

引用格式: LIU Chunjuan, SUN Xiaoli, WU Xiaosuo, et al. Slot Phase-shifting Bragg Grating Microring Resonator and Its Sensing Characteristics[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(6):0623003

刘春娟,孙晓丽,吴小所,等.槽型相移布拉格光栅微环谐振器及其传感特性[J].光子学报,2023,52(6):0623003

# 槽型相移布拉格光栅微环谐振器及其传感特性

刘春娟,孙晓丽,吴小所,王嘉伟,曹倩倩

(兰州交通大学 电子与信息工程学院,兰州 730070)

**摘要:**为实现高灵敏度及高品质因数的折射率传感特性,设计了一种基于槽型相移布拉格光栅的微环谐振器结构。该结构由槽型直波导内嵌相移布拉格光栅耦合单实波导微环构成。结构中离散态光模式与连续态光模式相互干涉产生了 Fano 共振。利用传输矩阵法量化谐振器中各部分的光场分布,分析系统的传输原理。采用时域有限差分法对提出的器件结构进行仿真模拟,并对结构物理参数进行优化。模拟结果表明该结构的品质因数达到 25 729,比传统微环谐振器提高了 3 倍以上,消光比为 18.65 dB,高出传统微环谐振器 6.46 dB,折射率灵敏度达到 122 nm/RIU,且该谐振器结构简单。所提出的结构在传感应用中具有一定的优势。

**关键词:**集成光学;硅基波导;微环谐振器;槽型相移;布拉格光栅;Fano 谐振;折射率传感

中图分类号:TN256

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235206.0623003

## 0 引言

随着绝缘体上硅技术的成熟,硅基光学传感器件凭借响应速度快、抗电磁干扰能力强、加工工艺与微电子工艺相兼容等优势迅速发展<sup>[1-3]</sup>。科研人员提出了很多基于 SOI 平台的光学传感器。例如亚波长光栅传感器<sup>[4]</sup>、微环谐振腔<sup>[5]</sup>、双层介质加载等离子体传感器<sup>[6]</sup>、一维光子晶体传感器<sup>[7]</sup>等。

在众多的硅基集成传感器件中,微环谐振器由于品质因数高、结构紧凑而成为传感系统中的理想选择<sup>[8-9]</sup>。传统微环谐振器的频谱响应是典型的洛伦兹线型,灵敏度差、品质因数低<sup>[10]</sup>。因此科研人员致力于研究更高品质因数和灵敏度的传感器。文献[11]提出了一种紧凑型的微环内壁光栅狭缝传感器,获取了超宽的测量范围,但 Q 值仅为 1 085。文献[12]提出了基于狭缝波导的布拉格光栅耦合微环传感器,得到的灵敏度为 297.13 nm/RIU,但 Q 值仅为 2 000。文献[13]通过光子晶体腔耦合微环,得到高达 30 950 的 Q 值,但是光子晶体的制备对工艺要求较高,增加了制作成本。因此,对于基于 SOI 的折射率传感器来说,在保证制作成本较低和结构简单的情况下,如何获得高灵敏度和高品质因子仍是一个值得研究的课题。

本文提出一种基于槽型相移布拉格光栅(Slot Phase-shifted Bragg Grating, SPS-Bragg)的微环谐振器结构。采用狭缝波导与相移布拉格光栅的结合代替传统的条形波导,将电场集中在低折射率的狭缝区域,提高了传感器的灵敏度,利用光栅的锯齿状物理结构对导模进行调制,使系统中不同路线的光信号相互干涉产生高灵敏度的 Fano 共振。应用时域有限差分法对所提出的结构进行仿真模拟,优化了光栅周期、占空比等参数对传感性能的影响,通过改变环境折射率,分析并计算了结构的折射率灵敏度。

## 1 基本原理

### 1.1 结构设计

提出的基于 SPS-Bragg 光栅微环谐振器的立体结构如图 1。两段槽型布拉格光栅作为部分反射元件位

基金项目:甘肃省自然科学基金(No. 21JR7RA289)

第一作者:刘春娟,liuchj@mail.lzjtu.cn

通讯作者:孙晓丽,2558540504@qq.com

收稿日期:2023-01-03;录用日期:2023-02-23

<http://www.photon.ac.cn>

于总线波导的两侧,在总线波导与微环的耦合区域引入一个相移因子,形成类似一阶的F-P谐振腔,该腔具有较强的光约束能力,微环谐振器(Microring Resonator, MRR)通过微弱的倏逝场与F-P腔横向耦合。其中, $L$ 是F-P谐振腔的长度, $N$ 为F-P谐振腔一侧的光栅周期数, $T$ 是光栅周期, $H_g$ 是光栅刻蚀深度, $R$ 是微环半径,所提结构基于 $\text{SiO}_2$ 和Si组成的SOI平台波导。

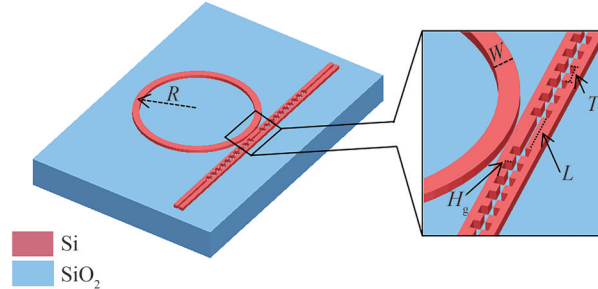


图1 SPS-Bragg光栅微环谐振器的立体结构  
Fig.1 Three-dimensional structure of SPS-Bragg grating microring resonator

结构中,光栅的弱反射功能将部分位于反射区的光信号汇聚在相移因子位置,使系统的传输频谱中出现一定谱宽的阻带。由于倏逝场的作用,部分光波被耦合到微环中,微环中离散的光信号与相移因子中连续的光信号发生破坏性干涉,在槽型相移布拉格光栅的阻带频谱中产生Fano共振。Fano共振是一种量子干涉效应,它具有非对称的谱线形状,待测环境折射率的轻微变化,可以引起其谐振波长的较小偏移和透射强度的剧烈变化,从而实现高灵敏度的折射率传感特性<sup>[14]</sup>。

