

## 一种光栅辅助狭缝微环谐振器的传感特性

刘春娟<sup>1</sup>, 王嘉伟<sup>1\*</sup>, 吴小所<sup>1,2</sup>, 桑常林<sup>1</sup>, 乔泽<sup>1</sup>, 孙晓丽<sup>1</sup><sup>1</sup>兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070;<sup>2</sup>兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070

**摘要** 为提高折射率传感中的灵敏度和品质因数,提出一种光栅辅助狭缝微环谐振器,该结构在狭缝微环的基础上引入光栅结构来实现不同波长处的类电磁诱导透明(EIT-like)效应,从而获得更高的灵敏度和品质因数。利用传递矩阵法建立嵌孔微环谐振器频谱计算和参数优化的数值模型。采用有限差分时分域(FDTD)方法对所提器件结构的传输频谱和谐振腔的电场分布进行模拟仿真,并讨论器件结构参数的影响。结果表明:所提器件实现了EIT-like效应;在折射率传感应用中,所提器件的品质因素为35495,灵敏度高达360 nm/RIU(RIU为折射率单位),与参数相似的常规微环谐振器相比,灵敏度提高了270 nm/RIU;所提器件的灵敏度检测下限为 $2.3 \times 10^{-4}$  RIU。

**关键词** 集成光学; 微环谐振器; 狭缝微环; 光栅; 折射率传感

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1613001

## Sensing Characteristics of Grating-Assisted Slot Microring Resonator

Liu Chunjuan<sup>1</sup>, Wang Jiawei<sup>1\*</sup>, Wu Xiaosuo<sup>1,2</sup>, Sang Changlin<sup>1</sup>, Qiao Ze<sup>1</sup>, Sun Xiaoli<sup>1</sup><sup>1</sup>School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;<sup>2</sup>Key Lab of Opt-Electronic Technology and Intelligent Control of Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China

**Abstract** To improve the sensitivity and quality factor in refractive index sensing, a grating-assisted slot microring resonator is proposed. On the basis of the slot microring, the grating structure is introduced to realize the electromagnetically induced transparency (EIT)-like effect at different wavelengths, and obtain higher sensitivity and higher quality factor. A numerical model for spectrum calculation and parameter optimization of the hole-embedded microring resonator is built by the transfer matrix method. The transmission spectrum of the proposed device structure and electric field distribution of the resonator are simulated using the finite-difference time-domain (FDTD) method, and the influence of device structure parameters is discussed. The results indicate that the proposed device achieves the EIT-like. In the application of refractive index sensing, the quality factor of the proposed device is 35495, and the sensitivity is as high as 360 nm/RIU (RIU is refractive index unit). Compared with the results of the conventional microring resonator with similar parameters, the sensitivity is improved by 270 nm/RIU, and the lower limit of sensitivity detection of the proposed device is  $2.3 \times 10^{-4}$  RIU.

**Key words** integrated optics; microring resonator; slot microring; grating; refractive index sensing

## 1 引言

绝缘层上硅(SOI)是目前集成无源波导最具发展前景的技术平台,由于其结构紧凑、集成度高和性能优异,故已被广泛应用于多个领域中。在众多基于SOI材料的光学器件中,微环谐振器(MRR)由于插入损耗

小、串扰低,故常被用于构建不同功能的光学器件。新型的微纳米级布拉格光栅器件由于其特殊的物理结构可以增大光与其的作用效果<sup>[1-2]</sup>,且其具有与微环组合后可以实现高品质因数和高灵敏度的独特特性<sup>[3-6]</sup>,因此这种物理结构在温度检测<sup>[7]</sup>、压力传感<sup>[8]</sup>等领域中有很大的应用潜力。目前已有许多学者对此类应用进行

收稿日期: 2022-01-05; 修回日期: 2022-02-06; 录用日期: 2022-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(61905102)、甘肃省自然科学基金(21JR7RA289)

通信作者: \*961695256@qq.com

了研究,提出了不同类型的微环谐振器结构,例如:在微环的侧面耦合波导中插入空气孔或将其与光子晶体耦合可以实现法诺线形<sup>[9-11]</sup>,将侧面耦合波导与光栅结构耦合后可以提高斜率<sup>[12]</sup>,改变侧面耦合波导中空气孔的距离实现了三种不同的波形<sup>[13]</sup>;文献[14]通过在微环外添加弧形波导来实现波长的偏移;文献[15]利用微环打孔的结构实现了慢光效应、游标效应和不同场景下的轨道角动量发射;文献[16]通过对双环结构进行优化,增强了该结构在光学陀螺仪中的应用效果;文献[17]基于拍频效应实现了温度传感,但器件结构大,不利于集成;文献[18-19]通过改变波导损耗来改善器件性能,但品质因数仅为  $1.9 \times 10^4$ ;文献[20]中引入法诺线形提高了品质因数,但灵敏度仅为  $67 \text{ nm/RIU}$  (RIU 为折射率单位);文献[21]获得了高达  $2.4 \times 10^5$  的品质因数,但器件灵敏度较低,仅为  $86.3714 \text{ nm/RIU}$ ;文献[22]利用光在狭缝中的反射产生电磁诱导透明(EIT)效应,而在某一谐振波长处 EIT 的分裂可使品质因数得到提高。对于基于 SOI 的折射率传感器来说,如何在结构简单的前提下获得高灵敏度和高品质因子仍是一个值得研究的课题。

