

基于少模氮化硅微环谐振器的折射率传感技术

刘明慧,马麟*,邱辞源,何祖源

(上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室,上海 200240)

摘要:针对微环谐振器用于折射率传感时动态范围较窄的问题,提出了一种基于少模氮化硅微环谐振器的折射率传感技术,使谐振波长漂移的计算能够不用考虑原始参考值以及增大折射率探测范围,并验证高阶模对环境变化更敏感。通过理论分析,建立仿真模型,验证了该方法的可行性,并使用具有不同折射率的待测溶液开展传感实验,得到了 91.79 nm/RIU 的折射率灵敏度与 10^{-5} RIU 的分辨率。

关键词:微环谐振器;折射率传感器;氮化硅波导

中图分类号:TN253 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2020)10-0006-03

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.10.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Refractive index sensing technology based on few-mode silicon nitride micro-ring resonator

LIU Minghui, MA Lin*, QIU Ciyuan, HE Zuyuan

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Aiming at the problem of narrow dynamic range when microring resonators are used for refractive index sensing, this paper proposes a refractive index sensing technology based on few-mode silicon nitride micro-ring resonators, which enables the calculation of resonance wavelength drift without considering the original reference value and increase the refractive index detection range, and verify that higher-order modes are more sensitive to environmental changes. After theoretical analysis, a simulation model is established to verify the feasibility of the method, and the sensing experiment is carried out with the solution to be tested with different refractive index. Finally, the refractive index sensitivity of 91.79 nm/RIU and the resolution of 10^{-5} RIU are obtained.

Key words: micro-ring resonator; refractive index sensor; silicon nitride waveguide

0 引言

折射率传感技术是一种对待测物质折射率进行检测的技术,通过对折射率的检测,可以获取物质的纯度、浓度和成分等信息^[1-4]。因此,折射率传感技术被广泛应用于食品安全检测、生化传感以及环境状况检测等领域。衡量折射率传感器性能的主要技术指标包

括折射率灵敏度、分辨率和动态范围。常用的折射率传感的方法有全反射法、干涉法、衍射法以及利用微谐振器进行传感的方法,如微环、微盘等。

近年来,硅基微环谐振器也被应用于折射率传感领域。基于微环谐振器的折射率传感器在生化传感、医疗保健和环境监测等领域中应用十分普遍,该结构能够通过探测物质折射率变化来检测液相或气相物质以及它们之间的化学反应^[5-7]。其中,片上微环谐振器结构由于其独特的优势,比如小尺寸、高灵敏度和高分辨率以及使用 SOI(Silicon-on-Insulator)技术可能实现的批量生产和低成本,具有很大的吸引力^[8-11]。微环谐振器用于折射率传感通常有 2 种检测方式,强度法和波长法。强度法是在相同波长处检测强度的变化,只能在谐振波长附近进行探测,动态范围较窄。波长法是检测谐振波长的漂移,动态范围则是 2 个谐振

收稿日期:2019-11-23。

基金项目:国家重点研发计划(2019YFB1802900)资助;国家自然科学基金(61775138,61835006)资助。

作者简介:刘明慧(1994—),女,甘肃武威人,硕士生,现就读于上海交通大学电子信息与电气工程学院电子与通信工程专业,主要从事光传感相关的技术研究工作。2019 年 7 月参加(亚太)光电子与光通信会议,发表会议论文 1 篇,同月申请“新型微环折射率传感测量装置”专利 1 项。

*通信作者:马麟(E-mail: ma.lin@sjtu.edu.cn)。



峰之间的宽度,这个宽度也被称为自由光谱范围(FSR),因此微环折射率传感器更多的是选用波长法。目前,大部分结构的优化都是针对灵敏度的提高,增大动态范围的做法较少。为此,本文提出一种基于少模氮化硅微环谐振器的折射率传感技术,其中的折射率传感器不用计算某一谐振波长的位移,而是计算基模和高阶模的谐振波长位移差值。

1 基于少模氮化硅微环的折射率传感原理

基于少模氮化硅微环的折射率传感技术的原理如下:光波导中的光场穿透到外部媒介中形成倏逝场,倏逝场对外部环境变化十分敏感,因此当波导附近折射率改变时,倏逝场会发生变化,这使得微环的传输光谱中谐振峰的位置会发生漂移,以此来对折射率变化的测定如式(1)所示。

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_g} \quad (1)$$

其中, $\Delta\lambda$ 是谐振波长的漂移, λ 是谐振波长, Δn_{eff} 是当光源波长改变以及外部环境折射率改变时的有效折射率的变化, n_g 是波长 λ 时的群折射率。 λ 、 n_g 的表达式分别为:

$$\lambda = \frac{2\pi r n_{\text{eff}}}{m} \quad (2)$$

$$n_g = n_{\text{eff}} - \lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \lambda} \quad (3)$$

