

亚波长圆环形分解复用器谐振模分离研究

王 柳 曾亚萍*

桂林理工大学理学院, 广西 桂林 541004

摘要 设计了一种亚波长圆环形三通道金属-介质-金属(MIM)波导分解复用器。利用时域有限差分(FDTD)法,在可见光到近红外频段研究了该结构的电磁传输特性,发现满足谐振条件的电磁波可以在圆环中发生多级谐振现象。通过优化出口通道在圆环上的位置,成功实现了圆环二、三、四级谐振模式的分离功能。此外,圆环的谐振波长可以通过设置圆环的半径进行调制。该微结构对光波具有束缚与传输功能,解决了光信号谐振模式分离传输问题,在光集成与通讯等方面有较好的应用前景。

关键词 光学器件;亚波长结构;金属-介质-金属波导;分解复用器;谐振模;时域有限差分法

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.042301

Research on the Resonance Modes Separation of the Subwavelength Ring-Shaped Demultiplexer

Wang Liu Zeng Yaping

College of Science, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract A subwavelength ring-shaped three channels metal-insulator-metal waveguide demultiplexer is proposed. The transmission characteristics are investigated using finite-difference time-domain method from visible to near infrared spectrum. The multi order resonance phenomenon is found in the ring when the electromagnetic waves satisfy the resonance condition. The second, third, fourth order resonance waves can be separated by optimizing output ports next to the ring. Moreover, the resonance wavelengths of the ring can be controlled by setting the radius of the ring. The structure has light trapping and transmission functions, which can solve the modes separation transmission of signal. This design structure may be useful in optical integration and communication.

Key words optical devices; subwavelength structure; metal-insulator-metal waveguide; demultiplexer; resonance mode; finite-difference time-domain method

OCIS codes 230.7408; 240.6680; 050.6624

1 引 言

金属表面等离子体(SPPs)由于能够克服衍射极限,有望为实现以光子输运为基础的集成光子器件开辟新道路^[1]。基于SPPs的微型波导结构由于能够很好地束缚和调控电磁波的传输引起了学术界的广泛关注,如基于SPPs的纳米波导被提出^[2],其引起的奇异穿透性亦被证实^[3]。微型光波导结构主要包括介质-金属-介质(IMI)和金属-介质-金属(MIM)等类型。而MIM型波导结构具有尺寸小、束缚电磁波能力强、传播距离远等优点^[4]。因此,基于SPPs的MIM型波导在光子器件中将更具潜在应用价值。

基于MIM波导的各类光子器件被研究者提出:布拉格反射器^[5]、sinc形滤波器^[6]、圆盘型及可调带通滤波器^[7-8]、布拉格滤波器和共振器^[9]、扇形定向耦合器^[10]。此外,基于MIM波导的各种电磁性能可以被实现,如三角环对电磁波滤波传输率的调控^[11];基于线性介质微腔的多通道等离子体滤波功能^[12];基于树桩型法布里-珀罗(F-P)谐振腔耦合共振的诱导透明滤波功能^[13];重叠双圆环滤波功能^[14];双纳米圆盘的透明传输^[15];矩形

收稿日期: 2015-09-27; 收到修改稿日期: 2015-10-17; 网络出版日期: 2016-03-22

基金项目: 广西高校科研项目(KY2015LX123)、桂林理工大学引进人才科研启动项目(002401003422)

作者简介: 王 柳(1986—),男,博士,讲师,主要从事表面等离子体亚波长光子学方面的研究。

E-mail: hnwangliu@163.com

*通信联系人。E-mail: yapingz@126.com

微腔多路分频功能^[16];圆盘型三通道波长分离功能^[17];矩形微腔独立 F-P 谐振模^[18],单边耦合矩形多重 F-P 谐振^[19]等。

前期对各类 MIM 波导结构的研究,主要利用微腔的共振作用实现电磁波的滤波^[16-15]、分频等功能^[16-19],而对微腔的谐振模及调控方面的报道非常少见。最近,纳米圆盘型 MIM 波导中谐振频率的抑制、劈裂现象被报道^[20];随后,基于 MIM 波导的多矩形谐振腔的滤波器被提出^[21]。基于亚波长 MIM 波导的多级谐振模的分离对光子器件具有重要意义。本文利用时域有限差分(FDTD)数值模拟方法,在可见光到近红外频段研究了亚波长圆环型 MIM 波导的电磁传输特性,设计了圆环型三端口 MIM 波导分解复用器并探究了其电磁传输特性。结果表明,亚波长圆环对电磁波具有良好的谐振功能,其谐振模可通过不同亚波长端口进行分离传输。

