

# 单挡板金属-电介质-金属波导耦合圆盘腔 级联多 Fano 共振差动传感

韩帅涛<sup>1\*\*</sup>, 陈颖<sup>1\*</sup>, 许扬眉<sup>1</sup>, 曹景刚<sup>1</sup>, 高新贝<sup>1</sup>, 谢进朝<sup>1</sup>, 朱奇光<sup>2</sup>

<sup>1</sup>燕山大学电气工程学院测试计量技术与仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

<sup>2</sup>燕山大学信息科学与工程学院河北省特种光纤与光纤传感器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 基于表面等离子亚波长结构的传输特性与光子局域特性, 提出了一种单挡板金属-电介质-金属(MDM)波导耦合圆盘级联结构。由圆盘级联形成的孤立态与金属挡板形成的较宽连续态干涉相长相消, 形成了两种不同模式的 Fano 共振。结合耦合模理论, 分析了该结构形成 Fano 共振的传输特性, 采用有限元分析法对结构进行了模拟仿真, 定量分析了结构参数对折射率传感特性影响。根据折射率变化的物理机制, 分析了温度和湿度在实际测量过程中对测量结果的影响, 并采用差动传感的方法有效解决了传感过程中的交叉敏感问题。

**关键词** 测量; 金属-电介质-金属波导; Fano 共振; 单挡板; 级联结构; 差动传感

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0212005

## Multi-Fano Resonance Differential Sensing by Single-Baffle Metal-Dielectric-Metal Waveguide Coupled Disk Cavity Cascade

Han Shuaitao<sup>1\*\*</sup>, Chen Ying<sup>1\*</sup>, Xu Yangmei<sup>1</sup>, Cao Jinggang<sup>1</sup>, Gao Xinbei<sup>1</sup>,  
Xie Jinchao<sup>1</sup>, Zhu Qiguang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hebei Province Key Laboratory of Test/Measurement Technology and Instrument, School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

**Abstract** A single-baffle metal-dielectric-metal (MDM) waveguide coupled disk cavity cascade structure is proposed based on the transmission characteristics and photon local characteristics of the surface-plasmon-based sub-wavelength structures. The discrete state provided by the side-coupled disk cavity cascade and is used to provide a continuous state produced by the baffle plate placed in metal-dielectric-metal waveguide interferes constructively or destructively, and thus two different modes of Fano resonance are formed. The transmission characteristics of the formed Fano resonance are analyzed according to the coupled mode theory. The structure is simulated by the finite element analysis method and the effects of the structural parameters on the refractive index sensing characteristics are quantitatively analyzed. The effects of temperature and humidity on the measurement results in the actual measurement process are analyzed, based on the physical mechanism underlying the refractive index change. Moreover, the problem of cross-sensitivity in the sensing process is effectively solved by the differential sensing method.

**Key words** measurement; metal-dielectric-metal waveguide; Fano resonance; single-baffle; cascade structure; differential sensing

**OCIS codes** 120.3180; 130.6010; 260.5740; 280.4788

收稿日期: 2018-07-12; 修回日期: 2018-08-07; 录用日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(61201112, 61475133)、中国博士后基金(2018M630279)、河北省自然科学基金(F2016203188, F2016203245)、河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2018243)

\* E-mail: chenying@ysu.edu.cn; \*\* E-mail: 2350035697@qq.com

## 1 引 言

Fano 共振具有不对称的共振轮廓线,可以得到比传统洛伦兹共振更高的优质因子(FOM)和灵敏度<sup>[1]</sup>,引起了表面等离子体(SPs)领域的研究者的浓厚兴趣。人们首先在原子的自电离状态<sup>[2]</sup>中发现了 Fano 共振现象,随后在经典光学系统中也发现了该现象。在 SPs 体系中发现的 Fano 共振效应在光开关、等离子体诱导透明、慢光<sup>[3]</sup>及传感<sup>[4]</sup>等方面得到了广泛应用,已成为纳米光子学研究的热点之一。Klimov 等<sup>[5]</sup>通过对穿孔金属膜覆盖光子晶体光学特性的研究,验证了 Fano 共振的存在,并在此基础上提出了对环境折射率变化敏感的 Fano 共振传感器的设计方法。

