

# 等离子体四聚体中法诺共振的调制

黄运欢<sup>1,2</sup> 殷丽艳<sup>1,2</sup> 蔡东进<sup>1,2</sup> 齐信<sup>1,2</sup> 薛保平<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024

<sup>2</sup>太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024

**摘要** 利用时域有限差分法(FDTD)模拟研究了纳米环四聚体和双开口劈裂纳米环四聚体两种结构中的法诺共振现象及其近场分布。研究表明,纳米环四聚体的消光光谱中可以观察到一个明显的法诺共振,双开口劈裂纳米环四聚体的消光光谱中可以观察到双重法诺共振,在消光光谱中新出现的法诺共振的起因是四聚体中的劈裂纳米环形成了暗的四极共振模式。通过调整四聚体中纳米环间夹角和间距的大小,可以很大的调谐法诺共振的光谱位置和调制深度。研究结果对纳米环四聚体和双开口劈裂纳米环四聚体这两种结构应用于表面增强拉曼散射和生物传感等方面具有重要的指导意义。

**关键词** 表面光学;表面等离子激元;四聚体;法诺共振

中图分类号 O539 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.022401

## Modulation of Fano Resonance in Plasmonic Quadrumer Clusters

Huang Yunhuan<sup>1,2</sup> Yin Liyan<sup>1,2</sup> Cai Dongjin<sup>1,2</sup> Qi Xin<sup>1,2</sup> Xue Baoping<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

**Abstract** The finite difference time domain method (FDTD) is used to investigate the phenomenon of Fano resonance and near field distribution in the quadrumer clusters comprising nanorings or split nanorings with two gaps. The calculation results show that one prominent Fano resonance is observed in the extinction spectra of quadrumer cluster composed of nanorings and double Fano resonances are observed in the quadrumer cluster comprising of split-nanorings. The new Fano resonance appearing in the spectra is caused by the split nanorings in quadrumer cluster forming the dark quadrupole mode. The spectral position and modulation depth of Fano resonance can be largely tuned by adjusting the angle and separation of the nanorings. These results can be used as guideline in multiwavelength surface-enhanced Raman scattering and biosensing.

**Key words** optics at surfaces; surface plasmons; quadrumer cluster; Fano resonance

**OCIS codes** 240.6680; 250.5403; 240.6380; 260.3910

## 1 引言

表面等离子激元(SP)是金属结构表面自由电子在入射光激励下的共振振荡,主要存在有两种形式,一种是在金属纳米结构与介质的界面上激发并可以沿界面传播的表面等离子激元,通常称作传导表面等离子激元(SPP),另一种是金属纳米颗粒的自由电子振荡受结构尺度限制,称为局域表面等离子激元(LSP),局域表面等离子激元对金属纳米结构的尺寸,形状还有周围的介电环境变化十分敏感<sup>[1-2]</sup>。近年来,不同形状的金属纳米颗粒的光学性质受到越来越多研究者的关注,如纳米球<sup>[2]</sup>、纳米盘<sup>[3]</sup>、纳米棒<sup>[4-5]</sup>等。由于这些金属纳米颗粒在特定波长处能够激发局部表面等离子激元共振,在金属纳米颗粒结构表面产生很强的电场,能够将光控制在

