

• 光电子学工程与应用 •



基于 VO₂ 热相变的光子晶体波导开关

刘 海*, 邵齐元, 张砚曾, 赵 嘉, 陈 聪, 白冰冰

(1. 中国矿业大学地下空间智能控制教育部工程研究中心 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学信息与控制工程学院 江苏 徐州 221116)

【摘要】基于相变材料 VO₂, 设计了一款光子晶体波导结构的光开关。通过在硅波导中填充 SU-8 包层对温度灵敏度做补偿, 降低了波导开关的温度敏感特性。采用热驱动开关实现了 1 591 nm 波长处约 9.5 dB 的消光比。同时提出一种新型级联波导来优化开关结构, 实现了 27.46 dB 的消光比。

关键词 光学开关设备; 光子晶体; 热光效应; 波导

中图分类号 TN25 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2019288

Photonic Crystal Waveguide Switch Based on VO₂ Thermal Transformation

LIU Hai*, SHAO Qi-yuan, ZHANG Yan-zeng, ZHAO Jia, CHEN Cong, and BAI Bing-bing

(1. Engineering Research Center of Intelligent Control for Underground Space, Ministry of Education, China University of Mining and Technology Xuzhou Jiangsu 221116; 2. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology Xuzhou Jiangsu 221116)

Abstract A photonic crystal waveguide optical switch based on the phase-change materials VO₂ is designed. Through plating the SU-8 cladding material onto the waveguide to compensate the temperature effect of the silicon waveguide, the temperature dependence of the waveguide switch can be reduced. An extinction ratio of approximately 9.5 dB is achieved at 1 591 nm with a thermal actuation. In addition, a new cascaded grating is designed to optimize the switch structure and achieves an extinction ratio of 27.46 dB.

Key words optical switching devices; photonic crystals; thermo-optic effect; waveguides

近年来, 光子晶体微腔结构^[1]因具有高品质因数、易于设计等优点而受到越来越多的关注, 广泛应用于通信、传感器领域。由于硅 (Si) 具有较高折射率, 能够实现光学器件在小体积上大规模集成, 并且与互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 有良好的兼容性, 因此被认可为是极有前途的光子学材料。硅的热光系数 (thermo-optic coefficient) 较高, 常被用作制造光学温度传感器^[2-3]。然而, 这一温度敏感特性也导致硅光子器件在温度不稳定环境下的应用受到限制, 如波分复用系统中的光滤波器^[4]。以纯硅环形谐振滤波器为例, 即使环境温度变化很小, 谐振器也将失谐。故在制作复杂温度条件下工作的硅光子器件时, 必须考虑硅器件的热稳定性。实现硅波导谐振滤波器温度不敏感的一种途径是在波导空隙处填充热光系数为负的包层材料, 而 SU-8 光刻胶能够很好地满足这一要求, 从而设计出一款具有良好热稳

定性的光学波导。

二氧化钒 (VO₂) 材料因其特有的热引发相变特性, 自 1959 年被提出^[5]以来就成为各领域研究的热点。2017 年文献 [6] 在实验中通过硅光子结构中嵌入 VO₂ 相变材料, 实现了波导全光开关作用。

然而由于目前对与温度不敏感的光子晶体微腔的研究极少, 以往对于波导中 VO₂ 嵌入的研究虽然使用了 VO₂ 的温度相变特性, 却忽略了温度对于硅波导本身的热效应^[7]。为了消除温度变化时波导中硅的热光效应对 VO₂ 开关机制的影响, 本文设计出一种新型的温度不敏感光子晶体微腔, 将温度不敏感的性质与 VO₂ 材料的温度相变特性结合, 提出一种谐振峰不随温度移动的热驱动开关, 进行级联优化。该波导开关具有高消光比、谐振温度不敏感、可级联等优点, 有望实现芯片内高速、小型化光开关和光调制器。

收稿日期: 2019-12-19; 修回日期: 2020-09-18

基金项目: 国家自然科学基金 (51874301)