等离子体金属-电介质-金属(MDM)波导具有传播距离长、制造方便及可用频率范围宽等显著优点,受到了广泛关注<sup>[6]</sup>,其金属表面产生的 SPs 可以被金属纳米结构引导而突破分辨极限,且对结构形态、属性、周围环境及入射光的偏振态相当敏感<sup>[7]</sup>。利用这些特性可使设计出的传感器的灵敏度得到极大提高,并且设计的 MDM 波导结构可达到纳米量级,这为纳米器件的集成化和小型化提供了可能<sup>[8]</sup>。目前,已有大量利用 MDM 波导设计的 Fano 共振的研究。Chen 等<sup>[9]</sup>提出了一种基于 Fano 共振及双槽 MDM 波导的小型折射率传感器,其灵敏度约为 1260 nm/RIU(RIU 为每单位折射率),FOM 的值约为  $2.3 \times 10^4$ 。Wen 等<sup>[1]</sup>提出了一种基于 Fano 共振的齿形加矩形腔的 MDM 波导结构,并分析了其产生共振的原因及各部分结构的作用,该纳米传感器的灵敏度为 1131 nm/RIU,FOM 值较大。Yang 等<sup>[10]</sup>提出了一种由单挡板和矩形腔构成的 MDM 波导结构,研究了该结构的双 Fano 共振特性,研究表明,多 Fano 共振系统在非线性、慢光及生物纳米传感设备等方面都具有重要的应用。当多个 Fano 共振峰同时用于传感时,将形成差动传感,可以有效地消除部分外界环境因素的影响,得到某一变化量与共振波长之间的线性关系,因此多 Fano 共振为纳米传感提供了新的思路和方法。

本文提出一种单挡板 MDM 波导耦合圆盘级联结构,利用光在含有金属挡板的波导中传播形成较宽连续态,同时光进入级联圆盘腔后会形成多个较窄的孤立态共振波谷。在近场作用下,两者耦合会形成两种模式的 4 个 Fano 共振峰。结合耦合模理论(CMT)分析这种连续态与孤立态耦合形成的

Fano 共振的传输特性。利用基于有限元分析法的 COMSOL 软件进行仿真,定量分析结构参数对传感特性、折射率灵敏度及 FOM 值的影响,进而对结构参数进行优化。分析折射率传感误差产生的物理机制,采用差动传感的方法有效解决交叉敏感带来的问题。

## 2 模型建立与理论分析

## 2.1 模型建立

所提出的单金属挡板 MDM 波导耦合圆盘级联结构如图 1 所示。结构中金属为 Ag,电介质层为空气,空气的折射率为 1。为了确保只有横磁(TM)模式能够传播,令波导的宽度  $w$  为 50 nm<sup>[11]</sup>。 $d$  为波导与圆盘腔的最小耦合距离; $g$  为金属挡板的厚度; $R_a$ 、 $R_b$  分别为圆盘腔 a、圆盘腔 b 的半径; $t$  为两圆盘腔之间的耦合距离; $l_1$  为整个波导结构的长度。Ag 的相对介电常数可用 Drude 模型<sup>[12]</sup>表示:

$$\epsilon_m(\omega) = \epsilon_\infty - \omega_p^2 / (\omega(\omega + i\gamma)), \quad (1)$$

式中: $\omega$  为输入光的角频率;等离子振荡频率  $\omega_p = 1.38 \times 10^{16}$  Hz;碰撞频率  $\gamma = 2.73 \times 10^{13}$  Hz;无穷介电常数  $\epsilon_\infty = 3.7$ 。

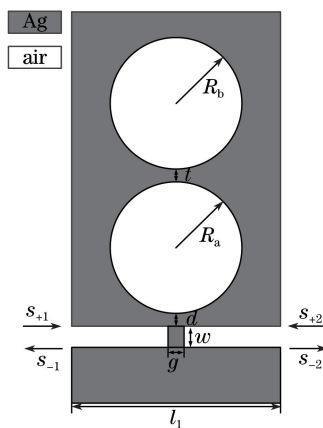


图 1 单挡板 MDM 波导耦合圆盘级联结构  
Fig. 1 Single-baffle MDM waveguide coupled disk cavity cascade structure

## 2.2 理论分析

以 TM 模式传播时,入射光在亚波长波导结构中的金属表面产生 SPs,SPs 突破了衍射极限,在波导中进行传播。对于所提出的系统,在所计算的范围内将产生的两种不同模式同时引入级联结构。当系统中存在两个或两个以上模式相同的耦合腔时,模式就会发生分裂<sup>[11]</sup>,因此在所计算的范围内产生了 4 个共振峰。为了解释多 Fano 共振产生的原因,结合 CMT 对等离子体共振系统进行分析。分别用

$a_1$  和  $a_2$  表示圆盘谐振腔 a 内的两种模式的共振振幅, 分别用  $b_1$  和  $b_2$  表示圆盘谐振腔 b 内的两种模式的共振振幅。 $s_{+1}$  和  $s_{-1}$  分别为输入端口入射光和出射光的模场振幅;  $s_{+2}$  和  $s_{-2}$  分别为输出端口入射光和出射光的模场振幅。随着时间演化, 系统的振幅方程<sup>[13]</sup>可表示为

$$i\omega a_{1,2} = \left( i\omega_{a1,2} - \frac{1}{\tau_{a1,2}} - \frac{1}{\tau_{e1,2}} \right) a_{1,2} + d_{1,2}(s_{+1} \pm s_{+2}) - i\mu_{1,2}b_{1,2}, \quad (2)$$

