

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.06.018

基于表面等离子激元的多通道滤波器设计

张兴娇^{1*}, 曾礼丽², 文如泉¹, 廖建波¹, 李薪蔚¹

(1 萍乡学院机械电子工程学院, 江西 萍乡 337055;
2 湖南理工职业技术学院新能源学院, 湖南 湘潭 411104)

摘要: 设计了一种由一个槽型腔和两个波导耦合构建的金属-介质-金属 (MDM) 滤波器, 并利用时域有限差分法对该结构进行了仿真研究, 分析了主要结构参数对滤波器传输特性的影响。研究发现: 纵向位移 L_d 对传输特性有重要影响, 会导致新的谐振峰出现; 在一定范围内, 槽腔宽度 W_c 的增加使得透射峰增加并且更均匀地分布在 600~1500 nm 范围内。通过参数优化最终设计了分布于 550、730、920、1330 nm 波段窗口附近的多通道滤波器, 该设计透射峰窄、品质因子良好, 且结构简单、易于集成、制作方便, 能够很好地运用在波分复用系统及光通信中。

关键词: 光电子学; 表面等离子激元; 金属-介质-金属结构波导; 时域有限差分法; 传输特性

中图分类号: O439; TN252 文献标识码: A 文章编号: 1007-5461(2023)06-00983-09

Design of multichannel filter based on surface plasmon polaritons

ZHANG Xingjiao^{1*}, ZENG Lilil², WEN Ruquan¹, LIAO Jianbo¹, LI Xinwei¹

(1 School of Mechanical and Electronic Engineering, Pingxiang University, Pingxiang 337055, China;
2 School of New Energy, Hunan Vocational Institute of Technology, Xiangtan 411104, China)

Abstract: A metal-dielectric-metal (MDM) filter is designed which is composed of a slot cavity and two waveguides. The influence of main structure parameters on the transmission characteristics of the filter is analyzed in detail using the finite-difference time-domain (FDTD) method. It is found that the lateral displacement L_d has a significant impact on transmission properties of the filter, which will lead to the appearance of new resonance peaks. In addition, it is shown that the increase of the cavity width W_c will not only make the number of transmission peaks increase, but also make the transmission peaks distribute more uniformly in the range from 600 nm to 1500 nm within limits. Through parameter optimization, a multi-channel filter distributed near the 550, 730, 920 and 1330 nm wavelength windows in optical communication systems is designed. The design has the advantages of narrow transmission peak, good

基金项目: 江西省科技厅项目 (20202BABL201021), 湖南省自然科学基金 (2019JJ70060), 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ212714)

作者简介: 张兴娇 (1986 -), 女, 江西萍乡人, 硕士, 讲师, 主要从事光通信、光传感、微纳光子晶体以及光域表面等离子体理论及应用方面的研究。E-mail: zhangxingjiao521@163.com

收稿日期: 2022-07-18; 修改日期: 2022-09-02

*通信作者。

quality factor, simple structure, easy integration and easy fabrication, which can be well used in wavelength-division multiplexing system and optical communication.

Key words: optoelectronics; surface plasmon polaritons; metal-dielectric-metal structural waveguide; finite-difference time-domain; transmission characteristics

0 引言

表面等离子激元 (SPPs) 是在金属介质界面上与自由电子振荡耦合的电磁波^[1,2], 由于其突破了传统光学衍射极限并具有将光引入深亚波长维度的能力, 为纳米器件的高度小型化和集成化提供了可能^[3-5]。因此, 基于 SPPs 的高集成光子电路具有很好的应用前景。

在众多 SPPs 波导结构中, 金属-介质-金属 (MDM) 波导结构以其传输距离长、制作方便、集成方便等显著优点, 引起了研究人员的广泛关注。一些学者专注研究基于 MDM 波导的等离子体激元结构, 这些结构广泛应用于全光开关、滤波器、纳米传感器、布拉格发射器和多路分束器等^[6-9]。2003 年, Barnes 等^[10]引领了表面等离子体亚波长光学的研究; 受集成电路工艺的限制, Han 等^[11]和 Park 等^[12]早期主要研究金属-绝缘体-金属 (MIM) 波导结构, 提出了 MIM 波导表面等离子体布喇格光栅结构, 研究了其高阶等离子体布喇格反射和传输特性; Miroschnichenko 等^[13]和 Zand 等^[14]研究了纳米结构中的 Fano 共振以及纳米等离子槽腔结构用于波长滤波和解复用系统的情况; 2015 年, Huang 等^[15]的研究表明基于透明效应的 MDM 波导可以提高其传感性能; 2016 年, Zhan 等^[16]研究了 MDM 波导中 Fano 共振作为可调纳米等离子体传感器的情况; 2016 年, An 等^[17]设计了 T 型谐振腔和金属挡板组成的 MDM 波导结构; 2018 年, Han 等^[18]设计出含金属单挡板耦合单 T 型空腔的 MDM 波导结构; 2020 年, Deng 等^[19]分析了 MDM 中等离子体诱导透明的物理机理, 回顾了其在光学传感、光学滤波、光学开关、慢光器件和光学逻辑器件中的应用; 2020 年, Zhao 等^[20]设计了一种带金属挡板 MDM 波导与半圆环谐振腔相耦合的结构模型。

