

X-两环结构的光学特性研究

潘庭婷 曹文 邓彩松 王鸣 夏巍 郝辉

Optical property of X-two ring structure

Pan Ting-Ting Cao Wen Deng Cai-Song Wang Ming Xia Wei Hao Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 157301 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172582

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172582>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I15>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[二维方形量子点体系等离激元的量子化](#)

Quantization of plasmon in two-dimensional square quantum dot system

物理学报.2017, 66(22): 227301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.227301>

[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>

[基于纳米天线的多通道高强度定向表面等离子体波激发](#)

High-intensity directional surface plasmonic excitation based on the multi metallic slits with nano-antenna

物理学报.2015, 64(24): 247301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.247301>

[十字结构银纳米线的表面等离极化激元分束特性](#)

Surface plasmon polaritons splitting properties of silver cross nanowires

物理学报.2015, 64(9): 097303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.097303>

[金属光栅对表面等离子体波的辐射抑制研究](#)

Suppression of metal grating to surface plasma radiation

物理学报.2015, 64(8): 087301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.087301>

## X-两环结构的光学特性研究\*

潘庭婷 曹文 邓彩松 王鸣† 夏巍 郝辉

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏省光电技术重点实验室, 南京 210023)

(2017年12月4日收到; 2018年4月4日收到修改稿)

提出了一种X-两环的金属周期性阵列结构, 该结构由两个同心圆环包围中心X型构成. 利用时域有限差分算法研究了该结构的光学特性. 计算表明, 当光入射到金属表面时, 能够在结构中产生法诺共振现象, 并在不同的位置下产生共振谷. 同时, 共振谷的出现又明显依赖于结构的相对参数(X的臂长、内外环的距离、内外环宽度、周期、环数、X所呈的角度), 从而可以通过调节结构的相对参数来实现对结构的共振强度及共振谷位置的调控. 另外, 进一步分析了在不同环境折射率条件下该结构共振谷的变化规律, 可以得出该结构也对周围的环境折射率有着较高的敏感度, 最高可达1300 nm/RIU. 结果表明, 该结构在环境折射率传感器及某些光子器件的应用方面有着潜在的价值.

**关键词:** 法诺共振, 时域有限差分算法, 周期性结构

**PACS:** 73.20.Mf, 78.67.-n, 61.46.-w

**DOI:** 10.7498/aps.67.20172582

## 1 引言

光入射到金属纳米颗粒表面能够在金属表面激发局域表面等离子体共振现象<sup>[1]</sup>, 目前这种现象越来越受到各界学者的关注, 并广泛应用于等离子体激光<sup>[2]</sup>、表面增强拉曼散射<sup>[3]</sup>等方面. 而在金属纳米结构中, 相邻的金属纳米颗粒间的局域表面等离子体可以通过近场耦合作用产生一系列的等离子体模式<sup>[3-5]</sup>, 这些等离子体共振模式由多种物理机制的相互作用形成, 可以产生独特的干涉现象, 例如法诺(Fano)共振效应. 通过大量研究表明, 这些金属纳米结构中会产生Fano共振效应主要是因为具有较大辐射展宽的亮模式和具有较弱辐射展宽的暗模式之间的相消干涉引起的<sup>[6-11]</sup>. 同时这一光学性质强烈地依赖于几何形状: 大小、厚度、形状<sup>[12-15]</sup>, 因此可以通过对结构参数的调控, 来控制耦合作用的产生及强度, 进而实现共振效应的产生及调控. 另外, Fano共振也具有弱辐射阻尼且能产生很强的局域电磁场增强, 其共振频率

和线型将会随着环境折射率的变化而发生明显的偏移. 目前, 研究者已针对这一特性设计出了许多基于Fano共振的折射率传感结构. 例如, Verllen等<sup>[16]</sup>提出了X型金纳米结构和金纳米棒构成的纳米结构, 并研究了Fano共振对环境折射率的敏感性, 其敏感度可达1000 nm/RIU; Lu等<sup>[17]</sup>提出了一种基于MDM(金属-介质-金属)波导和两个纳米谐振腔组成的耦合结构, 通过对介质折射率的改变, 证明该结构对环境的敏感性, 其敏感度达900 nm/RIU; Li等<sup>[18]</sup>提出了一种基于波导和矩形谐振腔的T型传感器, 其对环境折射率敏感度可达1090 nm/RIU. 故Fano共振效应在基于介质折射率的传感方面具有极大的应用潜力<sup>[19,20]</sup>.

