

耦合内嵌银条圆盘腔的金属-介质-金属 弯曲波导滤波特性

陈颖*, 谢进朝, 曹景刚, 高新贝, 许扬眉

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

摘要 基于表面等离子激元的传输及耦合特性,设计了一种耦合内嵌银条圆盘腔的金属-介质-金属弯曲波导滤波器结构。并应用有限元法对该结构的光谱特性及滤波特性进行了分析。结果表明,内嵌的银条打破了结构的对称性,实现了双模式共振效应,且该结构由于具有双边耦合效应,获得了比单边耦合更高的耦合效率,透射谱中出现了两个明显的阻带,获得了很好的双频窄带滤波功能,相比已报道的同类滤波器得到了更高的品质因子;改变圆盘谐振腔半径或腔内介质折射率,可实现滤波波长的近似线性调节。

关键词 表面光学; 表面等离子激元; 有限元法; 圆盘谐振腔; 耦合效应; 滤波器

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0805005

Filtering Characteristics of Metal-Insulator-Metal Curved Waveguide Coupled with Embedded-Silver-Bar Disk Cavity

Chen Ying*, Xie Jinchao, Cao Jinggang, Gao Xinbei, Xu Yangmei

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

Abstract This study presents the design of a metal-insulator-metal curved waveguide filter coupled with an embedded-silver-bar disk cavity, which is based on the transmission and coupling characteristics of surface plasmon polaritons. Herein, the spectral and filtering characteristics of the proposed structure are analyzed via the finite element method. The results indicate that the dual-mode resonance effect is achieved because the silver bars embedded into the disk cavity destroy the structural symmetry. In addition, the structure possesses the bilateral coupling effect, which makes the coupling efficiency higher than that for single-sided coupling. There exist two distinct forbidden bands in the transmission spectrum and the good dual-band narrowband filtering function is obtained. Furthermore, a quality factor higher than those of the previously reported filters is achieved. The wavelength of such a filter can be approximately linearly adjusted by varying the radius of disk cavity or the refractive index of the medium in the cavity.

Key words optics at surfaces; surface plasmon; finite element method; disk resonant cavity; coupling effect; filter

OCIS codes 240.6680; 230.7370; 230.4555; 350.2460

1 引 言

表面等离子激元(SPPs)是由入射光子与金属表面自由电子相互作用产生,局域在金属-电介质界面传播的一种非辐射电磁模式,其振幅在垂直于金

属界面向两侧呈指数衰减^[1]。SPPs 能将电磁场能量集中在亚波长尺度,打破了传统光学器件的衍射极限^[2]。因此,SPPs 广泛应用于亚波长级别对光的传输和控制,实现亚波长光学器件的集成^[3-5]。

在亚波长光学器件中,滤波器是通信过程中

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2019-01-07; 录用日期: 2019-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(61201112,61475133)、河北省自然科学基金(F2016203188,F2016203245)、中国博士后基金(2018M630279)、河北省博士后择优资助(D2018003028)、河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2018243)、中国国家留学基金(201808130004)

* E-mail: chenying@ysu.edu.cn

不可或缺的器件^[6-7]。基于 SPPs 的金属-介质-金属(MIM)波导与其他波导结构相比能产生超高强度的电磁模式,使光信号在传输中有较低的弯曲辐射损耗^[8]。因此,研究者设计了多种基于 MIM 型波导的等离子体滤波器,包括齿形滤波器^[9]、矩形腔滤波器^[10]、环形腔滤波器^[11]及波分复用滤波器结构^[12]等。但目前报道的 MIM 型波导的 SPPs 滤波器半峰全宽多为 20 nm 量级以上,分辨率不高,需要进一步提高。例如,庞绍芳等^[13]在矩形谐振腔基础上设计了 L 型谐振腔结构的滤波器,虽相比前者获得了更好的滤波特性和品质因子,但 1170 nm 共振波长处的半峰全宽为 48 nm。Wang 等^[14]设计的方形环横腔结构,实现了多模式带阻滤波器,但半峰全宽均大于 20 nm。因此,为实现更好的滤波效果和选频特性,如何在 SPPs 滤波器中实现更窄的半峰全宽和多模式共振,获得更高的分辨率,实现更好的选频,还需开展进一步的研究工作。

