

基于表面等离子激元的非对称矩形环腔电可调滤波器设计

吴梦¹, 梁西银^{1,2*}, 孙对兄¹, 谢凌菲¹, 陈瑞霖¹, 文大鹏¹, 张天辰¹

¹西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃 兰州 730070;

²甘肃省智能信息技术与应用工程研究中心, 甘肃 兰州 730070

摘要 基于口径耦合的方法提出了金属-绝缘体-金属电压可调滤波器,该滤波器由两个非对称的矩形环腔和一个矩形波导管组成,其中非对称的矩形环腔内填充有机电光材料 4-二甲氨基-N-甲基-4-甲苯磺酸盐(DAST)。利用有限元法仿真分析了非对称矩形环腔波导结构的透射光谱、谐振波长分布和磁场强度分布。结果表明,该滤波器的传输频谱比较平滑,通带带宽和阻带带宽较宽,通带的透射率高达 97%,阻带的透射率低至 0.01%。该滤波器的特性不仅可以通过改变结构参数进行调整,还可以通过施加控制电压进行调节,可调节性较高,且优化结构后阻带带宽更宽,可在集成光学中应用。

关键词 表面等离子激元; 金属-绝缘体-金属滤波器; 有限元法; 矩形环腔; 电光材料 4-二甲氨基-N-甲基-甲苯磺酸盐(DAST); 口径耦合

中图分类号 O43

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1423001

Design of Asymmetric Rectangular Ring Resonance Cavity Electrically Adjustable Filter Based on Surface Plasmon Polaritons

Wu Meng¹, Liang Xiyin^{1,2*}, Sun Duixiong¹, Xie Lingfei¹, Chen Ruilin¹,
Wen Dapeng¹, Zhang Tianchen¹

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

²Engineering Research Center of Gansu Province for Intelligent Information Technology and Application, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract Based on the aperture coupled method, a metal-insulator-metal voltage tunable filter is proposed. The filter consists of two asymmetric rectangular ring resonance cavities and a rectangular waveguide, in which the asymmetric rectangular ring cavity is filled with organic electro-optic material 4-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium tosylate. Finite element numerical simulation method is used to calculate and analyze the transmission spectrum, resonance wavelength distribution curve, and magnetic field intensity distribution of the asymmetric rectangular ring cavity waveguide structure. The results show that the filter has smooth transmission spectra, wide passband bandwidth with transmittance as high as 97%, and wide stopband bandwidth with transmittance as low as 0.01%. The characteristics of the filter can be adjusted not only by changing the structural parameters, but also by applying a control voltage. The adjustability of the filter is higher, and the proposed optimized structure has a wider stopband. Therefore, this type of filter can be well applied in integrated optics.

Key words surface plasmon polaritons; metal-insulator-metal filter; finite element method; rectangular ring resonance cavity; electro-optic material 4-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium tosylate; aperture coupling

OCIS codes 240.6680; 130.3120; 230.740

1 引言

表面等离子激元(SPPs)是一种沿金属和介质

交界面传播的电磁表面波,其在垂直于交界面的方向上以指数形式衰减。由于 SPPs 能克服传统的衍射极限在亚波长级别下引导和操纵光,因此可作为

收稿日期: 2020-03-05; 修回日期: 2020-04-07; 录用日期: 2020-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(61741513,61965015)

* E-mail: 569613663@qq.com

能量和信息的载体被应用到亚波长高密度集成光学器件中^[1-3]。基于 SPPs 的高密度集成光学器件主要有金属-绝缘体-金属(MIM)、绝缘体-金属-绝缘体(IMI)两种波导结构,其中 MIM 波导结构因频谱范围较宽、尺寸小,且支持亚波长和空间定域传输而备受关注^[4-5]。目前,基于 SPPs 的 MIM 结构已经被广泛应用于分波器^[6-7]、法诺共振^[8-10]、马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪^[11]、耦合器^[12]、滤波器^[13-15]、全光开关^[16]等光学器件的设计。

滤波器技术在纳米集成光学器件、光通信和计算领域中有重要意义。基于 SPPs 的 MIM 结构滤波器按通带类型可分为窄带带通型、窄带带阻型、平顶带通型、平底带阻型四种类型。按耦合方式可分为直接耦合、边界耦合、口径耦合三种类型。直接耦合一般构成带通型滤波器^[17-20],边界耦合一般构成带阻滤波器^[21-23],口径耦合一般构成带通、带阻混合型滤波器^[24]。其中直接耦合滤波器和边界耦合滤波器只有在谐振腔和波导管的距离小于 20 nm 时才会发生明显的耦合,这是由金属层中场的衰减长度决定的;而口径耦合滤波器则不需要该条件,且能通过改变口径的尺寸调节耦合强度^[25]。Nezhad 等^[26]设计的管道型滤波器结构简单、通带透射率高、阻带透射率低,但传输谱线不够平坦、可调参数比较单一。Han 等^[25]设计了口径耦合环形谐振器,大大提高了滤波器的可调节性,且下降沿和上升沿十分陡峭,但仍存在传输谱线不够平滑的问题。