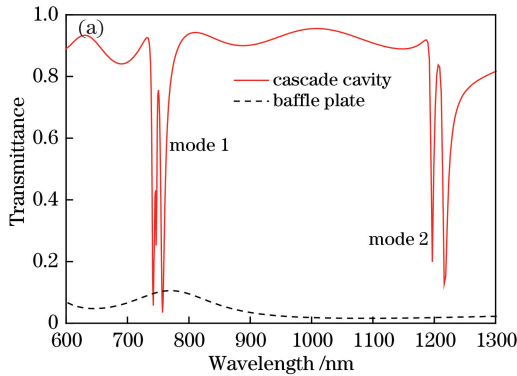
$$i\omega b_{1,2} = \left( i\omega_{b1,2} - \frac{1}{\tau_{b1,2}} \right) b_{1,2} - i\mu_{1,2}a_{1,2}, \quad (3)$$

式中:  $\omega_{ai,bi}$  ( $i=1,2$ ) 分别为谐振腔 a、谐振腔 b 在两种模式下的共振频率;  $1/\tau_{ai,bi}$  ( $i=1,2$ ) 为腔的固有损耗率;  $1/\tau_{ei}$  ( $i=1,2$ ) 为腔振幅耦合到波导的衰减率;  $\mu_{1,2}$  为谐振腔 a、谐振腔 b 之间的直接耦合系数;  $d_1$  和  $d_2$  分别为波导中正向和反向传播模式的输入耦合系数。根据能量守恒<sup>[14]</sup>原理, 输出波可表示为

$$\begin{pmatrix} s_{-1} \\ s_{-2} \end{pmatrix} = \mathbf{C} \begin{pmatrix} s_{+1} \\ s_{+2} \end{pmatrix} + \mathbf{k} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{k}$  为输出波与输出端口耦合的耦合矩阵;  $\mathbf{C}$  为散射矩阵, 表示入射波和出射波通过单挡板时的耦合关系<sup>[15]</sup>, 可以表示为

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} r & it \\ it & r \end{pmatrix}, \quad (5)$$



式中  $r, t$  分别为反射和透射振幅系数, 且  $r^2 + t^2 = 1$ 。

矩阵  $\mathbf{k}$  的具体形式为

$$\mathbf{k} = \begin{pmatrix} -d_1^* & d_2^* \\ -d_1^* & -d_2^* \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中  $*$  表示对表达式取共轭。

根据能量守恒和时间反转的对称性,  $d_1 = \sqrt{1/\tau_{e1}} \exp(i\theta_1)$ ,  $d_2 = \sqrt{1/\tau_{e2}} \exp(i\theta_2)$ , 其中  $\theta_i$  ( $i=1,2$ ) 为相应的相位耦合系数。因此, 系统的传递函数可以表示为  $t(\omega) = s_{-2}/s_{+1}$ , 透射谱为

$$T(\omega) = |t(\omega)|^2 = \left| it - \frac{1/\tau_{e1}}{\Delta_1} - \frac{1/\tau_{e1}}{\Delta_2} \right|^2, \quad (7)$$

式中  $\Delta_{1,2} = i(\omega - \omega_{a1,2}) + 1/\tau_{a1,2} + 1/\tau_{e1,2} + \mu_{1,2}^2 / [i(\omega - \omega_{b1,2}) + 1/\tau_{b1,2}]$ 。

当不含挡板时 ( $t=1, r=0$ ),  $1/\tau_{e1,2}$ 、 $1/\tau_{a1,2}$ 、 $1/\tau_{b1,2}$  和  $\mu_{1,2}$  为常数, 它们的值远小于  $i(\omega - \omega_{ai,bi})$  ( $\omega \neq \omega_{ai,bi}$ ,  $i=1,2$ ) 的绝对值, 此时将会得到相对较大的透射率。当  $\omega$  的值接近或等于  $\omega_{ai,bi}$  时, 透射率将急剧减小, 透射谱将形成 4 个狭窄的洛伦兹传输谱线, 如图 2(a) 所示。当波导中引入挡板时, 波导中光波受到复杂的耦合作用影响, 其相位发生明显的变化, 强烈的相位变化会使波导中产生 Fano 共振现象, 形成 4 个尖锐非对称的波峰与 4 个零传输的波谷, 如图 2(b) 所示。

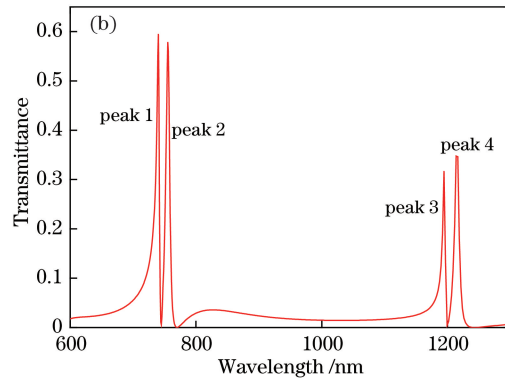


图 2 Fano 共振形成过程。(a) 只有挡板时和只有圆盘级联时的透射谱;

