

# Slot 结构聚合物波导微环光学生物传感器研究

韩笑男<sup>1</sup> 韩秀友<sup>1</sup> 邵宇辰<sup>1</sup> 陆志理<sup>1</sup> 滕 婕<sup>2</sup> 武震林<sup>1</sup> 王锦艳<sup>3</sup> 赵明山<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大连理工大学物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116024

<sup>2</sup>中国电子科技集团 第三十八研究所, 安徽 合肥 230088

<sup>3</sup>大连理工大学化工学院, 辽宁 大连 116024

**摘要** Slot结构在提高集成波导光学传感器灵敏度和降低探测极限值方面具有极大的优势。对基于Slot结构的聚合物PSQ-Ls波导微环光学生物传感器进行了研究。分析了850 nm波段Slot波导的单波导高度、狭缝宽度及单波导宽度对传感器灵敏度的影响,在满足单模传输的条件下,得到了优化的微环传感器横截面尺寸参数。对Slot结构波导微环的弯曲损耗、自由光谱范围等进行了仿真分析,得到微环传感器的消光比、品质因子等随结构参数的变化,确定了优化的微环弯曲半径、耦合效率。与正脊形结构波导微环传感器相比,Slot结构波导微环传感器的灵敏度是前者的两倍,探测极限值是其一半。

**关键词** 集成光学; Slot波导; 波导微环; 光学生物传感器; 探测极限

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0413001

## Study on Polymer Microring Optical Biosensor Based on Slot Waveguide

Han Xiaonan<sup>1</sup> Han Xiuyou<sup>1</sup> Shao Yuchen<sup>1</sup> Lu Zhili<sup>1</sup> Teng Jie<sup>2</sup> Wu Zhenlin<sup>1</sup>  
Wang Jinyan<sup>3</sup> Zhao Mingshan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Physics and Optoelectronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

<sup>2</sup>No.38 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Hefei, Anhui 230088, China

<sup>3</sup>School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

**Abstract** The Slot structure is superior in improving the sensitivity of integrated optical waveguide sensor and decreasing the detection limit. The microring optical biosensor based on PSQ-Ls polymer waveguide with the slot structure is studied. The influence of height, width and slot width of the Slot waveguide on the sensitivity is analyzed at the 850 nm band, and the optimized cross section parameters of microring sensor are gained for the single mode transmission. The bend loss and free spectral range of the Slot waveguide microring are analyzed, and the relationship between structural parameters and performance of microring sensor, such as extinction ratio, quality factor, is obtained. The optimized bend radius and coupling efficiency of the microring are achieved. Compared to the ridge waveguide based microring sensor, the Slot waveguide based microring sensor has twice of the sensitivity and a half of the detection limit.

**Key words** integrated optics; Slot waveguide; waveguide microring; optical biosensor; detection limit

**OCIS codes** 130.5460; 130.6010; 350.5730

## 1 引言

集成波导光学生物传感器基于待测生物样品与光波倏逝场相互作用的原理,通过测量传感器输出光信

收稿日期: 2015-11-03; 收到修改稿日期 2015-12-15

项目基金: 科技部国际合作项目(2014DFG32590)、国家自然科学基金(60807015, 61077015, 61307040)、国家863计划(2012AA040406)、辽宁省自然科学基金(2014020002)、中央高校基本科研业务费专项(DUT13JB01, DUT15TD47)

作者简介: 韩笑男(1991—),女,硕士研究生,主要从事集成光波导器件方面的研究。E-mail: hbu\_hxn@163.com

导师简介: 韩秀友(1977—),男,博士,副教授,博士生导师,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@dut.edu.cn

号的强度、波长或相位的改变量, 获知待测生物样品的浓度(均一传感)或种类(免标记传感)<sup>[1-2]</sup>。通常集成波导光学生物传感器为条波导(横截面为矩形或脊形结构), 待测生物样品与光波倏逝场相互作用的程度较低, 灵敏度不高。Slot 结构波导<sup>[3-6]</sup>在常规波导中设置狭缝, 可以将部分导模约束在狭缝区域中, 增加了待测生物样品与光波相互作用的程度, 在提高传感器的灵敏度方面具有潜在的优势。

早期的 Slot 结构集成光波导传感器研究主要集中于绝缘体上硅(SOI)波导, 该波导折射率差大, 所以波导横截面尺寸和传感器占据芯片的面积非常小<sup>[7]</sup>。然而由于硅材料本身透光特性的限制, SOI 波导大多工作在 1550 nm 波段。对于光学生物传感应用, 待测生物样品通常为水溶液, 其对 1550 nm 波段的光波具有很强的吸收<sup>[8]</sup>, 造成 SOI 波导传感器的损耗很大, 降低了微环的品质因子  $Q$ , 因此劣化了微环传感器的性能<sup>[9]</sup>。与传统的无机材料相比, 有机聚合物材料具有成本低、可旋涂成膜、折射率易调控等优势<sup>[10-12]</sup>。基于该材料的集成波导器件可采用简单的微纳米压印工艺来制备<sup>[13-14]</sup>, 并可实现与光源、光电探测器等的混合集成<sup>[15-16]</sup>。而且, 聚合物波导可在水溶液具有极低吸收率的 650 nm 或 850 nm 波段工作<sup>[17-18]</sup>。同时, 聚合物波导表面具有良好的生物兼容性, 极大地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<sup>[19-20]</sup>。