本文基于口径耦合方法构建的电可调 MIM 结构滤波器,由非对称矩形环腔和矩形波导管组成。首先利用有限元法(FEM)对该滤波器的传输特性进行了数值仿真分析,在原始参数的基础上改变结构参数,分析其传输谱线,并对该滤波器的传输特性进行了优化。然后在保持结构参数不变的情况下,分析了外加控制电压对滤波器传输特性曲线的影响。最后提出了一种优化结构,分析了电压变化对其传输谱线的影响。

2 滤波器结构与仿真分析

2.1 结构与方法

实验设计的 MIM 结构滤波器如图 1 所示,是由两个矩形环腔与矩形波导管通过两个矩形口径耦合构成的非对称结构。其中, t 、 L 和 s 分别为矩形环腔的厚度、长和宽, h 为矩形口径的高度, A 为输入输出端口与矩形环腔的距离, d 为两个矩形环腔中心的距离, W 为矩形波导管的宽, $s = (L -$

50) nm, W 与 t 均固定为 50 nm。

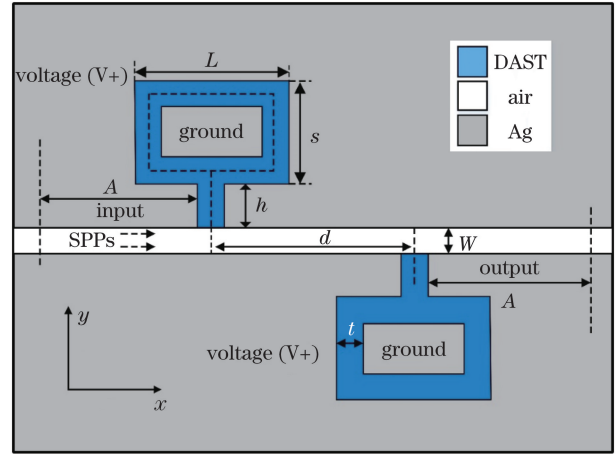


图 1 非对称矩形环腔 MIM 滤波器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an asymmetric rectangular ring resonator MIM filter

图 1 中的波导管部分为空气介质(介电常数 $\epsilon_{\text{air}} = 1.0$),矩形环腔为可通过外加电压操控折射率的电光(EO)材料,实验选取具有高非线性系数和低介电常数的 4-二甲氨基-N-甲基-4-甲苯磺酸盐(DAST)。由于 DAST 具有较大的离域 π 电子系统,相对于其他无机 EO 材料,如 LiNbO_3 (电光系数 $\kappa = dn/dE = 0.16 \text{ nm/V}$),DAST 的电光系数较大 ($\kappa = dn/dE = 3.41 \text{ nm/V}$)^[27],其中 n 和 E 分别为折射率和电场强度。电光材料的折射率与外加控制电压的关系为^[28]

$$n_{\text{eo}}(U) = n_{\text{eo}}(0) + \kappa U/t, \quad (1)$$

式中, $n_{\text{eo}}(U)$ 为 DAST 的折射率, U 为电压, $n_{\text{eo}}(0) = 2.2$ 。当矩形环腔外部的金属 Ag 施加一定大小的电压,内部的金属 Ag 接地时,矩形环腔的内外存在电压差也为 U 。由(1)式可知,电光材料的折射率变化与外加控制电压呈现线性关系。图 1 中的金属 Ag,其相对介电常数 ϵ_{m} 采用 Drude 模型计算^[29],可表示为

$$\epsilon_{\text{m}} = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_{\text{p}}^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}, \quad (2)$$

式中, $\epsilon_{\infty} = 3.7$ 为无穷相对介电常数, $\omega_{\text{p}} = 1.38 \times 10^{16} \text{ Hz}$ 为等离子体频率, $\gamma = 2.73 \times 10^{13} \text{ Hz}$ 为电子碰撞频率, ω 为入射光的工作频率。

实验用 FEM 计算分析了该矩形环腔结构的传输特性,采用二维结构仿真,SPPs 从左端沿着波导管入射,从右端出射,上、下端为完美匹配层(PML),设置端口类型为数值类型功能,网格为物理场控制网络,单元尺寸为极细化网格。传输过程中一部分波向前传播,另一部分波耦合进入矩形环

腔内形成振荡, $\Delta\varphi = 4\pi n_{\text{eff}} L_{\text{eff}}/\lambda + \varphi$ 为 SPPs 传播一个周期时发生的相位变化, 其中, L_{eff} 为有效波导长度, n_{eff} 为有效折射率, φ 为 SPPs 在金属-电解质界面处反射引起的相位变化, λ 为 SPPs 的谐振波长。在腔内形成稳定驻波的条件是 $\Delta\varphi = 2N\pi$ ($N = 1, 2, 3, \dots$), N 为 SPPs 的波腹数, 则^[30]

$$\lambda = \frac{2n_{\text{eff}}L_{\text{eff}}}{N - \varphi/\pi} \quad (3)$$

若 SPPs 在波导传播的相位常数为 β , 真空中的波矢量 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, 则 $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$, 其中 λ_0 为真空中的谐振波长。透射率 (transmittance) $T = P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$, 其中, $P_{\text{in}}, P_{\text{out}}$ 分别为输入功率和输出功率。

