

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.04.05

垂直耦合悬空型氮化硅微盘光学传感器

冉纲林¹, 顾昌林², 仲路铭², 张福领³, 武腾飞⁴, 冯吉军²

(1. 河南速达电动汽车科技有限公司, 河南 三门峡 472000;

2. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093;

3. 中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450047;

4. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 提出了一种垂直耦合型悬空氮化硅微盘谐振型传感器, 该传感器由一个底部非悬空的接入波导和一个顶部悬空的微盘腔组成, 并用实验证明了其具有较高的器件灵敏度和良好的机械稳定性。对于半径 40 μm 的微盘, 在 1548.98 nm 谐振波长下可以实现超过 10^4 的品质因数以及大小适中、5.66 nm 的自由光谱范围。该传感器的灵敏度可通过覆盖不同的有机液体来测量, 实验测得值约为 554 nm/RIU。该三维传感器的制备与传统的光刻工艺相兼容, 利于大批量低成本生产, 同时凭借器件尺寸小、工艺简单、检测灵敏度高、响应快、免标记等特点, 在国防安全、生物检测和环境监测等方面具有广阔的应用前景。

关键词: 光学微腔; 悬空型微盘; 集成光学; 传感器

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)04-0044-06

Vertically Coupled Suspended Silicon Nitride Microdisk Based Optical Sensor

RAN Ganglin¹, GU Changlin², ZHONG Luming², ZHANG Fuling³, WU Tengfei⁴, FENG Jijun²

(1. Henan SD Electric Vehicle Technology Co., Ltd, Sanmenxia 472000, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

3. The 27th Institute of China Electronic Technology Group Company, Zhengzhou 450047, China;

4. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory, Beijing 100095, China)

Abstract: A vertically coupled suspended silicon nitride resonator sensor is experimentally demonstrated, which consists of a bottom-layer un-suspended access waveguide and a top-layer suspended micro-disk cavity. The presented sensor can realize a high device sensitivity with a good mechanical stability. For a 40 μm -radius disk, a quality factor of over 10^4 and a moderate free-spectral range of 5.66 nm can be obtained at a resonant wavelength of 1548.98 nm. The sensitivity of the sensor can be measured by covering different organic liquids, and the experimental value is about 554 nm/RIU. The fabrication of the proposed three-dimensional sensor is compatible with the conventional photolithography process, which would benefit its mass production at low cost. At the same time, due to its characteristics of small size, simple process, high sensitivity, fast response and mark-free, the sensor has broad application prospects in national defense safety, biological detection and environment monitoring and other aspects.

Key words: optical micro-cavity; suspended micro-disk; integrated optics; sensors

0 引言

近年来, 光学传感器广泛地应用于环境监测^[1]、食品安全、国防军事、医学等方面。在众多的新型传感器中, 光学回音壁模式谐振器因其高品质因子被广泛应用于折射率检测中。相较于其他种类的传感器, 高品质因子微腔有利于提高传感器的检测极限^[2-3]。

目前已经发展出多种回音壁谐振腔结构^[4-7], 如微孔、微盘、微球、微环、光子晶体结构等。悬空结构可以进一步应用于提高器件灵敏度, 降低产品尺寸。目前已报道的悬空器件多为基于二维平面结构的微盘^[8-9]或波导结构^[10-12], 并采用悬空波导或锥形光纤将光耦合到谐振腔中。通过引入接入波导, 可以采用 T 形悬空结构或脊形波导, 前者的制备需要对湿法腐蚀过程

进行精准控制,以形成支撑波导芯层的二氧化硅基座。而后者则需要对脊型结构波导的复杂制造过程进行精准控制。由于悬空型的接入波导宽度较窄,该类器件整体的机械稳定性受到限制。对于利用锥形光纤耦合的结构来说,需要精确控制光纤与微腔的距离,易受环境抖动影响且使用并不是很方便。因此,在保持良好的机械稳定性的同时,可将高灵敏度的悬空微盘谐振器与非悬空的接入波导加以集成,但这对传统二维平面结构来说仍然是一大挑战。

