

# 三角形金属纳米结构的局域表面等离子共振传感特性与优化分析

罗庭军<sup>1</sup> 万玲玉<sup>1\*</sup> 黄继钦<sup>1</sup> 庞霖<sup>1,2</sup> 张卫平<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西南宁 530004)

(<sup>2</sup> 四川大学物理科学与工程技术学院, 四川成都 610064)

**摘要** 采用三维时域有限差分法,数值研究了不同几何参数下,三角形金属纳米颗粒的局域表面等离子共振特性和传感特性。给出了三角形的高、顶角、顶角曲率半径和间距 4 个参数对单三角形和双三角形金纳米结构的消光谱、体折射率灵敏度和品质因子等的影响,并提出了优化三角形金属纳米结构传感性能的方法。经优化的双三角金属纳米结构的体折射率灵敏度达 941 nm/RIU,品质因子达 6.8。

**关键词** 表面光学;局域表面等离子共振;三角形金属纳米颗粒;双三角纳米结构;传感特性

**中图分类号** O539 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0524002

## Shape Optimization and Analysis of Sensing Properties of Localized Surface Plasmon Resonances for Triangle Metal Nanoparticles

Luo Tingjun<sup>1</sup> Wan Lingyu<sup>1</sup> Huang Jiqin<sup>1</sup> Pang Lin<sup>2</sup> Zhang Weiping<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Physical Science and Technology, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

(<sup>2</sup> College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract** Using three-dimensional (3D) finite-difference time-domain method, optical and sensing properties of local surface plasmon resonances of triangle metal nanoparticles with different geometric parameters are studied numerically. The influences of four parameters, including the height, the tip angle, the radius of curvature of vertex angle of the triangle and the gap, on the extinction spectra, bulk refractive index sensitivities and figures of merit of single-triangle and bi-triangle gold nanostructures are analyzed in detail. An optimization method of sensing properties is given based on the results of numerical calculation. An optimization bi-triangle nanostructure with the bulk refractive index sensitivity of 941 nm/RIU and figure of merit of 6.8 is presented.

**Key words** optics at surfaces; localized surface plasmonic resonant; triangle metal nanoparticles; bi-triangle nanostructure; sensing characteristic

**OCIS codes** 240.6680; 310.6628; 230.4555

## 1 引 言

近年来,金属纳米颗粒的局域表面等离子共振(LSPR)特性在化学和生物传感方面的应用得到了广泛关注。基于 LSPR 现象的传感器具有无标记、实时、测试设备简单和体积小等优点,在药物研究、生物检测、细胞标记、定点诊断、分子动力学研究及癌症诊断等方面具有广阔应用前景。LSPR 生化

传感器利用局域表面等离子激元(LSP)的共振峰值波长随金属纳米颗粒所处环境折射率变化而发生偏移的特性来进行传感测量。LSP 随周围介质折射率变化的共振偏移特性与金属纳米颗粒的组成、形状、尺寸和粒子间距等因素有关,通过形状选择和几何参数优化使金属纳米粒子的共振波长偏移具有更大的折射率灵敏度是研究人员重点关注的方面之一。目前,

收稿日期: 2012-12-18; 收到修改稿日期: 2013-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(10964001)资助课题。

作者简介: 罗庭军(1985—),男,硕士研究生,主要从事表面等离子激元生物传感器方面的研究。E-mail: ltj.407@163.com

导师简介: 庞霖(1966—),男,教授,主要从事微纳米光学和微纳制造等方面的研究。Email: lin.lpang@gmail.com

(通信联系人)

多种形状的单金属纳米颗粒如球形和椭圆形<sup>[1~4]</sup>、棒形和圆盘形<sup>[2~9]</sup>、空心壳及核形<sup>[10,11]</sup>、环形<sup>[12]</sup>、菱形<sup>[13]</sup>、星形<sup>[14,15]</sup>、新月形<sup>[16]</sup>和三角形<sup>[17~20]</sup>等的 LSPR 特性相继被研究,其中球状和椭圆状颗粒的折射率灵敏度一般为 100~200 nm/RIU,棒形和圆盘形以及菱形颗粒的为 200~300 nm/RIU<sup>[21~24]</sup>,空心壳形的为 300~400 nm/RIU<sup>[10]</sup>,星形的可达 600 nm/RIU<sup>[14]</sup>。现有报道中,新月形颗粒具有最大的谐振波长范围和相应的折射率灵敏度,谐振波长范围为 560~3600 nm,折射率灵敏度为 370~880 nm/RIU<sup>[16]</sup>。对于单三角形金属纳米颗粒,现有报道的折射率灵敏度约为 200 nm/RIU<sup>[21,22]</sup>,但由于其尖端效应和形状的可调整性大,认为三角形颗粒的折射率灵敏度还有很大的增长空间,特别是利用双三角尖端效应的近场耦合,可以更好地提高折射率灵敏度。

本文采用三维时域有限差分(3D-FDTD)法,详细分析了单三角和双三角金属纳米结构的几何参数对共振波长、半峰全宽、体折射率灵敏度和传感品质因子(FOM)的影响,提出了三角形金属纳米颗粒传感性能的优化方案。结构优化后的单三角纳米颗粒折射率灵敏度可达 500 nm/RIU,双三角形纳米金属结构的折射率灵敏度可达 941 nm/RIU,品质因子为 6.8。研究结果为三角形纳米结构的传感器设计提供了一定的参考。