(b) 单挡板 MDM 波导耦合圆盘级联结构形成的 Fano 共振谱

Fig. 2 Fano resonance formation process. (a) Transmission spectrum with only baffle or only cascaded disk cavity; (b) Fano resonance spectrum formed by single-baffle MDM waveguide coupled disk cavity cascade structure

为了进一步分析内在机理, 用 COMSOL 软件对耦合结构的稳态电场  $E_z$  分布进行仿真, 结果如图 3 所示。由图 3(a) 和 3(b) 可知, 当波长为 740 nm 和 755 nm 时, 在级联圆盘腔内多次反射后反射出级联结构并进入直波导的 SPs 与直波导中的 SPs 的干涉增强<sup>[16]</sup>, 形成了 Fano 共振峰。由图 3(c) 和 3(d) 可知, 当波长为 1194 nm 和 1214 nm

时, 级联圆盘内反射出的 SPs 与直波导内 SPs 的干涉增强, 也形成了 Fano 共振峰。

### 3 结构的传感特性分析

由于 Fano 共振产生的峰是一种非对称的峰, 在实际测量过程中, 通过在特定波长  $\lambda_0$  下测量待测物折射率变化  $dn$  引起的透射谱的相对透射强度变

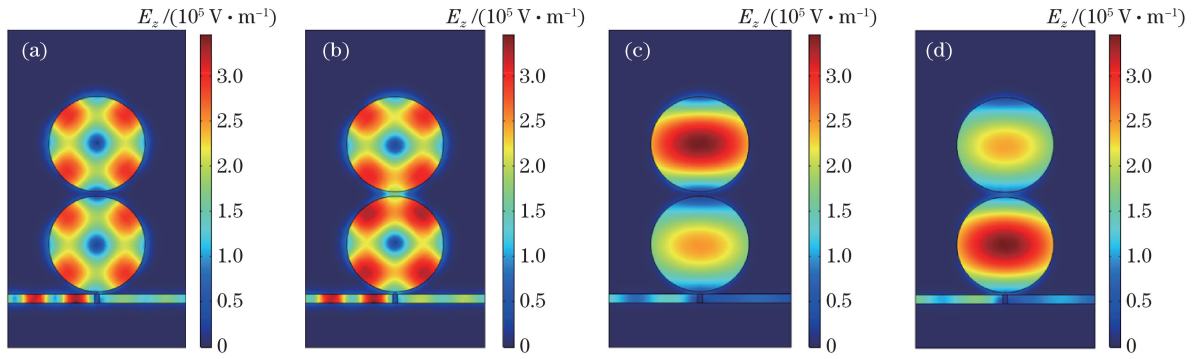


图 3 不同波长下的稳态电场分布。(a) 740 nm; (b) 755 nm; (c) 1194 nm; (d) 1214 nm

Fig. 3 Steady electric field distributions under different wavelengths. (a) 740 nm; (b) 755 nm; (c) 1194 nm; (d) 1214 nm

化  $dT/T$  来测量波长漂移。相对透射强度变化越快,越容易检测到透射谱的变化,可用 FOM 来衡量<sup>[17]</sup>,FOM 可定义为

$$f_{\text{FOM}} = \left( \frac{dT/dn}{T} \right)_{\text{max}} = \left[ \frac{S_{\lambda} (dT/d\lambda)}{T} \right]_{\text{max}} \quad (8)$$

这里取  $\lambda_0$  为 FOM 最大时的波长,定义灵敏度  $S_{\lambda} = d\lambda/dn$ 。该波导结构在频率  $\omega$  下的 FOM<sup>[9]</sup> 可表示为

$$f_{\text{FOM}} = \frac{\Delta T}{T \Delta n} = \frac{T(\omega, n) - T(\omega, n_0)}{T(\omega, n_0) \Delta n} \quad (9)$$

式中:  $T(\omega, n_0)$  为结构初始状态下的透射系数;  $T(\omega, n)$  为环境折射率变化后的透射系数。环境变化导致的折射率差  $\Delta n = n - n_0$ 。FOM 体现了传感结构的灵敏度  $S_{\lambda}$  和分辨率  $dT/d\lambda$ , Fano 共振所形成的共振峰尖锐且共振峰透射系数陡降,其分辨率大, FOM 大,故 Fano 共振具有很好的传感性能。

