

内嵌矩形金属块纳米圆盘结构等离子体多通道 波分复用器研究

肖功利^{1,2*}, 徐俊林¹, 杨宏艳³, 韦清臣¹, 窦婉滢¹, 杨秀华¹, 李海鸥¹, 张法碧¹, 孙堂友¹

¹桂林电子科技大学广西精密导航技术与应用重点实验室, 广西 桂林 541004;

²广西信息科技实验中心, 广西 桂林 541004;

³桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004

摘要 提出了一种内嵌矩形金属块纳米圆盘结构, 利用该结构形成的法布里-珀罗腔来加强表面等离激元的耦合作用。该结构具有窄带宽高品质因子的滤波性能, 可通过多腔耦合形成多通道波分复用器。采用时域有限差分方法讨论有无内嵌矩形金属块和金属块的横纵向宽度及耦合距离对强透射现象的影响, 并根据其透射特性实现多通道波分复用器。研究发现, 当圆盘谐振器内嵌矩形金属块后, 滤波器具有较好的强透射现象, 其半峰全宽显著降低, 品质因子增加; 通过耦合多个内嵌矩形金属块圆盘谐振器构建的等离子体多通道波分复用器, 可实现双通道及三通道解复用功能, 各信道共振波长可通过谐振腔内嵌的金属块参数来调整, 传输效率可达到 70%, 最小插入损耗为 1.549 dB, 平均工作范围为 189 nm, 且不存在相邻信道串扰。这说明该结构具有较好的解复用分频特性。

关键词 集成光学; 波分复用器; 时域有限差分方法; 最小插入损耗; 传输效率; 圆盘谐振腔

中图分类号 TN252

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1206006

A Plasmon Multi-Channel Wavelength-Division Multiplexer Constructed with a Nanodisk Structure Embedded in a Rectangular Metal Block

Xiao Gongli^{1,2*}, Xu Junlin¹, Yang Hongyan³, Wei Qingchen¹, Dou Wanying¹,
Yang Xiuhua¹, Li Haiou¹, Zhang Fabi¹, Sun Tangyou¹

¹Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

²Guangxi Experiment Center of Information Science, Guilin, Guangxi 541004, China;

³School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract This study aims to propose a nanodisk structure embedding a rectangular metal block. The Fabry-Perot cavity formed by this structure is used to enhance the coupling effect of the surface plasmons. The structure has a narrow bandwidth, high quality factor, and high filtering performance. Herein, a multi-channel wavelength-division multiplexer is constructed by multiple cavities coupling. The influence of the horizontal and vertical widths of the rectangular metal block and the coupling distances between the embedded disk and rectangular metal block on the transmission characteristics of the device is described with the time-domain finite-difference method, for which a device without embedded rectangular metal block is used as the control group. A multi-channel wavelength division multiplexer is realized according to its transmission characteristics. The filter shows strong transmission characteristics when the disk resonance filter is embedded in the rectangular metal block; its full width at half maximum is significantly reduced and the quality factor is increased. By coupling a number of inline rectangular-metal-block/disk resonators, we construct the filter. Such plasmon multi-channel wavelength-division multiplexers can provide

收稿日期: 2018-07-04; 修回日期: 2018-07-29; 录用日期: 2018-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(61465004, 61765004)、广西自然科学基金项目(2017GXNSFAA198164, 2016GXNSFAA380006)、桂林电子科技大学研究生教育创新计划项目(2017YJXC41)、广西精密导航技术与应用重点实验室基金项目(DH201804, DH201703)

* E-mail: xgl.hy@126.com

two- and three-channel demultiplexing functions. The resonant wavelength of each channel can be adjusted by selection of the parameters of the embedded metal block in the resonator, the transmission efficiency can reach up to 70%, and the minimum insertion loss is 1.549 dB. The average operating range is 189 nm, and there is no adjacent-channel crosstalk. We demonstrate that the proposed structure has good de-multiplexing frequency characteristics.