## 2 理论基础和计算模型

当光和金属纳米颗粒相互作用时,金属颗粒对光的吸收和散射性质通过麦克斯韦方程组求解,目前只有球状和椭球状粒子有解析解。对于粒径远小于入射光波长的球状及椭球状粒子,其对光的吸收和散射性质由准静态近似与米氏理论描述<sup>[25~27]</sup>,在准静态近似下,尺寸小于 100 nm 的球形粒子的消光系数可明确表示为

$$C_{\text{ext}} = 9 \frac{\omega}{c} \epsilon_m^{3/2} V \frac{\epsilon_2}{(\epsilon_r + 2\epsilon_m)^2 + \epsilon_2^2}, \quad (1)$$

式中  $c$  为光在真空中的速度, $\omega$  为入射光的角频率, $V$  为金属的体积, $\epsilon_r = \epsilon_1 + i\epsilon_2$  为金属的复介电常数, $\epsilon_m$  为周围环境介质的介电常数。当  $\epsilon_r + 2\epsilon_m = 0$  时发生局域表面等离子体共振, $C_{\text{ext}}$  最大,此时的消光谱峰值波长即为共振波长。当球形粒子尺寸大于 100 nm 时,消光系数需要采用米氏理论计算<sup>[25]</sup>。

对于尺寸远小于入射波长的椭球粒子,消光系数改写为

$$C_{\text{ext}} = \frac{2\pi}{3\lambda} NV \epsilon_m^{3/2} \sum_j \frac{(1/P_j^2)\epsilon_2}{\left(\epsilon_1 + \frac{1-P_j}{P_j}\epsilon_m\right)^2 + \epsilon_2^2}, \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为入射波长, $j$  为整数, $N$  为单位体积内的粒子数, $P_j$  为粒子的退极化因子,与椭球的长半轴和短半轴有关。但是,对于复杂形状的粒子,上述散射问题没有精确解析解,只能通过数值仿真进行近似分析。常用的数值计算方法有离散偶极子近似(DDA),有限元法(FEM)和时域有限差分(FDTD)法等,其中用 FDTD 法在时域内对麦克斯韦方程组进行差分近似,可仿真任意形状结构,并实时反馈空间各点的场分布,在脉冲入射时,通过一次时域计算即可借助快速傅里叶变换得到整个频段范围内的频率响应。本文采用 3D-FDTD 方法对三角形金属纳米颗粒的 LSPR 传感性质进行数值研究。

计算模型如图 1 所示,由等腰三角形金属纳米颗粒和玻璃基底构成,其中图 1(a)、(b)分别为单三角形的俯视图和立体图,图 1(c)、(d)分别为双三角形结构的俯视图和立体图。设定三角形的厚度为 20 nm,其他可变化的几何参数有等腰三角形的高度  $D$ 、三角形顶角  $A$  和顶角曲率半径  $R$  三个参数,双三角形纳米结构由对称的两个三角形组成,变化几何参数除了  $D$ 、 $A$  和  $R$  之外,还有两个三角形的间距  $G$ 。在图 1 中,定义俯视图所在的平面为三维空间的  $XOY$  平面,入射场波矢沿着  $Z$  方向,电场矢量沿  $X$  轴方向。选择金作为纳米结构材料,其色散性质满足 Lorentz-Drude 模型<sup>[28]</sup>,在该模型下,金属的复介电常数可表示为

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \sum_{j=0}^M \frac{G_j \omega_p^2}{\omega_j^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega}, \quad (3)$$

式中  $\epsilon_\infty$  表示金属无限频率处的电容率, $M$  为整数, $\omega_p$  为自由电子气的等离子体频率, $G_j$  为第  $j$  共振项的强度, $\omega_j$  为第  $j$  共振项的束缚频率, $\gamma_j$  为第  $j$  共振项的阻尼系数。计算中  $\epsilon_\infty = 1$ , $j = 5$  时,相关参数如表 1 所示<sup>[28]</sup>,其中网格划分为  $1 \text{ nm} \times 1 \text{ nm} \times 1 \text{ nm}$ ,边界条件为完美匹配层。

根据所建几何模型,通过 3D-FDTD 法求出金属纳米颗粒的消光谱,从消光谱中提出峰值波长即为共振波长,LSPR 传感器通过测量 LSPR 消光谱上共振峰的波长变化来确定纳米结构外部生物环境折射率的变化,常用的考察 LSPR 传感性能的指标主要有:1)体折射率灵敏度  $S$ ,定义为外部折射率  $n_c$  变化一个单位所引起的共振波长差,表示为  $S = \frac{d\lambda_r}{dn_c}$ ;2)品质因子,定义为折射率灵敏度  $S$  和共振谱

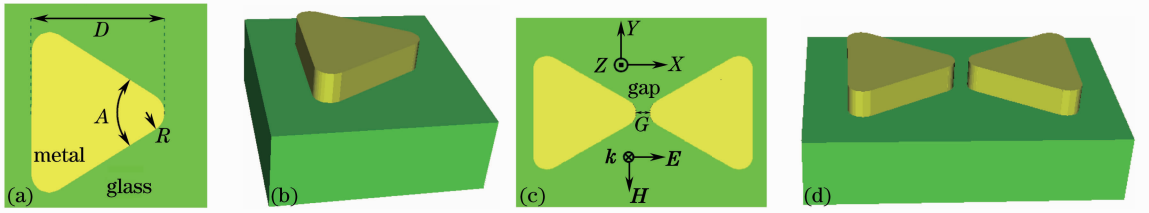


图 1 三角形金属纳米结构模型。(a)单三角模型平面图；(b)单三角模型立体图；(c)双三角模型平面图；(d)双三角模型立体图

Fig.1 Schematic models of simulated metal nanostructures. (a) Plan view of single-triangle; (b) space diagram of single-triangle; (c) plan view of bi-triangle; (d) space diagram of bi-triangle

