材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022101701

MIM 波导内嵌金属板结构 Fano 共振传感特性

覃祖彬，肖功利，周嗣童，蓝进京，孙堂友*，邓艳容

（桂林电子科技大学 广西精密导航技术与应用重点实验室，广西 桂林 541004）

摘　要： 基于法诺(Fano)共振传感特性，提出了一种金属-介质-金属(MIM)波导耦合矩形腔结构，目的是为了实现高灵敏度、高可靠性的折射率传感检测。通过耦合模理论和有限元数值模拟仿真，分析了矩形腔中有无内嵌金属板两种结构的 Fano 透射光谱特征，并且进一步优化了矩形腔内嵌金属板结构参数，最后阐明了结构参数对其传感特性的内在影响。结果表明，当入射光以 TM 模式入射到矩形谐振腔时，会形成两个 Fano 模式共振峰：第一种模式的品质因数(FOM)达 9.4×10^4，灵敏度为 700 nm/RIU；第二种模式的 FOM 达 8.4×10^3，灵敏度为 1 200 nm/RIU。研究结果表明此结构设计实现了双 Fano 峰检测，同时各个模式品质因数都很高，这为高性能微纳光学折射率传感器的设计提供了一定的理论参考依据。

关键词： 耦合模理论；MIM 波导；矩形腔；Fano 共振；折射率传感

中图分类号： TN256　**文章编号：** 1001－5868(2023)01－0076－05

Sensing Characteristics of Fano Resonance in MIM Waveguide with Embedded Metal Plate Structure

QIN Zubin，XIAO Gongli，ZHOU Sitong，LAN Jinjing，SUN Tangyou，DENG Yanrong

（Guangxi Key Lab. of Precision Navigation Technol. and Application，Guilin University of Electronic Technol.，Guilin 541004，CHN）

Abstract： In order to achieve highly sensitive and reliable sensing detection of refractive index，a metal-insulator-metal (MIM) waveguide coupled rectangular cavity structure is proposed based on sensing performance of Fano resonance in this paper. With the help of theoretical analysis of the coupling mode and the numerical simulation by the finite element method，the Fano transmission spectral characteristics of the rectangular cavity with and without embedded metal plate are analyzed. And the parameters of the designed rectangular cavity embedded metal plate structure are optimized further. Finally，the influence of structural parameters on its sensing characteristics is discussed. The results show that two Fano mode resonant peaks are formed after light is incident into the rectangular resonant cavity with TM mode. In the first mode，the FOM is 9.4×10^4 and the sensitivity is 700 nm/RIU；in the second mode，the FOM is 8.4×10^3 and the sensitivity is 1 200 nm/RIU. The results indicate that bimodal detection can be achieved in this structure and a high quality factor can be achieved also in each model，which provides a theoretical basis for the design of high performance micro/nano optical refractive index sensor.

Key words： coupled-mode theory；MIM waveguide；rectangular cavity；Fano resonance；refractive index sensing

收稿日期：2022－10－17.

基金项目：国家自然科学基金项目(61805053)；国家大学生创新创业训练计划资助项目(202010595018).

* **通信作者：**孙堂友

E-mail：suntangyou@guet.edu.cn.

0　引言

当金属表面电子频率和入射光子频率相匹配时，表面等离激元[1]（SPP）会被激发，它是沿金属-介质表面所形成的电磁波。SPP 突破了传统光学衍射的限制，从而可以在纳米尺度下形成特殊的光学性质，这对微纳光电子器件的高度集成化具有重要的指导意义[2]。法诺（Fano）共振主要是由金属纳米结构中亮与暗模式相互耦合形成的，与其他共振比较，Fano 共振线形状十分锐利，因此结构或环境的微小改变就会对 Fano 共振特性造成很大的影响，利用此特性能够实现高灵敏度的传感。此外，Fano 共振峰尖锐且不对称、线宽较窄，为传感器拥有高品质因数（FOM）提供了可能性[3]。金属-绝缘体-金属（MIM）作为激发态 SPP 的光波导结构，为金属纳米光学器件的实现奠定了良好的理论基础。基于 MIM 波导的 Fano 共振由于具有制作简单、易于集成、弯曲损耗低、传播距离远、灵敏度高，以及品质因数大等优点，被广泛地应用于各类光学传感器的设计中[4-6]。