Key words integrated optics; wavelength division multiplexer; time domain finite difference method; minimum insertion loss; transmission efficiency; disk resonator

OCIS codes 060.4510; 230.7580; 230.7408; 240.6680

1 引 言

表面等离子体激元(SPP)是沿着金属和电介质界面传播的倏逝波,在克服光的衍射极限方面有着潜在的应用^[1-3]。为了提高集成度和制造超密集光子集成电路,基于 SPP 的金属-介质-金属(MIM)等 离子体波导是目前最有前景的解决方案之一^[4-7]。目前已经通过数值模拟或实验证明了各种无源等 离子体激元器件,如耦合器^[8]、布拉格光栅反射器^[9]、Mach-Zehnder 干涉仪^[10]、环形谐振器^[11]、等 离子传感器^[12-13]、齿形波导滤波器^[14-17]和等 离子激元准直器^[18-21]等。然而,对其他的一些光学器件的研究还不够深入,如波分复用器、解复用器^[22-27]等,还 存在很多的问题;譬如文献[22]和文献[24]研究的是 基于矩形耦合谐振腔的解复用器,其主要问题是传 输损耗较大,传输效率较小;而文献[23]研究的基 于 H 形谐振腔的解复用器,虽然有较好的传输效率, 但其插入损耗较大,工作范围较小。

基于上述原因,本文提出一种内嵌矩形金属块 纳米圆盘结构,对非线性介质填充金属块纳米盘谐 振器与波导组成的纳米尺度系统的传输响应进行了 数值分析和研究,并通过有限差分域(FDTD)方 法进行了验证。通过改变内嵌矩形金属块的几何参 数(纳米盘谐振器的金属块的参数),来改变滤波器 结构的传输响应,其半峰全宽(FWHM)显著降低, 品质因子增加;基于内嵌金属块圆盘谐振器构建的 等 离子多通道波分复用器,可实现双通道和三通道 解复用功能,各信道的波长可通过各谐振腔内嵌金 属块参数来修改。优化这些结构参数后发现该结构 可获得较好的解复用分频特性,传输效率比文 献[22]的结果增加 20%,最小插入损耗相比于 文献[24]增加 0.358 dB,平均工作范围相比于 文献[23]增加 99 nm,且不存在相邻信道串扰。该 发现为下一代高性能等 离子体光学解复用器设计提 供了理论基础。

2 结构设计数值分析

图 1(a)为设计的内嵌矩形金属块的纳米圆盘

谐振器结构,该结构由两个波导和一个带金属块的 纳米盘谐振器组成,本文采用 Ag 作为金属材料,这 是由于其在可见光谱范围的 SPP 效应较好^[1],另外 采用 SiO₂ 作为基底。谐振腔与入射波导和出射波 导之间均存在一定的距离,谐振腔一端与入射波导 耦合,另一端与出射波导耦合。图 1(b)为此结果的 二维平面图,其中波导宽度 w 为 50 nm,金属薄膜 的长、宽 $L_1=L_2=1 \mu\text{m}$,纳米盘谐振器 r 的半径为 100 nm。波导和纳米圆盘谐振器之间的耦合距离 d 被设置为 10 nm。表面激发的 SPP 通过隧道效应 穿越到出射波导,平面光由出射波导透射光出射。 利用 SPP 谐振腔的共振耦合作用,通过调节谐振腔 内金属块的尺寸、谐振腔与入射波导和出射波导的 间距等结构参数,可体现不同的性质,实现不同的 功能。对于 MIM 结构,SPP 的色散关系可表示为^[28]

$$\frac{\epsilon_0 p}{\epsilon_s k} = \frac{1 - \exp(kd)}{1 + \exp(kd)}, \quad (1)$$

式中: $p = \sqrt{\beta_{\text{spp}}^2 - \epsilon_s k_0^2}$ 为波数的承载功率, β_{spp} 为传 播常数, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的光波数; ϵ_0 为真空(空 气)介电函数; ϵ_s 为银的介电函数。为了更好地匹配 真实材料,使用 Lorentz-Drude 模型^[29] 来表示银的 介电函数:

$$\epsilon_s = \epsilon_\infty - \sum_{m=0}^M \frac{G_m \Omega_m^2}{\omega_m^2 - \omega^2 + i\omega\Gamma_m}, \quad (2)$$

式中: ϵ_∞ 为高频介电函数; G_m 为振子的强度; Ω_m 为

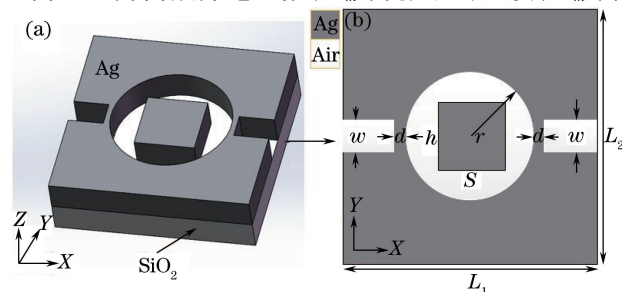


图 1 内嵌矩形金属块圆盘谐振器结构。(a) 三维结构示 意图;(b) XY 平面二维结构示意图

Fig. 1 Inline rectangular block disk resonator structure. (a) Schematic of three-dimensional structure; (b) schematic of XY two-dimensional structure