随着波导加工制备技术的进步, 聚合物基 Slot 波导光学生物传感器成为近年来集成波导光学生物传感技术研究的热点<sup>[21-24]</sup>。Bettotti 等<sup>[21]</sup>仿真分析了影响聚合物基 Slot 波导传感灵敏度的因素, 并对比分析了高折射率差和低折射率差、单狭缝和多狭缝、单模和多模的 Slot 结构波导的灵敏度, 证明了低折射率差 Slot 波导实现高灵敏度传感的可行性。Sun 等<sup>[22]</sup>研究了 1550 nm 波段基于聚合物 SU8 的多 Slot 结构波导微环传感器, 采用电子束刻蚀工艺制备了传感器原型器件, 并实现了氯化钠溶液浓度的均一传感和牛血清蛋白的表面传感原理验证。Hiltunen 等<sup>[23-24]</sup>对 633 nm 波段基于聚合物 Ormocore 的 Slot 波导杨氏干涉结构传感器进行了深入的研究, 包括波导结构设计、微纳米压印制备等, 并实现了葡萄糖溶液浓度的高灵敏度检测。

本文基于聚合物 PSQ-Ls 材料, 对 850 nm 波段 Slot 结构波导微环光学生物传感器进行研究。从提高传感器灵敏度的角度出发, 研究了 Slot 波导的单波导高度、狭缝宽度及单波导宽度对传感器灵敏度的影响。通过仿真分析 Slot 结构波导的单模条件、弯曲损耗、自由光谱范围等, 得到微环传感器的消光比、品质因子等性能随结构参数的变化, 优化了微环传感器的结构参数。Slot 波导的灵敏度是脊形波导的两倍。考虑到检测系统的噪声, Slot 波导的微环传感器探测极限值比脊形波导降低了一半。

## 2 Slot 波导微环传感器的基本理论

图 1(a)、(b)分别为 Slot 波导微环传感器的整体结构和 Slot 波导的横截面示意图。微环采用 Slot 波导结构以便提高传感器的灵敏度, 两平行直波导采用 Strip 波导结构, 以提高输入/输出波导与光纤的耦合效率。分别采用聚合物 PSQ-LH 和 PSQ-LL 作为波导的芯层和下包层材料<sup>[25]</sup>。待测生物样品溶液 Analyte 覆盖波导芯层并填充于 Slot 波导的狭缝区域。采用微纳压印制备聚合物波导传感器<sup>[26]</sup>, 压印脱模后波导芯层会有残留的平板层存在, 其厚度设为  $H_s$ 。Slot 波导微环传感器的结构参数分别为:  $W_s$  为狭缝宽度,  $W$  为单波导宽度,  $H$  为单波导高度,  $R$  为微环弯曲半径(狭缝中心到圆心的距离)。

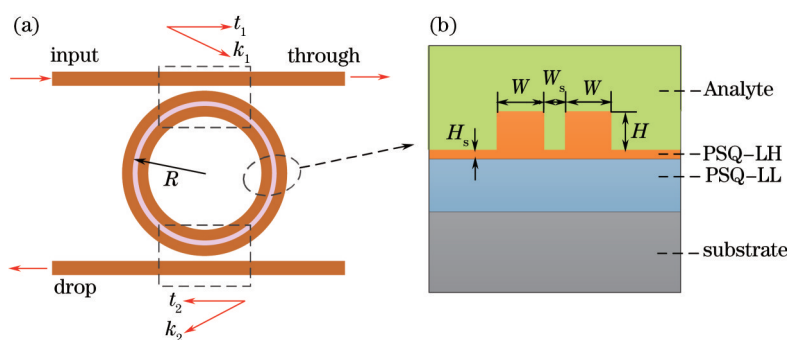


图 1 Slot 结构波导微环生物传感器。(a) 整体结构图; (b) 波导横截面图

Fig.1 Schematic of Slot waveguide microring biosensor. (a) Overall structure; (b) cross section of waveguide  
微环 Drop 端口的归一化光功率传输函数为<sup>[27]</sup>

$$T_D = \frac{|\kappa_1|^2 |\kappa_2|^2 \alpha}{1 - 2\alpha |t_1| |t_2| \cos \theta + \alpha^2 |t_1|^2 |t_2|^2}, \quad (1)$$

