

内嵌金属块的金属-绝缘体-金属波导光透射特性

韦力丹¹ 王宏庆¹ 杨宏艳² 郑龙¹ 肖功利^{1,3}

¹ 桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004

² 桂林电子科技大学计算机科学与工程学院, 广西 桂林 541004

³ 广西信息科学实验中心, 广西 桂林 541004

摘要 采用有限时域差分法,研究了内嵌金属块长度与夹缝宽度对金属-绝缘体-金属波导结构的光透射特性的影响。研究发现,此结构相比较于单一直波导而言,出现了一个很明显的透射峰。并且当金属块的长度较大时,其与波导上表面的金属之间形成的夹缝会构成法布里-珀罗腔,高阶共振模式被激发,能量在腔内不断谐振,从而产生多个不断衰减的共振峰。同时,提出了一种基于内嵌双金属块结构的表面等离激元带通滤波器,此滤波器在共振峰以外波段的透射率可以下降为0,且其共振波长可以通过改变金属块的长度等参数进行调节。

关键词 表面光学; 表面等离激元; 滤波器; 有限时域差分法; 金属-绝缘体-金属波导

中图分类号 TN252 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.092401

Optical Transmission Characteristics of Embedded Metal Strip Based on Metal-Insulator-Metal Waveguide

Wei Lidan¹ Wang Hongqing¹ Yang Hongyan² Zheng Long¹ Xiao Gongli^{1,3}

¹ School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

² School of Computer Science and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

³ Guangxi Experiment Center of Information Science, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract The effects of the length of the embedded metal strip and the width of the gap in the metal-insulator-metal waveguide structure on the optical transmission characteristics have been investigated using the finite-difference time-domain method. The result shows that, compared with the single straight waveguide, an obvious transmission peak appears in this structure. Moreover, the Fabry-Perot cavity is generated by the gap between the metal strip and the metal at the top surface of the waveguide when the length of metal strip is relatively large. The high order resonant mode is stimulated, the energy is resonated continuously in the Fabry-Perot cavity, and multiple resonance peaks of attenuation are generated. Meanwhile, a surface plasmon polariton bandpass filter based on embedded double metal strip is proposed. The transmission of this filter can be down to zero except the resonant peak. In addition, the resonant wavelength can be adjusted by changing the various parameters such as the length of the metal strip.

Key words optics at surfaces; surface plasmon polariton; filter; finite-difference time-domain method; metal-insulator-metal waveguide

OCIS codes 240.6680; 230.7370; 130.7408

收稿日期: 2016-03-21; **收到修改稿日期:** 2016-05-23; **网络出版日期:** 2016-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(61465004, 11264009)、桂林电子科技大学大学生创新创业计划项目(201510595125)、桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目(YJXS201522)、广西自然科学基金项目(2013GXNSFAA019338)、广西高校科学技术研究项目重点项目(2013ZD026)

作者简介: 韦力丹(1993—),女,本科生,主要从事微纳米光电子学方面的研究。E-mail: 310889058@qq.com

导师简介: 肖功利(1975—),男,博士,副教授,主要从事微纳米光电子器件与表面等离激元等方面的研究。

E-mail: xgl.hy@126.com(通信联系人)

1 引言

表面等离子激元(SPP)作为一种特殊的电磁波,已经在很多方面显示出了巨大的潜力^[1-3],并发展成为一门独立的学科—SPP光子学。其与超材料一起被美国国防部评为未来重点关注的六大颠覆性基础研究之一。SPP由于其具有的一系列独特的光学性质,例如近场增强、表面受限、突破衍射极限等,有望在光传感、超分辨率成像、负折射率材料等许多领域发挥出重要的应用价值。

