

“ θ ”型谐振腔结构的光学透射特性

王维 高社生 孟阳

Transmission characteristics of surface plasmon polaritons in “ θ ”-shaped resonator

Wang Wei Gao She-Sheng Meng Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 017301 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.017301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.017301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

银纳米颗粒对纳米金刚石的拉曼及荧光增强特性研究

[Effects of silver nanoparticles on Raman spectrum and fluorescence enhancement of nano-diamond](#)

物理学报.2016, 65(19): 197301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.197301>

基于微波表面等离激元的 360° 电扫描多波束天线

[360° scanning multi-beam antenna based on spoof surface plasmon polaritons](#)

物理学报.2016, 65(14): 147301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.147301>

一维金属光栅嵌入磁性介质纳米结构下的横向磁光克尔效应的增强

[Great enhancement of transversal magneto-optical Kerr effect for magnetic dielectric film embedded by one-dimensional metallic grating](#)

物理学报.2016, 65(14): 147302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.147302>

介质填充型二次柱面等离激元透镜的亚波长聚焦

[Subwavelength light focusing using quadric cylinder surface plasmonic lens with gold film slits filled with dielectric](#)

物理学报.2016, 65(13): 137301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.137301>

一维原子链局域等离激元的非线性激发

[Nonlinear excitation of localized plasmon in one-dimensional atomic chain](#)

物理学报.2016, 65(8): 087301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.087301>

“ θ ”型谐振腔结构的光学透射特性*王维[†] 高社生 孟阳

(西北工业大学自动化学院, 西安 710072)

(2016年4月1日收到; 2016年9月25日收到修改稿)

应用有限元方法研究了在圆形谐振腔结构内嵌椭圆形棒(“ θ ”型谐振腔结构)的光学透射特性, 结果表明, 该结构对于光学滤波具有很强的可调性. 另外, 通过调节椭圆结构的倾斜角度破坏该结构的对称性, 能够产生明显的法诺共振效应. 这些结构对于光学滤波和折射率传感器结构的设计有一定的指导意义.

关键词: 表面等离子极化激元, 法诺共振, 滤波器

PACS: 73.20.Mf, 42.50.Gy, 42.79.Gn

DOI: 10.7498/aps.66.017301

1 引言

表面等离子极化激元(surface plasmon polarizations, SPPs)是一种沿着金属-介质表面传播, 并且以指数形式衰减的电荷密度波, 故SPPs有着很好的限域性, 能够突破衍射极限, 为实现纳米波导、微纳集成光子学的研究开辟了新的方向^[1,2]. 为此, 研究者提出了金属-介质-金属(MIM)和介质-金属-介质(IMI)两种主要的波导. 但是MIM波导相比于IMI波导, 在金属表面能够耦合出较强的SPPs, 并且能够传播较远的距离^[3], 因此, 设计出了很多基于MIM波导的纳米结构. 如: U型波导^[4], Y型合成器^[5]、滤波器^[6-9]和多模干涉仪^[10]等. 其中, 滤波器扮演着特别重要的角色.

与表面等离子极化激元相比, 局域表面等离子激元是一种被局限在纳米颗粒表面, 并在来回振荡中发生热损耗及辐射衰减的电磁波, 大多存在于纳米球、纳米环或者纳米盘表面. 当入射光照射在金属纳米粒子表面, 如果入射光的频率与金属内部自由电子的固有频率相等时, 就会在金属表面形成局域表面等离子激元共振. 近几年来, 基于贵金属纳米结构的局域表面等离子激元共振由于其不同寻常的光学特性, 引起了很多研究者的兴趣^[11,12]. 特别地,

由亮模式和暗模式相互耦合形成的法诺共振, 由于其在生物传感、二次谐波的产生、光学开关等领域的潜在应用^[13-16], 受到了很多研究者的关注. 为此, 已设计出很多的纳米结构. 如环/盘结构^[17], θ 型结构^[18]、七聚体^[19]等. 虽然基于局域表面等离子激元共振的法诺共振收到了广泛研究, 但是基于表面等离子极化激元的法诺共振效应研究较少.

本文通过有限元方法, 研究了“ θ ”型谐振腔结构的透射特性和稳态磁场分布. 结果发现: 与张中月课题组^[20]提出的内嵌银纳米棒圆形银缝隙结构对比, “ θ ”型谐振腔结构波导具有很强的滤波特性以及结构可控性; 通过调节椭圆形结构的尺寸, 能够在可见光和近红外区域对滤波范围进行调控; 另外, 我们通过调节椭圆形结构的旋转角度, 可以使基于局域表面等离子激元共振的法诺共振效应延伸到基于表面等离子极化激元方面, 所以此结构能为法诺共振的研究提供一些新的参考价值.