2.2 非对称矩形环腔滤波器的传输特性分析

对该滤波器的所有结构参数进行初始化, 矩形环腔的长 L 为 200 nm, 宽 s 为 150 nm, 与波导管的

距离 h 为 100 nm, 输入输出端口与矩形环腔的距离 A 为 150 nm。在外加电压 U 为 0 V 时, 比较了三种非对称矩形环腔结构 (两个矩形环腔均填充空气介质的结构 1; 一个矩形环腔填充空气介质, 一个矩形环腔填充电光材料 DAST 的结构 2; 两个矩形环腔均填充 DAST 材料的结构 3) 的传输特性曲线, 如图 2(a) 所示。可以看出, 相比其他两种结构, 结构 3 具有更好的传输特性。图 2(b) 为两个矩形环腔均填充 DAST 材料的结构透射率, 可以看出, 在波长为 800~2200 nm 之间有三个波谷, 分别对应 mode1 (1996 nm)、mode2 (1136 nm) 和 mode3 (908 nm)。该结构不仅具有更平滑的通带、更宽的通带带宽和阻带带宽, 且上升沿和下降沿更陡峭。因此, 两个矩形环腔均填充 DAST 的非对称结构可构成带阻、带宽混合型滤波器。

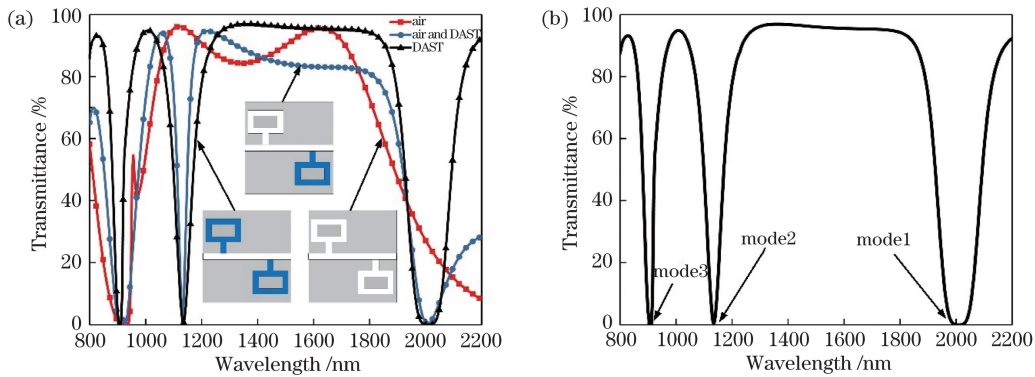


图 2 传输谱线图。(a) 三种不同结构矩形环腔的传输谱线; (b) 结构 3 的传输谱线

Fig. 2 Transmission spectrum diagram. (a) Transmission spectra of three different structures of rectangular ring cavity; (b) transmission spectrum of structure 3

为了进一步研究非对称矩形环腔滤波器结构中 SPPs 的传输特性, 分析了单矩形环腔结构、对称矩形环腔结构 ($d = 0$ nm) 和非对称矩形环腔结构 ($d = 360$ nm) 的传输特性, 结果如图 3 所示。可以发现, 单矩形环腔结构和对称矩形环腔结构均存在三个波谷。单矩形环腔结构的通带透射率较高, 但 mode1 的透射率 (6%) 不够低, 作为滤波器不能准确滤除相应波长。对称矩形环腔结构 mode2 的透射率接近于 0, 但通带不够平坦、不够宽, 且通带的透射率不够高。而非对称矩形环腔结构通带十分平坦, 通带带宽 (半峰全宽 (FWHM) 达到 880 nm) 和阻带带宽 (FWHM 达到 50 nm) 都非常宽, 且其通带透射率高达 97%, 阻带透射率低至 0.01%, 上升沿和下降沿陡峭, 这表明非对称矩形环腔结构结合了单矩形环腔结构和对称矩形环腔结构的优点。表 1 为不同结构滤波器传输特性的对比, 可以发现非对称矩形环腔滤波器具有良好的应用价值。

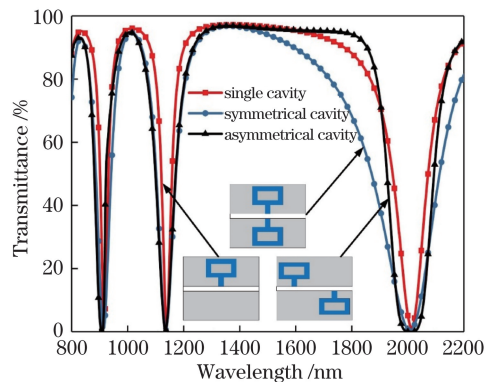


图 3 三种不同矩形环腔结构滤波器的传输谱线
Fig. 3 Transmission spectra of the three different rectangular ring cavity structure filters