本文提出了一种基于光栅辅助狭缝微环的新型结构,在狭缝微环中插入周期性排列的空气孔,形成光栅辅助狭缝硅微环谐振器(GASSMRR)。改变孔与微环边界的距离可以灵活地实现不同的功能,在特定位置处可以实现在不同的波长处的类电磁诱导透明(EIT-like)和最多连续 4 个谐振波长处的分裂。该器

件在较小的体积内对折射率的变化更加敏感,灵敏度更高。与传统微环谐振器的洛伦兹线形相比,类电磁诱导透明效应的高斜率特性实现了更高的品质因数,从而导致更明显的共振波长偏移,实现了更高的灵敏度。为了实现 EIT-like 效应,首先设计了器件结构并分析了其物理机制。然后,研究了结构参数的尺寸变化对器件性能的影响。最后,以不同浓度的水溶液为检测环境,对光学传感器的传感性能进行了优化和评估。

## 2 基本原理

### 2.1 结构设计

如图 1 所示,所提结构基于  $2 \mu\text{m}$  厚  $\text{SiO}_2$  衬底的 SOI 平台,由直母线波导和狭缝微环组成。在狭缝微环上加入周期性排列的孔形成光栅,空气孔的位置如图 1(a) 所示。在直母线波导中引入一个可调谐的光源并在 MRR 中引入缝隙结构,扩大了传感器与外界环境的相互作用区域,从而提高了折射率传感器的灵敏度。波导芯层的高度为  $0.22 \mu\text{m}$ ,二氧化硅的折射率为  $1.444^{[23]}$ ,硅的折射率为  $3.4757^{[24]}$ ,环形波导的半径  $R$  和空气孔的半径  $r$  的大小分别为  $5.4 \mu\text{m}$  和  $0.02 \mu\text{m}$ ,如图 1(b) 和图 1(c) 所示,单环厚度( $w_{\text{out}}$ )、总线波导的宽度( $w$ )、微环与总线波导的距离( $w_{\text{gap}}$ )和狭缝宽度( $s_{\text{in}}$ )等参数则以此为基础进行优化。将孔与微环圆心的距离定义为  $\Delta R$ 。

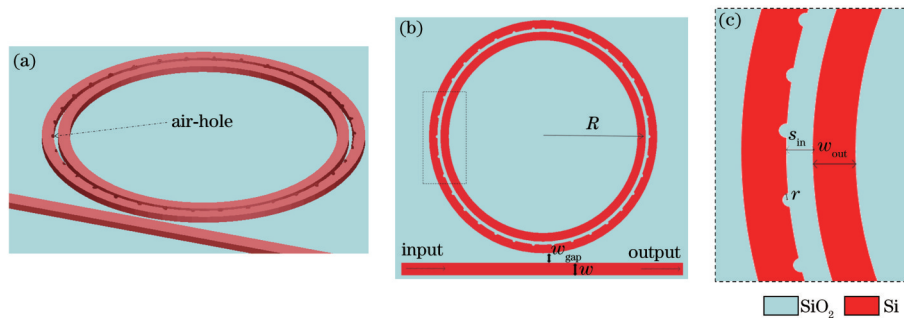


图 1 GASSMRR 的结构图。(a) 三维结构;(b) 俯视图;(c) 狭缝放大图

Fig. 1 Structural diagram of GASSMRR. (a) Three-dimensional structure; (b) top view; (c) enlarged view of slot

根据孔中心在环形波导的不同位置,可以实现微环与法布里-珀罗腔或光栅构成的混合结构。本次设计采用在环形波导边界打孔的结构,该结构通过微环和布拉格光栅之间发生耦合,两种光学模式相互耦合与反射,从而实现 EIT-like 的分裂。在原本的谐振频率处出现分裂,从而可以提高品质因数  $Q$ ,即谐振处波长与半峰全宽之比。EIT-like 的分裂效果有利于利用游标效应来实现折射率或者温度的检测,这是因为传统的游标效应检测为单峰<sup>[25]</sup>,双峰会使得频谱偏移引起的检测范围更宽,温度变化的检测范围扩大。通过调整孔与圆心的距离  $\Delta R$ ,可以实现至多 4 个谐振频率处的波峰分裂。与传统的单波导微环相比,狭缝微环的双波导结构可以将大部分光限制在狭缝中,而小孔会