在光子集成生物传感器的各种材料平台中,氮化硅(Si_3N_4)因其具有较宽的透明带宽而具有广阔的应用前景。它的制造与互补金属氧化物半导体(CMOS)技术相兼容,可以实现低成本的大规模生产。相较于高折射率对比的平台如绝缘体上硅^[13],折射率适中的氮化硅对模式的约束能力更小,由此可以增强与外部环境的相互作用并实现高灵敏度的检测^[14]。氮化硅集成光子器件能提供大制造容差,具有较高的光纤耦合效率和极低的光波传播损耗^[15],也易于实现三维结构的集成。目前,已经有多种基于氮化硅平台的垂直耦合谐振器被报道^[16-19]。本文采用三维集成技术,制作并表征了一种垂直耦合谐振器传感器,其结构是由顶层的悬空微盘和底层非悬空的接入波导组成,该器件在保持高灵敏度和高品质因子的同时,可以提高机械稳定性。同时,器件与检测物质直接接触,具有灵敏度高、响应快、免标记等特点,有望应用于对爆炸物和空气中的污染物的检测,在国防安全和环境检测方面具有广阔的应用前景和实用价值。

1 器件制作

本文提出的垂直耦合微盘传感器的结构示意图和显微镜图如图1所示,其中,底层接入氮化硅波导的宽度为 $1.5\text{ }\mu\text{m}$,接入波导的上表面正好与二氧化硅层上表面持平。为了检测不同大小悬空微盘的检测灵敏度,分别制备了半径大小为 $20, 40, 60, 80\text{ }\mu\text{m}$ 的顶层悬空氮化硅微盘。

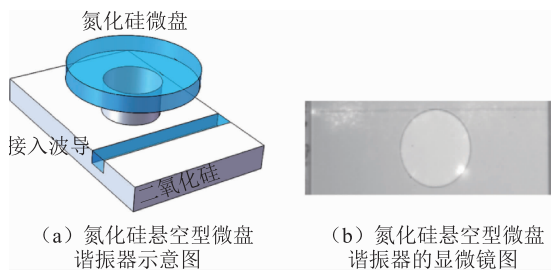


图1 氮化硅悬空型微盘谐振器示意图和显微镜图

图2显示了具体制造过程。这里采用InP衬底,是因为其易于劈裂产生光滑的波导端面,可以保证波导与光纤的高光耦合效率。首先通过等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)沉积 $4\text{ }\mu\text{m}$ 厚的二氧化硅缓冲层^[20],接着通过电子回旋共振(ECR)等离子体增强溅射制备 200 nm 厚的氮化硅层。然后通过电子束光刻(EBL)用电子束抗蚀剂ZEP520A对第一层接入波导进行图案化,再然后沉积 20 nm 的铬(Cr)膜。之后进行剥离工艺(Lift-off),形成Cr掩膜并用其作为反应离子蚀刻(RIE)工艺的蚀刻掩模。反应离子蚀刻(RIE)之后,去除Cr掩膜并沉积 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 厚的中间二氧化硅层。再进行化学机械抛光(CMP)之后,用ZEP520A覆盖二氧化硅层并烘干。涂覆的抗蚀剂厚约 300 nm 且表面足够光滑。然后采用RIE干法刻蚀工艺,蚀刻气体为 CHF_3/O_2 。对气体流速和射频功率进行优化,使得抗蚀剂和二氧化硅膜的刻蚀速率相同。在完全刻蚀掉抗蚀剂之后,继续刻蚀以将中间二氧化硅层厚度减小到约 800 nm 。通过该工艺,可以获得平滑的二氧化硅表面,用于第二次 200 nm 厚的氮化硅芯层沉积。用与第一层波导相似的工艺形成第二层微盘谐振器,并沉积 $2\text{ }\mu\text{m}$ 厚的二氧化硅包覆层,如图2所示。然后用光刻胶AZ1500进行掩模曝光,以制备湿刻窗口。将样品放入氢氟酸(BHF)溶液中对二氧化硅进行湿法腐蚀,以形成悬空的微盘结构。应小心控制刻蚀时间以避免底部光波导出现悬空状态而影响机械强度。最后,对样品进行背面抛光与劈裂制样,以进行性能表征。