基于此,本文提出了一种由直角波导和内嵌银条的圆盘腔组成的等离子体弯曲波导带阻滤波器。利用添加完美匹配层吸收边界的有限元法(FEM)研究了其滤波特性和电磁场分布。数值模拟结果表明,该结构的滤波特性强烈地依赖于圆盘腔的半径和银条的长度。同时,该滤波器结构实现的双边耦合效应产生了更强烈的共振作用,通过调节圆盘腔内介质折射率可调控滤波波长,最终实现了带宽更窄、分辨率更高的双频可调谐带阻滤波。

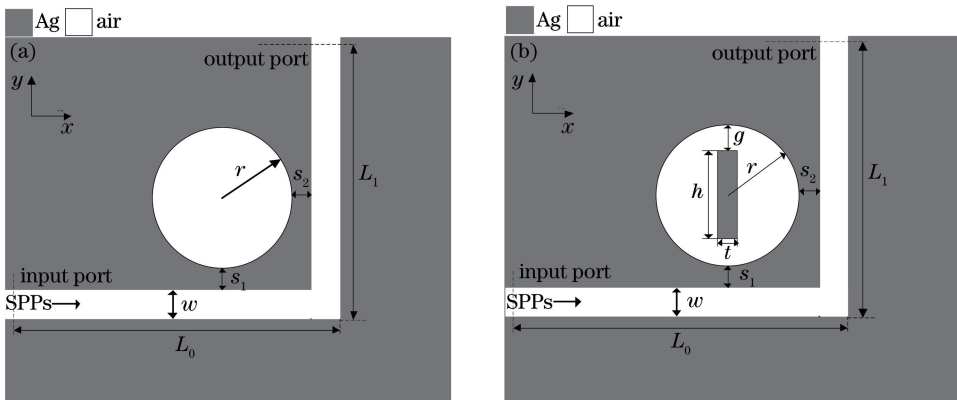


图 1 等离子体弯曲波导结构示意图。(a)圆盘腔耦合弯曲波导结构;(b)内嵌银条的圆盘腔耦合波导结构

Fig. 1 Structural diagrams of plasmonic curve waveguides. (a) Disk cavity coupled curve waveguide; (b) embedded-silver-bar disk cavity coupled curve waveguide

采用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 模拟电磁波与金属的相互作用,分析计算了图 1 中

2 结构设计与理论分析

2.1 结构模型的建立

构建的等离子体弯曲波导滤波器结构示意图如图 1 所示,图 1(a)结构由一两端开口的直角 MIM 波导耦合圆盘腔组成,图 1(b)为内嵌银条的圆盘腔耦合直角 MIM 波导结构。对于直角结构带来的损耗,由于器件结构非常紧凑,其对输出端口的影响很小^[15]。采用银作为金属材料,电介质采用空气的主要原因是其相对介电常量 $\epsilon_d = 1$,便于模拟计算。但从实验制备和实用角度来说,选 SiO_2 为电介质材料与选空气为电介质材料得到的现象几乎一致。由于金属介电常数在红外光波段存在色散以及其内在的欧姆热损耗,为准确描述金属银的介电常数,采用 Drude 模型 $\epsilon_m = \epsilon_\infty - \omega_p^2 / (\omega + j\gamma)$,其中 $\epsilon_\infty = 3.7$ 为无限大角频率处金属的介电常数; $\omega_p = 1.38 \times 10^{16}$ Hz 为等离子体共振频率; $\gamma = 2.73 \times 10^{13}$ Hz 为阻尼衰减频率; ω 为入射电磁波角频率。当波导宽度 $w < \lambda/2$ (λ 为波长)时,MIM 波导中只存在 SSPs 模式;当波导宽度远小于入射波长时,波导中仅有横磁(TM)基模。因此,当 TM_0 模式波入射波导时,激发的 SPPs 模式沿波导传播,其色散关系为^[16]