近年来，基于 Fano 谐振的 MIM 波导结构被应用于多种光学器件，如传感器[13-14]、光开关[7]、滤波器[7-10]等。其中在传感器中的应用最为广泛，陈颖等[13]提出了一种由圆形开环谐振腔与双对称矩形短根波导构成的结构，该结构构成的传感器在形成 Fano 谐振时，谐振波长与线形均能通过结构几何参数进行调整。该传感器的灵敏度可达 1 180 nm/RIU，可产生最大光延迟约为 0.128 ps，在折射率传感器和慢光器件等方面具有潜在的应用前景。Chao 等[14]在 MIM 波导耦合 T 型腔的基础上开发了包含矩形腔波导耦合的 T 型腔，该型腔的共振谷传感灵敏度和品质因数都极高。Fano 共振波长可由类 H 型谐振腔的中轴长度独立调节，它的线型可由枝节宽度独立调节，从而使这一结构能够很容易地满足多种传感的需要。Fano 型谐振腔在纳米光学传感和光子集成器件中极具有潜在应用价值。Zhang 等[15]提出了一种矩形腔与倒 T 形腔相耦合而形成的结构，该结构产生了具有极高灵敏度与品质因数的 Fano 共振峰。这说明人们可通过调节结构参数从而对 Fano 共振峰进行调制，以满足检测时所需要的高灵敏度及高品质因数。上述器件在传感领域中展现出优异的传感特性，但由于对其性能要求越来越高，单纯依靠基本的 Fano 共振无法应对复杂的传感问题，因此，如何进一步改善 Fano 共振传感特性已成为新的研究热点。

本文提出了一种 MIM 波导耦合半椭圆金属板结构，它能够产生两个 Fano 共振峰，结果表明提出的结构拥有高灵敏度和高品质因数。采用耦合模理论（CMT）和有限元（FEM）模拟数值仿真方法，对结构参数进行了详细的分析，并阐明了结构参数对其传感特性的内在影响。仿真结果表明，当入射光以 TM 模式经过此结构传输后会形成两个模式 Fano 共振，矩形谐振腔的几何结构参数经过优化后，所得到的 FOM 分别为 9.4×10^4 和 8.4×10^3，相应的灵敏度为 700，1 200 nm/RIU。双 Fano 峰的探测进一步改善了折射率传感器的性能，这为微纳米光学传感器设计提供新思路。

1　模型建立及理论分析

1.1　模型建立

图 1 是 MIM 波导矩形腔内嵌半椭圆金属板结构示意图，其中，结构的深色部分为金属银（Ag），白色透明部分为空气（Air）。根据相关文献报道，波导宽度 $W=50$ nm 为最佳距离[11]。金属挡板的长度 $T=25$ nm，桥形共振腔的长度和宽度分别为 L，N，椭圆金属板短轴和长轴的长度分别为 a，b，其中参数 $N=240$ nm，$a=50$ nm 保持不变，耦合距离 $g=16$ nm。S_{1+} 和 S_{1-} 分别为输入端入射光和出射光的振幅；S_{2+} 和 S_{2-} 分别为输出端入射光和出射光的振幅。

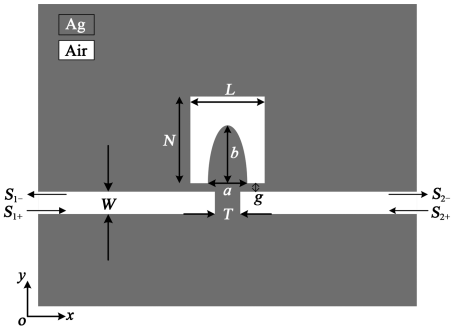


图 1　MIM 波导矩形腔耦合半椭圆金属板结构二维示意图

1.2　理论分析

金属银（Ag）的相对介电常数一般用德鲁德（Drude）模型来表示[12]：

$$\varepsilon_m(\omega)=\varepsilon_\infty-\omega_p^2/[\omega(\omega+j\gamma)] \tag{1}$$