等离子体频率; ω_m 为谐振频率; Γ_m 为阻尼因子; ω 为入射光的圆频率, m 为该条件下的振荡器数量。单个物理量的值可以在文献[30]中找到。

3 结果与讨论

采用 FDTD 方法^[31] 模拟纳米圆盘谐振器内部金属块参数对滤波器传输特性的影响。在模拟中, x 和 y 方向的网格大小设置为 $\Delta_x = \Delta_y = 5$ nm, 光透过内嵌金属块圆盘谐振腔结构的透射率定义为

$$T = P_{\text{out}}/P_{\text{in}} = |E_{\text{out}}/E_{\text{in}}|^2, \quad (3)$$

式中: P_{out} 为内嵌矩形金属块圆盘谐振腔结构透射光波功率; P_{in} 为入射光波功率; E_{out} 为透射光波电场强度; E_{in} 为入射光波电场强度。图 2(a) 为有内嵌矩形金属块的圆盘谐振滤波器透射光谱图(实线)。为了对比, 也展示了无内嵌矩形金属块的圆盘谐振滤波器透射光谱图, 如图 2(a) 所示(虚线)。为了研究谐振模式的特性, 滤波器的品质因子被定义为^[32]

$$Q = \frac{\lambda}{\omega_{1/2}}, \quad (4)$$

式中: λ 为 MIM 波导的共振波长; $\omega_{1/2}$ 为谐振半峰全宽(FWHM)。模式透射光谱在这两种结构中都出现了单共振峰, T_{peak} 、 λ_{peak} 分别为共振峰的透射率和波长。圆盘谐振腔的半径 $r = 100$ nm, 内嵌矩形金属块参数横向宽度 $S = 30$ nm、纵向宽度 $h = 40$ nm。无内嵌矩形金属块的共振波长 λ_{peak} 为 480 nm, 其 T_{peak} 为 80%, 半峰全宽为 162 nm, 品质因子为 3; 内嵌矩形金属块的共振波长 λ_{peak} 为 630 nm, 其 T_{peak} 为 78%, 半峰全宽为 54 nm, 品质因子为 12。此结果表明, 与无内嵌矩形金属块的圆盘谐振器结构相比, 该复合结构呈现出较好的滤波特性, 半峰全宽减小了 108 nm, 品质因子增加 9, 且共振峰的位置也出现了红移现象。这是由于复合结构中形成了 F-P 腔(法布里-珀罗腔), 加强了耦合作用^[33]。相比于同类型圆盘谐振滤波器^[34], 其透射率增加 10%, 品质因子增加 3。为了深入说明上述情况, 分别模拟了两种情况的电场强度, 如图 2(b)、(c) 所示。可以看出, 当圆盘谐振腔无内嵌矩形金属块时, 光透射系数主要由 SPP 决定; 当谐振腔内嵌矩形金属块后, 在谐振腔内形成 F-P 腔, 能量被局域在矩形金属块周围, 使得共振滤波范围变小, 继而减小滤波的半峰全宽, 增大品质因子。但能量在 F-P 腔内不断谐振会激发高阶模进而引起损耗, 使 T_{peak} 略微减小。

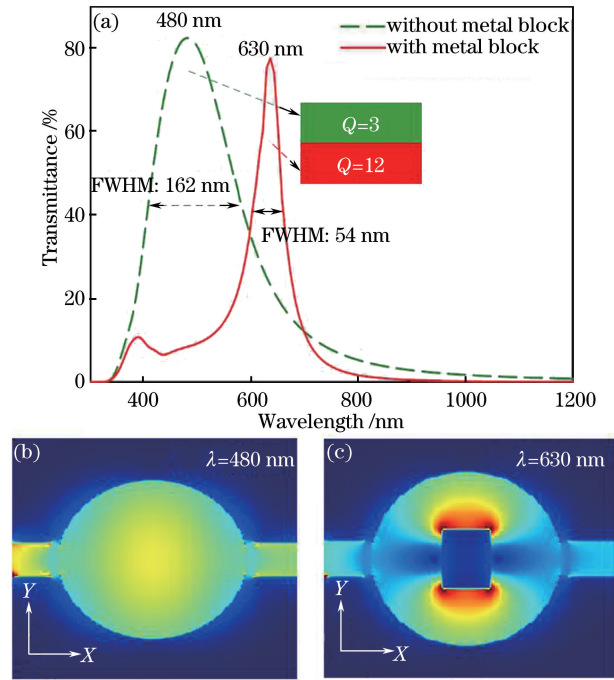


图 2 有、无内嵌矩形金属块两种圆盘谐振滤波器。(a) 透射光谱图; (b) 480 nm 和 (c) 630 nm 共振波长处的电场能量密度分布

Fig. 2 Two kinds of disk resonator filters with or without embedded rectangular metal block. (a) Transmission spectra; electric field energy density distribution at (b) 480 nm and (c) 630 nm resonant wavelengths