$$\epsilon_d \sqrt{\beta_{\text{spp}}^2 - \epsilon_m k_0^2} + \epsilon_m \sqrt{\beta_{\text{spp}}^2 - \epsilon_d k_0^2} \cdot \tanh(w \sqrt{\beta_{\text{spp}}^2 - \epsilon_d k_0^2} / 2) = 0, \quad (1)$$

式中: ϵ_d 和 ϵ_m 分别为介质与金属的介电常数; $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为波导中传播的电磁波波矢; w 为波导宽度; β_{spp} 为传播常量。波导的有效折射率 $n_{\text{eff}} = \beta_{\text{spp}} / k_0$ 。

所示 MIM 结构的传输特性。图 1 结构分别为圆盘腔耦合弯曲波导结构和内嵌银条圆盘腔耦合波导结

构(后文中分别简称为结构 1 和结构 2)。计算过程中,入射波导和出射波导的长度 L_0 和 L_1 均固定为 1000 nm,宽度 w 固定为 100 nm,用于激发和传输 SPPs 波,其对结构的谐振影响并不明显。圆盘腔与传输波导两边的耦合间距及其半径分别用 s_1 、 s_2 和 r 表示,圆盘腔内嵌银条的长与宽分别为 h 和 t ,银条顶端到圆盘顶端的距离为 g 。当基本的 TM 模式波入射波导时,激发的 SPPs 模式沿波导传播。用透射率描述结构的滤波特性,透射率 T 定义为输出端口处的输出功率 P_{out} 与输入端口处的输入功率 P_{in} 之比,即 $T = P_{out}/P_{in}$ 。

2.2 理论分析

当 TM 波沿着入射波导射入结构 1 时,激发的 SPPs 沿波导传输遇到纳米圆盘腔时,部分能量将会被耦合到腔中,如果入射波长满足圆盘腔的谐振条件,纳米圆盘腔中会形成稳定的驻波模式。纳米圆盘腔的共振条件可表示为^[17]

$$k_d \frac{H_i^{(1)'}(K_m r)}{H_i^{(1)}(K_m r)} = k_m \frac{J_i'(K_d r)}{J_i(K_d r)}, \quad (2)$$

式中: $k_m = k_0 n_m$, $k_d = k_0 n_d$,其中 k_m 和 k_d 分别为周围金属和圆形介质中的波数, n_m 和 n_d 分别为金属和介质中的折射率; J_i 与 J_i' 分别为第一类 i 阶贝塞尔函数及其微商; $H_i^{(1)}$ 和 $H_i^{(1)'}$ 分别为第一类 i 阶汉开尔函数及其微商。由(2)式可知,谐振波长由圆盘腔的半径和折射率决定。

图 2(a) 所示为 $r = 200$ nm, $s_{1,2} = 20$ nm 时 COMSOL 仿真计算得到的 TM 波经过结构 1 的透射光谱(实线),以及无圆盘腔结构时的透射谱线(虚线)。可以看出,相比无圆盘腔结构的透射谱线,结构 1 在波长 805 nm 处出现一个明显的透射波谷。为深入分析上述现象的产生机理,计算了波长 $\lambda = 805$ nm 时结构 1 对应的稳态电场强度 E_z 分布,如图 2(b) 所示。可以明显看出,电磁波在纳米圆盘腔内发生共振,形成稳定的驻波模式,驻波模式使能量束缚在腔内,不能透射出去,因此出现了透射波谷,其对应的半峰全宽为 10 nm,阻带带宽非常窄,较好地实现了窄带带阻滤波器的功效。