其中，ω 为入射光的角频率；等离子体振荡频率 $\omega_p=1.38\times10^{16}$ rad/s；电子的振荡频率 $\gamma=2.73\times$

10^{13} Hz;无穷介电常数 $\varepsilon_\infty=3.7$。

驻波理论描述了波导谐振腔的等效长度与波长之间关系,其表达式[13]如下所示:

$$\lambda=\frac{2L_{\text{eff}}\text{Re}(n_{\text{eff}})}{m-l/\pi} \tag{2}$$

其中,L_{eff} 为波导谐振腔的等效长度,n_{eff} 为谐振腔的等效折射率,m 为驻波的波数,l 代表光相位的变化。

接下来,采用耦合模理论来分析波导共振的机理。光子只从输入端口入射到波导中,输出端口处没有入射光,因此 $S_{2+}=0$。矩形谐振腔的振幅 A 表示为

$$\text{d}A/\text{d}t=(\text{j}\omega_0-k_1-k_2)\cdot A+\sqrt{k_2}\,\text{e}^{\text{j}\theta}\cdot S_{1+} \tag{3}$$

其中,ω_0 表示共振波长,k_1 是矩形谐振腔内部损耗的损耗率,k_2 是光子能量耦合进入波导的损耗率,θ 是矩形共振腔和 MIM 波导之间耦合的系数相位。由此式可以导出

$$A=\frac{\sqrt{k_2}\,\text{e}^{\text{j}\theta}S_{1+}}{\text{j}(\omega-\omega_0)+k_1+k_2} \tag{4}$$

根据能量守恒定律可得

$$S_{2-}=S_{1+}-\sqrt{k_2}\,\text{e}^{-\text{j}\theta}A \tag{5}$$

其透过率可以表示为

$$T=\left|\frac{S_{2-}}{S_{1+}}\right|=\frac{(\omega-\omega_0)+k_1^2}{(\omega-\omega_0)^2+(k_1+k_2)^2} \tag{6}$$

由上式可知,当 $\omega=\omega_0$ 时,会发生共振,其矩形共振腔内会形成驻波,此时的透射率达到最小值:

$$T_{\min}=\frac{k_1^2}{(k_1+k_2)^2} \tag{7}$$

入射光波以 TM 模式从输入端口经过波导结构传播后,在波导介质与金属层交界面处将出现 SPP。在数值软件中建立了相应的 MIM 波导耦合半椭圆金属板结构的矩形谐振腔模型,仿真结果得到了两种模态下的 Fano 共振峰。谐振腔中传输光波透射谱如图 2 所示。图 2(a)与(b)是 MIM 矩形腔中有无内嵌入半椭圆金属板两种不同结构透射光谱的比较,从图中可以看出两种结构均存在着两个 Fano 共振峰。无内嵌金属板的矩形谐振腔结构会引起两个共振峰(图 2(a)),其中一个透射率偏低,另一个半峰全宽(FWHM)偏大,上述特性均会造成品质因数偏低,从而造成检测结果不可信。与此相比,内嵌半椭圆金属板的矩形谐振腔结构(图 2(b))由于内部较易发生 SPP 耦合,故而所生成的两个共振峰透射率都比较高且 FWHM 都比较小。在高透射率和窄 FWHM 的共同作用下,该结构同时拥有高灵敏度和高品质因数的特征,为双峰折射率传感器的探测提供了必要的可靠性。图 2(c)展示了两个共振峰及其附近位置(700,800,1 180,1 360 nm)的光透射率及其磁场密度的大小分布。与前面分析一致的是,内嵌半椭圆金属板的矩形谐振腔结构在 700 和 1 180 nm 处发生了 Fano 共振现象,形成了两个高透射率、尖锐且不对称的共振峰。此外,这两个共振峰处磁场在矩形腔内分布较为密集,这表明此时矩形腔内存在 SPP 耦合,使得大部分的 SPP 透射通过,从而形成了尖锐、不对称 Fano 共振光谱图。而在 800 和 1 360 nm 的位置处,磁场集中分布于波导的入射端,出射端处基本不存在磁场,所以这两处的光透射率 T 很低,几乎近似为 0。