为了深入研究内嵌矩形金属圆盘谐振器结构的透射现象, 详细探讨了图 2(b) 中 h 、 S 、 d 对 T_{peak} 和 λ_{peak} 的影响。首先讨论了内嵌矩形金属块纵向宽度对滤波性能的影响。令圆盘谐振器的半径 $r = 100$ nm, 波导宽度 $w_1 = w_2 = 50$ nm, 波导和纳米圆盘谐振器之间的耦合距离 $d = 10$ nm, 当内嵌矩形金属块的横向延伸方向的长度 $S = 30$ nm, 调节谐振腔内金属块垂直于出射波导延伸方向宽度 h 分别为 20, 40, 60, 80, 100, 120 nm, 如图 3(a) 所示。结果表明, 共振峰随着 h 的增加而发生红移, 可以实现在一定范围内的选频效果。但 h 增加导致谐振腔内损耗增加, 其透射率逐渐减小。从图 3(b) 中可以看出, 共振波长几乎与 h 呈线性关系。模拟结果显示通过调整内嵌金属块的纵向长度可以线性改变滤波器透射共振波长。

内嵌矩形金属块横向宽度 S 变化对滤波特性的影响, 如图 4 所示。谐振腔半径、波导宽度以及波导和纳米圆盘谐振器之间的耦合距离保持不变。当内嵌矩形金属块的纵向延伸方向的长度 $h = 30$ nm, 调节谐振腔内矩形金属块垂直于出射波导延伸方向

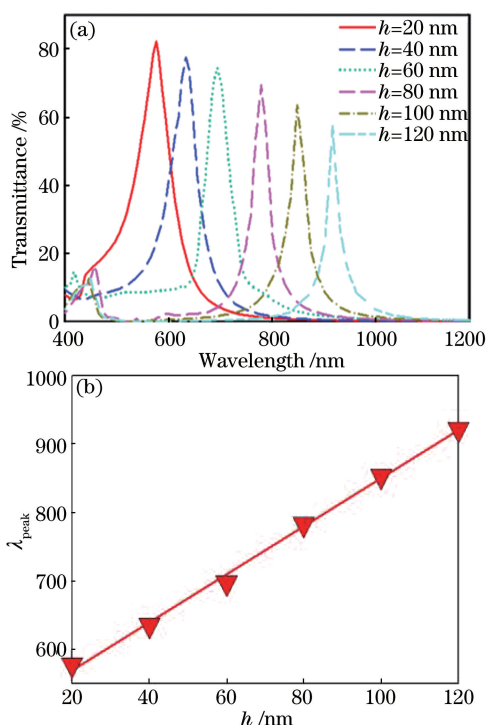


图 3 (a)不同的纵向宽度 h 下内嵌矩形金属圆盘结构透射率与共振波长的关系; (b)共振波长和纵向宽度 h 的关系

Fig. 3 (a) Relationship between transmittance and resonance wavelength of embedded rectangular metal disk structure with different vertical widths h ; (b) relationship between resonance wavelength and length h

宽度 S 分别为 20, 40, 60, 80, 100, 120 nm。结果表明,通过改变 S ,透射峰发生轻微的红移。由于内嵌金属块较宽,随着 S 的变化,从入射波导产生的等光子激元与内嵌金属块在耦合腔中发生干涉,透射谱产生侧峰;随着金属块平行于出射波导延伸方向宽度 S 增加,光干涉不断增加,在波的左侧产生一个侧峰,而左侧的峰随着宽度 S 不断增加而红移。模拟结果显示通过调整内嵌金属块的横向宽度也可以改变滤波器的共振波长,并且宽度 S 的增加不会减小其透射效率;但由于光的干涉作用,当 S 逐步增大,产生的侧峰会影响滤波器的性能。

此外,研究发现波导和纳米圆盘谐振器之间的耦合距离 d 对共振峰透射率有很大的影响。保持谐振腔半径、波导宽度和耦合距离不变,当内嵌矩形金属块的纵向延伸方向的长度 $h = 30$ nm,横向方向的长度 $S = 30$ nm,令耦合距离 d 分别为 10, 15, 20, 25 nm。结果表明,随着耦合距离 d 不断增加,外部损耗将迅速下降,但是内部损耗几乎不变,因此透射

