

温度不敏感聚合物波导微环光学生化传感器研究

韩秀友¹ 韩笑男¹ 王志灵¹ 邵宇辰¹ 武震林¹ 任 军² 王锦艳³ 滕 婕⁴ 赵明山¹

¹大连理工大学物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116024

²大连理工大学生命科学与技术学院, 辽宁 大连 116024

³大连理工大学化工学院, 辽宁 大连 116024

⁴中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽 合肥 230088

摘要 温度敏感性是影响波导微环光学生化传感器性能的重要因素。从微环谐振方程出发分析了微环传感器温度敏感性产生的机理,研究了以SU8-NOA61-SU8 三明治结构聚合物衬底代替传统硅衬底,利用衬底的热膨胀效应抵消波导的热光效应,来消除聚合物波导微环光学生化传感器的温度敏感性。采用 ANSYS 软件对三明治衬底的厚度进行了仿真设计,得到了温度不敏感条件下的衬底厚度参数。对 SU8 和 NOA61 旋涂成膜工艺进行了实验研究,得到 SU8 和 NOA61 的膜厚控制精度分别为 0.07 $\mu\text{m}@20\text{ r/min}$ 和 0.34 $\mu\text{m}@20\text{ r/min}$ 。分析得到三明治聚合物衬底波导微环传感器的温度敏感性和探测极限值,达到了带有温控装置的硅衬底聚合物波导微环传感器的性能。

关键词 集成光学; 聚合物波导; 微环; 光学生化传感器; 温度敏感性

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1113004

Temperature Insensitive Optical Biosensor Based on Polymer Waveguide Microring

Han Xiuyou¹ Han Xiaonan¹ Wang Zhiling¹ Shao Yuchen¹ Wu Zhenlin¹
Ren Jun² Wang Jinyan³ Teng Jie⁴ Zhao Mingshan¹

¹School of Physics and Optoelectronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

²School of Life Science and Biotechnology, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

³School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

⁴No.38 Research institute, China Electronics Technology Group Corporation, Hefei, Anhui 230088, China

Abstract The temperature sensitivity is the key factor to influence the performance of optical biosensor based on waveguide microring. According the resonant equation of the waveguide microring, the mechanism inducing the temperature sensitivity is analyzed. The sandwich polymer substrate of SU8-NOA61-SU8 is employed to replace the conventional silicon substrate. The thermo-optic effect of the waveguide is counteracted by the thermo-expansion effect of the sandwich polymer substrate, resulting in the temperature insensitivity of the all polymer waveguide microring biosensor. The optimized thicknesses of the sandwich substrate for the temperature insensitive microring sensor are obtained by the design with ANSYS software. The films of SU8 and NOA61 are prepared with the spin coating technique. The controllable thickness precisions of SU8 and NOA61 films are 0.07 $\mu\text{m}@20\text{r/min}$ and 0.34 $\mu\text{m}@20\text{r/min}$, respectively. The temperature sensitivity and the detection limit of the polymer waveguide microring biosensor with the sandwich polymer substrate are as same as the performance of the one on the silicon substrate with a temperature controller.

Key words integrated optics; polymer waveguide; microring; optical biosensor; temperature sensitivity

OCIS codes 130.5460; 350.2460; 350.4010

收稿日期: 2015-07-03; 收到修改稿日期: 2015-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(60807015, 61077015, 61307040)、国家 863 计划(2012AA040406)、科技部国际合作项目(2014DFG32590)、辽宁省自然科学基金(20102020, 2014020002)

作者简介: 韩秀友(1977—),男,博士,副教授,主要从事集成光电子器件的优化设计、制备及应用等方面的研究。

E-mail: xyhan@dlut.edu.cn

1 引 言

集成波导微环光学生化传感器以其结构紧凑、灵敏度高、可阵列集成等优势,在疾病检测、新药创制、安全检测等领域具有广阔的应用前景^[1-3]。集成波导微环的高品质因子(Q 值)特性极大增加了光波在环形腔内往返传输的次数,增强光波倏逝场与待测生物物质相互作用的光程,因而提高了传感器的灵敏度。高 Q 值特性为获得高灵敏光学生化传感提供了必要条件,然而在高灵敏传感的同时,微环对环境温度的变化也极为敏感。环境温度的改变同样会引起微环谐振波长的漂移,这与待测生化样品引起其谐振波长的移动叠加在一起,无法区分。因此消除环境温度敏感性是微环光学生化传感器高 Q 值特性有效发挥必须解决的关键问题。