本文提出了一种X-两环的金属周期性阵列结构, 利用时域有限差分(the finite difference time domain method, FDTD)算法进行仿真探究. 结果表明, 在该结构中的Fano共振效应主要是由于所激发的四偶极子共振模式与偶极共振模式之间的相互耦合所产生的. 此外, 进一步研究表明该结构

\* 国家自然科学基金(批准号: 51775283, 51405240)、江苏省自然科学基金(批准号: BK20161559)、江苏省高校自然科学基金项目(批准号: 16KJB510018)和江苏省高校研究生培养创新工程(批准号: KYLX16\_1289)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangming@njnu.edu.cn

对环境折射率有着较高的敏感度, 最高可达 1300 nm/RIU, 与上述提到的 X 结构、耦合结构、T 型结构等相比具有更高的折射率敏感性, 且设计简单. 故在环境折射率传感器及某些光子器件的应用方面有着极大的应用价值 [21–25].

## 2 计算模型与方法

X-两环结构模型如图 1(a) 所示, 一个周期模型如图 1(b) 所示. 该结构由两个同心圆环包围中心 X 型构成, 外环内直径  $R_2 = 260$  nm、内环内直径  $R_1 = 180$  nm, X 的臂长  $L = 120$  nm、角度  $\theta = 90^\circ$ , 内外环及 X 的宽度  $W$  均为 20 nm、厚度  $H$  均为 60 nm、两环之间的距离  $t = 20$  nm, 衬底为  $\text{SiO}_2$ , 周期  $P = 400$  nm. 为了分析结构的光学特性, 选择金作为金属薄膜的材料, 当金

属的介电常数与频率相关时, 金属表现出色散特性. 本文模拟过程中采用修正的 Drude 模型, 可以表示为:  $\epsilon_{\text{Au}} = 1 - w_p^2/[w(w + i\gamma)]$ , 其中,  $w_p = 2\pi \times 2.175 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ . 利用 FDTD 方法建立模型, 采用波长范围为 400–3000 nm 的平面波, 沿 Z 轴正方向向下垂直入射金属表面, 偏振方向沿 X 方向. X 和 Y 方向上设置成周期边界条件(periodic), 相当于将计算区域内的模型结构、电磁场及光源强度分布进行周期性延拓, 以便达到以有限的计算区域模拟无限空间电磁场分布的目的. Z 方向设置为吸收边界条件(PML), 以保证边界上的介质连续分布. 同时设置为自动非均匀共性网格, 理论上,  $\lambda/10$  的网格会有较可靠的精确度, 因此模型网格大小设为 4 nm, 来满足计算收敛条件, 提高计算的精度与速度.

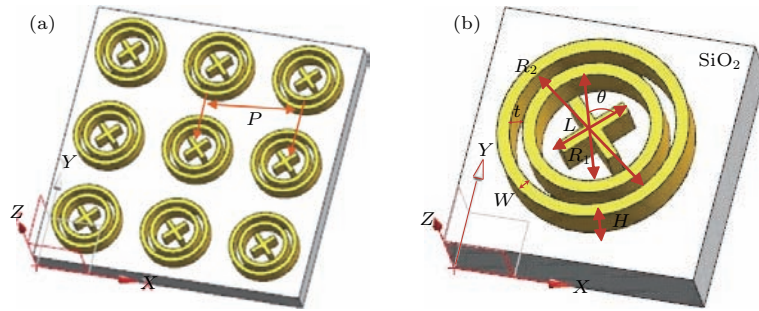


图 1 结构模型 (a) X-两环的周期性结构; (b) X-两环的单个周期  
Fig. 1. Structural model: (a) The periodic structure of X-two ring; (b) single period of X-two ring.

## 3 结果与分析

### 3.1 X-两环结构的 Fano 共振现象

图 2 为 X-两环结构的透射谱, 为了探究 X-两环结构共振谷的产生原因, 进一步分析对比了单独 X 结构、X-单环、X-两环的透射谱, 并仿真了每个结构

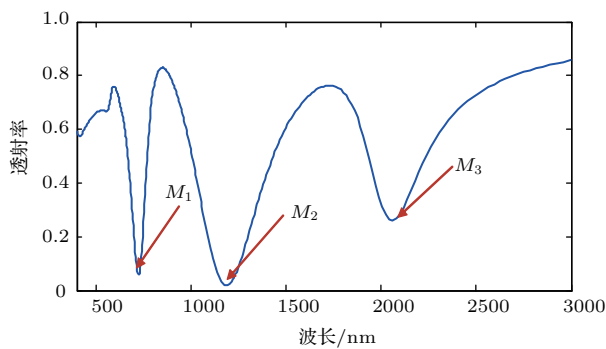


图 2 X-两环结构的透射谱  
Fig. 2. Transmission spectrum of X-two ring structure.