作者简介: 刘海 (1983-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事集成光电、计算电磁学和光子学方面的研究. E-mail: lhai_hust@hotmail.com

1 实验设计与仿真

1.1 温度补偿原理

通常光在纯硅波导中传输时,大部分光能被限制在硅中传输,因此温度发生改变时硅的热光效应对波导的谐振情况有显著影响,只有在负热光系数聚合物包层中分布足够的光能,才能补偿硅波导的正热光效应^[8-9]。为了实现波导的温度不敏感特性,在硅波导上覆盖一层 SU-8 光刻胶^[10]包层,这种材料的热光系数为负值,可有效地减少硅波导谐振随温度的漂移,降低波导开关的温度敏感特性。

常温下,硅、SU-8 和二氧化硅在波长 1.6 μm 附近折射率分别为 3.46、1.57 和 1.44^[11]。对于一维光子晶体波导结构,波导的有效热光系数可以表示为^[12]:

$$\frac{dn_{\text{eff}}(\lambda)}{dT} = \Gamma_{\text{clad}}(\lambda) \frac{dn_{\text{clad}}(\lambda)}{dT} + \Gamma_{\text{c}}(\lambda) \frac{dn_{\text{c}}(\lambda)}{dT} + \Gamma_{\text{buff}}(\lambda) \frac{dn_{\text{buff}}(\lambda)}{dT} \quad (1)$$

式中, $dn_{\text{eff}}(\lambda)/dT$ 为波导的有效热光系数; $dn_{\text{clad}}(\lambda)/dT$ 、 $dn_{\text{c}}(\lambda)/dT$ 、 $dn_{\text{buff}}(\lambda)/dT$ 分别为包层、芯层、二氧化硅衬底的有效热光系数; Γ_{clad} 、 Γ_{c} 、 Γ_{buff} 分别表示包层、芯层、二氧化硅衬底的限制因子。

波长在 1.6 μm 附近时,硅、SU-8 和二氧化的热光系数分别为 $dn_{\text{si}}/dT = -1.8 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $dn_{\text{SU-8}}/dT = 3.5 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $dn_{\text{SiO}_2}/dT = 1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ^[13-14]。由于硅和 SU-8 的热光系数比二氧化硅的热光系数大一个数量级,因此忽略二氧化硅随温度改变对结构的影响。式 (1) 可以改写为:

$$\frac{dn_{\text{eff}}}{dT}(\lambda) = \Gamma_{\text{si}}(\lambda) \frac{dn_{\text{si}}}{dT}(\lambda) + \Gamma_{\text{SU-8}}(\lambda) \frac{dn_{\text{SU-8}}}{dT}(\lambda) \quad (2)$$

当 $dn_{\text{eff}}/dT = 0$ 时,理论上可以得到零温度敏感的波导。 $dn_{\text{si}}/dT = -1.8 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $dn_{\text{SU-8}}/dT = 3.5 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 所以 Γ_{si} 应是 $\Gamma_{\text{SU-8}}$ 的 1.95 倍。

图 1 为光子晶体谐振腔三维结构示意图,图 2a 为光子晶体谐振腔平面示意图。选取硅层厚度为 220 nm,二氧化硅衬底厚度为 2 μm 的 SOI(Silicon-on-insulator) 平台。基于传统的一维光子晶体谐振腔,设计波导为对称结构,谐振腔为长半轴不同的椭圆柱, SU-8 填充在椭圆硅柱周围。硅椭圆柱谐振腔的长半轴和短半轴分别设为 R_x 和 R_y , R_{y1} 和 $R_{y\text{max}}$ 分别表示中心位置椭圆的长半轴和端部的长半轴。谐振腔内椭圆柱个数 $N = 29$, $N = 2i_{\text{max}} - 1$ 。椭圆柱长半轴为:

$$R_y(i) = R_{y1} + \frac{(i-1)^2(R_{y\text{max}} - R_{y1})}{(i_{\text{max}} - 1)^2} \quad (3)$$