目前大多数研究报道均是采用外部温控装置对微环传感检测系统进行主动恒温控制^[4],为了确保传感的低探测极限值,需要极高的温度控制精度($<\pm 0.01\text{ }^\circ\text{C}$)^[5]。对于小型化、便携式传感器这必将增加系统的体积和成本。为了避免外部温控装置的使用,近年来人们研究了在传感芯片中单独设置参考微环监测环境温度的变化,利用传感微环输出波长改变量($\Delta\lambda_s$)与参考微环输出波长改变量($\Delta\lambda_r$)的差值($\delta\lambda = \Delta\lambda_s - \Delta\lambda_r$)作为待测样品浓度变化引起的波长改变量,来进行传感检测。Gylfason等^[6]研究了 Si_3N_4 波导上制备传感微环与参考微环,样品溶液和缓冲溶液分别流经传感微环和参考微环,检测二者的波长漂移量,其差值作为样品溶液引起的波长改变量,获得了较好效果。但是该方案假设样品溶液和缓冲溶液具有相同的折射率和温度,这在实际应用中难以完全满足。Xu等^[6]研究了在绝缘体上硅(SOI)波导参考微环上覆盖 SiO_2 或SU8保护层,待测样品溶液同时流经传感微环和参考微环,使得二者处于相同的温度下,解决了文献[5]中的限制。但是该方案需要可调谐激光器同时扫描并测量参考微环和传感微环的波长漂移量,还需计算 SiO_2 或SU8覆盖层引起的波长漂移量,检测系统和解调算法复杂。Liu等^[7]研究了电辅助跟踪SOI双环传感器,传感微环和跟踪微环共同受到环境温度的影响,跟踪微环在实现波长检测的同时抑制传感微环的温度敏感性。尽管其温度敏感性由 59.4 pm/K 降低为 -10.1 pm/K (约6倍),但是仍受到传感微环与跟踪微环的温度敏感性差值的影响(因上包层分别为水溶液和 SiO_2 ,具有相反的热光系数^[8-9]),无法有效消除传感器的温度敏感性。

本文从集成波导微环的谐振方程出发,分析了其温度敏感性的物理机制,以消除聚合物集成波导微环光学生化传感器的温度敏感性为目标,研究了以聚合物SU8-NOA61-SU8的三明治衬底代替传统的硅衬底,利用衬底的热膨胀效应来抵消波导的热光效应,获得温度不敏感传感功能。对SU8-NOA61-SU8三明治衬底的热膨胀效应进行仿真分析,获得了温度不敏感的衬底厚度优化参数。实验研究了旋涂成膜工艺对衬底薄膜厚度的影响,并分析了三明治聚合物衬底波导微环光学生化传感器的温度稳定性和探测极限值,结果表明该传感器达到带有温控装置的硅衬底聚合物波导微环传感器的性能。研究工作为温度不敏感聚合物集成波导微环光学生化传感器的制备奠定了基础。

2 集成波导微环温度敏感机理分析

图1为集成波导微环传感器的结构示意图。

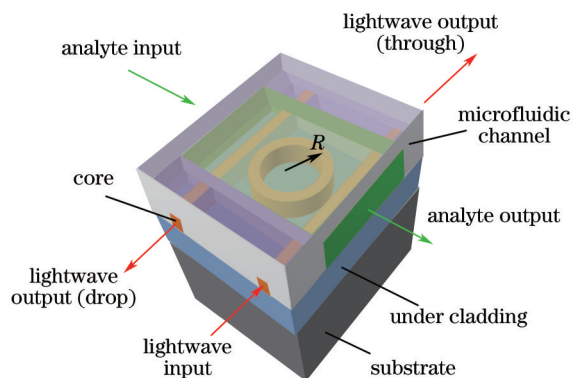


图1 集成波导微环光学生化传感器结构示意图

Fig.1 Structure diagram of the integrated waveguide microring optical biosensor

光波在微环中传输的谐振条件为^[10]

$$n_{\text{eff}}L = m\lambda_R, \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为波导的有效折射率, L 为波导微环的周长, m 为谐振级数 ($m = 1, 2, 3, \dots$), λ_R 为谐振波长。(1)式两边分别对温度 T 求导, 得到波导微环谐振波长对温度的依赖关系

$$\frac{d\lambda_R}{dT} = \frac{L}{m} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + \frac{n_{\text{eff}}}{m} \frac{dL}{dT}, \quad (2)$$

式中右侧第一项表示波导的热光效应对微环谐振波长的影响, 第二项表示因波导的热膨胀效应对微环谐振波长的影响。根据(2)式谐振条件, 波导微环谐振波长随温度的漂移率为

$$\frac{d\lambda_R}{dT} = \frac{\lambda_R}{n_{\text{eff}}} \left(\frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + n_{\text{eff}} \alpha_{\text{sub}} \right), \quad (3)$$

式中 $\alpha_{\text{sub}} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT}$ 为衬底材料的热膨胀系数(CTE)。因为波导微环的芯层和包层都是制备在衬底上, 与这些介质层相比, 通常衬底是很厚的, 当温度发生变化时, 整个波导的热膨胀主要是由衬底的热膨胀引起的^[11], 所以微环的热膨胀特性依赖于衬底材料的热膨胀系数。

由(3)式可知, 如果波导的热光系数和衬底的热膨胀系数正负相反, 通过波导结构参数的设计和衬底热膨胀系数的优化, 可以使(3)式右侧括号内两项之和为 0, 即

$$\frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + n_{\text{eff}} \alpha_{\text{sub}} = 0. \quad (4)$$