收稿日期: 2014-07-31; 收到修改稿日期: 2014-09-09; 网络出版日期: 2015-01-13

作者简介: 黄运欢(1987—),男,硕士研究生,主要从事纳米光子器件方面的研究。E-mail: anlahyh@163.com

导师简介: 薛保平(1968—),男,高级实验师,主要从事信号检测与纳米光子器件方面的研究。

E-mail: xuebaoping@tyut.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

纳米尺度上,因此在表面增强拉曼散射(SERS)<sup>[6-7]</sup>、生物传感<sup>[8-9]</sup>、纳米天线<sup>[10]</sup>、异常透射<sup>[11-13]</sup>等方面有广阔的应用前景。贵金属纳米环由于具有较大的腔体积,环中可以产生非常均匀的电场<sup>[14]</sup>,而劈裂的贵金属纳米环由于破坏结构的对称性能够产生多极的局部表面等离子共振,并且在开口处有巨大的电场增强<sup>[15-16]</sup>,引起了人们的广泛研究。当两个或多个贵金属纳米颗粒放置紧密时,它们的局部表面等离子共振通过近场相互作用耦合,可以产生新的局域等离子激元杂化模式。当这些纳米颗粒结构间的近场耦合被合理控制时,纳米颗粒结构中就能产生法诺共振干涉效应<sup>[17]</sup>。最初提出法诺共振效应是用于理论解释在原子分子光谱中出现一种非对称线型的现象<sup>[18]</sup>,随后在其他许多量子系统中也观测到了法诺共振现象。法诺共振的本质是能量从初始态转移到最终态所通过的两条不同途径间的干涉<sup>[19-20]</sup>。在表面等离子激元体系中,金属纳米颗粒的偶极共振可以与入射光场直接耦合,被称为超辐射模式(亮模式),亮模式的辐射损耗很强因而具有较大辐射展宽,类似原子体系的连续态能带。而有些金属纳米颗粒的多极共振模式不能被入射光场直接激发,被称为亚辐射模式(暗模式),暗模式辐射损耗很弱因此辐射展宽很窄,类似于分立能级<sup>[19,21]</sup>。当这些亮模式与暗模式通过近场相互作用耦合,在光谱中就可以出现法诺共振的非对称线型。换句话说,光谱中出现狭窄法诺凹槽的起因是相位相反的亮模式和暗模式在光谱中重叠,在亮模式和暗模式间产出杂化和相消干涉<sup>[22]</sup>。与标准的等离子共振相比在法诺共振光谱位置处的辐射阻尼受到了有效抑制,导致光谱更加精细,可以极大提高传感质量因子(FoM)。入射光能量可以有效局限在结构周围从而在结构表面有更大的电场增强。最近研究者已经设计出各种基于局部表面等离子共振实现法诺共振的系统,如纳米球壳颗粒簇<sup>[22]</sup>、双开口劈裂纳米环颗粒簇<sup>[23]</sup>、纳米环盘系统<sup>[24-25]</sup>等,并且被广泛运用于光学开关与电光调制<sup>[26]</sup>、慢光传输<sup>[27-28]</sup>、多波段增强红外吸收<sup>[29]</sup>等方面。

本文研究了纳米环四聚体和双开口劈裂纳米环四聚体两种结构中的法诺共振现象。在纳米环四聚体结构中只出现了一个法诺共振,相比之下,双开口劈裂纳米环的四极共振暗模式与偶极共振亮模式间的能隙很小,双开口劈裂纳米环四聚体结构中可以产生双重法诺共振。通过调节四聚体中环的几何参数,可以对法诺共振调制深度及光谱位置进行调谐,同时给出了相应的近场增强与电流密度矢量分布图来解释法诺共振形成及调制深度和光谱位置被调谐的原因。

## 2 计算方法

采用时域有限差分法(FDTD)模拟计算了两种四聚体结构的消光光谱、近场增强和电流密度矢量分布,其中Yee元胞尺寸为 $2\text{ nm} \times 2\text{ nm} \times 2\text{ nm}$ ,在模拟中,金纳米环或双开口劈裂纳米环在不同波长下的介电常数取自实验数据<sup>[30]</sup>,周围介质假设为水,折射率 $n=1.33$ 。计算中各个方向皆采用了完全匹配层(PML)吸收边界。近场增强和电流密度矢量分布图所计算的位置是四聚体结构的中间截面。

## 3 计算结果及分析

### 3.1 纳米环四聚体中的法诺共振现象

图1(a)为纳米环(黑线)和双开口劈裂纳米环(红线)的消光光谱,其中入射光偏振方向沿 $x$ 轴,纳米环的入射光为正入射,双开口劈裂纳米环的入射光为侧入射。图1(a)右上角的两个插图分别表示纳米环和双开口劈裂纳米环的几何结构示意图,环外径 $R=80\text{ nm}$ ,环宽度 $W=30\text{ nm}$ ,缺口宽度 $G=30\text{ nm}$ ,厚度为 $30\text{ nm}$ ,从图1(a)中的消光光谱可看出纳米环在 $1080\text{ nm}$ 处激发起偶极共振模式,双开口劈裂纳米环在侧入射情况下在 $1060\text{ nm}$ 和 $1310\text{ nm}$ 处出现共振峰分别为偶极和四极共振模式。纳米环和双开口劈裂纳米环在共振峰处的电荷分布如图1(a)中插图所示。由于劈裂纳米环的两个半弧之间形成了反成键模式,双开口劈裂纳米环的偶极共振模式与纳米环的偶极共振模式相比出现了蓝移。双开口劈裂纳米环的四极共振模式是暗模式,这个暗模式与入射光场的耦合很弱且不能在正入射情况下激发<sup>[31]</sup>。另外从图1(a)的消光光谱可以看出双开口劈裂纳米环的偶极共振模式和四极共振模式间的能隙很小,这就使得劈裂纳米环四极共振模式可以应用于法诺共振的形成<sup>[23]</sup>。图1(b)是纳米环四聚体的结构示意图,四聚体中上下两个纳米环与中间两个纳米环的间距和夹角分别为 $S$ 和 $\theta$ ,其他的结构参数与图1(a)中纳米环的结构参数保持一致,在接下来的讨论中,以下参数保存不变: $R=80\text{ nm}$ , $W=30\text{ nm}$ , $G=30\text{ nm}$ ,环的厚度设定为 $30\text{ nm}$ 。