表 1 金的 Lorentz-Drude 模型参数  
Table 1 Parameters in Lorentz-Drude model for gold

| $j$ | $G_j$  | $\omega_p/(10^{17} \text{ rad/s})$ | $\omega_j/(10^{15} \text{ rad/s})$ | $\gamma_j/(10^{16} \text{ rad/s})$ |
|-----|--------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 0   | 0.7600 | 0.137188                           | 0.000000                           | 0.805202                           |
| 1   | 0.0240 | 0.137188                           | 0.630488                           | 0.366139                           |
| 2   | 0.0100 | 0.137188                           | 1.26098                            | 0.524141                           |
| 3   | 0.0710 | 0.137188                           | 4.51065                            | 0.132175                           |
| 4   | 0.6010 | 0.137188                           | 6.53885                            | 0.378901                           |
| 5   | 4.3840 | 0.137188                           | 20.2364                            | 0.336362                           |

的半峰全宽  $W$  之比,即  $P_{\text{FOM}} = S/W$ 。根据所建几何模型,通过 3D-FDTD 法计算可得不同几何参数三角形纳米颗粒的局域表面等离共振传感性质。

### 3 三角形金属纳米结构的传感特性

#### 3.1 单三角形纳米结构的传感性质

等腰单三角形金纳米颗粒的初始结构参数为:  $D=80 \text{ nm}$ ,  $A=60^\circ$ ,  $R=5 \text{ nm}$ 。初始外部介质为水,折射率为 1.33,玻璃基底的折射率取 1.5。分别改变其中的一个几何参数,考察其消光谱和传感性质。图 2 为三角形的高对单三角纳米结构的消光和传感性质的影响。计算中,  $D$  以 20 nm 的步长从 40 nm 变化到 220 nm,在  $D$  增大时,保持长宽比不变,体积正比于  $D^2$ ,共振波长近似以线性关系红移。红移的主要原因为体积增大使参与集体震荡的自由电子数增多,电磁场延迟效应减弱,使等离共振激发所需的能量减少。图 2(b)~(d) 分别为  $D$  对折射率灵敏度、半峰全宽和品质因子的影响,  $D=40 \text{ nm}$  时总自由电子数偏少,未能良好起振,消光强度很小,导致半峰全宽很大。  $D$  大于 60 nm 后,随着体积的增大参与共振的自由电子数增加,共振幅度增大,消光强度增加。随着共振波长的红移,体折射率灵敏度增大,同时

半峰全宽增加。当  $D$  从 60 nm 变化到 220 nm 时,体折射率灵敏度由 190 nm/RIU 增加到 480 nm/RIU,当折射率灵敏度的增加速率大于半峰全宽的增加速率时,品质因子增加,反之则减小,品质因子在 80~150 nm 之间具有较佳值。

图 3 为三角形的顶角变化时单三角纳米结构的消光和传感性质。计算中,  $A$  以  $15^\circ$  的步长从  $15^\circ$  变化到  $135^\circ$ 。随着  $A$  的增加,长宽比减小,体积增大,消光谱共振峰先蓝移,在约  $75^\circ$  的时候转向红移。共振波长的偏移和三角形的尖锐程度相关,形状尖锐时在尖端处集聚的自由电子数密度大,激发共振所需要的能量少,共振波长红移。半峰全宽和体折射率灵敏度也相应地呈现两头大、中间小的特点,品质因子则在  $75^\circ \sim 105^\circ$  的范围内有较佳值。

图 4 为三角形的顶角曲率半径变化对单三角纳米结构的消光和传感性质的影响。计算中,  $R$  以非均匀步长从 1 nm 变化到 28 nm。同样地,共振波长与顶角的尖锐程度相关,随顶角尖锐度的下降而蓝移。  $R$  增加,消光谱共振峰蓝移,半峰全宽变窄,体折射率灵敏度下降,品质因子无规律起伏,在  $R=3 \text{ nm}$  和  $R=16 \text{ nm}$  时有较佳值。

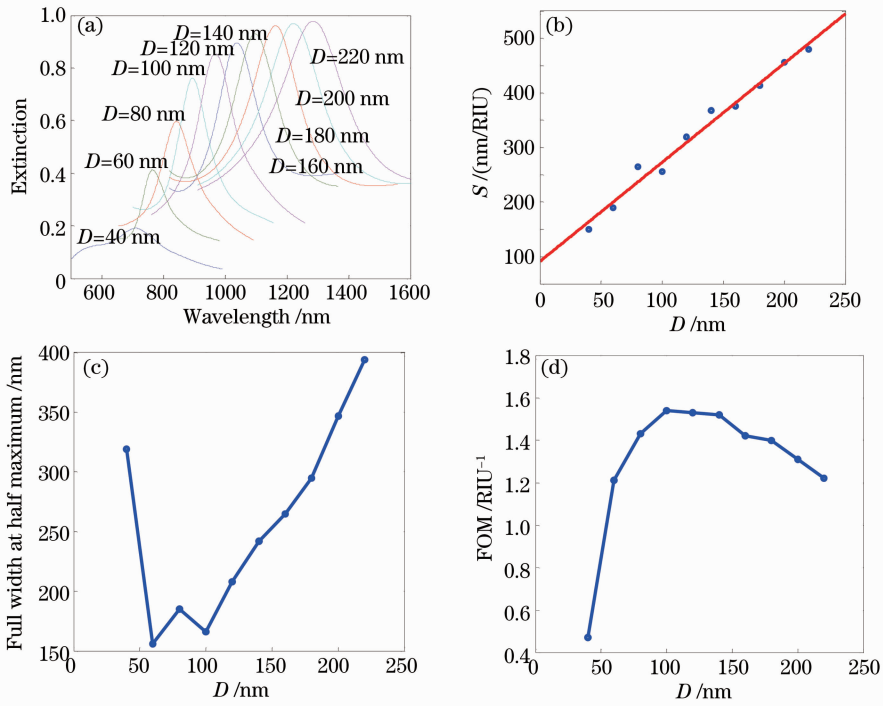


图 2  $D$  对单三角纳米结构消光和传感特性的影响。(a)消光谱;(b)折射率灵敏度;(c)半峰全宽;(d)品质因子  
 Fig.2 Effects of  $D$  on extinction and sensing characteristics of single-triangle nanostructures. (a) Extinction spectra; (b) refractive index sensitivity; (c) full width at half maximum; (d) figure of merit