式中, i 从 1 递增至 i_{max} 。硅脊波导宽度 1 μm , 与硅波导同样厚度以及宽度的 SU-8 包层填充在波导空隙处。图 2b、2c 分别为入射波长 1 591 nm, 晶格周期 $a = 0.41 \mu\text{m}$, $R_x = 0.155 \mu\text{m}$, $R_y = 0.27 \mu\text{m}$, $R_{y\text{max}} = 0.45 \mu\text{m}$ 时,波导 x - y 截面与波导中心位置 y - z 截面的稳态电场图,光场受限制均匀分布在 SU-8 与硅柱中,说明波导内的光同时受这两种介质的热光效应影响。

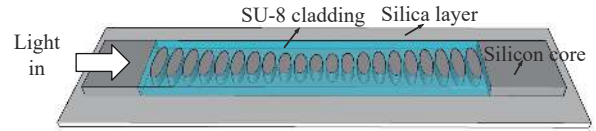
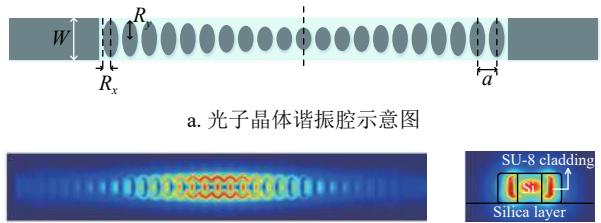


图 1 光子晶体谐振腔三维结构示意图



a. 光子晶体谐振腔示意图

b. 稳态电场分布图（俯视图）

c. 稳态电场分布图（横截面图）

图 2 稳态电场分布图（横截面图）

1.2 温度补偿仿真实验

为了验证 SU-8 的负热光效应可以有效补偿硅的正热光效应,本文使用 FDTD Solutions 仿真软件对纯硅波导与填充 SU-8 包层后的波导进行了温度影响的对比,当温度由 0 $^\circ\text{C}$ 上升至 80 $^\circ\text{C}$ 时,两种波导谐振峰的温度漂移情况如图 3 所示,这两种波导并未对上文的结构参数进行改动,区别仅在于有无 SU-8 填充。

温度灵敏度 $S = d\lambda/dT$ 是评估传感器性能的一个重要指标, dT 是温度变化量, $d\lambda$ 是由于温度变化引起的透射谱漂移量,其含义是单位温度变化所致的透射谱变化程度。由于本文希望 SU-8 能有效补偿硅波导的热光效应,因此波导的温度灵敏度应尽可能低。图 3a 为空气包层的纯硅波导,谐振峰随温度升高发生红移,谐振波长由 1 524 nm 线性移动至 1 536 nm,温度灵敏度达到了 150 pm/ $^\circ\text{C}$ 。而对波导填充 SU-8 包层进行温度补偿后的谐振峰漂移如图 3b 所示,谐振波长集中在 1 591 nm,温度改变时漂移量可以忽略不计。图 4 是以晶格周期 $a = 0.41 \mu\text{m}$ 、 $R_x = 0.155 \mu\text{m}$ 为基准,改变 a 与 R_x 大小,波导温度灵敏度随之发生改变。随着波导中 SU-8 的占比增大,波导谐振峰由温度升高发生红移慢慢变为温度升高发生蓝移。符合先前的预测结果,即 SU-8 的占比越多,光场在 SU-8 中分布越多。