在共振谷处 XY 面上的电场图和电荷图, 分别如图 3—图 5 所示. 从单独 X 结构在 722 nm 的电场图和电荷图(图 4(a) 和图 4(d)) 可以看出, 正负电荷分别聚集在结构的左右两边, 在 X 结构上激发了

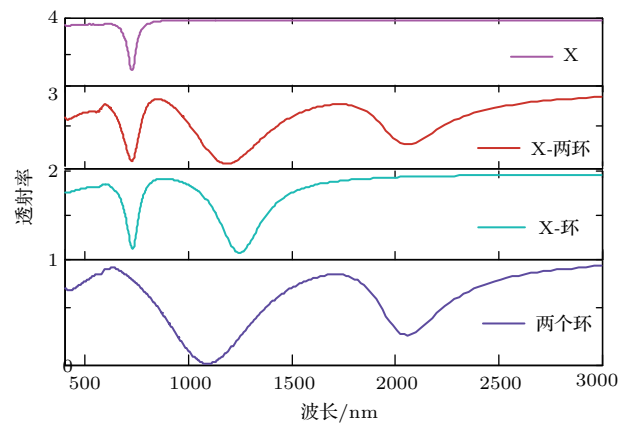


图 3 X 结构、X-两环、X-单环、两环的透射谱对比  
Fig. 3. Comparison of transmission spectra among X structure, X-two ring, X-ring and two-ring.

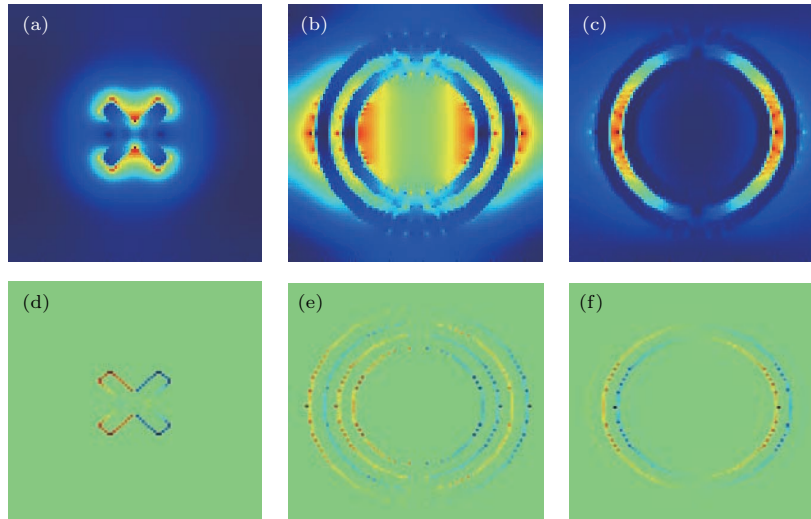


图4  $XY$  面上电场和电荷分布图 (a) X 结构在波长 722 nm 处  $XY$  面上的电场图; (b) 两环结构在波长 1090 nm 处  $XY$  面上的电场图; (c) 两环结构在波长 2060 nm 处  $XY$  面上的电场图; (d) X 结构在波长 722 nm 处  $XY$  面上的电荷图; (e) 两环结构在波长 1090 nm 处  $XY$  面上的电荷图; (f) 两环结构在波长 2060 nm 处  $XY$  面上的电荷图

Fig. 4. Diagram of the electric field and charge on the  $XY$  surface: (a) The electric field diagram of X structure at 722 nm; (b) the electric field diagram of the two ring structure at 1090 nm; (c) the electric field diagram of the two ring structure at 2060 nm; (d) the charge diagram of X structure at 722 nm; (e) the charge diagram of the two ring structure at 1090 nm; (f) the charge diagram of the two ring structure at 2060 nm.

