

等离子体八聚体中多重法诺共振现象的研究

黄运欢 薛保平

太原理工大学物理与光电工程学院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)研究了纳米环八聚体和劈裂纳米环八聚体的消光光谱及其近场分布。研究结果表明,当入射光偏振方向不同时,纳米环八聚体和劈裂纳米环八聚体都产生法诺共振现象,通过调整八聚体外部4个纳米环间夹角的大小,不仅可以使纳米环八聚体和劈裂纳米环八聚体产生多重法诺共振,还可以对法诺共振的调制深度及共振波长进行调谐,以满足在表面增强拉曼散射、生物分子或化学分子探测中的应用。

关键词 表面光学; 表面等离子共振; 法诺共振; 时域有限差分法

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.062401

Research of Mutiple Fano Resonances in Plasmonic Octamer Clusters

Huang Yunhuan Xue Baoping

Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education, College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract The extinction spectra and distribution of electric near field of the octamer clusters composed of nanorings and split nanorings are calculated by using the finite-difference time-domain method (FDTD). The results show that the Fano resonances are generated in the plasmonic octamer clusters composed of nanorings and split nanorings with different incident light polarizations. In addition, multiple Fano resonances can be generated and the modulation depth and resonance wavelength of Fano resonances can be tuned by adjusting the angle of the external ring of the plasmonic octamer clusters. These results can be used in Raman scattering, biological and chemical molecule detection.

Key words optics at surface; surface plasmon resonance; Fano resonances; finite-difference time-domain method

OCIS codes 240.6680; 250.5403; 240.6380; 260.3910

1 引言

近年来,金属纳米颗粒的局域表面等离子共振(LSPR)受到研究者极大关注。金属纳米颗粒的局域表面等离子共振能与光发生强烈相互作用,能够在纳米尺度上对光进行调控,因此成为光子和电子间的桥梁,为构建亚波长集成光子器件应用于量子通信和信息处理提供了机会。局域表面等离子共振的共振频率对金属纳米结构几何形状、大小及所处的介电环境十分敏感^[1-4]。当入射光频率与金属纳米颗粒表面自由电子集体振荡频率相同时,金属纳米颗粒可以产生消光和近场增强效应,这些效应可被应用于纳米天线^[5-8]、非线性光学^[9-10]、太阳能收集^[11]等。通过改变金属纳米颗粒的大小、间距及相邻金属纳米颗粒间的放置形态,可以控制金属纳米结构共振模式间的耦合,使得谱线窄化,同时也可调制金属纳米结构局域表面等离子体共振的共振峰位置和电磁场增强效应^[4-5]。研究发现简单的金属纳米颗粒如纳米棒^[12-13]、纳米盘^[14]、纳米三角形^[15]等可以产生明显的偶极共振模式,与这些简单的金属纳米颗粒相比,金属纳米环具有较大的腔体积,并且可以在金属纳米环中产生均匀的电场^[16],而劈裂的金属纳米环由于结构对称性被打破,能够在缺口处产生巨大的电磁场增强,具有丰富的多极表面等离子共振特性^[17],从而引起广泛研究。当两个或多个纳米环构成复杂金属纳米结构时,金属纳米结构间的等离子共振可以通过近场的相互作用进行耦合,引起一系列杂化等离子共振

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-01-29; 网络出版日期: 2015-05-23

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)

模式。当合理地设计复杂金属纳米结构及控制纳米颗粒间的近场耦合时,复杂金属纳米结构就能展现出法诺共振干涉效应。目前研究人员已经设计了许多复杂纳米结构如环-盘纳米腔^[18]、纳米核-壳结构^[19-21]、石棚结构^[22]、纳米颗粒簇^[23-26]等来实现和调制法诺共振。在等离子体纳米结构中的法诺共振起因于亚辐射模式(暗模式)和超辐射模式(亮模式)间的相消干涉出现特别窄且不对称的线形。亚辐射模式的偶极矩为零或几乎为零,不能被入射光直接激发,因此辐射阻尼很小,光谱展宽很窄,而超辐射模式拥有有限的偶极矩,能与入射光相互作用,辐射阻尼很大,光谱展宽也很大。与简单金属纳米颗粒的等离激元共振相比法诺共振具有更窄且更为精细的谱线宽度和更大的电磁场增强,因此法诺共振广泛应用于生物传感^[27]、慢光传输器件^[28]、光学调制开关^[29]、表面增强拉曼散射(SERS)^[30-31]等方面。为更好地产生和调制法诺共振,可采用改变复杂金属纳米结构中纳米颗粒的数量、材料、大小及纳米颗粒间的间距,或破坏复杂金属纳米结构对称性等方法^[26]。