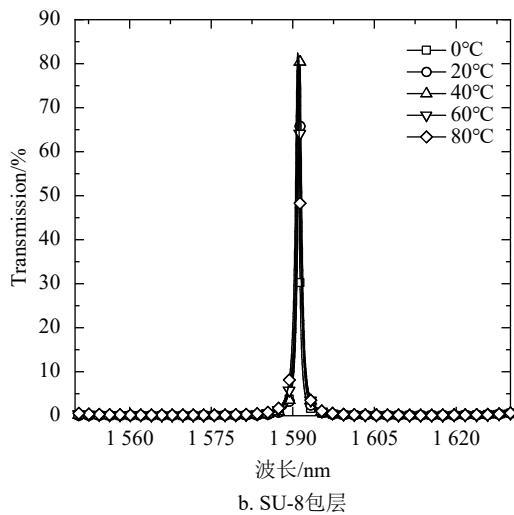
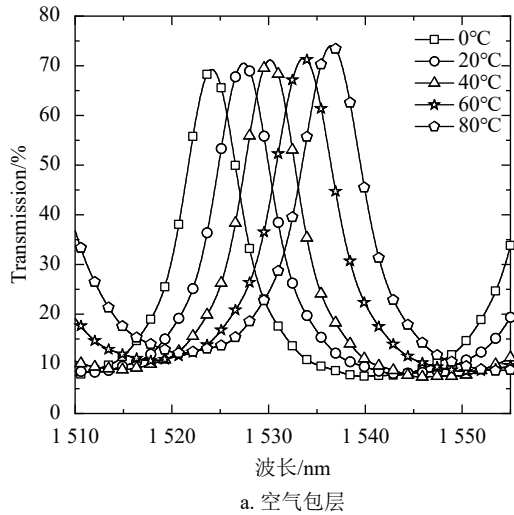


图 3 不同环境温度下波导填充 SU-8 包层前后的透射谱

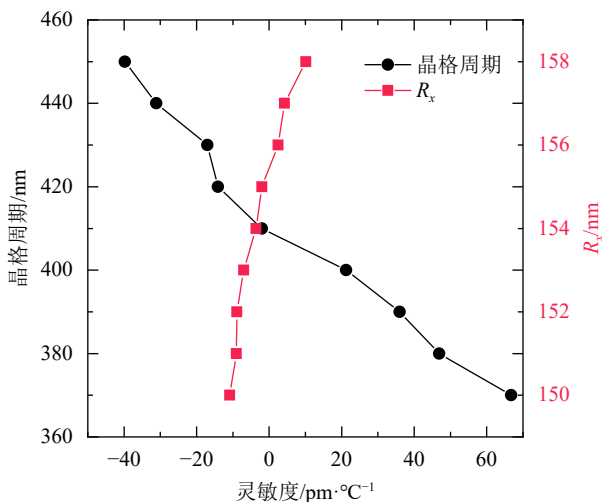


图 4 温度灵敏度与波导结构之间的关系

2 VO₂ 热开关机制

VO₂ 是一种可逆热致相变材料^[15], 在温度高于 68°C 时会由半导体态单斜结构转化为金属态金

红石四方结构, 光学性质与电学性质发生突变, 电阻率发生 4 个量级的变化, 同时近红外的光传输率显著降低。这种材料的相变特性称之为 VO₂ 材料的金属-半导体相变 (metal-semiconductor transition, MST), 而且其晶体结构相变过程的时间非常短, 仅需要几纳秒至几百纳秒^[16-17]。由于这些独特的特性, VO₂ 被认为是制作高灵敏度超高速温度探测器、智能隔热窗、光电开关和光电转换单元等^[18-19]的优秀材料。

为了结合 VO₂ 的温度相变特性实现波导的温度开关作用, 在波导前端添加 VO₂ 贴片, 如图 5 所示, VO₂ 贴片的横截面尺寸与波导相同, 宽度暂设为 100 nm。由于 VO₂ 的温度相变特性, 温度由低温升至 68°C 以上时, VO₂ 贴片的光学性质发生突变, 消光系数增大, 波导的透射率会大幅度降低, 从而达到光开关的作用。填充 SU-8 补偿后的波导温度开关不仅具有良好的消光性, 特征峰峰值也不会随温度变化明显的漂移。本文绘制了 VO₂ 相变前后两种不同状态下开关的透射情况, 图 6a 为波导开关在 1570~1610 nm 波长处不同温度时的透射谱, 谐振峰集中在 1591 nm 处, 几乎无漂移。图 6b 为波导开关谐振峰峰值在不同温度下的透射率, 由开关低温状态 (ON) 时的 64%, 降至开关高温状态 (OFF) 时的 26%。此开关与以往大部分光子晶体光学开关不同, 仅在幅值上发生了变化, 而峰值位置未发生漂移。