为了分析 SPPs 在三种矩形环腔结构中的传输特性, 对三种矩形环腔结构中的磁场强度 ($|H_z^2|$) 分布进行了仿真。对于单矩形环腔结构, SPPs 沿波导管传播经过矩形环腔时, 一部分进入矩形环腔, 一

表 1 不同结构滤波器传输特性对比

Table 1 Comparison of transmission characteristics of different structure filters

Structure	Max transmittance /%	Min transmittance /%	Max passband bandwidth /nm	Voltage control capability	Reference
Rectangular ring cavity	97	0.02	880	yes	—
Concave ring resonator	96	1	>700	no	Ref. [31]
Circular ring resonator	91	2	<400	no	Ref. [32]
Trapezoid resonator	90	0.1	>320	no	Ref. [33]

部分在波导管中传输。可将矩形环腔看作一个“磁容器”，矩形环腔里填充的 DAST 有效折射率高于波导管中空气的有效折射率，因此会吸收更多磁场能量，从而增加 SPPs 的传输长度^[18]。当谐振腔的出射波与波导管中前向传输波的相位相反时，会出现相位干涉相消，及传输谱线会出现波谷，如图 3 所示。矩形环腔中直角间的相互干扰会导致多种谐振模式 (mode1 ~ mode3)^[14]，如图 4(a)~图 4(c) 所

示。此时磁场强度大部分集中在矩形环腔中，流入波导中的能量几乎为 0。SPPs 在对称矩形环腔结构中的传输与单矩形环腔结构相似，只是当波经过矩形环腔时，一部分波会进入两个矩形环腔，当两个矩形环腔的出射波和波导管中的传输波相位相反时，同样发生干涉相消现象，如图 4(d)~图 4(f) 所示。由图 3 可知，对于相同的入射波长，对称矩形环腔结构滤波器的透射率要小于单矩形环腔结构滤波

