

基于表面等离子激元的拱型谐振腔滤波器设计

吴梦¹, 梁西银^{1*}, 颜昌林², 祁云平¹

¹西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃 兰州 730070;

²兰州真空设备有限责任公司华宇分公司, 甘肃 兰州 730010

摘要 基于边界耦合的方法构造一种基于金属-介质-金属(MIM)纳米谐振腔波导组成的滤波器,该结构由 1 个拱型谐振腔和 1 个矩阵波导管组成。通过有限元法(FEM)仿真分析拱型腔波导 MIM 结构滤波器的传输特性曲线、谐振波长和磁场分布图。研究表明该拱型腔滤波器具有平滑的传输曲线、平坦的通带、较宽的带宽,且通带透射率高达 0.976,阻带透射率低至 0.001,这表示此结构滤波器具有良好的滤波特性。通过对该拱型结构滤波器进行参数优化,可以在光通信波段的三个通信窗口上实现通道选择的滤波功能,该结构滤波器在高密度光集成电路和纳米光学中具有广阔的应用前景。

关键词 表面光学; 金属-介质-金属(MIM)滤波器; 有限元方法; 拱型谐振腔; 边界耦合

中图分类号 O43

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.202417

Design of Arch-Type Resonance Cavity Filter Based on Surface Plasmon Polaritons

Wu Meng¹, Liang Xiyin^{1*}, Yan Changlin², Qi Yunping¹

¹ College of Physics Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

² Huayu Branch, Lanzhou Vacuum Equipment CO, Ltd., Lanzhou, Gansu 730010, China

Abstract A tunable filter based on a metal-insulator-metal (MIM) nano-cavity waveguide is constructed by using side-coupled method, which consists of an arch-type resonator and a rectangular waveguide. The transmission characteristic spectra, resonance wavelength distribution and magnetic field distribution of the arch-type cavity waveguide MIM structure filter have been numerically simulated and analyzed by finite element method (FEM). The results show that the arch-cavity filter has smooth transmission spectra, flat passband with transmittance of 0.976, stopband with transmittance of 0.001 and wide bandwidth, which shows that this structure filter has good filtering characteristics. By optimizing the parameters of the type structure filter, the channel selection filtering function can be realized in three communication windows of the optical communication band. This structure filter has great application prospects in high-density optical integrated circuits and nano-optics.

Key words optics at surfaces; metal-insulator-metal (MIM) filter; finite element method; arch-type resonance cavity; side-coupling

OCIS codes 240.6680; 130.3120; 230.7408

1 引言

表面等离子激元(SPPs)是通过金属中的自由电子和介质中的电磁场相互作用形成的一种沿着金属和介质交界面传播的电磁波,其在垂直于交界面的方向上以指数形式衰减,SPPs 作为能量和信息

载体具有突破传统光学衍射极限及局限性的特点,能够在次波长级别下引导和操控光,为制作纳米级光子元件和光学器件提供可能^[1-2]。基于 SPPs 的波导结构有金属-绝缘体-金属(MIM)和绝缘体-金属-绝缘体(IMI)两种,其中 MIM 结构波导因具有更小的尺寸、高约束性和在较宽的频谱范围内支持

收稿日期: 2019-03-20; 修回日期: 2019-04-03; 录用日期: 2019-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(61367005)、甘肃省科技厅重大专项(1602GKDA015)

* E-mail: 569613663@qq.com

次波长高群速传播的特点而被广泛关注和研究^[3-4]。目前,基于 MIM 结构的 SPPs 纳米光学器件在实验和理论分析上已经取得了众多成果,例如:全光开关^[5]、滤波器^[6-7]、分流器^[8-9]、Y 型组合器^[10]、法诺(Fano)共振^[11]、耦合器^[12-13]、马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪^[14-15]。

