

doi: 10.3788/gzxb20164511.1113003

# 基于耦合 T 型空腔的多重法诺共振现象

安厚霖, 张冠茂, 胡南, 石悦, 王志爽

(兰州大学 信息科学与工程学院 现代通信技术研究所, 兰州 730000)

**摘 要:**提出由 T 型空腔和挡板组成的两种金属-电介质-金属(MIM)波导结构,分别为:正 T 型空腔结构和倒 T 型空腔结构,并应用有限元法系统地研究了该结构的透射特性.对于正 T 型空腔结构,仿真结果出现了双重法诺共振现象,并且共振波长可以通过改变 T 型空腔长度和高度进行调节.该结构有助于设计成敏感度达到 1 620 nm/RIU、品质因数为  $5.4 \times 10^4$  的纳米传感器.对于倒置 T 型空腔,在波导中产生了多重法诺共振现象,其敏感度可达 1 560 nm/RIU,品质因数为  $9.37 \times 10^4$ .该结构有望在光学集成回路,特别是纳米传感器、光束分路器方面具有广泛应用.

**关键词:**波导;表面等离子激元;法诺共振;T 型谐振腔;传输谱;品质因数;光学传感与传感器

中图分类号:O43

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)11-1113003-6

## Phenomenon of Multiple Fano Resonances Based on Coupled T-type Cavity

AN Hou-lin, ZHANG Guan-mao, HU Nan, SHI Yue, WANG Zhi-shuang

(Institute of Modern Communication Technology, School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Two Metal-Insulator-Metal (MIM) waveguide structures that consists of T-type cavity and baffle were proposed, and they are the positive T-type cavity structure and the inverted T-type cavity structure respectively. The transmission characteristics of this structure were calculated by using the Finite-Element Method(FEM). The simulation results show the double Fano resonances for the positive T-type cavity structure, and the resonant wavelength can be easily tuned by changing the length and the height of the T-type cavity. The structure would be helpful for designing the nano-sensor with a sensitivity of 1620 nm/RIU and the figure of merit of  $5.4 \times 10^4$ . By inverting the T-type cavity, multiple Fano resonances are observed in the waveguide with a sensitivity of 1560 nm/RIU and the figure of merit of  $9.37 \times 10^4$ . The waveguide structure may have wide applications in highly integrated optical circuits, especially for nano-sensor and spectral splitter.

**Key words:** Waveguide; Surface plasmon polariton; Fano resonance; T-type resonator; Transmission spectrum; Figure of merit; Optical sensing and sensors

**OCIS Codes:** 130.0130; 230.7370; 240.6680; 280.4788

## 0 引言

表面等离子激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)是金属表面的自由电子与入射光子相互作用形成的沿着金属与介质表面传输的电子疏密波,它在垂

直界面方向上以指数形式衰减,突破了传统光学上的光衍射极限<sup>[1]</sup>.基于金属-电介质-金属(Metal-Insulator-Metal, MIM)波导的 SPPs 器件有克服衍射限制、损耗少、结构简单等特点,所以它可以应用到光学集成回路,并且被设计成多种光电子器件,譬如:分

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(兰州大学)(No. lzujbky-2015-K7)资助

第一作者:安厚霖(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为表面等离子激元波导技术应用. Email: anhoulin@126.com

导师(通讯作者):张冠茂(1973-),男,副教授,博士,主要研究方向为光通信、光传感、微纳光子晶体以及光域表面等离子激元共振理论与应用. Email: zhanggm@lzu.edu.cn

收稿日期:2016-06-15;录用日期:2016-08-01

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

光器、滤波器、传感器、共振器<sup>[2-7]</sup>。

法诺共振是离散态能级(狭窄非辐射的暗模式)与连续态能带(宽广辐射的亮模式)之间相互干涉形成的<sup>[8-9]</sup>,与常见的共振器中对称洛伦兹线形不同的是:法诺共振是尖锐且非对称的线形<sup>[8]</sup>,利用它可以得到很高的品质因数(Figure of Merit, FOM)和敏感度(Sensitivity, S)因此,法诺共振在光学非线性、生物传感器、转换开关等领域的应用潜力巨大<sup>[9-11]</sup>。基于MIM波导的法诺共振系统有对称双边耦合腔结构<sup>[12]</sup>、对称双边凹槽结构<sup>[13]</sup>、单一圆环共振腔结构<sup>[14]</sup>、T型MIM共振结构<sup>[15]</sup>、眼型谐振腔<sup>[16]</sup>等,其中形成多重法诺共振的主要方法有叠加共振腔<sup>[17]</sup>、破坏结构对称性<sup>[13]</sup>。