2 结构和计算方法

图1为圆形谐振腔结构内嵌椭圆形棒(“ θ ”型谐振腔结构)的2D结构示意图. 灰色区域代表的结构材料是银, 白色代表空气, 两个MIM波导通过一个内嵌纳米盘的圆形谐振腔相连, 圆形腔的半径为

[†] 通信作者. E-mail: wangweixgd@163.com

r , 圆形腔与两个波导的连接距离为 w . 在计算中我们固定 r 和 w 分别为 200 nm 和 10 nm, 椭圆盘的半长轴和半短轴分别用字母 a 和 b 表示, 椭圆盘长轴与 x 轴方向的夹角为 θ . 为保证只有磁场的横向基模 (TM₀ mode) 通过, 两个波导的宽度 d 固定为 50 nm.

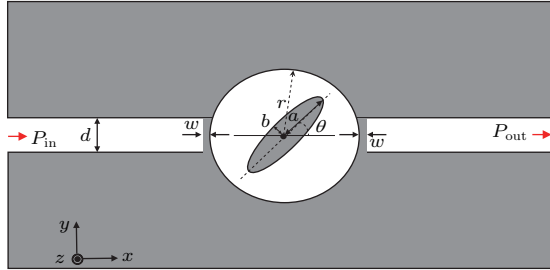


图1 “ θ ”型谐振腔结构示意图

Fig. 1. Structure schematics of the “ θ ”-shaped resonator.

本文应用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件计算了内嵌纳米盘圆形谐振腔的透射率, 透射率定义为通过波导出射口的出射功率 P_{out} 与入射口的入射功率 P_{in} 之比, 即 $T = P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$. 本文中, 银材料的折射率取自实验结果.

3 结果与讨论

图2给出了“ θ ”型谐振腔结构在 $a = 120$ nm, $b = 30$ nm, $\theta = 0^\circ$ 的透射光谱. 我们发现“ θ ”型谐振腔主要有三个模式 I, II, III, 分别在 890, 530,

415 nm 处. 为了进一步研究模式 I, II, III 处的共振机理, 我们计算了图2(a)处三个共振模式的稳态磁场分布, 如图2(b)—(d)所示. 从图中可以看出: 在 λ_I 处有两个共振模式, 对应于局域表面等离子激元共振的偶极模式; λ_{II} 处有四个共振模式, 对应于局域表面等离子激元共振的四极模式; λ_{III} 处有八个共振模式, 对应于局域表面等离子激元共振的八极模式; 这些共振模式均匀地分布在腔内, 并且这三个共振峰的透射光谱线宽是非常窄的, 所以能达到极好的滤波效果. 图3给出了随着椭圆形结构半长轴 b 的变化, “ θ ”型谐振腔结构的透射光谱图. 可以发现: 由于伴随着半长轴 b 的增加, 表面等离子极化激元电子振荡距离变长, 模式 I, II, III 都出现不同程度的红移. 另外, 模式 III 的透射系数变大, 而模式 I 的透射系数减少, 模式 II 的透射系数基本保持不变. 基于“ θ ”型谐振腔结构的可调控性, 并且光谱线宽都非常窄, 故“ θ ”型谐振腔结构可以为滤波器的设计提供新的借鉴意义.

图4为伴随着椭圆形结构旋转角度的增加, “ θ ”型谐振腔结构在 $a = 120$ nm, $b = 30$ nm, 不同倾斜角 θ 时的透射光谱. 从图中可以看出: 伴随着角度的增加, “ θ ”型谐振腔结构的对称性被破坏, 模式 I, II, III 的暗态模式被激发, 导致了基于表面等离子极化激元的法诺共振的产生. 从图4可以看出: 模式 I 劈裂为 I_A 和 I_B ; 模式 II 劈裂为 II_A 和 II_B ; 模式 III 劈裂为 III_A 和 III_B ; 并且伴随着角度的增加, I_A 模式透射系数增加, I_B 模式透射系数减少. 另外,