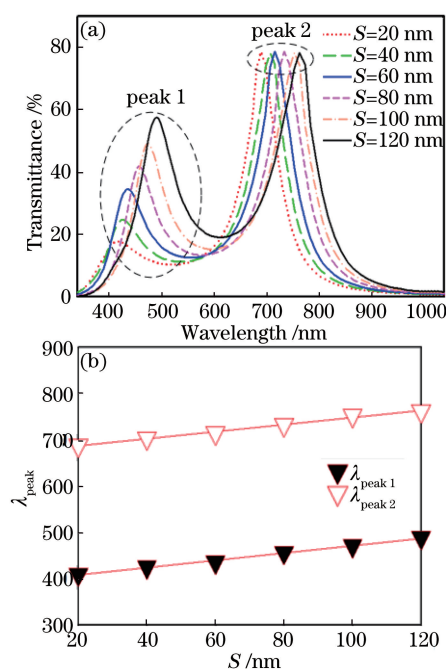


图 4 (a)不同的横向宽度 S 下内嵌矩形金属圆盘结构透射率与共振波长的关系; (b)共振波长和横向宽度 S 的关系

Fig. 4 (a) Relationship between transmittance and resonance wavelength of embedded rectangular metal disk structure with different lateral widths S ; (b) relationship between resonance wavelength and length S

峰将会逐渐减小,如图 5 所示。结论表明,共振峰的透射率大小可以通过改变耦合距离 d 来控制,并随着 d 的增大而大幅度减小。

根据上述基于内嵌矩形金属块纳米盘谐振器等光子体滤波器的特点,提出并研究了一种的双通道波分复用器结构。图 6(a)为内嵌不同参数矩形金属块的两个谐振腔放置在波导附近的示意图。由于该结构是单输入、双输出结构,将每个输出标记为 channel 1、channel 2。相应的结构参数设置为 $r = 10$ nm,波导宽度 $w = 50$ nm,矩形金属块参数 $S_1 = S_2 = 40$ nm, $h_1 = 80$ nm, $h_2 = 120$ nm。图 6(b)显示了两通道的透射光谱。channel 1、channel 2 的共振峰波长分别为 558 nm 和 741 nm,对应的电场能量密度分布图如图 6(c)和(d)所示。入射光由入射波导进入,与两个不同的谐振进行耦合,产生不同透射光谱,实现波分复用功能。同时,通过设置不同谐振内的金属块的参数,可以很好地调节波分复用器的分频参数。

根据上述结构继续增加谐振腔,可构建单输入、三输出解复用器。如图 7(a)所示,三个内嵌

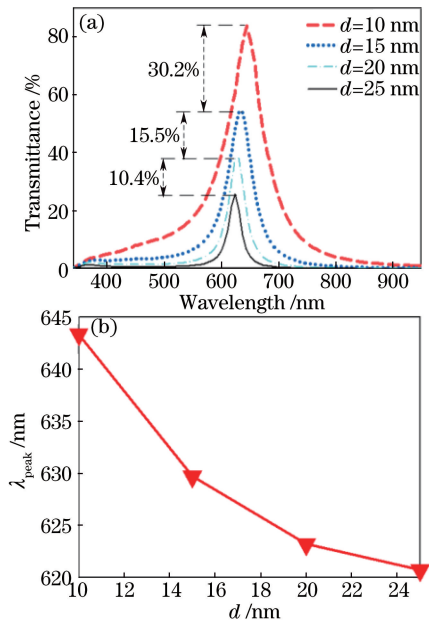


图 5 (a)不同的耦合距离 d 下内嵌矩形金属圆盘结构透射率与共振波长的关系；(b)共振波长和耦合距离 d 的关系

Fig. 5 (a) Relationship between transmittance and resonance wavelength of embedded rectangular metal disk structure with different coupling distances d ; (b) relationship between resonance wavelength and coupling distance d