本文设计了两种由挡板和T型空腔组成的MIM波导结构,实现单一腔在不同共振模式下的多重法诺共振。首先,将T型空腔正置于波导一侧,并运用有限元模拟并计算该结构的透射特性。然后,通过倒置T型空腔,新的法诺共振出现,并对其特性进行了研究,该研究有望在光学集成回路、光电子器件特别是纳米传感器、纳米光束分离器等具有广泛应用前景。

## 1 正T型空腔波导结构与计算方法

图1是本文提出的MIM波导二维平面结构示意图,该结构由MIM波导、挡板和T型空腔组成。T型空腔正置于MIM波导一侧且间距 $d=10\text{ nm}$ ,它的长度和高度分别为 $L=400\text{ nm}$ 、 $H=360\text{ nm}$ ,在波导中加入的挡板宽 $g=25\text{ nm}$ 。为了保证只有横磁基模(TM<sub>0</sub>)通过,T型空腔和MIM波导的宽度都被固定为 $W=50\text{ nm}$ <sup>[18]</sup>。灰色和白色部分分别为银和空气,空气的相对介电常量 $\epsilon_d=1$ ,银的相对介电常量采用常规Drude模型 $\epsilon_m = \epsilon_\infty - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\omega\gamma)$ ,其中 $\omega$ 是入射光在真空中的角频率,无限频率的介电常量 $\epsilon_\infty=3.7$ ,等离子体振荡频率 $\omega_p=9.1\text{ eV}$ ,阻尼系数 $\gamma=0.018\text{ eV}$ <sup>[19]</sup>。与有凹槽的波导一侧放置空腔的结构不同<sup>[20]</sup>,由于在该波导中加入金属挡板,波导中出现了反射,该反射扰乱了原本无挡板时波在波导中传播的振幅相位,因此出现了复杂的干涉现象,改变了无挡板时结构的透射谱形状,从而出现尖锐非对称的法诺线形<sup>[17,21]</sup>。为了探究其光学响应特性,本文建立了基于有限元方法的几何分析模型,设置了相关计算参量,并用完美匹配层包裹整个结构,面光源自输入端口从左向右平行入射,在输出端口监测输出,并采用较细化的任意三角形网格划分,然后运用COMSOL Multiphysics软件进行模拟分析,得出该结构的透射谱,透射率定义为

$$T = |H_{z_{out}}|^2 / |H_{z_{in}}|^2 \quad (1)$$

式中 $|H_{z_{out}}|$ 和 $|H_{z_{in}}|$ 分别定义为输出端口和输入端口的磁场幅值<sup>[22]</sup>。

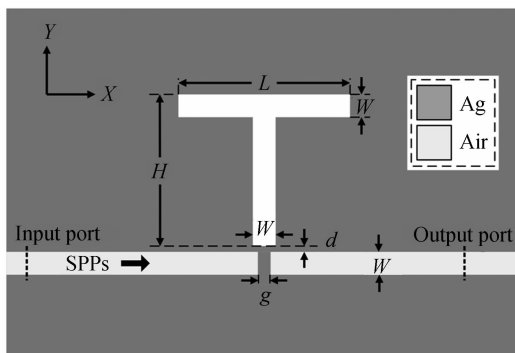


图1 MIM波导结构示意图

Fig. 1 The Configuration of the MIM waveguide structure

## 2 原理与性能分析

为了清晰地说明法诺共振的形成原理,分析图2的两种结构:一种是T型空腔位于MIM波导一侧而无挡板,另一种是挡板位于MIM波导中而无T型空腔。图中三角实线对应MIM波导中只有挡板结构的连续透射谱;星实线对应T型空腔位于MIM波导一侧结构的间断狭窄透射谱,该透射谱在波长为743 nm和1 665 nm处损耗大,在波长为700~800 nm和1 600~1 800 nm处,存在类似洛伦兹曲线的对称线形。圆实线是完整结构(挡板和T型空腔都存在)的透射谱,在共振波长735 nm和1 649 nm处,存在两个从峰值快速下降到波谷的尖锐非对称线形,这种由宽广连续状态(三角实线)和狭窄间断状态(星实线)相互作用形成的现象称为法诺共振,两个法诺共振的峰值分别约为0.69和0.30。