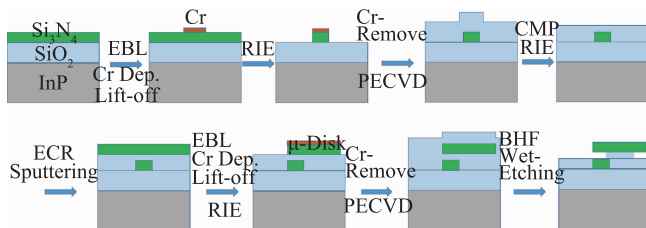


图2 器件制作的流程图

值得注意的是,空气悬置的微盘会使光学模态受到更严格的限制,从而具有更高的内在品质因子。但支撑微盘的底座高度为中间二氧化硅的厚度,应保持足够小以便波导与微盘的充分耦合。这也限制了支撑底座的高度。这样的底座高度可能不足以将光学模场从微盘到氧化物衬底层隔离开来,会降低微腔的品质因子。为了获得足够的外部耦合和较高的本征品质因子,需要权衡波导与圆盘间距,因此选择中间二氧化硅的厚度为 800 nm 。此处所提出的光子集成光路也可

以采用传统的光刻工艺制备,传统的光刻胶可以作为蚀刻掩模使用,不需要额外的铬膜沉积和去除工艺。

2 器件性能表征

为了表征器件性能,采用放大自发辐射(ASE)光源输出的宽带光波耦合到波导中。激光器出射激光首先通过偏振器,然后通过物镜耦合到波导中。偏振器用于调整输入光的偏振状态,其消光比大于 50 dB。波导中的光波与微盘谐振器相互作用后,输出光由锥形光纤收集,并输入光学频谱分析仪(OSA)测试透射光谱。这里采用的 OSA 的最小分辨力是 0.01 nm,这对于表征高品质因子的谐振腔来说是不够精确的,故而本文所得到的品质因子可能比实际值偏小,采用皮米精度的光谱仪可以保证实验结果更加精准。

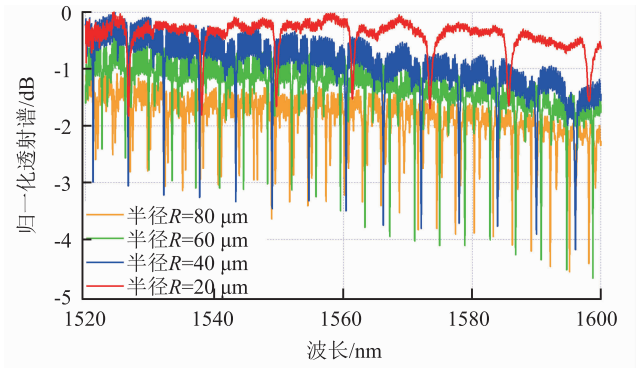
由于底部接入波导上表面没有覆盖二氧化硅层,因而只有横向电磁波(TE)才能传播。图 3(a)记录了不同半径大小的悬空微盘所测试到的归一化透射谱,其中透射谱上部的谐振条纹源于光波在芯片端面间来回反射的法布里-珀罗干涉。随着微盘半径的增大,弯曲相关的散射损耗将会减小,品质因子得以提高,但自由光谱范围(FSR)会随着微盘半径的增大而减小^[21]。半径为 20 μm , 谐振波长为 1549.6 nm 时该微盘器件的品质因子约为 3.9×10^3 , 自由光谱范围为 11.56 nm; 半径为 60 μm 时,在谐振波长为 1548.24 nm 处,该微盘器件的品质因子约为 1.7×10^4 , 自由光谱范围为 3.76 nm。图 3(b)是基于 FDTD 仿真模拟悬空微盘半径在 20, 40 μm 下的归一化透射谱,可以计算出两种半径下的 FSR 分别为 11.31, 5.64 nm, 与实验测得的数值 11.56, 5.66 nm 非常接近。图 3(c)是基于 FDTD 仿真得到的这两种半径下的微盘光场分布图。

通过求解麦克斯韦方程组可以确定微盘谐振模态解。有效折射率法可以将系统转换为二维,并假设微盘足够薄,在垂直方向上只支持一种模式。通过求解 TE 偏振下的超越方程^[22-23],可以得到谐振腔有效折射率为