### 3.1 圆盘腔半径对传感器 FOM 值的影响

对半径  $R$  进行参数化扫描,且满足  $R_a = R_b = R$ ,其中  $g$  为 23 nm,  $d$  为 14 nm,  $t$  为 27 nm,半径的扫描范围为 280~350 nm。如图 4(a)所示,耦合到级联圆盘中的 SPs 的传播距离(光程)与共振波长正相关<sup>[18]</sup>,增大半径时,耦合到级联圆盘腔的 SPs 光程会随之增大,因此模式一和模式二的两个共振峰都发生了红移,模式二的红移较为明显,透射率有所减小,模式一透射率反而有所增大。不同半径下扫描的 FOM 曲线如图 4(b)所示,可以看出,随着半径的增大,模式一的 FOM 不断减小,模式二的 FOM 不断增大。考虑到实际情况并权衡两种模式对传感性能的影响,初步将半径定为 300 nm。

### 3.2 结构参数 $g$ 对传感器 FOM 值的影响

对金属挡板厚度  $g$  进行参数化扫描,其中  $R$  为 300 nm,  $d$  为 14 nm,  $t$  为 27 nm,  $g$  的范围为 18~28 nm。如图 5(a)所示,由于实际耦合距离直接影

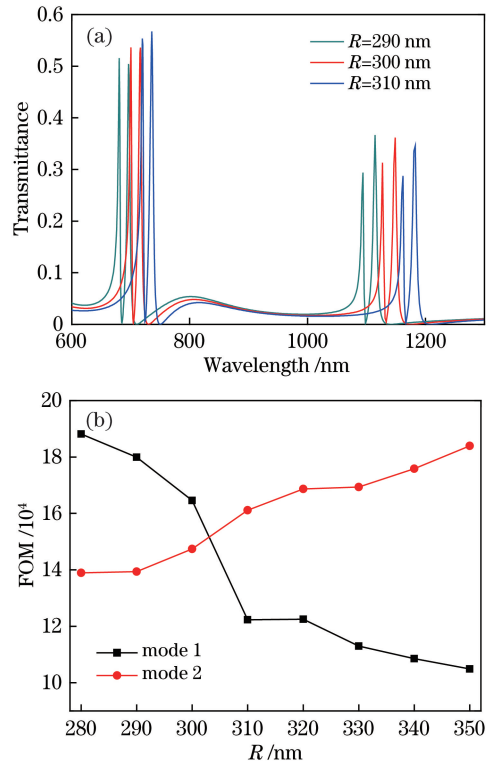


图 4 半径变化对 Fano 共振峰和 FOM 的影响。

(a) Fano 共振峰; (b) FOM

Fig. 4 Effect of radius change on Fano formant and FOM.

(a) Fano formant; (b) FOM

响连续态与离散态的耦合作用,随着  $g$  的增大,单挡板 MDM 波导与圆盘级联腔的实际耦合距离增大,耦合作用减小,能量损耗增大,衰减率增大。由耦合模理论的透射公式(7)式可知,实际耦合间距与透射率负相关。故随着金属挡板厚度的增加,实际耦合间距增大,整个结构的透射率减小。4 个共振峰的透射率总体有所减小,但模式一与模式二左边的共振峰变窄,分辨率有所增大。模式一的 FOM 随着  $g$  的变化情况如图 5(b)所示,可以看出,当  $g$  为 23 nm 时, FOM 最大,其值为  $1.64 \times 10^5$ 。模式二的



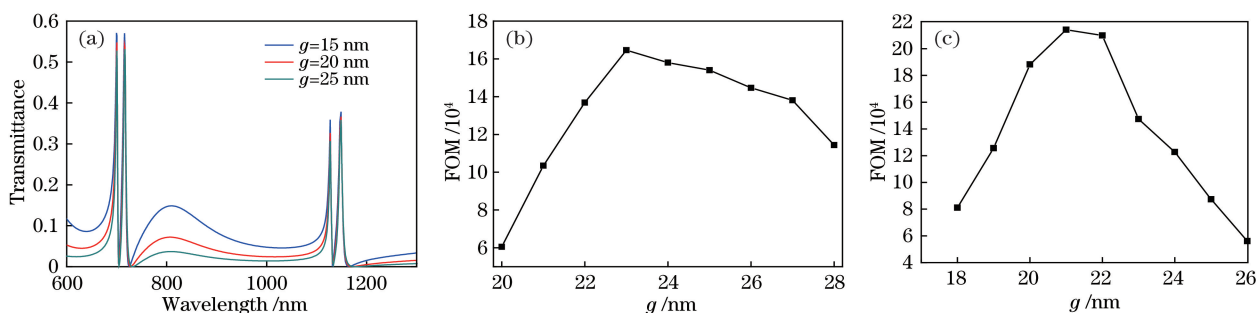


图 5 金属挡板厚度对 Fano 共振峰和 FOM 的影响。(a) Fano 共振峰;(b)模式一的 FOM;(c)模式二的 FOM

Fig. 5 Effect of metal-baffle thickness on Fano formant and FOM. (a) Fano formant;

(b) FOM of mode 1; (c) FOM of mode 2

FOM 随着  $g$  的变化情况如图 5(c)所示,可以看出,当  $g$  为 21 nm 时,FOM 最大,其值为  $2.14 \times 10^5$ 。