### 1.2 理论分析

基于SPS-Bragg光栅耦合微环的谐振系统原理如图2(a)。当光从总线波导的输入端口进入系统后,在光波的传播方向上,布拉格光栅对波导的光学模式进行周期性调制,使系统发生均匀分布的透射和反射,光栅腔结构放大图如图2(b)。

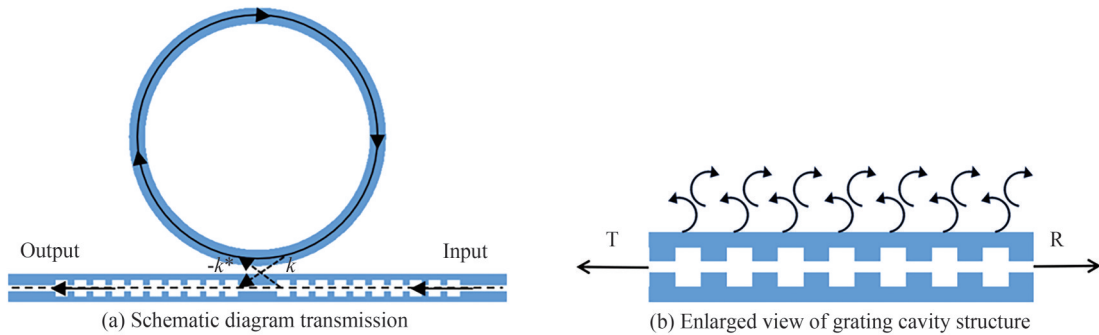


图2 系统原理  
Fig.2 System schematic

对于布拉格光栅,可以将它看作是由宽波导段、窄波导段和反射界面组成的周期性结构,其中宽波导段的传输矩阵可以表示为

$$T_{gw} = \begin{bmatrix} \exp(-j\beta_{gw}l_{gw}) & 0 \\ 0 & \exp(j\beta_{gw}l_{gw}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

窄波导段的传输矩阵可表示为

$$T_{gn} = \begin{bmatrix} \exp(-j\beta_{gn}l_{gn}) & 0 \\ 0 & \exp(j\beta_{gn}l_{gn}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $l_{gw}$ 是宽波导段的长度, $l_{gn}$ 为窄波导段的长度, $\beta_{gw}$ 和 $\beta_{gn}$ 分别表示宽波导和窄波导的复传播常数。而对于反射界面,由宽波导段到窄波导段的传输矩阵可表示为

$$T_{\text{gw-gn}} = \begin{bmatrix} \frac{n_1 + n_2}{2\sqrt{n_1 n_2}} & \frac{n_1 - n_2}{2\sqrt{n_1 n_2}} \\ \frac{n_1 - n_2}{2\sqrt{n_1 n_2}} & \frac{n_1 + n_2}{2\sqrt{n_1 n_2}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

从窄波导段到宽波导段的传输矩阵可表示为

$$T_{\text{gn-gw}} = \begin{bmatrix} \frac{n_2 + n_1}{2\sqrt{n_1 n_2}} & \frac{n_2 - n_1}{2\sqrt{n_1 n_2}} \\ \frac{n_2 - n_1}{2\sqrt{n_1 n_2}} & \frac{n_2 + n_1}{2\sqrt{n_1 n_2}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $n_1$  和  $n_2$  表示宽波导段和窄波导段的有效折射率。由于布拉格光栅的结构是周期性的,用  $N$  代表光栅的周期数,所以均匀布拉格光栅的传输矩阵可表示为<sup>[15]</sup>

$$T_g = (T_{\text{gw}} \cdot T_{\text{gw-gn}} \cdot T_{\text{gn}} \cdot T_{\text{gn-gw}})^N \quad (5)$$

对于微环谐振器来说,考虑到布拉格光栅作为部分反射元件,会将特定频率的光波反射,使其反向传输,所以微环的传输矩阵应该包含这部分反射光,因此,传感器中微环的传输矩阵可以表示为

$$T_r = \begin{bmatrix} \frac{-at^* + \exp(-j\varphi)}{-a + t \exp(-j\varphi)} & 0 \\ 0 & \frac{-a + t \exp(-j\varphi)}{-at^* + \exp(-j\varphi)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $a^2 = \exp(-\delta l_r)$  表示往返功率衰减,其中  $\delta$  为传输损耗系数,  $l_r = 2\pi R$  是微环的腔长;  $t$  表示传输系数,  $t = \sqrt{1 - |k|^2}$ ,  $k$  为耦合系数,  $t^*$  表示  $t$  的共轭;  $\varphi = \frac{2\pi n_{\text{eff}} l_r}{\lambda}$  为光信号往返一周所产生的相位差,  $n_{\text{eff}}$  是微环波导的有效折射率,  $\lambda$  表示波长。

通过组合以上基本结构的传输矩阵,可以得到基于槽型相移布拉格光栅耦合微环谐振器的传输矩阵,则系统传输矩阵可表示为

$$T_{\text{in}} = T_g \cdot T_{\text{FP}} \cdot T_r \cdot T_{\text{FP}} \cdot T_g \cdot T_{\text{out}} \quad (7)$$

式中,  $T_{\text{FP}} = \begin{bmatrix} \exp\left(-j\frac{\beta_{\text{gn}} L}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(j\frac{\beta_{\text{gn}} L}{2}\right) \end{bmatrix}$  为 F-P 谐振腔的传输矩阵,  $L$  是 F-P 谐振腔的空腔长度,  $T_{\text{in}} =$

$\begin{bmatrix} R_{\text{CCW-out}} \\ R_{\text{CW-in}} \end{bmatrix}$ ,  $T_{\text{out}} = \begin{bmatrix} R_{\text{CCW-in}} \\ R_{\text{CW-out}} \end{bmatrix}$ ,  $R_{\text{CCW-out}}$  和  $R_{\text{CW-in}}$  分别为输出端透射光场振幅和反射光场振幅,  $R_{\text{CCW-in}}$  和  $R_{\text{CW-out}}$  分别表示输入端透射光场振幅和反射光场振幅。