(4)式称为温度不敏感波导微环的工作条件。

将(3)式变形, 使其两边分别为谐振波长 λ_R 和波导有效折射率 n_{eff} 对温度 T 的关系式, 对温度从 T_0 到 T 进行积分, 整理可得

$$\lambda_R(T) = \frac{\lambda_{R0}}{n_{\text{eff0}}} n_{\text{eff}} \exp[\alpha_{\text{sub}}(T - T_0)], \quad (5)$$

式中 λ_{R0} 和 n_{eff0} 分别为参考温度 T_0 下波导微环的谐振波长及其导模的有效折射率。由(5)式可得温度变化引起谐振波长的漂移量为

$$\Delta\lambda_R(T) = \lambda_R(T) - \lambda_{R0} = \frac{\lambda_{R0}}{n_{\text{eff0}}} \{ n_{\text{eff}} \exp[\alpha_{\text{sub}}(T - T_0)] - n_{\text{eff0}} \}. \quad (6)$$

3 三明治聚合物衬底优化设计

聚合物材料具有成本低、可旋涂成膜、折射率易调控等优势, 基于该材料的集成波导器件可采用微纳米压印工艺来制备, 避免了通常硅、二氧化硅等无机波导器件制备所需的光刻、刻蚀等复杂工艺, 并可实现与光源、光电探测器等的混合集成, 近年来相关研究受到极大关注并取得重要进展^[12-18]。基于聚合物材料的集成波导光学生化传感器, 其聚合物波导表面具有良好的生物兼容性, 极大简化特异性生物敏感膜的固载工艺, 利于免标记检测功能的实现^[19-20]。对于生化传感应用, 待测样品多为水溶液, 聚合物波导可工作在水溶液具有极低吸收率的 650 nm 或 830 nm 波段^[13, 21-23], 有效避免 1550 nm 波段水溶液的高吸收损耗(SOI 波导工作局限于该波段^[24])。因此选择 830 nm 波段聚合物波导微环传感器为对象, 对其温度敏感性进行研究。

选择液态聚倍半硅氧烷(PSQ-Ls)聚合物材料^[25]来制备波导微环传感器, PSQ-LH 和 PSQ-LL 分别为波导的芯层和下包层材料, 磷酸盐缓冲液(PBS)为波导的上包层^[26]。830 nm 波段波导芯层和包层材料的折射率分别为: PSQ-LH: 1.5292, PSQ-LL: 1.4582, PBS: 1.3440。材料的热光系数为: PSQ-LH: $-2.4 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$, PSQ-LL: $-2.2 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$, PBS: $-1 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 。结合微纳米压印聚合物波导制备工艺^[27], 波导的横截面为正脊形, 如图 2 所示, 综合考虑波导单模条件、低弯曲损耗及高探测灵敏度要求, 优化设计确定波导的尺寸参数为 $W=1 \mu\text{m}$, $H=1 \mu\text{m}$, $S=0.2 \mu\text{m}$, $R=220 \mu\text{m}$ 。

以 $T_0=20 \text{ }^\circ\text{C}$ 为参考温度, 上、下改变 $10 \text{ }^\circ\text{C}$, 采用光束传播法(BPM)软件, 仿真分析得到不同温度下波导的有效折射率, 获得波导有效折射率随温度的变化关系, 由(4)式求出满足温度不敏感波导微环传感器的衬底材料热膨胀系数, 结果如图 3 所示。可以看出, 无热化条件要求衬底热膨胀系数为 $1.5796 \sim 1.5846 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 。

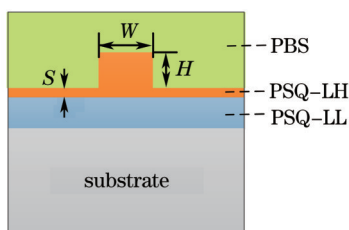


图2 聚合物波导微环传感器波导横截面示意图

Fig.2 Cross section schematic of the polymer waveguide microring sensor

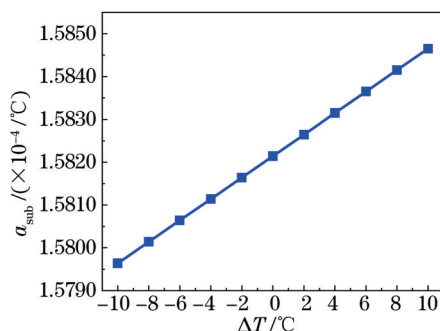


图3 聚合物波导微环传感器温度不敏感条件下的衬底热膨胀系数

Fig.3 Substrate CTEs for the temperature insensitive polymer waveguide microring based optical biosensor