不同参数矩形金属块的谐振腔放置在波导附近。由于该结构是单输入、多输出结构,因此将每个输出标记为 channel 1、channel 2 和 channel 3。相应的结构参数设置为 $r = 100$ nm,波导宽度 $w = 50$ nm, $S_1 = S_2 = S_3 = 40$ nm, $h_1 = 80$ nm, $h_2 = 100$ nm, $h_3 = 120$ nm。中心波长最小插入损耗被定义为^[35]

$$L_1 = -10 \lg \frac{P_1}{P_{01}}, \quad (5)$$

式中: L_1 为最小插入损耗; P_1 为波长为 λ_1 的光束在输出端的光功率; P_{01} 为波长为 λ_1 的光束在输出端合路信号中的光功率。图 7(b)显示了三个通道的透射光谱。channel 1, channel 2, channel 3 的三个通道的透射峰值波长分别 558, 748, 936 nm, 对应的电场能量密度分布图如图 7(c) ~ (e) 所示。结果表明,入射光由入射波导进入,与三个不同的谐振进行耦合,产生不同透射光谱,实现了波分复用功能,传输效率可达到 70%,最小插入损耗为 1.549 dB,平均工作范围为 189 nm,且不存在相邻信道串扰。与文献[20]相比,该结构有更好的传输效率;与文献[21]相比,该结构无相邻信道串扰,同时有更大的平均工作范围,说明内嵌金属块圆盘谐振结构在高性能的 SPP 解复用器的设计中具有重要作用。

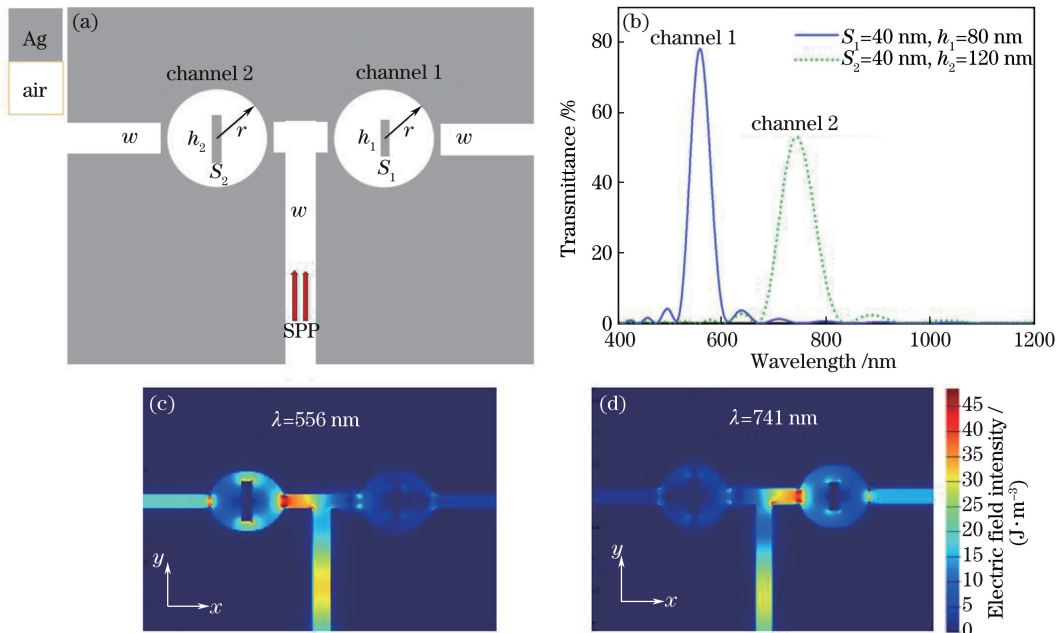


图 6 (a)基于内嵌金属块滤波器双通道波分复用器结构示意图；(b)多通道波分复用器透射光谱图；多通道波分复用器分别在(c) $\lambda = 556$ nm、(d) $\lambda = 741$ nm 下的电场能量密度分布图

Fig. 6 (a) Schematic of dual-channel wavelength division multiplexer based on embedded metal block filter; (b) transmission spectrum of tunable multi-channel wavelength demultiplexer; electric field intensity distribution of tunable multi-channel wavelength demultiplexer at (c) $\lambda = 556$ nm, (d) $\lambda = 741$ nm