为进一步研究所提结构的传感特性,对 Fano 共振产生的机理进行分析。根据共振线类型  $\sigma$  的定义<sup>[16]</sup>,  $\sigma = (\beta + q)^2 / \beta^2 + 1$ , 其中  $\beta = 2(E - E_d) / \Gamma_d$ ,  $\Gamma_d$  表示 Fano 谱线的线宽,  $E$  为入射光能量,  $E_d$  表示分立态能量,  $q$  是离散态和连续态激发率的比值,当  $q = \pm 1$  时,即当能量在离散态和连续态上激发概率相同时就会产生 Fano 共振。在传感特性分析中,由于 Fano 谱线的非对称性,不能直接用洛伦兹线型的共振腔方式计算半峰全宽,而需要采用典型的 Fano 公式对频谱进行拟合<sup>[17]</sup>有

$$T_{\text{Fano}} = \left| a_1 + ja_2 + \frac{b}{\omega - \omega_0 + j\gamma} \right|^2 \quad (8)$$

式中,  $a_1$ 、 $a_2$  和  $b$  为常实数,  $\omega_0$  表示振荡频率,  $\gamma$  是阻尼系数,与线宽成正比,半峰全宽  $\text{FWHM} = 2\gamma$ , 因此, Fano 共振的品质因子  $Q = \lambda / \text{FWHM}$ 。在接下来的传感特性分析中,关注折射率灵敏度和消光比这两个传感性能指标。其中,消光比 (Extinction Ratio, ER) 可以表示为

$$ER = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \right) \quad (9)$$

式中,  $P_{\max}$  为传感器输出端口的最大光功率,  $P_{\min}$  为传感器输出端口的最小光功率, 消光比越大表明器件输出端口的  $P_{\max}$  与  $P_{\min}$  的差距越大, 结构抗噪声性能越好。

## 2 器件结构优化

采用三维时域有限差分法(Three-dimensional Finite-difference Time-domain Method, 3D-FDTD)对器件结构的模场分布以及不同物理参数下的透射频谱进行仿真模拟。仿真过程中二氧化硅和硅的有效折射率分别为 1.444<sup>[18]</sup> 和 3.476<sup>[19]</sup>, 环形波导的宽度为 0.4  $\mu\text{m}$ , 条形波导的宽度为 0.27  $\mu\text{m}$ , 波导高度均为 0.22  $\mu\text{m}$ 。对于布拉格光栅来说, 主要有三个参数影响器件性能, 分别是布拉格光栅的周期( $T$ )、布拉格光栅的占空比( $F$ )和光栅的周期数( $N$ )。而对于微环谐振器来说, 环形波导的半径( $R$ )与谐振器的弯曲损耗和传输损耗密切相关, 此外, F-P 谐振腔的长度( $L$ )也是一个关键参数。本文将分析上述五个参数对所提结构折射率传感中品质因数和消光比的影响。品质因数越高, 结构输出谱线的线宽就越窄, 外界环境折射率变化引起的谐振峰的微小漂移就越容易被观测到; 大的消光比可以使传感器具有更强的抗噪声性能。因此, 优化结构参数的目的是获得更高的  $Q$  因子和消光比。

总线波导中狭缝的宽度为 100 nm, 光波被局限在狭缝中传播。图 3 模拟了相同尺寸下, 矩形波导和狭缝波导的模场分布。从图中可以看出, 低折射率的狭缝区域具有更低的光耗散和更强的光限制能力, 应用于折射率传感中, 被探测物质也可以完全覆盖和填充在狭缝之中, 从而增强光与待测物的相互作用, 使传感器的灵敏度提高。

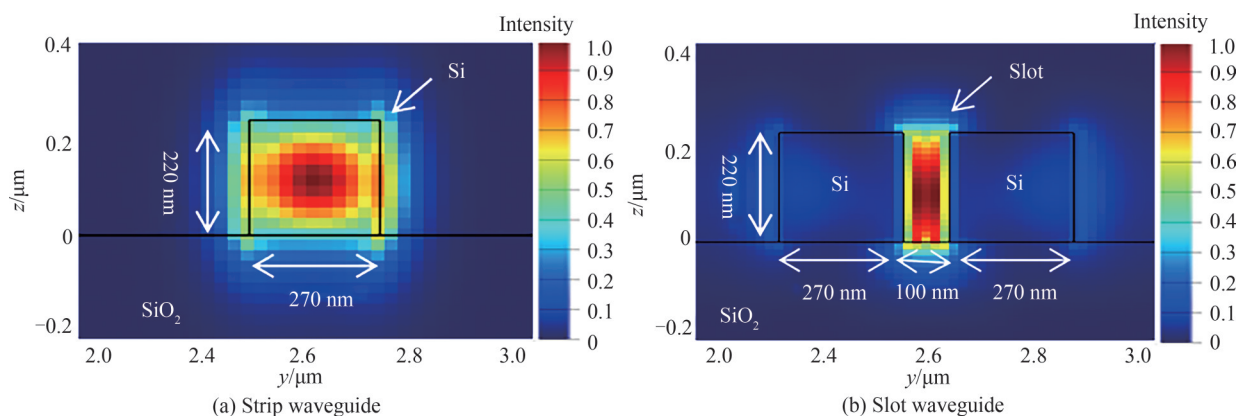


图3 波导模场分布

Fig.3 Waveguide mode field distribution

为了分析布拉格光栅周期对传感性能的影响, 将其他参数设置为:  $N=10$ ,  $F=66\%$ ,  $L=0.99 \mu\text{m}$ ,  $R=3.5 \mu\text{m}$ ,  $H_g=0.175 \mu\text{m}$ , 图 4(a) 为几种不同周期下的归一化频谱图, 从图中可以看出, 当  $T$  增大时, Fano 谱线的谐振峰保持在 1 526.65 nm 波长处, 但谐振峰值逐渐降低, 这意味着周期的取值过大会降低 Fano 谱线的谐振峰幅值。考虑到周期与消光比的关系, 如图 5, 当  $T < 470 \text{ nm}$  时, 随着周期的增大, 消光比逐渐增大, 并在  $T=470 \text{ nm}$  处取到最大值, 而当  $T > 470 \text{ nm}$  后, 消光比逐渐减小。因此, 为了同时兼顾较高的透射率和消光比, 将周期  $T$  设置为 470 nm, 此外,  $T$  值在 469 ~ 471 nm 之间波动时仍能保证较大的 ER 和透射强度。