式中  $\kappa_1$ 、 $\kappa_2$  和  $t_1$ 、 $t_2$  分别为两个耦合区的振幅耦合系数和振幅传输系数, 满足关系  $|\kappa_1|^2 + |t_1|^2 = 1$  和  $|\kappa_2|^2 + |t_2|^2 = 1$ ,  $\alpha$  为微环的周振幅损耗因子,  $\theta = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} 2\pi R$  为光波在微环中传输一周的相位,  $n_{\text{eff}}$  为波导有效折射率。由(1)式可以得出, 当  $\theta = 2m\pi$  和  $\theta = (2m+1)\pi$  时,  $T_D$  分别取极大值  $T_{D_{\text{max}}}$  和极小值  $T_{D_{\text{min}}}$ , 则 Drop 端口的消光比为

$$E_{\text{ER,D}} = 10 \lg \frac{T_{D_{\text{max}}}}{T_{D_{\text{min}}}} = 10 \lg \left( \frac{1 + \alpha |t_1| |t_2|}{1 - \alpha |t_1| |t_2|} \right)^2 = 10 \lg \left( \frac{1 + p |t_1|}{1 - p |t_1|} \right)^2, \quad (2)$$

式中  $p = \alpha |t_2|$ 。

品质因子  $Q$  反映谐振器输出光谱的锐利程度, 表示为

$$Q = \frac{\lambda_m}{\Delta \lambda_{\text{FWHM}}}, \quad (3)$$

式中  $\lambda_m = 2\pi R n_{\text{eff}} / m$  为谐振波长,  $\Delta \lambda_{\text{FWHM}} = \frac{\lambda_m^2}{2\pi^2 n_g R} \frac{1 - p |t_1|}{\sqrt{p |t_1|}}$  为谐振峰半峰全宽,  $n_g$  为有效群折射率, 与有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的关系为  $n_g = n_{\text{eff}} - \lambda_m \frac{dn_{\text{eff}}}{d\lambda}$ 。  $\Delta \lambda_{\text{FSR}} = \frac{\lambda_m^2}{2\pi R n_g}$  为自由光谱范围, 反映微环传感器探测时的动态范围, 自由光谱范围值越大, 微环传感器可探测的上包层待测生物溶液浓度变化的范围越大。

### 3 Slot波导微环传感器的结构设计

根据图 1(b)所示的 Slot 波导横截面结构, 采用 Rsoft 软件中的有限差分光束传播法(FD-BPM)对波导微环传感器的结构进行优化设计。考虑到在光学生物传感器应用中, 需要在微流通道中先通过磷酸盐缓冲液(PBS)作为参考, 因此在波导分析时选择 PBS 作为波导上包层 Analyte 的材料。850 nm 波段波导各层折射率分别为: 上包层  $n_{\text{PBS}}=1.3400$ , 芯层  $n_{\text{core}}=1.5292$ , 下包层  $n_{\text{cladding}}=1.4582$ 。结合微纳压印聚合物波导制备工艺, 选定平板层厚度  $H_s=0.2 \mu\text{m}$ <sup>[26]</sup>。

灵敏度反映光波导中传输的模场受上包层待测生物溶液影响的程度, 对于波导微环传感器, 灵敏度表示为谐振波长漂移量与上包层折射率变化量的比值<sup>[28]</sup>:

$$S = \frac{\partial \lambda_m}{\partial n_{\text{PBS}}} = \frac{\partial \lambda_m}{\partial n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{PBS}}} = \frac{\lambda_m}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{PBS}}}. \quad (4)$$

灵敏度越高, 表明波导感知待测生物溶液浓度变化的能力越强。光波的偏振状态和波导的横截面结构参数直接影响传感灵敏度, 由于在弯曲波导上任意位置截取的和波导垂直的横截面与图 1(b)所示 Slot 波导的横截面都是相同的, 而且在微环设计中弯曲半径远大于波导横截面尺寸, 波导弯曲对模式折射率影响很小, 故不需要考虑波导弯曲对灵敏度的影响。从获得高灵敏度的角度出发, 选择光波工作的偏振状态, 优化

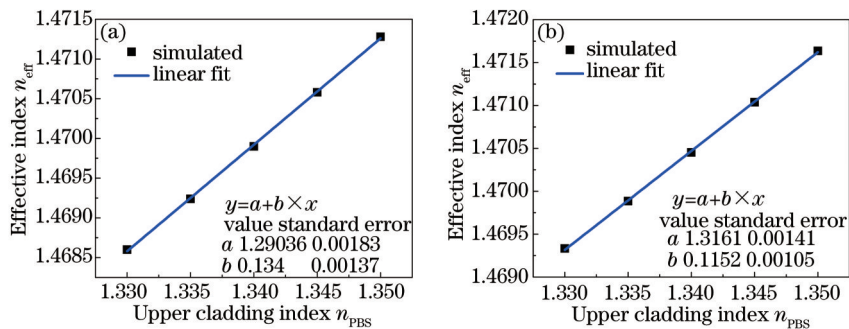


图 2 波导有效折射率随上包层折射率的变化曲线。(a) TE 偏振; (b) TM 偏振

Fig.2 Effective index of waveguide versus index of upper cladding. (a) TE polarization; (b) TM polarization