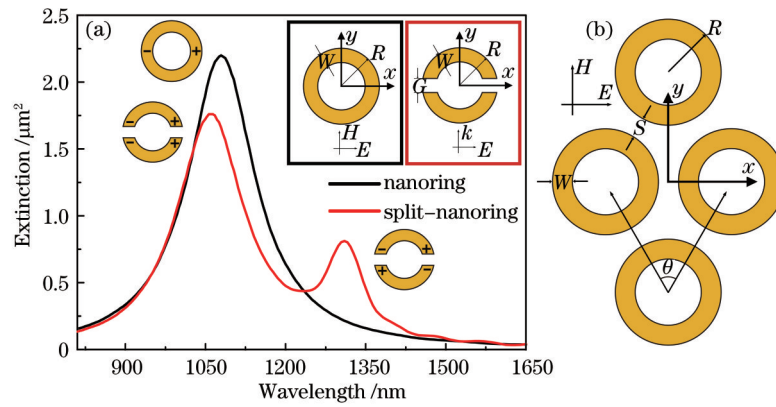


图1 (a)纳米环和双开口劈裂纳米环的消光光谱;(b)纳米环四聚体示意图

Fig.1 (a) Extinction spectra of the nanoring and double gap split-nanoring; (b) schematic illustration of the nanoring quadrumer clusters

纳米颗粒的间距强烈影响纳米颗粒间的局部表面等离激元耦合的强弱,因此通过改变纳米环四聚体中纳米环的间距 $S$ 可对结构中的法诺共振进行调制。设定纳米环四聚体中上下两环与中间两环的夹角 $\theta$ 为 $60^\circ$ ,图2(a)为纳米环间距 $S$ 从 $10\text{ nm}$ 增大到 $50\text{ nm}$ 时的纳米环四聚体的消光光谱。从图2(a)中可看出纳米环四聚体的消光光谱中出现了明显的法诺共振现象。随着纳米环间距 $S$ 的增大,法诺共振的调制深度减弱,法诺共振的光谱位置也发生了蓝移。与Fan等<sup>[20]</sup>所研究的纳米球壳四聚体相比,本文中纳米环四聚体的纳米环直径比纳米球壳小,纳米环的间距也比纳米球壳的间距大,但是纳米环四聚体的法诺共振调制深度却比纳米球壳的法诺共振调制深度更深。

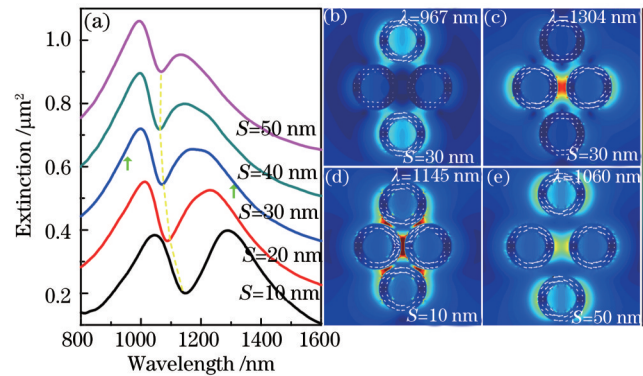


图2 (a)不同纳米环间距 $S$ 时的纳米环四聚体的消光光谱;(b)~(e)纳米环四聚体的近场增强和电流密度矢量分布图

Fig.2 (a) Extinction spectra of the nanoring quadrumer clusters with different separations  $S$ ; (b)~(e) near-field enhancement and current density vector distributions of quadrumer clusters composed of nanorings