光栅的占空比直接影响光波反射作用的强弱和反射相位的大小。图 6 展示了不同占空比对  $Q$  factor 和消光比 ER 的影响。当占空比  $F < 65\%$  时, 随着占空比的增大, 消光比迅速增大, 品质因数先增大后减小, 虽然这一区域中, 当占空比  $F=63\%$  时, 品质因数较大, 但消光比 ER 却不到 15 dB, 无法实现高抗噪声性能的折射率传感特性。当占空比  $F=66\%$  时, 消光比达到了 18.65 dB, 品质因数  $Q$  的取值也较大, 而当占空比  $F > 67\%$  时, 消光比开始缓慢减小, 品质因数也逐渐降低。因此, 为了满足较高的消光比和品质因子, 将占空比  $F$  ( $F=l_{\text{gw}}/T$ ) 设定为 66%。虽然从工艺角度来看, 制作狭缝布拉格光栅这种结构是比较复杂的, 但是

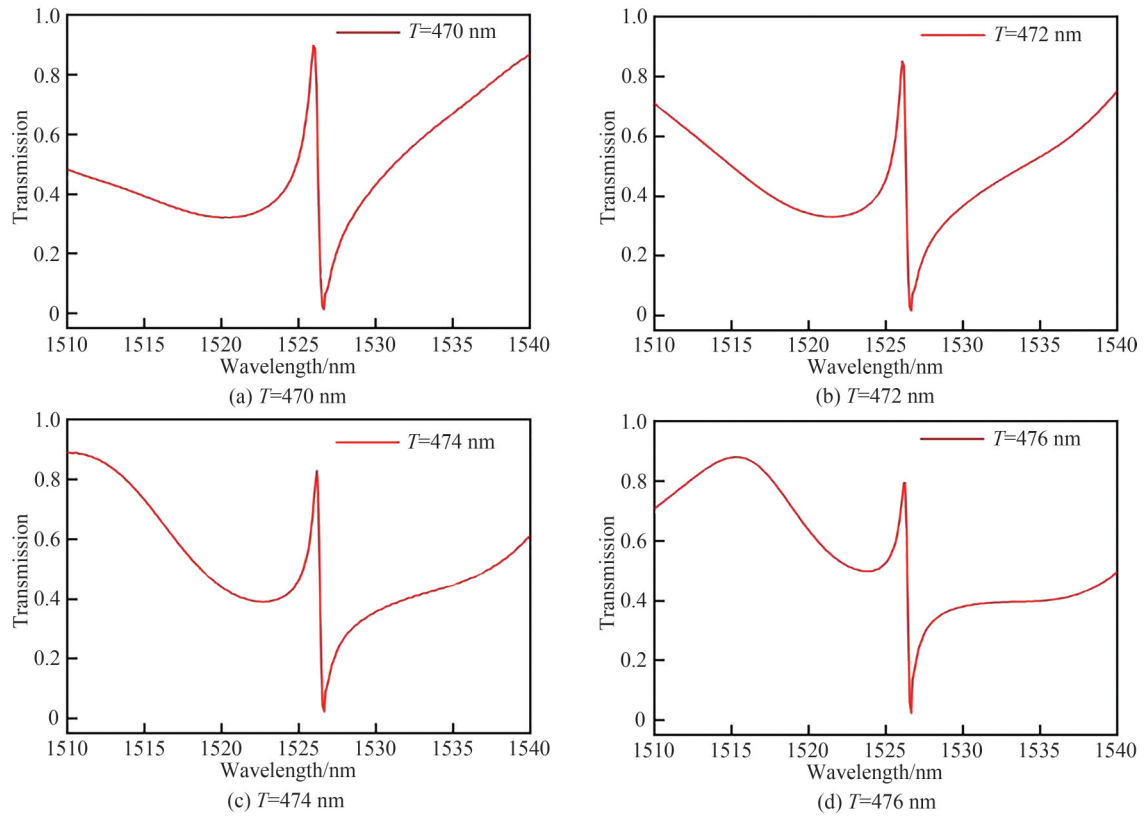


图4 不同周期下的频谱

Fig.4 Output Spectra at different periods

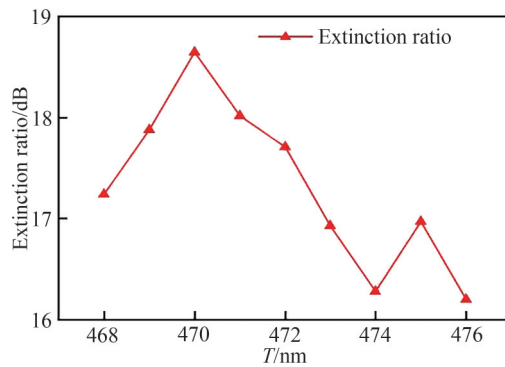


图5 不同周期下的消光比

Fig.5 Extinction ratio at different periods

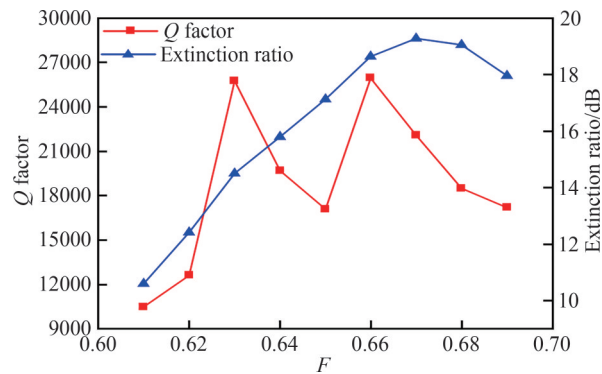


图6 不同占空比下的品质因数和消光比

Fig.6 Quality factor and extinction ratio under different duty cycle

ZHANG Weifeng 等提出并验证了基于光栅的法布里珀罗腔耦合微环谐振器系统,其刻蚀深度只有 35 nm,且实验结果满足要求<sup>[20]</sup>。因此,本文中光栅的刻蚀尺寸在目前的工艺条件下是完全可以实现的。