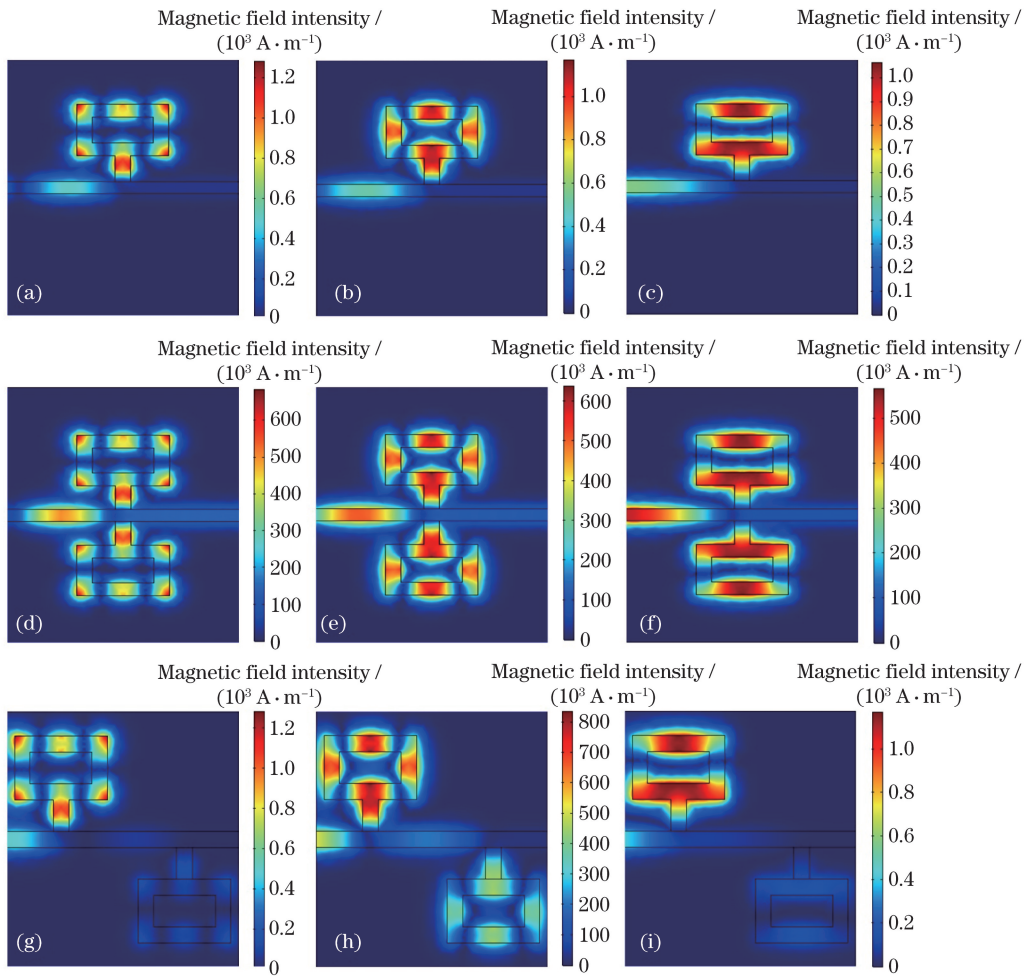


图 4 环腔结构的磁场分布。(a)~(c) $\lambda=916, 1140, 2012$ nm 的单矩形环腔结构;(d)~(f) $\lambda=912, 1136, 2012$ nm 的对称矩形环腔结构;(g)~(i) $\lambda=908, 1136, 1996$ nm 的非对称矩形环腔结构

Fig. 4 Magnetic field distribution of the ring cavity structure. (a)–(c) Single rectangular ring cavity structure with $\lambda=916, 1140, 2012$ nm; (d)–(f) symmetric rectangular ring cavity structure with $\lambda=912, 1136, 2012$ nm; (g)–(i) asymmetrical rectangular ring cavity structure with $\lambda=908, 1136, 1996$ nm

器的透射率,这也证实了“磁容器”的概念。图 4(g)~图 4(i)分别为非对称矩形环腔结构在 908 nm(mode3),1136 nm(mode2)和 1996 nm(mode1)波长下的稳态磁场强度分布,三个波长下的透射率均可以达到 0.01%。在非对称矩形环腔结构中,SPPs的传播与在对称矩形环腔结构中的传播相似。但当 SPPs 到达第一个矩形环腔时,一部分波进入矩形环腔,一部分波传输距离 d 后进入第二个矩形环腔。

3 不同结构参数对非对称矩形环腔结构滤波器传输特性的影响

为了研究非对称矩形环腔结构滤波器的传输特

性,用控制变量法分析不同结构参数对滤波器传输特性的影响。固定 $L=200\text{ nm}$ 、 $d=360\text{ nm}$ 不变,将 h 从 90 nm 增加到 130 nm,步长为 10 nm,得到非对称矩形环腔结构滤波器的透射率如图 5(a)所示。可以看出,透射率随着 h 的增加产生了明显的红移现象。原因是有效长度 $L_{\text{eff}}=2L+2s+h-3.5t$,当 L 和 s 保持初始值不变,外加电压 U 为 0 V 时矩形环腔中的电光材料 DAST 折射率保持不变,则 n_{eff} 为定值,根据(3)式可知,谐振波长与有效长度正相关,当 L_{eff} 随着 h 的增大而增大时,谐振波长也随之增大。图 5(b)为三种模式的谐振波长与 h 的对应关系,可以看出,三种模式的谐振波长和 h 正相关,这与理论结果相互印证。

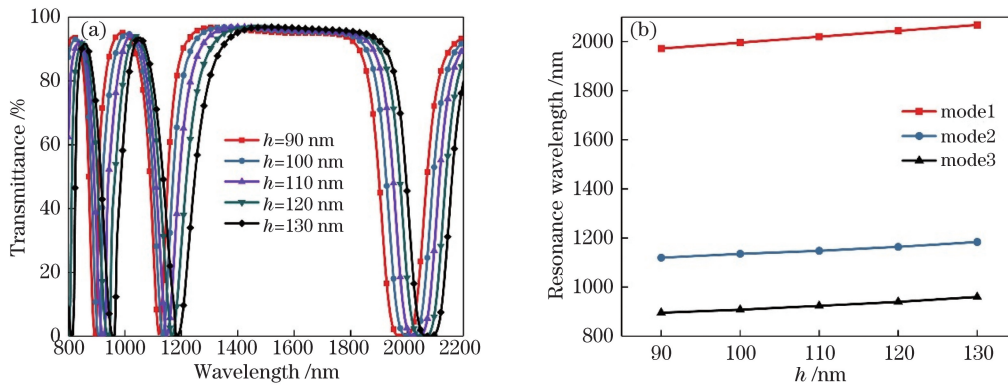


图 5 改变结构参数 h 对矩形环腔滤波器传输特性的影响。(a)传输谱线;(b)谐振波长

Fig. 5 Effect of changing the structure parameter h on the transmission characteristics of rectangular ring cavity filter.