为了进一步分析法诺共振形成的物理机制及调制深度减弱和光谱位置发生蓝移原因,得到了纳米环四聚体的亮模式和暗模式近场增强和电流密度矢量分布图,如图2(b)~(e)所示。图2(b)、(c)为间距 $S=30\text{ nm}$ 的纳米环四聚体在波长 $\lambda$ 为 $967\text{ nm}$ 和 $1304\text{ nm}$ 处[图2(a)中绿色箭头处]的近场分布图,从图2(b)、(c)可以看出四聚体中的纳米环均为偶极共振模式,在图2(b)中上下两个纳米环的偶极共振模式起主要作用,中间两纳米环的偶极共振模式较弱。图2(c)中的情况正好与图2(b)相反,中间两个纳米环的偶极共振模式较明显,并且中间两个纳米环间有强的耦合作用。在图2(b)、(c)中,四聚体中的纳米环偶极矩振荡同向,辐射场产生相长干涉,使得光谱具有很大的线宽,从而形成了超辐射亮模式。图2(d)、(e)分别为 $S=10\text{ nm}$ 和 $50\text{ nm}$ 的纳米环四聚体在法诺共振凹槽处的近场分布图。从图2(d)、(e)中可以看出在四聚体中的纳米环都是偶极共振模式,但是上下两个纳米环的偶极矩振荡方向与中间两纳米环的偶极矩振荡方向相反,使得上下两个纳米环与中间两纳米环之间的偶极矩相互抵消,纳米环四聚体剩余的偶极矩几乎为零,导致了亚辐射暗模式的形成。当这个暗模式在光谱中与亮模式相互重叠,两种模式间就会产生相消干涉从而导致在光谱中出现法诺共振。随着四聚体中纳米环间距 $S$ 的增大,纳米环间的表面等离激元相互作用减少导致局部表面等离激元的

耦合减弱,法诺共振的光谱位置产生了蓝移,与此同时法诺共振的调制深度也减弱<sup>[32]</sup>。

当固定上下纳米环与中间两个纳米环的间距 $S$ 不变,通过改变上下纳米环与中间两个纳米环的夹角 $\theta$ 大小,可以对纳米环四聚体结构中的法诺共振进行调制。图3(a)是纳米环间的夹角 $\theta$ 从 $60^\circ$ 增大到 $120^\circ$ 时的纳米环四聚体的消光光谱,其中固定上下纳米环与中间两纳米环的间距 $S=30\text{ nm}$ 。从消光光谱中可看出法诺共振的调制深度强烈依赖于纳米环四聚体中纳米环间的夹角 $\theta$ 大小,随着夹角 $\theta$ 增大,法诺共振的调制深度逐渐减弱最后变得不明显。当纳米环间夹角 $\theta=90^\circ$ 时,由于结构的旋转对称性纳米环四聚体的光谱响应不随入射光偏振方向变化而变化。

为了解释纳米环四聚体光谱响应随纳米环间夹角 $\theta$ 变化的原因,得到了不同夹角 $\theta$ 的纳米环四聚体的近场增强和电流密度矢量分布图,如图3(b)~(e)所示。图3(b)、(c)分别为 $\theta=90^\circ$ 、 $120^\circ$ 时纳米环四聚体在波长 $\lambda=1204\text{ nm}$ 和 $\lambda=1260\text{ nm}$ 的共振峰顶点处[图3(a)中绿色箭头处]的近场分布图,从近场分布图可以看出四聚体中的纳米环均为偶极共振模式,所有纳米环的偶极矩振荡同向,从而形成了亮模式。同时随着 $\theta$ 的增大纳米环间的等离激元耦合也增强。图3(d)和(e)分别为 $\theta=60^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 的纳米环四聚体在法诺共振凹槽处的近场分布图,在四聚体中,上下两个纳米环的偶极矩振荡方向与中间两个纳米环的偶极矩振荡方向相反,两者间偶极矩相互抵消,从而形成了暗模式。当纳米环夹角 $\theta$ 增大,纳米环四聚体的亮模式产生红移,在法诺共振凹槽处的辐射阻尼迅速减小,导致了法诺共振的调制深度减弱。