### 3.3 结构参数 $t$ 对传感器 FOM 的影响

对  $t$  进行参数化扫描,其中  $R$  为 300 nm, $d$  为 14 nm, $g$  为 23 nm, $t$  的扫描范围为 24~32 nm。如图 6(a)所示,级联结构之间的耦合距离会直接影响直接耦合系数  $\mu_{1,2}$  的大小,当耦合距离变小时,直接耦合系数变大,将会有更多的能量被限制在级联腔内,其表现形式为波谷更趋向于零。因此减小  $t$  时,4 个波谷更趋近于零。模式一和模式二的 FOM 随  $t$  的变化情况如图 6(b)所示,可以看出: $t$  为 27 nm

时,模式一的 FOM 最大,为  $1.64 \times 10^5$ ;  $t$  为 28 nm 时,模式二的 FOM 最大,为  $1.62 \times 10^5$ 。

### 3.4 优化结构参数后的传感性能

对于优化后的结构进行传感特性分析,如图 7(a)所示,随着环境折射率  $n$  的增加,Fano 共振峰发生红移,其共振波长与环境折射率  $n$  之间具有很好的线性关系,如图 7(b)所示。通过计算得到,模

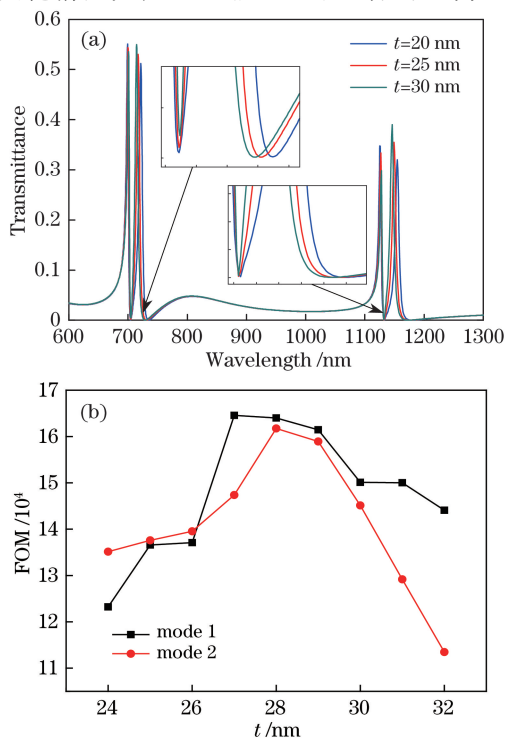


图 6 参数  $t$  变化对共振峰和 FOM 值的影响。

(a) Fano 共振峰;(b) FOM

Fig. 6 Effect of parameter  $t$  change on Fano formant and FOM. (a) Fano formant; (b) FOM

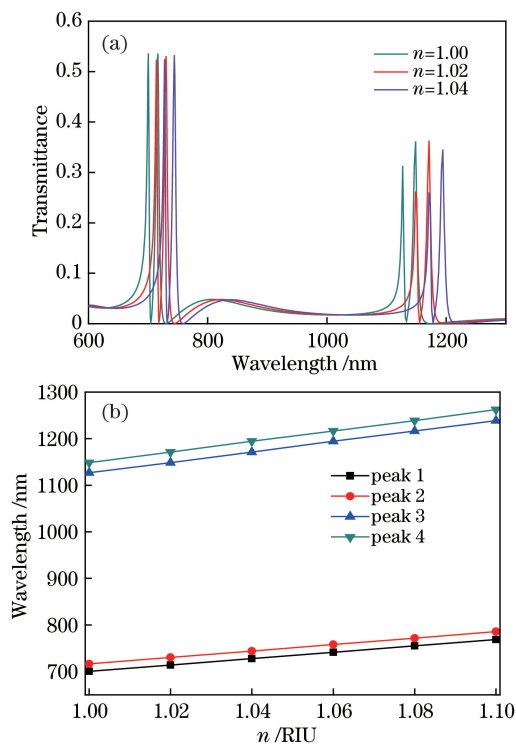


图 7 共振波长与环境折射率  $n$  的关系。(a)不同环境折射率  $n$  下的透射谱;(b)共振波长与环境折射率  $n$  的线性关系

Fig. 7 Relationship between resonant wavelength and environmental refractive index  $n$ . (a) Transmission spectra under different environment refractive index  $n$ ; (b) linear relationship between resonant wavelength and environmental refractive index  $n$

式一下两个共振峰的灵敏度分别为 667 nm/RIU 和 698 nm/RIU,模式二下两个共振峰的灵敏度分别为 1079 nm/RIU 和 1121 nm/RIU。

综上所述,结构参数  $R$ 、 $g$  和  $t$  对结构的传感性能具有调节作用,通过优化  $R$ 、 $g$  和  $t$ ,可以得到很好的传感性能。