滤波器作为光通信和计算领域的主要技术之一,是纳米集成光学器件中不可或缺的一部分。基于 SPPs 的 MIM 结构滤波器按照通带类型可以分为窄带带阻型、窄带带通型、平顶带通型、平底带阻型;按照耦合方式可以分为直接耦合、边界耦合、口径耦合三种类型。直接耦合,即耦合腔体放置在波导管中间,对应的滤波器一般为带通滤波器^[16-17];边界耦合,即耦合腔体放置在波导管的一侧或者两侧,对应的滤波器一般为带阻滤波器^[18];口径耦合,即耦合腔体放置在波导管的一侧或者两侧并通过矩形口径与波导管相连,对应的滤波器一般为带通带阻混合型滤波器^[19-20]。Nezhad 等^[21]设计的管道型滤波器具有结构简单、通带透射率高、阻带透射率低的优点,但传输谱线不够平坦,可调参数比较单一。Zand 等^[22]设计的缺口环腔滤波器克服了传输谱线不够平坦的不足,但是存在通带的带宽不够大、阻带的透射率较高的问题。Song 等^[23]设计的梯形腔滤波器的通带透射率可达 0.9,但是不同模式阻带的透射率相差较大,低的能够接近 0,高的接近 0.2,无法很好地阻挡要求过滤掉的波。

因此本文提出一种由拱型谐振腔和矩形波导管利用边界耦合而成的 MIM 结构滤波器。运用有限元法(FEM)数值仿真分析该结构滤波器的传输特性,通过分析不同结构参数下滤波器的传输谱线对此滤波器的传输特性进行优化,优化结果表明:此滤波器具有更好的滤波特性(阻带透射率低,通带透射率高,下降沿和上升沿陡峭度较高等),能够根据实际要求高效率地实现波的通过和阻挡,并且可以应用于光通信波段三个通信窗口的通断选择。最后提出两种改进型结构,实现对此带阻滤波器谐振模式、透射率、带宽的调节,构造出性能优良的 Fano 共振结构和带通滤波器。

2 结构模型与方法

如图 1 所示,构建的 MIM 结构滤波器是由拱型腔与波导管通过边界耦合得到的,其中拱型腔的宽度为 t ,拱型腔上半部分大半圆和小半圆的半径

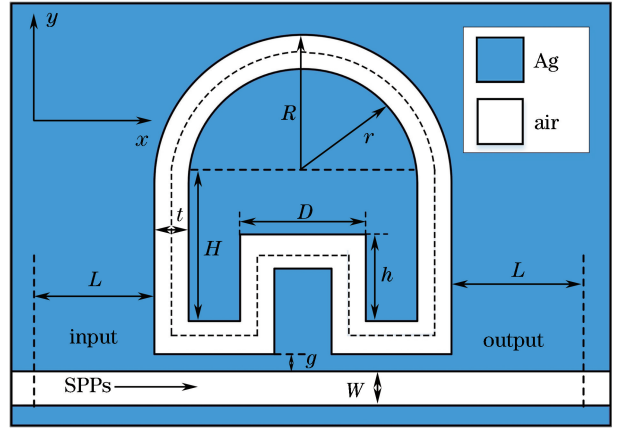


图 1 拱型谐振腔 MIM 滤波器结构示意图

Fig. 1 Diagram of arch-type resonance cavity MIM filter
分别为 R 、 r ,拱型腔距离波导的高度为 g ,腔体内侧的高度为 H ,凸起的宽度和高度分别为 D 、 h ,输入输出端口与拱型腔的距离为 L ,其中 W 固定为 30 nm, t 为 30 nm。因为 MIM 型波导的宽度小于入射波长,所以该结构下只有横磁基模(TM)通过,并且 TM 模式的色散关系为^[24]

$$\epsilon_{in} k_{z2} + \epsilon_m k_{z1} \coth\left(-\frac{ik_{z1}}{2}d\right) = 0, \quad (1)$$

式中, $k_{z1}^2 = \epsilon_{in} k_0^2 - \beta^2$, $k_{z2}^2 = \epsilon_m k_0^2 - \beta^2$, β 为 SPPs 在波导中的传播常数, ϵ_{in} 和 ϵ_m 分别为介质(空气)和金属(银)的介电常数, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波矢大小, λ 为等离子激元的谐振波长。使用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 5.3 计算分析此拱型腔结构的传输特性。在仿真计算中,采用完美匹配层,表面光源从左向右进行传输,透射率定义为

$$T = \frac{P_{Out}}{P_{In}}, \quad (2)$$

式中, P_{In} 为输入功率, P_{Out} 为输出功率。填充介质选用空气(air),其介电常数和折射率为 $\epsilon_{in} = n_{in}^2 = 1.0$;金属选用银(Ag),其相对介电常数 ϵ_m 采用 Drude 模型计算^[25],即

$$\epsilon_m = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}, \quad (3)$$

式中,无穷相对介电常数 $\epsilon_\infty = 3.7$,等离子激元频率 $\omega_p = 1.38 \times 10^{16}$ Hz,电子碰撞频率 $\gamma = 2.73 \times 10^{13}$ Hz, ω 为入射光的工作频率。