波导微环传感器的横截面结构参数。

首先分析光波工作偏振状态对传感灵敏度的影响。 $H=1.4\ \mu\text{m}$ ,  $W_s=0.2\ \mu\text{m}$ ,  $W=0.6\ \mu\text{m}$ ,  $H_s=0.2\ \mu\text{m}$ 时, 仿真分析得到横电模(TE)和横磁模(TM)偏振状态下波导有效折射率随待测生物溶液折射率的变化如图2所示。分别对图2(a)、(b)中的数据点进行线性拟合得到  $\partial n_{\text{eff}}/\partial n_{\text{PBS}}$  值, 代入(4)式计算得到TE和TM偏振状态下传感器的灵敏度分别为  $75.18\ \text{nm/RIU}$  和  $66.59\ \text{nm/RIU}$ 。可以看出Slot结构波导传感器在TE偏振状态下的灵敏度高于TM偏振状态下的灵敏度。因此, 选择TE偏振作为光波的工作偏振态, 以下分析均在TE偏振态下进行。

优化波导微环传感器的横截面结构参数时, 采用逐步确定结构参数的优化方法, 每一步的优化结果都是在上一步优化的基础上进行的, 最终得到相互关联的各结构参数。采用这种优化方法既可以简化分析过程, 又可以获得可靠的结果。图3为Slot结构波导微环传感器灵敏度随单波导高度的变化曲线。由图3可以看出, 单波导高度越高, 传感灵敏度越高。但是, 随着单波导高度的增加, 波导结构的高宽比增大, 会增加微纳压印波导制备的难度<sup>[23]</sup>, 故选定单波导高度  $H=1.4\ \mu\text{m}$ 。图4是  $H=1.4\ \mu\text{m}$  条件下Slot波导传感灵敏度随狭缝宽度  $W_s$  的变化曲线。由图4可以看出, 狭缝宽度  $W_s=0.2\ \mu\text{m}$  时, 灵敏度值最大, 故选定狭缝宽度  $W_s=0.2\ \mu\text{m}$ 。

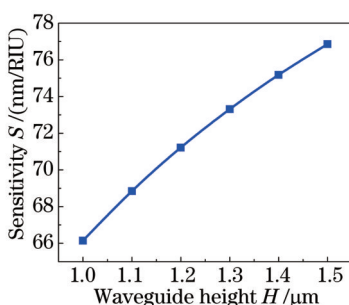


图3 灵敏度随单波导高度的变化曲线

Fig.3 Sensitivity curve versus waveguide height

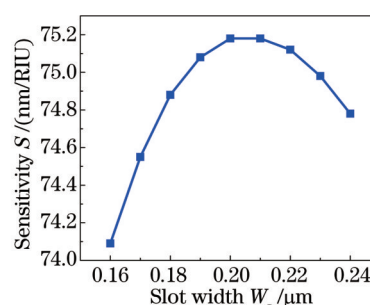


图4 灵敏度随狭缝宽度的变化曲线

Fig.4 Sensitivity curve versus slot width

单波导高度  $H=1.4\ \mu\text{m}$ , 狭缝宽度  $W_s=0.2\ \mu\text{m}$  时, 分析图1(b)所示Slot波导的单模条件对单波导宽度  $W$  的要求, 结果如图5所示, 其中 mode 0 表示基模, mode 1 表示1阶导模。由图5可以看出, 当单波导宽度  $W < 1.0\ \mu\text{m}$  时, 光在波导中的传输满足单模条件。在满足单模传输的条件下, 以获得高灵敏度为目标, 分析不同单波导宽度对应的灵敏度, 结果如表1所示。单波导宽度取  $0.6\ \mu\text{m}$  时, 传感灵敏度最高, 且满足单模条件, 故选定  $W=0.6\ \mu\text{m}$ 。

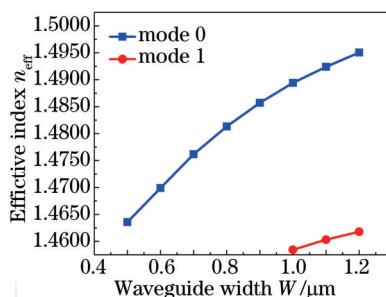


图5 波导有效折射率随单波导宽度的变化曲线

Fig.5 Effective index of waveguide curves versus waveguide width

表1 不同单波导宽度下的灵敏度

Table 1 Sensitivity at different waveguide widths

Waveguide width $W/\mu\text{m}$	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Sensitivity $S/(\text{nm/RIU})$	72.88	75.18	68.49	59.92	51.73