#### 4 差动传感特性

近年来,基于 MDM 波导的 Fano 传感研究已经取得了较大进展,但这些研究一般是通过折射率这个中间变量来得到共振波长与浓度之间的线性关系,仅仅分析了共振波长与折射率之间的线性关系,没有考虑温度、湿度等因素对空气折射率的影响,然而这些因素在实际应用过程中不容忽视。在测量过程中,一个干扰量的消除需要两个共振峰共同作用来进行差动相减处理<sup>[19]</sup>,故三个共振峰同时用于传感时便可有效地消除温度、湿度两种因素带来的误差。但共振峰并非越多越好,因为要产生更多共振峰需要额外添加结构或更改现有的结构,结构越复杂,越不易得到好的传感性能,故为消除温度、湿度的影响,选取三个共振峰进行消除效果更佳。

当单挡板 MDM 波导耦合圆盘级联结构的有效折射率发生变化时,便可以得到 4 个共振峰的偏移量,其中三个 Fano 共振峰的偏移量可以表示为

$$\Delta\lambda_i = k_i \Delta T + l_i \Delta c + m_i \Delta s, \quad (10)$$

式中: $k_i$ 、 $l_i$ 、 $m_i$  ( $i=1,2,3$ ) 分别为由温度、浓度和湿度变化引起的折射率变化对应的系数; $\Delta T$ 、 $\Delta c$ 、 $\Delta s$  分别为温度、空气组分及湿度的变化量。

表 1 单 Fano、多 Fano 的折射率测量值与真实值

Table 1 Measurement and true value of refractive index under single- or multiple-Fano

$n$	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.12	1.14	1.16	1.18	1.20
Multiple-Fano	1.0192	1.0395	1.0596	1.0797	1.0996	1.1206	1.1399	1.1599	1.1799	1.1996
Single-Fano	1.0263	1.0481	1.0525	1.0883	1.1026	1.1120	1.1356	1.1609	1.1892	1.2093

综上所述,通过差动的方式较好地消除了干扰量温度和湿度,得到了三个共振波长与折射率之间的线性关系,有效提高了传感精度。

#### 5 结 论

提出了一种单挡板 MDM 波导耦合圆盘级联结构,当有光照射在 MDM 波导结构上时,金属表面产生的 SPs 可突破衍射极限并在波导中进行传播。SPs 透过金属挡板,形成了较宽的连续态。当信号

由(10)式可得

$$A \cdot \Delta\lambda_1 + B \cdot \Delta\lambda_2 + C \cdot \Delta\lambda_3 = D \cdot \Delta c, \quad (11)$$

式中: $A = 1 + \frac{k_1 k_2 m_3}{k_1 k_3 m_2 - k_2 k_3 m_1} - \frac{k_2 m_1}{k_1 m_2 - k_2 m_1}$ ;  
 $B = \frac{k_1^2 m_3}{k_2 k_3 m_2 - k_1 k_3 m_1} - \frac{k_1 m_1}{k_1 m_2 - k_2 m_1}$ ;  $C = \frac{k_1}{k_3}$ ;  $D = l_1 + \frac{k_2 m_1 l_2 - k_1 m_1 l_2}{k_1 m_2 - k_2 m_1} - \frac{k_1^2 m_3 l_3 - k_1 k_2 m_1 l_3 - k_1^2 m_3 l_2}{k_1 k_3 m_2 - k_1 k_3 m_1}$ ;  
 $\Delta\lambda_i = \lambda_{i,1} - \lambda_{i,0}$  ( $i=1,2,3$ ), 其中  $\lambda_{i,0}$  为初始共振波长, $\lambda_{i,1}$  为条件发生变化后的共振波长; $\Delta c = c_{1,1} - c_{1,0}$ , 其中  $c_{1,0}$ 、 $c_{1,1}$  分别为变化前、后的浓度。(11)式整理可得

$$A \cdot \lambda_{1,1} + B \cdot \lambda_{2,1} + C \cdot \lambda_{3,1} = D \cdot c_{1,1} + Q, \quad (12)$$

式中  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $Q$  均为常数, $Q = A\lambda_{1,0} + B\lambda_{2,0} + C\lambda_{3,0} - Dc_{1,0}$ 。

当某一气体浓度发生改变时,只要得到当前三个共振峰的波长( $\lambda_{1,1}$ 、 $\lambda_{2,1}$ 、 $\lambda_{3,1}$ )便可以准确得到该气体当前的浓度对应的折射率( $n = Dc_{1,1}$ )。将  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $Q$  的具体数值代入(12)式可得

$$0.001078\lambda_{1,1} - 0.00043\lambda_{2,1} + 0.0005\lambda_{3,1} = n + 0.0106. \quad (13)$$