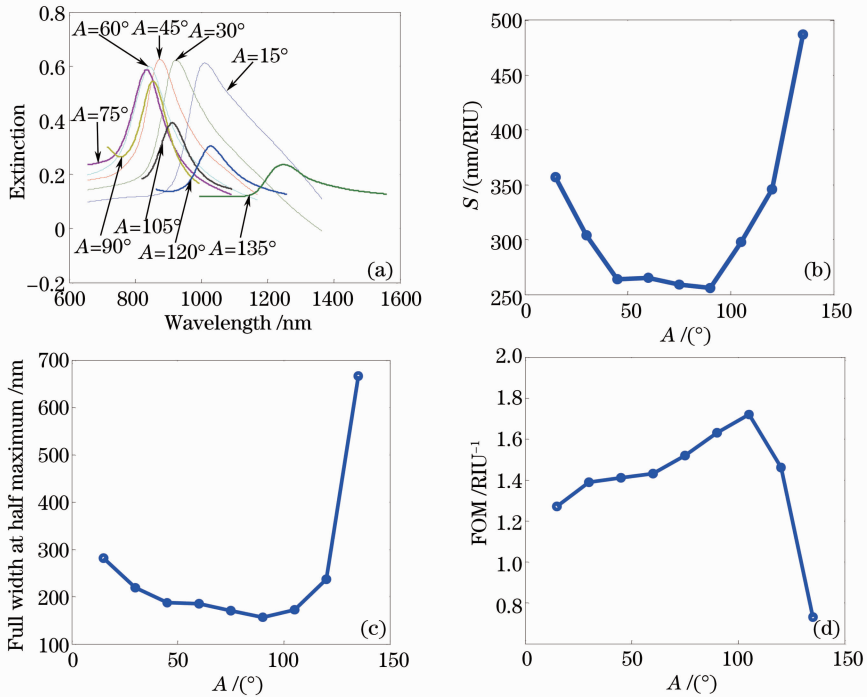


图 3  $A$  对单三角纳米结构消光和传感特性的影响。(a)消光谱;(b)折射率灵敏度;(c)半峰全宽;(d)品质因子  
 Fig.3 Effects of  $A$  on extinction and sensing characteristics of single-triangle nanostructures. (a) Extinction spectra; (b) refractive index sensitivity; (c) full width at half maximum; (d) figure of merit

### 3.2 双三角形金属纳米结构的传感性质

双等腰三角金纳米结构的初始参数选为  $D = 80$  nm,  $A = 60^\circ$ ,  $R = 5$  nm,  $G = 10$  nm。采用相同的

方法,模拟计算了各参数对双三角金属纳米结构的消光谱和传感特性的影响,结果分别如图 5~8 所示。由图 2~7 可知共同的几何参数对单三角和双

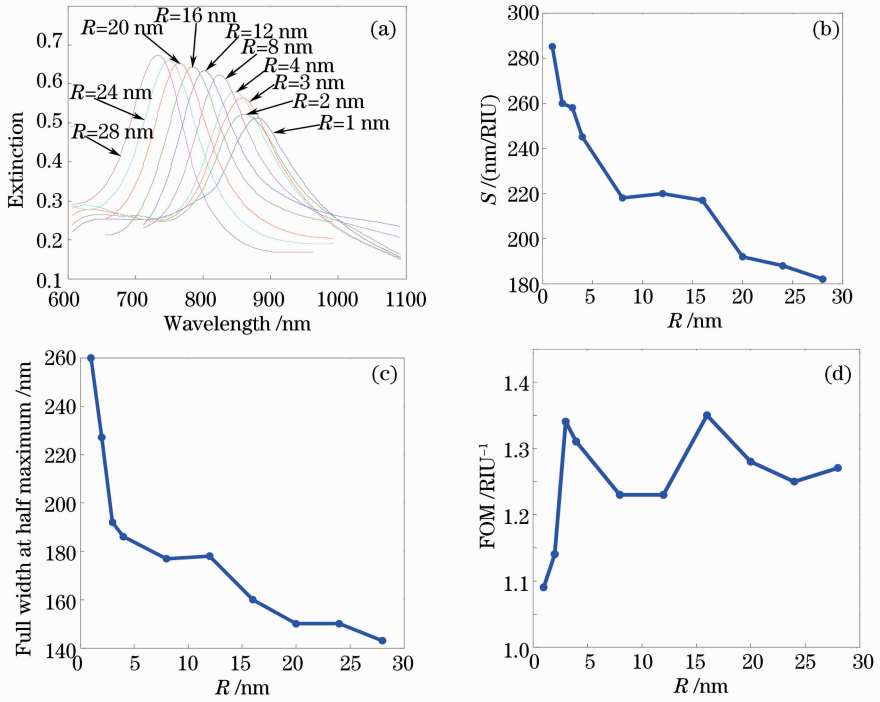


图 4  $R$  对单三角纳米结构消光和传感特性的影响。(a)消光谱;(b)折射率灵敏度;(c)半峰全宽;(d)品质因子  
Fig. 4 Effects of  $R$  on extinction and sensing characteristics of single-triangle nanostructures. (a) Extinction spectra;  
(b) refractive index sensitivity; (c) full width at half maximum; (d) figure of merit