本文设计了金纳米环八聚体和劈裂纳米环八聚体两种复杂金属纳米结构,通过时域有限差分法(FDTD)模拟研究了两种八聚体中的法诺共振现象。金纳米环八聚体在入射光偏振方向不同时,能在光谱中产生不同的法诺共振现象,同时调节外部4个纳米环与中间两个纳米环间夹角的大小,可以出现双重法诺共振现象。当入射光偏振方向不同相应地改变劈裂纳米环缺口方向时,劈裂纳米环八聚体的光谱中出现多重法诺共振现象,同样改变外部4个劈裂纳米环与中间两个劈裂纳米环间夹角的大小,可以同时调制每个法诺共振的光谱位置及调制深度。这些理论结果为相关的实验研究纳米环八聚体和劈裂纳米环八聚体在表面增强拉曼散射和生物传感应用方面提供了比较有价值的理论指导。

2 计算方法与结构模型

FDTD是用有限差分式替代时域麦克斯韦旋度方程中的微分式,得到场分量的有限差分式。可以仿真不同形状的结构,通过一次时域分析计算,即可借助傅里叶变换获得整个频段范围内的频率响应,实时反馈电磁场的空间分布。FDTD作为最有效的电磁计算方法已经被广泛应用于模拟电磁波的传播、散射、耦合和辐射等特性的数值求解。利用FDTD计算纳米环八聚体和劈裂纳米环八聚体两种纳米结构的消光光谱及其近场增强和电流密度矢量分布,在模拟计算过程中,入射光方向垂直 $x-y$ 平面(正入射),计算中结构的各个方向皆采用完全匹配层(PML)吸收边界来模拟开放空间,金属材料选取金,金的介电常数取自实验结果^[32],网格精度为 $2\text{ nm}\times 2\text{ nm}\times 2\text{ nm}$,媒质为水,折射率 $n=1.33$,所有的近场增强和电流密度矢量分布都是计算纳米结构的中间截面。

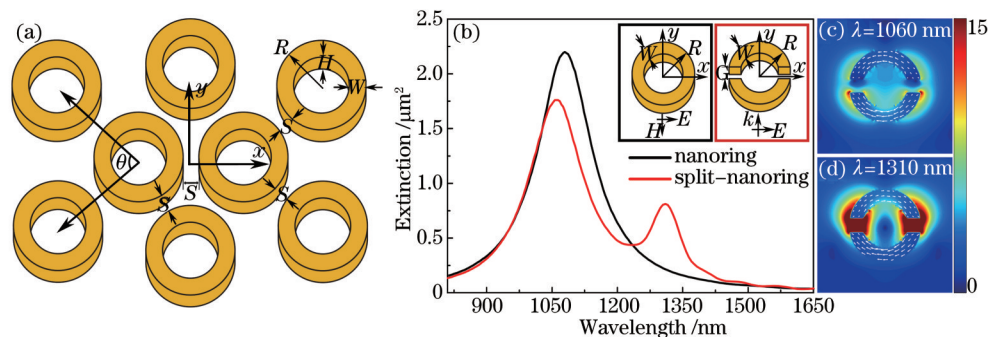


图1 (a) 纳米环八聚体的结构示意图; (b) 纳米环(黑线)和劈裂纳米环(红线)的消光光谱,插图为纳米环和劈裂纳米环的几何结构; (c)(d) 劈裂纳米环近场分布图

Fig.1 (a) Schematic of plasmonic octamer clusters composed of nanorings; (b) extinction spectra of nanoring (black) and split-nanoring (red), the inset represents the geometrical structure of the nanoring and split-nanoring; (c)(d) near-field distribution of split-nanoring