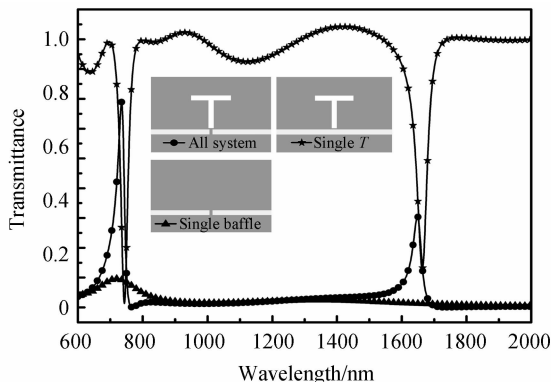


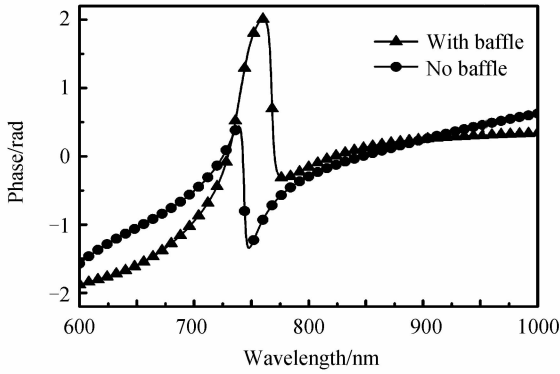
图2 三种波导结构的透射谱

Fig. 2 Transmission spectra with three kinds of structures

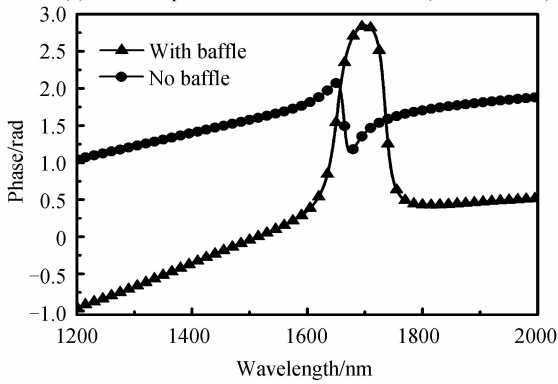
### 2.1 原理

在只有T型空腔无挡板的波导结构中,SPPs沿波导传输并耦合进入T型空腔,其耦合相位分布为图3(a)(b)圆实线,对应的透射谱为图2星实线。但在波导结构中加入挡板后,SPPs不能直接沿波导传输,并在挡板处出现了反射波,该反射波与沿波导传输的波形成干涉,使得波长在700~800 nm和1 600~1 800 nm处的耦合相位发生了明显改变(三角实线),因此,透射

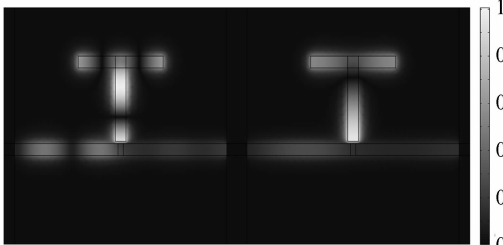
谱在波长为 735 nm 和 1 649 nm 处出现了双重法诺共振<sup>[9]</sup>,分别定义为左侧法诺共振(Left Fano Resonance, LFR)和右侧法诺共振(Right Fano Resonance, RFR).图 3(c)为 LFR 和 RFR 在共振波长处的  $|H_z|^2$  分布, SPPs 在波导结构中的能量流动可以详细观察到,其共振能量主要集中在 T 型空腔中,并且大部分 SPPs 可以通过波导传输. LFR 是由高阶模式激发产生.