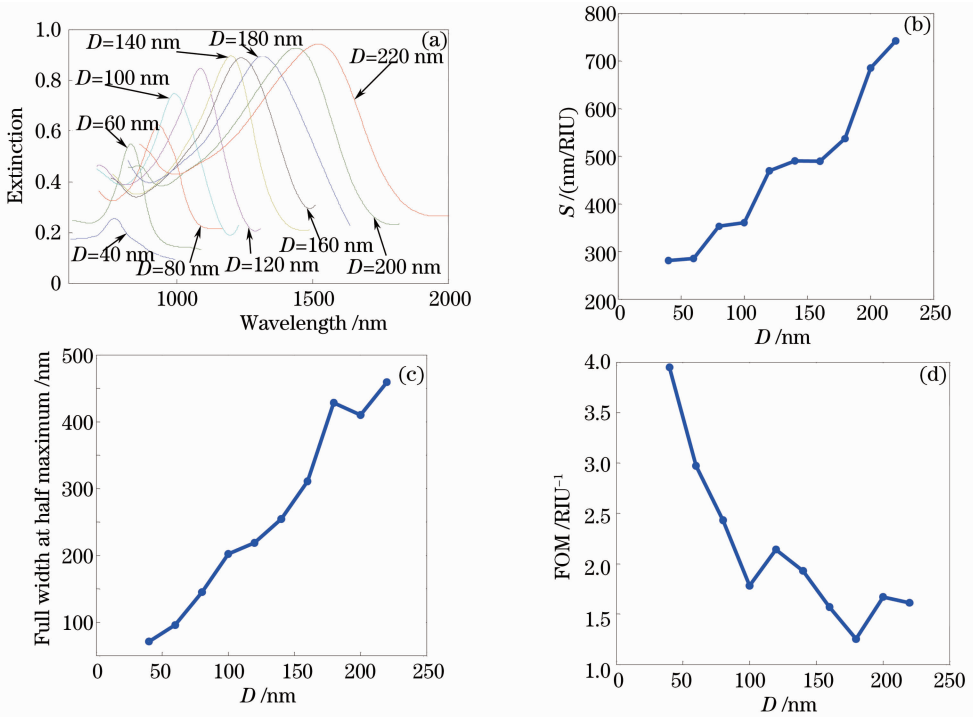


图 5  $D$  对双三角纳米结构消光和传感特性的影响。(a)消光谱;(b)折射率灵敏度;(c)半峰全宽;(d)品质因子  
Fig. 5 Effects of  $D$  on extinction and sensing characteristics of bi-triangle nanostructures. (a) Extinction spectra;  
(b) refractive index sensitivity; (c) full width at half maximum; (d) figure of merit

三角的共振峰波长和折射率灵敏度的影响是一致的,但由于双三角之间的近场耦合效应,相同的外部折射率变化引起更大的共振波长偏移,使得折射率

灵敏度更高,在  $G=10$  nm 时近似为单三角的 1.5~1.9 倍,具体的内在机制目前尚不清楚。对于双三角金属纳米结构,当  $D$  从 40 nm 变化到 220 nm 时,

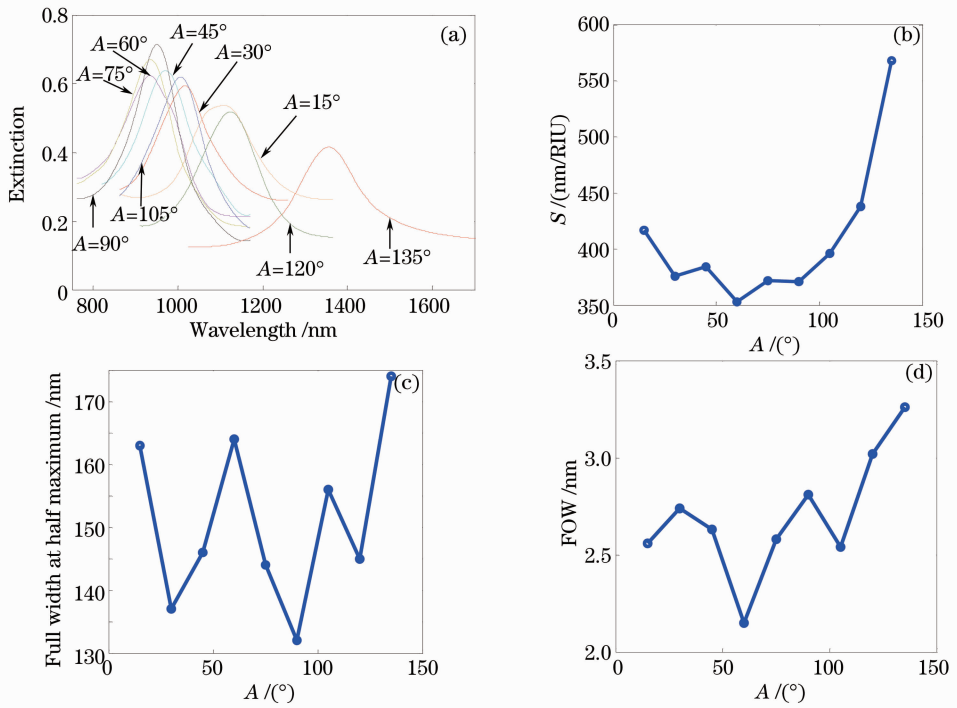


图 6  $A$  对双三角纳米结构消光和传感特性的影响。(a)消光谱;(b)折射率灵敏度;(c)半峰全宽;(d)品质因子  
Fig. 6 Effects of  $A$  on extinction and sensing characteristics of bi-triangle nanostructures. (a) Extinction spectra;  
(b) refractive index sensitivity; (c) full width at half maximum; (d) figure of merit

