

doi:10.3788/gzxb20184702.0223004

基于 SPPs 的方形凹环结构 MIM 滤波器设计

刘海瑞, 张冠茂, 王志爽, 乔利涛

(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: 基于表面等离子体波的传播特性提出了一种由方形凹环与波导管耦合而成的 MIM 结构滤波器, 运用有限元数值计算获得了该滤波结构的磁场分布、透射谱和共振波长分布曲线。研究表明, 其阻带透射率最小透射比可低至 0.01, 通带最大透射比则高达 0.96, 并且顶部分布平滑。在增大滤波器波导结构参数 I 、 H 时, 相应的透射谱线会有明显的红移, 且不同模式阻带的透射比也会随之改变, 此外共振波长与结构参数的变化呈现线性关系。在增大结构参数 D 时, 模式 1 的透射率从之前的 0.63 增加到 0.80, 模式 1 最终消失, 其余模式几乎不变, 同时共振波长分布与参数 D 的变化无关。通过结构参数的优化, 可以使波导结构的品质因数从 14.82 提升到 17.07, 通频带亦有所增加。该 MIM 结构滤波器具有封装尺寸小、多模式、阻带较窄、通带平滑、良好的品质因数以及可调节性, 在微纳集成光学器件尤其是波分复用系统中有着良好的应用前景。

关键词: 表面等离子体波; 方形凹环谐振腔; 波导; 传输谱; 波分复用系统; MIM 滤波器; 有限元方法

中图分类号: O43

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)02-0223004-7

Design of the Square Concave Ring Resonator MIM Filter Based on the Surface Plasmon Polaritons

LIU Hai-rui, ZHANG Guan-mao, WANG Zhi-shuang, QIAO Li-tao

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

Abstract: Based on the surface plasmon polaritons, a Metal-Insulator-Metal (MIM) structure filter which is coupled by a square concave ring resonator and a waveguide is proposed. The magnetic field distributions, the transmission spectrums and the resonant wavelength distribution curves of the MIM structure are obtained through the numerical simulation software which is based on the finite element method. The results show that its stopband has a minimum transmittance of 0.01 while its passband transmittance can reach up to 0.96 and the top is smooth. When the parameter I or H of the waveguide structure is increased, the corresponding transmission curve has obvious red shift and the transmittance of different stopband modes will also change. In addition, the resonance wavelength shows a linear relationship with the structure parameters. When the structure parameter D is increased, the transmittance of mode 1 increases from 0.63 to 0.80, the mode 1 disappears eventually and the other modes are almost unchanged. the resonance wavelength shows no relationship with D . After optimization of structure parameters, the quality factor of waveguide structure can be improved from 14.82 to 17.07 and the bandwidth of the passband is increased. The MIM structure filters have the advantages of small footprint size, multi-modes, narrow stopband, smooth passband, good quality factor and adjustability. Therefore the MIM structure filters may have good applications in Micro-nano integrated optical devices,

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No.61631007)和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: 刘海瑞(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面等离子体波导技术及其应用。Email: liuhr15@lzu.edu.cn

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与光传感、微纳光子器件设计和光频表面等离子体波导学及其应用。Email: zhanggm@lzu.edu.cn

收稿日期: 2017-09-18; **录用日期:** 2017-11-14

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

especially in wavelenth division multiplexing system.

Key words: Surface plasmon polaritons; Square concave ring resonance cavity; Waveguides; Transmission spectrum; WDM system; MIM filter; Finite element method

OCIS Codes: 130.3120; 230.7408; 230.7370; 240.6680

0 引言

表面等离子体激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)是一种在金属介质交界面上传播的电磁表面波,其场分布在界面两侧呈指数衰减^[1-2].SPPs具有可突破传统光学衍射极限^[3]及强局域性的特点,因此可以实现光在亚波长级别的引导和操控.基于SPPs可以作为能源和信息载体在高密度集成光电路中具有重要的潜在应用价值^[4-6].SPPs波导结构中有两种重要的波导结构类型,即IMI(Insulator-Metal-Insulator)和MIM(Metal-Insulator-Metal)波导.IMI波导具有较低的损耗,但是限制光在亚波长传播的能力较弱.相对应的,MIM波导不仅在较宽的频谱范围内支持亚波长高群速的模式,而且可实现长程传播并允许其在纳米级别操控和传播光^[7-8].