F-P 谐振腔的长度是影响输出结果的重要参数。腔内光场的谐振效应可以增大光与待测物质相互作用的面积和强度,此时希望 F-P 谐振腔的长度越长越好,同时希望 F-P 腔中的光能量尽可能大,以获得高灵敏度的 Fano 共振。另一方面,腔长过长又会增加狭缝波导的等效长度,使得狭缝波导的损耗变大,从而降低传感器透射谱谐振峰的幅值。因此需综合考虑谐振腔长度的选择。根据上述分析结果,在其余参数不变的情况下,改变 F-P 谐振腔的长度,观察结构透射率和消光比的变化。由图 7(a)所示的腔长  $L$  对 Fano 共振的影响可以看出,随着谐振腔长度的增加,共振峰保持在 1526.65 nm 波长处没有发生偏移,但透射率逐渐降低。从图 5(b)腔长  $L$  与消光比 ER 的关系观察到,当  $L=0.99 \mu\text{m}$  时,结构获得较高的透射率和消光比,而  $L$  在  $0.99\sim 1 \mu\text{m}$  之间波动时仍能满足传感需求。

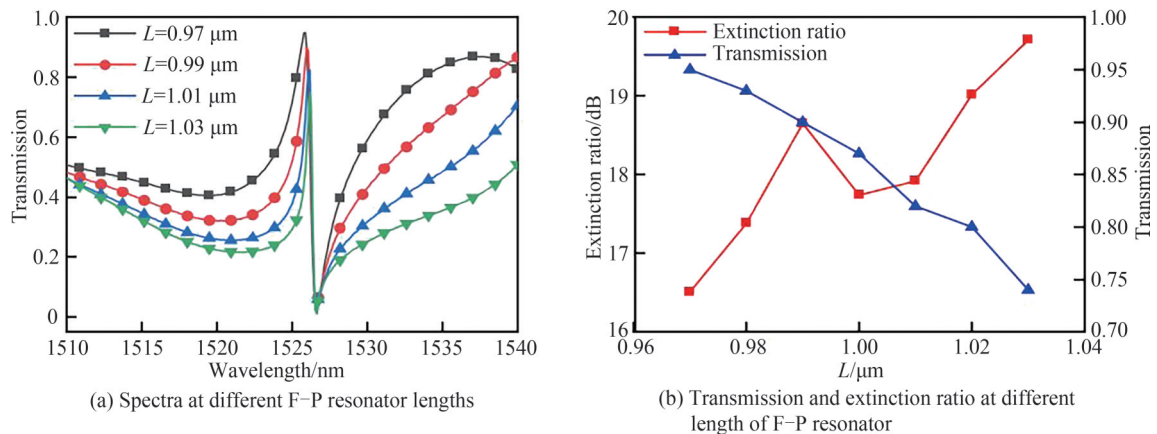


图7 不同F-P谐振腔长度下的透射率和消光比

Fig.7 Transmissivity and extinction ratio under different length of F-P resonator

布拉格光栅是周期性结构,选取合适的光栅周期数可以获得较高的品质因数。为了评估周期数对传感特性的影响,改变光栅齿的个数  $N$  并观察输出结果。图 8 为光栅齿与品质因数间的关系,当  $N < 10$  时,光栅齿的增加会使品质因数  $Q$  增大,这是因为当  $N$  较小时,光栅对光波的弱反射作用不明显,不能进行很好地选频,欠滤波状态下的结果就是品质因数较小,而当光栅齿的个数  $N$  增加,一定数量的锯齿型物理结构会将特定波长的光信号进行反射,使 F-P 谐振腔中的光场能量增强,进而导致品质因数增大。然而,当  $N$  超过 10 后,过多的光栅齿数目会造成强光栅的作用效果,使输入的光信号被反射回去,导致品质因数减小, Fano 共振减弱甚至消失。因此,选择  $N=10$  以保证结构具有较大的品质因子。

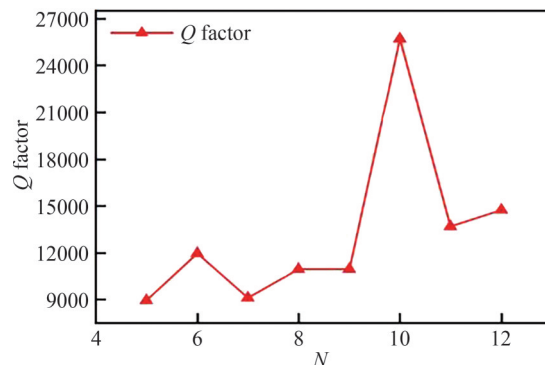


图8 不同光栅齿数量下的品质因数

Fig. 8 Quality factor under different grating teeth numbers

图 9(a)为光栅周期为 470 nm,光栅占空比为 66%,F-P 谐振腔长为  $0.99 \mu\text{m}$ ,光栅周期数为 10 的情况下,微环半径对传感器输出频谱的影响。从图中可以看到,当  $R$  由  $3.3 \mu\text{m}$  以  $0.2 \mu\text{m}$  的步长增大到  $3.9 \mu\text{m}$  时,

其透射谱的谐振峰发生了蓝移且透射率越来越低,透射强度的降低主要是由于微环半径增加,导致对光波的损耗增大而引起。同时,从图9(b)可以观察到, $R$ 的增大并未使品质因数直接减小,这是因为随着微环半径的增大,共振峰变窄,Fano谱线变得更加尖锐所导致。为了实现透射率和品质因数间的平衡,选择微环半径为 $3.5\ \mu\text{m}$ 。由于SOI波导的高折射率差,当环形波导的半径大于 $3\ \mu\text{m}$ 时,微环谐振器的弯曲损耗可以忽略,而相对较小的微环半径又会减少光波在环中的传输路径,使传感器的传输损耗降低,透射率提高。此外,所提结构中微环谐振器采用单一的实心波导单微环构成,相比其他微环的复合结构具有结构简单的优势,可以降低工艺的复杂性。