微环的自由光谱范围  $\Delta\lambda_{\text{FSR}}$  决定了传感检测的动态响应范围,  $\Delta\lambda_{\text{FSR}} = \lambda_m^2 / (2\pi R n_g)$  受波导有效群折射率  $n_g$  和微环弯曲半径  $R$  的影响。首先求解有效群折射率, 仿真分析得到波导有效折射率随波长的变化曲线, 如图6所示。对图6中的数据点进行线性拟合得到  $dn_{\text{eff}}/d\lambda = -0.05\ \mu\text{m}^{-1}$ , 计算可得群折射率  $n_g = 1.5124$ 。接着确定弯曲半径, 弯曲半径  $R$  取不同值时得到的  $\Delta\lambda_{\text{FSR}}$  不同,  $R$  越小,  $\Delta\lambda_{\text{FSR}}$  越大, 微环传感检测的动态范围越大。弯曲半径



除影响  $\Delta\lambda_{\text{FSR}}$  外,还影响微环的弯曲损耗,弯曲半径越大,弯曲损耗越低。Slot 结构波导的横截面尺寸取优化结果值,单波导高度  $H=1.4\ \mu\text{m}$ ,单波导宽度  $W=0.6\ \mu\text{m}$ ,狭缝宽度  $W_s=0.2\ \mu\text{m}$ ,取散射损耗  $\alpha_s=0.80\ \text{dB/cm}$ ,吸收损耗  $\alpha_a=0.20\ \text{dB/cm}$ ,微环周损耗由弯曲损耗、散射损耗和吸收损耗三者之和与微环周长相乘得到。图 7 是 FSR 和微环周损耗随弯曲半径的变化曲线。兼顾微环损耗和自由光谱范围,选定  $R=400\ \mu\text{m}$ ,此时由 FD-BPM 方法得到的弯曲波导中传输光功率随光波传输长度的变化曲线如图 8 所示,相应的弯曲损耗  $\alpha_b=1.14\ \text{dB/cm}$ ,总的周损耗为  $-0.54\ \text{dB}$ ,周功率损耗因子  $\alpha^2=0.88$ ,周振幅损耗因子  $\alpha=0.94$ ,自由光谱范围约为  $190.08\ \text{pm}$ 。

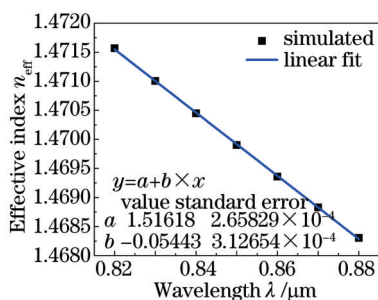


图 6 波导有效折射率随波长的变化曲线

Fig.6 Effective index of waveguide versus wavelength

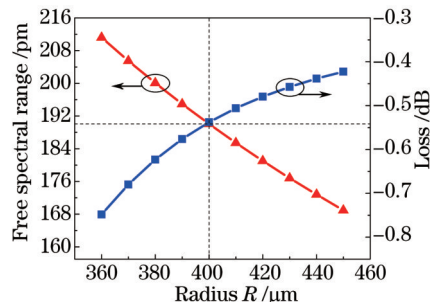


图 7 自由光谱范围和周损耗随弯曲半径的变化曲线

Fig.7 FSR and round trip loss versus bend radius

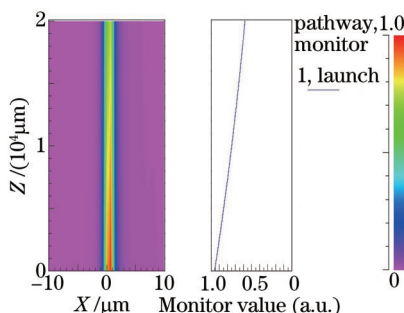


图 8 弯曲波导( $R=400\ \mu\text{m}$ )中光波传输的场分布

Fig.8 Field distribution of optical wave in the bend waveguide ( $R=400\ \mu\text{m}$ )

#### 4 Slot 波导微环传感器的探测极限

以上对 Slot 波导微环传感器的结构进行了优化设计,获得了具有高灵敏度的优化结构参数。灵敏度仅反映传感器感知待测生物样品溶液浓度变化的能力,在实际传感应用中,传感器芯片的传感检测能力同时会受到解调系统和环境因素的影响。通常采用探测极限值  $D_{\text{DL}}$  来表征传感器的传感检测水平,  $D_{\text{DL}}$  值越低,说明传感器的传感检测技术指标越好。  $D_{\text{DL}}$  表示为<sup>[28]</sup>

$$D_{\text{DL}} = \frac{\delta\lambda}{S}, \quad (5)$$

式中  $\delta\lambda$  为传感检测系统的检测分辨率,其表达式为

$$\delta\lambda = 3\sqrt{\sigma_{\text{spect-res}}^2 + \sigma_{\text{temp-induced}}^2 + \sigma_{\text{ampl-noise}}^2}, \quad (6)$$