(a) Phase response with baffle or no baffle(600~1000nm)



(b) Phase response with baffle or no baffle(1200~2000nm)



(c)  $|H_z|^2$  field distribution(735nm,1649nm)

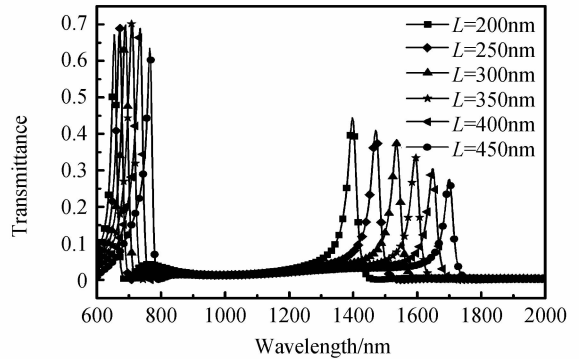
图 3 两种结构的相位响应及  $|H_z|^2$  分布

Fig. 3 The phase response with two kinds of structures and the  $|H_z|^2$  distribution

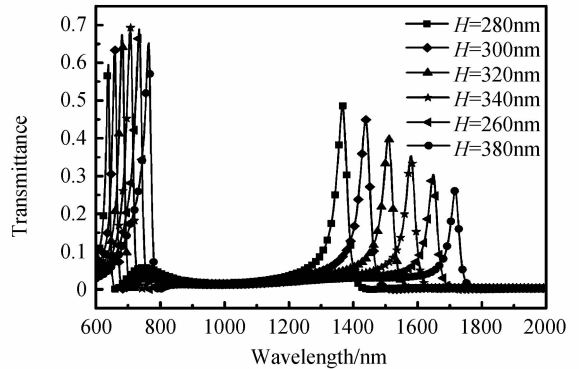
### 2.2 结构参量影响分析

MIM 波导结构的传输特性会受到结构参数的影响.为了研究 T 型空腔结构对波导传输特性的影响,把 T 型空腔看作是由横腔和竖腔组合而成.首先,竖腔长度固定为 360 nm,改变横腔的长度从 200 nm 到 450 nm (间隔 50 nm),计算不同横腔长度的透射谱如图 4(a).然后固定横腔为 400 nm,改变竖腔的长度从 280 nm 到 380 nm(间隔 20 nm),计算不同竖腔长度的透射谱如图 4(b).从图 4 中发现两个法诺共振峰值会随着横

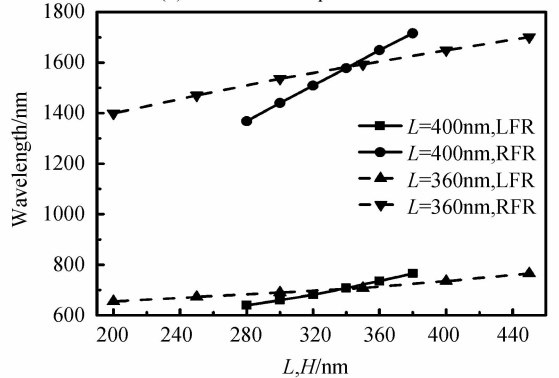
腔及竖腔长度的增加而降低,这可能是由于结构内部损耗变化引起的<sup>[17]</sup>.图 4(c)为两个法诺共振波长与横腔及竖腔长度之间的变化关系,可以观察到随着两腔长度的增加,两个法诺共振波长都会单调红移,这是由于空腔结构参数的改变使法诺共振中狭窄暗模式发生变化引起的<sup>[24]</sup>.而且,从图中实线的斜率高于虚线的斜率可知,法诺共振的峰值波长对竖腔长度的敏感程度高于其对横腔长度的敏感程度.综上所述,该结构既可以通过改变竖腔长度显著调节两个法诺共振波长,也可以通过改变横腔长度细微调节两个法诺共振波长.该结构在纳米传感器调节方面有应用前景.