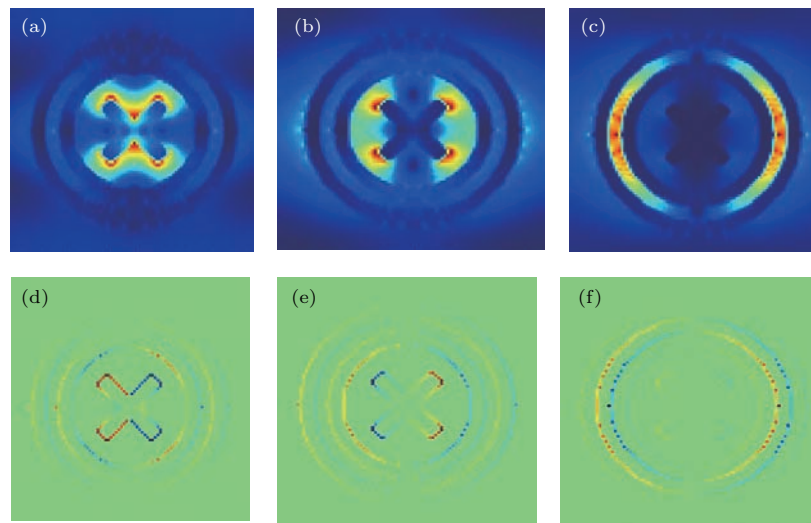


图5  $XY$  面上 X-两环结构的电场和电荷分布图 (a) 在波长 724 nm 处的电场图; (b) 在波长 1188 nm 处的电场图; (c) 在波长 2042 nm 处的电场图; (d) 在波长 724 nm 处的电荷图; (e) 在波长 1188 nm 处的电荷图; (f) 在波长 2042 nm 处的电荷图

Fig. 5. Electric field and charge diagram of X-two ring structure on the  $XY$  surface: (a) The electric field diagram at 724 nm; (b) the electric field diagram at 1188 nm; (c) the electric field diagram at 2042 nm; (d) the charge diagram at 724 nm; (e) the charge diagram at 1188 nm; (f) the charge diagram at 2042 nm.

四偶极子共振模式, 形成亚辐射模式, 抑制辐射损耗, 实现窄带光谱特性. 再结合 X-两环结构在 724 nm 共振谷  $M_1$  处的电场图及电荷图(图 5(a) 和图 5(b)), 可以看出该结构的电场及电荷分布与单独 X 结构相似, 电场及电荷分布也主要集中在内部 X 结构上, 在内部 X 结构上也呈现了一个四偶极子共振模式, 故此时 X-两环结构同样可以形成亚辐射

模式, 实现窄带光谱特性, 在 722 nm 处产生共振谷  $M_1$ . 图 5(b) 和图 5(e) 为 X-两环结构在 1188 nm 共振谷  $M_2$  处的电场及电荷图, 从图中可以看出电场主要聚集在 X 和内环之间, 正负电荷主要聚集在 X 和内环上, 这不仅在内部 X 结构上激发了四偶极子共振模式, 同时在内环上也激发了偶极子共振模式, 此时内环和 X 结构所激发的两种模式相互作用, 形

成一种混合等离激元模式, 产生 1188 nm 处的共振谷  $M_2$ . 再从单独两环结构及 X-两环结构的电场和电荷图(图 4(c) 和图 4(f) 以及图 5(c) 和图 5(f)) 可以看出, 电场增强主要集中在内环与外环之间, 正负电荷主要集中在内外环上, 在内外环上激发了偶极子共振模式, 使 X-两环结构在 2042 nm 处产生共振谷  $M_3$ .

### 3.2 X-环结构的结构参数分析

为了进一步分析 X-两环结构的共振特性, 针对相关模型参数: X 的臂长  $L$ 、内外环的距离  $t$ 、内外环宽度  $W$ 、周期  $P$ 、环数、X 所呈的角度及环境折射率的改变进行仿真对比, 得到了明显的光学响应规律, 为实现共振谷波长的可控提供了有效途径.

#### 3.2.1 X-两环结构的 X 的臂长、内外环的距离对共振谷的调控

保持 X-两环结构其他参数不变, 改变 X 的臂长  $L$ (80—160 nm), 间隔为 20 nm. 其透射谱如图 6 所示, 随着臂长  $L$  的增加, 透射谱红移, 共振谷  $M_1$ 、 $M_2$  的偏移明显, 且  $M_1$  的值不断减小而  $M_2$  的值不断增加, 表明 X 的臂长  $L$  的改变会使 X 结构的四偶极子共振强度增强, X 结构与内环之间的电场耦合作用加强, 所呈现的混合等离激元模式相互作用增加. 因此, 可以通过调节臂长来调控共振谷  $M_1$ 、 $M_2$  的共振产生及强度. 另外再改变结构内外环的距离  $t$  (10—50 nm), 间隔为 10 nm, 结果如图 7 所示, 可见随着间距的增大共振谷  $M_2$  谱线略有红移, 大小几乎不变, 而  $M_3$  的值发生了巨大的改变. 由此可知随着内外环间距的增大, 电场耦合作用减小,

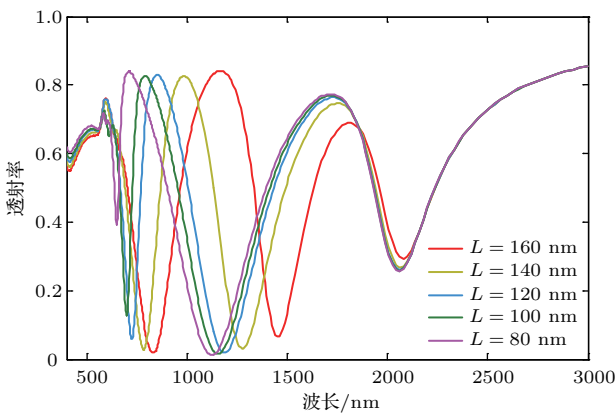


图 6 在不同的 X 长度下 X-两环结构的透射谱  
Fig. 6. Transmission spectra of X-two ring structure at different length of X.