衬底的热膨胀系数在 $1.5796\sim 1.5846\times 10^{-4}/\text{C}$ 范围内变化,由(6)式求出不同温度改变量下微环谐振波长的漂移量,结果如图4所示。由图4可以看出,当衬底热膨胀系数为 $1.5821\times 10^{-4}/\text{C}$ 时,温度在 $\pm 10\text{C}$ 范围内,微环谐振波长的漂移量在 $-1.0\sim 0\text{pm}$ 范围内。在该热膨胀系数下,由(3)式计算得到谐振波长漂移率随温度的变化关系,结果如图5所示,可以看出谐振波长漂移率在 $-0.2\sim 0.2\text{pm}/\text{C}$ 范围内。因此,当衬底热膨胀系数为 $1.5821\times 10^{-4}/\text{C}$ 时,聚合物波导微环传感器对温度敏感性得到有效抑制。

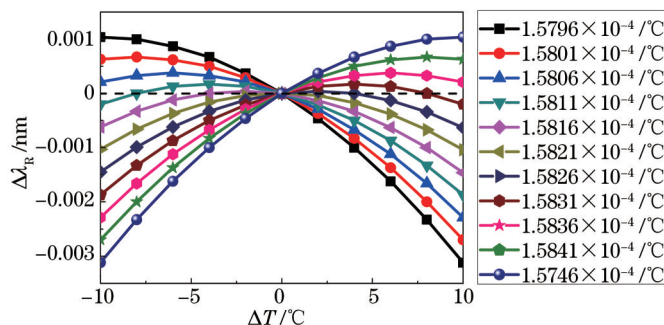


图4 不同衬底热膨胀系数下微环谐振波长漂移量随温度变化的关系曲线

Fig.4 Relation curves of resonant wavelength shift of micro ring versus temperature change at different substrate CTEs

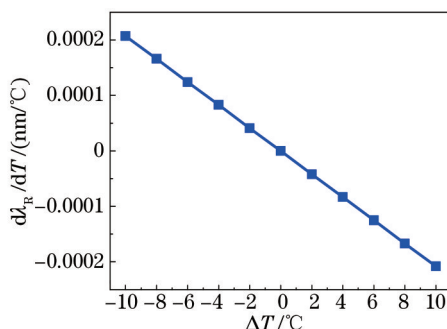


图5 波导微环谐振波长漂移率随温度变化的关系曲线

Fig.5 Relation curve of resonant wavelength shift rate of waveguide microring versus temperature change

聚合物材料的高热膨胀系数特性为获得温度不敏感集成波导微环传感器的衬底材料提供了可能^[28-30]。

在衬底材料选择时需要考虑两个主要因素:1) 满足温度不敏感对热膨胀系数的要求;2) 满足聚合物光波导器件制备中热固化工艺要求(聚合物 PSQ-Ls 波导的热固化温度最高为 200 ℃)。在已有的商品化聚合物中能够同时满足上述两个条件的衬底材料较难获得。选择 Microchem 公司的 SU8 和 Norland Products 公司的 NOA61 两种商品化材料来制备聚合物衬底,这两种材料满足波导器件热固化工艺的温度要求。SU8 的热膨胀系数为 $0.5200 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$, NOA61 的热膨胀系数 $2.3 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$, 分别小于和大于温度不敏感条件下目标衬底的热膨胀系数值 $1.5821 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 。将这两种材料组合构成 SU8-NOA61-SU8 三明治结构衬底,通过三层厚度的优化来达到目标衬底热膨胀系数值的要求。

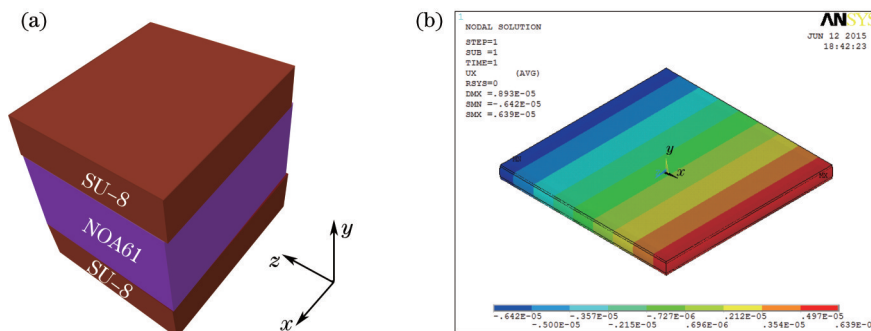


图 6 (a) 三明治衬底结构示意图; (b) ANSYS 中构建的模型

Fig.6 (a) Structure diagram of the sandwich substrate; (b) the model built in ANSYS

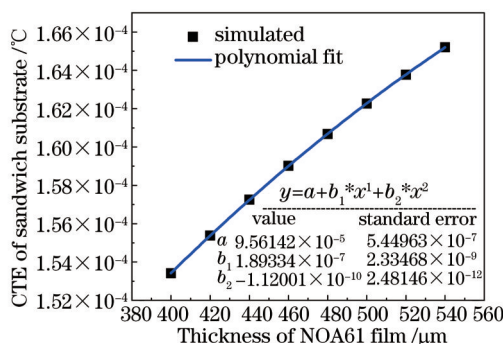


图 7 三明治衬底热膨胀系数随 NOA61 层厚度变化的关系曲线

Fig.7 Relation curve of sandwich substrate CTE versus the thickness of NOA61 film