反射少部分的光,同时可以让剩余的光通过。

### 2.2 理论分析

为了简化数学分析,以常规 MRR 中两个孔( $N=2$ )的情况为例,使用传递矩阵方法来分析整个结构的传输特性。该结构的光传输路径如图 2 所示。其中,下标 out 表示输出光,下标 in 表示输入光,下标  $t_1$  表示光从直母线波导耦合进入微环后所经的第一个孔的透射光,下标  $r_1$  表示光从直母线波导耦合进入微环后所经的第一个孔的反射光,设光栅腔的数量为  $h$ ,下标  $t_h$  表示光从直母线波导耦合进入微环后所经的最后一个孔的透射光,下标  $r_h$  表示光从直母线波导耦合进入微环后所经的最后一个孔的反射光,下标  $t_2$  表示光从直母线波导耦合进入微环后所经的第二个孔的透射光,

$r_2$ 表示光从直母线波导耦合进入微环后所经的第二个孔的反射光,下标  $t_{h-1}$ 表示光从直母线波导耦合进入微环后所经的倒数第二个孔的透射光, $r_{h-1}$ 表示光从直母

线波导耦合进入微环后所经的倒数第二个孔的反射光,其余孔的透射光和反射光可以以此类推, $k$ 为耦合系数, $t$ 为传输系数。

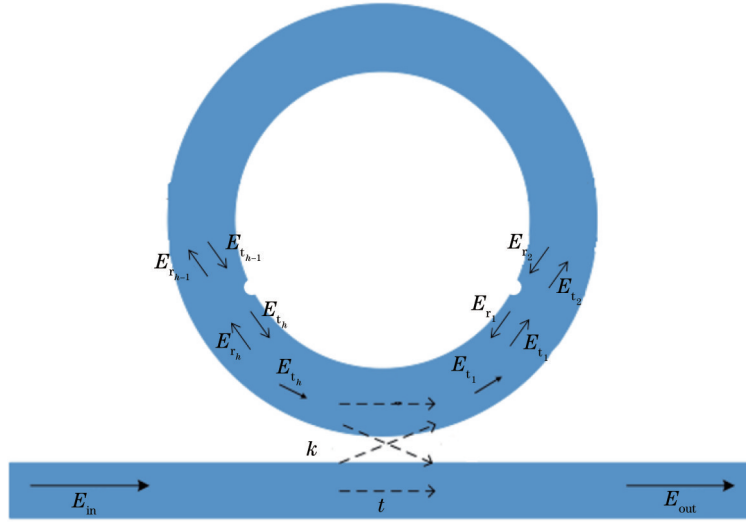


图2 透射原理图

Fig. 2 Schematic diagram of transmission

在所提 GASSMRR 结构中,一部分信号耦合进入狭缝微环中,另一部分信号通过总线波导到达直通端口。当光在狭缝中传播时,会有部分光耦合到周围的光栅腔结构中。若光栅腔的数量为  $h$ ,则输出的传输矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_{out} \\ E_{t_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & ik \\ ik & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in} \\ E_{t_h} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $E_{t_1}$ 表示光从直母线波导耦合进入微环后所经的第一个孔的透射光强度; $E_{t_h}$ 表示光从直母线波导耦合进入微环后所经的最后一个孔的透射光强度; $E_{out}$ 为输出光的强度; $E_{in}$ 为输入光的强度。反射光强与透射光强的关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_{r_1} \\ E_{r_h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s & r \\ r & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{t_2} \\ E_{t_1} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $E_{r_1}$ 表示光从直母线波导耦合进入微环后所经的第一个孔的反射光强度; $E_{r_h}$ 表示光从直母线波导耦合进入微环后所经的第二个孔的反射光强度; $E_{t_1}$ 表示光从直母线波导耦合进入微环后所经的第一个孔的透射光强度; $E_{t_2}$ 表示光从直母线波导耦合进入微环后所经的第二个孔的透射光强度; $r$ 为反射系数; $s$ 为透射系数。

由于光栅腔的数量较多,距离较近,故光栅腔引起的衰减可以忽略不计,此时可以将单孔的矩阵应用到所有光栅腔的矩阵中,简化后所得的结果为

$$\begin{bmatrix} E_{r_1} \\ E_{r_h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S & R \\ R & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{t_1} \\ E_{t_h} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: $E_{r_h}$ 表示光从直母线波导耦合进入微环后所经的最后一个孔的反射光强度; $R$ 和  $S$ 由孔的数量及其透射率和反射率决定。

将式(1)和式(3)联立后可以得到输出与输入之间的传输矩阵,即

$$\begin{bmatrix} E_{out} \\ E_{r_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u & v \\ x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in} \\ E_{r_h} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: $u, v, x, y$ 为微环的特性参数。 $E_{r_1}$ 和  $E_{r_h}$ 与上一时刻的传输状态有关。

当狭缝微环与光栅的谐振条件同时满足时,会在器件中出现 EIT-like 效应。级联微环待检测液体的折射率,该效应就可以通过分裂波峰的效果更清晰地表现出来。

### 3 器件结构优化

采用 Lumerical Mode Solutions 仿真软件对所提器件进行建模仿真。当空气孔在狭缝微环的不同位置时,可以实现不同的功能。

从图 3(a)可以清楚地看出,狭缝波导在低折射率的狭缝区域中提供了更强的光约束和更低的光耗散。在光折射率传感器中,狭缝波导暴露在外部环境中,被检测材料完全覆盖并填充,这将增强光与外部环境的相互作用,进而增加器件的传感灵敏度。