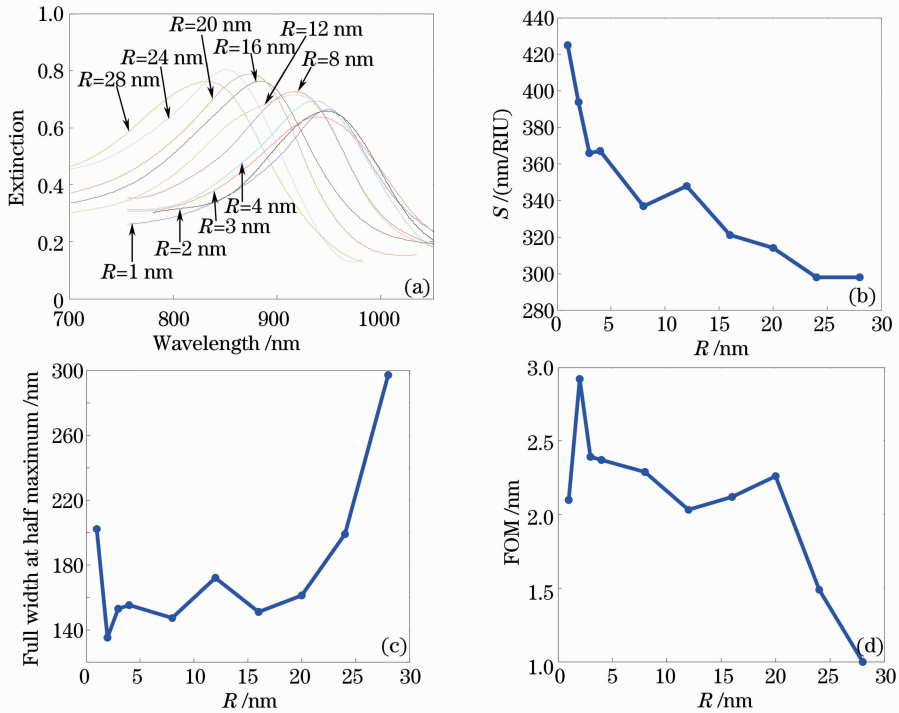


图 7  $R$  对双三角纳米结构消光和传感特性的影响。(a)消光谱;(b)折射率灵敏度;(c)半峰全宽;(d)品质因子  
Fig. 7 Effects of  $R$  on extinction and sensing characteristics of bi-triangle nanostructures. (a) Extinction spectra;  
(b) refractive index sensitivity; (c) full width at half maximum; (d) figure of merit

体折射率灵敏度增加,半峰全宽  $W$  变大,品质因子减小,在小于  $80\text{ nm}$  时具有较大值。当  $A$  从  $15^\circ$  变化到  $135^\circ$  时,半峰全宽和品质因子的变化无明显规

律,品质因子在  $30^\circ$  和  $120^\circ$  时有相对较好的值。当  $R$  从  $2\text{ nm}$  变化到  $28\text{ nm}$  时,共振波长蓝移,体折射率灵敏度减小,半峰全宽先减小后增大,品质因子有起

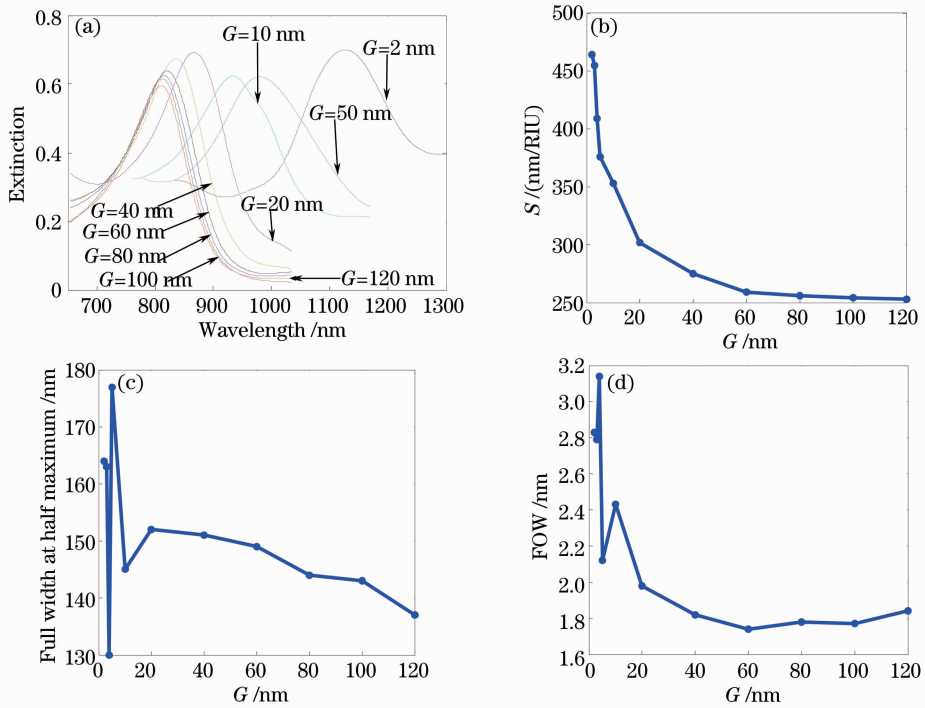


图 8  $G$  对双三角纳米结构消光和传感特性的影响。(a)消光谱;(b)折射率灵敏度;(c)半峰全宽;(d)品质因子  
Fig. 8 Effects of  $G$  on extinction and sensing characteristics of bi-triangle nanostructures. (a) Extinction spectra;  
(b) refractive index sensitivity; (c) full width at half maximum; (d) figure of merit