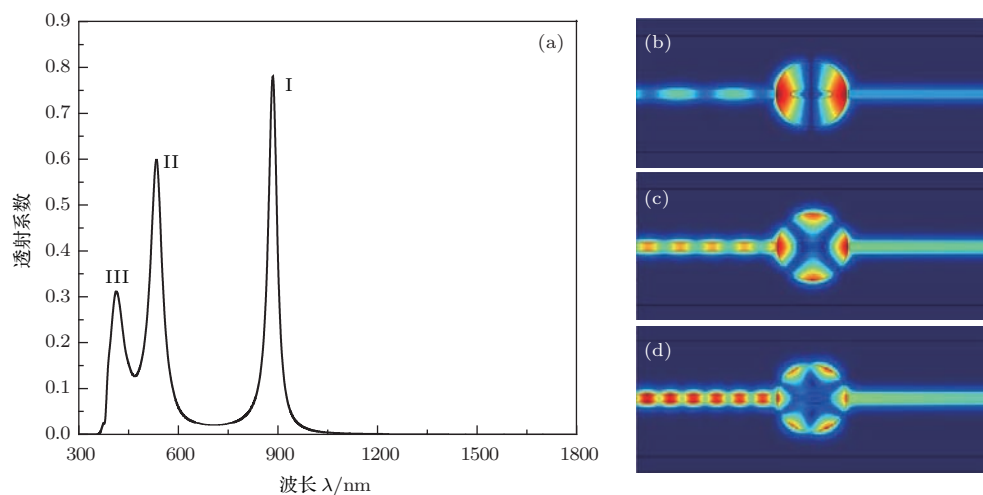


图2 (网刊彩色) (a) “ θ ”型谐振腔在 $a = 120$ nm, $b = 30$ nm, $\theta = 0^\circ$ 的透射光谱, “ θ ”型谐振腔 H_z 平面的稳态磁场分布; (b) $\lambda = 890$ nm; (c) $\lambda = 530$ nm; (d) $\lambda = 415$ nm

Fig. 2. (color online) (a) Transmission spectrum of the the “ θ ”-shaped resonator; model field distributions (H_z) of SPPs in the system at (b) $\lambda = 890$ nm; (c) $\lambda = 530$ nm; (d) $\lambda = 415$ nm.

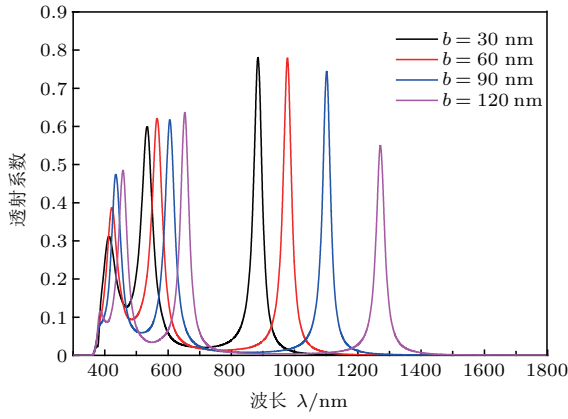


图3 (网刊彩色)“θ”型谐振腔结构在结构旋转角度 $\theta = 0^\circ$ 时, 长度 b 变化的透射光谱

Fig. 3. (color online) Transmission spectrum of the the “θ”-shaped resonator as a function of the semi-minor axis b , where $\theta = 0^\circ$.

除过 I_A 和 I_B 模式外, 通过对比光谱线型, 可以发现: $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 的透射光谱相似; $\theta = 15^\circ$ 和 $\theta = 75^\circ$ 透射光谱相似; $\theta = 30^\circ$ 和 $\theta = 60^\circ$ 透射光谱相似. 此现象的产生原因是对于“θ”型谐振腔结构, $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 的不对称度^[21]相同, $\theta = 15^\circ$ 和 $\theta = 75^\circ$ 的不对称度相同, $\theta = 30^\circ$ 和 $\theta = 60^\circ$ 的不对称度相同.

为了更进一步理解 I_A , I_B , II_A , II_B , III_A 和 III_B 的产生原因, 我们计算了“θ”型谐振腔结构在 $a = 120$ nm, $b = 30$ nm, $\theta = 30^\circ$ 时, I_A ($\lambda =$

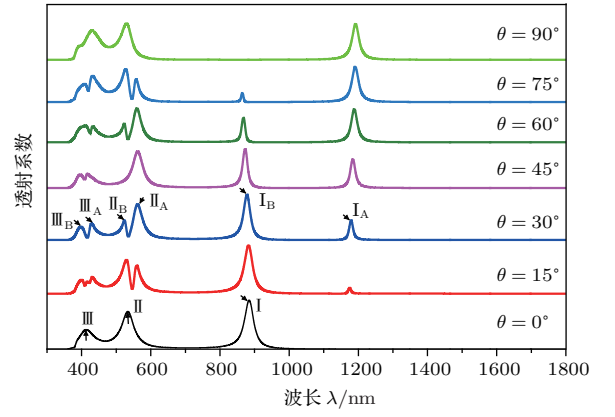


图4 (网刊彩色) “θ”型谐振腔结构在 $a = 120$ nm, $b = 30$ nm, 不同倾斜角 θ 时的透射光谱

Fig. 4. (color online) Transmission spectrum of the the “θ”-shaped resonator as a function of the rotation angle θ , where $a = 120$ nm, $b = 30$ nm.