近年来,由于纳米工艺的飞速发展,许多基于SPP的亚波长光学器件被设计出来。与传统的光学器件相比,SPP功能器件主要存在如下优点:1)具有将电磁场能量聚集在纳米尺度范围的能力;2)器件集成度较高,很好地满足了现代社会发展的需要。而金属-绝缘体-金属(MIM)波导作为其中一种最基本的结构,由于其尺寸小、传播距离远等优点,也已经被人们广泛地研究并衍生出一大批集成光学器件,例如调制器^[4]、分束器^[5-6]、布拉格反射器^[7-8]、光开关^[9]、滤波器^[10-14]等。且与其他类型的等离子体波导,比如介质-金属-介质(IMI)波导、混合SPP波导等功能器件相比较而言,MIM器件具有更加明显的优势。例如,其对SPP波具有更强的束缚能力;能够产生超高强度的电磁模式,使得光信号在传输时具有更低的弯曲辐射损耗^[15]。而在最近的工作中,关于IMI结构内嵌单一或周期性的金属块也得到了大量的关注^[16-21]。2013年,Xu等^[8]将周期排列的金属块内嵌于夹缝波导结构中,构成了一种布拉格反射器,从而出现了很宽的带阻,并且透射率大约只有千分之一。而在同年,Zhan等^[21]研究了MIM波导中内嵌金属柱对光透射的影响,并认为光透射是由SPP与局域表面等离子激元(LSP)共同作用的结果。但是仅研究了单波长(1550 nm)下内嵌金属柱结构的各个参数对光透射率的影响,而并未详细研究某个波段范围内光的传播特性。

同时,作为目前一个新颖的研究热点,多模式之间的共振增强效应也吸引了研究者们浓厚的兴趣。例如,Zhang等^[22]报道了一种基于银纳米旗帜的可调谐超窄带等离子体天线,并得出当纳米盘周围的局部表面等离子体共振(LSPR)模式与纳米线中的法布里-珀罗腔模式的共振波长相等时,会导致很强烈的相互作用。本文系统地分析了波导内SPP模式与金属块周围LSP模式的混合作用对内嵌金属块MIM波导结构的光透射特性的影响,采用有限时域差分法(FDTD)模拟了该结构中SPP波的传播特性。并得出当金属块的长度较小时,MIM波导内传播的SPP波可以激发金属块周围的LSP,透射受到LSP与SPP混合作用的影响;而当金属块的长度较大时,高阶共振模式被激发,此时SPP波对透射起主导作用,能量在腔内发生多次谐振,产生多个不断衰减的透射峰。同时提出了一种基于内嵌双金属块波导结构的SPP带通滤波器,这种滤波器也可以通过合理地调节两个金属块的长度、距离等参数,从而改变它的滤波特性。

2 结构与计算方法

图1为内嵌金属块MIM波导结构示意图。其中金属块位于波导的中心处,波导的宽度 w 固定为200 nm, L 为金属块的长度, w_g 为内嵌金属块与波导夹缝上表面的距离。采用二维FDTD法对结构进行数值仿真,FDTD边界条件设置为完美匹配层(PML)。在下面的仿真中,通过平面光源来激发波导中横磁(TM)波模式, x 与 y 方向上的网格精度被设置为 $5\text{ nm}\times 5\text{ nm}$ 。该结构中的金属为金(深黄色区域),介质

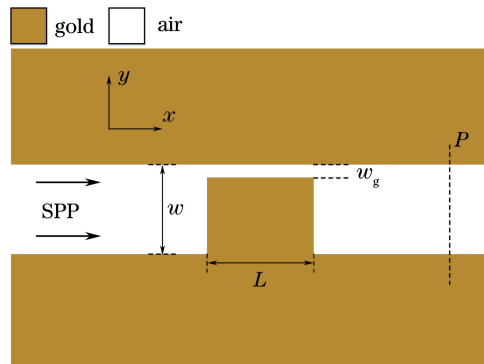


图1 内嵌金属块的MIM波导结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of MIM waveguide structure with embedded metal strip

为空气(白色区域)。金的介电常数选用软件中 CRC^[23] 数据,空气的介电常数为 1。监视器位于 P 点处,用于测量透射光的能量。

3 结果与讨论

图 2 为内嵌金属块的 MIM 波导结构的透射光谱图(红色线)。作为对比,图 2 中也给出了单一直波导的透射谱(绿色线)。其中金属块的长度 $L=150$ nm,夹缝的宽度 $w_g=10$ nm。如图所示,相比较于单一直波导而言,此结构在波长为 950 nm 处出现了一个明显的透射峰,透射率可达到 72% 左右,半峰全宽(FWHM)为 95 nm,这可以起到一个光学滤波器的作用。同时,这种现象也被认为是 LSP 与 SPP 共同作用的结果^[21]。由以往报道可知^[10,12],当光波耦合进入波导时,仅有 TM 波模式被激发(也就是 SPP 波被激发)。沿着波导金属界面传播的 SPP 波经过内嵌的金属块,激发了金属块周围的 LSP,从而对透射场能量产生影响。为了说明这个问题,给出了该结构在透射峰处(950 nm)的电场分布图,如图 2 插图所示。从图中可以看出,在金属块上表面的两端有两个很强的局域电场,能量被聚集在夹缝中,而在波导中其他区域电场较弱。