GASSMRR 的模场分布如图 3(b)所示。布拉格光栅的散射损耗会导致少量的电场被散射到波导中。微环谐振器的损耗主要包括弯曲损耗、散射损耗和耦合损耗,但由于 SOI 波导的高折射率对比度,故当  $R > 3 \mu\text{m}$  时,可以忽略微环谐振器的弯曲损耗<sup>[26]</sup>。此外,狭缝波导比条形波导具有更低的散射损耗。因此,通过选择合适的波导类型并设置合理的波导半径和耦合间隙,可以使光场被更好地限定在狭缝内,进而获得较小的损耗。



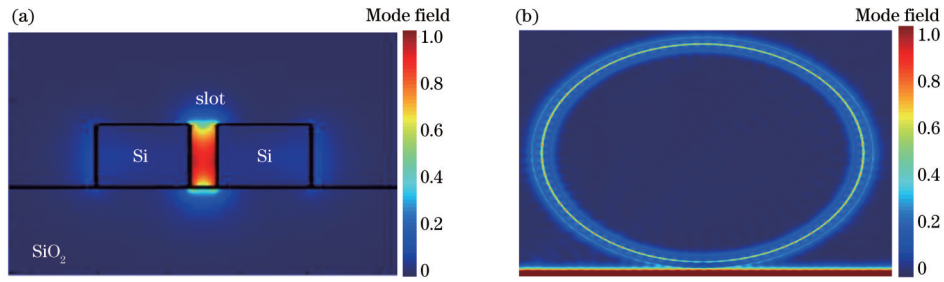


图3 GASSMRR的模场分布。(a)狭缝波导截面的模场分布;(b) GASSMRR整体的模场分布

Fig. 3 Mode field distribution of GASSMRR. (a) Mode field distribution of cross section of slot waveguide; (b) mode field distribution of GASSMRR as whole

### 3.1 气孔阵列与环形波导中心的距离

为了使气孔在狭缝微环中成为如图4所示的光栅阵列结构,需要将 $\Delta R$ 取4个固定值以使小孔在微环波导的边界。由于微环圆心到微环内波导内壁的距离为

$5.097 \mu\text{m}$ ,狭缝的宽度为  $0.062 \mu\text{m}$ ,波导的厚度为  $0.272 \mu\text{m}$ ,故图4(a)~(d)中的 $\Delta R$ 分别为  $5.097, 5.369, 5.429, 5.700 \mu\text{m}$ 。

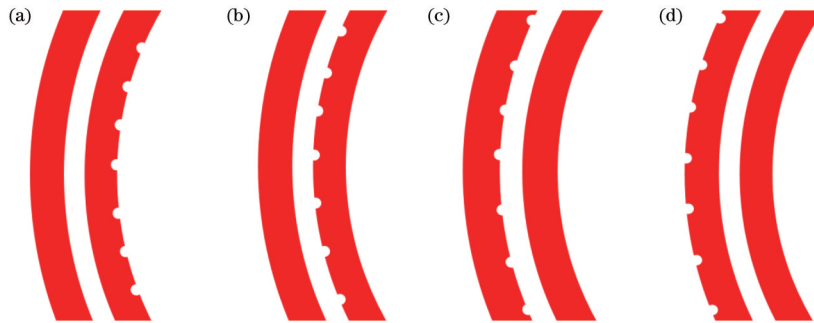


图4 小孔在不同位置下形成的光栅阵列结构。(a)  $\Delta R=5.097 \mu\text{m}$ ; (b)  $\Delta R=5.369 \mu\text{m}$ ; (c)  $\Delta R=5.429 \mu\text{m}$ ; (d)  $\Delta R=5.700 \mu\text{m}$

Fig. 4 Grating array structure formed by small holes at different positions. (a)  $\Delta R=5.097 \mu\text{m}$ ; (b)  $\Delta R=5.369 \mu\text{m}$ ; (c)  $\Delta R=5.429 \mu\text{m}$ ; (d)  $\Delta R=5.700 \mu\text{m}$

当 $\Delta R$ 分别取  $5.097 \mu\text{m}$  和  $5.700 \mu\text{m}$  时,狭缝微环的输出频谱如图5(a)和图5(d)所示。可以看出,狭缝微环拥有相对高的透射率,但没有出现EIT-like效应。当 $\Delta R$ 分别取  $5.369 \mu\text{m}$  和  $5.429 \mu\text{m}$  时,狭缝微环的输出频谱如图5(b)和图5(c)所示,可以得到具有EIT-like效应的效果,其透射率可以通过改变直母线波导与微环的距离、狭缝宽度等参数来进行优化。当 $\Delta R=5.429 \mu\text{m}$  时,空气孔在外微环的内边界处。