其中, n_{eff} 是有效折射率, r 是微环半径, m 是谐振级数(一个整数)^[12]。

少模微环传感原理示意图如图1所示。与单模微环不同的是,少模微环可以支撑多个模式。由于外部媒介中的倏逝场分布与阶数有关,高阶模比基模延伸到包层的距离更长,因此高阶模对折射率的变化更敏感。高阶模对折射率变化更强的敏感性使其对应的谐振峰漂移大于基模的谐振峰漂移,少模微环传感实验利用这一特点,通过计算2种模式对应的谐振峰漂移之差来检测折射率的变化。

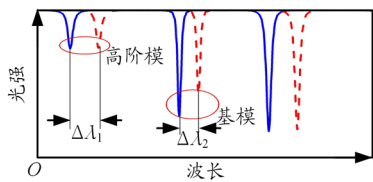


图1 少模微环传感原理示意图

2 少模微环折射率传感的理论计算

本文使用有限元法对少模氮化硅波导开展了数值计算分析,仿真参数如表1所示。

根据式(1)~式(3),可以计算得到基模和高阶模

表1 仿真参数

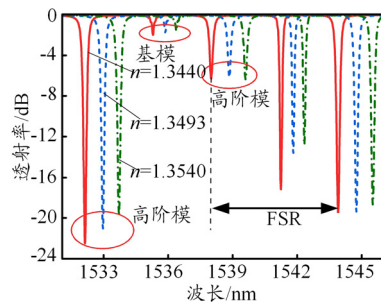
折射率	波长/nm	波导尺寸/ μm		有效折射率		
		宽度	厚度	基模	第一高阶模	第二高阶模
1.34	1550	2	0.4	1.698859	1.647054	1.560239
1.345	1550	2	0.4	1.699325	1.647633	1.561063

在折射率改变后谐振波长的漂移分别是 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 。计算结果表明:待测物的折射率可以通过测量相邻模式的漂移,即 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 的差值来计算,而不需要做额外的校准。灵敏度(S)的表达式如式(4)所示。

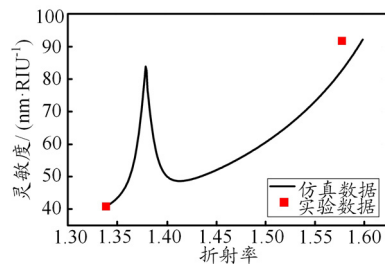
$$S = \frac{\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2}{\Delta n} \quad (4)$$

其中, $\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2$ 代表谐振波长的相对差值, Δn 是折射率的变化。本文通过有限时域差分法计算得到了该结构的透射光谱。仿真所用的参数与实验中所用的微环结构参数是一致的。图2(a)展示了待测物折射率分别为1.3440、1.3493和1.3540时所计算得到的传感结构的透射谱。可以看出,与基于单模微环结构的传感器相同的是,当折射率改变时,光谱整体存在漂移,并且FSR约为5.91 nm;另一方面,基模和高阶模的谐振波长漂移存在一个差值。本文使用有限元法计算了所提出的传感器的灵敏度-折射率的函数,结果如图2(b)所示。可以看出,一般情况下,灵敏度随着折射率的增大而增大,在折射率为1.38左右出现了一个峰值,可能是由于高阶模式的截止波长的变化所导致的。

上述计算表明灵敏度与第一高阶模和基模的波长漂移的差值密切相关。为了提高灵敏度,可以使用更高阶模与基模的差值。根据表1中的实验数据,结合式(1)~式(3)计算可知,基模与第二高阶模对应的谐振波长的位移大约是0.24 nm,是基模与第一高阶模的差值的3倍。



(a) 不同折射率待测物情况下计算的透射光谱



(b) 灵敏度与折射率的关系

图2 理论计算结果

3 传感实验与分析

实验中使用的微环结构由直径为 $60\text{ }\mu\text{m}$ 、横截面积为 $0.4\times 2.0\text{ }\mu\text{m}^2$ 的氮化硅环型波导和宽度为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的氮化硅直波导构成,氮化硅微环制作于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的二氧化硅衬底上,二氧化硅衬底下方为硅基底。为了使折射率传感更加灵敏,结构没有添加上包层。传感实验中的待测物质是折射率分别为 1.3335 和 1.3398 的乙醇溶液以及折射率为 1.5379 和 1.5786 的煤油和硅油的混合物。