目前,基于MIM波导的微纳光学功能器件有着重要的研究价值且在实验和理论研究方面取得了许多突破,如布喇格反射器^[9],传感器^[10]等.为克服布喇格反射器构造的复杂性并获得较好的带阻滤波特性,表面等离子体波导滤波器被提出并加以研究.例如,Xiao Peng等设计的方形环腔结构^[11],该结构具有结构简单、阻带模式较多等优点,但其阻带的透射率略高、通带不够平滑且只能通过少量参数实现共振模式的调节,这在一些方面限制了其应用的范围.Shaowu Wang等设计了方形环横腔结构^[12],该结构在方形环腔的基础上增加了一横腔通道,相比前者而言不仅出现了多模式的共振效果而且还优化了通带平滑性,其通带的透射率最高可达到0.92,但是除一个阻带透射率较低外,其它阻带的透射率都在0.10以上,其通带的透射率尚可,但还有可以提升的空间而阻带的透射率较高.Mahdi Zavvari等设计的矩形环腔结构^[13],该结构采用的金属介质为金,有很好的品质因数,经过双环矩形腔结构的优化后不仅保证了较低的阻带透射率而且品质因数得到进一步的提高,且可通过参数的调节实现共振模式的改变.但是其通带内存在较大的起伏,曲线不够平滑,可进行参数调节的个数不多,且阻带的透射率还有可以降低的可能.此外,还有双波导管方形环腔结构^[14]、圆形环腔结构^[15]等,都从不同的角度对多模式、可调节等方面进行了分析研究.

由于正方形环形谐振器的对称性,其奇次谐振是退化的,所以常常作为有效的谐振结构而被应用于实现带阻(带通)滤波器^[14-17].本文利用边界耦合构造方形凹环结构滤波器,运用有限元法(Finite Element Method, FEM)数值分析了该滤波器的传输特性.为了全面探索所提出的MIM结构滤波器,在原始结构的基础上通过改变结构参数、变换环形横腔和波导管部分区域的介质提出了两种新的结构,发现这些改进不仅可以轻松实现对带阻滤波器共振模式、透射率、带宽的调节,而且还可以构造出性能优良的带通滤波器.

1 滤波器结构与仿真分析

1.1 结构与方法

本文构建的MIM结构滤波器如图1,此滤波器结构由方形凹环腔与波导管通过边界耦合所得.结构参数 L, I, D, H, d, W, S 分别为输入输出端口与共振腔边界的距离,外方形环边长,方形内环凹进宽度,方形内环凹进高度,共振腔与波导管的耦合间距,介质波导管宽度和方形环腔宽度.其中 L, D, d, W 分别固定为400 nm, 150 nm, 10 nm, 50 nm.为了确保只有基本的TM波^[12],固定 S 的数值为50 nm.其余结构参数初始化为 $I = 350$ nm, $H = 105$ nm.图中白色区域为介质,设置为空气($\epsilon_a = 1$),灰色区域为金属设置为银,银的介电常数 ϵ_m 采用Drude模型^[17]计算

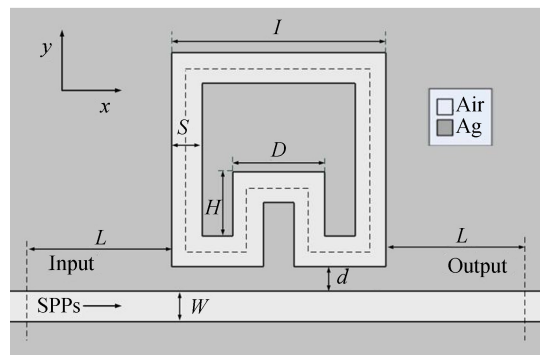


图1 MIM结构滤波器示意图

Fig.1 The configuration of the MIM structure filter

$$\epsilon_m = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma} \quad (1)$$

式中,无穷介电常数 $\epsilon_\infty = 3.7$,等离子体频率 $\omega_p = 1.38 \times 10^{16}$ Hz,电子碰撞频率 $\gamma = 2.73 \times 10^{13}$ Hz。 ω 为仿真计算用到的角频率,波导中的传输常数 β 由其色散关系决定.MIM波导中TM基模的色散关系^[11]为

$$\epsilon_d k_{z2} + \epsilon_m k_{z1} \coth\left(-\frac{ik_{z1}}{2}W\right) = 0 \quad (2)$$

其中 k_{z1} 和 k_{z2} 可由以下关系求得

$$\begin{cases} k_{z1}^2 = \epsilon_d k_0^2 - \beta^2 \\ k_{z2}^2 = \epsilon_m k_0^2 - \beta^2 \end{cases} \quad (3)$$