为研究集成结构更简单、加工更容易实现、工艺成本更低的波导滤波器, 本文提出了由槽型腔和两个波导耦合构建的新型 MDM 波导结构滤波器, 利用时域有限差分法 (FDTD) 进行数值仿真分析, 通过改变关键性结构参数分析了结构参数变化导致滤波器传输特性发生相应改变的规律。参数优化后设计了一个四通道滤波器, 该滤波器具有体积小、结构简单紧凑、易于制作、集成化程度高、传输特性参数性能良好等优点, 滤波效果良好, 为实现特性更优的多通道滤波器等光电子器件提供了理论研究依据。

1 结构模型

槽腔波导耦合结构如图 1 所示, 由一个槽腔和两个波导耦合而成, 其是 z 轴无限长的二维金属结构, 为满足 Fano 共振要求, 取 z 轴厚度为 100 nm。橙色、白色区域分别是银、介电质, 介电质默认采用空气。入射光沿 x 方向呈 TM 极化 (磁场平行于 z 方向), TM 极化波由 P 传播到 Q 。 P_p 、 P_Q 分别代表输入、输出功率, 传输系数为 $T = P_Q/P_p$ 。设波导宽度和槽腔宽度分别为 W_1 、 W_2 和 W_c , 槽腔高度为 L , L_{d1} 和 L_{d2} 分别表示两个波导中心与槽腔中心平面之间的纵向位移量即侧向位移, 槽腔两侧面与两个波导的间距为 d 。

采用 Drude 模型进行仿真计算, 理论相对介电常数 $\epsilon_m(\omega) = \epsilon_\infty - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\omega\gamma_p)$, 其中无穷介电常数 $\epsilon_\infty = 3.7$, 等离子体角频率 $\omega_p = 1.38 \times 10^{16}$ rad/s, ω 代表入射波的角频率, $\gamma_p = 2.73 \times 10^{13}$ rad/s。仿真中光源为平

面波, 设置计算空间 $L_x \times L_y = 1000 \text{ nm} \times 1000 \text{ nm}$, 采用完全匹配层吸收边界条件, 引入时域有限差分法 (FDTD) 分析该模型。空间、时间上步长分别设置为 $\Delta x = \Delta y = 5 \text{ nm}$ 、 $\Delta t = \Delta x / 2c$ (c 为真空中的光速), 该步长大小对于数值仿真结果收敛是足够的。

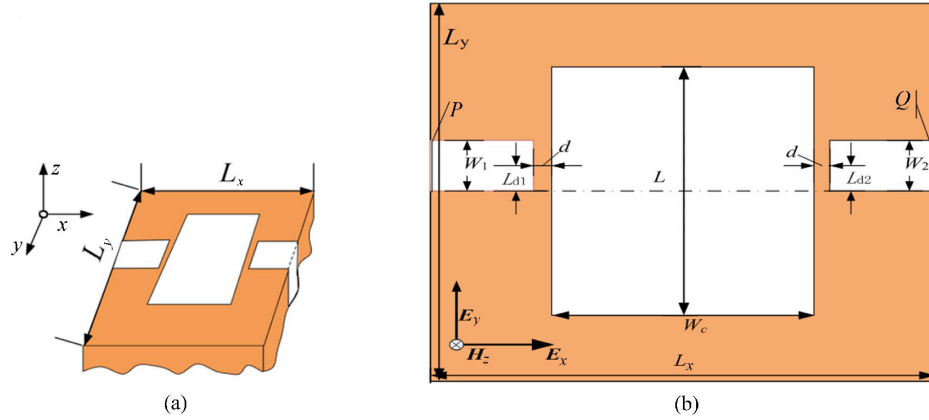


图 1 槽腔波导耦合结构的 (a) 三维示意图及 (b) 二维结构图

Fig. 1 (a) Three-dimensional schematic diagram and (b) two-dimensional structure diagram of slotted waveguide coupled structure

2 理论分析

当 SPPs 被耦合到槽腔中时, 定义 ϕ 为槽腔中的相位延迟, 则 $\phi = 4\pi n_{\text{eff}} L / \lambda_m + \phi_r$, 式中 n_{eff} 、 λ_m 和 ϕ_r 分别是反射在槽腔上、下两面光束的有效折射率、共振波长和相位分布, ϕ_r 很小对谐振波长没有明显影响。波导中横向磁场基模传输的色散方程为

$$\epsilon_m \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - \epsilon_d} \tanh \left(\frac{W\pi \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - \epsilon_d}}{\lambda} \right) + \epsilon_d \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - \epsilon_m} = 0, \quad (1)$$