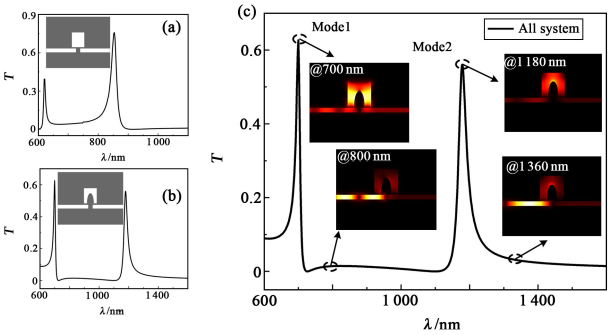


图 2 两种不同结构的 MIM 波导透射光谱对比图。(a) 矩形腔结构;(b) 矩形腔内嵌金属板结构;(c) Fano 共振透射光谱特性

2 结构优化与性能分析

Fano 共振峰的位置及其强度大小会随着矩形谐振腔几何结构参数的变化而有所改变,因此可以通过调节矩形谐振腔的几何尺寸得到最优的结果。灵敏度(S)这一物理量可用于衡量共振波长随腔内介质折射率改变而偏移的大小,它可以体现传感器对周围环境折射率的灵敏程度,计算表达式为[14]

$$S_\lambda=\frac{\text{d}\lambda}{\text{d}n} \tag{8}$$

其中,$\text{d}\lambda$ 是由折射率的变化引起共振波长变化量的大小,$\text{d}n$ 是折射率变化的大小。

FOM 是衡量折射率传感器性能的重要指标,FOM 的数值越大则表示传感器的传感性能越好,其表达式为

$$FOM=\max\left(\frac{\text{d}T/\text{d}n}{T}\right)=\max\left[\frac{S_\lambda(\text{d}T/\text{d}\lambda)}{T}\right] \tag{9}$$

其中，T 为透射系数。

2.1　结构参数 L 对性能的影响

在保持其他结构参数一致的前提下，对矩形共振腔的长度 L 设置步长为 10 nm 的间隔，从 220 nm 增加到 250 nm 进行参数扫描。不同 L 所对应的透射光谱如图 3 所示，可以清晰地发现当 L 增加时，第一个 Fano 共振峰（Mode 1）发生了明显的红移现象，但其 FWHM 和透射率的大小并未有大的改变，这说明了 Mode 1 的检测受无关参数的影响较小。此外，根据驻波理论也可以计算出，当谐振腔的边长发生变化时，共振波长也会随之变化，正好与透射谱红移的现象相吻合，增加了传感器检测的可信度。

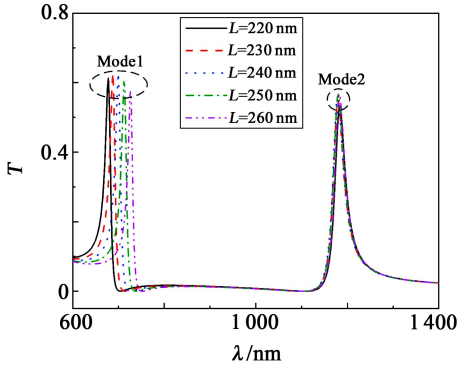


图 3　改变结构参数 L 后透射光谱的变化

2.2　结构参数 b 对性能的影响

接下来，在固定矩形边长 $L=240$ nm 时，将椭圆金属板的长轴 b 改变，其他参数保持不变。对 b 设置步长间隔为 10 nm，从 130 nm 增加到 180 nm 进行参数扫描，不同 b 所对应的透射光谱如图 4 所示。分析发现，当参数 b 增大后，矩形腔的有效面积将会变小，导致透射峰 Mode 1 和 Mode 2 均发生不同程度的红移，红移现象与驻波理论相吻合。此外，Mode 2 受参数 b 调控的范围更大，为可调谐的带通滤波器设计提供了一定的参考价值。