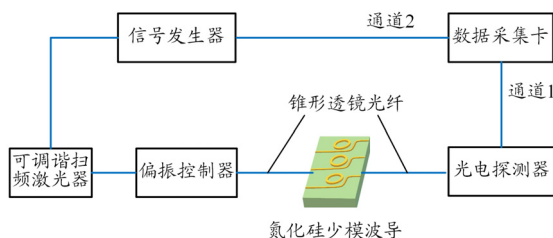
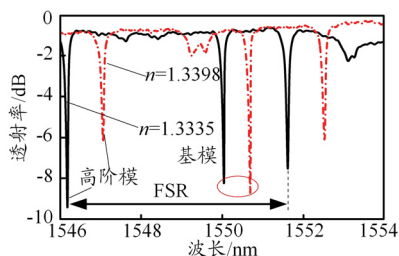
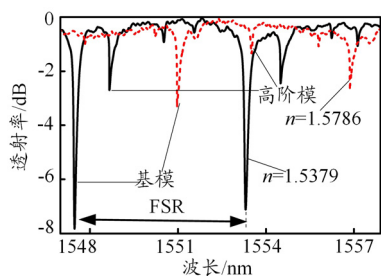


图3 传感实验系统

传感实验系统如图3所示。本文使用C波段可调谐激光器作为光源,经过偏振控制器(PC)后通过锥形透镜光纤耦合到氮化硅少模波导并从波导另一端耦合出来。来自传感波导的输出光由光电探测器(PD)检测,并且使用数据采集卡(DAQ)记录检测到的信号。实验系统的波长分辨率大约为 0.8 pm 。当进行折射率传感实验时,将待测溶液滴于传感芯片的表面,由于待测物质折射率的不同,具有不同折射率的待测溶液测得的透射谱如图4所示。在折射率为 1.34 和 1.58 附近



(a) 折射率为 1.3335 和 1.3398 的透射谱



(b) 折射率为 1.5379 和 1.5786 的透射谱

图4 具有不同折射率的待测溶液测得的透射谱

漂移分别是 3.5312 nm 和 4.8518 nm 。使用式(4)计算可得,当折射率在 1.34 和 1.58 左右时,灵敏度分别为 40.89 nm/RIU 和 91.79 nm/RIU 。这个实验结果与图2(b)的计算结果具有较好的一致性。由于高阶模与基模对折射率变化的灵敏度不同,因此会产生不同的谐振波长漂移,通过计算二者漂移之差,可以有效检测折射率的变化。

4 结束语

本文提出了一种基于少模氮化硅微环的折射率传感器,其传感原理是计算基模和高阶模谐振波长位移的差。实验中,该器件的灵敏度达到了 91.79 nm/RIU 。这种折射率传感器能够增大探测范围,使用的氮化硅材料也能够降低波导对温度的敏感性。通过对传感器结构进行优化,有望进一步提升其灵敏度,并在生化传感领域得到广泛应用。

参考文献:

- [1] NOOR M M, RASHID N Z A, ATAN K N, et al. Characterization of Optical Fiber Dissolved Oxygen Sensor for Aquaculture Sensing and Monitoring[J]. Procedia Chemistry, 2016, 20: 8–11.
- [2] 刘茂环,樊昕昱,王彬,等. 基于扫描光谱测量技术的快速高精度折射率传感系统[J]. 光通信技术, 2020, 44(8): 10–13.
- [3] 王金豆,葛海波,李彩虹,等. 倾斜长周期光纤光栅的折射率传感特性[J]. 光通信技术, 2020, 44(4): 23–25.
- [4] 何其睿,葛海波,刘睿. 高灵敏温度自补偿折射率传感器的研究[J]. 光通信技术, 2018, 42(2): 31–34.
- [5] BEDI A, SINGH S, KUMAR S, et al. Design of microring resonator sensor for liquid chemical sensing application[J]. Frontiers in Optics, 2018. DOI: 10.1364/FIO.2018.JTu2A.109.
- [6] SUMETSKY M, WINDELER R S, DULASHKO Y, et al. Optical liquid ring resonator sensor[J]. Optics Express, 2007, 15(15): 14376–14381.
- [7] LI X, ZHANG Z, QIN S, et al. Sensitive label-free and compact biosensor based on concentric silicon-on-insulator microring resonators[J]. Applied Optics, 2009, 48(1): 90–94.
- [8] VOS K D, BARTOLOZZI I. Silicon-on-Insulator microring resonator for sensitive and label-free biosensing [J]. Optics Express, 2007, 15(12): 7610–7615.
- [9] LACCY S, WHITE I M. Versatile opto-fluidic ring resonator lasers with ultra-low threshold[J]. Optics Express, 2007, 15(23): 15523–15530.
- [10] ARMANI A M, VAHALA K J. Heavy water detection using ultra-high-Q microcavities[J]. Optics Letters, 2006, 31(12): 1896–1898.
- [11] RAMACHANDRAN A, WANG S. A universal biosensing platform based on optical micro-ring resonators [J]. Biosensors & Bioelectronics, 2008, 23(7): 939–944.
- [12] SUN Y, FAN X. Optical ring resonators for biochemical and chemical sensing[J]. Analytical & Bioanalytical Chemistry, 2011, 399(1): 205–211.