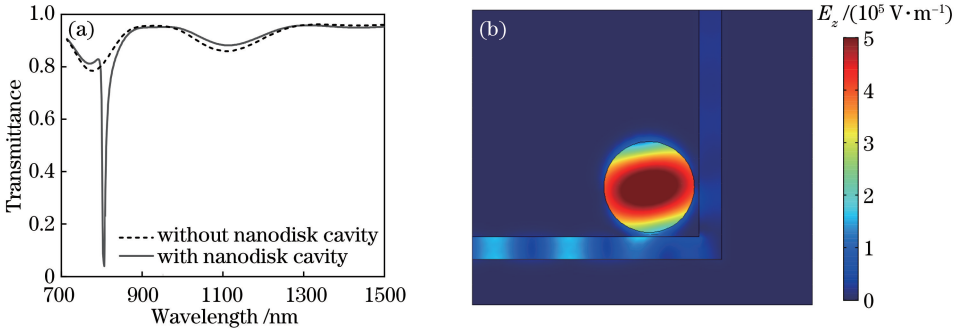


图 2 结构 1 透射光谱图和电场强度分布。(a)透射光谱;(b)电场强度分布

Fig. 2 Transmission spectrum and electric filed intensity distribution of structure 1.

(a) Transmission spectrum; (b) electric filed intensity distribution

基于结构 1 良好的滤波特性,在圆盘腔中内嵌银条引入微扰以改变结构透射谱,进而改变器件滤波性能,提出了耦合内嵌银条圆盘腔的 MIM 弯曲波导滤波器结构 2。图 3(a) 为在结构 1 基础上圆盘腔内嵌 $h = 200$ nm, $t = 20$ nm 银条结构 2 的透射谱线,足够小的宽度 t 不足以影响其横向电场分布。相比结构 1,该复合结构出现了两个共振模式,在透射谱中形成两个共振波谷,呈现双频带阻输出的特性,在滤波器和波分复用系统中有更广阔的应用。模式 1 和模式 2 的共振波长分别为 842 nm 和 1125 nm。图 3(b)、(c) 为两个共振波长处对应的稳态磁场 $|H_z|$ 分布图;图 3(d)、(e) 为相

应的电场强度分布图。可以看到共振波长处圆盘腔内的磁场分布均呈典型的驻波共振图样,模式 1 和模式 2 对应的磁场分布不同,在电场强度分布图中能更清楚地说明这点。模式 1 的电荷主要分布在银条的 h 面,而模式 2 的电荷主要分布在银条的 t 面,这使得两种波长下电场激发方向不同,从而形成两个不同的共振模式,使得透射曲线出现两个共振波谷。这归因于内嵌的银条改变了圆盘共振腔的共振条件,使腔的共振性质出现新特性。银条可看作通过破坏结构对称性引进的一个扰动,使滤波器结构在相同的一级共振下出现了不同的共振波长。

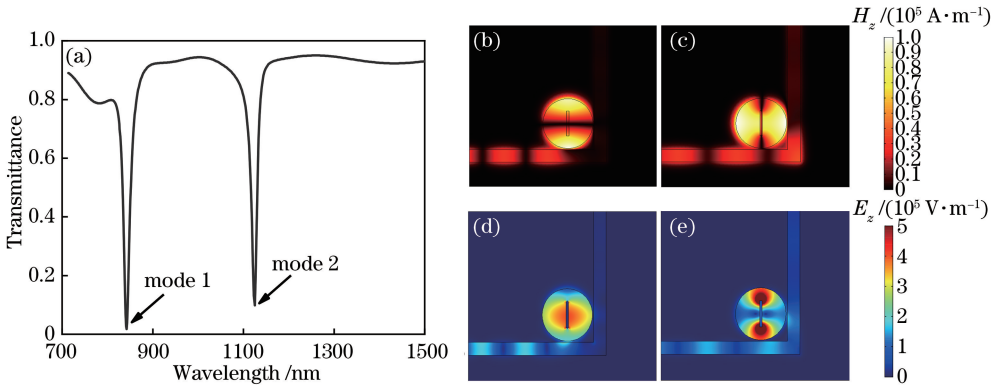


图3 结构2透射谱和不同共振波长处的 H_z 及 E_z 场分布。(a)透射光谱;(b) $\lambda=842$ nm 处的 H_z 场分布;(c) $\lambda=1125$ nm 处的 H_z 场分布;(d) $\lambda=842$ nm 处的 E_z 场分布;(e) $\lambda=1125$ nm 处的 E_z 场分布

