

硅基片上光电传感及相关器件

Silicon-Based Optical Devices for On-Chip Sensing

周治平/ZHOU Zhiping
邓清中/DENG Qingzhong

(北京大学, 北京 100871)
(Peking University, Beijing 100871,
China)

硅基光电子学主要研究和开发以光子和电子为信息载体的硅基大规模集成技术^[1], 其具有片上光通信和片上光电传感两大主要应用。文章中, 我们聚焦于“传感”应用, 结合本课题组在硅基片上光电传感领域的研究成果对其基本原理以及相关器件进行介绍。

传统的光电传感器按结构主要可分为3类: 表面等离子体型^[2]、光纤型^[3]、集成光波导型^[4]。表面等离子体型传感器利用金属-介质界面作为传感结构, 在这一界面横磁波模式(TM)和金属表面电子的相互耦合形成一种特殊的电磁表面波模式——表面等离子体激元(SPP), 其特点是金属材料易于吸附生化分子, 吸附后会对SPP的传播特性产生显著影响从而实现了对吸附物的传感; 光纤型光电传感器以光纤(圆柱形介质波导)为传感介质, 其中待传感物质作为包层材料, 利用光纤传输模式中的倏逝场与包层材料的相互作用实现传感; 集成光波导型光电传感器的基本原理与光纤型相同, 区别在于波导结构

收稿日期: 2017-08-03
网络出版日期: 2017-09-06

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 05-0043-004

摘要: 针对硅基光电子学在片上光电传感中的应用, 分析了硅基片上光电传感的工作原理, 指出该领域的主要研究方向包括: 提升传感灵敏度, 增加传感选择性, 减小温度相关性, 降低系统成本。结合本课题组的研究成果, 总结了其研究现状和各研究方向在光电传感器结构设计方面获得的诸多进展。

关键词: 硅基光电子学; 片上光电传感; 光电子器件

Abstract: Focusing on the application of silicon photonic on-chip sensing, we point out that enhancing the sensitivity, improving the selectivity, reducing the temperature dependency, and lowering the cost are main research directions of silicon photonic on-chip sensing. The research status and progress in photoelectric sensor structure design are also summarized in this paper.

Key words: silicon photonics; on-chip sensing; photonic devices

为平面介质波导。文中我们所讨论的硅基片上光电传感器将生物、化学、物理等各种信息通过器件折射率的变化加载到光波中传播并最终转换为电信号进行处理, 是集成光波导型和表面等离子体型等光电传感器的主要发展方向。相比于传统的光电传感器, 硅基片上光电传感器具有更高的系统集成度, 可以方便地与片上的其他光、电功能器件进行传感系统的单片集成。

1 硅基片上光电传感原理

硅基片上光电传感的基本结构为光波导, 如条形波导、沟道波导等。不同的波导结构会有不同的传感性能, 但工作原理相同。文中, 我们以条形波导为例简述其工作原理。硅基条形波导的横截面结构如图1a)所示, 包括衬底、波导芯区、上包层。根据导行电磁波理论, 波导中的导模可以表示为:

$$\vec{E}(x, y, z) = \vec{E}_t(x, y) \cdot e^{-jn_{eff}k_0z} \quad (1)$$

式(1)中 \vec{E} 为光波的电场强度, 可以表达为横截面上的强度分布 \vec{E}_t 与传播方向的相位变化 $\exp(-jn_{eff}k_0z)$; $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为光波在真空中传播时的波矢, 仅与光波长 λ 相关; n_{eff} 是导模的有效折射率。基模的 $|\vec{E}_t|$ 在波导中的分布如图1b)所示, 光场主要分布在波导芯区, 但也有部分光波分布在衬底和上包层中。因此有效折射率 n_{eff} 主要由波导芯区材料折射率 $n_{芯}$ 决定, 同时也与衬底和包层的材料折射率 ($n_{衬}$ 与 $n_{包}$) 相关。在线性近似下, n_{eff} 可表达为:

$$n_{eff} = \Gamma_{芯} \cdot n_{芯} + \Gamma_{包} \cdot n_{包} + \Gamma_{衬} \cdot n_{衬} + n_0 \quad (2)$$