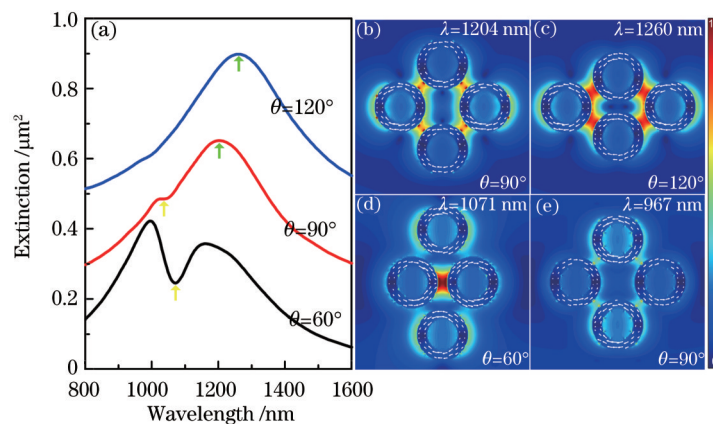


图3 (a)不同夹角 $\theta$ 时的纳米环四聚体消光光谱;(b)~(e)纳米环四聚体的近场增强和电流密度矢量分布图

Fig.3 (a) Extinction spectra of the nanoring quadrumer clusters with different angles  $\theta$ ; (b)~(e) near-field enhancement and current density vector distributions of quadrumer clusters composed of nanorings

### 3.2 双开口劈裂纳米环四聚体中的法诺共振现象

劈裂纳米环由于破坏其结构的对称性能够产生多极的局部表面等离激元共振,在劈裂纳米环的开口处有巨大的电场增强。从图1(a)中双开口劈裂纳米环的消光光谱可以看出,劈裂纳米环的偶极共振模式和四极共振模式间的能带宽度很小,使得劈裂纳米环四极共振模式可应用于法诺共振的形成。因而本文对双开口劈裂纳米环四聚体的光学性质进行了进一步研究,其中双开口劈裂纳米环的缺口宽度 $G$ 为 $30\text{ nm}$ ,入射光正入射电场偏振方向沿 $x$ 轴方向。图4(a)为不同劈裂纳米环间距 $S$ 时的双开口劈裂纳米环四聚体的消光光谱。与纳米环四聚体相比,双开口劈裂纳米环的消光光谱中出现了双重法诺共振,使得双开口劈裂纳米环四聚体特别适合于多波段生物传感和表面增强拉曼散射(SERS)等方面的应用。从图4(a)中可以看出随着劈裂纳米环间距 $S$ 增大,劈裂纳米环四聚体的亮模式出现了蓝移,两个法诺共振的调制深度明显减弱,高能量处的第一个法诺共振的光谱位置出现了蓝移,而低能量处的法诺共振的光谱位置几乎没有偏移。

为了解释上述现象,进一步得到了双开口劈裂纳米环四聚体的近场增强和电流密度矢量分布,如图4(b)~(g)所示。图4(b)、(c)分别为间距 $S=30\text{ nm}$ 的双开口劈裂纳米环四聚体在波长 $\lambda=1000\text{ nm}$ 和 $1428\text{ nm}$ [图4(a)绿色箭头]处的近场分布图,四聚体中劈裂纳米环的两半弧被激发偶极共振且振荡同向形成反成键模式,图4(b)的双开口劈裂纳米环四聚体的近场分布图类似于图2(b)中纳米环四聚体近场分布图,上下两个双开口劈裂纳米环偶极共振模式比中间的劈裂纳米环的偶极共振模式明显,在图4(c)中四聚体中间两个劈裂纳米环偶极共振模式起主要作用,同时由于局部表面等离激元的耦合作用,上下两个劈裂纳米环靠近中间两个劈裂纳米环

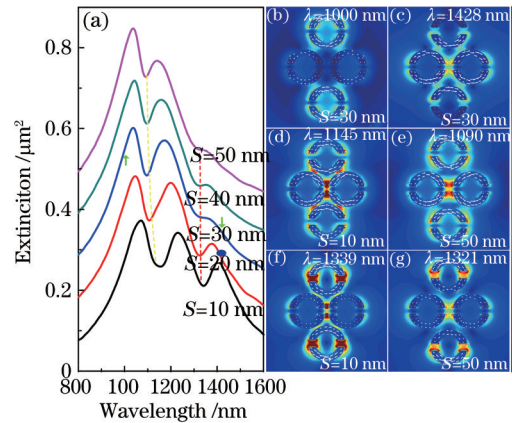


图4 (a) 不同劈裂纳米环间距 $S$ 时的双开口劈裂纳米环四聚体消光光谱; (b)~(g)双开口劈裂纳米环四聚体在不同波长处的近场分布

Fig.4 (a) Extinction spectra of the quadramer clusters composed of split nanorings with two gaps versus separation  $S$ ; (b)~(g) near-field distribution properties of quadramer clusters at different wavelengths