(a) Transmission spectrum; (b) resonance wavelength

固定 $h=100\text{ nm}$ 、 $d=360\text{ nm}$ 不变,将 L 从 190 nm 增长为 210 nm,步长为 5 nm,得到非对称矩形环腔结构滤波器的透射率,如图 6(a)所示。可以看出,该结构滤波器的传输谱线随 L 的增大发生了红移现象。原因是当其他结构参数保持初始值时,外加

电压 U 保持为 0 V,矩形环腔中电光材料的折射率不发生改变,滤波器的 n_{eff} 为定值,有效长度 L_{eff} 随 L 的增大而增大,谐振波长也随之增大。图 6(b)为三种模式的谐振波长与 L 的对应关系,可以看出,三种模式的谐振波长和结构参数 L 正相关。经计

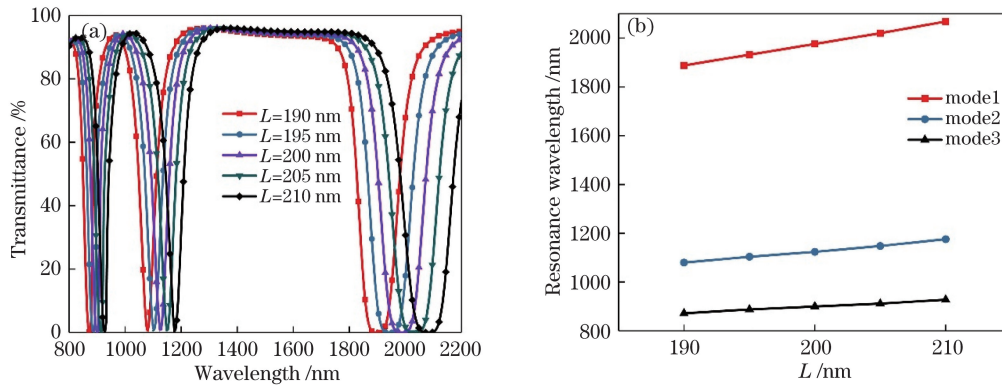


图 6 改变结构参数 L 对矩形环腔滤波器传输特性的影响。(a)传输谱线;(b)谐振波长

Fig. 6 Effect of changing the structure parameter L on the transmission characteristics of rectangular ring cavity filter.

(a) Transmission spectrum; (b) resonance wavelength

算得到 $\Delta\lambda_{\text{mode1}}/\Delta L \approx 2.8$, $\Delta\lambda_{\text{mode2}}/\Delta L \approx 5$, $\Delta\lambda_{\text{mode3}}/\Delta L \approx 8.8$, 其中 λ_{mode1} 、 λ_{mode2} 和 λ_{mode3} 分别表示三种模式的谐振波长。和(3)式理论分析的谐振波长与有效长度正相关,与模式数负相关相互印证。

固定数 $L = 200 \text{ nm}$ 、 $h = 100 \text{ nm}$ 不变,将 d 从 320 nm 增加到 400 nm ,步长为 20 nm ,同时为了保证滤波器结构为非对称结构,结构参数 d 不可以为 0 ,得到非对称矩形环腔结构滤波器的透射率,如

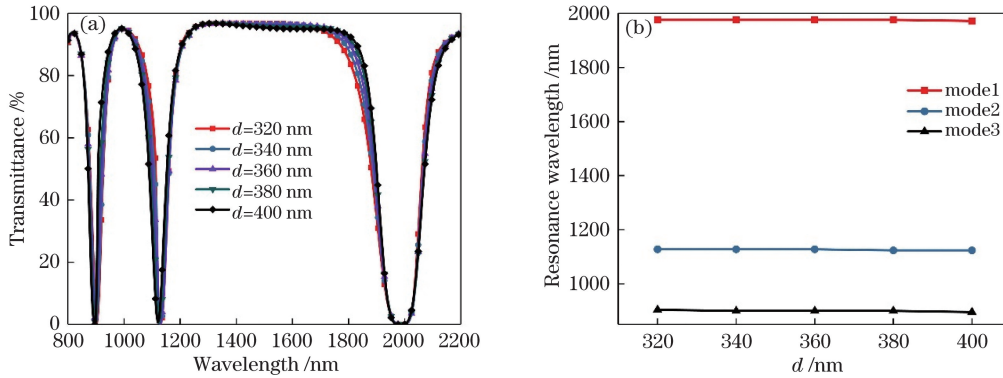


图 7 改变结构参数 d 对矩形环腔滤波器传输特性的影响。(a)传输谱线;(b)谐振波长

Fig. 7 Effect of changing the structure parameter d on the transmission characteristics of rectangular ring cavity filter.

(a) Transmission spectrum; (b) resonance wavelength

4 外加电压 U 对滤波器传输特性的影响

设置结构参数的初始值 $h = 100 \text{ nm}$ 、 $L = 200 \text{ nm}$ 、 $d = 360 \text{ nm}$,将矩形环腔中 DAST 材料的外加电压从 0 V 变化到 2 V ,步长为 0.5 V ,得到非对称矩形环腔结构滤波器的透射率,如图 8(a)所示。可以看出,随外加控制电压的增大,传输谱线发生了明显的红移现象。原因是当矩形环腔结构滤波器的结构参数保持初始值不变时, L_{eff} 为定值,电光材料 DAST 组成的矩形环腔的折射率会随外加电压的增大而增