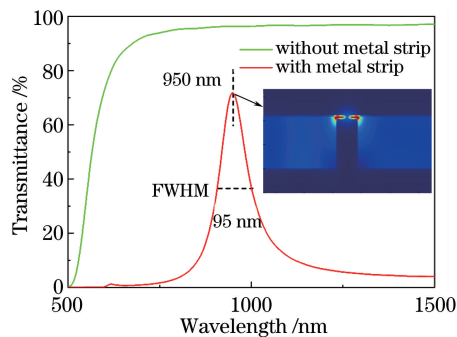


图 2 内嵌金属块结构与单一直波导的透射光谱比较图

Fig. 2 Comparison diagram of transmission spectrum with embedded metal strip structure and single straight waveguide

为了研究金属块的长度对光透射特性的影响,选取了 $L=200\sim 350$ nm,步长为 50 nm 的 4 个长度进行模拟,其中夹缝的宽度为 10 nm。图 3(a)为不同长度时的透射光谱图。如图 3(a)所示,当 $L=200$ nm 时,其透射谱出现了两个明显的透射峰,分别出现在 684 nm 与 1170 nm 处,把这两个透射峰称之为 M_2 (短波长处较小的透射峰)与 M_1 (长波长处较大的透射峰)。从图 3(a)中可以发现,随着 L 增加, M_1 的透射率基本保持不变(会有略微减少的现象,这主要是由于金属块长度增大会引起损耗的增加),但是透射谱的 FWHM 会逐渐增大。而对于 M_2 而言,随着 L 长度的增加,透射率也在不断增大。并且当 L 增大到 300 nm 时,其透射光谱出现了第三个透射峰,称之为 M_3 。同时从图 2 中也可得知,当 $L=150$ nm 时,该结构只会产生一个透射峰(M_1),并且峰值处的透射率小于 $L=200$ nm 时峰值处的透射率。根据仿真结果(没有在图中展现出来),当 $L<150$ nm 时,该结构都只能产生一个透射峰,并且峰值随着 L 的增大而增加。当增大到一定程度时,第一个透射峰(M_1)基本保持不变,并且 M_2 会随之产生。两个透射峰的波长随着长度 L 变化的关系如图 3(b)所示。从图 3(b)中可以看出,两个透射峰的共振波长都是随 L 呈线性变化的,这种现象与齿状滤波器中的 SPP 共振^[10,12,24] 比较相似。但是在图 3(b)中,两条曲线的斜率是不同的。这也就是说,相比较于 M_2 而言, M_1 的共振波长随着金属块长度 L 的增加变化更快,红移更加明显。

为了更加深刻地说明图 3 中多个透射峰产生的原因,计算了 $L=800$ nm 时的透射光谱图。如图 4(a)所示,除了上文中介绍的三个透射峰以外,这里出现了一系列阶梯式逐渐衰减的共振峰。图 4(a)中的 M_1 红移至 3950 nm 处,并且透射率缩减至 65% 左右。同时 M_2 、 M_3 也分别红移至 2015 nm、1366 nm。图 4(b)为每个共振峰处的电场分布图。从图中可以看出,在 $\lambda=3950$ nm 时,金属块上表面的夹缝内存在两个能量很强的局域电场,这也与图 2 中 M_1 电场的位置相吻合。而当 $\lambda=2015$ nm 时,可以看到除了金属块两边的两个电场外,金属块的正中位置又出现了一个强电场。并且通过对 6 张图的电场分布的对比可知,当共振峰从 M_1 向短波长方向依次谐振时,其电场会进行逐次分裂,能量也在随之衰减(从文中的透射率大小与电场的