Fig. 3 Transmission spectrum and H_z and E_z filed distributions at different resonant wavelengths of structure 2. (a) Transmission spectrum; (b) H_z filed distribution at $\lambda=842$ nm; (c) H_z filed distribution at $\lambda=1125$ nm; (d) E_z filed distribution at $\lambda=842$ nm; (e) E_z filed distribution at $\lambda=1125$ nm

3 结果与讨论

3.1 结构参数 r 对滤波特性的影响

为研究圆盘腔半径对滤波特性的影响,计算了不同半径时滤波器结构2的透射光谱,如图4(a)所示,其余结构参数保持初始值($s_{1,2}=20$ nm, $h=200$ nm, $t=20$ nm)。图4(b)是共振波长与半径 r 的关系。从图中可以明显看出,随着半径 r 的增加,透射光谱出现红移现象,且模式1和模式2的共振波长近似呈线性增加。这是因为耦合进圆盘腔的 SPPs 以稳定驻波形式被局限于谐振腔中时,相位差满足 $\Delta\varphi=2\pi m$ ^[18],其中 $\Delta\varphi$ 是圆盘腔内入射波与反射波之间的相位差; m 是共振

级数。相位差 $\Delta\varphi$ 与有效折射率 n_{eff} 之间的关系可近似为

$$\Delta\varphi = (2\pi/\lambda) \int_0^L n_{\text{eff}} dL_{\text{eff}}, \quad (3)$$

式中: L_{eff} 为 SPPs 在腔内传播的有效长度。当相位差刚好满足共振条件时,可得共振波长 λ_m 为

$$\lambda_m = \int_0^L n_{\text{eff}} dL_{\text{eff}} / m. \quad (4)$$

由(4)式可知, r 越大,SPPs 在圆盘腔中的有效长度 L_{eff} 越长,得到的共振波长也越长。这很好地说明了其共振波长随圆盘腔半径 r 的增大而增加的现象。因此,根据所提出的结构合理选择圆盘腔的半径,可得到实际需要的选频波长。

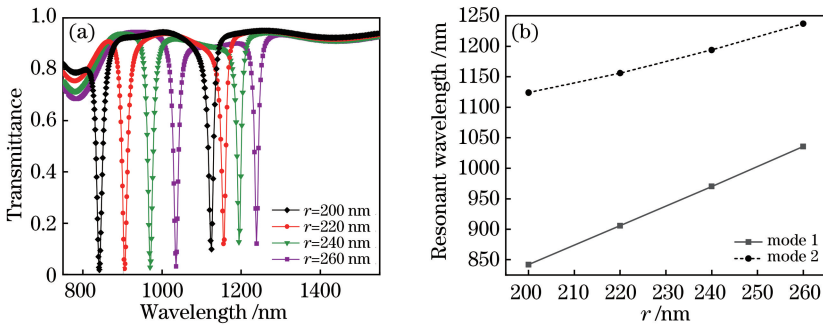


图4 参数 r 对滤波特性的影响。(a)不同 r 下滤波器的透射谱线图;(b)共振波长与 r 关系

Fig. 4 Influence of parameter r on filtering characteristics. (a) Transmission spectra at different r ; (b) resonant wavelength versus r

3.2 结构参数 h 对滤波特性的影响

(2)式中波数 k_d 和 k_m 与结构有效折射率有关,所以改变结构有效折射率能调节结构的共振波长。MIM 波导结构有效折射率 $\text{real}(n_{\text{eff}})$ 与波导间距离的关系如图5(a)所示,当波导间的距离变小时,波导有