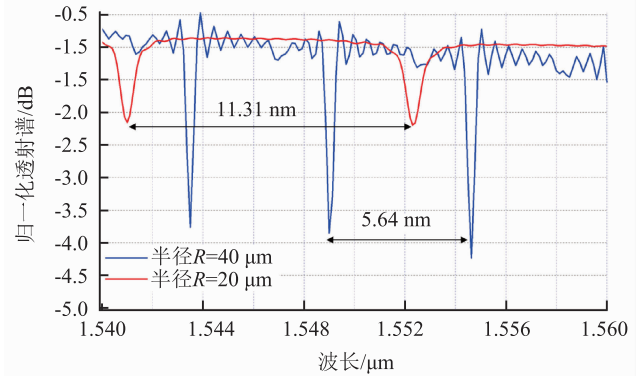
$$\frac{H_{\ell}^{(2)'}(kR)}{H_{\ell}^{(2)}(kR)} = \frac{J_{\ell}'(kRn_{\text{eff}})}{n_{\text{eff}} J_{\ell}(kRn_{\text{eff}})} \quad (1)$$

式中: J_{ℓ} 为第一类贝塞尔函数; $H_{\ell}^{(2)}$ 为第二阶汉克尔函数; ℓ 为模式级数,取决于 $\ell = 2\pi R \cdot n_{\text{eff}} / \lambda_{\text{res}}$, n_{eff} 为谐振波长 λ_{res} 下的有效折射率, $k = 2\pi / \lambda_{\text{res}}$ 为自由空间波矢大小。

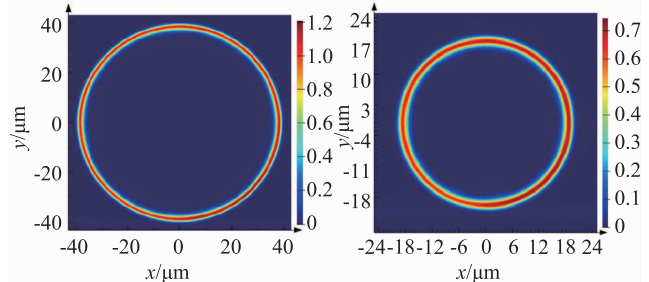
对于谐振波长 λ_{res} , 有效折射率 n_{eff} 可以通过数值求解得到。通过式(1)选取谐振波长计算对应的有效折



(a) 半径为 20, 40, 60, 80 μm 下悬空微盘谐振器的归一化透射谱



(b) 基于 FDTD 仿真半径为 20, 40 μm 的微盘谐振器透射谱



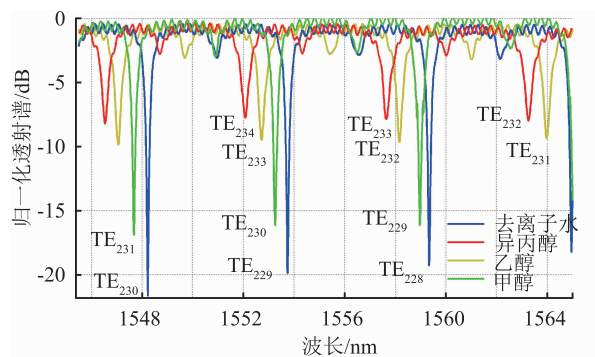
(c) 基于 FDTD 仿真半径为 20, 40 μm 的微盘谐振器场分布图

图 3 微盘谐振器的归一化透射谱及场分布图

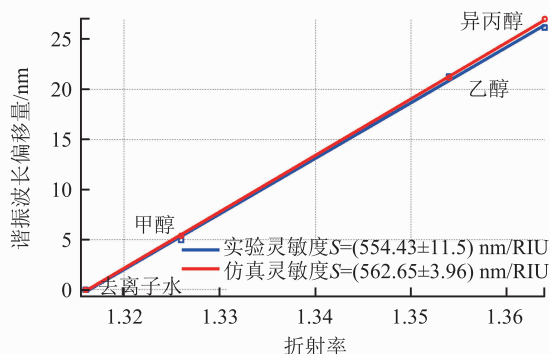
射率。开始计算得到的有效折射率可能与选取的波长不匹配,但可以通过不断迭代直到有效折射率匹配本征值方程^[24]。因此,在确定谐振模式的级数后,就可以分析器件的灵敏度。

