIRO E, SILVA J S. Security for the internet of things: a survey of existing protocols and open research issues [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, **17**(4): 1-1.

[2] LIU J, LIU M. A novel surface acoustic wave sensor for optical lens surface dirt detection [C]. *IEEE International Conference on Green Computing & Communications, IEEE & Internet of Things*, 2013: 1673-1675.

[3] CHEN S, SU H. The Tradeoff analysis for remote sensing image fusion using expanded spectral angle mapper [J]. *Sensors*, 2008, **8**(1): 520-528.

[4] WOLFRAM H P, XIONG Chi, TANG Hong. High Q micro-ring resonators fabricated from polycrystalline aluminum nitride films for near infrared and visible photonics[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(11): 12261-12269.

[5] CHOI J M, LEER K, YARIV A. Control of critical coupling in a ring resonator-fiber configuration: application to wavelength-selective switching, modulation, amplification, and oscillation [J]. *Optics Letters*, 2001, **26**: 1236-1238.

[6] ZHOU L, SOREF R, CHEN J. Wavelength-selective switching using double-ring resonators coupled by a three-waveguide directional coupler[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(10): 13488-13498.

[7] WEI Li-ping, WANG Yong-hua. Optimum design of silicon-on-insulator micro-ring resonator electro-optic modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(12): 1473-1477.

韦丽萍, 王永华. 绝缘体上硅微环谐振腔电光调制器的分析与最优设计[J]. *光子学报*, 2013, **42**(12): 1473-1477.

[8] RAJAEI M, SHAHABADI M. Analysis of 2-D dielectric waveguide-coupled optical ring resonators using a transmission-line formulation[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2015, **32**(10): 1797-1804.

- [9] GUO Shi-liang, HU Chun-hai, LI Xin, *et al.* A novel high sensitivity optical microresonator humidity sensor[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(8): 1009-1013.  
郭士亮,胡春海,李欣,等.一种新型高灵敏度光学微环湿度传感器[J].*发光学报*,2014,**35**(18):1009-1013.
- [10] MERCANTILE E A. Bends in optical dielectric guides[J]. *BellSyst Technology Journal*, 1969, **48**(7): 2103-2132.
- [11] ZANG Jun-bin, XUE Chen-yang. Optimizations fabrication and test of bending loss of the soi nano-waveguide [J]. *Chinese Journal of Sensors & Actuators*, 2012, **25**(11): 1498-1502.  
臧俊斌,薛晨阳. SOI 纳米波导的优化制备与弯曲损耗测试 [J]. *传感技术学报*,2012,**25**(11): 1498-1502.
- [12] CUI Dan-feng, XUE Chen-yang. The coupling efficiency analysis and testing of vertical nano-grating coupler [J]. *Chinese Journal of Sensors & Actuators*, 2011, **24**(8): 1131-1135.  
崔丹凤,薛晨阳.垂直纳米光栅耦合器耦合效率分析与测试 [J]. *传感技术学报*,2011,**24**(08): 1131-1135.
- [13] MAINE S, MARRIS-MORINI D. Design, fabrication and characterization of high Q-factor SOI microring resonators [C]. *IEEE International Conference on Group IV Photonics*, 2007: 1-3.
- [14] PUCCI E, ZAMAN A U. Study of Q-factors of ridge and groove gap waveguide resonators [ J ]. *Iet Microwaves Antennas & Propagation*, 2013, **7**(11): 900-908.