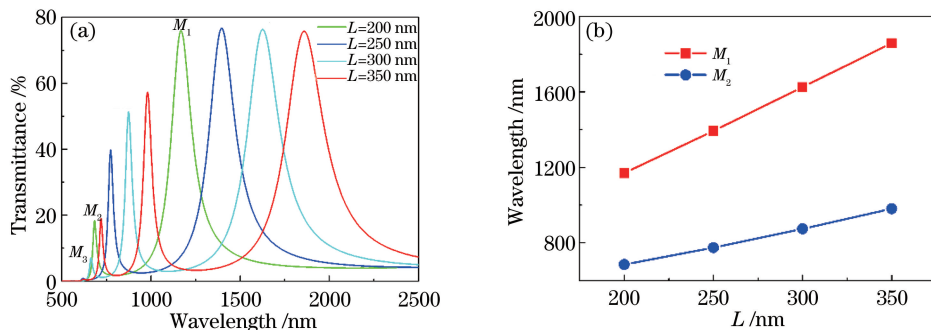


图 3 (a) 不同长度金属块的透射光谱; (b) M_1 、 M_2 两种情况下, 共振波长与长度 L 的关系图

Fig. 3 (a) Transmission spectrum for different lengths of metal strip; (b) relation graph of resonant wavelength as a function of length L for M_1 and M_2

颜色分布可以明显看出)。这种情况与文献^[25]中法布里-珀罗腔多峰共振的电场分布图很相似。所以对于 L 增大所带来的多个谐振峰的原因, 可以归结为金属块上表面与波导上方的金属之间(图 1 中宽度为 w_g 的夹缝)形成的法布里-珀罗腔。根据法布里-珀罗腔共振条件

$$k \operatorname{Re}(n_{\text{eff}})L = m\pi, \quad (1)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$ 是自由空间波矢量; L 为法布里-珀罗腔的长度; m 是一个整数, 对应于 SPP 的共振阶数; $\operatorname{Re}(n_{\text{eff}})$ 是结构有效折射率的实部。有效折射率定义为 $n_{\text{eff}} = \beta/k$, β 为传播常数。所以(1)式也可以改写为

$$\lambda = 2\pi \operatorname{Re}(n_{\text{eff}})L / m\pi = 2\operatorname{Re}(n_{\text{eff}})L / m. \quad (2)$$

从(2)式中可以看出, SPP 的共振波长 λ 与有效折射率的实部 $\operatorname{Re}(n_{\text{eff}})$ 或法布里-珀罗腔的长度 L 是呈线性关系的。这也很好地解释了图 3(b)中 M_1 、 M_2 两种状态下, 共振波长随着长度 L 变化呈线性关系的原因。同时对于图 4(a)来说, M_1 对应于(2)式中 $m=1$ 的情况, 也就是一阶共振模式。 M_2 对应于 $m=2$ 的情况, 其余依次类推, 也就是说当 $m \geq 2$ 时, 高阶共振模式被激发了。因此对于这种现象, 总的来说, 当金属块长度较小时, 其金属块上表面两端的 LSP 与波导金属表面传播的 SPP 共同作用产生强大的电场, 从而出现一个很大的透射峰。而当 L 不断增大时, 高阶模式被激发, 能量在法布里-珀罗腔内不断进行谐振, 出现多个阶梯式的透射峰, 透射率随之下降, 这主要是由于谐振所带来的 SPP 能量损耗的问题。 L 越大, 其出现的共振峰就会越多, M_1 会向长波长处移动更远。

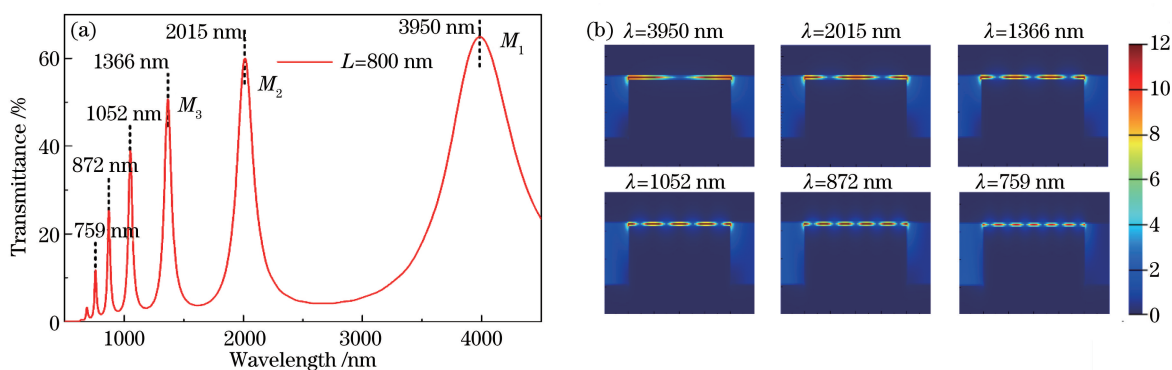


图 4 (a) $L=800$ nm 时的透射光谱图; (b) 每个共振峰处的电场分布图

Fig. 4 (a) Transmission spectrum with $L=800$ nm; (b) electric-field distribution of each resonance peak