其中 ϵ_d 、 ϵ_m 和 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 分别为介质(空气)的介电常数,金属(银)的介电常数和自由空间波数。

本文使用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 5.0 分析计算了此 MIM 结构的传输特性.在仿真计算中,设置此结构的边界条件为散射边界条件.传输透射系数^[11](Transmittance)定义为

$$T = P_o / P_i \quad (4)$$

其中 P_i 为输入端口处的输入功率, P_o 为输出端口处的输出功率。

1.2 方形凹环腔带阻滤波器传输特性分析

图2为方形凹环腔滤波器的透射谱线,其中结构参数 I 、 D 、 H 分别为350 nm、150 nm、105 nm.由图可知,此结构滤波器透射谱线在800~2500 nm波长范围内有三个波谷分别对应不同的共振模式,模式1~3的共振波长分别为926 nm、1008 nm、1860 nm.其中模式1波谷透射率较高,对应阻带带宽非常窄;模式2~3波谷透射率非常低,最小透射比可低至0.01,对应阻带带宽较窄,模式2和模式3之间的通带有很好的平滑性,且其通带的透射比高达0.96.

为了说明图2传输曲线的特性以及波谷产生的机理,在此借助SPPs波在方形凹环结构中的磁场分布图来加以阐述,如图3所示,图3(a)~(c)三张图片是方形凹环腔结构滤波器在不同入射波长下的磁场分布图.当SPPs沿波导管传输时,在经过方形凹环时一部分波耦合至凹环腔内,之后在环腔的顺时针和逆时针两个方向上分别传输^[19],当两股SPPs波满足相位相消的条件时^[20-21],透射曲线就会出现波谷,并且方形凹环的八个角会造成扰动效应,从而会形成多种不同的共振模式(Mode 1~3)^[22].由磁场分布图可以看出,在对应共振的波长处,磁场能量基本都聚集在方形凹环腔内部。

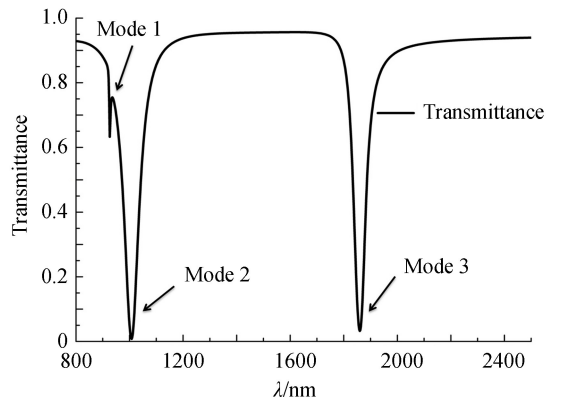
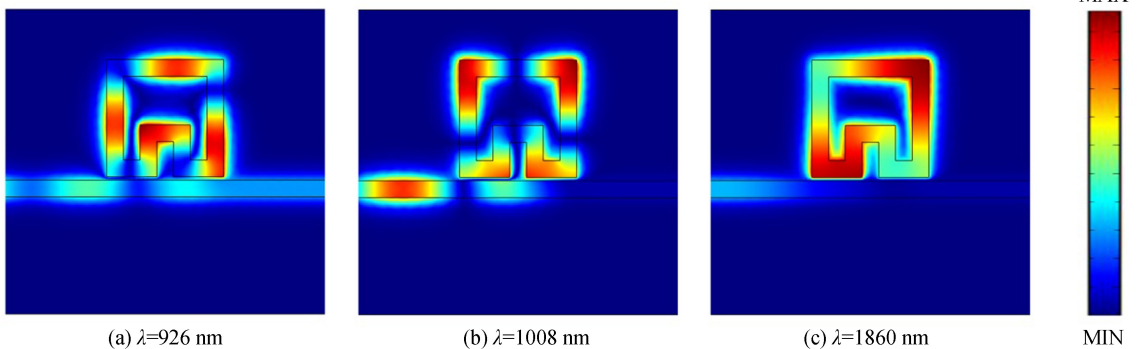