图 7(a)所示。可以看出,随 d 的增加,三种谐振模式的位置分别保持在波长 908 、 1136 、 1996 nm 处未发生移动。原因是当外加电压为 0 V , n_{eff} 保持不变, d 的增加并不会引起 L_{eff} 的改变。图 7(b)为三种模式的谐振波长与 d 的对应关系,可以看出,谐振波长随 d 的增加并未有明显变化。计算得到 $\Delta\lambda_{\text{mode1}}/\Delta d \approx \Delta\lambda_{\text{mode2}}/\Delta d \approx \Delta\lambda_{\text{mode3}}/\Delta d \approx 0$,这与理论分析结果相互印证。

大,即整体结构的有效折射率 n_{eff} 会增大,而谐振波长与有效折射率 n_{eff} 正相关,因此外加控制电压的增大会导致谐振波长的增大。图 8(b)为三种模式的谐振波长和外加控制电压呈现的线性变化关系,可以发现,随外加控制电压的增大,谐振波长也线性递增。计算得到 $\Delta\lambda_{\text{mode1}}/\Delta U \approx 44$, $\Delta\lambda_{\text{mode2}}/\Delta U \approx 58$, $\Delta\lambda_{\text{mode3}}/\Delta U \approx 102$,谐振波长与模式数呈负相关,这与理论分析结果相互印证。根据这一特性,该矩形环腔结构滤波器可以根据实际需要,在不改变结构参数的情况下,通过改变外加电压就能实现过滤特定波长或特定波段的功能。

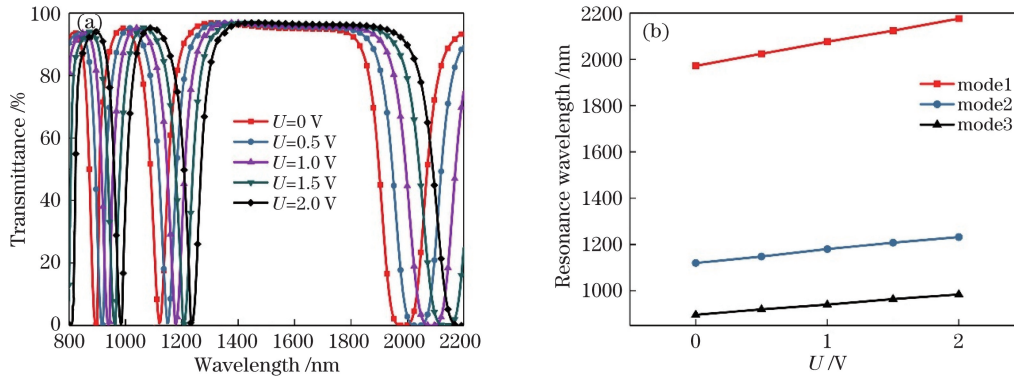


图 8 改变外加电压 U 对矩形环腔滤波器传输特性的影响。(a)传输谱线;(b)共振波长

Fig. 8 Effect of changing the applied voltage U on the transmission characteristics of rectangular ring cavity filter.

(a) Transmission spectrum; (b) resonance wavelength

5 基于非对称矩形环腔结构滤波器的优化

在非对称矩形环腔结构滤波器的基础上,对该结构进行进一步的优化。固定矩形环腔结构参数初始值 $L=200\text{ nm}$ 、 $h=100\text{ nm}$ 、 $U=0\text{ V}$ 、 $d=360\text{ nm}$,在原结构基础上添加两个相同的矩形环腔构成了对称的多重矩形环腔结构,如图 9(a)所示。SPPs 在多重矩形环腔结构中的传输与在非对称矩形环腔结构中的传播类似,不同的是当入射波传播时,一部分波会先分两个路径进入前两个矩形环腔,一部分波

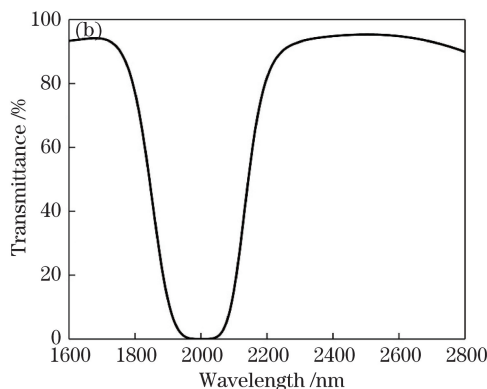
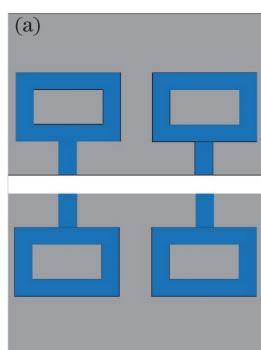


图 9 多重矩形环腔结构。(a)结构图;(b)传输谱线

Fig. 9 Multiple rectangular ring cavities structure. (a) Schematic diagram; (b) transmission spectrum