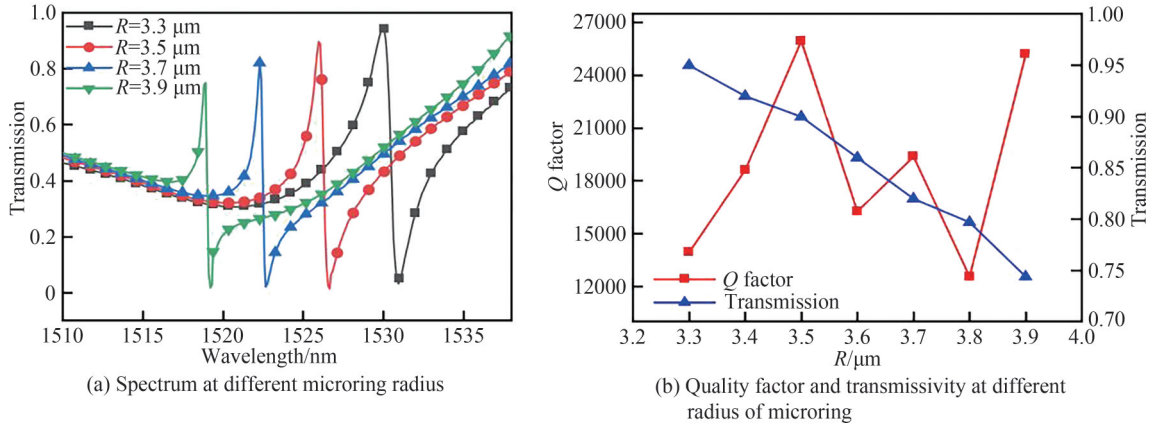


图9 不同微环半径下的品质因数和透射率  
Fig. 9 Quality factor and transmissivity at different radius of microring

波导在制造过程中产生的误差会影响传感器的传感性能,有必要对结构的关键尺寸做容差分析,以评价加工偏差对器件性能的影响。由于布拉格光栅的尺寸相对较小,其制造误差对器件的传感特性影响较大,因此根据参数优化结果,设定 $H_g=175\ \text{nm}$ , $F=66\%$ ,考虑光栅刻蚀深度 $H_g$ 和光栅齿刻蚀宽度 $l_{gw}$ 在 $-10\sim 10\ \text{nm}$ 范围内的制造容差。由图10(a)可以看出,当光栅刻蚀深度 $H_g$ 在 $165\sim 185\ \text{nm}$ 之间波动时,品质因数呈现先增后减的趋势,消光比表现为缓慢增加,为了降低工艺对传感器性能的影响,通常要提高加工精度,如果能将制造精度控制在 $\pm 5\ \text{nm}$ 以内,那么可以保证Q值最低为15 701,消光比为16.38 dB,结果仍在工艺容差值范围内,输出频谱仍然保持非对称的Fano谱线。由图(b)光栅齿刻蚀宽度对品质因子Q和消光比ER的影响可以看出, $\Delta l_{gw}$ 的宽度在 $\pm 10\ \text{nm}$ 的范围内波动时,对结构传感性能的影响仍是可以接受的。

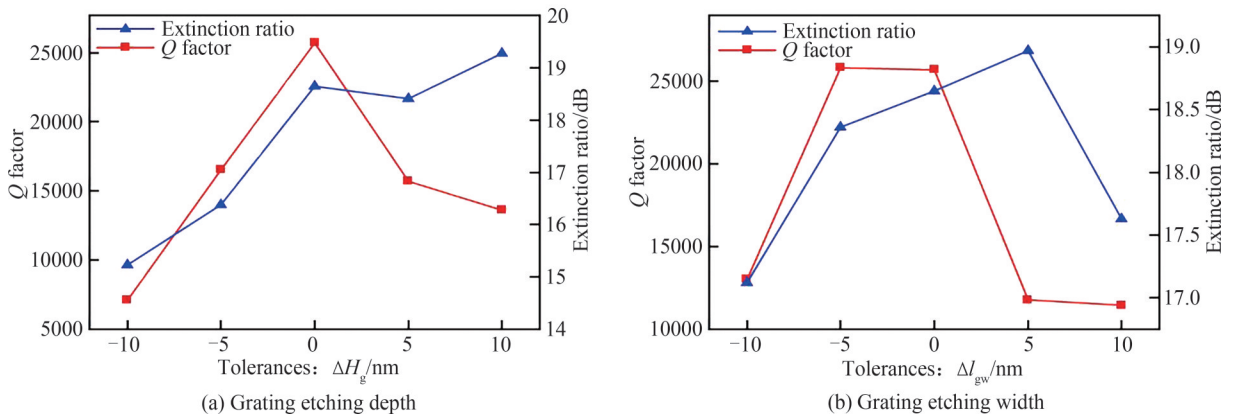


图10 制造容差分析  
Fig. 10 Manufacturing tolerance analysis

### 3 折射率传感特性

折射率灵敏度 $S$ 也是评估传感器传感性能的重要指标,定义为单位折射率变化引起的谐振波长的偏移量,其表达式为

$$S = \frac{\Delta\lambda_{\text{res}}}{\Delta n} \quad (10)$$

式中,  $\Delta\lambda_{\text{res}}$  表示谐振波长的偏移量,  $\Delta n$  为有效折射率的变化量。将传感器放置在折射率变化的环境中, 波导表面的有效折射率会发生变化而使谐振波长发生偏移。为了模拟结构应用于气体折射率传感的环境, 选取优化后的物理参数, 将结构上包层的空气换成其他待测气体, 则不同折射率环境下的透射光谱对比图如图 11。从图中可知, Fano 谱线随折射率的变化发生了较快的偏移, 当  $n$  增加时, 谐振波长发生了红移, 折射率灵敏度达到了 122 nm/RIU, 并且波长与折射率具有良好的线性关系, 拟合率超过了 98%。