### 3.2 孔半径

狭缝波导内壁上的不平滑和较强的电场相互作用会导致狭缝波导比普通波导具有更大的损耗,而损耗的大小由光刻和蚀刻的工艺决定,位于狭缝内壁的孔的半径大小将会导致不同的损耗与品质因数。设置气孔时应选择合适的气孔半径,否则待测液体会难以进入气孔中,进而导致检测出现误差。在液体足以进入的前提下,不同孔半径下品质因数的变化如图6所示。可以看出:当孔的半径在  $0.02 \mu\text{m}$  以内时,狭缝波导具有较高的品质因数,最高可达38255;当孔的半径超过  $0.02 \mu\text{m}$  时,品质因数急剧减小。为了降低制作工艺的难度,孔半径取最大值 ( $0.02 \mu\text{m}$ ),此时  $Q$  值为35495。从工艺角度来看,制作布拉格光栅结合微环谐振器这种结构是比较复杂的,但是文献[27]提出并制

作了基于光栅的跑道型MRR,其刻蚀深度仅仅只有  $0.015 \mu\text{m}$ ,而且实验结果满足要求。本文刻蚀深度为  $0.02 \mu\text{m}$ ,在目前的加工制备条件下完全可以实现。

### 3.3 微环半径

图7所示为耦合距离为  $d=0.25 \mu\text{m}$  和环境折射率为1的情况下,微环半径对透射光谱的品质因数和透射强度的影响。为了便于比较不同光谱间光强的大小,透射强度以dB为单位。显然,随着半径的增加,品质因数先增大后减小,且透射强度在微环半径为  $5.4 \mu\text{m}$  时达到最大值。微环半径的大小以  $5.4 \mu\text{m}$  为中心,微环的弯曲损耗会随着微环半径的减小而增大,而微环半径过大又会引起谐振光在微环中的传输路径增加,进而导致传输损耗增加,透射强度减小。此外,当半径小于  $5 \mu\text{m}$  时,工艺损耗会增加,共振强度减弱,品质因数降低,故选择微环半径为  $5.4 \mu\text{m}$ 。

### 3.4 孔间距

孔间距是影响输出结果的重要参数,与孔数成反比,空气孔为周期性排列,选取合适的孔数可以获得较高的消光比。为了评估GASSMRR的EIT-like效果,改变其空气孔的数量并观察其输出结果,不同孔的数量会引起输出发生变化,孔为奇数时其EIT-like线形不对称,故选择孔数为偶数。图8为孔的数量从2增加

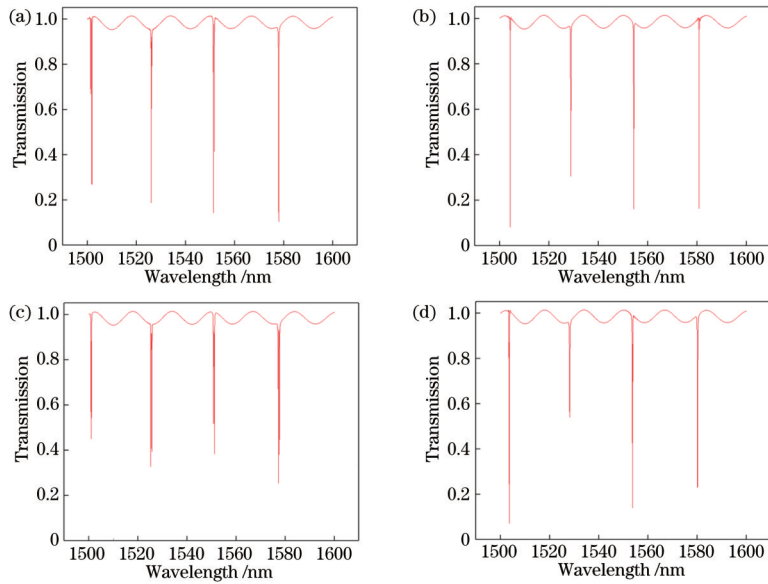


图 5 不同孔位置下的输出频谱。(a)  $\Delta R=5.097 \mu\text{m}$ ; (b)  $\Delta R=5.369 \mu\text{m}$ ; (c)  $\Delta R=5.429 \mu\text{m}$ ; (d)  $\Delta R=5.700 \mu\text{m}$   
 Fig. 5 Output spectra at different hole positions. (a)  $\Delta R=5.097 \mu\text{m}$ ; (b)  $\Delta R=5.369 \mu\text{m}$ ; (c)  $\Delta R=5.429 \mu\text{m}$ ; (d)  $\Delta R=5.700 \mu\text{m}$