选取纳米环八聚体结构模型作为代表,结构模型如图1(a)所示,劈裂纳米环八聚体的结构模型参数与纳米环八聚体模型结构基本相同,图中 W 表示宽度, R 表示半径, S 表示纳米环间的间距, H 表示纳米环的高度, θ 表示外部4个纳米环与 x 轴上纳米环间的夹角大小,图1(b)为入射光偏振方向均沿 x 轴时纳米环(正入射)和劈裂纳米环(侧入射)的消光光谱,图1(b)右上角的两个插图分别表示纳米环和劈裂纳米环的几何结构,其中 $W=30\text{ nm}$, $R=80\text{ nm}$, $H=40\text{ nm}$, $S=20\text{ nm}$, G 表示劈裂纳米环缺口的大小, $G=30\text{ nm}$ 。在以下的讨论

中以上参数保持不变。从图 1(b)中的消光光谱可以看出,入射光正入射情况下,纳米环在波长 $\lambda = 1080 \text{ nm}$ 处可激发偶极共振模式,而劈裂纳米环在入射光侧入射时激发两种共振模式,分别为偶极和四极共振模式,相应的近场分布如图 1(c)、(d)所示,其中劈裂纳米环的四极共振模式是暗模式,其与入射光场的耦合很弱,不能在入射光正入射时激发。从图 1(b)中劈裂纳米环的消光光谱可以看出,劈裂纳米环的偶极共振和四极共振间的能带间隙很小,这为劈裂纳米环四极共振模式应用于法诺共振的形成提供了条件^[17]。

3 结果及讨论

3.1 金纳米环八聚体中的法诺共振现象

设计了在金纳米环四聚体外部增加 4 个纳米环构成金纳米环八聚体的结构,通过改变外部 4 个纳米环间的夹角大小,研究了金纳米环八聚体中的法诺共振现象。图 2(a)是入射光正入射偏振方向沿 x 轴时纳米环八聚体的消光光谱随纳米环间夹角 θ 变化的关系,从消光光谱中可以看出,通过调整纳米环间的夹角 θ 可以对法诺共振进行强烈的调谐。当纳米环间的夹角 $\theta = 60^\circ$ 时,纳米环八聚体中只产生了一个法诺共振,而随着纳米环间夹角 θ 的增大,这个法诺共振的光谱位置出现红移并且其调制深度也减弱;当纳米环间的夹角 θ 增大到 120° 时,纳米环八聚体在消光光谱的高能量处产生了一个新的法诺共振。为了解释纳米环八聚体中的法诺共振现象,研究了不同夹角 θ 的纳米环八聚体的近场分布。图 2(b)、(c)分别为 $\theta = 60^\circ$ 时纳米环八聚体在波长 λ 为 910 nm 和 1580 nm 处的近场分布图,它们相应的光谱位置如图 2(a)中的绿色箭头所示。从图 2(b)、(c)可以看出纳米环八聚体中的纳米环均激发偶极共振模式,所有纳米环的偶极共振同向,具有大的光谱线宽和辐射阻尼,导致超辐射亮模式的形成。图 2(c)中纳米环间局部表面等离子激元强烈的相互作用使用使得纳米环间的电磁场强度产生巨大的增强。图 2(d)~(f)分别为纳米环间夹角 $\theta = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ 时,纳米环八聚体在低能量处法诺共振的近场分布,从图 2(d)~(f)可知在纳米环八聚体中间 x 轴上的两个纳米环的偶极共振方向与周围 6 个纳米环的偶极共振方向相反,这两部分纳米环总的偶极矩相互抵消,具有弱的辐射阻尼,导致了亚辐射暗模式的形成。这个亚辐射暗模式与超辐射亮模式间产生相消干涉,形成了图 2(b)中在消光光谱低能量处的法诺共振。随着纳米环间夹角 θ 的增大,纳米环八聚体中纳米环间的耦合逐渐增强,法诺共振光谱位置出现红移,但是在法诺共振处纳米环八聚体的净偶极矩却随着夹角 θ 增大而增大,因此法诺共振的调制深度逐渐减弱。当纳米环间的夹角 $\theta = 120^\circ$ 时,纳米环八聚体在波长 $\lambda = 1015 \text{ nm}$ 的光谱位置(黄色箭头)处产生了一个新的法诺共振,其近场分布如图 2(g)所示,可将纳米环八聚体分为中间 4 个纳米环和周围 4 个纳米环两个部分;中间的 4 个纳米环在 x 轴上的两个纳米环的偶极共振方向与在 y 轴上的两个纳米环的偶极共振方向相反,而周围 4 个纳米环的偶极矩相互抵消,此时纳米环八聚体总的偶极矩几乎为零,导致在高能量处形成了新的亚辐射暗模式。这个新的亚辐射暗模式与超辐射亮模式在光谱中相互重叠,使得波长 $\lambda = 1015 \text{ nm}$ 处形成了新的法诺共振。