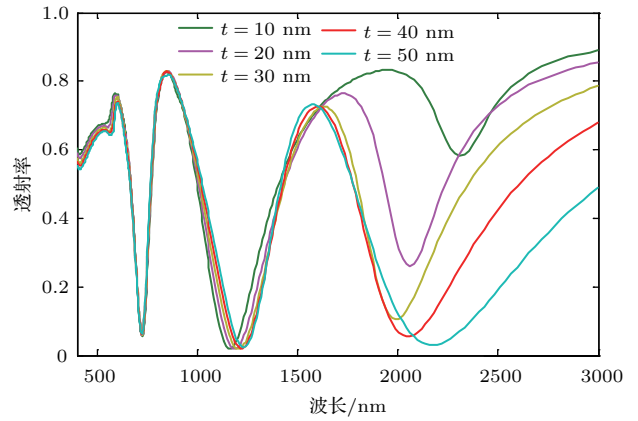


图 7 在不同的环间距下 X-两环结构的透射谱  
Fig. 7. Transmission spectra of X-two ring structure at different ring spacing.

所呈现的偶极子共振减弱, 甚至消失. 显然, 可以使用内外环间距  $t$  来调控内外环的共振谷  $M_3$  的产生及强度.

#### 3.2.2 X-两环结构的内外环宽度、周期对共振谷的调控

保持 X-两环其他结构参数不变, 改变内外环的宽度  $W$ (10—30 nm), 间距为 5 nm. 结构的透射谱如图 8 所示, 随着内外环宽度  $W$  的增加, 透射谱线蓝移, 对共振谷  $M_2$  及  $M_3$  的影响较为明显, 尤其是  $M_3$  不仅存在位置偏移还伴随着值的明显变化, 说明改变宽度可以使 X 结构与内环之间、内外环之间的电场耦合作用增强, 使得 X 结构与内环上激发的四偶极子共振模式与偶极子共振模式的相互作用增强, 内外环上呈现的偶极子共振模式更加显著. 因此可以利用宽度  $W$  来调控共振谷  $M_2$  及  $M_3$  的产生及强度变化. 另外, 再通过改变结构的周

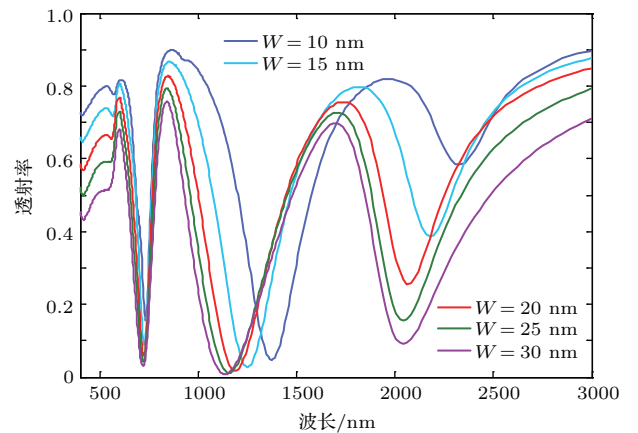


图 8 X-两环结构在不同结构宽度下的透射谱  
Fig. 8. Transmission spectra of X-two ring structure at different widths structure.

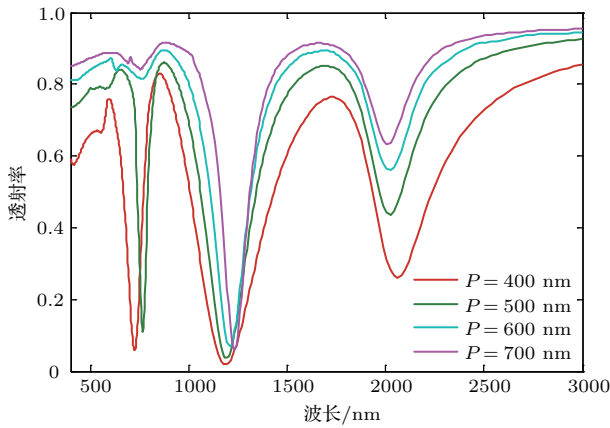


图9 X-两环结构在不同结构周期下的透射谱  
Fig. 9. Transmission spectra of X-two ring structure at different periods.