通过将不同的有机液体滴在悬空微盘谐振器的上表面来测量器件的灵敏度,其中包括去离子水($n = 1.316$)、甲醇($n = 1.326$)、乙醇($n = 1.354$)和异丙醇(IPA, $n = 1.364$),材料折射率参考相关文献^[8]。由于半径大小为 40 μm 的微盘拥有较小的模式体积,以此为例,该结构在 1548.98 nm 的谐振波长下可以实现超过 10^4 的品质因子和大小适中、5.66 nm 的自由光谱范围。测量透射谱如图 4 所示,微腔模式标记为 TE_ℓ ,可以根据式(1)计算得出。从图 4(a)可以清楚地

看出随着覆盖材料折射率的增大,品质因子和消光比会明显减小,这是由悬空谐振器与波导间的过耦合以及谐振器损耗增大造成的。损耗增大可能是由增加的辐射损耗和材料的红外吸收所引起。被有机液体包覆的微盘将会显著降低其与外部环境间的折射率差值,从而减小微盘内的模态约束能力,进而减小内在的品质因子。尽管如此,由于氮化硅具有从可见到中红外的宽透明带宽,该传感器也有应用于可见光波长区域的潜力。



(a) 半径为40 μm 悬空微盘覆盖不同液体下的归一化透射谱



(b) 半径为40 μm 悬空微盘覆盖不同液体时的谐振波长偏移量图

图4 半径为40 μm 悬空微盘覆盖不同液体下的归一化透射谱和谐振波长偏移量图

现以谐振模式 TE_{229} 为例,从图4(a)看出,随着覆盖不同折射率的有机液体,对应的谐振波长(λ_{res})会有所偏移。图4(b)中绘制的是不同有机液体相较于去离子水模式下对应的谐振波长的偏移量($\Delta\lambda_{\text{res}}$)。根据实验测得数据,可以拟合得到半径40 μm 的悬空微盘谐振器的灵敏度约为554 nm/RIU。通过上述理论方法计算出对应大小的微盘灵敏度约为563 nm/RIU,与实验值非常吻合,如图4(b)所示。实验值与理论值间的差异可能来源于制造误差以及光谱仪精度有限造成的峰值谐振波长测量的不准确性。

需要指出的是,可以通过减小微盘半径进一步提高悬空型微盘器件的灵敏度^[25],但相较于半径较大的

情况,小半径微盘对于光的束缚能力较弱。半径为20 μm 的悬空微盘灵敏度测量值约为615 nm/RIU,大于40 μm 半径时微盘的情况,但这是以牺牲品质因子和机械稳定性为代价。本文所开发的微盘检测器件的灵敏度优于文献[8]中报道的230 nm/RIU光纤耦合悬空微盘谐振器以及文献[9]中提出的灵敏度为247 nm/RIU的T型悬空微环谐振器。

3 结论

本文实现了悬空微盘谐振器与非悬空接入波导的集成,可以同时实现高灵敏度和良好的机械稳定性。微盘半径为40 μm 的传感器在谐振波长为1548.98 nm下,可以实现超过 10^4 的高品质因子、大小适中的5.66 nm的自由光谱范围以及增强的554 nm/RIU的高灵敏度。可以通过减小器件尺寸和改进工艺进一步提高器件性能。该三维传感器的制备与传统的光刻工艺相兼容,器件尺寸小、工艺简单、利于芯片集成。同时器件与检测物质直接接触,具有检测灵敏度高、响应快、免标记等特点,在国防安全、生物检测和环境监测等方面具有广阔的应用前景和实用价值。