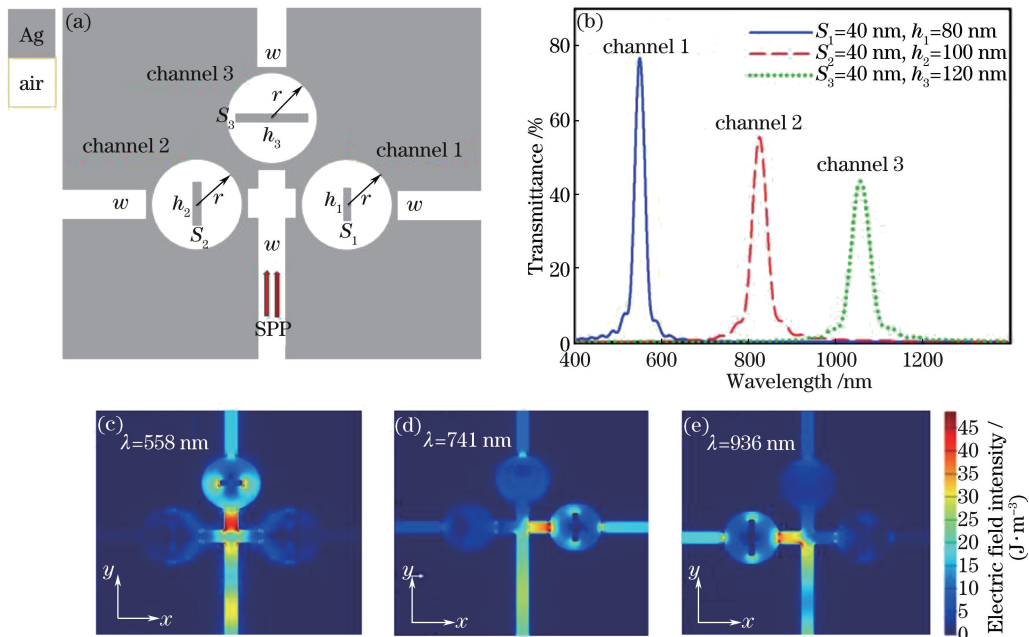


图 7 (a) 基于内嵌金属块滤波器三通道波分复用器结构示意图; (b) 多通道波分复用器透射光谱图; 多通道波分复用器分别在 (c) $\lambda = 558 \text{ nm}$ 、(d) $\lambda = 748 \text{ nm}$ 、(e) $\lambda = 936 \text{ nm}$ 下的电场能量密度分布图

Fig. 7 (a) Structural diagram of three-channel wavelength division multiplexer based on embedded metal block filter; (b) transmission spectrum of tunable multi-channel wavelength demultiplexer; electric field intensity distribution of tunable multi-channel wavelength demultiplexer at (c) $\lambda = 558 \text{ nm}$, (d) $\lambda = 748 \text{ nm}$, (e) $\lambda = 936 \text{ nm}$

4 结 论

提出了一种内嵌矩形金属块的 MIM 等离子体纳米圆盘谐振滤波器结构。采用 FDTD 方法从理论上探讨了金属块的宽 h 、长 S 和耦合距离 d 等几何参数对内嵌矩形金属块圆盘谐振器滤波特性的影响,并研究了基于该现象设计的多通道解复用器的分频特性。主要研究结果如下:在圆盘谐振腔内嵌入矩形金属块可以减小滤波器的半峰全宽,增加滤波器的品质因子,其半峰全宽仅为 54 nm ,品质因子为 12 。该结构与未内嵌金属块的结构相比半峰全宽减小 108 nm ,品质因子增加 9 。通过修改金属块的 h 、 S 和 d 等参数的值可以很容易地改变滤波器的滤波波长,增加 h 和 S ,其共振峰都发生红移;增加 d ,可以进一步减小半峰全宽,但是其透射率会显著下降。基于以上特性,设计了一种单输入、多输出的波分复用器,可以实现双通道及三通道解复用功能。修改各谐振腔内嵌矩形金属块参数,可使各信道的传输效率达到 70% ,最小插入损耗为 1.549 dB ,平均工作范围为 189 nm ,且不存在相邻信道串扰,该结构具有较好的解复用分频特性。这些研究成果为设计下一代高性能等离子体光解复用器提供了理论基础。

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 X, Wang P, Chen C, *et al.* Active modulation of plasmonic signal with a subwavelength metal/nonlinear dielectric material/metal structure [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(6): 584-587.
- [3] Li X, Tan Q, Bai B, *et al.* Tunable directional beaming assisted by asymmetrical SPP excitation in a subwavelength metallic double slit [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(5): 052401.
- [4] Lal S, Link S, Halas N J. Nano-optics from sensing to waveguiding [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(11): 641-648.
- [5] Maier S A, Kik P G, Atwater H A, *et al.* Local detection of electromagnetic energy transport below the diffraction limit in metal nanoparticle plasmon waveguides [J]. *Nature Materials*, 2003, 2(4): 229-232.
- [6] Ozbay E. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions [J]. *Science*, 2006, 311(5758): 189-193.
- [7] Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I. Plasmonics beyond the diffraction limit [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(2): 83-91.