图2 MIM结构滤波器透射谱线

Fig.2 The transmission spectra of the MIM structure filter



(a) $\lambda=926$ nm

(b) $\lambda=1008$ nm

(c) $\lambda=1860$ nm

MIN

图3 不同波长处的磁场分布

Fig.3 The magnetic field distributions at different wavelengths

2 方形凹环腔带阻滤波器结构参数的变化对传输特性的影响

为了解结构参数对滤波器传输特性的影响,对结构参数 I 、 D 、 H 逐一进行分析.在这里引入共振条件方

程,来解释参数改变引起谱线移动的原因.方形凹环腔共振条件表示为^[7,11]

$$L_{\text{eff}} = N \lambda_{\text{spp}} = N [\lambda_r / \text{Re}(n_{\text{eff}})] \quad N = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

式中, L_{eff} 是方形凹环谐振腔的有效长度, λ_r 是谐振腔共振时的共振波长, N 是整数, 表示的是模式数, n_{eff} 是方形凹环谐振腔的有效折射率.

2.1 结构参数 I 的变化对传输特性的影响

在图 4(a) 中, 改变结构参数 I , 其余结构参数保持初始化值 ($D = 150 \text{ nm}$, $H = 105 \text{ nm}$) 不变, 获得一组滤波器透射谱线图. 可以看出, 随着参数 I 的增大, 此滤波器的透射谱线出现明显的红移现象. 其中模式 1 变化比较明显, 在 $I = 330 \text{ nm}$ 时, 模式 1 几乎消失, 且随着 I 的增大, 透射率明显减少, 而模式 2 的透射率基本保持不变, 模式 3 的透射率有轻微增大的趋势. 在此可以用式(5)来解释谱线红移的原因: 在图 1 中方形凹环空腔的虚线为 SPPs 传输轨迹, 则 SPPs 在方形凹环谐振腔传输的有效长度为 $L_{\text{eff}} = 4(I - S) + 2H$, 而方形凹环谐振腔的宽度 $S = 50 \text{ nm}$ 不发生变化, 且共振腔的填充介质始终为空气, 则 n_{eff} 保持不变. 当 I 增大时, 则对应的 L_{eff} 增大, 根据式(5)可知, λ_r 必然也会增大, 所以出现红移的现象. 为了更加清楚地说明这一问题, 以模式 3 为例, 找出参数 I 不同数值对应下的共振波长; 图 4(b) 是模式 3 共振波长位置与结构参数 I 的关系示意图, 从图中可以很清楚地看出共振波长与结构参数 I 呈线性关系, 根据式(5)所得的理论分析结果与仿真计算结果可以相互印证.

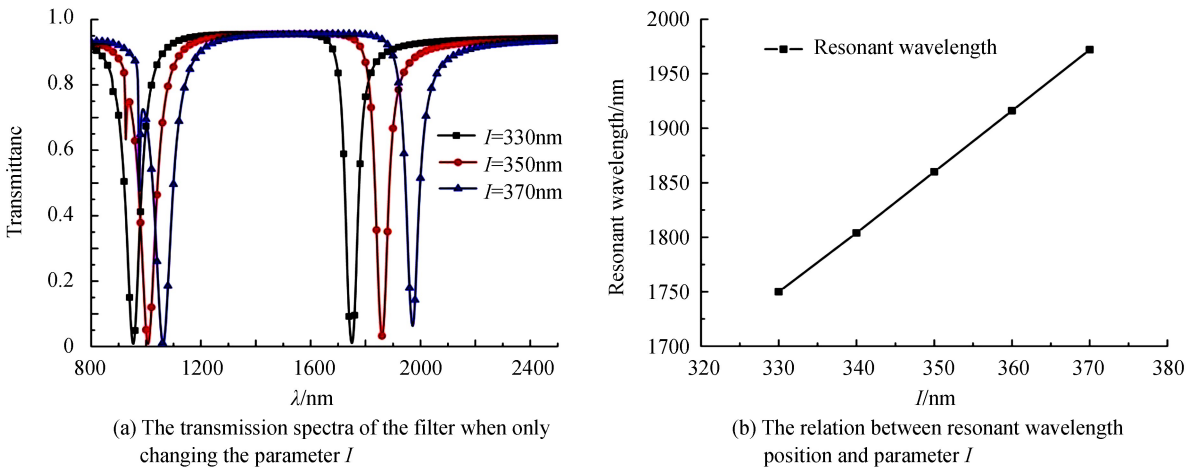


图 4 改变结构参数 I 时的透射谱线图和共振波长分布图

Fig.4 Transmission spectra and resonant wavelength distribution for different parameters of I