的两个半弧也激发起了偶极共振。在图4(b)、(c)中,四聚体中所有的双开口劈裂纳米环的偶极矩振荡同向导致亮模式的形成。图4(d)、(e)分别为环间距 $S=10\text{ nm}$ 和 $50\text{ nm}$ 的双开口劈裂纳米环四聚体在第一个法诺共振波长处的近场分布图,与图2(d)、(e)相似,四聚体中所有的劈裂纳米环均为偶极共振模式,上下两个劈裂纳米环的偶极矩振荡方向与中间两个劈裂纳米环的偶极矩振荡方向相反,两者间的偶极矩相互抵消,导致了第一个暗模式的形成。随着间距 $S$ 的增大,劈裂纳米环间的局部表面等离子元耦合减弱,导致了第一个法诺共振的调制深度减弱同时光谱位置产生蓝移。图4(f)、(g)分别为间距 $S=10\text{ nm}$ 和 $50\text{ nm}$ 的双开口劈裂纳米环四聚体在第二个法诺共振波长处的近场分布图。从图4(f)和(g)中四聚体的电流密度矢量分布可以看出上下两个劈裂纳米环激发起四极共振模式,导致了四聚体形成了新的暗模式。这个新的暗模式与亮模式在光谱中重叠导致了第二个法诺共振的形成。由于上下两个劈裂纳米环的几何参数没有改变,所以随间距 $S$ 的增大,第二个法诺共振的光谱位置没有发生偏移,但是劈裂纳米环间的局部表面等离子元耦合减少,同时上下两劈裂纳米环在缺口处的近场增强也明显减弱,导致了第二个法诺共振调制深度减弱。

双开口劈裂纳米环四聚体的消光光谱与夹角 $\theta$ 的变化关系如图5(a)所示,劈裂纳米环的间距 $S=30\text{ nm}$ 。从图5(a)中的消光光谱可以看出改变劈裂纳米环间夹角 $\theta$ 的大小可以对大幅度地调制法诺共振的光谱位置和调制深度。随着劈裂纳米环间夹角 $\theta$ 增大,四聚体的亮模式出现红移并且其光谱宽度也变窄,第一个法诺共振的调制深度迅变浅最后变得不明显,而第二个法诺共振的光谱位置没有产生偏移,但是第二个法诺共振的调制深度却出现了由浅变深的过程。

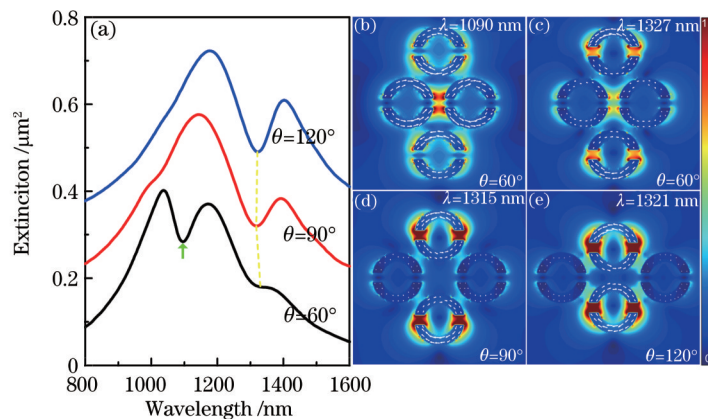


图5 (a)不同夹角 $\theta$ 时的双开口劈裂纳米环四聚体消光光谱; (b)~(e)双开口劈裂纳米环四聚体不同夹角 $\theta$ 的近场分布

Fig.5 (a) Extinction spectra of the quadramer clusters composed of split nanorings with two gaps with different angles  $\theta$ ; (b)~(e) near-field distribution properties of quadramer clusters with different angles  $\theta$