效折射率变大。由(4)式可知,有效折射率的增大会使共振波长变长。而在结构2中,当增大 h 时,银条顶端到圆盘的距离 g 变小。微扰的引进是模式2出现的主要原因,不难推断银条长度 h 的增加对其谐振波长的影响更大。图5(b)显示了不同 h 时此复合结

构的透射光谱图,其中 $r = 200 \text{ nm}$,其余结构参数为初始值。从图中可以看出,随着 h 的增大,模式 1 发

生微小红移,模式 2 出现明显红移现象, h 的变化对模式 2 的谐振波长影响更大,与上述理论推断一致。

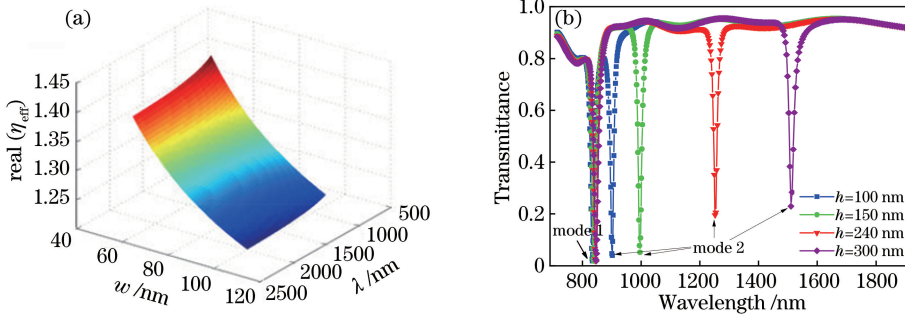


图 5 参数 h 对滤波特性的影响。(a)波导有效折射率与入射波长及波导宽度间的关系;(b)不同 h 下的透射谱
Fig. 5 Influence of parameter h on filtering characteristics. (a) Effective refractive index of waveguide versus incident wavelength and waveguide width; (b) transmission spectra under different h

3.3 耦合间距对滤波特性的影响

为研究圆盘腔与波导间距对滤波特性的影响,计算了改变耦合间距时结构 2 的透射光谱,其余结构参数为初始结构参数。图 6(a)为 $s_1 = 10 \text{ nm}$,改变耦合间距 s_2 时的透射谱;图 6(b)为 $s_2 = 10 \text{ nm}$,改变耦合间距 s_1 时的透射谱。可以明显看出,耦合间距 s_1 和 s_2 分别对模式 1 和模式 2 的谐振波长起主要作用,它

们的变化趋势一致。随着耦合间距的减小,SPPs 通过波导与圆盘腔的耦合损耗减小,透射谷发生微小的红移,波谷处的透射率明显降低。也就是说,与单边耦合相比,当圆盘腔与直角波导发生双边耦合时,电磁波耦合更为强烈,腔内共振作用更强,共振波长处的能量大部分被束缚在谐振腔内,此时滤波器结构 2 呈现模式分明的双频率带带阻滤波特性。

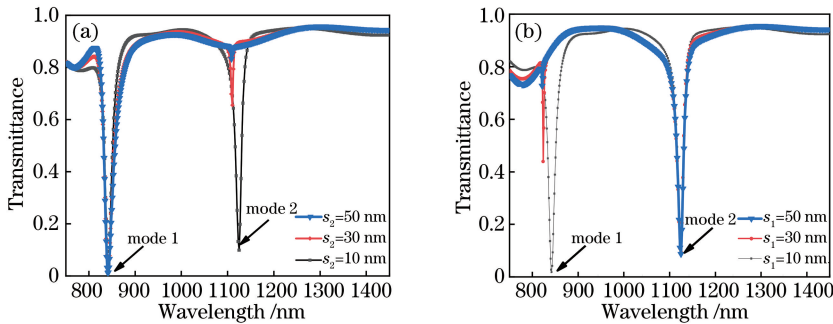


图 6 耦合间距对滤波特性的影响。(a) $s_1 = 10 \text{ nm}$,不同 s_2 时滤波器的透射谱图;
(b) $s_2 = 10 \text{ nm}$,不同 s_1 时滤波器的透射谱图