- [8] Zhao H W, Huang X G, Huang J T. Surface plasmon polaritons based optical directional coupler [J]. Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy, 2008, 51(12): 1877-1882.
- [9] Hossieni A, Massoud Y. A low-loss metal-insulator-metal plasmonic Bragg reflector[J]. Optics Express, 2006, 14(23): 11318-11323.
- [10] 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.
- [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] Xiao G L, Liu X G, Yang H Y, *et al.* Refractive index sensing property based on extraordinary optical transmission of metal circular arc hole array[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0224001.
肖功利, 刘小刚, 杨宏艳, 等. 基于金属圆弧孔阵列强透射的折射率传感特性[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0224001.
- [13] Wu D Q, Huang C, Yang W F. Improvement on pH sensing properties based on surface treatment of graphene plasma[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 012401.
吴冬芹, 黄翀, 杨玮枫. 基于石墨烯等离子体表面处理改善 pH 传感特性的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 012401.
- [14] Lin X S, Huang X G. Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometric sizes [J]. Optics Letters, 2008, 33(23): 2874-2876.
- [15] 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.
- [16] Tao J, Huang X G, Lin X S, *et al.* A narrow-band subwavelength plasmonic waveguide filter with asymmetrical multiple-teeth-shaped structure[J]. Optics Express, 2009, 17(16): 13989-13994.
- [17] Tao J, Huang X G, Lin X S, *et al.* Systematical research on characteristics of double-sided teeth-shaped nanoplasmonic waveguide filters [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(2): 323-327.
- [18] 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.
肖功利, 刘利, 杨宏艳, 等. 基于微腔耦合结构金属弯曲波导的光透射特性[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1213001.
- [19] Yu N F, Blanchard R, Fan J, *et al.* Quantum cascade lasers with integrated plasmonic antenna-array collimators[J]. Optics Express, 2008, 16(24): 19447-19461.
- [20] Yu N, Wang Q J, Pflügl C, *et al.* Semiconductor lasers with integrated plasmonic polarizers[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(15): 151101.
- [21] Yu N F, Kats M A, Pflügl C, *et al.* Multi-beam multi-wavelength semiconductor lasers [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(23): 239901.
- [22] Yu N F, Wang Q J, Kats M A, *et al.* Designer spoof surface plasmon structures collimate terahertz laser beams[J]. Nature Materials, 2010, 9(9): 730-735.
- [23] Hu F F, Zhou Z P. Wavelength filtering and demultiplexing structure based on aperture-coupled plasmonic slot cavities [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2011, 28(10): 2518-2523.
- [24] Azar M T H, Zavvari M, Arashmehr A, *et al.* Design of a high-performance metal-insulator-metal plasmonic demultiplexer[J]. Journal of Nanophotonics, 2017, 11(2): 026002.
- [25] Zhan S P, Li H J, Cao G T, *et al.* Theoretical analysis of plasmon-induced transparency in ring-resonators coupled channel drop filter systems [J]. Plasmonics, 2014, 9(6): 1431-1437.
- [26] Hu F F, Yi H X, Zhou Z P. Wavelength demultiplexing structure based on arrayed plasmonic slot cavities[J]. Optics Letters, 2011, 36(8): 1500-1502.
- [27] Tao J, Huang X G, Zhu J H. A wavelength demultiplexing structure based on metal-dielectric-metal plasmonic nano-capillary resonators[J]. Optics Express, 2010, 18(11): 11111-11116.
- [28] Kaminow I P, Mammel W L, Weber H P. Metal-clad optical waveguides: analytical and experimental study[J]. Applied Optics, 1974, 13(2): 396-405.
- [29] Ruan Z C, Qiu M. Enhanced transmission through periodic arrays of subwavelength holes: the role of localized waveguide resonances [J]. Physical Review Letters, 2006, 96(23): 233901.
- [30] Rakic A D, Djuricic A B, Elazar J M, *et al.* Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices[J]. Applied Optics, 1998, 37(22): 5271-5283.
- [31] Kaminow I P, Mammel W L, Weber H P. Metal-clad optical waveguides: analytical and experimental study[J]. Applied Optics, 1974, 13(2): 396-405.
- [32] Wang B, Wang G P. Plasmon Bragg reflectors and nanocavities on flat metallic surfaces [J]. Applied

- Physics Letters, 2005, 87(1): 013107.
- [33] Haynes C L, van Duyne R P. Nanosphere lithography: a versatile nanofabrication tool for studies of size-dependent nanoparticle optics[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2001, 105(24): 5599-5611.
- [34] Lu H, Liu X M, Mao D, *et al.* Tunable band-pass plasmonic waveguide filters with nanodisk resonators[J]. Optics Express, 2010, 18(17): 17922-17927.
- [35] Beatty R W. Insertion loss concepts[J]. Proceedings of the IEEE, 1964, 52(6): 663-671.