当 SPPs 波沿着波导管进行传输时,一部分波会进入拱型腔形成振荡,SPPs 波传播一个周期的相位变化为 $\Delta\varphi = 4\pi n_{eff} L_{eff}/\lambda + \varphi$,当 $\Delta\varphi = 2j\pi$ ($j=1, 2, 3, \dots$) 时,在腔内会形成稳定的驻波。因此,可以得到等离子激元的谐振波长^[26]为

$$\lambda = \frac{2n_{\text{eff}}L_{\text{eff}}}{j - \varphi/\pi}, \quad (4)$$

式中, L_{eff} 表示有效模式长度, φ 表示 SPPs 在腔体中传播的相位变化, n_{eff} 表示有效模式折射率, 满足 $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$, 正整数 j 表示 SPPs 波的波腹数, 此时在拱型腔体内能够形成稳定的驻波, 透射曲线出现波谷。

3 拱型谐振腔滤波器的传输特性分析

对结构参数进行初始化, 拱型腔的宽度 t 设置为 30 nm, 拱型腔上半圆腔的大半圆半径 R 和小半圆的半径 r 分别为 130 nm 和 100 nm, 拱型腔距离波导的高度 g 为 15 nm, 腔体内侧的高度 H 为 120 nm, 凸起的宽度 D 为 110 nm, 高度 h 为 75 nm, 对拱型滤波器的传输特性进行分析, 如图 2 所示。

通过拱型腔的传输谱线可以清楚地看到在 600~1800 nm 范围内存在两个波谷, 分别对应着不同的谐振模式, mode 1 和 mode 2 对应的谐振波长分别为 1550 nm 和 830 nm, 十分接近第三通信

表 1 不同结构滤波器传输特性对比

Table 1 Comparison of transmission characteristics with different filters

Structure	Transmittance (max)	Transmittance (min)	Max passband bandwidth /nm	Reference
Arch-type cavity	0.976	1.39×10^{-4}	>700	—
Concave ring resonator	0.96	0.01	>700	Ref. [27]
Circular ring resonator	0.91	0.02	<400	Ref. [18]
Trapezoid resonator	0.90	0.001	<320	Ref. [23]
Rectangle cavity	0.95	0.07	<200	Ref. [24]

为了更好地说明此结构中 SPPs 的传输特性和 model 1、model 2 产生的原理, 可以借助 SPPs 在拱型腔中的磁场分布图来分析此传输谱线。图 3(a)~(c) 分别为拱型腔 MIM 结构滤波器在不同入射波长下的磁场 ($|H_z^2|$) 分布图。SPPs 波被激发以后沿着波导管传输, 传输到拱型腔时发生耦合, 一部分 SPPs 波耦合到拱型腔中, 并在腔中沿顺时针和逆时针两个方向进行传输。传输一定程度后, SPPs 波将会从拱型腔中射出, 另外一部分 SPPs 波继续沿着波导管向前传输, 两部分 SPPs 波相互叠加, 当两者满足干涉相消的条件时, 对应传输谱线出现波谷, 并且因为直角之间的扰动效应^[28], 形成了不同的谐振模式, 例如 mode 1 和 mode 2。通过图 3(a)、(b) 可以看出 mode 1 和 mode 2 对应着不同的谐振模式, 此时磁场能量主要集聚在拱型腔内部, 透射出来的电磁能量几乎为 0。当两部分 SPPs 波满足干涉相长条件时, 对应的传输谱线出现高透射率,

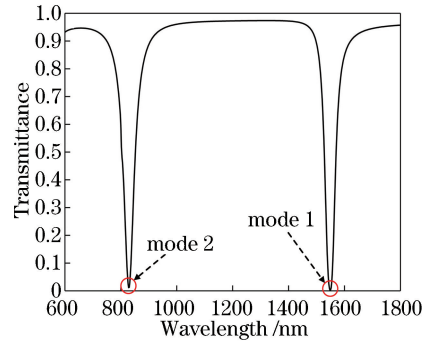


图 2 拱型腔 MIM 结构滤波器的透射谱线

Fig. 2 Transmission spectra of arch-type cavity MIM structure filter

窗口(1550 nm)和第一通信窗口(850 nm), 这两种模式的透射率都比较低, 最低能达到 0.001, 对应的阻带带宽非常窄, 并且在 mode 1 和 mode 2 之间存在高透射率且平滑的通带, 通带的透射率高达 0.976, 相对于很多结构滤波器^[18, 23-24, 27], 其具有更好的传输特性。主要滤波特性对比结果如表 1 所示, 由表 1 可知, 该型结构滤波器具有重要的应用价值。