式中 ϵ_m 和 ϵ_d 分别代表宽度为 w 的金属和介质波导的介电常数。

引入时域耦合理论来研究单腔波导耦合结构的传输特性, 为简化计算, 忽略传输损耗和耦合损耗以及相位差, 将槽腔的时域归一化模振幅 a 表示为

$$\frac{da}{dt} = (-j\omega_0 - k_0 - k_1 - k_2) a + A_{+1} \sqrt{k_1} + A_{+2} \sqrt{k_2}, \quad (2)$$

式中: ω_0 为槽腔的谐振频率, k_0 、 k_1 和 k_2 分别代表槽腔的内部损耗和两个波导的耦合损耗, 且满足 $k_i = \frac{\omega_0}{2Q_i}$, ($i = 1, 2, 3$), 其中 Q_i 为对应的品质因子, Q_1 和 Q_2 由耦合距离控制, 这一点已在文献 [21] 中得到证明。品质因子与透射率之间存在矛盾关系, 随着耦合距离增大, 透射率减小, 品质因数增大。根据能量守恒原理, 推导出单槽腔波导耦合结构的传输特性为

$$T = \left| \frac{\sqrt{2k_1 k_2}}{j(\omega - \omega_0) + k_0 + k_1 + k_2} \right|^2. \quad (3)$$

3 仿真分析

图 2 给出了 $L_{d1} = L_{d2} = 0 \text{ nm}$ 、 $L = 600 \text{ nm}$ 、 $d = 10 \text{ nm}$ 、 $W_1 = W_2 = 50 \text{ nm}$ 、 $W_c = 250 \text{ nm}$ 时槽腔波导耦合结

构仿真得到的透射谱。由图2可见:在波长500、625、725 nm处有3个明显的透射峰,峰值透射率分别达0.751、0.685、0.719。为了研究谐振器内部的共振模式,计算了不同波长入射时的磁场分布情况,如图3所示。图3(a)~(c)分别对应透射峰的模式1~模式3,可以明显看出这几种模式下在槽腔和波导中形成不同模式共振,有极强的磁场分布出现,从而使得SPPs能够通过槽腔传输形成高透射率的透射峰。为研究非透射峰值情况,图3(d)选取透射最低点中波长为600 nm的入射波进行仿真,验证了其磁场分布与图3(a)~(c)明显不同,其磁场在槽腔谐振腔中的分布很弱,且在右侧波导中SPPs处于禁止传播状态。

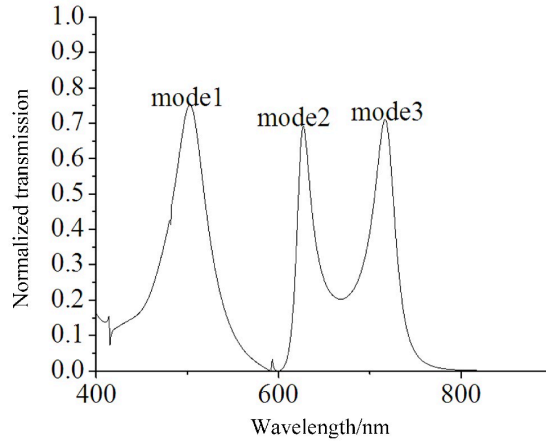


图2 槽腔波导耦合结构仿真得到的透射谱

Fig. 2 Transmission spectrum of slotted waveguide coupled structure by simulation

图3绘制了4个透射峰的磁场分布,很明显不同波长下磁场分布不同。根据磁耦合理论,由于槽腔与波导之间的耦合谐振,当输出波导位于槽腔的高能区时,能量可以间接地耦合到输出波导中。

根据光学叠加原理对不同侧向位移 L_d 对应的透射谱进行了定性分析,当满足共振条件时 $\phi = 2L\beta_m + \theta = 2m\pi$,式中 θ 表示反射在槽腔上下侧面上波束的相移, β_m 是槽腔最高阶谐振模式对应SPPs的传播常数。若在槽腔内的输入场 H 分为 H_{up} 和 H_{down} 两部分,且 $H_{up} = H_{down} = H/2$,传播方向相反。任意输入位置的槽腔内强度可表示为

$$H_m(x, t) = \frac{2H_0 \cos(\beta_m x - 0.5\beta_m L)}{\sigma} \times \{\exp[j(1.5\beta_m L - \beta_m L_d)] + \exp[j(\beta_m L_d + 0.5\beta_m L)]\} \exp(-j\omega_m t), \quad (4)$$

式中 σ 代表光传播的损耗。

若忽略相移 θ 和 Φ ,对于第一阶模式($m=1$),可表示为

$$H_1(x, t) = \frac{2H_0 \cos(\beta_1 x - 0.5\pi)}{\sigma} [-2 \sin(\beta_1 L_d)] \exp(-j\omega_1 t); \quad (5)$$