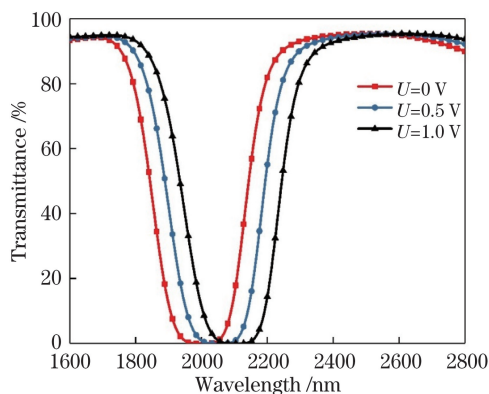


图 10 不同电压下的传输谱线

Fig. 10 Transmission spectra at different voltages

6 结 论

提出了一种基于口径耦合的电可调矩形环腔 MIM 结构滤波器,用 FEM 仿真分析了该结构的传输谱特性。实验结果表明,该滤波器可通过改变结构参数改变滤波器的传输性能,还可在不改变结构参数的情况下,通过调整电光材料 DAST 的外加控制电压实现滤波器传输谱线的移动(红移或蓝移),且共振波长与外加电压呈现线性关系。该结构滤波

传输距离 d 后进入后两个矩形环腔。用 FEM 对多重矩形环腔滤波器的传输特性进行仿真计算,得到传输谱线如图 9(b)所示。可以发现,相对于非对称矩形环腔滤波器,该结构滤波器的传输谱线具有更宽的阻带(达到 100 nm),通带和阻带都十分平滑,且具有陡峭的上升沿和下降沿,通带的透射率能达到 95.6% ,阻带接近于 0 。不同电压下的传输谱线如图 10 所示,通过改变外加控制电压,该结构滤波器的传输谱线同样也会发生红移,具有电压调节功能。因此能构建可调节的平顶带通、带阻混合滤波器。

器的透射率最高达到 97% ,阻带透射率最低为 0.01% ,通带带宽达到 880 nm ,阻带带宽达到 50 nm 。在该结构的基础上提出的多重矩形环腔结构,不仅具有平滑的通带和阻带,阻带的带宽也有明显的增加,达到了 100 nm 。综上所述,该结构滤波器具有平坦的高通带、较宽的 FWHM,以及电可调等特性,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] Zia R, Schuller J A, Chandran A, et al. Plasmonics: the next chip-scale technology [J]. Materials Today, 2006, 9(7/8): 20-27.
- [4] Veronis G, Fan S H. Modes of subwavelength plasmonic slot waveguides [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(9): 2511-2521.
- [5] 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*, 2010, 43(38): 385102.
- [6] Liu J S Q, Pala R A, Afshinmanesh F, et al. A submicron plasmonic dichroic splitter [J]. *Nature Communications*, 2011, 2: 525.
- [7] 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.
- [8] Qiao L T, Zhang G M, Wang Z S, et al. Study on the Fano resonance of coupling M-type cavity based on surface plasmon polaritons[J]. *Optics Communications*, 2019, 433: 144-149.
- [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] Wang M M, Yun L Y, Wang Y F, et al. Plasma refractive index nanosensor based on Fano resonance [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 052401.
- 王梦梦, 韵力宇, 王一飞, 等. 基于 Fano 共振的等离子体折射率纳米传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 052401.
- [11] 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.
- [12] Xu Q, Zhang X Q, Wei M G, et al. Efficient metacoupler for complex surface plasmon launching [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(5): 1701117.
- [13] Gao X, Che W Q, Feng W J. Novel non-periodic spoof surface plasmon polaritons with H-shaped cells and its application to high selectivity wideband bandpass filter[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 2546.
- [14] 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.
- [15] Guo Z H, Zhang G M, Qiao L T, et al. Design of the voltage tunable side-coupled asymmetric Y-type resonance cavity MIM filter based on surface plasmon polaritons[J]. *OSA Continuum*, 2020, 3(3): 609-619.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Zhang Z, Shi F H, Chen Y H. Tunable multichannel plasmonic filter based on coupling-induced mode splitting[J]. *Plasmonics*, 2015, 10(1): 139-144.
- [21] Wu M, Liang X Y, Yan C L, et al. Design of arch-type resonance cavity filter based on surface plasmon polaritons [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(20): 202417.
- 吴梦, 梁西银, 颜昌林, 等. 基于表面等离子激元的拱型谐振腔滤波器设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(20): 202417.
- [22] Zhu J H, Wang Q J, Shum P, et al. A nanoplasmonic high-pass wavelength filter based on a metal-insulator-metal circuitous waveguide[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2011, 10(6): 1357-1361.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Han Z, Van V, Herman W N, et al. Aperture-coupled MIM plasmonic ring resonators with sub-diffraction modal volumes[J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 12678-12684.
- [26] 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.
- [27] Geis W, Sinta R, Mowers W, et al. Fabrication of crystalline organic waveguides with an exceptionally large electro-optic coefficient [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(19): 3729-3731.
- [28] Zhu J H, Huang X G, Mei X. Plasmonic electro-

- optical switches operating at telecom wavelengths[J]. *Plasmonics*, 2011, 6(3): 605-612.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.