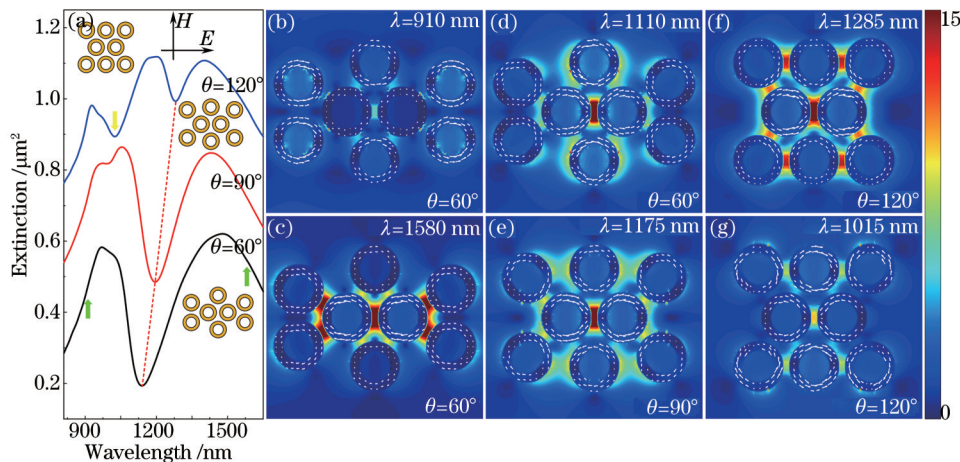


图 2 (a) 纳米环八聚体的消光光谱与夹角 θ 的关系; (b)~(g) 不同夹角 θ 的纳米环八聚体的近场增强和电流密度矢量分布
 Fig.2 (a) Extinction spectra of the plasmonic octamer clusters composed of nanorings as a function of the angle θ ;
 (b)~(g) near-field enhancement and current density vector distribution of plasmonic octamer clusters composed of
 nanorings with different angle θ

入射光偏振方向改变对纳米环八聚体中的法诺共振现象有重要影响。当入射光偏振方向沿 y 轴时,变化纳米环间夹角 θ 的大小可以对纳米环八聚体中的法诺共振进行调谐。图 3(a)为纳米环八聚体的消光光谱与纳米环间夹角 θ 的关系。从图 3(a)中可以看出,不同夹角 θ 的纳米环八聚体消光光谱中都出现了明显的法诺共振,随着纳米环间夹角 θ 的增大,纳米环八聚体超辐射亮模式的光谱展宽逐渐增大,纳米环八聚体在光谱低能量处的法诺共振出现了蓝移,其调制深度也逐渐增加。当纳米环间夹角 $\theta=60^\circ$ 时,纳米环八聚体在光谱高能量处产生了一个新法诺共振(粉色箭头);当纳米环间夹角 θ 增大到 120° 时,在光谱更高的能量处产生了另一个新的法诺共振(黄色箭头)。为了解出现在消光光谱中的法诺共振现象,调查了纳米环八聚体不同波长处的近场分布,图 3(b)、(c)分别为纳米环间夹角 $\theta=120^\circ$ 时在入射光波长 λ 为 910 nm 和 1580 nm 处的近场分布图,从图中可知八聚体中的纳米环偶极共振方向都同向,表明这是典型的超辐射亮模式。纳米环八聚体在低能量法诺共振处的近场分布如图 3(d)、(e)所示,从近场分布图中可以看出,纳米环八聚体中间的 4 个纳米环的偶极共振同向,外部 4 个纳米环的偶极共振也同向,但是这两部分总的偶极矩振荡方向相反且相互抵消,使得纳米环八聚体总的偶极矩几乎为零,导致了在低能量处亚辐射暗模式的形成。图 3(f)是纳米环间夹角 $\theta=120^\circ$ 时的纳米环八聚体在高能量处的法诺共振近场分布图,纳米环八聚体在 x 轴上的两个环的偶极共振方向与周围的 6 个纳米环偶极共振方向相反,两部分间总的偶极矩相互抵消,从而在波长 $\lambda=905\text{ nm}$ 处形成亚辐射暗模式。当纳米环间夹角 $\theta=60^\circ$ 时,纳米环八聚体在入射光波长 $\lambda=1120\text{ nm}$ 处产生了新的法诺共振,相应的近场分布如图 3(g)所示,从近场分布图中可以看出,纳米环八聚体外部 4 个纳米环激发了强的偶极共振模式,而中间的 4 个纳米环只激发弱的偶极共振模式,外部 4 个纳米环间的偶极矩相互抵消导致纳米环八聚体在光谱高能量处形成亚辐射暗模式,此时的纳米环八聚体剩余偶极矩较大,所以法诺调制深度较浅。