为了研究夹缝的宽度对光透射特性的影响, 选取了 $w_g = 5 \sim 20$ nm、步长为 5 nm 的 4 个长度进行模拟, 其中金属块的长度 $L=150$ nm。图 5 为不同夹缝宽度时的透射光谱。从图 5 中可以看出, 当夹缝的宽度不断增大时, 其透射率也在不断增大, 共振波长显现出蓝移现象。这根据(2)式, 当夹缝增大时, 会带来该结构的有效折射率 n_{eff} 的改变, $\operatorname{Re}(n_{\text{eff}})$ 会随之减小。共振波长会向短波长处移动。

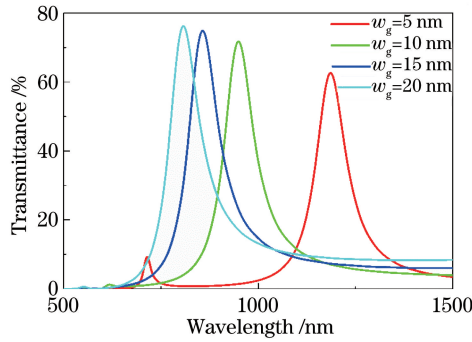
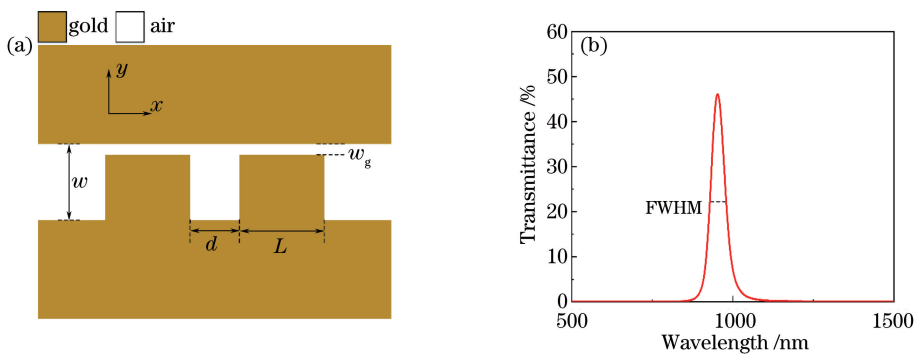


图5 不同夹缝宽度时的透射光谱

Fig. 5 Transmission spectrum with different gap widths

4 基于内嵌金属块波导结构的 SPP 滤波器

基于上述的研究,设计了一种内嵌双金属块波导结构的 SPP 滤波器。图 6(a)为此滤波器的结构示意图。如图 6(a)所示,两个同等大小、同等高度的金属块被内嵌于 MIM 波导之中,金属块上表面与波导之间形成的夹缝的宽度都为 w_g ,两个金属块的长度都为 L ,金属块之间的距离为 d ,波导的宽度 w 固定为 200 nm。图 6(b)为此结构的透射光谱图。其中 $L = 150$ nm, $w_g = 10$ nm,与图 2 中的设定保持一致, $d = 200$ nm。如图 6(b)所示,此结构在波长为 952 nm 处出现了一个明显的透射峰,这与图 2 中透射峰的位置基本一致。此现象说明了在此结构中,两个金属块并不是以一个整体而存在的,其共振波长不会受到两个金属块长度的叠加作用,而只会受到它们的共同长度 L 以及夹缝宽度 w_g 的影响。并且从图 6(b)中也可以看出,此结构相比较于图 2 而言,其 FWHM 从 95 nm 下降到 49 nm,同时在透射峰以外的其他波段,透射率下降为 0,也就是形成了光学中的传输禁带,这可以很好地起到一个滤波的作用。关于这方面的理论解释,主要是由于加入第二个金属块之后,可以对前文中单一金属块的透射谱起到二次滤波的作用,使图 2 中较小的透射率直接下降为 0。并且此滤波器的共振波长也可以通过改变金属块长度与夹缝的宽度来进行调节,变化规律与前文介绍的内嵌单金属块的变化规律基本一致,这里不再一一表述。但需要说明的是,在此滤波器的设计中,为了避免多峰的出现,双金属块的长度都应保持在一定的限度内(大约在 $L = 195$ nm 时,第二个小的透射峰开始出现)。