在 ANSYS 中构建三明治衬底模型,如图 6 所示,根据 SU8 和 NOA61 两种材料的热膨胀系数、粘度等特性,上下两层 SU8 的厚度选为 $100 \mu\text{m}$,仿真分析不同 NOA61 层厚度下三明治衬底的热膨胀系数,结果如图 7 所示。对图 7 中的仿真结果进行二次曲线拟合,得到三明治衬底热膨胀系数与 NOA61 层厚度的关系式,单位为 μm ,

$$y = 9.56142 \times 10^{-5} + 1.89334 \times 10^{-7} x - 1.12001 \times 10^{-10} x^2. \quad (7)$$

前面设计得到温度不敏感的聚合物波导微环传感器衬底热膨胀系数的目标值为 $1.5821 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$, 即(7)式中 $y = 1.5821 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$, 计算得到 $x = 450.8 \mu\text{m}$ 。

为了获得目标衬底,对 SU8 和 NOA61 的旋涂成膜工艺进行了研究。SU8 旋涂成膜分为三个阶段进行,第一阶段:转速 500 r/min 时间 30 s , 第二阶段:转速 1000 r/min 时间 10 s , 第三阶段:时间固定为 30 s , 改变转速。NOA61 旋涂成膜分为两个阶段进行,第一阶段:转速 1000 r/min 时间 10 s , 第二阶段:时间固定为 20 s , 改变转速。采用棱镜耦合仪(SPA-4000)对制备的聚合物薄膜进行厚度测量,图 8(a)和(b)分别给出了 SU8 和 NOA61 成膜厚度与旋涂转速的关系曲线。根据实验测试结果,分析得到 SU8 和 NOA61 成膜厚度控制精度分别为 $0.07 \mu\text{m}@20 \text{ r/min}$ 和 $0.33 \mu\text{m}@20 \text{ r/min}$ 。

分别研究了 SU8 多层成膜、NOA61 多层成膜、以及 SU8 和 NOA61 之间成膜工艺,结果显示多层膜之间呈现良好的粘合性和成膜均匀性,表明三明治聚合物衬底是可行的。同时研究了在 SU8 薄膜上旋涂制备 PSQ-LL 薄膜工艺,并进行了固化,获得了良好的波导薄膜,为下一步器件的制备奠定了基础。

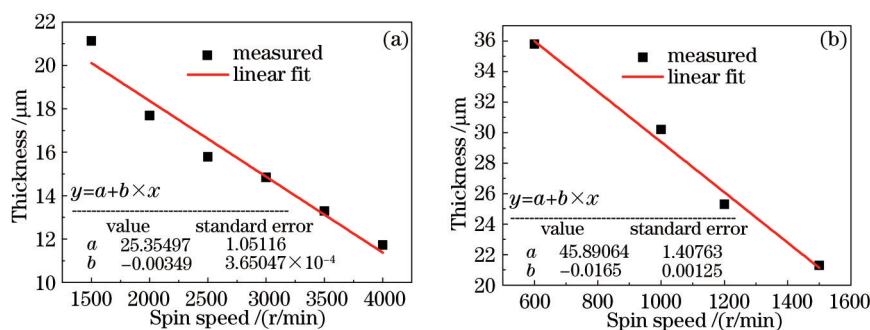


图8 成膜厚度与旋涂转速的关系曲线。(a)SU8; (b) NOA61

Fig.8 Relation curve of film forming thickness versus spin speed. (a) SU8; (b) NOA61

表1 各层厚度偏差对应的三明治衬底热膨胀系数和微环传感器谐振波长漂移量

Table 1 Sandwich substrate CTE and the resonant wavelength shift of micro ring sensor at different thickness deviations

SU8 thickness / μm	99.9			100			100.1		
NOA61 thickness / μm	450.4	450.8	451.2	450.4	450.8	451.2	450.4	450.8	451.2
CTE /(10^{-4} / $^{\circ}\text{C}$)	1.5822	1.5825	1.5829	1.5818	1.5821	1.5825	1.5814	1.5817	1.5821
$\Delta\lambda_R$ /pm	0~-1.1	0~-1.3	0.1~-1.7	0~-1.3	0~-1.1	0~-1.3	0.1~-1.7	0~-1.4	0~-1.1
SU8 thickness / μm	99.8			100			100.2		
NOA61 thickness / μm	450.0	450.8	451.6	450.0	450.8	451.6	450.0	450.8	451.6
CTE /(10^{-4} / $^{\circ}\text{C}$)	1.5822	1.5829	1.5836	1.5814	1.5821	1.5828	1.5806	1.5813	1.5820
$\Delta\lambda_R$ /pm	0~-1.1	0.1~-1.7	0.4~-2.3	0.1~-1.7	0~-1.1	0.1~-1.6	0.4~-2.3	0.1~-1.7	0~-1.2