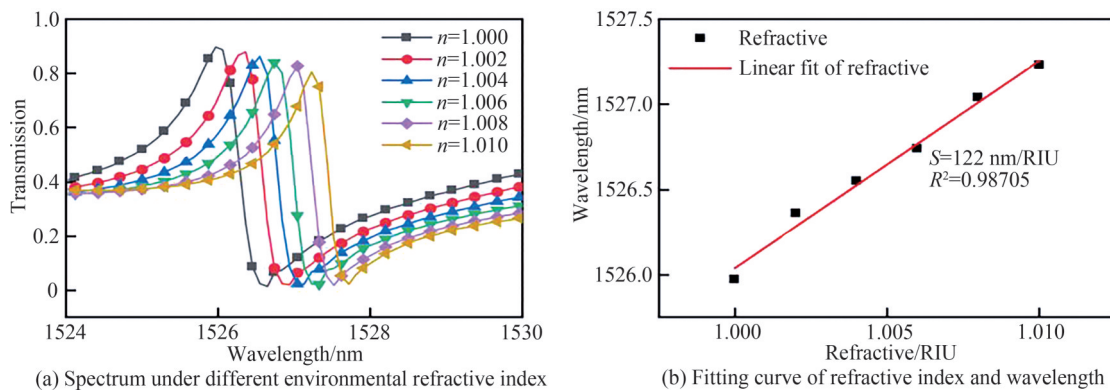


图 11 不同环境折射率下的透射谱

Fig.11 Transmission spectrum under different environmental refractive index

随着待测环境折射率的增加, 谐振波长发生红移, 同时谐振峰值略微发生了变化。表 1 为 SPS-Bragg 光栅微环谐振器与相关文献提到的基于单实波导单 MRR 传感器关于  $Q$ 、 $ER$ 、 $S$  几个参数的比较。

表 1 所提结构与基于单实波导单 MRR 的折射率传感特性比较

Table 1 Comparison of refractive index sensing characteristics between single real waveguide MRR and the proposed structure

| Refractive index sensor | $Q$    | $ER/\text{dB}$ | $S/(\text{nm}\cdot\text{RIU}^{-1})$ | Refractive index |
|-------------------------|--------|----------------|-------------------------------------|------------------|
| Ref.[21]                | —      | 53.09          | 125                                 | 1.33~1.332       |
| Ref.[22]                | —      | —              | 77                                  | 1~1.05           |
| Ref.[23]                | 20 200 | 12             | —                                   | —                |
| Ref.[24]                | 32 000 | 23             | 67                                  | 1.333 2~1.343 2  |
| Proposed structure      | 25 729 | 18.65          | 122                                 | 1~1.01           |

通过与其它单实波导单微环谐振器的对比可知, 所提结构具有较高的品质因数和灵敏度, 在实际的检测应用中可以降低对光信号的损耗而实现测量精度的提升。

## 4 结论

本文提出了基于槽型相移布拉格光栅的微环传感器, 结构中通过相移布拉格光栅微腔和微环的两种不同路径的光相互干涉, 产生 Fano 共振, 实现高  $Q$  值的传感特性。采用传输矩阵法分析器件的工作原理并利用 FDTD 进行仿真模拟, 比较不同物理参数对器件性能的影响。模拟结果表明 SPS-Bragg 光栅微环传感器的  $Q$  值为 25 729, 消光比为 18.65 dB, 改变环境折射率将结构应用于气体传感时, 折射率灵敏度可以达到 122 nm/RIU。该器件结构简单, 具有可靠的传感性能, 在传感应用和光开关领域具有一定的潜力。

## 参考文献

- [1] 王乾圣. 高  $Q$  硅基微环谐振腔的设计与制备[D]. 武汉: 武汉华中科技大学, 2020: 1-5.
- [2] 李祥鹏. 硅基微环谐振器传输特性的研究[D]. 济南: 山东大学, 2015: 1-7.
- [3] LIU Chunjuan, WANG Jiawei, WU Xiaosuo, et al. Sensing characteristics of grating-assisted slot microring resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(16): 1613001.  
刘春娟, 王嘉伟, 吴小所, 等. 一种光栅辅助狭缝微环谐振器的传感特性[J]. 光学学报, 2022, 42(16): 1613001.



- [4] XU Yameng, FU Chenyang, SUN Shibo. Research progresses of refractive index sensing based on subwavelength grating structures[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(2): 254-260.  
徐亚萌,付晨阳,孙士博.基于亚波长光栅结构的折射率传感研究进展[J].半导体光电,2022,43(2):254-260.
- [5] SHI Bingyao, CHEN Xiao, CAI Yuanyuan, et al. Compact slot microring resonator for sensitive and label-free optical sensing[J]. Sensors, 2022, 22(17): 64-67.
- [6] LIU Heng, MA Tao, YU Zhongxiu, et al. Highly sensitive biosensor based on two-layer dielectric-loaded plasmonic microring[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(3): 140-144.  
刘恒,马涛,余重秀,等.双层介质加载等离子体微环的高灵敏生物传感[J].红外与激光工程,2017,46(3):140-144.
- [7] ZHANG Xingwang, ZHOU Guangya, SHI Peng, et al. On-chip integrated optofluidic complex refractive index sensing using silicon photonic crystal nanobeam cavities[J]. Optics Letters, 2016, 41(6): 1197-1200.
- [8] XU Yameng, KONG Mei. Research progresses of refractive index sensing based on silicon-on-insulator microring resonators [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(4): 455-463.  
徐亚萌,孔梅.基于硅基微环谐振器的折射率传感研究综述[J].半导体光电,2020,41(4):455-463.
- [9] 高亮.基于SOI的光学传感器的研究[D].成都:电子科技大学,2014:1-13.
- [10] WANG Shuling, LIU Yonghao, ZHAO Deyin, et al. Optofluidic Fano resonance photonic crystal refractometric sensors[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(9): 091105.
- [11] 顾洪军.狭缝波导微环谐振器的免标签生化传感研究[D].长春:吉林大学,2020:65-78.
- [12] ZHAO Chaoying, ZHANG Lei, ZHANG Chengmei. Compact SOI optimized slot microring coupled phase-shifted Bragg grating resonator for sensing[J]. Optics Communications, 2018, 414: 212-216.
- [13] LIU Chunjuan, SANG Changlin, WU Xiaosuo, et al. One-dimensional photonic crystal groove microring resonators and its sensing characteristics [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2413002.  
刘春娟,桑常林,吴小所,等.一维光子晶体槽型微环谐振器及其传感特性[J].光学学报,2020,40(24):2413002.
- [14] ZHAO Jing, WANG Jiaxian, QIU Weibin, et al. Investigation of sensing characteristic of graphene metamaterial based on Fano resonance[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0524001.  
赵静,王加贤,邱伟彬,等.基于Fano共振的石墨烯超材料传感特性研究[J].激光与光电子学进展,2021,58(5):0524001.
- [15] CHROSTOWSKI L, HOCHBERG M. Silicon photonics design from devices to systems [M]. England: Cambridge University, 2015.
- [16] HAO Xiangxiang, HUO Yiping, HE Qian, et al. Study on the Fano resonance of MIM waveguide with double semi-ring cavities[J]. Journal of Shanxi Normal University, 2022, 50(1): 12-20.  
郝祥祥,霍义萍,何倩,等.双半环型腔MIM波导法诺共振研究[J].陕西师范大学学报,2022,50(1):12-20.
- [17] YANG Lei, YU Shilin, LI Hao, et al. Multiple Fano resonance excitation on all-dielectric nanohole arrays metasurfaces[J]. Optics Express, 2021, 29(10): 14907-14916.
- [18] LI H H. Refractive index of silicon and germanium and its wavelength and temperature derivatives [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1980, 9(3): 561-658.
- [19] MALITSON I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica [J]. Journal of the Optical Society of America, 1965, 55(10): 1205-1209.
- [20] ZHANG Weifeng, LI Wangzhe, YAO Jianping. Optically tunable Fano resonance in a grating-based Fabry-Perot cavity-coupled microring resonator on a silicon chip[J]. Optics Letters, 2016, 41(11): 240-245.
- [21] 高洁,张东亮,鹿利单,等.基于跑道型微环谐振腔的Fano共振器件设计及传感特性研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(5):24-30.
- [22] ZHANG Ping, WANG Yufei, HE Dongyua. Numerical analysis of simultaneous measurement of the refractive index and the pressure utilizing the mode splitting in a single-opening microring resonator[J]. Optics Communications, 2019, 434: 167-174.
- [23] ZHANG Zecen, NG G I, HU Ting, et al. Electromagnetically induced transparency-like effect in microring-Bragg gratings based coupling resonant system[J]. Optics Express, 2016, 24(22): 25665-25674.
- [24] PENG Fangcao, WANG Zhuoran, YUAN Guohui, et al. High sensitivity index sensing based on Fano resonances in a photonic crystal cavity-coupled microring resonator[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 17680600.