图6 (a)内嵌双金属块波导结构的 SPP 滤波器结构示意图; (b) $L = 150$ nm, $d = 200$ nm, $w_g = 10$ nm 时的透射光谱图Fig. 6 (a) Schematic diagram of SPP waveguide filter with embedded double metal strip; (b) transmission spectrum with $L = 150$ nm, $d = 200$ nm, $w_g = 10$ nm

为了说明两个金属块之间的距离对此滤波器特性的影响,选取 $d = 100 \sim 250$ nm,步长为 50 nm 的 4 个长度进行模拟。其中两个金属块的长度 L 都为 150 nm,夹缝宽度都为 10 nm。图 7 为不同距离时的透射光谱。如图 7 所示,随着 d 不断增大,共振峰的位置基本保持不变,透射率不断增大。当 $d = 100$ nm 时,透射率大约为 6%;而在 $d = 250$ nm 时,透射率增大到 54%。通过对 $d = 100$ nm 与 $d = 250$ nm 时两个共振峰处

的电场分布图的对比可知(如图 7 插图所示),当两个金属块距离较大时($d=250\text{ nm}$),两个金属块上表面都会产生强电场,也就是说 SPP 波可以很好地透射出去。而当两个金属块距离较小时($d=100\text{ nm}$),第一个金属块上表面也产生了很强的电场,并且从电场的颜色分布观察可知,其比 $d=250\text{ nm}$ 时的电场强度更大。但是在第二个金属块上表面,电场强度很弱,也就是说 SPP 波被限制在第一个夹缝中,几乎不能传播出去,所以在 $d=100\text{ nm}$ 时其透射率很小。

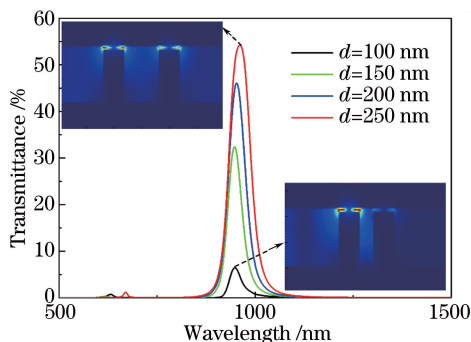


图 7 不同 d 时的透射光谱图,插图为 $d=100\text{ nm}$ 与 $d=250\text{ nm}$ 时的电场分布图

Fig. 7 Transmission spectrum with different d , the two insets show the electric-field distribution with $d=100\text{ nm}$ and $d=250\text{ nm}$, respectively

5 结 论

采用 FDTD 法系统探讨了内嵌金属块的长度、个数与夹缝的宽度等参数对 MIM 波导结构的光透射特性的影响。主要研究结果如下:1)该结构相比较于单一的 MIM 直波导而言,出现了一个很明显的透射峰,这被认为是 SPP 模式与 LSP 模式共同作用的结果;2)通过改变金属块的长度,可以线性地调节透射峰的位置。并且当长度较大时,其与波导上表面的金属构成了法布里-珀罗腔,高阶模式被激发,能量在腔内不断进行谐振,出现多个不断衰减的透射峰;3)可以通过调节夹缝宽度的大小,达到调节共振峰与透射率大小的目的。夹缝宽度增大,共振峰蓝移,透射率增大;4)设计了一种内嵌双金属块的可调谐的 SPP 带通滤波器,此滤波器具有一个相对狭窄的透射峰,FWHM 只有 49 nm ,而在透射峰以外的其他波段透射率为 0。并且其滤波特性也可以通过改变相关的参数来进行调谐。这些发现有望在未来的光互连、光通信的潜在应用中提供参考价值。