根据SU8和NOA61的膜厚度控制精度,分析制备的三明治衬底厚度偏差对衬底热膨胀系数及微环传感器热稳定性的影响。在这里考虑SU8厚度偏差分别为 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 和 $\pm 0.2 \mu\text{m}$,NOA61厚度偏差在 $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 和 $\pm 0.8 \mu\text{m}$,温度变化范围是 $\pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。表1给出了SU8和NOA61厚度不同偏差下的三明治衬底热膨胀系数和微环传感器的谐振波长漂移量。从表1可以看出,由于SU8和NOA61的厚度偏差会引起三明治衬底热膨胀值偏离目标设计值,两种厚度偏差下造成微环传感器的谐振波长漂移量最大范围分别是 $0.1\sim 1.7 \text{ pm}$ (SU8: $\pm 0.1 \mu\text{m}$, NOA61: $\pm 0.4 \mu\text{m}$)和 $0.4\sim 2.3 \text{ pm}$ (SU8: $\pm 0.2 \mu\text{m}$, NOA61: $\pm 0.8 \mu\text{m}$)。

4 三明治衬底聚合物波导微环传感性能分析

集成波导微环光学生化传感器的探测灵敏度S定义为谐振波长漂移量随上包层待测样品溶液折射率变化的关系^[11]为

$$S = \frac{\partial \lambda_m}{\partial n_c} = \frac{\partial \lambda_m}{\partial n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_c} = \frac{\lambda_m}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_c}, \quad (8)$$

式中 n_c 是待测样品溶液的折射率,考虑待测样品溶液的折射率变化范围在 $0\sim 0.05$ 之间,按照图2的波导结构参数,仿真分析得到波导有效折射率随待测样品溶液折射率变化的关系,结果如图9所示。对图9中的数据点进行线性拟合得到 $\partial n_{\text{eff}}/\partial n_c = 0.06358$,根据(8)式计算得到传感器的探测灵敏度为 34.68 nm/RIU 。

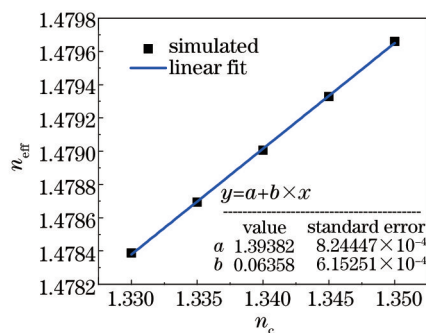


图9 聚合物波导有效折射率随上包层折射率变化的关系

Fig.9 Relationship of effective refractive index of the polymer waveguide versus the refractive index of upper cladding

探测极限(DL)表示能被准确测量的最小的折射率变化量,定义为传感检测系统的检测分辨率与探测灵敏度 S 的比值^[31]

$$D_{DL} = \frac{R_{Res}}{S}, \quad (9)$$

式中 R_{Res} 表示为^[31]

$$R_{Res} = 3\sigma = 3\sqrt{\sigma_{\text{ampl-noise}}^2 + \sigma_{\text{spect-res}}^2 + \sigma_{\text{temp-induced}}^2}, \quad (10)$$

式中 $\sigma_{\text{spect-res}}$, $\sigma_{\text{temp-induced}}$, $\sigma_{\text{ampl-noise}}$ 分别表示系统光谱分辨的均方差噪声、温度噪声和幅度噪声。

$$\sigma_{\text{ampl-noise}} \approx \frac{\Delta\lambda_{\text{FWHM}}}{4.5(R_{SN}^{0.25})}, \quad (11)$$

式中 $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ 为波导微环 drop 端口输出光谱的半峰全宽, R_{SN} 为输出光谱的信噪比。

考虑由可调谐激光器和光功率计构成检测系统,激光器的波长扫描精度为 1 μm ,分析得到系统光谱分辨的均方差噪声为 0.3 μm 。考虑微环的周损耗因子为 0.95、耦合系数为 0.1,微环半径为 220 μm ,计算得到 drop 端口输出光谱的半峰全宽为 10.8 μm 。对比分析带温控装置的传统硅衬底聚合物波导微环传感器和三明治衬底聚合物波导微环传感器的分辨率和探测极限值。对于如图 2 所示制备在硅衬底($\alpha_{\text{sil}}=2.63\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)上的波导微环传感器,取控温装置的控温精度为 0.01 $^\circ\text{C}$,谐振波长漂移量最大值为 1.7 μm ,对应的温度噪声 $\sigma_{\text{temp-induced}}$ 为 0.5 μm 。微环传感器输出光谱的信噪比分别取 10 dB、15 dB、20 dB、25 dB,温度变化量范围为 $\pm 10^\circ\text{C}$ 。根据(9)、(10)和(11)式,计算三明治聚合物衬底微环传感器和带控温装置的硅衬底微环传感器在不同信噪比下的分辨率和探测极值,结果如表 2 所示。

表 2 不同信噪比下三明治衬底和带温控装置硅衬底的微环传感器性能参数

Table 2 Micro ring sensor performance parameters on the sandwich substrate and silicon substrate with temperature controller at different signal to noise ratios