2.2 结构参数 D 的变化对传输特性的影响

当结构参数 D 改变时, 其相应的透射谱线如图 5(a). 从中可以看出, 随着 D 的增大透射谱线中模式 1 有着明显的变化, 透射率有增大的趋势, 且在 $D = 170 \text{ nm}$ 时, 模式 1 波谷的透射比从之前的 0.63 增加到 0.80,

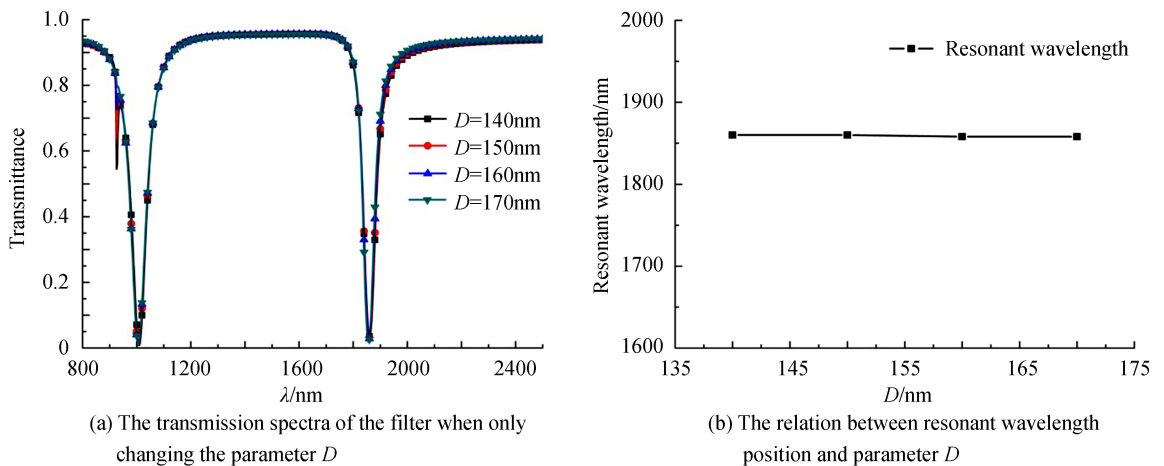


图 5 改变结构参数 D 时的透射谱线图和共振波长分布图

Fig.5 Transmission spectra and resonant wavelength distribution for different parameters of D

导致模式 1 几乎消失;而模式 2 和模式 3 共振波长位置在 1 008 nm 和 1 860 nm 处却几乎不变.由式(5)可以看出,方形凹环共振腔有效长度 L_{eff} 的表达式中无对应参数 D 的出现,这就是说 D 的变化对于 L_{eff} 没有影响,而其他参数也没有变化.所以当 D 变化时,其共振波长的位置不会发生变化.以模式 3 为例,由图 5(b)可以清楚地看出共振波长与参数 D 的变化关系,曲线的斜率近似为 0,在此理论分析结果与仿真计算结果同样可以相互印证.

2.3 结构参数 H 的变化对传输特性的影响

当改变凹环深度 H 时,相应的透射谱线如图 6(a)所示.从中可以看出,随着 H 的增大,透射谱线出现明显的红移,尤其是模式 3,且模式 2 与模式 3 之间的通带带宽增大.对于透射率而言,模式 3 的透射率有明显减小的趋势,模式 1 则有明显增大的趋势,当 H 增大到一定程度时模式 1 会退化直至消失,如 $H=115$ nm 时.同样由式(5)可以分析得出结果,方形凹环共振腔的有效长度 $L_{\text{eff}}=4(I-S)+2H$,当 H 变化时, L_{eff} 也会随之而发生变化,易知共振波长的位置会随着 H 呈线性变化.如图 6(b)所示,在此可以很明显地发现共振波长的位置是随 H 呈线性变化.