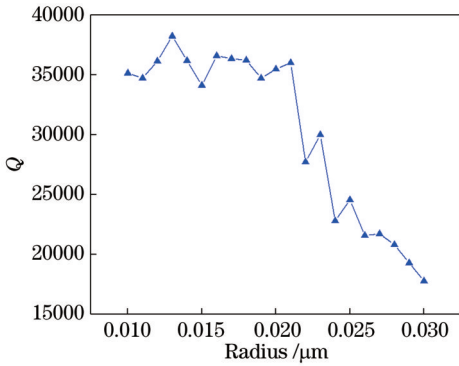


图 6 不同孔半径下的品质因数  
 Fig. 6 Quality factor under different hole radii

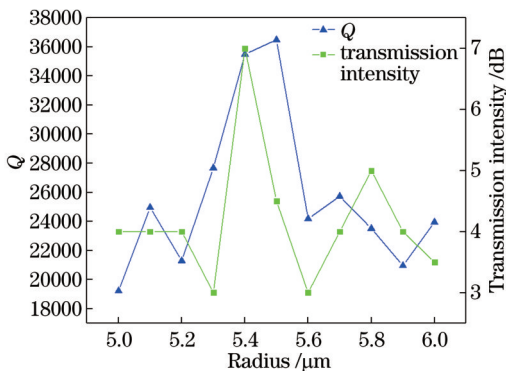


图 7 不同微环半径下的透射强度和品质因数  
 Fig. 7 Transmission intensity and quality factor under different microring radii

至 86 的情况下,当孔数为偶数时其在 1500~1600 nm 波长范围内波峰分裂的数量。可以看出,波峰分裂的数量整体趋势为随着孔数的增加而增加,这是因为随着孔洞数量的增加,狭缝微环与孔洞形成的光栅相互作用会增强。当波导孔数较少时,两种结构之间的交

互较弱,同一谐振频率发生 EIT-like 效应的机会会相应减少。随着孔洞的增加,这种相互作用会增强,进而增强了该结构中出现 EIT-like 效应的能力。

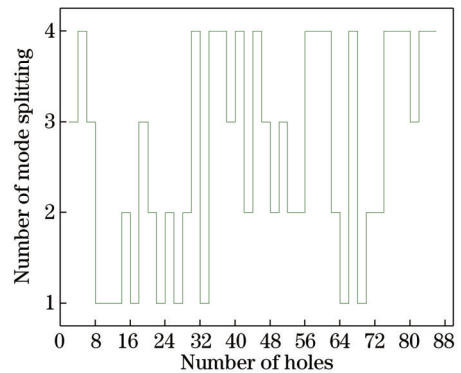


图 8 不同孔数下波峰分裂的数量  
 Fig. 8 Number of wave crest splitting under different hole numbers

GASSMRR 的品质因数与空气孔形成的光栅和微环的相互作用有关。当空气孔数分别为 16, 52, 64, 66 时,输出频谱如图 9(a)~(d) 所示,实现了 4 个波峰分裂的效果。不同的孔数对应着不同的反射面有效折射率,随着孔数的增加,光栅的波长选择性使光谱中出现 EIT-like 效应的数量增加,但当孔数持续增加时,光栅的散射损耗将逐渐增加,这将导致透射率减小。因此,选择孔数为 66,此时波峰分裂的数量达到最大值 (4),且透射率较高(可达 0.8)。

### 3.5 微环与直母线波导的距离

微环与直母线波导之间的距离  $w_{\text{gap}}$  会对透射强度产生影响。为了提高透射强度,对传感参数进行改变,图 10 为  $w_{\text{gap}}$  与输出透射强度间的关系。 $w_{\text{gap}}$  的改变会改变光峰的强度,这是因为耦合进入微环中的光是由

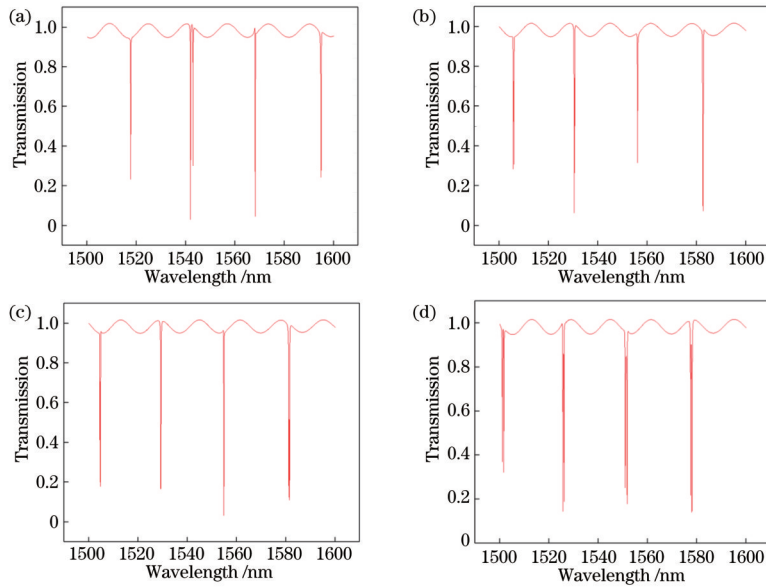


图 9 不同孔数下的输出频谱。(a) 16; (b) 52; (c) 64; (d) 66

Fig. 9 Output spectra under different hole numbers. (a) 16; (b) 52; (c) 64; (d) 66