通过图 3(c) 可以看出, 拱型腔中的电磁能量很少, 磁场能量主要集聚在波导管中, SPPs 波沿着波导管传播, 能量也随之投射出来, 从而得到较高的透射率。

4 结构参数对拱型谐振腔结构滤波器传输特性的影响

为研究结构参数变化对拱型谐振腔结构滤波器传输特性的影响, 采用控制变量法对其结构参数进行分析。保持其他结构参数为初始值 ($R=130$ nm、 $r=100$ nm、 $D=110$ nm、 $h=75$ nm) 不变, 首先改变结构参数 H , H 的变化范围为 110~130 nm, 步长为 5 nm, 对应的传输谱线如图 4(a) 所示。可以看出, 随着参数 H 的增加, 此结构滤波器的传输谱线产生红移现象, mode 1 和 mode 2 也随之变化。对红移现象进行分析后可知, 在图 1 中拱型腔内的虚线为 SPPs 的传输轨迹, 则 SPPs 在拱型谐振腔中传输的有效长度 $L_{\text{eff}} = \pi(R - t/2) + 2H + R$, 由于拱

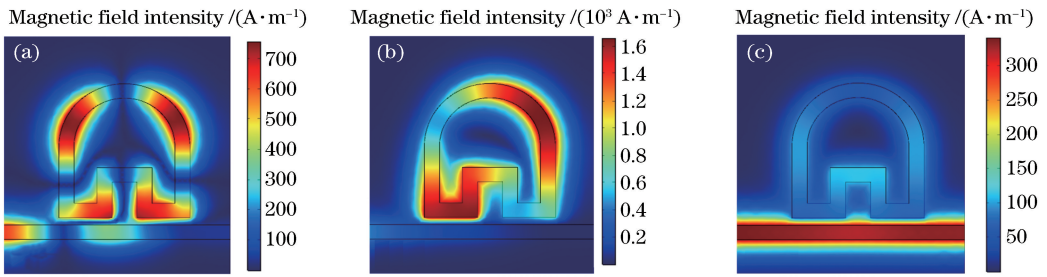


图3 拱型谐振腔结构滤波器的磁场分布对比。(a) $\lambda = 830 \text{ nm}$; (b) $\lambda = 1550 \text{ nm}$; (c) $\lambda = 1200 \text{ nm}$
 Fig. 3 Comparison of magnetic field distribution of arch-type resonance cavity structure filter.
 (a) $\lambda = 830 \text{ nm}$; (b) $\lambda = 1550 \text{ nm}$; (c) $\lambda = 1200 \text{ nm}$

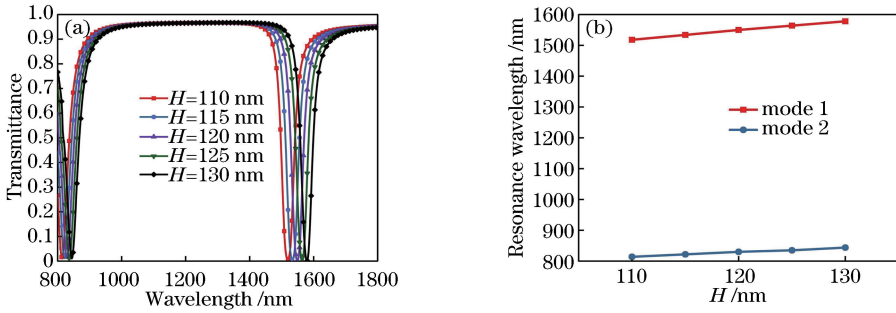


图4 改变结构参数 H 对拱型谐振腔滤波器传输谱线和共振波长的影响。(a) 传输谱线和结构参数 H 的关系;
 (b) 共振波长和结构参数 H 的关系
 Fig. 4 Effect on transmission spectra and resonance wavelength distribution of arch-type resonator filter by changing structural parameter H . (a) Relation between transmission spectra and parameter H ; (b) relation between resonance wavelength and parameter H