式中 Γ 表示导模在波导各部分中的光功率分布比例。

由式(1)、(2)可见, 波导中任一材料折射率的改变都会影响

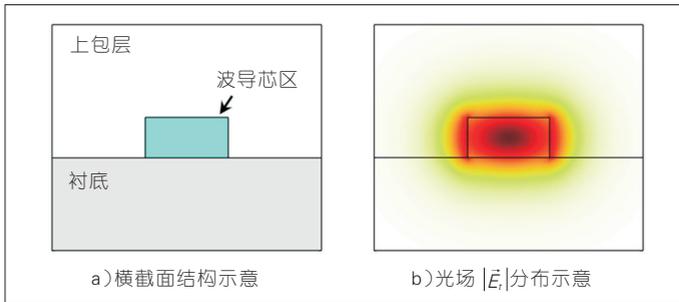


图1 硅基条形波导示意

其传播的光导模的相位。原理上,只要能引起波导中材料折射率变化的物理量都可以被传感。在实际应用中,衬底通常固定为二氧化硅(SiO₂),芯区材料为硅(Si)。通常利用待传感的物理量去影响上包层的材料折射率来实现传感;但待传感量反映在输出光波的相位中,而光波的相位无法进行直接监测。因此需要利用干涉或谐振结构来间接监测,其中最具代表性的是图2a)所示的微环谐振腔^[5-6]。当入射光波长 λ 满足式(3)时,微环内将会发生谐振。由此可见当待传感量引起 n_{eff} 变化时,谐振波长也会发生相应的漂移。

$$n_{eff} \cdot 2\pi R = m\lambda \quad (R \text{ 为微环半径}; m = 1, 2, \dots) \quad (3)$$

利用耦合模理论^[7]可以进一步得出微环的传输谱,如图2b)所示。传输谱的极小值处对应于式(3)中的谐振波长。谐振波长随待传感量发生漂移时,有两种方法进行监测:测量微环的传输谱,监测谐振波长的变化情况,称之为波长监测;固定工作波长在谐振波长附近,监测输出光强的变化情况,称之为强度监测。

前述理论分析将可引起材料折射率变化的物理量传感为光波强度或谐振波长这些可直接监测的物理量。接下来将结合研究实例介绍硅基片上光电传感的几个主要的研究方向包括提升传感灵敏度,增加传感选择性,减小温度相关性,降低系统成本等。

2 提升传感灵敏度

灵敏度指的是传感器能够检测

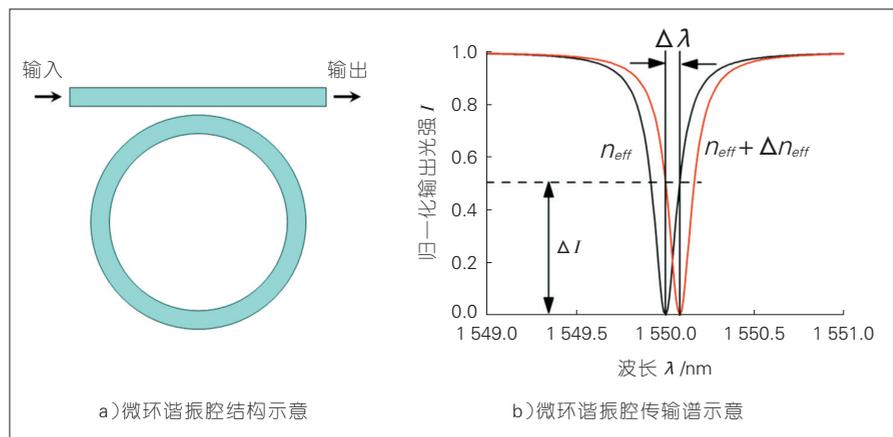
到的最小的待传感量的变化量,它是传感器的基础特性。提升灵敏度则依赖于对器件本身原理的研究。对于波长监测,相同待传感量的变化引起的有效折射率变化量越大则灵敏度越高。根据式(2)可知,让光波导模的光场更多地分布在上包层中,即可提升采用上包层进行传感时的灵敏度。如图3所示的沟道波导可以将光场主要限制在上包层的沟道区域内,其已被广泛用于提升传感灵敏度^[8]。此外,本课题组借鉴于游标卡尺原理提出了图4所示的多谱线漂移传感结构。这一结构通过检测传感环与参考环“重叠谐振峰”的漂移,