## Slot Phase-shifting Bragg Grating Microring Resonator and Its Sensing Characteristics

LIU Chunjuan, SUN Xiaoli, WU Xiaosuo, WANG Jiawei, CAO Qianqian

(College of Electronics and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to realize high sensitivity and high quality factor refractive index sensing characteristics, a microring resonator structure based on the slot phase-shifted Bragg grating is proposed. The structure is composed of a slotted straight waveguide embedded phase-shifted Bragg grating coupled with a single real waveguide microring. Two uniform Bragg gratings in the structure form a first-order F-P resonator. The light field oscillates in the F-P resonator through weak reflection of the gratings on both sides, forming a continuous light mode. part of the light waves are coupled into the microring and constantly surround in the microring due to evanescent field. After phase change, and part of the light is coupled back into the slot waveguide and interferes with the continuous state light mode in the F-P resonator, resulting in Fano resonance. Fano resonance has a sharp and asymmetric spectral line shape, so slight disturbance of refractive index in the external environment can cause a shift of resonant wavelength and a drastic change of transmission intensity, so as to achieve high sensitivity refractive index sensing characteristics. The light wave transfer matrix of each part of the structure is established, the light field distribution of each component in the resonator is quantified, and the light wave transmission principle of the system is analyzed. In order to further study the sensing characteristics of the structure, the physical model of SOI platform waveguide with Si as waveguide and SiO<sub>2</sub> as substrate is established, which is compatible with CMOS technology and is very conducive to the integration of photonic devices. Classical Fano formula and the finite difference time domain method are used to fit the output spectrum and simulate the proposed device structure, respectively. The field distribution of the strip waveguide and the slot waveguide with the same size is compared in the simulation process. Compared with the single strip waveguide, the slot waveguide with high refractive index difference is more suitable for the structural design of the sensor. For the refractive index sensor, the higher the quality factor, the stronger optical signal storage ability of the device, and the higher the extinction ratio, the higher the anti-noise sensing performance can be achieved. Therefore, in order to optimize the quality factor, extinction ratio and transmission intensity of the sensor, the influence of key physical parameters on the sensor performance is analyzed. Among them, the different values of Bragg grating period will affect the generation of Fano resonance and the amplitude of resonant peak in the structure, and the grating duty ratio directly controls the intensity of light wave reflection and the magnitude of reflection phase. At the same time, the number of grating teeth has a great influence on the performance of the sensor, and too many grating teeth will cause the effect of strong grating, resulting in the input optical signal is reflected and reduced quality factor, and the length of the F-P resonator affects the area and intensity of the interaction between the light and the object to be measured. At the same time, the length of the F-P resonator is related to the transmission loss of the sensor system. In addition, the radius of the microring resonator is closely related to the transmission loss and bending loss of the system. By simulating the output spectrum of different sizes of Bragg grating period, grating duty ratio, grating tooth number, F-P cavity length and microring radius, the optimal structure size is set to ensure the reliable sensing performance of the proposed structure. Based on the optimized physical parameters, the simulation structure is applied to the gas refractive index sensing environment. When the refractive index of the environment to be measured increases from 1.000 to 1.01 with the step size of 0.002, the resonant peak of the output spectrum of the structure is redshifted. There is a good linear relationship between wavelength and refractive, the fitting rate is more than 98%. The proposed structure can be widely used in biological or other sensing fields. In addition, the simulation results show that the quality factor of the structure is 25 729, which is more than 3 times higher than that of the traditional microring resonator, and the extinction ratio is 18.65 dB, which is 6.46 dB higher than the traditional microring resonator. The proposed structure can realize the high noise resistance performance of the sensor characteristics, and the refractive

index sensitivity can reach 122 nm/RIU. The comparison between the proposed structure and the single real waveguide microring resonator proposed in the relevant literature proves that the proposed structure has higher quality factor and refractive index sensitivity. In addition, the proposed resonator is composed of single real waveguide microring with simple and compact structure, which reduces the difficulty of the process. Therefore, the structure has certain advantages in sensing applications.

**Key words:** Integrated optics; Silicon waveguide; Microring resonator; Slot type phase shift; Bragg grating; Fano resonance; Refractive index sensing

**OCIS Codes:** 230.3120; 130.3120; 130.6010; 130.2790; 350.2770