对于第二阶模式($m=2$),则

$$H_2(x, t) = \frac{2H_0 \cos(\beta_2 x - \pi)}{\sigma} [-2 \cos(\beta_2 L_d)] \exp(-j\omega_2 t). \quad (6)$$

由此可知:当 $L_d = 0$ 时, $H_1 = 0$, $H_2 \neq 0$,这也就意味着此时槽型腔中不存在一阶模,二阶模是可以存在的。当 $L_d = 275$ nm,槽型腔中的一阶模和二阶模都能够存在,很好地解释了为什么不同的位移导致不同的传输特性。

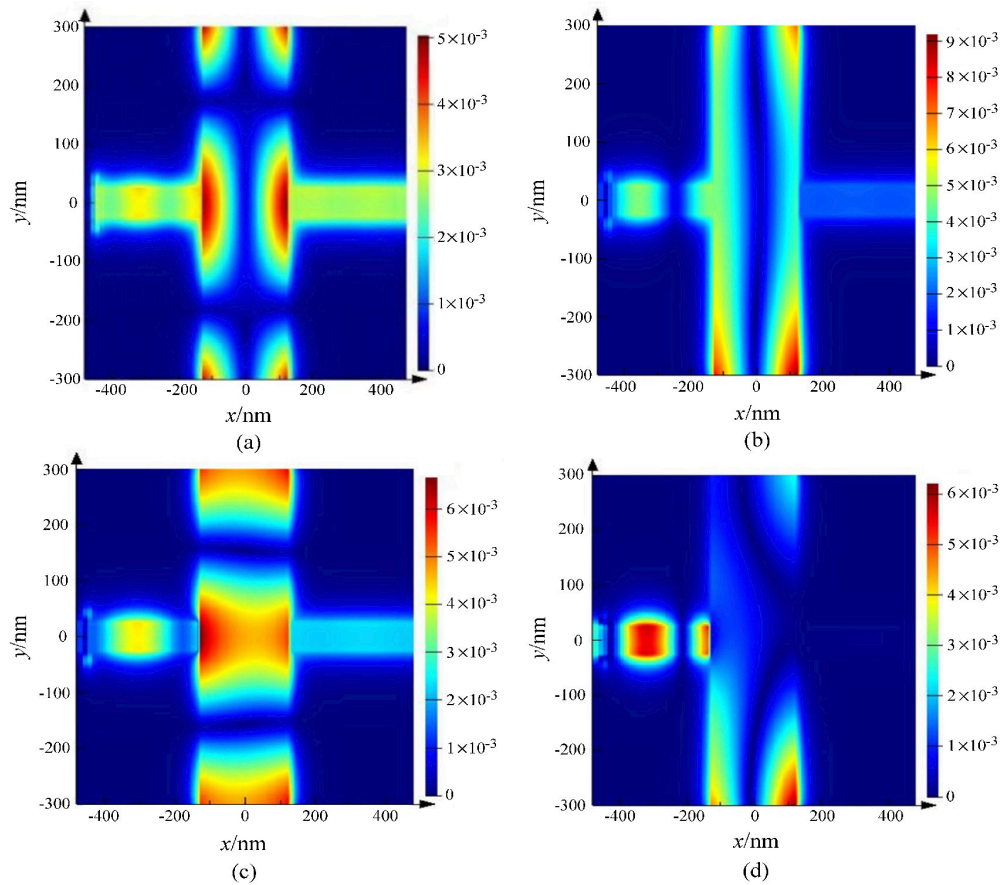


图3 槽腔波导耦合结构仿真得到的 (a) 500 nm (mode 1), (b) 625 nm (mode 2), (c) 725 nm (mode 3) 及 (d) 600 nm (传播禁戒) 入射时 FDTD 磁场空间分布模拟

Fig. 3 Simulation of magnetic field spatial distribution of slotted waveguide coupled structure at

(a) 500 nm (mode 1), (b) 625 nm (mode 2), (c) 725 nm (mode 3) and (d) 600 nm (propagation forbidden) by FDTD

4 结构参数对传输特性的影响

为了进一步研究分析所提出结构的传输特性, 利用控制变量法对该结构参量中的波导宽度 W ($W = W_1 = W_2$)、侧向位移 L_d 、槽腔宽度 W_c 进行了参数分析, 通常情况下固定参数槽腔长度 $L = 600$ nm、槽腔侧面与波导间距 $d = 10$ nm。

首先研究了在 $L_d = 0$ 条件下, 传输特性随不同波导宽度 W 改变的情况, 如图4所示。由图4可见, 在 W 从 40 nm 变为 60 nm 时, 反射峰无变化, 随着 W 继续增加, 三个峰值迅速增加且对应反射率在 $W = 100$ nm 处达到最大值, 分别为 0.97、0.927 和 0.912, 随后最大反射率线性下降; 并且在 $W = 100$ nm 处, 透射谱宽度也更宽。