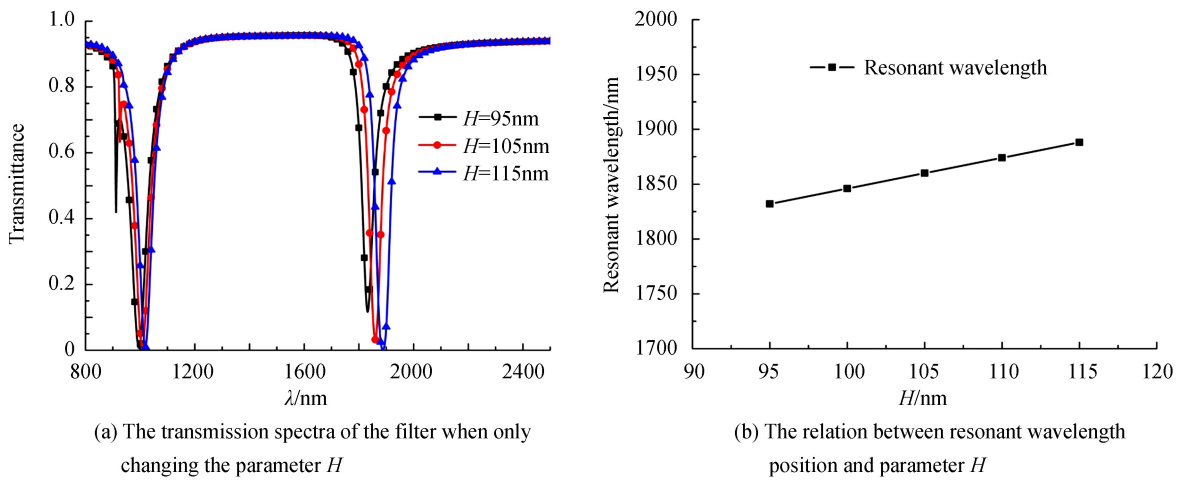


图 6 改变结构参数 H 时的透射谱线图和共振波长分布图

Fig.6 Transmission spectra and resonant wavelength distribution for different parameters of H

为了检验方形凹环结构滤波器的性能,在此引入品质因数的概念来对其进行定量的计算,滤波器品质因数 Q 为^[14]

$$Q = \lambda_r / \Delta_{\text{FWHM}} \quad (6)$$

其中 λ_r 是谐振腔共振时的共振波长, Δ_{FWHM} 是传输频谱的半峰全宽.由于模式 1 的透射率较高作为带阻滤波器的效果欠佳,并且在参数合适的时候有消失的趋势,在这里选择模式 1 消失的优化结构 a、b、c,以模式 2 为例来计算其品质因数 Q .除了图 1 所对应参数的结构外,此处选择结构优化后的参数为:(a) $I=350$ nm、 $D=150$ nm、 $H=120$ nm, (b) $I=330$ nm、 $D=150$ nm、 $H=105$ nm, (c) $I=350$ nm、 $D=170$ nm、 $H=105$ nm.其中 Origin、a、b 和 c 模式 2 所对应的共振波长分别为:1 008 nm、1 024 nm、954 nm 和 1 008 nm,与之相对应的半峰全宽分别为:68 nm、60 nm、62 nm 和 68 nm.由此可计算得到所对应的品质因数分别为: $Q_o=14.82$ 、 $Q_a=17.07$ 、 $Q_b=15.39$ 、 $Q_c=14.82$.优化后的结构除了消除模式 1 的影响外,大部分在品质因数是有所提高的,并且有部分结构的通带带宽拓宽,如图 7 中的结构 a.综上所述通过改变参数可以进一步提升系统性能,所以此 MIM 结构滤波器能够作为可调节的带阻滤波器.

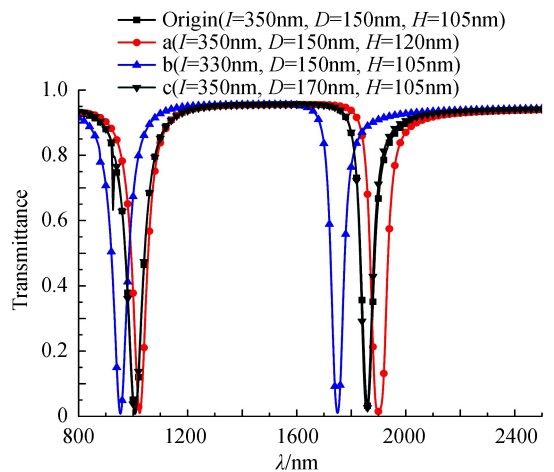


图 7 优化后的滤波器透射谱线

Fig.7 Transmission spectra for optimized parameter of the filter

3 两种基于方形凹环结构改进的滤波器设计

在方形凹环腔结构的基础上,对一些结构和参数做了改变.其中一种改变是把方形内环凹横腔中原来的介质由空气变为银,另一改变是把方形内环凹口所对应波导管的介质由空气变为银,其它结构与原方形凹环相同.两种新 MIM 结构滤波器分别与原结构滤波器对比的透射谱线如图 8.为了显示较好的效果,选取第一种结构改变的参数为(Struct 1) $I=350\text{ nm}$ 、 $D=150\text{ nm}$ 、 $H=125\text{ nm}$,与之相对比的原结构(Origin 1)的参数与其相同;第二种结构改变的参数为(Struct 2) $I=350\text{ nm}$ 、 $D=150\text{ nm}$ 、 $H=105\text{ nm}$,同样与之相对比的原结构(Origin 2)的参数与其相同.