期  $P$  (400—700 nm), 间隔为 100 nm, 仿真其结构的透射谱, 如图 9 所示. 由图 9 可见, 随着结构周期的增加, 共振谷  $M_1$  值增加且逐渐消失, 共振谷  $M_2$  半高全宽不断减小且值略有增加,  $M_3$  的值逐渐增加. 这是由于结构周期增加, 电场耦合作用减弱, 进而对环内 X 结构及两环之间的共振产生巨大的影响, 使得 X 结构上的四偶极子共振及内外环上的偶极子共振都逐渐减弱, 甚至消失. 结果表明, 结构的周期性可以调控不同位置处的共振产生及强度.

### 3.2.3 X-两环结构的环数变化、X 所呈的角度对共振谷的调控

保持 X-两环其他结构参数不变, 改变结构所对应的环数, 仿真对比 X-环、X-三环结构的透射谱, 如图 10 所示. 对比三种结构可见, 随着环数的增加, 尽管激发在环与环之间的共振模式增多, 共振谷的数量增加, 但是每个环与环之间电场耦合强度减弱, 进而影响所产生的共振强度及共振谷位置, 表明环数的增加会导致结构原有共振模式的转变, 同时激发新的共振模式. 另外为了探究环内 X 结构所呈角度对结构共振效应的影响, 仿真了角度从  $30^\circ$  到  $150^\circ$ 、间隔为  $30^\circ$  时的透射谱图, 如图 11 所示, 表明随着 X 所呈角度的增加, 主要影响 X 结构所激发的四偶极子共振模式及所产生的共振谷  $M_1$ , 同时共振谷  $M_2$  的谱线红移. 这是由于共振谷  $M_2$  的产生是由 X 结构的四偶极子共振模式与内环上偶极子共振模式相互作用的结果. 因此可以采用 X 的角度来调控的共振谷  $M_1$ ,  $M_2$  的产生及强度.

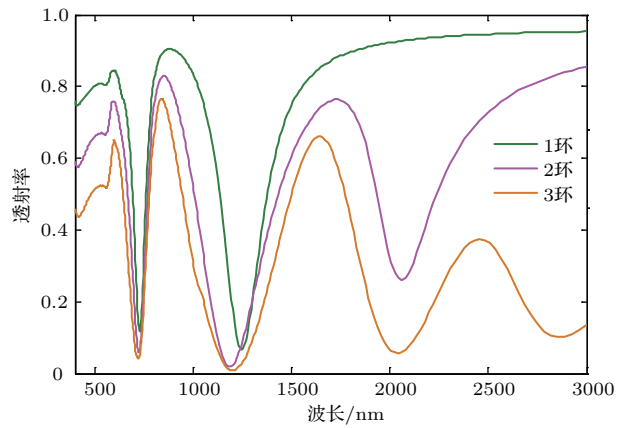


图10 X-环、X-两环、X-三环结构的透射谱  
Fig. 10. Transmission spectra of X-ring, X-two ring and X-three ring structure.

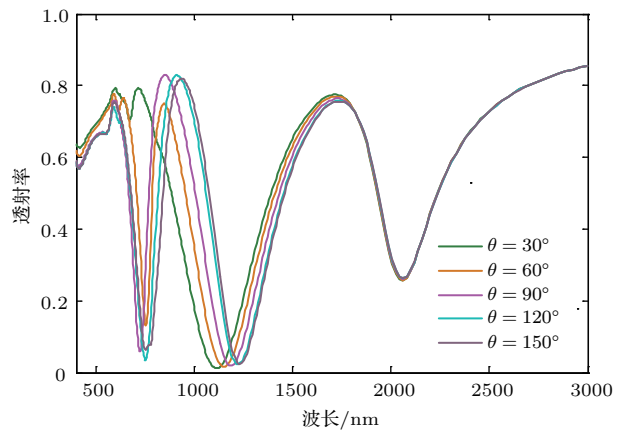


图11 当 X 所呈角度增加时 X-两环结构的透射谱的变化  
Fig. 11. Variation of transmission spectrum of the X-two ring structure with the increase of X angle.

### 3.2.4 环境折射率对 X-两环结构共振的调控

周期结构的光学特性对所处环境介质折射率的改变是否灵敏是衡量其是否适于用作折射率传感器研究的重要判据之一, 为了探究 X-环结构对于环境折射率的敏感性, 仿真了环境折射率  $\epsilon$  分别为 1.25, 1.30, 1.35, 1.40, 1.45, 1.50 时, X-两环结构所对应的透射光谱, 如图 12 所示. 由图 12 可见, 随着环境折射率的增加, X-两环结构的透射谱红移, 同时计算了结构透射谱相对折射率  $\epsilon = 1.25$  的折射率灵敏度曲线, 如图 13 所示, 谱线呈近似线性分布. 从中着重计算了环境折射率变化所引起的共振谷  $M_3$  波长的偏移值, 得到其灵敏度可以达到 1300 nm/RIU, 故该结构应用于折射率传感器件优势显著.