为了研究结构参量中纵向位移 L_d 对传输特性的影响, 如图5所示, 给出了纵向位移 L_d 从 0 变化至 250 nm 的透射谱曲线, 选择步长为 50 nm。由图可知当 $L_d = 0$ 时, 仅在 512.9、636.4、722.0 nm 处分别出现透射峰; 随着 L_d 的增加, 在 1400 nm 偏蓝光处均出现透射峰, 且该透射峰的归一化透射率在 $L_d = 200$ nm 处逐渐提高到 0.672, 透射峰的中心波长从 1404 nm 蓝移到 1444 nm; 与此同时 600~720 nm 处的两透射峰中 mode3 透射峰逐渐合并到 mode2 透射峰中, 两主峰中心波长先后出现红移再微弱蓝移, 波段出现多个不规则透射峰; 当 L_d

达 250 nm 时, mode2 透射峰宽度达到最大值且 1444 nm 处峰值透射率基本保持优良特性。

为进一步了解波导宽度 W 对透射谱的影响, 研究了所有波导最上方与槽腔最顶端保持一致的情况下透射谱的传输特性, 结果如图 6 所示, 随着 W 增加, 1410 nm 处反射率逐渐增强到 0.69, 且出现蓝移现象; 650 nm 处由两个分散的透射峰逐渐合并为一个宽度达 150 nm 的透射峰, 且峰值在 0.88 以上增长。

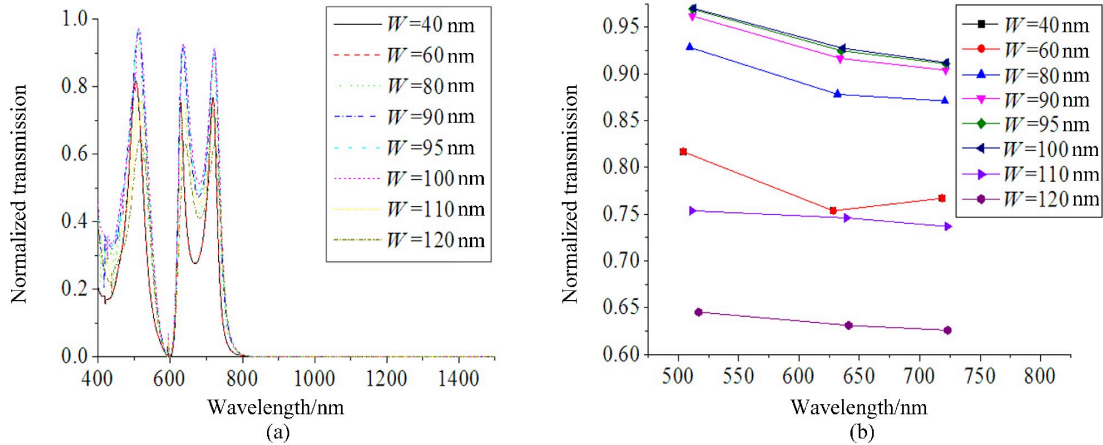


图4 不同 W 的 (a) 透射谱及 (b) 透射峰与波长的关系 ($W_c = 250$ nm, $L = 600$ nm, $d = 10$ nm, $L_d = 0$ nm)

Fig. 4 (a) Transmission spectrum and (b) transmission peak-wavelength relation with different W

($W_c = 250$ nm, $L = 600$ nm, $d = 10$ nm, $L_d = 0$ nm)

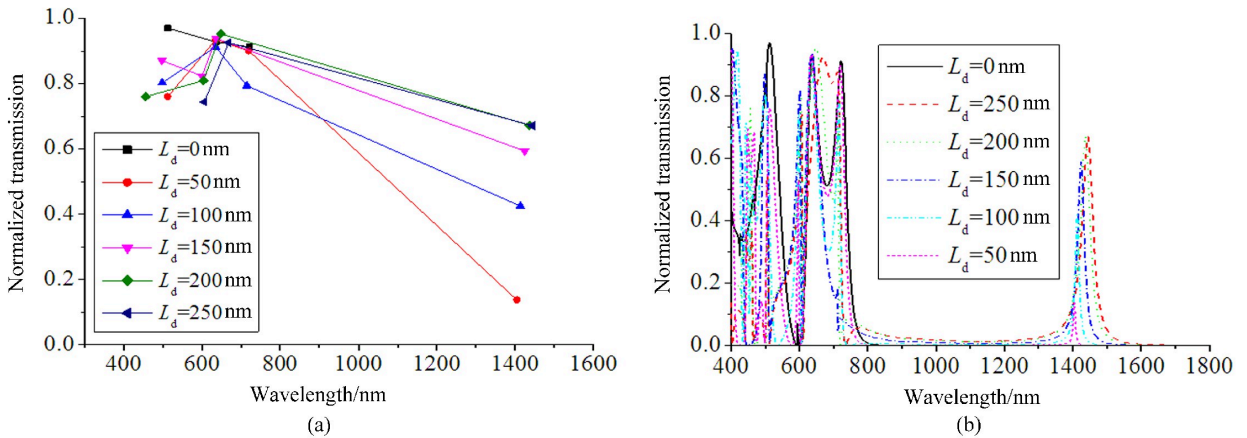


图5 不同 L_d 的 (a) 透射谱及 (b) 透射峰与波长的关系 ($W_c = 250$ nm, $L = 600$ nm, $d = 10$ nm, $W_1 = W_2 = 100$ nm)