其传感灵敏度相对于单环结构提升了100倍,可达 2×10^{-6} 折射率单位(RIU)^[9]。

对于强度监测,除可类似于波长监测通过提升有效折射率随待传感量的变化率来提升灵敏度外,还可通过提升微环谐振波长附近传输谱线的斜率来提升灵敏度。采用如图5a)所示结构,由波导端面反射而产生的光场在直波导中形成法布里-珀罗(FP)谐振,其会和环形谐振腔中的谐振相互耦合,将原有环形谐振腔中的相位反馈到谐振当中,形成Fano谐振。具有Fano谐振特点的谱线具有非对称的谱线分布,一侧谱线的斜率将大幅增加,其传感灵敏度可达 10^{-8} RIU^[10]。采用如图5b)所示结构,将微环嵌入马赫曾德干涉仪(MZI)干涉结构中可以增加传输谱斜率^[11]。两种结构的传感灵敏度分别可以达到 $\sim 1.17 \times 10^{-7}$ RIU和 $\sim 4.9 \times 10^{-8}$ RIU。

3 增加传感选择性

前文提及的所有研究在传感时



▲图2 微环谐振腔示意

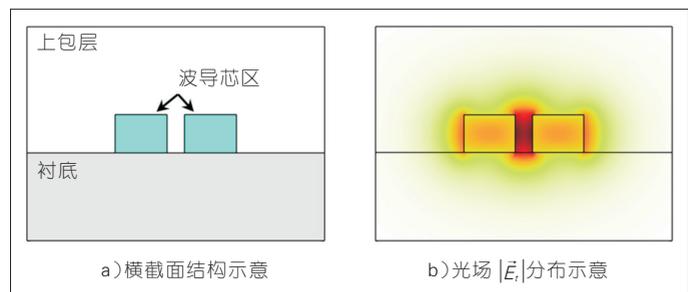
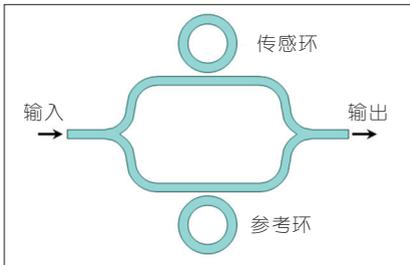