型腔内的填充介质为空气,所以滤波器的有效模式折射率 n_{eff} 为定值。当拱型腔的半圆腔的大半圆半径 R 保持初始值时,根据(4)式可知谐振波长与有效长度正相关,所以当 H 增大时,此滤波器的 L_{eff} 增大,则谐振波长随之增大,从而引起 mode 1 和 mode 2 的红移。图 4(b) 为两种模式的谐振波长与结构参数 H 的对应关系,可以计算得到 mode 1 谐振波长随结构参数 H 的变化率为 1.6, mode 2 的变化率约等于 3.2,与(4)式理论分析得到的谐振波长与有效长度是正相关关系,与模式数是负相关关系相互印证。

接下来,在保持其他结构参数为初始值的基础上 ($H = 120 \text{ nm}$, $r = 100 \text{ nm}$, $D = 110 \text{ nm}$, $h = 75 \text{ nm}$),改变结构参数 R , R 的变化范围为 $110 \sim 130 \text{ nm}$,步长为 5 nm 。如图 5(a) 所示,随着拱型腔上半圆腔大半圆半径 R 的增大,拱型结构滤波器的传输谱线发生红移。同样利用(4)式进行理论分析,由于拱型腔中填充介质空气保持不变,所以滤波器的有效模式折射率 n_{eff} 为定值,当其他结构参数保持初始值,结构参数 R 增大时,此滤波器的有效模式长度 L_{eff} 增大,则谐振波长随之增大。图 5(b) 是

谐振波长与结构参数 R 的变化关系,并且可以清楚地看出 mode 1 的变化速度比 mode 2 快,此理论分析结果与仿真计算结果同样相互印证。

然后在结构参数都保持初始值 ($R = 130 \text{ nm}$, $H = 120 \text{ nm}$, $r = 100 \text{ nm}$, $D = 110 \text{ nm}$, $h = 75 \text{ nm}$) 时,改变有效折射率来研究对拱型结构滤波器传输谱线的影响,改变拱型腔和波导管中的填充介质,将空气换成折射率较高的介质,进而实现折射率从 1.00 到 1.04 的改变,步长为 0.01。图 6(a) 是传输谱线和介质折射率的关系示意图,可以清楚地看到,随着拱型腔和波导管中填充介质折射率的增加,传输谱线发生红移。同样利用(4)式进行理论分析,由于结构参数保持不变,所以有效长度 L_{eff} 为定值,当拱型腔和波导管中填充介质的折射率增加时,此滤波器的有效模式折射率 n_{eff} 增大,则谐振波长随之增大。如图 6(b) 所示,谐振波长和填充介质折射率是正相关关系,计算得到 mode 1 随填充介质折射率的变化率为 1600, mode 2 的变化率为 800, mode 1 的变化率为 mode 2 的 2 倍,谐振波长与模式数呈负相关关系,与理论分析相互印证。

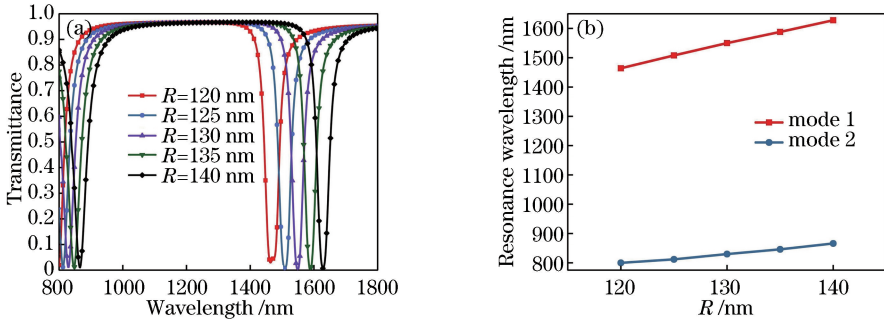


图 5 改变结构参数 R 对拱型谐振腔滤波器传输谱线和谐振波长的影响。(a) 传输谱线和结构参数 R 的关系；(b) 谐振波长和结构参数 R 的关系

Fig. 5 Effect on transmission spectra and resonance wavelength distribution of arch-type resonator filter by changing structural parameter R . (a) Relation between transmission spectra and parameter R ; (b) relation between resonance wavelength and parameter R