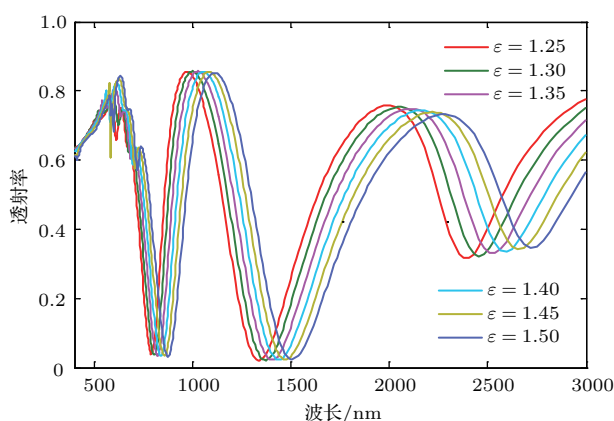


图 12 X-两环结构在不同环境折射率下的透射谱  
Fig. 12. Transmission spectra of X-two ring structure at different environmental refractive index.

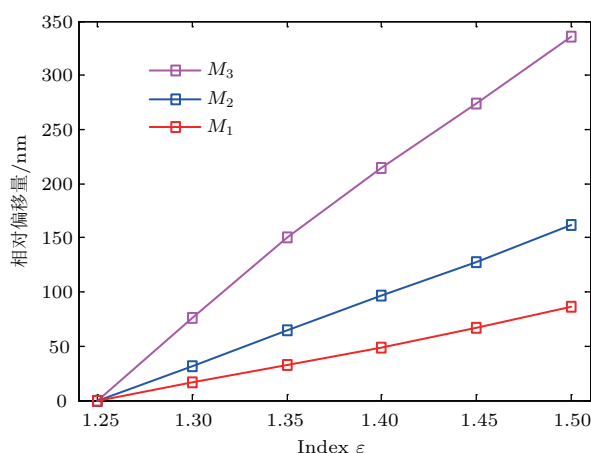


图 13 X-两环结构透射谱相对折射率  $\epsilon = 1.25$  的折射率灵敏度曲线  
Fig. 13. Sensitivity of refractive index of X-two ring structure transmission spectrum to relative refractive index  $\epsilon = 1.25$ .

## 4 结 论

本文提出了X-两环结构的金属周期性阵列结构,利用FDTD算法研究了该结构的光学特性.计算表明,当光入射到金属表面时,能够激发局域表面等离子体共振现象,在结构中将产生明显的Fano共振现象,而在不同的位置下产生共振谷.同时,由于Fano共振效应强烈依赖于结构的相对参数,从而可以通过调节结构的X的臂长、内外环的间距、内外环宽度、周期、环数、X所呈的角度来改变结构的电场耦合作用及结构内部存在的不同共振模式,从而实现对X-两环结构共振谷的产生及强度的调控.此外,进一步分析了不同环境折射率下该结构共振谷的变化规律,获得该结构的传感性能,最高达1300 nm/RIU.以上结果表明,该结构

不仅简单经济、紧凑高效,同时还具有良好的传感特性,在生化器件传感或其他光学应用领域将有极大的应用价值.