(a) Transmission spectra for different L



(b) Transmission spectra for different H



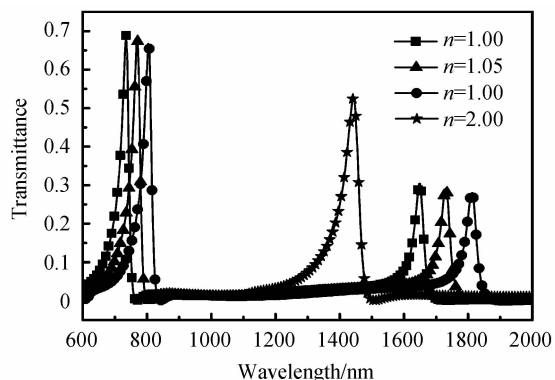
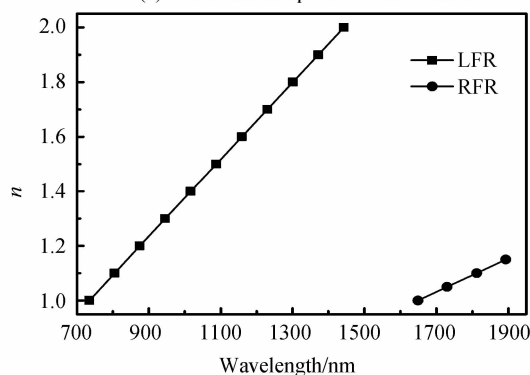
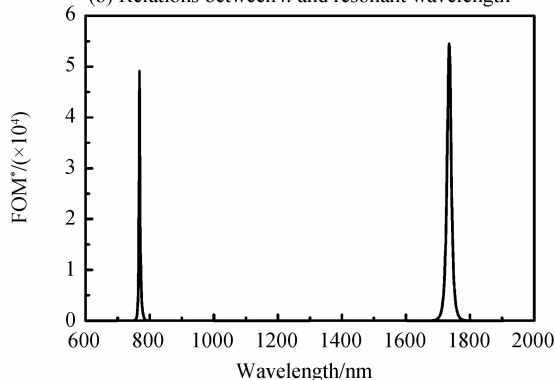
(c) Relations between  $L, H$  and the resonant wavelength

图 4 不同 T 型空腔结构参数的波导透射谱及相互关系  
Fig. 4 Transmission spectra for different parameter of the cavity and relations each other

### 2.3 介质折射率及性能分析

为研究介质折射率对波导传输特性的影响,计算了不同介质折射率时的透射谱,固定 T 型空腔长度为

400 nm、高度为 360 nm,并将介质折射率从 1.00 增加到 1.10(间隔为 0.05).从图 5(a)可知,MIM 波导结构的透射特性与介质折射率有关,其中心波长会随着介质折射率的增加而单调红移.图中星实线是介质折射率为 2.00 且波长在 1 100~2 000 nm 处的透射谱,该透射谱中只存在 LFR,且其线形与之前相比并未发生明显改变.同时,图 5(b)显示出法诺共振波长与介质折射率成线性关系,且从矩形实线可知,在介质折射率  $n$  从 1.00~2.00(间隔 0.1)的变化过程中,它与 LFR 共振波长之间的线性关系始终成立.综上所述,该波导结构在利用 LFR 时,适用折射率为 1.00~2.00 的介质,该特性为纳米传感器的相关应用提供了可能.

(a) Transmission spectra for different  $n$ (b) Relations between  $n$  and resonant wavelength(c)  $FOM^*$  at different wavelength图 5 折射率与结构之间关系及  $FOM^*$ Fig. 5 Relation between  $n$  and the structure,  $FOM^*$ 

敏感度和品质因数是评估波导传感器结构的两个重要参量,定义为

$$S = d\lambda / dn(\lambda) \quad (2)$$

$$FOM^* = |dT(\lambda) / (dn(\lambda)T(\lambda))| \quad (3)$$

$$FOM = \text{Max}(FOM^*) \quad (4)$$

式(2)中, $\lambda$ 是波长, $S$ 反映的是介质折射率每变化一个单位,共振波长的移动值.因此,计算出 LFR、RFR 的敏感度分别是 700 nm/RIU、1 620 nm/RIU.式(3)中, $dT(\lambda)$ 是固定波长的透射率, $dT(\lambda)/dn(\lambda)$ 是当波长固定时, $n$ 改变一个单位,透射率的变化值<sup>[23-24]</sup>.根据上述关系,可计算出不同波长下的  $FOM^*$  值,而 FOM 则是  $FOM^*$  随波长变化曲线中的最大值.对本结构而言,FOM 为图 5(c)中曲线的两个峰值,当波长为 768 nm 时,LFR 的 FOM 为  $4.9 \times 10^4$ ,当波长为 1 735 nm 时,RFR 的 FOM 为  $5.4 \times 10^4$ .基于式(3)和式(4)可知,由介质折射率变化引起的透射率急剧改变和其超低的透射率使 FOM 比较高.对于该结构中高阶模式下 LFR 的品质因数和低阶模式下 RFR 的敏感度和品质因数比很多波导结构高,例如:单侧环形谐振腔<sup>[14]</sup>、凹槽与短棒谐振器<sup>[19]</sup>、单侧双谐振腔<sup>[24]</sup>、矩形环波导<sup>[25]</sup>,见表 1.