式中  $\sigma_{\text{spect-res}}$ 、 $\sigma_{\text{temp-induced}}$ 、 $\sigma_{\text{ampl-noise}}$  分别为系统的光谱分辨率噪声、温度噪声和振幅噪声。

采用随机数列标准差方法进行噪声分析。采用可调谐激光器和光功率计构成检测系统,取激光器的波长扫描精度为  $1\ \text{pm}$ ,用 Matlab 软件在  $0\sim 1$  之间生成随机数列,再求随机数列的标准差即可得到光谱分辨率的均方差噪声  $\sigma_{\text{spect-res}} = 0.29\ \text{pm}$ 。对于图 1(b)所示的 Slot 波导微环传感器,衬底选用硅材料(热膨胀系数为  $2.63\times 10^{-6}\ \text{C}^{-1}$ ),取控温装置的控温精度为  $0.01\ \text{C}$ <sup>[29]</sup>,由此造成的谐振波长漂移量最大值为  $-1.71\ \text{pm}$ ,用 Matlab 在  $0\sim 1.71$  之间生成随机数列,再求随机数列的标准差即可得到温度噪声  $\sigma_{\text{temp-induced}} = 0.49\ \text{pm}$ 。振幅噪声  $\sigma_{\text{ampl-noise}} \approx \lambda_m / (4.5R_{\text{SN}}^{0.25} Q)$ ,其中品质因子  $Q$  反映输出光谱的锐利程度,直接影响传感检测系统的分辨率;  $R_{\text{SN}}$  为输出光谱的信噪比,是输出光谱中信号峰值功率与噪声功率的比值。消光比[(2)式]是波导微环芯片 Drop

端口输出光谱的最大值与最小值之比,足够大的消光比才能保证传感器系统具有足够高的信噪比。因此,在保证一定传输光功率的前提下,品质因子和消光比应尽可能取大值。

由(2)式可以看出,当 $|t_1|$ 、 $p$ 都极大且相等时,品质因子 $Q$ 和Drop端口的消光比 $E_{ER,D}$ 最大。取周振幅损耗因子 $\alpha=0.94$ , $p=|t_1|$ ,分别得出品质因子 $Q$ 和Drop端归一化传输光功率、Drop端消光比随第一个耦合区耦合效率 $\kappa_1^2$ 的变化曲线(图9和图10)。由图9和图10可以看出,耦合效率 $\kappa_1^2$ 越大,Drop端归一化传输光功率越大,而消光比和品质因子越小。综合考虑消光比、品质因子和传输光功率,最终选定耦合效率 $\kappa_1^2=0.15$ ,此时耦合效率 $\kappa_2^2=0.03$ ,优化后的Slot结构波导传感器结构参数值为 $H=1.4\ \mu\text{m}$ , $W_s=0.2\ \mu\text{m}$ , $W=0.6\ \mu\text{m}$ , $H_s=0.2\ \mu\text{m}$ , $R=400\ \mu\text{m}$ ,Drop端口的消光比 $E_{ER,D}=21.82\ \text{dB}$ ,归一化传输功率为0.21,谐振峰半峰全宽为 $9.84\ \text{pm}$ ,品质因子为 $8.64\times 10^4$ ,灵敏度约为 $75.18\ \text{nm}/\text{RIU}$ ,此时Drop端口的传输光谱曲线如图11所示。

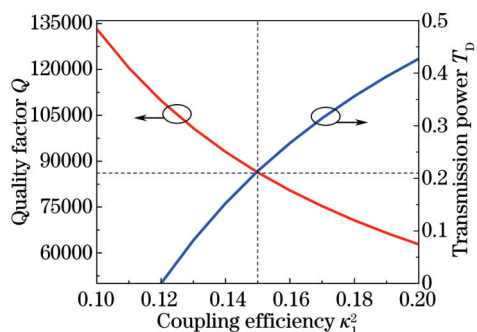


图9 品质因子和Drop端归一化传输光功率随耦合效率的变化曲线

Fig.9 Quality factor and normalized transmission of drop port versus coupling efficiency