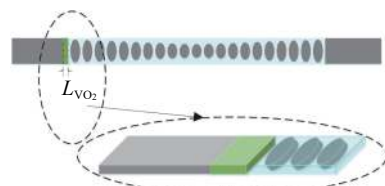
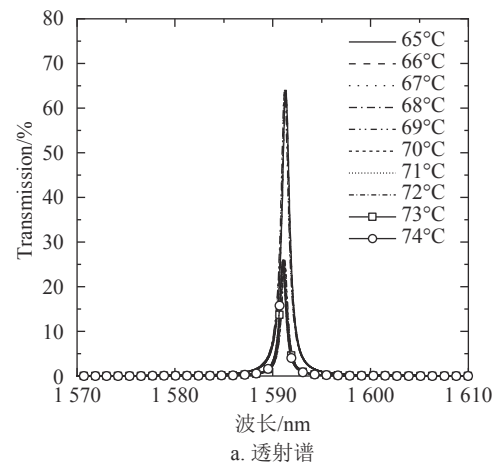
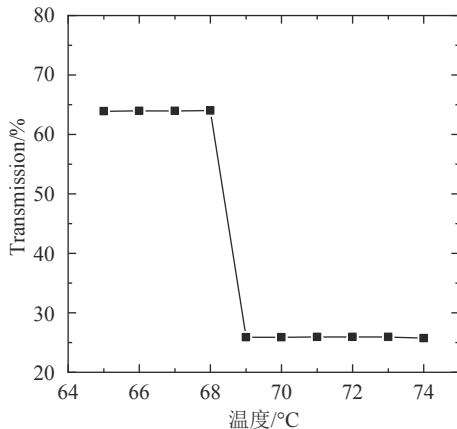


图 5 加入 VO₂ 后的开关结构及其局部放大图





b. 峰值透射率

图6 波导开关在不同温度下的透射情况

3 开关性能分析

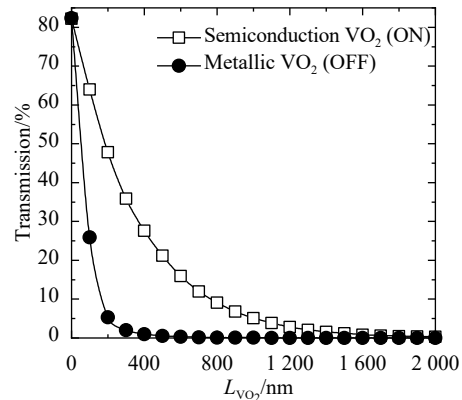
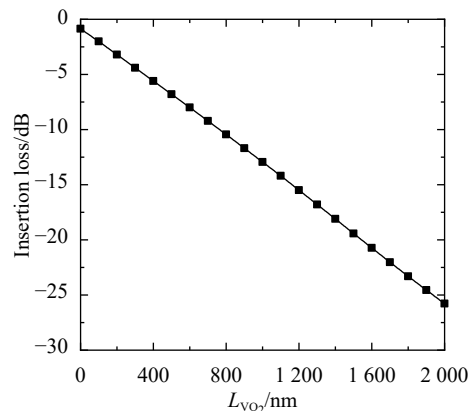
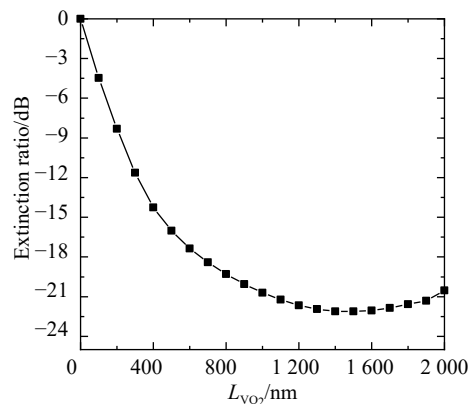
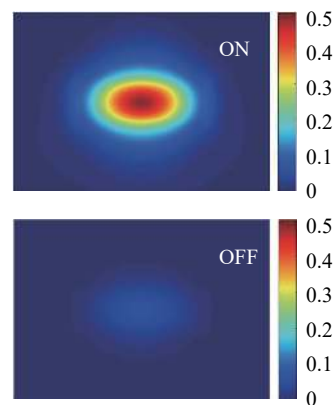
根据上文中透射数据计算 VO₂ 波导开关的插入损耗 (insertion loss) 和消光比 (extinction ratio)。其中插入损耗是指 VO₂ 贴片处于半导体状态下 (开关 ON 状态) 嵌入波导开关的传输损耗, 为:

$$L_{ON} = -10 \lg \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4)$$

式中, P_{in} 和 P_{out} 分别是波导开关归一化后输入和输出的光功率, 其中 $P_{in} = 1$ 。消光比是由 VO₂ 在半导体 (开关 ON 状态) 与金属状态 (开关 OFF 状态) 下嵌入波导后的传输效率损耗差值计算得到:

$$E_R = L_{ON} - L_{OFF} \quad (5)$$

式中, L_{OFF} 是波导开关处于 OFF 状态时波导的传输损耗。VO₂ 厚度对开关的插入损耗与消光比影响较大, 如图 7a 为波长 1 591 nm 时波导的透射率与 VO₂ 厚度的关系, 图中方形空心点表示 VO₂ 处于低温半导体状态, 圆形实心点表示 VO₂ 处于高温金属状态。图 7b 表示 L_{VO_2} 从 0 nm 增至 2 000 nm 时, 波导开关的插入损耗从 0.8 dB 线性下降至 25.8 dB。图 7c 为波导开关消光比随 VO₂ 厚度的变化, 可以看出消光比在 VO₂ 贴片厚度为 1 400 nm 时达到最大值 22.4 dB。考虑到开关插入损耗不应过大, 选择 VO₂ 贴片厚度为 200 nm, 此时波导开关具有约 3.2 dB 插入损耗和约 9.5 dB 的消光比。图 7d 为 VO₂ 贴片厚度为 200 nm 时, 波导输出端处于 ON/OFF 状态下 y - z 截面稳态电场图, 电场强度由开关 ON 状态切换至 OFF 状态时明显降低, 说明开关具有良好的消光特性。

a. 波导开关的透射率与 L_{VO_2} 之间的关系b. 插入损耗与 L_{VO_2} 之间的关系c. 消光与 L_{VO_2} 之间的关系

d. ON/OFF 状态下输出端电场图

图7 开关性能分析

此外, 本文还设计了一种新的级联方法来优化波导开关结构的消光比。选取 VO₂ 贴片厚度 100 nm, 将两个相同的开关前后级联, 拼接后如图 8 所示。波导开关级联个数可以增加, 级联个数与波导开关损耗以及消光比之间的关系如表 1 所示。由表可知波导开关的级联个数越大, 插入损耗越大, 而消光

比在 4 个波导进行级联时达到最大值 27.46 dB, 插入损耗为 8.11 dB。利用这种周期性一维级联的方法可以对此类型波导开关进行量产以实现对不同消光比的需求, 可以有效减少生产成本, 同时降低生产工艺带来的误差, 便于集成。