Fig. 5 (a) Transmission spectrum and (b) transmission peak-wavelength relation with different L_d

($W_c = 250$ nm, $L = 600$ nm, $d = 10$ nm, $W_1 = W_2 = 100$ nm)

为了进一步研究参数对透射谱的影响, 在研究结构参量中改变了槽腔的宽度, 如图 7 所示, 发现当宽度增加到 350 nm 时, 谱中出现了 4 个透射峰。如图 7(a), 随着 W 的增加出现了 2 个新的透射峰; 结合图 7(b) 和图 8(a) 可以看出, 随着波导宽度的增加, mode2、mode3 两个峰值出现了明显的红移, 而 mode1、mode4 两个峰值的变化频率则相反; 值得注意的是, 透射峰 mode2 和 mode3 的变化趋势大于透射峰 mode1 和 mode4 的变化趋势。为显示其内在机理, 图 8(b) 绘制了对应的磁场图。对 mode1、mode2、mode3 和 mode4 四个峰进行定量计算, 其品质因数 (QF) 分别高达 92、78、76、56, 这些特性非常适用于滤波器。相比于十字连通形环形谐振腔、凸环结构等复杂结构, 本研究所提出结构制作更简单、传输特性更优良^[22, 23]。

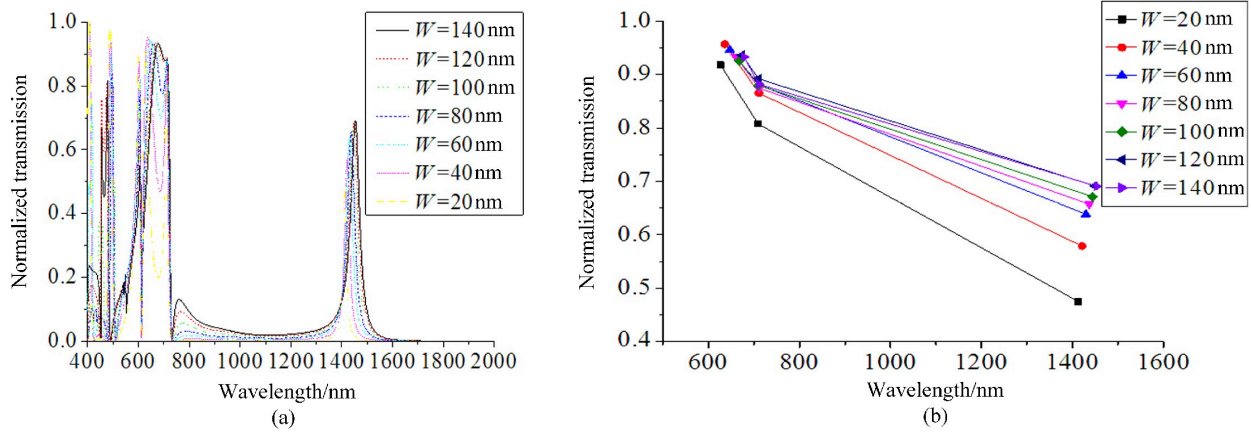


图 6 不同 W 和 L_d 的 (a) 透射谱及 (b) 透射峰与波长的关系 ($W_c = 250$ nm, $L = 600$ nm, $d = 10$ nm)

Fig. 6 (a) Transmission spectrum and (b) transmission peak-wavelength relation with different W and L_d
($W_c = 250$ nm, $L = 600$ nm, $d = 10$ nm)