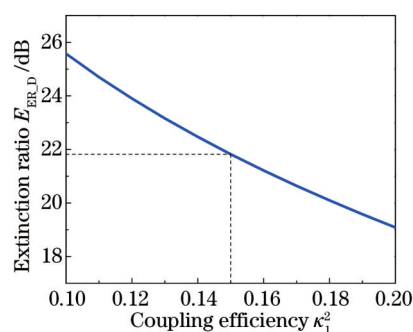


图10 Drop端消光比随耦合效率的变化曲线

Fig.10 Extinction ratio of drop port versus coupling efficiency

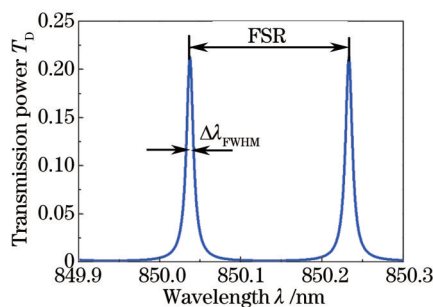


图11 Drop端口传输光谱曲线

Fig.11 Transmission spectrum of drop port

对比Slot波导和正脊形波导微环传感器的性能。综合考虑灵敏度、单模条件、弯曲损耗、耦合效率等方面,对正脊形波导微环传感器进行优化设计,得到的优化结构参数和性能参数分别为 $H=1\ \mu\text{m}$ , $W=1\ \mu\text{m}$ , $H_s=0.2\ \mu\text{m}$ , $R=400\ \mu\text{m}$ , $\Delta\lambda_{FSR}=186.32\ \text{pm}$ , $E_{ER,D}=21.82\ \text{dB}$ , $Q=8.81\times 10^4$ , $S=38.00\ \text{nm}/\text{RIU}$ 。对比分析可得,Slot波导传感器的自由光谱范围略大于正脊形波导传感器,两种结构传感器的消光比相等,Slot波导传感器的品质因子比正脊形波导传感器略低,Slot结构波导传感器灵敏度为正脊形波导传感器的1.98倍。输出光谱的信噪比分别取 $10\ \text{dB}$ 、 $15\ \text{dB}$ 、 $20\ \text{dB}$ ,计算控温精度为 $0.01\ \text{℃}$ 时Slot结构和正脊形结构聚合物波导微环光学生物传感器的分辨率和探测极限,结果如表2所示。

由表2可以看出,信噪比越高,传感检测系统的检测分辨率值越小,Slot波导和正脊形波导微环传感器的探测极限值越低,检测性能越好。相同信噪比条件下,Slot波导微环传感器的探测极限优于正脊形波导微环传感器,前者约为后者的一半,即Slot波导微环传感器的传感检测水平比正脊形波导微环传感器提高了一倍。探测极限值是由传感检测系统的检测分辨率和传感灵敏度共同决定的,两种结构波导微环传感器使用同一个检测系统,所以光谱噪声相同,不同的只有温度噪声、品质因子和灵敏度。对比两种结构波导微环传感器可以发现,尽管Slot结构波导微环传感器的品质因子略低于正脊形波导微环传感器,但Slot结构波导传

感器灵敏度明显高于正脊形波导传感器,且前者的振幅噪声略低于后者,因此Slot结构波导微环传感器的探测极限优于正脊形波导微环传感器。

表2 不同信噪比下Slot结构和正脊形结构聚合物波导微环光学生物传感器的性能参数

Table 2 Performance parameters of polymer waveguide microring optical biosensor based on Slot structure or ridge structure at different signal to noise ratios

Signal to noise ratio $R_{SN}$ /dB	Performance parameters					
	$\sigma_{temp-induced}$ /pm		$\delta\lambda$ /pm		$D_{DL}$ /( $10^{-5}$ RIU)	
	Slot structure	ridge structure	Slot structure	ridge structure	Slot structure	ridge structure
10	0.49	0.50	4.06	4.01	5.41	10.50
15	0.49	0.50	3.25	3.22	4.32	8.40
20	0.49	0.50	2.69	2.67	3.57	6.95

## 5 结 论

对 850 nm 波段 Slot 结构聚合物 PSQ-Ls 波导微环光学生物传感器进行了研究。以获得高灵敏度为目标,结合单模条件要求,优化了 Slot 波导微环传感器的单波导高度、狭缝宽度、单波导宽度等横截面结构参数。对 Slot 结构波导的弯曲损耗、自由光谱范围等进行了仿真分析,得到了微环传感器的消光比、品质因子等随结构参数的变化,并获得优化的微环弯曲半径、耦合效率。综合考虑检测系统噪声,对比分析了 Slot 波导和正脊形波导微环光学生物传感器,结果表明 Slot 波导微环传感器的灵敏度和探测极限值均比正脊形波导微环光学生物传感器提高了一倍。该研究工作对 Slot 波导微环传感器的制备提供了有益参考。