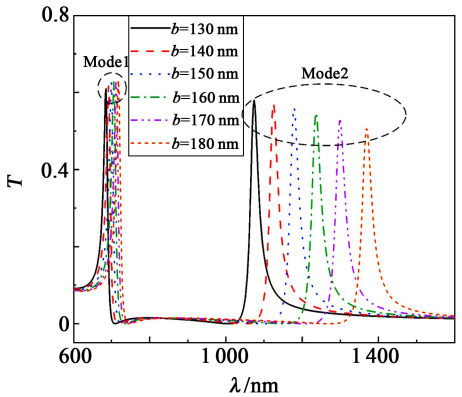
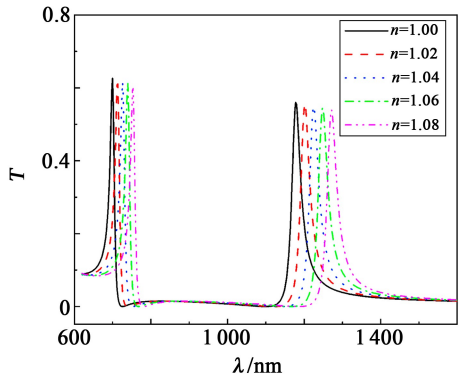


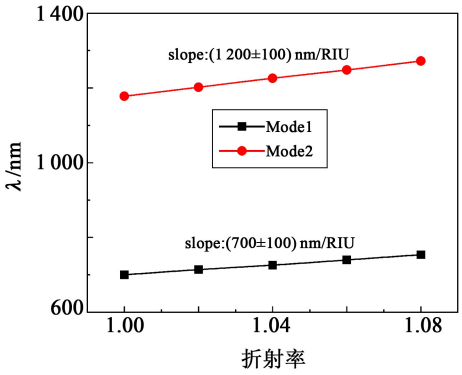
图 4　改变结构参数 b 后透射光谱的变化

2.3　环境折射率对特性的影响

如图 5(a)所示，在改变周围介质折射率情况下透射光谱中 Mode 1，Mode 2 都出现明显红移，符合本文设计双峰探测需求，使得探测结果更有效更可靠。其次，对传感器进行灵敏度计算，获得共振波长和折射率关系图，如图 5(b)所示。两个共振模式 Mode 1 和 Mode 2 的灵敏度分别为（700±100），（1 200±100）nm/RIU。



（a）在不同折射率条件下的透射光谱图



（b）折射率与共振波长的关系

图 5　在不同折射率条件下的透射光谱图及其与共振波长的关系

另外，通过公式计算了 FOM 的数值，两个模式的 FOM 最高分别可达 9.4×10^4 和 8.4×10^3，可见这两种共振峰都能表现出良好的传感性能。而且，与单共振峰传感结构相比，双峰同步探测结果可靠性得到了极大提高。

3　结论

本文以 MIM 波导矩形腔构造的 Fano 共振传感器为研究对象，通过在矩形谐振腔内嵌入一块半椭圆形金属板以及改变矩形谐振腔和金属挡板的几何结构参数等对折射率传感特性进行了研究。入射光从波导以 TM 模式入射到矩形谐振腔时，会形成两个

Fano模式共振峰。在矩形谐振腔边长 $L=240$ nm，金属椭圆挡板短轴 $a=50$ nm，长轴 $b=150$ nm，波导与谐振腔耦合距离 $g=16$ nm时，第一种模式FOM为 9.4×10^4，其灵敏度 $S=700$ nm/RIU；第二种模式FOM为 8.4×10^3，其灵敏度 $S=1\,200$ nm/RIU。这两种模式都表现出较好的传感特性，这为基于双Fano透射峰检测传感器的研究提供了一定的理论指导。

参考文献：

[1] Zayats A V, Smolyaninov I I, Maradudin A A, et al. Nano-optics of surface plasmon polaritons[J]. Physics Reports, 2005, 408(3/4): 131-314.