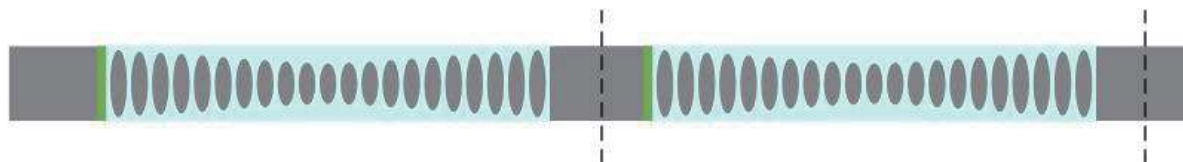


图 8 级联后的波导开关结构示意图

表 1 波导级联后的开关参数

级联个数	L_{ON}/dB	L_{OFF}/dB	E_R/dB
1	1.94	5.87	3.93
2	3.9	11.44	7.53
3	5.85	22.72	16.87
4	8.11	35.57	27.46
5	11.06	37.73	26.66

4 结束语

本文设计了一款新型一维光子晶体波导温度开关, 利用 VO₂ 材料的温度相变特性作为开关机制, 通过填充 SU-8 这一负热光系数材料来补偿硅波导谐振峰的温度敏感特性, 减小了滤波后谐振峰的温度漂移。开关通过温度调控, 当 VO₂ 厚度为 200 nm 时, 波导开关在 1591 nm 处具有约 3.2 dB 插入损耗和约 9.5 dB 的消光比。此外, 还提出了一种新的波导级联方式, 通过简单级联实现开关消光比的优化。这类光开关结构体积小, 易于与其他光学器件集成, 在滤波与光通信方向具有良好的应用价值。

参 考 文 献

- [1] KURAMOCHI E, TANIYAMA H, TANABE T, et al. Ultrahigh-Q one-dimensional photonic crystal nanocavities with modulated mode-gap barriers on SiO₂ claddings and on air claddings[J]. *Optics Express*, 2010, 18(15): 15859-15869.
- [2] LI X, WANG C, WANG Z, et al. Anti-external interference sensor based on cascaded photonic crystal nanobeam cavities for simultaneous detection of refractive index and temperature[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(10): 2209-2216.
- [3] LIU H, LENG L, MA H, et al. Temperature-independent strain sensing characteristics of coupled photonic crystal waveguides[J]. *Optics Communications*, 2016, 367: 17-22.
- [4] XIAO S, KHAN M H, SHEN H, et al. Multiple-channel silicon micro-resonator based filters for WDM applications[J]. *Optics Express*, 2007, 15(12): 7489-7498.
- [5] MORIN F J. Oxides which show a metal-to-insulator transition at the neel temperature[J]. *Physical Review Letters*, 1959, 3(1): 34-36.
- [6] MILLER K J, HALLMAN K A, HAGLUND R F, et al. Silicon waveguide optical switch with embedded phase change material[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 26527-26536.
- [7] CHEN L, YE H, LIU Y, et al. Numerical investigations of an optical switch based on a silicon stripe waveguide embedded with vanadium dioxide layers[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(4): 335-339.
- [8] RAGHUNATHAN V, YE W N, HU J, et al. Athermal operation of silicon waveguides: Spectral, second order and footprint dependencies[J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 17631-17639.
- [9] ZHANG Y, SHI Y. Temperature insensitive lower-index-mode photonic crystal nanobeam cavity[J]. *Optics letters*, 2015, 40(2): 264-267.
- [10] 金里. 基于硅基 SU-8 光波导的微环谐振器及光电探测器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
JIN Li. Microring resonators and photodetectors with SU-8 optical waveguides on silicon[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [11] ZHANG Y, SHI Y. Post-trimming of photonic crystal nanobeam cavities by controlled electron beam exposure[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 12542.
- [12] WINNIE N Y, MICHEL J, KIMERLING L C. Athermal high-index-contrast waveguide design[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(11): 885-887.
- [13] ZHANG Y, LIU P, ZHANG S, et al. High sensitivity temperature sensor based on cascaded silicon photonic crystal nanobeam cavities[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 23037-23043.
- [14] ZHOU L, OKAMOTO K, YOO S J B. Athermalizing and Trimming of Slotted Silicon Microring Resonators With UV-Sensitive PMMA Upper-Cladding[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(17): 1175-1177.

(下转第 293 页)