表 1 本文结构对应的敏感度及品质因数与其他文献的对比

Table 1 Comparison of  $S$  and FOM between this paper and other references

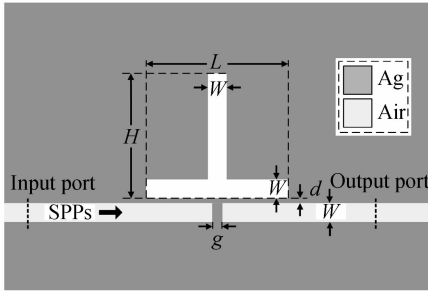
Structure	$S/(\text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1})$	FOM	References
T-type resonator(LFR)	700	$4.9 \times 10^4$	\
T-type resonator(RFR)	1 620	$5.4 \times 10^4$	\
Side-coupled ring cavity-	1 160	3 200	Ref. [14]
A groove and a stub resonator	1 260	$2.3 \times 10^4$	Ref. [19]
Side-coupled with a pair of resonators	900	500	Ref. [24]
A rectangular ring waveguide	1 300	6 838	Ref. [25]

### 3 倒 T 型空腔波导结构

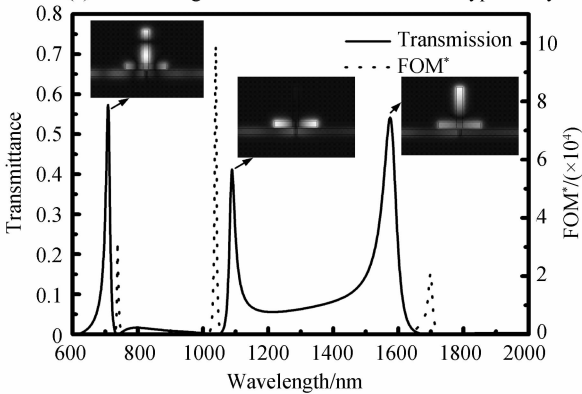
#### 3.1 结构与性能分析

倒置 T 型空腔并使它与 MIM 波导一侧的间距  $d=15$  nm,T 型空腔的长度和高度分别为  $L=350$  nm、 $H=360$  nm,在波导中加入宽度  $g=30$  nm 挡板,其他结构参量保持不变如图 6(a).使用有限元方法模拟该结构的透射谱如图 6(b)实线,可以发现,除了在波长 709 nm 和 1575 nm 处,出现了已经在上文研究过的 LFR 和 RFR,在波长 1 089 nm 处出现了新的法诺共振(New Fano Resonance, NFR),并且 RFR 的峰值明显升高,这是因为倒置的 T 型空腔与波导之间耦合面积增加,法诺共振现象更加明显,从而导致一种只与 T 型空腔中横腔产生共振的共振模式出现,这种法诺共振模式已经被先前的文献用耦合模理论详细论证过<sup>[16]</sup>.同时图 6(b)也展示了在三个法诺共振波长(709 nm、

1 089 nm、1 575 nm) 处的  $|H_z|^2$  分布. 由图中分布可知在共振波长处, 大部分的 SPPs 能通过波导结构传输. 使用上述同样的方法计算出 LFR、NFR、RFR 的敏感度分别为: 660 nm/RIU、1 060 nm/RIU、1 560 nm/RIU. 图 6(b) 虚线为  $FOM^*$  在不同波长下的值, 在波长 738 nm、1 090 nm、1 699 nm 处, LFR、NFR、RFR 的 FOM 分别为:  $3.18 \times 10^4$ 、 $9.37 \times 10^4$ 、 $2.1 \times 10^4$ , 其中最大值比前述结构的品质因数还要高.