R_{SN}/dB	Performance parameters of biosensor	Biosensor on sandwich polymer substrate			Biosensor on silicon substrate with temperature controller (precision 0.01 $^\circ\text{C}$)
		substrate thickness without deviation	substrate thickness with deviation		
			SU8: $\pm 0.1 \mu\text{m}$ NOA61: $\pm 0.4 \mu\text{m}$	SU8: $\pm 0.2 \mu\text{m}$ NOA61: $\pm 0.8 \mu\text{m}$	
10	$\sigma_{\text{temp-induced}}/\mu\text{m}$	0.31	0.48	0.67	0.48
	$R_{Res}/\mu\text{m}$	4.24	4.38	4.60	4.38
	$D_{DL}/(10^{-5} \text{ RIU})$	12.22	12.62	13.25	12.62
15	$\sigma_{\text{temp-induced}}/\mu\text{m}$	0.31	0.48	0.67	0.48
	$R_{Res}/\mu\text{m}$	3.28	3.46	3.74	3.46
	$D_{DL}/(10^{-5} \text{ RIU})$	9.48	9.99	10.78	9.99
20	$\sigma_{\text{temp-induced}}/\mu\text{m}$	0.31	0.48	0.67	0.48
	$R_{Res}/\mu\text{m}$	2.61	2.83	3.16	2.83
	$D_{DL}/(10^{-5} \text{ RIU})$	7.51	8.15	9.10	8.15
25	$\sigma_{\text{temp-induced}}/\mu\text{m}$	0.31	0.48	0.67	0.48
	$R_{Res}/\mu\text{m}$	2.13	2.39	2.77	2.39
	$D_{DL}/(10^{-5} \text{ RIU})$	6.14	6.90	8.00	6.90

由表 2 可以看出,在三明治聚合物衬底厚度与理论设计值无偏差时,传感器的分辨率和探测极限值均优于带控温装置的硅衬底微环传感器;衬底厚度存在偏差,当 SU8 和 NOA61 的厚度偏差分别为 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 和 $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 时,两种传感器的性能参数相当;当 SU8 和 NOA61 的厚度偏差分别为 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 和 $\pm 0.8 \mu\text{m}$ 时,三明治聚合物衬底微环传感器的性能略差于带控温装置的硅衬底微环传感器。在实际器件制备过程中,需要对衬底制备工艺进行控制,使衬底厚度偏差在允许范围之内,以保证传感器的性能参数。

5 结 论

从微环谐振方程出发分析了微环传感器温度敏感性产生的机理,表明微环传感器的温度稳定性主要由波

导的热光效应和衬底的热膨胀效应共同作用。以消除聚合物波导微环光学生化传感器的温度敏感性为目标,研究了以SU8-NOA61-SU8 三明治聚合物衬底代替传统硅衬底,利用衬底的热膨胀效应抵消波导的热光效应。对SU8-NOA61-SU8 三明治衬底的厚度进行了仿真分析,得到了温度不敏感条件下的衬底厚度参数。对SU8和NOA61的旋涂成膜工艺进行了研究,得到膜厚控制精度分别为 $0.07\ \mu\text{m}@20\ \text{r/min}$ 和 $0.34\ \mu\text{m}@20\ \text{r/min}$ 。根据成膜控制精度,分析了三明治聚合物衬底波导微环传感器的温度敏感性和探测极限,结果表明其达到了带有温控装置的硅衬底聚合物波导微环传感器的性能。研究工作为温度不敏感聚合物波导微环光学生化传感器的制备奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 C Ciminellin, C M Campanella, F Dell'Olivo, *et al.*. Label-free optical resonant sensors for biochemical applications[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2013, 37(2): 51-107.
- 2 Y Chen, F Yu, C Yang, *et al.*. Label-free biosensing using cascaded double-microring resonators integrated with microfluidic channels [J]. *Opt Commun*, 2015, 344: 129-133.
- 3 M Li, X Wu, LY Liu, *et al.*. Self-referencing optofluidic ring resonator sensor for highly sensitive biomolecular detection[J]. *Analytical Chemistry*, 2013, 85(19): 9328-9332.
- 4 De Vos K, Girones J, Popelka S, *et al.*. SOI optical microring resonator with poly (ethylene glycol) polymer brush for label-free biosensor applications[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2009, 24(8): 2528-2533.
- 5 K B Gylfason, C F Carlborg, A Kaźmierczak, *et al.*. On-chip temperature compensation in an integrated slot-waveguide ring resonator refractive index sensor array[J]. *Opt Express*, 2010, 18(4): 3226-3237.
- 6 D X Xu, M Vachon, A Densmore, *et al.*. Real-time cancellation of temperature induced resonance shifts in SOI wire waveguide ring resonator label-free biosensor arrays[J]. *Opt Express*, 2010, 18(22): 22867-22879.
- 7 Q Liu, KW Kim, JS Kee, *et al.*. Thermal characterization of electrical tracing-assisted dual-microring optical sensors[J]. *Opt Express*, 2014, 22(22): 27069-27076.
- 8 A H Harvey, J S Gallagher, J M H L Sengers. Revised formulation for the refractive index of water and steam as a function of wavelength, temperature and density[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1998, 27(4): 761-774.
- 9 A Arbabi, L L Goddard. Measurements of the refractive indices and thermo-optic coefficients of Si_3N_4 and SiO_2 using microring resonances [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(19): 3878-3881.
- 10 W Bogaerts, P D Heyn, T V Vaerenbergh, *et al.*. Silicon microring resonators[J]. *Laser & Photonics Rev*, 2012, 6(1): 47-73.
- 11 Y Kokubun, N Funato, M Takizawa, Athermal waveguides for temperature-independent lightwave devices[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(11): 1297-1300.
- 12 D X Dai, B Yang, Y Liu, *et al.*. Compact microracetrack resonator devices based on small SU-8 polymer strip waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(4): 254-256.
- 13 Yun Bin Feng, Hu Guohua, Cui Yiping. Polymer micro-ring resonator filter with high quality factor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1013002.
恽斌峰, 胡国华, 崔一平. 高品质因子聚合物波导微环谐振腔滤波器[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1013002.
- 14 M H M Salleh, A Glidle, M Sorel, *et al.*. Polymer dual ring resonators for label-free optical biosensing using microfluidics[J]. *Chem Commun*, 2013, 49: 3095-3097.
- 15 Han Xiyou, Wang Linghua, Wang Yu, *et al.*. Research of notch filter based on polymer micro-ring waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706006.
韩秀友, 王凌华, 王 瑜, 等. 聚合物波导微环陷波滤波器研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706006.
- 16 Zheng Chuantao, Luo Qianqian, Huang Xiaoliang, *et al.*. Analysis and simulation of an ultra-compact polymer five-port optical router [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0313001
郑传涛, 罗倩倩, 黄小亮, 等. 超紧凑聚合物五端口光路由器的分析模拟[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0313001.
- 17 X Y Han, L H Wang, Y Wang, *et al.*. UV-soft imprinted tunable polymer waveguide ring resonator for microwave photonic filtering[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(20): 3924-3932.
- 18 Z Y Zhang, A M Novo, A Polatynski, *et al.*. Colorless, dual-polarization 90° hybrid with integrated VOAs and local oscillator on polymer platform[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2015, Th1F.3.