1185 nm), I_B ($\lambda = 885$ nm), II_A ($\lambda = 560$ nm), II_B ($\lambda = 535$ nm), III_A ($\lambda = 435$ nm) 和 III_B ($\lambda = 410$ nm) 的稳态磁场分布 (如图5). 从图5可以看到: 当旋转角度 $\theta \neq 0^\circ$ 时, 该结构的对称性被破坏, 对应于“θ”型谐振腔结构的偶极模式、四极模式、八极模式分别被劈裂成两种模式, I_B 为偶极亮模式, I_A 对应偶极暗模式, 偶极亮模式和偶极暗模式的破坏性干涉形成基于此结构的偶极法诺共振; II_A 为四极亮模式, II_B 对应四极暗模式, 四极亮模式和四极暗模式耦合形成基于此结构的四极法

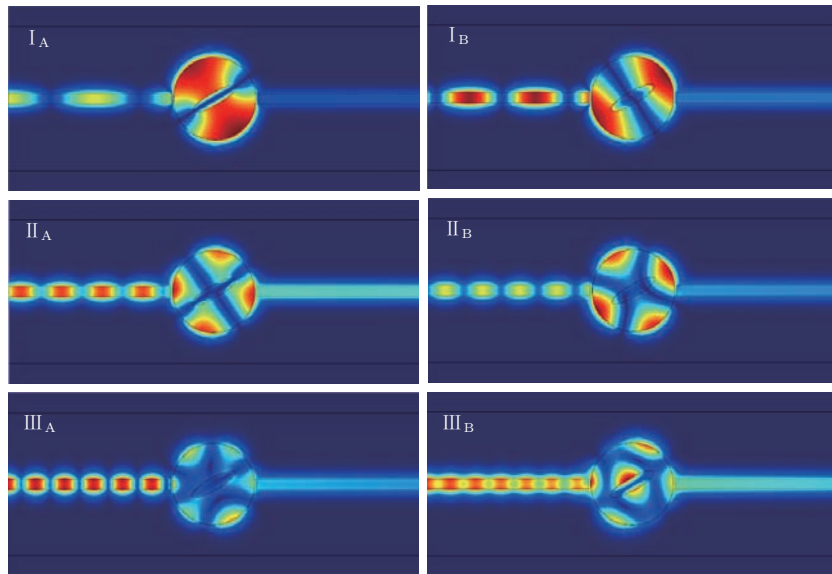


图5 (网刊彩色) “θ”型谐振腔结构在 $a = 120$ nm, $b = 30$ nm, 倾斜角 $\theta = 30^\circ$ 时, 分别在 I_A , I_B , II_A , II_B , III_A , III_B 模式下的 H_z 平面稳态磁场分布

Fig. 5. (color online) Model field distributions (H_z) of SPPs in the system at “θ”-shaped resonator I_A , I_B , II_A , II_B , III_A , III_B .

诺共振; III_A 对应八极亮模式, III_B 对应八极暗模式, 八极亮模式和八极暗模式耦合形成基于此结构的八极法诺共振.

以基于此结构的偶极法诺共振为例, 我们分析了法诺共振产生的共振机理. 对于偶极亮模式: 可被光直接激发, 对应于连续光谱, 由于辐射阻尼较大, 所以透射光谱相较于基于“ θ ”型谐振腔结构的偶极暗模式较宽; 对于偶极暗模式: 不能被光直接激发, 对应于离散光谱, 由于辐射阻尼较大, 所以透射光谱较窄. 对于基于“ θ ”型谐振腔结构的偶极亮模式可以通过两种方式激发出来: 一种是 $L \rightarrow BD$; 另一种是 $L \rightarrow BD \rightarrow DD \rightarrow BD$. 其中 L , BD 和 DD 分别代表入射光、此结构的偶极亮模式和偶极暗模式^[22]. 当结构高度对称时, 此结构支持各向同性光谱, 不能够实现偶极亮模式和偶极暗模式的耦合. 然而, 通过改变 θ 的角度, 此结构的对称性被破坏, 偶极暗模式可被不对称性有效调制并能实现与偶极亮模式的耦合, 因此可实现偶极法诺共振. 对于其他如四极、八极法诺共振与偶极法诺共振产生机理相同.