通过母线直波导的光的倏逝波决定的,微环与直母线波导的距离越远,即  $w_{\text{gap}}$  越大,则倏逝波越弱,透射强度整体会逐渐减小,故  $w_{\text{gap}}$  应尽量取较小的值。然而,  $w_{\text{gap}}$  过小会使得器件的耦合作用增大,大部分光信号都耦合进入微环中会导致器件对光的选择性减弱,故选择  $w_{\text{gap}}$  在  $0.20 \mu\text{m}$  以上。当  $w_{\text{gap}}$  为  $0.20 \mu\text{m}$  或  $0.25 \mu\text{m}$  时,满足特定波段的谐振条件,此时可以得到最大的透射强度。为了同时兼顾波峰分裂的效果与透射强度,选择分裂效果最明显且透射强度较高的尺寸,即  $w_{\text{gap}}$  为  $0.25 \mu\text{m}$  时最合适,此时透射强度为 12 dB。

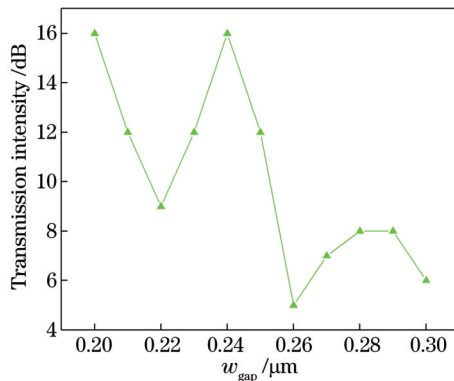


图 10 不同耦合间距下的透射强度

Fig. 10 Transmission intensity under different coupling spacing

#### 4 折射率传感特性

利用优化后的最佳参数,研究 GASSMRR 器件的折射率传感性能。在将待检测液体加入该结构后,待测液体中杂质的浓度发生改变导致待测液体折射率发生变化,波导表面的有效折射率也随之改变,此时谐振波长发生偏移。不同折射率 ( $n$ ) 下的透射光谱如图 11 所示,频谱随折射率改变偏移得较快,获得了较高的灵

敏度。在利用游标效应来检测液体折射率的研究中,该器件在谐振频率处为单峰,较小的折射率变化会导致谐振频率发生偏移的效果不易辨别。若使用 EIT-like 效应导致分裂的谐振双峰,发生微小偏移时该器件的频谱形状变化也较为明显,会出现三峰甚至四峰的效果,前后次峰值发生错位时输出也会出现单个的最高峰,两个双峰的次峰在重合时会依次出现单峰-双峰-单峰的效果,在一定温度范围内更易辨别。

为了检测介质折射率,设置了从  $1.3332 \sim 1.3382$  范围内多个不同的折射率,当折射率增加时,谐振波长产生红移,灵敏度高达  $360 \text{ nm/RIU}$ ,灵敏度检测下限为  $2.3 \times 10^{-4} \text{ RIU}$ 。当  $n=1.3382$  时,  $Q$  值达到 35495。

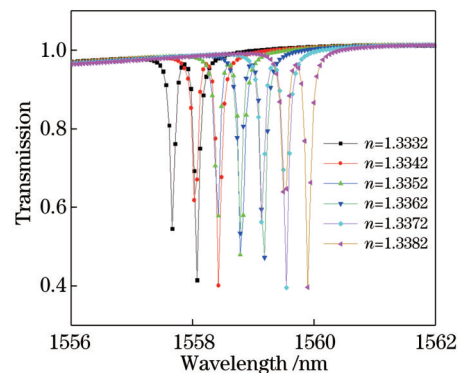


图 11 不同环境折射率下的透射光谱

Fig. 11 Transmission spectra under different environmental refractive indices

随着折射率的增加,谐振波长发生红移,同时 GASSMRR 的透射率略微发生变化。此外,直母线波导的倏逝场增强,进而导致微环耦合状态发生变化。所报道的器件并不局限于在所提到的研究领域中使用



用,还可用于其他领域,如温度传感和医学领域,以检测环境中温度的变化或血红蛋白浓度的变化等。可以通过编写函数的方式来进行温度传感的检测,需要将空气中的温度用以折射率为变量的函数标示出来,温度变化也会导致硅基波导的折射率发生变化,需要同时考虑波导的折射率变化。

## 5 结 论

设计了一种基于布拉格光栅的狭缝微环谐振器,在狭缝的边缘处嵌入空气孔实现狭缝微环与布拉格光栅的耦合结构,狭缝微环与布拉格光栅两种不同的光模式在不同的光路中会发生干涉,产生 EIT-like 效应,通过改变孔与微环边界的距离可以灵活地实现不同的功能。采用 Lumerical Mode Solutions 软件分析仿真了孔间距、耦合间距和孔半径等不同参数对器件的影响,证明了器件在高耦合环境下性能可靠和传感线形优秀。该结构作为折射率传感器,在拥有较高灵敏度的同时,具有较高的品质因数,灵敏度为 360 nm/RIU,品质因数为 35495,灵敏度的检测下限为  $2.3 \times 10^{-4}$  RIU。综上,所设计的紧凑型器件易于集成,适合应用在传感阵列中,在光学传感领域中具有巨大的潜力。