[2] Zheludev N I. What diffraction limit? [J]. Nature Materials, 2008, 7(6): 420-422.

[3] Miroshnichenko A E, Flach S, Kivshar Y S. Fano resonances in nanoscale structures[J]. Rev. of Modern Physics, 2010, 82(3): 2257.

[4] 王鸣宇，栾润青，苏　杨，等. 类H型腔耦合MIM波导的Fano共振及传感特性[J]. 激光与光电子学进展，2022，59(21)：203-209.
Wang Mingyu, Luan Runqing, Su Yang, et al. Fano resonance and sensing characteristics of MIM waveguide with H-type cavity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(21): 203-209.

[5] 陈　颖，许扬眉，高新贝，等. 含矩形腔的MIM波导耦合T型腔结构Fano共振传感特性研究[J]. 中国激光，2019，46(1)：332-338.
Chen Ying, Xu Yangmei, Gao Xinbei, et al. Fano resonance sensing characteristics of MIM waveguide coupled T-shaped cavity structure with rectangular cavity[J]. Chinese J. of Lasers, 2019, 46(1): 332-338.

[6] Chen J, Li J, Liu X, et al. Fano resonance in a MIM waveguide with double symmetric rectangular stubs and its sensing characteristics[J]. Opt. Communications, 2021, 482: 126563.

[7] Karimi Y, Kaatuzian H, Tooghi A, et al. All-optical plasmonic switches based on Fano resonance in an X-shaped resonator coupled to parallel stubs for telecommunication applications[J]. Optik, 2021, 243: 167424.

[8] Shuai Y, Zhao D, Tian Z, et al. Double-layer Fano resonance photonic crystal filters[J]. Opt. Express, 2013, 21(21): 24582-24589.

[9] Zhao W, Leng X, Jiang Y. Fano resonance in all-dielectric binary nanodisk array realizing optical filter with efficient linewidth tuning[J]. Opt. Express, 2015, 23(5): 6858-6866.

[10] Guo Y, Huo Y, Niu Q, et al. Band-stop filter based on tunable Fano resonance and electromagnetically induced transparency in metal-dielectric-metal waveguide coupling systems[J]. Physica Scripta, 2020, 96(1): 015507.

[11] Yan S, Zhang M, Zhao X, et al. Refractive index sensor based on a metal-insulator-metal waveguide coupled with a symmetric structure[J]. Sensors, 2017, 17(12): 2879.

[12] Smith N V. Classical generalization of the Drude formula for the optical conductivity[J]. Phys. Rev. B, 2001, 64(15): 155106.

[13] Chen Z, Chen J, Yu L, et al. Sharp trapped resonances by exciting the anti-symmetric waveguide mode in a metal-insulator-metal resonator[J]. Plasmonics, 2015, 10: 131-137.

[14] Chao C T C, Chau Y F C, Chiang H P. Multiple Fano resonance modes in an ultra-compact plasmonic waveguide-cavity system for sensing applications[J]. Results in Physics, 2021, 27: 104527.

[15] Zhang Y, Liu W, Li Z, et al. High-quality-factor multiple Fano resonances for refractive index sensing[J]. Opt. Lett., 2018, 43(8): 1842-1845.

作者简介：

覃祖彬(1998－)，男，硕士研究生，主要研究方向为光电子器件；

孙堂友(1987－)，男，博士，副教授，硕士生导师，主要研究方向为光电子器件以及忆阻器。