(a) MIM waveguide structure with inverted T-type cavity



(b) Transmission spectra of the structure,  $FOM^*$ ,  $|H_z|^2$  at resonant wavelength

图 6 倒 T 型空腔波导结构与其仿真分析图

Fig. 6 The waveguide structure with inverted T-type cavity and its simulated analysis

### 3.2 结构参量影响分析

研究倒置 T 型空腔结构对波导传输特性的影响. 首先, 给出横腔长度固定为 350 nm, 竖腔长度从 360 nm 到 320 nm (间隔 20 nm) 变化时的结构透射谱, 如图 7, 很明显 LFR 和 RFR 会随着竖腔长度的增加而单调红移, 而且 RFR 移动更加快速, 这也符合上述得出的结论. 但是, NFR 保持在固定的共振波长, 这是因为横腔长度没有改变, 这也说明 NFR 是波导只与横腔形成的法诺共振 (与竖腔无关). 然后, 给出竖腔长度固定为 320 nm, 横腔长度从 350 nm 到 390 nm (间隔 20 nm) 变化时的结构透射谱. 如图 7, 这三种模式的法诺共振都会随着横腔 L 的增加而单调红移. 但是, NFR 移动最快, 其次是 RFR, 最后是 LFR. 这种特性有可能可以运用到纳米光束分路器当中.

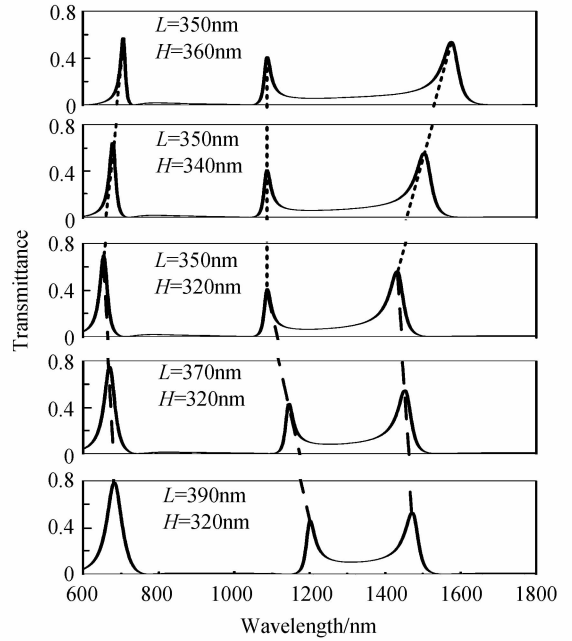


图 7 结构参量对倒 T 型空腔波导传输的影响

Fig. 7 The influences of different parameter on transmission spectra

## 4 结论

提出了两种由挡板和 T 型空腔组成的 MIM 波导结构. 有限元仿真分析结果表明, 对于正 T 型空腔结构而言, 在不同共振模式下会形成双重法诺共振, 并且两个共振波长可以通过改变 T 型空腔的长度和高度进行显著或细微调节. 根据理论计算, 该结构敏感度最高为 1 620 nm/RIU, 品质因数为  $5.4 \times 10^4$ . 对于倒 T 型空腔结构而言, 可以观察到多重法诺共振, 并且品质因数最高可达到  $9.37 \times 10^4$ . 该型波导结构可以在光学集成回路, 尤其在纳米传感器、纳米光束分路器等器件设计方面有着比较重要的应用.

### 参考文献

- [1] LUO Xian-gang, YAN Lian-shan. Surface plasmon polaritons and its applications [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(2): 590-595.
- [2] XU Ting, WU Yi-kui, LUO Xian-gang, et al. Plasmonic nanoresonators for high-resolution colour filtering and spectral imaging. [J]. *Nature Communications*, 2010, 1(5):118-124.
- [3] CUI Dan-feng, XIE Cheng-feng, LIU Yao-ying, et al. Research on coupled resonator induced transparency in fourth-order microring resonator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(5): 0523002. 崔丹凤, 谢成峰, 刘耀英, 等. 四环谐振腔结构中耦合诱导透明特性研究 [J]. *光子学报*, 2014, 43(5):0523002.
- [4] VERONIS G, FAN Shan-hui. Bends and splitters in metal-dielectric-metal subwavelength plasmonic waveguides [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(13): 131102.