## 参考文献

- [1] Funston A M, Novo C, Davis T J, Mulvaney P 2009 *Nano Lett.* **9** 1651
- [2] Yun B F, Hu G H, Cong J W, Cui Y P 2014 *Plasmonics* **9** 691
- [3] Tamma V A, Cui Y, Zhou J, Park W 2013 *Nanoscale* **5** 1592
- [4] Verellen N, van Dorpe P, Huang C, Lodewijks K, Vandenbosch G A E, Lagae L, Moshchalkov V V 2011 *Nano Lett.* **11** 391
- [5] Fu Y H, Zhang J B, Yu Y F, Luk'yanchuk B 2012 *ACS Nano* **6** 5130
- [6] Zhou L, Fu X F, Yu L, Zhang X, Yu X F, Hao Z H 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 153102
- [7] Gong H M, Zhou L, Su X R, Xiao S, Liu S D, Wang Q Q 2009 *Adv. Funct. Mater.* **19** 298
- [8] Wu D J, Jiang S M, Liu X J 2011 *J. Phys. Chem. C* **115** 23797
- [9] Zhang Q, Wen X, Li G, Ruan Q, Wang J, Xiong Q 2013 *ACS Nano* **7** 11071
- [10] Pena-Rodriguez O, Rivera A, Campoy-Quiles M, Pal U 2013 *Nanoscale* **5** 209
- [11] Fedotov V A, Rose M, Prosvirnin S L, Papasimakis N, Zheludev N I 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 147401
- [12] Huo Y, Jia T, Zhang Y, Zhao H, Zhang S, Feng D, Sun Z 2013 *Sensors* **13** 11350
- [13] Ye J, Wen F, Sobhani H, Lassiter J B, van Dorpe P, Nordlander P, Halas N J 2012 *Nano Lett.* **12** 1660
- [14] Huo Y Y, Jia T Q, Zhang Y, Zhao H, Zhang S A, Feng D H, Sun Z R 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 113104
- [15] Lu Y, Tohmyoh H, Saka M 2012 *Thin Solid Films* **520** 3448
- [16] Verellen N, van Dorpe P, Verduyck D, Vandenbosch G A E, Lagae L, Moshchalkov V V 2011 *Opt. Express* **19** 11034
- [17] Lu H, Liu X, Mao D, Wang G X 2012 *Opt. Lett.* **37** 3780
- [18] Li B X, Li H J, Zeng L L, Zhan S P, He Z H, Chen Z Q, Xu H 2016 *J. Lightwave Technol.* **34** 3342
- [19] Deng Z L, Zhang S, Wang G P 2016 *Nanoscale* **8** 1588
- [20] Deng Z L, Yogesh N, Chen X D, Chen W J, Dong J W, Ouyang Z B, Wang G P 2015 *Sci. Rep.* **5** 18461
- [21] Liu G D, Zhai X, Wang L L, Wang B X, Lin Q, Shang X J 2016 *Plasmonics* **11** 381
- [22] Deng Z L, Fu T, Ouyang Z B, Wang G P 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 081109
- [23] Deng Z L, Zhang S A, Wang G P 2016 *Opt. Express* **24** 23118
- [24] Deng Z L, Dong J W 2013 *Opt. Express* **21** 20291
- [25] Ahmadivand A, Sinha R, Pala N 2017 *Opt. Laser Technol.* **90** 65

# Optical property of X-two ring structure\*

Pan Ting-Ting Cao Wen Deng Cai-Song Wang Ming<sup>†</sup> Xia Wei Hao Hui

(Key Laboratory on Opto-Electronic Technology of Jiangsu Province, School of Physics Science and Technology,  
Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

( Received 4 December 2017; revised manuscript received 4 April 2018 )

## Abstract

In this paper, the metal periodic array structure of X-two ring based on the principle of Fano resonance is proposed, which is composed of two concentric rings around the center X. The optical properties of the structure are investigated by using the finite difference time domain method. According to the simulated transmission spectra, electric field distribution and charge distribution, when linearly polarized light is incident to the metal surface, Fano resonance can be excited and the interaction between resonance modes can be produced in the structure of X-two ring, which can make resonance valleys generated at different positions. Fano resonance is mainly formed by the coherent interference between a bright mode with the larger radiation broadening and a dark mode with the weak radiation broadening, thus the structural resonance valley of X-two ring based on Fano resonance is strongly dependent on the relative parameters of the structure (the arm length of X, the distance between the inner ring and outer ring, the width of the inner ring and outer ring, the period, the number of ring, and the angle of X). In other words, over the wavelength range of 450 nm to 3000 nm, the intensity and position of the structural resonance valley are adjustable as the change of the relative geometric parameters of the structure. In addition, due to weak radiation damping and strong local electromagnetic field enhancement of Fano resonance, the resonance frequency and line type can significantly shift with the change of the environmental refractive index. Therefore, the further analysis of the variation of the structural resonance valley under the conditions of different refractive indices can be concluded that the structure of X-two ring has a higher sensitivity to the refractive index of surrounding environment, up to 1300 nm/RIU. The above results show that the structure of X-two ring not only is simple, economical, compact and efficient, but also has great potential applications in refractive index sensors and some photonic devices.

**Keywords:** Fano resonance, finite-difference time-domain method, periodic structure

**PACS:** 73.20.Mf, 78.67.-n, 61.46.-w

**DOI:** 10.7498/aps.67.20172582

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51775283, 51405240), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20161559), the Natural Science Foundation of the Higher Education Institutions of Jiangsu Province, China (Grant No. 16KJB510018), and the Postgraduate Research and Innovation Project of the University of Jiangsu Province, China (Grant No. KYLX16\_1289).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: wangming@njjnu.edu.cn