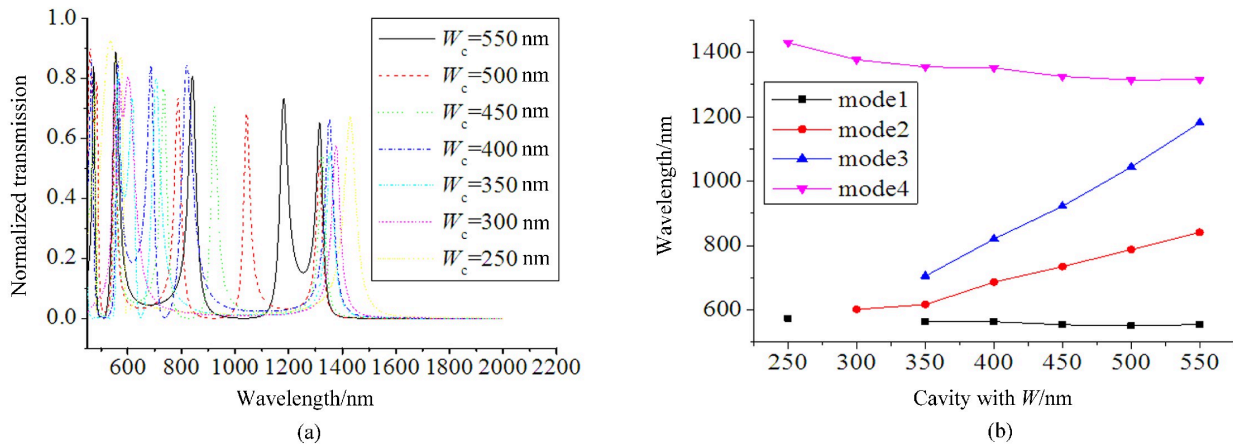


图 7 不同 W_c 的 (a) 透射谱及 (b) 透射峰波长位置与槽腔宽度的关系 ($W = 120$ nm, $L = 600$ nm, $d = 10$ nm)

Fig. 7 (a) Transmission spectrum and (b) transmission peak-wavelength relation with different W_c
($W = 120$ nm, $L = 600$ nm, $d = 10$ nm)

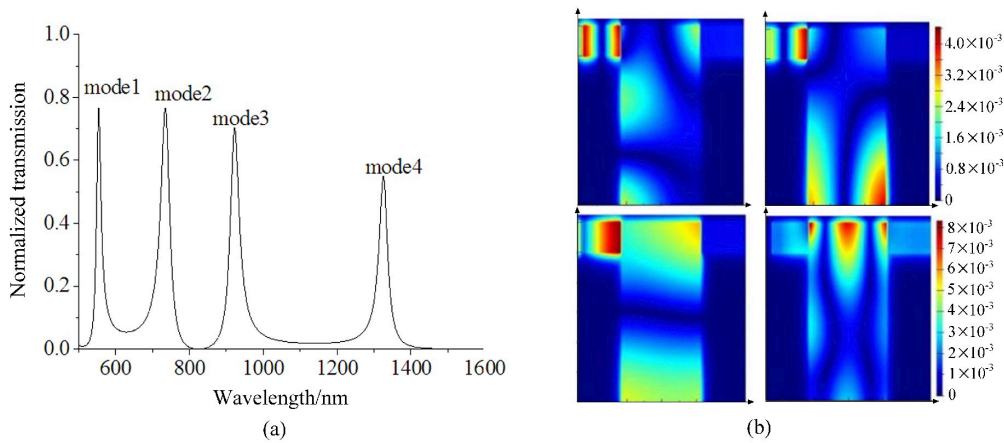


图 8 $W_c = 450$ nm 的 (a) 透射谱及 (b) mode1-4 磁场分布

Fig. 8 (a) Transmission spectrum and (b) magnetic field distribution of mode 1-4 with $W_c = 450$ nm

5 结 论

提出了一种基于 SPPs 的 MDM 波导结构, 由一个槽型腔和两个波导耦合构建而成。对该结构进行了理论和数值仿真研究, 并比较分析了不同结构参数对传输特性的具体影响。研究发现, L_a 和 W_c 对传输特性有重要影响, 通过选择合适的 L_a , 可以在不干扰的情况下分离一阶模和二阶模; 通过增大 W_c , 由于谐振模的叠加, 可以得到新的谐振峰并伴随偏移。基于以上特性, 优化参数并设计了一个可实现四通道的带通滤波器, 在 550、730、920、1330 nm 处出现 4 个通信窗口, 能获得较高的品质因子, 其具有更小的体积, 且结构简单紧凑、集成化程度高、性能良好, 可作为纳米级光子功能器件广泛应用于波分复用系统及光通信中。

参考文献:

- [1] Zhang Y J, Wang H J, Zhang L T, *et al.* Multi-Fano resonance sensing characteristics of MIM waveguide coupled cloud like cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(5): 0524002.
张燕君, 王护吉, 张龙图, 等. MIM 波导耦合类云朵腔的多 Fano 共振传感特性研究 [J]. *光学学报*, 2022, 42(5): 0524002.
- [2] Zhu F M, Li J, Hu K Y. Surface plasmon polaritons on metal surfaces corrugated by periodic grooves in mid-far infrared range [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2020, 37(1): 110-117.
朱方明, 李 军, 胡克用. 中远红外波段周期凹槽金属表面的等离激元 [J]. *量子电子学报*, 2020, 37(1): 110-117.
- [3] Chen Y, Zhou J, Ding Z X, *et al.* Analysis of formation and evolution of double Fano resonances in sub-wavelength dielectric grating/MDM waveguide/periodic photonic crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(3): 034202.
陈 颖, 周 健, 丁志欣, 等. 亚波长介质光栅/MDM 波导/周期性光子晶体中双重 Fano 共振的形成及演变规律分析 [J]. *物理学报*, 2022, 71(3): 034202.
- [4] Zhang S, Xie Z J, Xu C, *et al.* Broadband circularly polarized frequency scanning antenna based on spoof surface plasmon polaritons transmission line [J]. *Research & Progress of SSE*, 2022, 42(1): 27-32.
张 胜, 谢振江, 徐 聪, 等. 基于人工表面等离激元传输线的宽带圆极化频率扫描天线 [J]. *固体电子学研究与进展*, 2022, 42(1): 27-32.
- [5] Wu M, Liang X Y, Sun D X, *et al.* Design of asymmetric rectangular ring resonance cavity electrically adjustable filter based on surface plasmon polaritons [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1423001.
吴 梦, 梁西银, 孙对兄, 等. 基于表面等离激元的非对称矩形环腔电可调滤波器设计 [J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1423001.
- [6] Chen Z Q, Li H J, He Z H, *et al.* Multiple plasmon-induced transparency effects in a multimode-cavity-coupled metal-dielectric-metal waveguide [J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(9): 092201.
- [7] Shi X L, Ma L J, Zhang Z D, *et al.* Dual Fano resonance control and refractive index sensors based on a plasmonic waveguide-coupled resonator system [J]. *Optics Communications*, 2018, 427: 326-330.
- [8] Chen Y, Xu Y M, Cao J G. Fano resonance sensing characteristics of MIM waveguide coupled square convex ring resonator with metallic baffle [J]. *Results in Physics*, 2019, 14: 102420.
- [9] Chen Y, Cao J G, Xu Y M, *et al.* Fano resonance sensing characteristics of metal-dielectric-metal waveguide coupling square cavity with bimetallic baffle [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0213001.
陈 颖, 曹景刚, 许扬眉, 等. 双金属挡板金属-电介质-金属波导耦合方形腔的 Fano 共振传感特性 [J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0213001.

- [10] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [11] Han Z H, Forsberg E, He S L. Surface plasmon Bragg gratings formed in metal-insulator-metal waveguides [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(2): 91-93.
- [12] Park J, Kim H, Lee B. High order plasmonic Bragg reflection in the metal-insulator-metal waveguide Bragg grating [J]. *Optics Express*, 2008, 16(1): 413.
- [13] Miroschnichenko A E, Flach S, Kivshar Y S. Fano resonances in nanoscale structures [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2010, 82(3): 2257-2298.
- [14] Zand I, Abrishamian M S, Pakizeh T. Nanoplasmonic loaded slot cavities for wavelength filtering and demultiplexing [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(3): 4600505.
- [15] Huang Y, Min C J, Dastmalchi P, et al. Slow-light enhanced subwavelength plasmonic waveguide refractive index sensors [J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 14922-14936.
- [16] 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.
- [17] An H L, Zhang G M, Hu N, et al. Phenomenon of multiple Fano resonances based on coupled T-type cavity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(11): 1113003.
安厚霖, 张冠茂, 胡南, 等. 基于耦合T型空腔的多重法诺共振现象 [J]. 光子学报, 2016, 45(11): 1113003.
- [18] Han S T, Chen Y, Di Y J, et al. Fano resonance dual mode performance of single baffle contained MDM waveguide coupled disk cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1024002.
韩帅涛, 陈颖, 邸远见, 等. 单挡板MDM波导耦合圆盘腔的Fano共振双模式特性研究 [J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1024002.
- [19] Deng H G, Tian L L, Xiong R J, et al. Review on plasmon induced transparency based on metal-dielectric-metal waveguides [J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(3): 698-710.
- [20] Zhao Y P, Zhang G M, Ren P P, et al. Dual Fano resonance characteristics of coupled semi-circular resonant cavity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 131301.
赵亚萍, 张冠茂, 任盼盼, 等. 耦合半圆环谐振空腔的双重Fano共振特性 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 131301.
- [21] Wen K H, Hu Y H, Chen L, et al. Fano resonance based on end-coupled cascaded-ring MIM waveguides structure [J]. *Plasmonics*, 2017, 12(6): 1875-1880.
- [22] Qi Y P, Zhang X W, Zhou P Y, et al. Refractive index sensor and filter of metal-insulator-metal waveguide based on ring resonator embedded by cross structure [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(19): 197301.
祁云平, 张雪伟, 周培阳, 等. 基于十字连通形环形谐振腔金属-介质-金属波导的折射率传感器和滤波器 [J]. 物理学报, 2018, 67(19): 197301.
- [23] Yan Y F, Zhang G M, Qiao L T, et al. Design on the convex ring MIM structure filter based on surface plasmon polaritons [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(2): 0223002.
闫云菲, 张冠茂, 乔利涛, 等. 基于表面等离子激元的凸环结构金属-介质-金属滤波器设计 [J]. 光子学报, 2019, 48(2): 0223002.