为了解释这些法诺共振现象,得到了如图5(b)~(e)所示的双开口劈裂纳米环四聚体在法诺共振处的近

场增强和电流密度矢量分布图。图 5(b)是夹角  $\theta=60^\circ$  的双开口劈裂纳米环四聚体在  $\lambda=1090\text{ nm}$  [图 5(a)绿色箭头] 处的近场分布图。从图 5(b)中可以看出,四聚体中的上下两劈裂纳米环总的偶极矩与中间两劈裂纳米环总的偶极矩方向相反,两者的偶极矩相互抵消导致了第一个暗模式的形成。图 5(c)~(e)分别为夹角  $\theta=60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$  的双开口劈裂纳米环四聚体在第二个法诺共振光谱位置处的近场分布图。从图 5(c)~(e)的近场增强和电流密度矢量分布图中可以看出,四聚体中上下两个劈裂纳米环激发起了四极共振模式导致了第二个暗模式的形成,这个暗模式与亮模式间产生相消干涉,导致在光谱中出现了第二个法诺共振。随着劈裂纳米环间夹角  $\theta$  逐渐增大,四聚体的亮模式产生了红移,上下两个劈裂纳米环形成的四极共振模式逐渐增强,劈裂纳米环四聚体的净偶极矩逐渐减少,导致第二个法诺共振调制深度逐渐变深。由于上下两个劈裂纳米环的几何参数没有改变,所以第二个法诺共振的光谱位置没有出现偏移。

## 4 结 论

应用时域有限差分法研究了纳米环四聚体中纳米环的间距和夹角变化对其法诺共振的影响及其近场分布。研究表明,随着纳米环间距和夹角增大,纳米环四聚体结构中的法诺共振调制深度逐渐减弱并且光谱位置也出现蓝移。进一步还研究了双开口劈裂纳米环四聚体中劈裂纳米环的间距和夹角变化对法诺共振的调制及其近场分布的影响,计算结果显示,双开口劈裂纳米环四聚体结构能够产生双重法诺共振,随着劈裂纳米环的间距增大,双开口劈裂纳米环四聚体中两个法诺共振的调制深度均减弱,第一个法诺共振的光谱位置产生了蓝移而第二个法诺共振没有偏移。当劈裂纳米环间的夹角增大,第一个法诺共振调制深度显著减弱并且光谱位置产生蓝移,而第二个法诺共振的光谱位置没有偏移,但是法诺共振的调制深度却明显变深。因此通过对纳米环的间距和夹角的设计,可以使纳米环和劈裂纳米环四聚体结构产生更加明显和精细的法诺共振线型,在结构中产生更强的局域电磁场增强,以满足其在纳米光子学领域的应用。

## 参 考 文 献

- 1 Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Optics Nature*, 2003, 424(14): 824–830.
- 2 K 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.
- 3 Fang Z, Cai J, Yan Z, *et al.*. Removing a wedge from a metallic nanodisk reveals a Fano resonance [J]. *Nano Lett*, 2011, 11(10): 4475–4477.
- 4 Yang Z J, Zhang Z S, Zhang L H, *et al.*. Fano resonances in dipole–quadrupole plasmon coupling nanorod dimers [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(9): 1542–1544.
- 5 Yang Yudong, Xu Jinghua, Yang Linmei, *et al.*. Optical properties of gold nanorod and its application in biological imaging and photothermal therapy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(7): 071702.  
杨玉东, 徐菁华, 杨林梅, 等. 金纳米棒的光学性质及其在生物医学成像和光热疗法中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(7): 071702.
- 6 A Cleary, A Clark, A Glidle, *et al.*. Fabrication of double split metallic nanorings for Raman sensing [J]. *Microelectronic Engineering*, 2009, 86(4–6): 1146–1149.
- 7 Liu Yu, Zhang Haitao, Xu Shuping, *et al.*. Study on the effect of refractive index and metal film thickness on surface plasmon resonance field enhanced surface–enhanced Raman scattering [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1207001.  
刘 钰, 张海涛, 徐抒平, 等. 折射率和金属膜厚度对表面等离子体共振场增强表面增强拉曼散射的影响研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1207001.
- 8 Liu S D, Yang Z, Liu R P, *et al.*. High sensitivity localized surface plasmon resonance sensing using a double split nanoring cavity [J]. *J Phys Chem C*, 2011, 115(50): 24469–24477.
- 9 Jiang Yongxiang, Liu Binghong, Zhu Xiaosong, *et al.*. Study of silver coated hollow–core fiber surface plasmon resonance sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0223004.  
蒋永翔, 刘炳红, 朱晓松, 等. 镀银空芯光纤表面等离子体共振传感器的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0223004.
- 10 Huang Caijin, Chen Cheng, Wang Shunwen. An introduction to performance of optical nano–antennas [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060005.  
黄彩进, 陈 成, 王顺文. 纳米光学天线性能研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060005.