- [5] MOHARRAMI F, ABRISHAMIAN M S. Plasmonic multi-channel filters with separately tunable pass-bands[J]. *Journal of Optics*, 2013, **15**(15): 536-544.
- [6] HU Fei-fei, YI Hua-xiang, ZHOU Zhi-ping. Wavelength demultiplexing structure based on arrayed plasmonic slot cavities. [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(8): 1500-1502.
- [7] CHEN Jia-yin, LIU Guo-jun, WANG Jiang-an. Analysis of spp model theory and simulation in MIM structure[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(6): 737-741.
- [8] LUKYANCHUK B, ZHELUDEV N I, MAIRE S A, *et al.* The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials[J]. *Nature Materials*, 2010, **9**(9): 707-715.
- [9] MIROSHNICHENKO A E, FLACH S, KIVSHAR Y S. Fano resonances in nanoscale structures [J]. *Review of Modern Physics*, 2009, **82**(3): 2257-2298.
- [10] VERELLEN N, SONNEFRAUD Y, SOBHANI H, *et al.* Fano resonances in individual coherent plasmonic nanocavities [J]. *Nano Letters*, 2009, **9**(4): 1663-1667.
- [11] CHEN Jian-jun, LI Zhi, ZHANG Xiang, *et al.* Submicron bidirectional all-optical plasmonic switches [J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**(3): 01451.
- [12] WEN Kun-hua, HU Yi-hua, CHEN Li, *et al.* Fano resonance with ultra-high figure of merits based on plasmonic metal-insulator-metal waveguide [J]. *Plasmonics*, 2014, **10**(1): 27-32.
- [13] CHEN Zhao, YU Li. multiple fano resonances based on different waveguide modes in a symmetry breaking plasmonic system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, **6**(6): 1-8.
- [14] CHEN Zhao, YU Li, WANG Lu-lu, *et al.* Sharp asymmetric line shapes in a plasmonic waveguide system and its application in nanosensor [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, **33**(6): 3250-3253.
- [15] SHANG Xiong-jun, LI Xiao-fei, WANG Ling-ing, *et al.* Realizing fano-like resonance in a one terminal closed T-shaped waveguide[J]. *Physics of Condensed Matter*, 2015, **88**(6): 1-5.
- [16] LOU Xiao-wei, CUI Jin-jiang, DONG Ning-ning, *et al.* Analysis of sharpness fano resonance line based on eye-like resonator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(1): 0113002.
- 娄小伟, 崔锦江, 董宁宁, 等. 基于眼型谐振腔的 Fano 谐振曲线尖锐度的分析[J]. *光子学报*, 2015, **44**(1): 0113002.
- [17] CHEN Zhao, SONG Xiao-kang, DUAN Gao-yan, *et al.* Multiple fano resonances control in MIM side-coupled cavities systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(3): 1-10.
- [18] KEKATPURE R D, HRYCIW A C, BARNAD E S, *et al.* Solving dielectric and plasmonic waveguide dispersion relations on a pocket calculator[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(26): 24112-24129.
- [19] CHEN Zhao, YU Li, WANG Lu-lu, *et al.* A refractive index nanosensor based on fano resonance in the plasmonic waveguide system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(16): 1-3.
- [20] WEN Kun-hua, HU Yi-hua, CHEN Li, *et al.* Single/Dual fano resonance based on plasmonic metal-dielectric-metal waveguide[J]. *Plasmonics*, 2016, **11**: 315-321.
- [21] FAN Shan-hui. Sharp asymmetric line shapes in side-coupled waveguide-cavity systems [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **80**(6): 908-910.
- [22] QI Ji-wei, CHEN Zong-qiang, CHEN Jing, *et al.* Independently tunable double fano resonances in asymmetric MIM waveguide structure. [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(12): 14688-14695.
- [23] BECKER J, TRUGLER A, JAKAB A, *et al.* The optimal aspect ratio of gold nanorods for plasmonic bio-sensing[J]. *Plasmonics*, 2010, **5**(2): 161-167.
- [24] LU Hua, LIU Xue-ming, MAO Dong, *et al.* Plasmonic nanosensor based on fano resonance in waveguide-coupled resonators[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(18): 3780-3782.
- [25] CHEN Zhao, CUI Lu-na, SONG Xiao-kang, *et al.* High sensitivity plasmonic sensing based on Fano interference in a rectangular ring waveguide [J]. *Optics Communications*, 2015, **340**(340): 1-4.