图3 硅基沟道波导示意



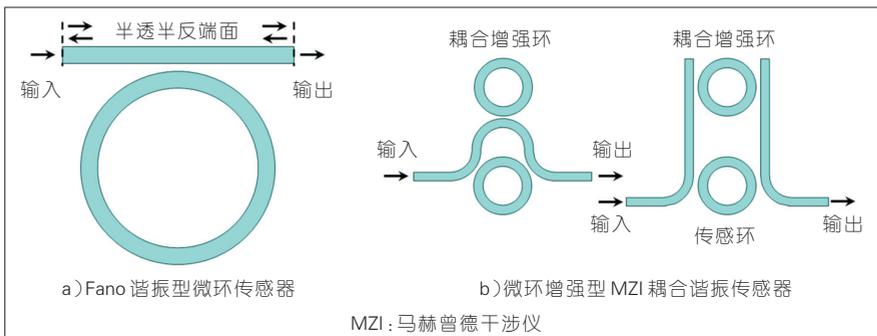
▲图4 多谐振漂移微环谐振腔传感器结构

使得传输谱整体横向漂移,而待传感量的变化会使得传输谱上下漂移。传输谱存在一定的“平底”区域,当温度变化引起的漂移量在这一范围时,将不影响传感。

5 降低系统成本

波长监测可以使用低成本的宽

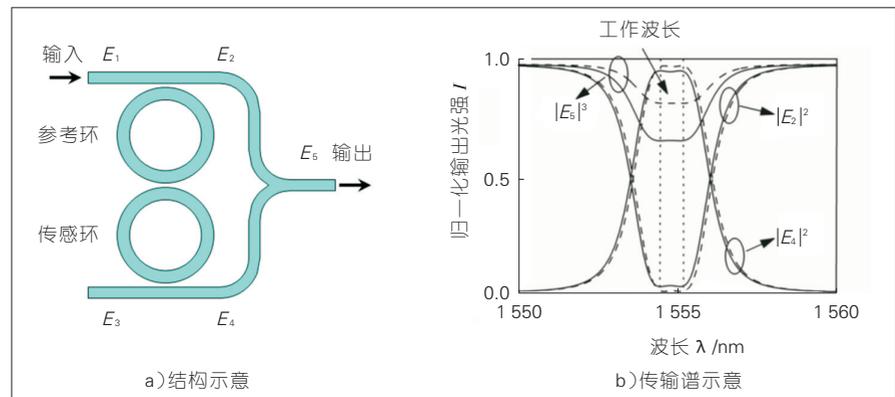
用波长可精确控制的窄线宽激光器作光源,然后利用光电探测器将传感信号转换为电信号。波长可精确控制的窄线宽激光器或光谱分析设备都是十分昂贵的。虽然硅基光电温度传感器可通过互补金属氧化物半导体(CMOS)光刻工艺进行批量加工,具有低成本的特性,但整个系统成本仍旧很高。为了降低系统成本,浙江大学何建军教授课题组提出了串联双环传感^[15]结构,该结构将两个自由光谱范围具有微小差异的微环串联,并将其中一个微环用于传感。当待传感量引起传感环的谐振波长漂移时,整个结构的传输谱包络会在双环的游标效应下显著变化,从而整个系统可以采用低成本宽带光源和光电探测器进行架构,有效降低系统成本。本课题组也提出了一种低成本光电温度传感器^[16],如图7a)所示。匹配结构参数使得MZI两臂满足非对称平衡条件,则其传输谱将没



▲图5 高灵敏度型微环传感器

都不具有选择性,即所有能引起上包层材料折射率变化的物理量都会反映在最终的传感输出信号中且不能区分各个物理量对输出信号的贡献比例。这种传感器可用于已知物质的浓度传感,但不适用于复杂的生化传感。生化传感往往需要从混合物样本(如血清样本)中传感出某一特定组分(如某癌胚抗原)的含量,这就需要传感器具有选择性。硅基片上光电传感器选择性已经被广泛地研究,基本原理是对传感器中波导芯区的表面进行预处理,使其只能吸附特定的待传感物。例如将抗体作为生物探针预处理在波导芯区表层,则其只会选择性吸附相应的抗原^[12]。

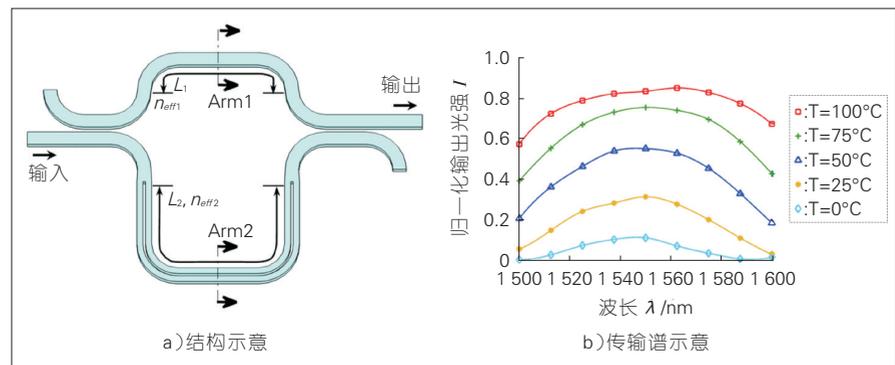
带光源,但需要光谱分析设备进行传感输出信号的处理;强度监测需要使



▲图6 温度不敏感型光电传感器示意

4 减小温度相关性

硅材料具有很强的热光效应,这将使得波导的有效折射率 n_{eff} 随温度而显著变化,会严重干扰传统传感器对目标物理量的传感。为了减小硅基片上光电传感器的温度相关性,本课题组提出了一种基于双环耦合的温度不敏感结构^[13-14],如图6a)所示,其传输谱如图6b)所示。温度变化会



▲图7 低成本温度传感器

有干涉峰,仅是温度的函数。如图7b)所示,传输谱随着温度的变化而整体上下漂移,因而也可以采用低成本的宽带光源和光电探测器来构建整个传感系统。

$$\text{非对称平衡条件: } \frac{n_{\text{eff}2}^0}{n_{\text{eff}1}^0} = \frac{\partial n_{\text{eff}2} / \partial \lambda}{\partial n_{\text{eff}1} / \partial \lambda} = \quad (4)$$

$\frac{L_1}{L_2}$ (上标0表示基准工作点时的值)

6 结束语

硅基片上光电传感器具有低成本、高系统集成度等诸多优点,在未来便携式传感等领域具有广泛的应用前景。文章中,我们对其基于倏逝波的传感原理进行了归纳总结,并结合本课题组的科研成果对当前主要的几个研究方向进行了介绍,包括提升传感灵敏度,增加传感选择性,减小温度相关性,降低系统成本。希望这些内容能有助于读者对硅基片上光电传感及相关器件的理解,积极推动这一研究领域的发展。