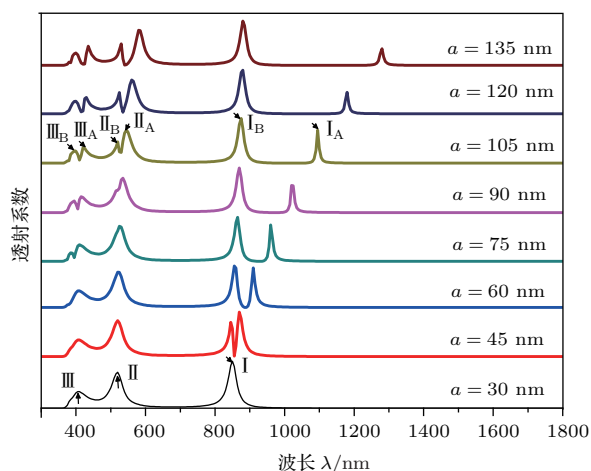


图6 (网刊彩色) “ θ ”型谐振腔结构在倾斜角 $\theta = 30^\circ$, $b = 30$ nm 时, 随半长轴 a 从 30 nm 增加到 135 nm 的透射谱线

Fig. 6. (color online) Transmission spectrum of the the “ θ ”-shaped resonator as a function of the semimajor axis a , where $\theta = 30^\circ$, $b = 30$ nm.

我们进一步研究了椭圆形结构半长轴 a 对该结构的透射光谱的影响, 首先固定倾斜角 $\theta = 30^\circ$, $b = 30$ nm, 并将半长轴 a 从 30 nm 增加到 150 nm, 计算了“ θ ”型谐振腔的消光谱线图, 如图6所示. 从图6可以看出: 随着半长轴的增加, “ θ ”型谐振腔的不对称度逐渐增加, 基于此结构的法诺共振效

应变得越来越明显, 法诺谷有明显的展宽; 并且八极暗模式 III_B 、四极暗模式 II_B 自分别于 $a = 75$ nm 和 $a = 90$ nm 出现后都随着半长轴的增加透射系数逐渐增大; 然而偶极暗模式 I_A 随着半长轴 a 的增大, 自 $a = 45$ nm 后透射系数逐渐减小. 此现象的出现可能是由于暗态偶极模式与暗态四极、八极模式共振产生机理不同, 不同表面等离子极化激元金属传播损耗有差异^[23]. 虽然随着不对称度的增加, 无论偶极、四极、八极法诺谷都越来越明显, 但是暗态偶极模式随着半长轴 a 的增加, 表面等离子极化激元传播距离变长, 金属损耗较明显.

4 结 论

本文通过设计“ θ ”型谐振腔以实现滤波功能. 数值计算结果表明, 此结构能够达到很好的滤波效果. 此外, 通过调控此结构内纳米椭圆棒的倾斜角度和纳米椭圆棒的结构参数, 可以产生明显的法诺共振现象并且能被有效调控, 这些结果不仅有助于设计复合结构滤波器, 而且基于波导结构的法诺共振效应, 可能会使此结构应用于生物传感领域.

参考文献

- [1] Falk A L, Koppens F H L, Yu C L, Kang K, Snapp N D, Akimov A V, Jo M H, Lukin M D, Park H 2009 *Nat. Phys.* **5** 475
- [2] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W 2003 *Nature* **424** 824
- [3] Dionne J A, Sweatlock L A, Atwater H A 2006 *Phys. Rev. B* **73** 035407
- [4] Lee T W, Gray S 2005 *Opt. Express* **13** 9652
- [5] Gao H, Shi H, Wang C, Du C, Luo X, Deng Q, Lü Y, Lin X, Yao H 2005 *Opt. Express* **13** 10795
- [6] Hosseini A, Massoud Y 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 181102
- [7] Wang G X, Lu H, Liu X M, Mao D, Duan L N 2011 *Opt. Express* **19** 3513
- [8] Yang Y R, Guan J F 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 057301 (in Chinese) [杨韵茹, 关建飞 2016 物理学报 **65** 057301]
- [9] Pang S F, Zhang Y Y, Huo Y P, Xie Y, Hao L M, Zhang T 2015 *Plasmonics* **10** 1723
- [10] Han Z H, He S L 2007 *Opt. Commun.* **278** 199
- [11] Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I 2010 *Nature Photon.* **4** 83
- [12] Barrow S J, Funston A M, Wei X Z, Mulvaney P 2013 *Nano Today* **8** 138
- [13] Cetin A E, Altug H 2012 *ACS Nano* **11** 9989
- [14] Jain P K, Huang X H, El-Sayed I H, El-Sayed M A 2007 *Plasmonics* **2** 107