伏,在  $R$  为 3 nm 和 20 nm 时有较好值。

图 8 为双三角形纳米结构的特有参数间距  $G$  对传感性质的影响。随着间距的增加,消光谱共振峰非线性蓝移,折射率灵敏度以指数形式减少,当间距约为 40 nm 时,双三角间的近场耦合效应基本消失,共振行为趋向单三角纳米结构。半峰全宽在  $G < 20$  nm 时无规则起伏,品质因子当  $G > 10$  nm 后随  $G$  的增大而减小。

## 4 三角形金属纳米结构传感特性的优化分析

由上述各参数对消光谱共振峰和传感性能的影响可见,对于单三角形金属纳米颗粒,消光谱共振峰位置与三角形的形状尖锐度和体积有密切关系,在相同的形状尖锐程度下,体积越大,参与振荡的总自由电子数越多,激发共振所需的能量越少,共振波长红移。在相同的体积下,形状越尖锐,尖端处的自由电子数密度越大,相应激发共振所需的能量也越少,共振波长红移。随着共振波长的红移,折射率灵敏度相应地增大,如果折射率灵敏度的增加大于半峰全宽的增加则品质因子改善,否则品质因子无法提高。现有报道中,金属纳米颗粒的 FOM 值一般小于 3,金纳米

立方体颗粒的 FOM 值较高<sup>[29]</sup>,可达 5.4。要获得性能优良的传感器,不仅要设法增加折射率灵敏度,还要使消光谱峰尖锐,降低半峰全宽,才能提高 FOM 值。对于双三角金属纳米结构,除体积和形状尖锐度外,共振峰波长还与近场之间的耦合效应密切相关,间距越小,耦合效应越强,激发共振所需的能量越少,共振波长红移越明显。可见,要获得大的共振峰红移,对于单三角形结构,应增加形状尖锐度和体积,对于双三角结构,还应减小间距,但品质因子的提高则没有明显的规律。综合上述分析结果,给出三角形金属纳米结构优化参数的取值范围如下: $D$  为 80~160 nm, $A$  为小于  $30^\circ$  的锐角, $R < 10$  nm, $G < 10$  nm。利用上述分析结果,表 2 和表 3 分别给出了 3 组优化后的单三角形和双三角形金属纳米结构的传感性质,经过形状锐化和减小间距,得到了较好的传感性能,优化的单、双三角金属纳米结构其消光谱共振峰红移明显,可获得较高的折射率灵敏度,其中优化的单三角金属纳米结构折射率灵敏度达 500 nm/RIU,但品质因子没有较大改善。优化的双三角金属纳米结构其折射率灵敏度和品质因子都得到显著提高,折射率灵敏度达 941 nm/RIU,品质因子达 6.8,优于现有的大多数报道,但还有提升的空间。

表 2 单三角形纳米结构的优化形状与传感特性

Table 2 Optimization shape of and sensing characteristics of single-triangle nanostructures

| $D/\text{nm}$ | $A/(\text{°})$ | $R/\text{nm}$ | $S/(\text{nm}/\text{RIU})$ | $\text{FOM}/\text{RIU}^{-1}$ |
|---------------|----------------|---------------|----------------------------|------------------------------|
| 80            | 15             | 3             | 386                        | 1.58                         |
| 80            | 10             | 1             | 510                        | 1.27                         |

表 3 双三角形纳米结构的优化形状与传感特性

Table 3 Optimization shape and sensing characteristics of bi-triangle nanostructures

| $D/\text{nm}$ | $A/(\text{°})$ | $R/\text{nm}$ | $G/\text{nm}$ | $S/(\text{nm}/\text{RIU})$ | $\text{FOM}/\text{RIU}^{-1}$ |
|---------------|----------------|---------------|---------------|----------------------------|------------------------------|
| 80            | 15             | 5             | 3             | 941                        | 6.8                          |

## 5 结 论

通过数值仿真方法,研究了不同几何参数对三角形金属纳米结构传感性能的影响。研究表明,对于单三角形金属纳米结构,消光谱共振峰的红移主要与三角形的形状尖锐度和体积有关:形状越尖锐,体积越大,共振波长红移越明显,相应的与共振波长相关的体折射率灵敏度也会提高;对于双三角形纳米结构,除形状参数外,两三角间的间距对传感性能有较大影响,其中形状参数对共振波长和体折射率灵敏度的影响规律和单三角的基本一致。通过形状锐化和间距的调节,双三角结构的谐振波长范围能覆盖可见光和近红外波段,折射率灵敏度有望达到1000 nm/RIU以上。综合各参数的影响,给出三角形金属纳米结构的优化参数参考范围为: $D$ 为80~160 nm, $A$ 为小于 $30^\circ$ 的锐角, $R < 10$  nm, $G < 10$  nm。利用上述优化方法,优化的双三角金属纳米结构折射率灵敏度达941 nm/RIU,品质因子为6.8,是现有报道中性能较为优异的一种。研究结果可为三角形金属纳米结构的传感应用提供设计参考。

## 参 考 文 献

- 1 R. Jin, Y. Cao, C. A. Mirkin *et al.*. Photoinduced conversion of silver nanospheres to nanoprisms [J]. *Science*, 2001, **294**(5548): 1901~1905
- 2 N. G. Khlebtsov. Determination of size and concentration of gold nanoparticles from extinction spectra [J]. *Anal. Chem.*, 2008, **80**(17): 6620~6625
- 3 X. Liu, M. Atwater, J. Wang *et al.*. Extinction coefficient of gold nanoparticles with different sizes and different capping ligands [J]. *Colloids Surf. B*, 2007, **58**(1): 3~7
- 4 K. S. Lee, M. A. El-Sayed. Gold and silver nanoparticles in sensing and imaging: sensitivity of plasmon response to size, shape, and metal composition [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2006, **110**(39): 19220~19225
- 5 L. Kelly, E. Coronado, L. L. Zhao *et al.*. The optical

properties of metal nanoparticles; the influence of size, shape, and dielectric environment [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2003, **107**(3): 668~677