参 考 文 献

- 1 Brongersma M L, Shalaev V M. Applied physics: The case for plasmonics[J]. Science, 2010, 328(5977): 440-441.
- 2 Ozbay E. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions[J]. Science, 2006, 311(5758): 189-193.
- 3 Atwater H A, Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices[J]. Nat Mater, 2010, 9(3): 205-213.
- 4 Nikolajsen T, Leosson K, Bozhevolnyi S I. In-line extinction modulator based on long-range surface plasmon polaritons [J]. Opt Commun, 2005, 244(1): 455-459.
- 5 Li Juan, Wang Bingyan, Xue Wenrui. Propagation properties of Y-splitters based on MIM surface plasmonic waveguides [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0124002.
- 李 娟, 王冰艳, 薛文瑞. 基于 MIM 型表面等离子体光波导的 Y 形分束器的传输特性研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0124002.
- 6 Wang Jicheng, Liu Hongjiao, Cai Zengyan, *et al.* Surface plasmon dichroic splitter with two metallic slits[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 102301.
- 王继成, 刘红娇, 蔡增艳, 等. 双缝波导结构表面等离子体可见光分束器设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(10): 102301.
- 7 Liu J Q, Wang L L, He M D, *et al.* A wide bandgap plasmonic Bragg reflector[J]. Opt Express, 2008, 16(7): 4888-4894.

- 8 Xu C, Hu T, Chen R Y, *et al.* Transmission characteristics of a plasmonic Bragg reflector based on a metal-embedded slot structure[J]. *J Optics-Uk*, 2013, 15(10): 105005.
- 9 Nikolajsen T, Leosson K, Bozhevolnyi S I. Surface plasmon polariton based modulators and switches operating at telecom wavelengths[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(24): 5833-5835.
- 10 Lin X S, Huang X G. Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometric sizes[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(23): 2874-2876.
- 11 Luo Xin, Zou Xihua, Wen Kunhua, *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.
- 12 Tao J, Huang X G, Lin X S, *et al.* A narrow-band subwavelength plasmonic waveguide filter with asymmetrical multiple-teeth-shaped structure[J]. *Opt Express*, 2009, 17(16): 13989-13994.
- 13 Wang H Q, Yang J B, Zhang J J, *et al.* Tunable band-stop plasmonic waveguide filter with symmetrical multiple-teeth-shaped structure[J]. *Opt Lett*, 2016, 41(6): 1233-1236.
- 14 Pang Shaofang, Qu Shixian, Zhang Yongyuan, *et al.* Filter characteristic research of MIM waveguide based on L shaped resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0623001.
庞绍芳, 屈世显, 张永元, 等. 基于 L 形谐振腔 MIM 波导结构滤波特性的研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0623001.
- 15 Zhang X Y, Hu A, Wen J Z, *et al.* Numerical analysis of deep sub-wavelength integrated plasmonic devices based on semiconductor-insulator-metal strip waveguides[J]. *Opt Express*, 2010, 18(18): 18945-18959.
- 16 Jetté-Charbonneau S, Charbonneau R, Lahoud N, *et al.* Bragg gratings based on long-range surface plasmon-polariton waveguides: comparison of theory and experiment[J]. *IEEE J Quantum Elect*, 2005, 41(12): 1480-1491.
- 17 Boltasseva A, Nikolajsen T, Leosson K, *et al.* Integrated optical components utilizing long-range surface plasmon polaritons[J]. *J Lightwave Technol*, 2005, 23(1): 413.
- 18 Søndergaard T, Bozhevolnyi S I, Boltasseva A. Theoretical analysis of ridge gratings for long-range surface plasmon polaritons[J]. *Phys Rev B*, 2006, 73(4): 045320.
- 19 Mu J W, Huang W P. A low-loss surface plasmonic Bragg grating[J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(4): 436-439.
- 20 Mu J W, Li X, Huang W P. Compact Bragg grating with embedded metallic nano-structures[J]. *Opt Express*, 2010, 18(15): 15893-15900.
- 21 Zhang Z D, Zhang Z Y, Wang H Y. The effect of the metal cylinder in the slot on the transmission properties of the metal-insulator-metal waveguide[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(23): 6351-6354.
- 22 Zhang X Y, Zhang T, Hu A, *et al.* Controllable plasmonic antennas with ultra narrow bandwidth based on silver nano-flags[J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(15): 153118.
- 23 Lide D R. CRC handbook of chemistry and physics[M]. CRC Press, 2004.
- 24 Cui L N, Song G, Yu L, *et al.* Tunable band-stop plasmonic filter based on symmetrical tooth-shaped waveguide couples[J]. *Mod Phys Lett B*, 2013, 27(14): 1350101.
- 25 Wen K H, Yan L S, Pan W, *et al.* Transmission characteristics and applications of plasmonic slit waveguide based on metal-insulator-metal structure[J]. *Opt Eng*, 2012, 51(10): 104601.