分别对多 Fano(三波长方案)和单 Fano 进行模拟数值计算,得到真实值  $n$  与相应的测量值,如表 1 所示。可以看出,多 Fano 的测量值明显要比单 Fano 的更接近真实值。通过 Origin Pro 软件线性拟合可知,多 Fano 得到的相关因子和标准差(0.99997和 0.00211)也明显优于单 Fano 的(0.982881和 0.04479)。

进入圆盘腔内时,所提结构会在计算范围内产生两种不同的模式,又因为双圆盘级联结构的分裂作用形成 4 个较窄的孤立态共振波谷,在近场作用下,与连续态耦合形成两种模式的 4 个 Fano 共振峰。Fano 共振对结构参数和环境折射率十分敏感,改变环境折射率会使 Fano 共振波长发生红移,可实现传感作用。通过调节结构参数  $R$ 、 $g$  和  $t$ ,定量分析了其传感性能,进而优化了其结构参数。提出了差动传感的方法,分析了折射率变化及误差的来源,详

细推导了消除误差的具体算法,有效解决了交叉敏感带来的问题。

## 参 考 文 献

- [1] Wen K H, Hu Y H, Chen L, *et al.* Single/dual Fano resonance based on plasmonic metal-dielectric-metal waveguide[J]. *Plasmonics*, 2016, 11(1): 315-321.
- [2] Fano U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts[J]. *Physical Review*, 1961, 124(6): 1866-1878.
- [3] Chen Y, Luo P, Tian Y N, *et al.* Fano resonance slow light characteristics of metal-dielectric-metal waveguide coupled ring cavity with metallic double-slit[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0924002. 陈颖, 罗佩, 田亚宁, 等. 含金属双缝的金属-电介质-金属波导耦合环形腔 Fano 共振慢光特性研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0924002.
- [4] Chen Y, Luo P, Liu X F, *et al.* Sensing performance analysis on Fano resonance of metallic double-baffle contained MDM waveguide coupled ring resonator[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 101: 273-278.
- [5] Klimov V V, Pavlov A A, Treshin I V, *et al.* Fano resonances in a photonic crystal covered with a perforated gold film and its application to bio-sensing[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(28): 285101.
- [6] Zhan S P, Peng Y Y, He Z H, *et al.* Tunable nanoplasmonic sensor based on the asymmetric degree of Fano resonance in MDM waveguide[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22428.
- [7] Zhan Y H, Lei D Y, Li X F, *et al.* Plasmonic Fano resonances in nanohole quadrumers for ultra-sensitive refractive index sensing[J]. *Nanoscale*, 2014, 6(9): 4705-4715.
- [8] Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(2): 83-91.
- [9] Chen Z, Yu L, Wang L L, *et al.* A refractive index nanosensor based on Fano resonance in the plasmonic waveguide system [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(16): 1695-1698.
- [10] Yang J H, Song X K, Chen Z, *et al.* Tunable multi-fano resonances in MDM-based side-coupled resonator system and its application in nanosensor[J]. *Plasmonics*, 2017, 12(6): 1665-1672.
- [11] Li Q, Wang T, Su Y K, *et al.* Coupled mode theory analysis of mode-splitting in coupled cavity system[J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8367-8382.
- [12] Yang Y R, Guan J F. Numerical study of plasmonic filter based on metal-insulator-metal waveguide[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(5): 057301. 杨韵茹, 关建飞. 基于金属-电介质-金属波导结构的等离子体滤波器的数值研究[J]. *物理学报*, 2016, 65(5): 057301.
- [13] Manolatu C, Khan M J, Fan S, *et al.* Coupling of modes analysis of resonant channel add-drop filters[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, 35(9): 1322-1331.
- [14] Suh W, Wang Z, Fan S H. Temporal coupled-mode theory and the presence of non-orthogonal modes in lossless multimode cavities[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(10): 1511-1518.
- [15] Bertolotti M. Waves and fields in optoelectronics[J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1985, 32(7): 1.
- [16] Wang R B. Research on Fano resonance effect and its sensing characteristics in MIM waveguide coupled resonator system[D]. Taiyuan: North University of China, 2017. 王瑞兵. MIM 波导耦合谐振腔系统中 Fano 共振效应及其传感特性研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [17] Becker J, Trügler A, Jakab A, *et al.* The optimal aspect ratio of gold nanorods for plasmonic bio-sensing[J]. *Plasmonics*, 2010, 5(2): 161-167.
- [18] Pang S F, Qu S X, Zhang Y Y, *et al.* Filter characteristic research of MIM waveguide based on L shaped resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0623001. 庞绍芳, 屈世显, 张永元, 等. 基于 L 形谐振腔 MIM 波导结构滤波特性的研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0623001.
- [19] Liu C, Wang Y, Zhao W Q, *et al.* High-resolution divided-aperture differential confocal sensing technique[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(9): 2225-2231. 刘超, 王允, 赵维谦, 等. 高分辨力分光瞳差动共聚焦传感技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(9): 2225-2231.