参考文献

- [1] Vollmer F, Yang L. Review Label-free Detection with High-Q Microcavities: A Review of Biosensing Mechanisms for Integrated Devices[J]. Nanophotonics, 2012, 1: 267–291.
- [2] Hosseini E S, Yegnanarayanan S, Atabaki A H, et al. High Quality Planar Silicon Nitride Microdisk Resonators for Integrated Photonics in the Visible Wavelength Range[J]. Optics Express, 2009, 17(17): 14543–14551.
- [3] Goykhman I, Desiatov B, Levy U. Ultrathin Silicon Nitride Microring Resonator for Biophotonic Applications at 970 nm Wavelength [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97 (8): 081108-1 – 081108–3.
- [4] Lutti J, Langbein W, Borri P. A Monolithic Optical Sensor Based on Whispering-gallery Modes in Polystyrene Microspheres [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93 (15): 151103-1 – 151103–3.
- [5] Armani A M, Kulkarni R P, Fraser S E, et al. Label-free, Single-molecule Detection with Optical Microcavities [J]. Science, 2007, 317(5839): 783–787.
- [6] Zhang Y, Zeng C, Li D, et al. High-quality-factor Photonic Crystal Ring Resonator [J]. Optics Letters, 2014, 39 (5): 1282–1285.
- [7] Zhai S, Feng J, Sun X, et al. Vertically Integrated Waveguide Self-coupled Resonator Based Tunable Optical Filter [J]. Optics Letters, 2018, 43(15): 3766–3769.
- [8] Wang X, Guan X, Huang Q, et al. Suspended Ultra-small

- Disk Resonator on Silicon for Optical Sensing [J]. Optics Letters, 2013, 38(24): 5405–5408.
- [9] Doolin C, Doolin P, Lewis B C, et al. Refractometric Sensing of Li Salt with Visible-light Si_3N_4 Microdisk Resonators [J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(8): 081104-1-081104-3.
- [10] Feng J, Akimoto R. T-shape Suspended Silicon Nitride Ring Resonator for Optical Sensing Applications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(15): 1601–1604.
- [11] Xia Y, Qiu C, Zhang X, et al. Suspended Si Ring Resonator for Mid-IR Application [J]. Optics Letters, 2013, 38(7): 1122–1124.
- [12] CAO Q, Feng J, Lu H, et al. Surface-enhanced Raman Scattering using Nanoporous Gold on Suspended Silicon Nitride Waveguides [J]. Optics Express, 2018, 26(19): 24614–24660.
- [13] Feng J, Akimoto R. A Three-dimensional Silicon Nitride Polarizing Beam Splitter [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(7): 706–709.
- [14] 翟珊, 顾昌林, 冯吉军, 等. 基于集成氮化硅微腔的光学传感芯片研究[J]. 计测技术, 2018, 38(1): 1674–5795.
- [15] Bauters J F, Heck M J R, John D D, et al. Planar Waveguides with Less than 0.1 dB/m Propagation Loss Fabricated with Wafer Bonding[J]. Optics Express, 2011, 19(24): 24090–24101.
- [16] Roeloffzen C G H, Zhuang L, Taddei C, et al. Silicon Nitride Microwave Photonic Circuits [J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22937–22961.
- [17] Feng J, Akimoto R. Vertically Coupled Silicon Nitride Micro-disk Resonant Filters[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(23): 2391–2394.
- [18] Kokubun Y, Kubota S, Chu S T. Polarization-independent Vertically Coupled Microring Resonator Filter[J]. Electronics Letters, 2001, 37(2): 90–92.
- [19] Feng J, Akimoto R, Hao Q, et al. Three-dimensional Cross-coupled Silicon Nitride Racetrack Resonator-based Tunable Optical Filter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(9): 771–774.
- [20] 刘昊轩, 杭凌俊, 薛俊. PECVD 制备光学氮化硅薄膜均匀性分析研究[J]. 光学仪器, 2014, 36(4): 364–368, 376.
- [21] 丁森. 可调谐氮化硅波导微环谐振器研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [22] Huang Q, Chen J, Song G, et al. Experimental Demonstration of a Microdisk Resonator Filter/buffer Utilizing Two-mode Interference[J]. Optics Letters, 2014, 39(23): 6553–6556.
- [23] Andronico A, Cailliet X, Favero I. Semiconductor Microcavities for Enhanced Nonlinear Optics Interactions[J]. Journal of the European Optical Society-rapid Publications, 2008, 3: 08030.
- [24] Lee M C, et al. Tunable Optical Microresonators Using Micro-

electro-mechanical-system (MEMS) Technology [D]. Los Angeles: PhD thesis, University of California, 2005.