- [15] Thyagarajan K, Butet J, Martin O J F 2013 *Nano Lett.* **13** 1847
- [16] Zhao K, Huo Y, Liu T, Li J, He B, Zhao T, Liu L, Li Y 2015 *Plasmonics* **10** 1041
- [17] Sonnefraud Y, Verellen N, Sobhani H, Vandenbosch G A E, Moshchalkov V V, Dorpe P V, Nordlander P, Maier S A 2010 *ACS Nano* **3** 1664
- [18] Habteyes T G, Dhuey S, Cabrini S, Schuck P J, Leone S R 2011 *Nano Lett.* **11** 1819
- [19] Dregely D, Hentschel M, Giessen H 2011 *ACS Nano* **5** 8202
- [20] Luo S, Fu T, Zhang Z Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 147303 (in Chinese) [罗松, 付统, 张中月 2013 物理学报 **62** 147303]
- [21] Feng H, Sonnefraud Y, Dorpe P V, Maier S A, Halas N J, Nordlander P 2008 *Nano Lett.* **11** 3983
- [22] Fan J A, Bao K, Wu C, Bao J, Bardhan R, Halas N J, Manoharan V N, Shvets G, Nordlander P, Capasso F 2010 *Nano Lett.* **10** 4680
- [23] Zhao K, Huo Y, Liu T, Wu Y, Zhao T, Liu L, Li Y, Deng J 2016 *Plasmonics* **10** 1041

Transmission characteristics of surface plasmon polaritons in “ θ ”-shaped resonator

Wang Wei[†] Gao She-Sheng Meng Yang

(School of Automatics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 1 April 2016; revised manuscript received 25 September 2016)

Abstract

To improve the efficiency of transmission, in this paper, we propose a structure of the surface plasmon polariton embedded in a sliver circular resonator with a sliver nanoellipsoid (“ θ ”-shaped resonator), and also investigate its optical properties by the finite element method. Firstly, we study the optical properties of “ θ ”-shaped resonator at $a = 120$ nm and $\theta = 0^\circ$ with different values of b . The results show that the “ θ ”-shaped resonator structure has the narrow transmission peaks, and the transmittance spectrum can be tuned by modifying the structure parameters. So this nanostructure would find applications in the designing of the novel filter. Secondly, compared with the former Fano resonance which results from the localized plasmon resonance coupling, the Fano resonance which results from the resonance of the surface plasmon polaritons coupling is represented by this structure. When the symmetry of “ θ ”-shaped resonator is broken, the Fano resonance will be observed clearly. Like the Fano resonance which results from the localized plasmon resonance coupling between the bright mode of metallic nanostructure and the dark mode of metallic nanostructure, the results show that the dipolar, quadrupolar, and octupolar Fano resonances of “ θ ”-shaped resonator structure occur, which are caused by the destructive interference between the bright dipolar mode and the dark dipolar mode, quadrupolar mode, and octupolar mode. When we take the rotation angle θ as 0° and 90° , 15° and 75° , 30° and 90° respectively, the Fano asymmetric transmittance spectra of “ θ ”-shaped resonator are similar, which result from the same degree of asymmetry. The larger the degree of asymmetry of the “ θ ”-shaped resonator structure, the more obvious the Fano resonance is. Thirdly, the size of this structure has significant effects on the transmission peak positions, line width, and intensity of the Fano resonance, in particular, in the case that $\theta = 0^\circ$ corresponds to the generation of FR (FR on) and in the case corresponding to the vanishing of FR (FR off). therefore, this phenomenon of “ θ ”-shaped resonator will provide a new strategy for the surface plasmon polariton Fano switch. We hope that this nanostructure has potential applications in designing filter, biological sensors, and Fano switch.

Keywords: surface plasmon polariton, Fano resonance, filter

PACS: 73.20.Mf, 42.50.Gy, 42.79.Gn

DOI: 10.7498/aps.66.017301

[†] Corresponding author. E-mail: wangweixgd@163.com