2 模型与方法

图 1 为所设计的二维(2D)圆环形三端口 MIM 波导分解复用器结构示意图。图中灰色部分表示金属银,白色部分表示介质空气。在可见光到近红外频段,金属银为典型的色散材料,其相对介电常数参照光学常数手册^[22]。空气端口 port 1 与端口 port 2、port 3 之间夹角分别为 90°和 120°,端口与圆环的宽度固定为 $w=50\text{ nm}$,圆环与各端口耦合间隙固定 $g=10\text{ nm}$,圆环半径 r 为内、外半径 r_1 、 r_2 的平均值。由于波导的宽度设定为 50 nm ,所以波导中支持 TM 模式波^[20],其色散关系为^[23]:

$$\varepsilon_d k_m + \varepsilon_m k_d \tanh\left(\frac{k_d}{2}w\right) = 0, \quad (1)$$

式中 $k_m = (\beta^2 - \varepsilon_m k_0^2)^{1/2}$, $k_d = (\beta^2 - \varepsilon_d k_0^2)^{1/2}$, 其中 ε_m 、 ε_d 分别为金属和介质的相对介电常数, β 为 SPPs 的传播常数, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空波矢(λ 为真空波长), $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$ 为波导的有效折射率。

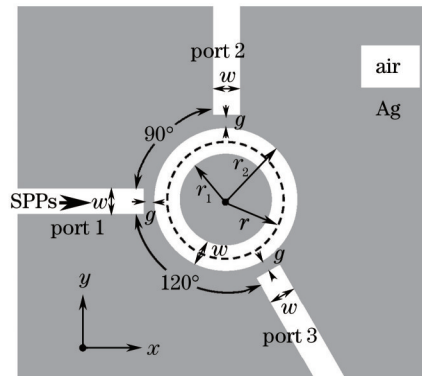


图 1 二维圆环型三端口 MIM 波导分解复用器结构图

Fig.1 Structure of 2D ring-shaped MIM waveguide multiplexer with three ports

使用二维 FDTD 方法^[24]模拟计算此类 MIM 波导的电磁传输谱和场强分布。设定计算空间网格为 $\Delta x = \Delta y = 5\text{ nm}$;时间间隔为 $\Delta t = \Delta x/(2c)$, c 为真空光速。在端口 port 1、port 2 和 port 3 处设置能流探测器,其传输率定义为 $T = P_{\text{in}}/P_{\text{out}}$ 。计算区域四周采用完美匹配层吸收边界条件。

3 结果与讨论

有关单圆环形 MIM 波导结构谐振现象已被报道^[7],结果表明亚波长圆环可视为谐振腔,且在可见光到近红外频段存在多级谐振模式。模拟计算了波导与圆环宽度为 50 nm 、圆环半径为 265 nm 的单圆环 MIM 波导的电磁传输谱、场强分布,分别如图 2、图 3 所示,与文献[7]报道结果基本一致。图 3(a)~(c)分别对应该圆环的第二、三、四级谐振模,(d)为非谐振模电磁波能量分布。

从图 3 中圆环各级谐振波能量分布情况可以看出:二级、三级、四级谐振模的场强在圆环谐振腔中分别有 4、6、8 个极大值。为实现圆环中各谐振模对应的电磁波分离传输,则需要设计三种谐振模能量极大值的错峰输出,即让某级谐振模电磁波在某一输出端口处场强最大,而让另外谐振模电磁波在该输出端口处场强最小。为此,设计了如图 1 所示的亚波长三端口圆环形 MIM 波导分解复用器结构。如图 4 所示圆环半径为 265 nm 、可见光到近红外频段电磁波由 port 1 入射至该结构传输时,出口端 port 2、port 3 对应的传输谱