参考文献

- [1] 周治平. 硅基光电子学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012
 [2] ANKER J N, HALL W P, LYANDRES O, et al. Biosensing with Plasmonic Nanosensors [J]. Nature Materials, 2008, 7(6): 442–453

- [3] LEUNG A, SHANKAR P M, MUTHARASAN R. A Review of Fiber–Optic Biosensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2007, 125(2): 688–703
 [4] FAN X, WHITE I M, SHOPAVA S I, et al. Sensitive Optical Biosensors for Unlabeled Targets: A Review[J]. Analytica Chimica Acta, 2008, 620(1–2): 8–26. DOI: 10.1016/j.aca.2008.05.022
 [5] CHEN Y, LI Z, YI H, et al. Microring Resonator for Glucose Sensing Applications [J]. Frontiers of Optoelectronics in China, 2009, 2(3): 304–307
 [6] XIA Z, CHEN Y, ZHOU Z. Dual Waveguide Coupled Microring Resonator Sensor Based on Intensity Detection [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2008, 44(1): 100–107. DOI: 10.1109/JQE.2007.909519
 [7] YARIV A. Universal Relations for Coupling of Optical Power between Microresonators and Dielectric Waveguides [J]. Electronics Letters, 2000, 36(4): 321–322. DOI: 10.1049/el:20000340
 [8] DELL'OLIO F, PASSARO V M. Optical Sensing by Optimized Silicon Slot Waveguides[J]. Optics Express, 2007, 15(8): 4977–4993. DOI: 10.1364/OE.15.004977
 [9] YI H, CITRIN D S, CHEN Y, et al. Dual–Microring–Resonator Interference Sensor[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(19): 191112. DOI: 10.1063/1.3263726
 [10] YI H, CITRIN D S, ZHOU Z. Highly Sensitive Silicon Microring Sensor with Sharp Asymmetrical Resonance[J]. Optics Express, 2010, 18(3): 2967–2972. DOI: 10.1364/OE.18.002967
 [11] YI H, CITRIN D S, ZHOU Z. Coupling–Induced High–Sensitivity Silicon Microring Intensity–Based Sensor[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2011, 28(7): 1611
 [12] WASHBURN A L, GUNN L C, BAILEY R C. Label–Free Quantitation of a Cancer Biomarker in Complex Media Using Silicon Photonic Microring Resonators [J]. Analytical Chemistry, 2009, 81(22): 9499–9506
 [13] YI H, CITRIN D S, ZHOU Z. Highly Sensitive Athermal Optical Microring Sensor Based on Intensity Detection[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2011, 44(3): 354–358. DOI: 10.1364/OE.18.002967
 [14] DENG Q, LI X, ZHOU Z, et al. Athermal Scheme Based on Resonance Splitting for Silicon–on–Insulator Microring Resonators [J]. Photonics Research, 2014, 2(2): 71–74
 [15] JIN L, LI M, HE J. Optical Waveguide Double–Ring Sensor Using Intensity Interrogation with a Low–Cost Broadband Source[J]. Optics Letters, 2011, 36(7): 1128
 [16] DENG Q, LI X, CHEN R, et al. Low–Cost Silicon Photonic Temperature Sensor Using Broadband Light Source[C]// The 11th International Conference on Group IV Photonics. USA: IEEE, 2014: WP23

作者简介



周治平, 北京大学信息科学技术学院教授、博士生导师, 教育部长江学者, OSA Fellow, SPIE Fellow, IET Fellow, 中国光学学会理事, 中国光学工程学会常务理事, IEEE中国武汉分会创会主席(2006–2008年), 《Photonics Research》创刊主编, 《Electronics Letters》中国版主编(2008–2010); 承担过国家基金委重点项目、科技部“973”项目、“863”项目, 以及工业界支持的多个横向项目; 多次主持IEEE、SPIE、OSA, 以及中国光学学会等举办的国际学术会议; 主编出版中外物理学精品书系《硅基光电子学》; 已发表论文400余篇, 拥有专利20余项。



邓清中, 北京大学信息科学技术学院博士研究生; 主要研究方向为硅基光电子器件及系统; 已发表SCI/EI收录论文29篇。