- 11 Yang Wenxu, Song Hongfei, Lei Jianguo. Numerical study on transmission enhancement of metallic nanohole array [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(3): 033101.  
杨文旭, 宋鸿飞, 雷建国. 金属纳米孔阵列透射增强的数值研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(3): 033101.
- 12 Martin-Moreno L, Garcia-Vidal F J, Lezec H J, *et al.*. Theory of extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(6): 1114-1117.
- 13 Chen Yuanhao, Liu Guiqiang, Huang Kuan, *et al.*. Investigation of optical transparent properties of sub-wavelength complex structure of a metal ellipsoid periodic array and a metal film [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(7): 071602.  
陈元浩, 刘桂强, 黄宽, 等. 亚波长金属椭球周期阵列—金属薄膜复合结构的光透明特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(7): 071602.
- 14 Hao F, Larsson E M, Ali T A, *et al.*. Shedding light on dark plasmons in gold nanorings [J]. *Chem Phys Lett*, 2008, 458(4): 262-266.
- 15 Liu S D, Zhang Z S, Wang Q Q. High sensitivity and large field enhancement of symmetry broken Au nanorings: effect of multipolar plasmon resonance and propagation [J]. *Opt Express*, 2009, 17(4): 2906-2917.
- 16 Lahiri B, Holland G, Aksyuk V C, *et al.*. Nanoscale imaging of plasmonic hot spots and dark modes with the photothermal-induced resonance technique [J]. *Nano Lett*, 2013, 13(7): 3218-3224.
- 17 Lovera A, Gallinet B, Nordlander P, *et al.*. Mechanisms of Fano resonances in coupled plasmonic systems [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(5): 4527-4536.
- 18 Fano U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts [J]. *Physical Review*, 1961, 124(6): 1867-1878.
- 19 Zhang S, Genov D A, Wang Y, *et al.*. Plasmon-induced transparency in metamaterials [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 101(4): 047401.
- 20 Fan J A, Bao K, Wu C, *et al.*. Fano-like interference in self-assembled plasmonic quadrumer clusters [J]. *Nano Lett*, 2010, 10(11): 4680-4685.
- 21 Piao X, Yu S, Park N. Control of fano asymmetry in plasmon induced transparency and its application to plasmonic waveguide modulator [J]. *Opt Express*, 2012, 20(17): 18994-18999.
- 22 Zhang S, Chen L, Y Huang, *et al.*. Reduced linewidth multipolar plasmon resonances in metal nanorods and related applications [J]. *Nanoscale*, 2013, 5(15): 6985-6991.
- 23 Liu S D, Yang Z, Liu R P, *et al.*. Multiple Fano resonances in plasmonic heptamer clusters composed of split nanorings [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(7): 6260-6271.
- 24 Zhang Y, Jia T Q, Zhang H M, *et al.*. Fano resonances in disk-ring plasmonic nanostructure: strong interaction between bright dipolar and dark multipolar mode [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(23): 4919-4921.
- 25 Cetin A E, Altug H. Fano resonant ring/disk plasmonic nanocavities on conducting substrates for advanced biosensing [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(11): 9989-9995.
- 26 Chen J, Wang P, Chen C, *et al.*. Plasmonic EIT-like switching in bright-dark-bright plasmon resonators [J]. *Opt Express*, 2011, 19(7): 5970-5978.
- 27 Wang J Q, Fan C Z, He J N, *et al.*. Double fano resonances due to interplay of electric and magnetic plasmon modes in planar plasmonic structure with high sensing sensitivity [J]. *Opt Express*, 2013, 21(2): 2236-2244.
- 28 Wang J Q, Yuan B H, Fan C Z, *et al.*. A novel planar metamaterial design for electromagnetically induced transparency and slow light [J]. *Opt Express*, 2013, 21(21): 25159-25166.
- 29 Blanchard R, Boriskina S V, Genevet P, *et al.*. Multi-wavelength mid-infrared plasmonic antennas with single nanoscale focal point [J]. *Opt Express*, 2011, 19(22): 22113-22124.
- 30 Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals [J]. *Phys Rev B*, 1972, 6(12): 4370-4379.
- 31 Liu S D, Yang Z, Liu R P, *et al.*. Plasmonic-induced optical transparency in the near-infrared and visible range with double split nanoring cavity [J]. *Opt Express*, 2011, 19(16): 15363-15370.
- 32 M Hentschel, M Saliba, R Vogelgesang, *et al.*. Transition from isolated to collective modes in plasmonic oligomers [J]. *Nano Lett*, 2010, 10(7): 2721-2726.