Fig. 6 Influence of coupling pitch on filtering characteristics. (a) Transmission spectra of filter under different s_2 when $s_1 = 10 \text{ nm}$; (b) transmission spectra of filter under different s_1 when $s_2 = 10 \text{ nm}$

3.4 圆盘腔内折射率 n 对滤波特性的影响

为研究圆盘腔内介质折射率对结构 2 滤波特性的影响,接着计算了腔填充不同折射率介质时的透射光谱,如图 7(a)所示,其中 $r = 200 \text{ nm}$, $s_{1,2} = 20 \text{ nm}$, $h = 200 \text{ nm}$ 。可以看出,随着介质折射率的增加,模式 1 和模式 2 的谐振波长向长波长方向移动。这是因为折射率的增大使耦合到圆盘腔内 SPPs 的传输光程增大,导致光谱发生红移现象。图 7(b)为两种模式对应波长随介质折射率 n 的变化曲线。滤波器结构一旦固定,只能工作于特定波长。为了在较宽范围内实现此结构的滤波传输特性,可

利用图 7(b)中共谐振波长与介质折射率的线性关系,在圆盘谐振腔中加入 Kerr 非线性材料或热光材料,通过改变外加光强或温度来调节谐振腔内材料的折射率^[19],实现滤波器工作波长的可调谐。

为检验滤波器的性能,引入品质因数的概念对其进行定量的计算,滤波器品质因数 $Q = \lambda_r / \Delta\omega_{1/2}$,其中 λ_r 是谐振腔共振时的共振波长, $\Delta\omega_{1/2}$ 是传输频谱的半峰全宽。以图 4(a)所对应参数的结构为例来计算其品质因数。与 $r = 200, 220, 240, 260 \text{ nm}$ 相对应的模式 1 的共振波长分别为 842, 906, 972, 1036 nm,相应的半峰全宽分别为 14, 14, 13, 12 nm。

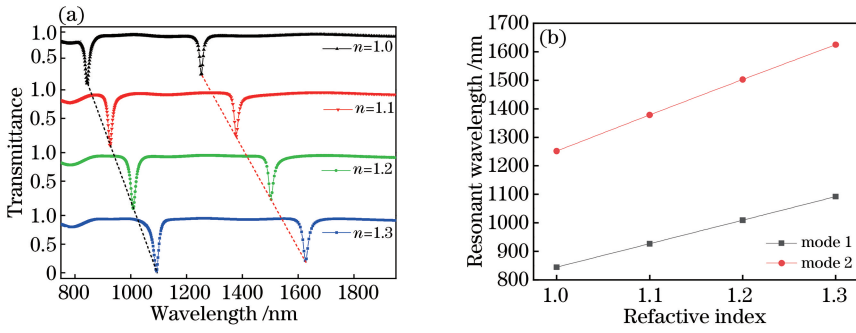


图 7 折射率 n 对滤波特性的影响。(a)腔内填充不同介质时的透射光谱;(b)共振波长与介质折射率的关系
Fig. 7 Influence of refractive index n on filtering characteristics. (a) Transmission spectra of cavity filled with different media; (b) resonant wavelength versus refractive index of medium

由此可求得对应的 Q 值分别为 60.14, 64.71, 74.77, 86.33。模式 2 的共振波长分别为 1125, 1155, 1194, 1239 nm, 相应的半峰全宽分别为 13, 13, 10, 9 nm, 求得对应的 Q 值分别为 86.54, 88.85, 119.4, 137.67。这与已报道的同类滤波器相比存在明显优势,对微弱光信号探测时滤掉较强的背景光噪声,提取有用的弱光信号具有重要意义。