- 19 C Delezoide, M Salsac, J Lautru, *et al.*. Vertically coupled polymer microracetrack resonators for label-free biochemical sensors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(4): 270–272.
- 20 J Ren, L H Wang, X Y Han, *et al.*. Organic silicone sol-gel polymer as non-covalent carrier of receptor proteins for label-free optical biosensor application[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(2): 386–394.
- 21 L H Kou, D Labrie, P Chylek. Refractive indices of water and ice in the 0.65 to 2.5 μm spectral range[J]. Appl Opt, 1993, 32(19): 3531–3540.
- 22 J Halldorsson, N Barfinnsdottir, A B Jonsdottir, *et al.*. High index contrast polymer waveguide platform for integrated biophotonics [J]. Opt Express, 2010, 18(15): 16217–16216.
- 23 X B Wang, J Sun, Y F Liu, *et al.*. 650 nm 1×2 polymeric thermo-optic switch with low power consumption[J]. Opt Express, 2014, 22(9): 11119–11128.
- 24 S Schmidt, J Flueckiger, WXWu, *et al.*. Improving the performance of silicon photonic rings, disks, and Bragg gratings for use in label-free biosensing[C]. Proc SPIE, 2014, 9166: 91660M.
- 25 H Zhang, J Wang, L Li, *et al.*. A study on liquid hybrid material for waveguides - Synthesis and property of PSQ-Ls for waveguides [J]. Journal of Macromolecular Science Part A--Pure and Applied Chemistry, 2008, 45(3): 232–237.
- 26 L Diéguez, N Darwish, M Mir, *et al.*. Effect of the refractive index of buffer solutions in evanescent optical biosensors[J]. Sensor Letters, 2009, 7(5): 851–855.
- 27 L H Wang, J Ren, X Y Han, *et al.*. A label-free optical biosensor built on a low cost polymer platform[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(3): 920–930.
- 28 Z Zhang, P Zhao, P Lin, *et al.*. Thermo-optic coefficients of polymers for optical waveguide applications[J]. Polymer, 2006, 47(14): 4893–4896.
- 29 S H Nam, J W Kang, J J Kim. Temperature-insensitive flexible polymer wavelength filter fabricated on polymer substrates[J]. Appl Phys Lett, 2005, 87(23): 233504.
- 30 C Chen, H Wang, L Wang, *et al.*. Athermal polarization-independent 49-channel UV curable all-polymer arrayed waveguide grating (AWG) multiplexer[J]. Optik- International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(1): 521–525.
- 31 I M White, X D Fan. On the performance quantification of resonant refractive index sensors[J]. Opt Express, 2008, 16(2): 1020–1028.

栏目编辑: 苏 岑