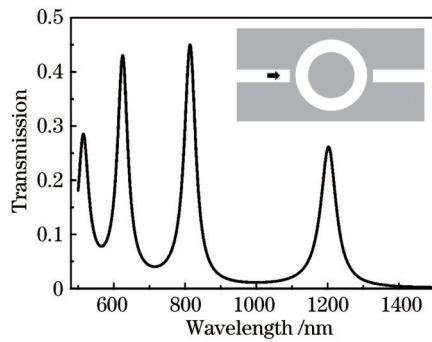


图2 亚波长圆环型MIM波导传输谱

Fig.2 Transmission spectrum of the subwavelength ring-shaped MIM waveguide

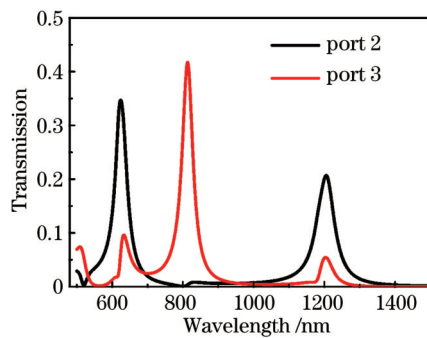


图4 二维圆环型三端口MIM波导传输谱

Fig.4 Transmission spectra of the 2D ring-shaped MIM waveguide with three ports

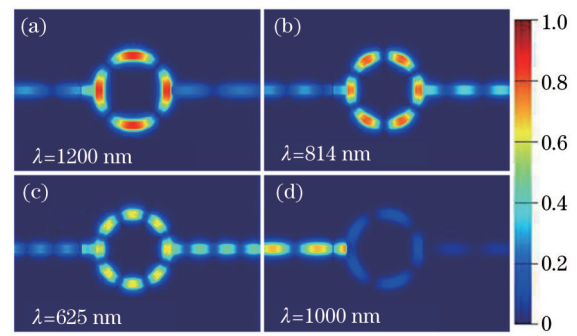


图3 亚波长圆环型MIM波导中场强分布图。

(a)第二,(b)第三,(c)第四级谐振模;(d)非谐振模

Fig.3 Field intensity distribution of the subwavelength ring-shaped MIM waveguide. (a) Resonant mode of (a) second, (b) third, (c) fourth order

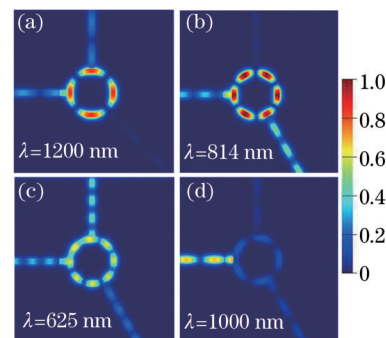


图5 二维圆环型三端口MIM波导场强分布图。

(a) 1200 nm; (b) 814 nm; (c) 625 nm; (d) 1000 nm

Fig.5 Field intensity distribution of the 2D ring-shaped MIM waveguide with three ports.

(a) 1200 nm; (b) 814 nm; (c) 625 nm; (d) 1000 nm

如黑色、红色实线所示。图4表明所设计的波导具有明显的分频滤波功能, port 2传输峰对应波长为1200 nm和625 nm, port 3传输峰对应波长为814 nm。图4的传输峰正好与该波导中圆环的第二、三、四级谐振波长对应。

图5为该波导结构中电磁波能量的场强分布图,(a)~(d)对应的波长分别为1200、814、625、1000 nm。图5(a)~(c)表明由于电磁波在圆环中分别发生第二、三、四级谐振现象。而port 2恰好位于第二、四级谐振波能量集中处, port 3位于第三级谐振波能量集中处,所以第二、四级谐振波可以耦合到port 2进行传输,第三级谐振波可以耦合到port 3进行传输,从而实现多级谐振模的分离功能。图5(d)对应的电磁波由于不满足圆环的谐振条件,所以未能形成谐振现象,而导致极低的电磁传输率。图5所示的场强分布与图4所示的传输谱能够很好地吻合,表明设计的亚波长三端口圆环形MIM波导具有良好的谐振模式分离功能。

图6中黑色、红色、绿色点线分别表示所设计的亚波长圆环形三通道MIM波导中圆环的第二、三、四级谐振波长与圆环半径的依赖关系。容易看出亚波长圆环半径越大,各级谐振波长越长,与电磁波谐振条件 $2\pi r \cdot n_{\text{eff}} = N\lambda$ 符合得很好。所以可以通过设定圆环的半径实现对port 2、port 3中电磁波波长的选择传输功能。

4 结 论

利用FDTD数值模拟方法,在可见光到近红外频段,研究亚波长圆环形MIM波导分解复用器的电磁传输特性。发现当电磁波在圆环中满足谐振条件时,与各级谐振模对应的能量被很好地束缚于圆环中。通过在圆环不同位置合理引入端口,实现了不同端口通道能够将圆环中不同级的谐振波能量耦合到各通道中传输,从而实现了二、三、四级谐振模的分离功能。此外,各级谐振模对应的波长可以通过设置圆环半径尺寸

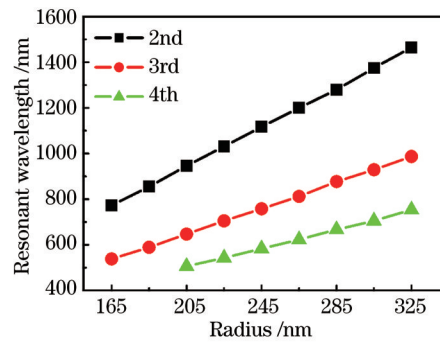


图6 谐振模与亚波长圆环半径的依赖关系图

Fig.6 Relationship between the resonance modes and the radius of the subwavelength ring
进行调制。研究工作将为未来微纳光子元器件与集成提供一定的理论参考。