由图 8(a)可以看出:由于横腔介质的改变,Struct 1 相对于 Origin 1 来说,模式 2 和模式 3 的共振位置均有一定的蓝移,且模式 2 蓝移的幅度较大.这就导致模式 2 和模式 3 之间的通带带宽有了很大幅度的增加,且模式 2 的透射率几乎没有变化,模式 3 的透射率也仅有轻微的增大.

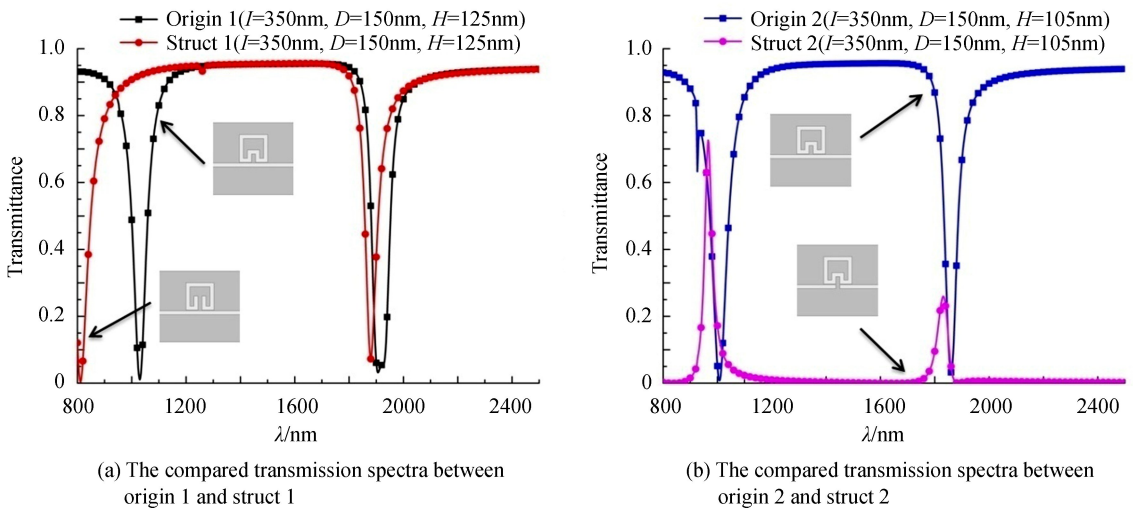


图 8 两种新的 MIM 结构与原结构透射谱线对比图

Fig.8 The compared transmission spectra between two new MIM structures and original structure

由图 8(b)可以看出:由于凹口对应处介质的改变,SPPs 波的前向传播被挡板阻挡而耦合进入了凹环,产生了共振,在 Struct 2 中出现了尖锐非对称的传输线型,这种由凹环结构和具有挡板的横腔发生相互作用而形成的共振现象通常就被称为法诺共振^[3].这导致其通带、阻带的区域与原 MIM 结构几乎是颠倒的,且其阻带的透射率极低.左侧通带可作为一个窄带带通滤波器,虽然其右侧通带的透射率不是太高,但是通过调节结构参数可进一步增加通带透射率,如减小方形内环凹进高度 H .此现象为改变部分结构参数实现带阻滤波器和带通滤波器相互转换提供了可能.

4 结论

本文运用有限元法分析了基于表面等离子体激元的方形凹环结构 MIM 滤波器的传输特性.通过调节结构参数 I 、 H 可以实现此 MIM 结构滤波器透射谱线的红移,而调节参数 D 虽不能实现透射谱线的移动,但是其阻带模式 1 会随结构参数的改变而出现退化直至消失.之后又提出两种新的改进结构,改进的滤波器结构 Struct 1 的透射谱线相较于原 MIM 结构滤波器来说,模式 2 和模式 3 之间有了更大的通带带宽.而改进的另一种滤波器结构 Struct 2 相较于原 MIM 结构滤波器出现了法诺共振,这使其通带和阻带与原结构几乎是颠倒的.综上所述,此系列滤波器以其多模式、窄阻带、可调节等特性在微纳光学集成电路尤其是波长选择器,波分复用系统中会有重要的应用价值.