- [25] 卜天容, 陈曜, 何鹏程, 等. 反馈式跑道型光学微环的传感灵敏度研究[J]. 光子学报, 2014, 43(8): 54–60.

基金项目: 国家自然科学基金 (11774235, 61705130, 11727812); 上海市自然科学基金(17ZR1443400); 上海市青年科技启明星计划(19QA1406100); 上海市高校特聘教授(东方学者)岗位计划

作者简介



冉纲林, 工程师, 河南速达电动汽车科技有限公司设备保全业务总监, 1993 年 7 月毕业于中州大学。1993 年至 2013 年 4 月, 就职于郑州日产, 从事传统乘用车制造及自动驾驶, 环境传感方向的研究; 2013 年 5 月至 2017 年 6 月, 就职于大福(中国)自动化设备有限公司广州分公司, 从事汽车制造业自动化设备工程的承建, 在长安福特、本田中国、广汽丰田、东风日产等公司建成汽车生产线 9 条; 2017 年 7 月至今, 就职于河南速达电动汽车科技有限公司, 新工厂建设重要参与者, 并负责设备保全体系的策划和筹备。



顾昌林(1993–), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 研究方向为集成光学器件, 尤其对于 3dB 耦合器, 光栅耦合器, 偏振分束器, 氮化硅微环等器件有较为深入的研究。本科毕业于武汉纺织大学电子与电气工程, 现就读于上海理工大学光学工程专业。著有专利“基于亚波长光栅结构的宽带氮化硅波导耦合器”一篇, 参与“基于微电子加工工艺的集成光子芯片制备研究”, 主要负责芯片的设计与仿真。

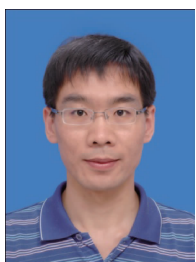


仲路铭(1994–), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向为集成光电子器件。自南京理工大学紫金学院光电信息工程专业后就读于上海理工大学光学工程专业。研究生阶段, 参与波导器件仿真模拟, 著有专利“一种超小型氮化硅波分复用芯片”和“一种可见光波段氮化硅光束偏转芯片”两篇。



张福领(1978–), 高级工程师, 主要从事新体制激光雷达、激光通信及硅光子集成领域的研究工作。2001 年 7 月毕业于郑州大学, 获理学学士学位, 2010 年 6 月毕业于中国科学院上海光学精密机械研究所国家重点联合实验室, 获工学博士学位。2010 年 7 月至今, 就职于中国电子科技集

团公司第二十七研究所光电系统事业部。先后主持和重点参与了陆、海、空等军民品领域的多个型号和预研项目。已发表论文 20 余篇，申请专利 10 余项。



武腾飞(1983 -)，男，研究员，博士，主要研究领域为飞秒激光频率梳及其在精密测量领域的应用。2010 年获中国科学院上海光学精密机械研究所工学博士学位，之后工作于航空工业北京长城计量测试技术研究所；2017 年 6 月至 2018 年 1 月，美国堪萨斯州立大学国家公派访问学者。在主要研究领域发表学术论文 25 篇，其中，6 篇 SCI、10 篇 EI。获国家授权发明专利 14 项，国家自然科学基金委同行评审专家，获国防科技进步二等奖和航空科技进步一等奖各 1 项，中国物理学会终身会员，中国航空学会高级会员。



冯吉军(1984 -)，上海理工大学光电信息与计算机工程学院教授，目前主要从事光电器件及集成等方向的研究，2005 年获中国科学技术大学理学学士、工学学士，2010 年于中科院上海光学精密机械研究所获光学工程博士，随后赴日本产业技术综合研究所(AIST)工作，2013 年获日本学术振兴会(JSPS)外国人特别研究员资助。2015 年获聘上海市东方学者特聘教授，2019 年获上海市青年科技启明星。研制了 II - VI 族半导体激光器、III - V 族材料高速全光开关、硅基三维集成微腔芯片等，已在 Applied Physics Letters, Optics Letters, Optics Express, Journal of Lightwave Technology 等国际知名 SCI 期刊发表一作及通信作者论文近 30 篇，主持国家自然科学基金面上项目、青年项目、上海市自然科学基金等科研项目。