4 结 论

采用 FEM 分析了耦合内嵌银条圆盘腔的 MIM 弯曲波导滤波器的透射光谱。研究发现,该滤波器结构模式分明,选频特性明显,且半峰全宽明显低于已报道的同类滤波器,具有良好的双频窄带滤波功能。透射曲线随圆盘谐振腔半径和银条长度的增加发生红移。根据共振波长与圆盘腔介质折射率的线性关系,可实现滤波器工作波长的调谐。该结果在波分复用系统中具有重要应用价值,对简单结构滤波器的设计有一定指导的意义。

参 考 文 献

- [1] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. Nature, 2003, 424(6950): 824-830.
- [2] Ozbay E. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions [J]. Science, 2006, 311(5758): 189-193.
- [3] Jun Z, Xu W J, Xu Z J, *et al.* Surface plasmon polariton mode in the metal-insulator-metal waveguide[J]. Optik, 2017, 134: 187-193.
- [4] Chen Y, Luo P, Zhao Z Y, *et al.* Study on Fano resonance regulating mechanism of Si contained metal-dielectric-metal waveguide coupled rectangular cavity[J]. Physics Letters A, 2017, 381(40): 3472-3476.
- [5] Xiao G L, Liu L, Yang H Y, *et al.* Light transmission characteristics of metal curved waveguide based on microcavity coupling structures [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1213001.
- [6] Liu Y, Zhou F, Yao B, *et al.* High-extinction-ratio and low-insertion-loss plasmonic filter with coherent coupled nano-cavity array in a MIM waveguide [J]. Plasmonics, 2013, 8(2): 1035-1041.
- [7] Zhang Z D, Zhao Y N, Lu D, *et al.* Numerical investigation of the metal-insulator-metal waveguide filter based on the arc-shaped resonator [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(18): 187301.
- [8] Zhang X Y, Hu A, Wen J Z, *et al.* Numerical analysis of deep sub-wavelength integrated plasmonic devices based on semiconductor-insulator-metal strip waveguides [J]. Optics Express, 2010, 18(18): 18945-18959.
- [9] Lin X S, Huang X G. Numerical modeling of a teeth-shaped nanoplasmonic waveguide filter [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(7): 1263-1268.
- [10] Yun B F, Hu G H, Cui Y P. Theoretical analysis of a nanoscale plasmonic filter based on a rectangular metal-insulator-metal waveguide [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010, 43(38): 385102.
- [11] Wang T B, Wen X W, Yin C P, *et al.* The transmission characteristics of surface plasmon polaritons in ring resonator [J]. Optics Express, 2009, 17(26): 24096-24101.
- [12] Mei X, Huang X G, Tao J, *et al.* A wavelength demultiplexing structure based on plasmonic MDM side-coupled cavities [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(12): 2707-2713.

- [13] 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.
- [14] Wang S W, Li Y, Xu Q J, *et al.* A MIM filter based on a side-coupled crossbeam square-ring resonator [J]. *Plasmonics*, 2016, 11(5): 1291-1296.
- [15] Veronis G, Fan S H. Bends and splitters in metal-dielectric-metal subwavelength plasmonic waveguides [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87 (13): 131102.
- [16] Kim K Y, Cho Y K, Tae H S, *et al.* Light transmission along dispersive plasmonic gap and its subwavelength guidance characteristics [J]. *Optics Express*, 2006, 14(1): 320-330.
- [17] Chremmos I. Magnetic field integral equation analysis of interaction between a surface plasmon polariton and a circular dielectric cavity embedded in the metal [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2009, 26(12): 2623-2633.
- [18] Zhang Q, Huang X G, Lin X S, *et al.* A subwavelength coupler-type MIM optical filter [J]. *Optics Express*, 2009, 17(9): 7549-7554.
- [19] Vlasov Y A, O'Boyle M, Hamann H F, *et al.* Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides[J]. *Nature*, 2005, 438(7064): 65-69.