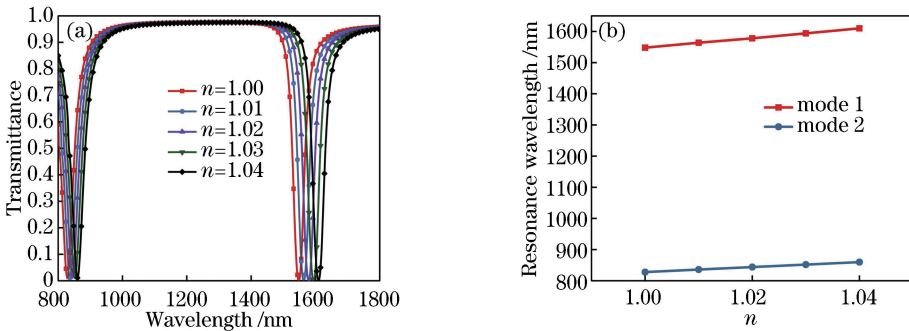


图 6 改变填充介质折射率 n 对拱型谐振腔滤波器传输谱线和谐振波长的影响。(a) 传输谱线和介质折射率 n 的关系；(b) 谐振波长和介质折射率 n 的关系

Fig. 6 Effect on transmission spectra and resonance wavelength distribution of arch-type resonator filter by changing dielectric refractive index n . (a) Relation between transmission spectra and insulator refractive index n ; (b) relation between resonance wavelength and insulator refractive index n

5 结构参数的优化和分析

通过分析总结结构参数对传输谱线的影响,进一步对拱型 MIM 结构滤波器进行优化,使得此滤波器能够更好地运用到三个通信窗口(850, 1310, 1550 nm)的调节,尤其是第二、三窗口。如图 7 所示,当结构参数设置为 $R = 135 \text{ nm}$, $H = 120 \text{ nm}$ 时,第一窗口位于传输谱线的阻带,第二、三窗口位于传输谱线的通带范围;当结构参数设置为 $R = 130 \text{ nm}$, $H = 20 \text{ nm}$ 时,第二窗口位于传输谱线的阻带,第一、三窗口位于传输谱线的通带范围;当结构参数设置为 $R = 130 \text{ nm}$, $H = 120 \text{ nm}$ 时,第三窗口位于传输谱线的阻带,第一、二窗口位于传输谱线的通带范围。此结构滤波器传输谱线的通带透射率较高(高达 0.976),阻带低至 0.001,能够很好地透射和阻碍通信波段,因此拱型谐振腔 MIM 结构滤波器能够实现对光通信波段中三个通信窗口通断的选

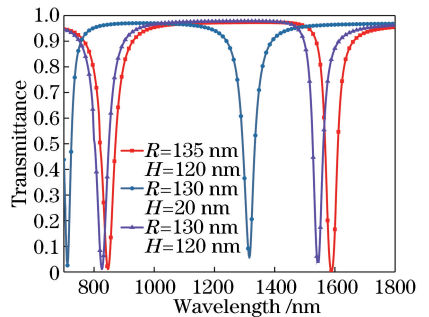


图 7 优化后的拱型谐振腔滤波器传输谱线
Fig. 7 Transmission spectra of optimized arch-type resonator filters

择性控制。

在拱型腔 MIM 结构滤波器的基础上,对结构和耦合方式进行一些改变,使此结构滤波器展现不同的传输特性。其中一种结构(optimized structure 1)是在波导管中加入矩形挡板(挡板材料为贵金属银),高度 h_{Ag} 为 30 nm,宽度 w_{Ag} 为 50 nm,其他结

构参数($R=130\text{ nm}$ 、 $H=120\text{ nm}$ 、 $r=100\text{ nm}$ 、 $D=110\text{ nm}$ 、 $h=75\text{ nm}$)与拱型基础结构(original structure)相同。另一种结构(optimized structure 2)是对拱型腔采用直接耦合的方法,波导与拱型腔的间距 d 为 10 nm ,其结构参数与拱型基础结构参数相同。

拱型基础结构滤波器与这两种改进结构滤波器的传输谱线如图8所示。由图8(a)可以看出当波导管中加入金属挡板后,其传输谱线出现了两个尖锐的波峰,这是由于在波导管中加入金属挡板后,SPPs波在波导管传输过程中被金属挡板阻挡,产生部分反射,该部分反射波与沿波导管传输的波形成干涉,复杂的耦合作用使得其相位发生了急剧且非对称的变化,这种强烈的相位变化产生了Fano共振现象,因此形成两个尖锐且非对称的波峰^[29-30],Fano共振结构在纳米生物传感器、非线性光学研究中具有一定的应用价值。