### 参 考 文 献

- [1] Wen Y J, Sun Y, Deng C Y, et al. High sensitivity and FOM refractive index sensing based on Fano resonance in all-grating racetrack resonators[J]. Optics Communications, 2019, 446: 141-146.
- [2] Passaro V M N, Loiacono R, D'Amico G, et al. Design of Bragg grating sensors based on submicrometer optical rib waveguides in SOI[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(9): 1603-1611.
- [3] Biswas U, Rakshit J K. Detection and analysis of hemoglobin concentration in blood with the help of photonic crystal based micro ring resonator structure[J]. Optical and Quantum Electronics, 2020, 52(10): 1-16.
- [4] Zhang W F, Li W Z, Yao J P. Optically tunable Fano resonance in a grating-based Fabry-Perot cavity-coupled microring resonator on a silicon chip[J]. Optics Letters, 2016, 41(11): 2474-2477.
- [5] Zhu B B, Zhang W F, Pan S L, et al. High-sensitivity instantaneous microwave frequency measurement based on a silicon photonic integrated Fano resonator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(11): 2527-2533.
- [6] Zhao C Y, Zhang L, Zhang C M. Compact SOI optimized slot microring coupled phase-shifted Bragg grating resonator for sensing[J]. Optics Communications, 2018, 414: 212-216.
- [7] Javanshir S, Pourziad A, Nikmehr S. Optical temperature sensor with micro ring resonator and graphene to reach high sensitivity[J]. Optik, 2019, 180: 442-446.
- [8] Zhang P, Wang Y F, He D Y, et al. 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.
- [9] Gu L P, Fang L, Fang H L, et al. Fano resonance lineshapes in a waveguide-microring structure enabled by an air-hole[J]. APL Photonics, 2020, 5(1): 016108.
- [10] Fang L, Gu L P, Zheng J B, et al. Controlling resonance lineshapes of a side-coupled waveguide-microring resonator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(16): 4429-4434.
- [11] 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.  
Liu C J, Sang C L, Wu X S, et al. One-dimensional photonic crystal groove microring resonators and its sensing characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2413002.
- [12] 廖莎莎, 包航, 张甜甜, 等. 基于光栅辅助微环结构的高斜率 Fano 谐振器[J]. 光学学报, 2021, 41(22): 2213001.  
Liao S S, Bao H, Zhang T T, et al. High-slope Fano resonator based on grating-assisted microring structure[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2213001.
- [13] Gu L P, Fang H L, Li J T, et al. A compact structure for realizing Lorentzian, Fano, and electromagnetically induced transparency resonance lineshapes in a microring resonator[J]. Nanophotonics, 2019, 8(5): 841-848.
- [14] Shotorban A K N, Abedi K, Jafari K. Design and analysis of an SOI photonic filter based on a microring [C]//27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), April 30-May 2, 2019, Yazd, Iran. New York: IEEE Press, 2019: 87-91.
- [15] Yuan G H, Cao S Y, Zhang P N, et al. Achieving wide-range photonics applications based on a compact grating-assisted silicon micro-ring resonator[J]. Optik, 2019, 183: 887-896.
- [16] 孙道鑫, 张东亮, 毕付, 等. 应用于集成光学陀螺敏感单元的硅基微环谐振腔[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(15): 1513001.  
Sun D X, Zhang D L, Bi F, et al. Silicon-based microring resonant cavity applied to integrated optical gyroscope sensitive unit[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(15): 1513001.
- [17] Chen X Y, Huang K, Zeng Z L, et al. A temperature sensor using cascaded microring resonators[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 490: 072030.
- [18] Shoman H, Jayatilleka H, Jaeger N A F, et al. Measuring on-chip waveguide losses using a single, two-point coupled microring resonator[J]. Optics Express, 2020, 28(7): 10225-10238.
- [19] Song J H, Kongnyuy T D, de Heyn P, et al. Enhanced silicon ring resonators using low-loss bends[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(6): 313-316.
- [20] Peng F C, Wang Z R, Yuan G H, et al. High-sensitivity refractive index sensing based on Fano resonances in a photonic crystal cavity-coupled microring resonator[J].

- IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 17680600.
- [21] Wu N S, Xia L. High-Q optical filter based on multi-nanohole micro-ring resonator[C]//Asia Communications and Photonics Conference, October 26-29, 2018, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2018: 18355737.
- [22] Wu N S, Xia L. High-Q and high-sensitivity multi-hole slot microring resonator and its sensing performance[J]. Physica Scripta, 2019, 94(11): 115512.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Tian C C, Zhang H, Li W X, et al. Temperature sensor of high-sensitivity based on nested ring resonator by Vernier effect[J]. Optik, 2020, 204: 164118.
- [26] Song J H, Kongnyuy T D, de Heyn P, et al. Low-loss waveguide bends by advanced shape for photonic integrated circuits[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(12): 3273-3279.
- [27] Shi W, Wang X, Zhang W, et al. Grating-coupled silicon microring resonators[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(12): 121118.