- 6 Ma Wenyong, Yang Huan, Liu Juanyi *et al.*. Influences of shape on extinction spectrum for metal nanoparticles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2629~2633  
马文英, 杨欢, 刘娟意等. 金属纳米结构的形状对其消光特性的影响研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2629~2633
- 7 Ma Wenyong, Luo Ji, Xu Chengxin *et al.*. Influence of metal nanostructures on spectral response and sensitivity of refractive index [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 1228001  
马文英, 罗吉, 许诚昕等. 金属纳米结构对光谱响应及折射率灵敏度的影响[J]. *光学学报*, 2012, **32**(12): 1228001
- 8 Y. F. Chau, Z. H. Jiang, H. Y. Li *et al.*. Localized resonance of composite core-shell nanospheres, nanobars and nanospherical chains [J]. *Progress in Electromagnetics Research B*, 2011, **28**: 183~199
- 9 L. M. Tian, E. Z. Chen, N. Gandra *et al.*. Gold nanorods as plasmonic nanotransducers: distance-dependent refractive index sensitivity [J]. *Langmuir*, 2012, **28**(50): 17435~17442
- 10 Y. Sun, Y. Xia. Gold and silver nanoparticles: a class of chromophores with colors tunable in the range from 400 to 750 nm [J]. *Analyst.*, 2003, **128**(6): 686~691
- 11 K. Laaksonen, S. Suomela, S. R. Puisto *et al.*. Influence of high-refractive-index oxide coating on optical properties of metal nanoparticles [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2013, **30**(2): 338~348
- 12 E. M. Larsson, J. Alegret, M. Kall *et al.*. Sensing characteristics of NIR localized surface plasmon resonances in gold nanorings for application as ultrasensitive biosensors [J]. *Nano Lett.*, 2007, **7**(5): 1256~1263
- 13 Huang Peng, Fu Yongqi, Du Jinglei *et al.*. The optical properties of rhombus metal nanoparticles [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2009, **21**(2): 157~162  
黄鹏, 付永启, 杜惊雷等. 菱形金属纳米粒子光学性质的研究[J]. *光散射学报*, 2009, **21**(2): 157~162
- 14 C. L. Nehl, H. W. Liao, J. H. Hafner. Optical properties of star-shaped gold nanoparticles [J]. *Nano Lett.*, 2006, **6**(4): 683~688
- 15 Huang Peng, Fu Yongqi, Du Jinglei *et al.*. The extinction properties of the cross-shaped metal nanoparticles [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2009, **21**(3): 256~261  
黄鹏, 付永启, 杜惊雷等. 十字星形金属纳米粒子的消光性质[J]. *光散射学报*, 2009, **21**(3): 256~261
- 16 R. Bukasov, J. S. Shumaker-Parry. Highly tunable infrared extinction properties of gold nanocrescents [J]. *Nano Lett.*, 2007, **7**(5): 1113~1118
- 17 L. J. Sherry, R. Jin, C. A. Mirkin *et al.*. Localized surface plasmon resonance spectroscopy of single silver triangular nanoprisms [J]. *Nano Lett.*, 2006, **6**(9): 2060~2065
- 18 A. Kinkhabwala, Z. Yu, S. Fan *et al.*. Large single-molecule fluorescence enhancements produced by a bowtie nanoantenna [J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**(11): 654~657
- 19 L. Yang, C. Du, X. Luo. Numerical study of optical properties of single silver nanobowtie with anisotropic topology [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **92**(1): 53~59
- 20 A. J. Haes, R. P. Van Duyne. A nanoscale optical biosensor: sensitivity and selectivity of an approach based on the localized surface plasmon resonance spectroscopy of triangular silver nanoparticles [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2002, **124**(35): 10596~10604
- 21 A. J. Haes, S. L. Zou, G. C. Schatz *et al.*. A nanoscale optical biosensor: the long range distance dependence of the localized surface plasmon resonance of noble metal nanoparticles [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2004, **108**(1): 109~116
- 22 A. D. McFarland, R. P. VanDuyne. Single silver nanoparticles



- as real-time optical sensors with zeptomole sensitivity [J]. *Nano Lett.*, 2003, **3**(8): 1057~1062
- 23 M. M. Miller, A. A. Lazarides. Sensitivity of metal nanoparticle surface plasmon resonance to the dielectric environment [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2005, **109** (46): 21556~21565
- 24 W. A. Murray, B. Auguie, W. L. Barnes. Sensitivity of localized surface plasmon resonances to bulk and local changes in the optical environment [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2009, **113**(13): 5120~5125
- 25 G. Mie. Contributions to the optics of turbid media, particularly of colloidal metal solutions [J]. *Ann. Phys.*, 1908, **25** (3): 377~445
- 26 R. Gans. Form of ultramicroscopic particles of silver [J]. *Ann. Phys.*, 1915, **47**(10): 270~284
- 27 C. F. Bohren, D. R. Huffman. Absorption and Scattering of Light by Small Particles [M]. New York: John Wiley & Sons, 1983
- 28 A. D. Rakic, A. B. Djurišić, J. M. Elazar *et al.*. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(22): 5271~5283
- 29 L. J. Sherry, S. H. Chang, G. C. Schatz *et al.*. Localized surface plasmon resonance spectroscopy of single silver nanocubes [J]. *Nano Lett.*, 2005, **5**(10): 2034~2038

栏目编辑：张 腾