由图8(b)可以看出当拱型腔采用直接耦合的方法后,其传输谱线会产生两个透射率较高的波峰,在 840 nm 处的透射率为 0.76 ,在 1616 nm 处的透射率为 0.56 。这是由于SPPs波从入射端口沿着左侧波导管传输时被金属阻挡,部分SPPs波耦合进入拱型腔中并发生共振,最后由右侧波导管传输到出射端口。此结构可以实现带通滤波器的功能,在特定波长处实现窄带带通,在其余波长处呈现带阻特性,通过调节间距 d 和拱型腔的结构参数,可以进一步优化此结构的传输谱线,得到更理想的结果。

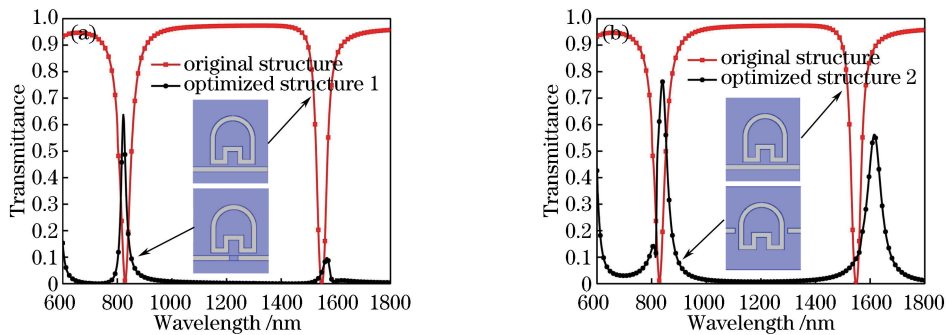


图8 两种改进型结构和原始结构的传输谱线图。(a)改进型结构1和原始结构的传输谱线对比;
(b)改进型结构2和原始结构的传输谱线对比

Fig. 8 Transmission spectra of two optimized structures and original structure. (a) Compared transmission spectra between optimized structure 1 and original structure; (b) compared transmission spectra between optimized structure 2 and original structure

6 结 论

采用有限元法分析基于边界耦合的拱型谐振腔MIM结构滤波器的传输特性。仿真结果表明,此滤波器具有阻带透射率低(低至 0.001)、通带平坦且透射率较高(高达 0.976)、通带带宽较宽、上升沿和下降沿十分陡峭等特性,相比于凹形滤波器^[23]、圆环形滤波器^[15]、梯形滤波器^[19]和矩形滤波器^[20]等,具有更好的滤波特性,可以作为良好的带阻滤波器。此外,可以通过改变该拱型结构参数实现滤波器传输性能的变化,为改进此结构滤波器提供可能。通过参数优化工作,该滤波器可以实现对光通信波段三个通信窗口($850, 1310, 1550\text{ nm}$)通道选择的滤波功能,并且提出的两种基于拱型腔的改进型结构(optimized structure 1, optimized structure 2)可以分别作为双重Fano共振结构和带通滤波器。综上所述,该滤波器在高密度集成光学电路设计和纳米

光学研究中具有一定的工程应用价值。

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] Liu L, Han Z H, He S L. Novel surface plasmon waveguide for high integration [J]. Optics Express, 2005, 13(17): 6645-6650.
- [3] Veronis G, Fan S H. Modes of subwavelength plasmonic slot waveguides [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(9): 2511-2521.
- [4] 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.
- [5] Zhu Y J, Huang X G, Mei X. A surface plasmon polariton electro-optic switch based on a metal-