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 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]. Nat Mat, 2003, 2(4): 229-232.
- 3 Barnes W L, Murray W A, Dintinger J, *et al.*. Surface plasmon polaritons and their role in the enhanced transmission of light through periodic arrays of subwavelength holes in a metal film[J]. Phys Rev Lett, 2004, 92(10): 107401.
- 4 Neutens P, Dorpe P Van, Vlamincx I De, *et al.*. Electrical detection of confined gap plasmons in metal-insulator-metal waveguides[J]. Nat Photon, 2009, 3(5): 283-286.
- 5 Wang B, Wang G P. Plasmon Bragg reflectors and nanocavities on flat metallic surfaces[J]. Appl Phys Lett, 2005, 87(1): 013103-013107.
- 6 Zhang Gaofeng, Yang Rongcao, Xue Wenrui. Filter characteristics of a sinc-shaped surface plasmonic filter in the visible light band[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s105004.
张高峰, 杨荣草, 薛文瑞. Sinc形表面等离子滤波器在可见光波导的滤波特性[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s105004.
- 7 Wang T B, Wen X W, Yin C P, *et al.*. The transmission characteristic of surface plasmon polaritons in ring resonator[J]. Opt Express, 2009, 17(26): 24096-24101.
- 8 Lu H, Liu X M, Mao D, *et al.*. Tunable band-pass plasmonic waveguide filters with nanodisk resonators[J]. Opt Express, 2010, 18(17): 17922-17927.
- 9 Neutens P, Lagae L, Borghs G, *et al.*. Plasmon filters and resonators in metal-insulator-metal waveguides[J]. Opt Express, 2012, 20(4): 3408-3423.
- 10 Wang Jicheng, Jiang Yalan, Wang Yueke, *et al.*. Directional couplers based on MIM plasmonic waveguide structures[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0217001.
王继成, 蒋亚兰, 王跃科, 等. 基于MIM结构等离子体波导定向耦合器[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0217001.
- 11 Wang L, Wang L L, Zeng Y P, *et al.*. A triangular shaped channel MIM waveguide filter[J]. J Mod Opt, 2012, 59(19): 1686-1689.
- 12 Lou X, Zou X H, Li X F, *et al.*. High-uniformity multichannel plasmonic filter using linearly lengthened insulators in metal-insulator-metal waveguide[J]. Opt Lett, 2013, 38(9): 1585-1587.
- 13 Yun B F, Hu G H, Cong J, *et al.*. Plasmon induced transparency in metal-insulator-metal waveguide by a stub coupled with F-P resonator[J]. Mater Res Express, 2014, 1(3): 036201.
- 14 Pang S F, Zhang Y Y, Huo Y P, *et al.*. The filter characteristic research of metal-insulator-metal waveguide with double overlapping annular rings[J]. Plasmonics, 2015, 10(6): 1723-1728.
- 15 Lai G, Liang R S, Zhang Y J, *et al.*. Double plasmonic nanodisks design for electromagnetically induced transparency and slow light[J]. Opt Express, 2015, 23(5): 6554-6561.
- 16 Hu F F, Yi H X, Zhou Z P. Wavelength demultiplexing structure based on arrayed plasmonic slot cavities[J]. Opt Lett, 2011, 36(8): 1500-1502.
- 17 Lu F, Wang Z H, Li K, *et al.*. A plasmonic triple-wavelength demultiplexing structure based on a MIM waveguide with side-coupled nanodisk cavities[J]. IEEE Trans Nano, 2013, 12(6): 1185-1190.

- 18 Qi J W, Chen Z Q, Che J N, *et al.*. Independently tunable double Fano resonances in asymmetric MIM waveguide structure [J]. *Opt Express*, 2014, 22(12): 14688–14695.
- 19 Chen Z, Song X K, Duan G Y, *et al.*. Multiple Fano resonances control in MIM side-coupled cavities systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 1–10.
- 20 Zhan G Z, Liang R S, Liang H T, *et al.*. Asymmetric band-pass plasmonic nanodisk filter with mode inhibition and spectrally splitting capabilities[J]. *Opt Express*, 2014, 22(8): 9912–9919.
- 21 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.
- 22 Palik E D. *Handbook of optical constants and solids*[M]. New York: Academic Press, 1985.
- 23 Economou E N. Surface plasmons in thin films[J]. *Phys Rev*, 1969, 182, 539–554.
- 24 Gray S K, Kupka T. Propagation of light in metallic nanowire arrays: finite-difference time-domain studies of silver cylinders [J]. *Phy Rev B*, 2003, 68(4): 045415.

栏目编辑：韩 峰