## 参 考 文 献

- 1 Fan X, White I M, Shopova S I, *et al.*. Sensitive optical biosensors for unlabeled targets: A review[J]. *Anal Chim Acta*, 2008, 620(1-2): 8-26.
- 2 Bogaerts W, Heyn P D, Vaerenbergh T V, *et al.*. Silicon microring resonators[J]. *Laser Photonics Rev*, 2012, 6(1): 47-73.
- 3 Almeida V R, Xu Q, Barrios C A, *et al.*. Guiding and confining light in void nanostructure[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(11): 1209-1211.
- 4 Xu Q, Almeida V R, Panepucci R R, *et al.*. Experimental demonstration of guiding and confining light in nanometer-size low-refractive-index material[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(14): 1626-1628.
- 5 Barrios C A, Gylfason K B, Sánchez B, *et al.*. Slot-waveguide biochemical sensor[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(21): 3080-3082.
- 6 Barrios C A, Bañuls M J, González-Pedro V, *et al.*. Label-free optical biosensing with slot-waveguides[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(7): 708-710.
- 7 Yu Ping, Qiu Huiye, Wu Feiqing, *et al.*. Silicon photonic crystal nanobeam cavities fabricated by deep-etching method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0813001.  
喻平, 邱晖晔, 吴飞青, 等. 一种基于深刻蚀的硅基周期波导微腔[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0813001.
- 8 Kou L, Labrie D, Chylek P. Refractive indices of water and ice in the 0.65 to 2.5  $\mu\text{m}$  spectral range[J]. *Appl Opt*, 1993, 32(19): 3531-3540.
- 9 Schmidt S, Flueckiger J, Wu W X, *et al.*. Improving the performance of silicon photonic rings, disks, and Bragg gratings for use in label-free biosensing[C]. *SPIE*, 2014, 9166: 91660M.
- 10 Ma H, Jen A K Y, Dalton L R. Polymer-based optical waveguides: materials, processing, and devices[J]. *Adv Mater*, 2002, 14(19): 1339-1365.
- 11 Eldada L. Advances in polymer-based dynamic photonic components, modules, and subsystems[C]. *SPIE*, 2006, 6351: 63510Y.
- 12 Chen Xi, Wang Tianjiao, Liu Shusen, *et al.*. Polymer planar waveguide amplifier doped with LiYF<sub>4</sub>:Er, Yb nanocrystals[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0206001.  
陈曦, 王天娇, 刘树森, 等. 掺杂 LiYF<sub>4</sub>:Er, Yb 纳米晶的聚合物平面光波导放大器[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0206001.
- 13 Guo L J. Recent progress in nanoimprint technology and its applications[J]. *J Phys D Appl Phys*, 2004, 37(11): R123-R141.
- 14 Han X, Wang L, Wang Y, *et al.*. UV-soft imprinted tunable polymer waveguide ring resonator for microwave photonic filtering[J]. *IEEE J Lightwave Technol*, 2014, 32(20): 3924-3932.

- 15 Zhang Z, Maese–Novo A, Polatynski A, *et al.*. Colorless, dual–polarization 90° hybrid with integrated VOAs and local oscillator on polymer platform[C]. OFC, 2015: Th1F.3.
- 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 Halldorsson J, Arnfinnsdottir N B, Jonsdottir A B, *et al.*. High index contrast polymer waveguide platform for integrated biophotonics[J]. Opt Express, 2010, 18(15): 16217–16226.
- 18 Wang X, Sun J, Liu Y, *et al.*. 650 nm 1×2 polymeric thermo–optic switch with low power consumption[J]. Opt Express, 2014, 22(9): 11119–11128.
- 19 Delezoide C, Salsac M, Lautru J, *et al.*. Vertically coupled polymer microracetrack resonators for label–free biochemical sensors[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(1–4): 270–272.
- 20 Ren J, Wang L, Han X, *et al.*. Organic silicone sol–gel polymer as a non–covalent carrier of receptor proteins for label–free optical biosensor application[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2013, 5(2): 386–394.
- 21 Bettotti P, Pitanti A, Rigo E, *et al.*. Modeling of slot waveguide sensors based on polymeric materials[J]. Sensors, 2011, 11(8): 7327–7340.
- 22 Sun H, Chen A, Dalton L R. Enhanced evanescent confinement in multiple–slot waveguides and its application in biochemical sensing [J]. IEEE J Photonics, 2009, 1(1): 48–57.
- 23 Hiltunen M, Heinonen E, Hiltunen J, *et al.*. Nanoimprint fabrication of slot waveguides[J]. IEEE J Photonics, 2013, 5(2): 2200808.
- 24 Hiltunen M, Hiltunen J, Stenberg P, *et al.*. Polymer slot waveguide interferometer for sensor applications[J]. Opt Express, 2014, 22(6): 7229–7237.
- 25 Zhang H, Wang J, Li L, *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 Wang L, Ren J, Han X, *et al.*. A label–free optical biosensor built on a low–cost polymer platform[J]. IEEE J Photonics, 2012, 4(3): 920–930.
- 27 Ma Chunsheng, Liu Shiyong. Optical waveguide mode theory[M]. Changchun: Jilin University Press, 2006: 335–382.  
马春生, 刘式壖. 光波导模式理论[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2006: 335–382.
- 28 White I M, Fan X D. On the performance quantification of resonant refractive index sensors[J]. Opt Express, 2008, 16(2): 1020–1028.
- 29 Wang Linghua. Fabrication optimization of polymer integrated photonic devices and their applications[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.  
王凌华. 聚合物集成光子器件的优化制备及其应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

栏目编辑: 张 雁