- insulator-metal structure with a strip waveguide and two side-coupled cavities [J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29(6): 064214.
- [6] Luo X, Zou X H, Wen K H, *et al.* Narrow-band filter of surface plasmon based on dual-section metal-insulator-metal structure [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1123003.
罗昕, 邹喜华, 温坤华, 等. 双节 MIM 结构表面等离子体窄带光学滤波器 [J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1123003.
- [7] Mao Q, Tang X G, Meng F, *et al.* Tunable narrow-band filter with sub-wavelength grating structure by micro-optofluidic technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 042301.
毛强, 唐雄贵, 孟方, 等. 基于亚波长光栅结构的微流控可调窄带滤波器设计与分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 042301.
- [8] Liu J S Q, Pala R A, Afshinmanesh F, *et al.* A submicron plasmonic dichroic splitter [J]. Nature Communications, 2011, 2: 525.
- [9] Zhu X L, Yan W, Mortensen N A, *et al.* Bends and splitters in graphene nanoribbon waveguides [J]. Optics Express, 2013, 21(3): 3486-3491.
- [10] Gao H T, Shi H F, Wang C T, *et al.* Surface plasmon polariton propagation and combination in Y-shaped metallic channels [J]. Optics Express, 2005, 13(26): 10795-10800.
- [11] Hajebifard A, Berini P. Fano resonances in plasmonic heptamer nano-hole arrays [J]. Optics Express, 2017, 25(16): 18566-18580.
- [12] Im S J, Han Y H, Ho K S, *et al.* Nanoscale optical directional coupler [J]. Plasmonics, 2017, 12(6): 1741-1747.
- [13] Lai L P, Wang W F, Zhuang Q R. Design of LED Fresnel lens fiber bundle coupler [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 022201.
赖丽萍, 王文法, 庄其仁. LED 菲涅耳透镜光纤束耦合器设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 022201.
- [14] Bozhevolnyi S I, Volkov V S, Devaux E, *et al.* Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators [J]. Nature, 2006, 440(7083): 508-511.
- [15] Feng J, Pacifici D. A spectroscopic refractometer based on plasmonic interferometry [J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(8): 083104.
- [16] Guo Y H, Yan L S, Pan W, *et al.* Characteristics of plasmonic filters with a notch located along rectangular resonators [J]. Plasmonics, 2013, 8(2): 167-171.
- [17] Duan G Y, Lang P L, Wang L L, *et al.* A band-pass plasmonic filter with dual-square ring resonator [J]. Modern Physics Letters B, 2014, 28(23): 1450188.
- [18] Zheng G G, Su W, Chen Y Y, *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): 055001.
- [19] Peng X, Li H J, Wu C N, *et al.* Research on transmission characteristics of aperture-coupled square-ring resonator based filter [J]. Optics Communications, 2013, 294: 368-371.
- [20] Wang Z S, Zhang G M, Liu H R, *et al.* Design of the aperture coupled multi-functional asymmetric semi-circular cavity filter based on surface plasmon polaritons [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(4): 0423003.
王志爽, 张冠茂, 刘海瑞, 等. 基于表面等离子激元的口径耦合多功能非对称半圆腔滤波器设计 [J]. 光子学报, 2018, 47(4): 0423003.
- [21] Nezhad V F, Abaslou S, Abrishamian M S. Plasmonic band-stop filter with asymmetric rectangular ring for WDM networks [J]. Journal of Optics, 2013, 15(5): 055007.
- [22] 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.
- [23] Song C, Qu S N, Wang J C, *et al.* Plasmonic tunable filter based on trapezoid resonator waveguide [J]. Journal of Modern Optics, 2015, 62(17): 1400-1404.
- [24] Yun B F, Hu G H, Cui Y P. Resonant mode analysis of the nanoscale surface plasmon polariton waveguide filter with rectangle cavity [J]. Plasmonics, 2013, 8(2): 267-275.
- [25] Zhu J H, Wang Q J, Shum P, *et al.* A simple nanometric plasmonic narrow-band filter structure based on metal-insulator-metal waveguide [J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2011, 10(6): 1371-1376.
- [26] Shi S S, Wei Z C, Lu Z Y, *et al.* Enhanced plasmonic band-pass filter with symmetric dual side-coupled nanodisk resonators [J]. Journal of Applied Physics, 2015, 118(14): 143103.
- [27] Liu H R, Zhang G M, Wang Z S, *et al.* Design of

- the square concave ring resonator MIM filter based on the surface plasmon polaritons[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(2): 0223004.
- 刘海瑞, 张冠茂, 王志爽, 等. 基于 SPPs 的方形凹环结构 MIM 滤波器设计[J]. *光子学报*, 2018, 47(2): 0223004.
- [28] Zand I, Mahigir A, Pakizeh T, *et al.* Selective-mode optical nanofilters based on plasmonic complementary split-ring resonators [J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7516-7525.
- [29] Chen Z, Yu L, Wang L L, *et al.* A refractive index nanosensor based on Fano resonance in the plasmonic waveguide system [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(16): 1695-1698.
- [30] Yang J H, Song X K, Chen Z, *et al.* Tunable multi-Fano resonances in MDM-based side-coupled resonator system and its application in nanosensor [J]. *Plasmonics*, 2017, 12(6): 1665-1672.