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] WANG Zhen-lin. A review on research progress in surface plasmons[J]. *Progress in Physics*, 2009, **29**(3): 287-324.
王振林.表面等离激元研究新进展[J]. *物理学进展*, 2009, **29**(3):287-324.

- [3] AN Hou-lin, ZHANG Guan-mao, HU Nan, *et al.* Study on 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.
- [4] OZBAY E. Plasmonics: Merging photonics and electronics at nanoscale dimensions.[J]. *Science*, 2006, **311**(5758): 189-193.
- [5] ZIA R, SCHULLER J A, CHANDRAN A, *et al.* Plasmonics: the next chip-scale technology[J]. *Materials Today*, 2006, **9**(7-8): 20-27.
- [6] GRAMOTNEY D K, BOZHEVOLNYI S I. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(2): 83-91.
- [7] YUN Bin-feng, HU Guo-hua, CUI Yi-ping. 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): 385102-385109.
- [8] ZHENG Gai-ge, SU Wei, CHEN Yun-yun, *et al.* Band-stop filters based on a coupled circular ring metal-insulator-metal resonator containing nonlinear material[J]. *Journal of Optics*, 2012, **14**(5): 651-658.
- [9] WANG Bing, WANG Guo-ping. Plasmon Bragg reflectors and nanocavities on flat metallic surfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **87**(1): 013107.
- [10] WU Tie-sheng, LIU Yu-min, YU Zhong-yuan, *et al.* The sensing characteristics of plasmonic waveguide with a ring resonator[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(7): 7669-7677.
- [11] PENG Xiao, LI Hong-jian, WU Cai-ni, *et al.* Research on transmission characteristics of aperture-coupled square-ring resonator based filter[J]. *Optics Communications*, 2013, **294**(5): 368 - 371.
- [12] WANG Shao-wu, LI Yan, XU Qi-jiao, *et al.* A MIM filter based on a side-coupled crossbeam square-ring resonator[J]. *Plasmonics*, 2016, **11**(5): 1-6.
- [13] ZAVVARI M, AZAR M T H, ARASHMEHR A. Tunable band-stop plasmonic filter based on square ring resonators in a metal-insulator-metal structure[J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, **64**(20): 2221-2227.
- [14] HOSSEINI A, MASSOUD Y. Nanoscale surface plasmon based resonator using rectangular geometry[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(18): 181102 - 181102-3.
- [15] XIAO San-shui, LIU Liu, QIU Min. Resonator channel drop filters in a plasmon-polaritons metal[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(7): 2932-2937.
- [16] LIU Jian-long, FANG Guang-yu, ZHAO Hai-fa, *et al.* Plasmon flow control at gap waveguide junctions using square ring resonators[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2010, **43**(5): 055103.
- [17] ZAND I, ABRISHAMIAN M S, BERINI P. Highly tunable nanoscale metal-insulator-metal split ring core ring resonators (SRCRRs).[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(1): 79-86.
- [18] SONG Ci, QU Shi-nian, WANG Ji-cheng, *et al.* Plasmonic tunable filter based on trapezoid resonator waveguide[J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, **62**(17): 1400-1404.
- [19] WANG Tong-biao, LIU Nian-hua, YU Tian-bao *et al.* Splitting of transmission modes in a nanoscale metal ring resonator with a notch[J]. *Acta Physica Sinica* 2014, **63**(1): 307-312.
王同标, 刘念华, 于天宝, 等. 含有凹口的金属纳米环形共振器的本征模式分裂[J]. *物理学报*, 2014, **63**(1): 307-312.
- [20] LI Tao, WANG Yu-zhuo, WANG Xu-dong, *et al.* Novel switchable microwave photonic filter based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(8): 0820002.
李涛, 王宇焯, 王旭东, 等. 全新布里渊散射可切换微波光子滤波器[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(8): 0820002.
- [21] HAN Xu, WANG Tao, LI Xiao-ming, *et al.* Dynamically tunable by Kerr effect multichannel filter based on plasmon induced transparencies at optical communication range[J]. *Plasmonics*, 2015, **11**(3): 729-733.
- [22] MAHIGIR A, ZAND I, ABRISHAMIAN M S, *et al.* Selective-mode optical nanofilters based on plasmonic complementary split-ring resonators[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(7): 7516-7525.