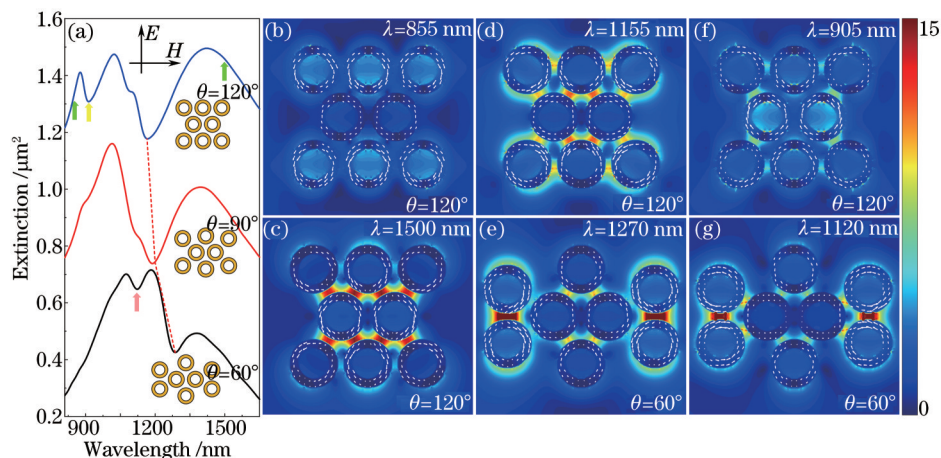


图 3 (a) 纳米环八聚体的消光光谱与夹角 θ 的关系; (b)~(g) 不同夹角 θ 的纳米环八聚体的近场增强和电流密度矢量分布
Fig.3 (a) Extinction spectra of plasmonic octamer clusters composed of nanorings versus the angle θ ; (b)~(g) near-field enhancement and current density vector distribution of plasmonic octamer clusters composed of nanorings with different angle θ

以上结果表明纳米环八聚体结构与 Fan 等^[20]研究的纳米球壳四聚体的法诺共振现象及 Liu 等^[24]研究的纳米环五聚体中法诺共振的调谐相比,不仅能够不同的入射光偏振方向上产生双重法诺共振现象且法诺共振的调制深度也明显增强,还可通过改变外部 4 个纳米环的夹角大小对纳米环八聚体可产生的多重法诺共振进行大范围调谐。

3.2 劈裂金纳米环八聚体中的多重法诺共振现象

由于劈裂纳米环的偶极共振和四极共振间的能带间隙很小,劈裂纳米环激发四极共振时在缺口处有很强的电磁场增强,因此进一步研究了劈裂纳米环八聚体中的法诺共振现象。图 4(a)为缺口方向和入射光偏振方向都沿 x 轴时劈裂纳米环八聚体的消光光谱与环间夹角 θ 之间的关系。随着劈裂纳米环间夹角 θ 的增大,第一个系列(绿色虚线)的法诺共振的调制深度逐渐增加,第二个系列(红色虚线)的法诺共振和第三个系列(黄色虚线)的法诺共振的光谱位置出现了红移,并且调制深度逐渐减弱。为了解释劈裂纳米环八聚体能够产生多重法诺共振现象的原因,绘制了相应法诺共振波长处的近场分布。图 4(b)、(c)分别为劈裂纳米环

间夹角 θ 为 90° 和 120° 时劈裂纳米环八聚体在第一个法诺共振波长处的近场分布图,从图中可以看出,劈裂纳米环八聚体中间在 x 轴上的两个劈裂纳米环只激发了很弱的偶极共振模式,在外部的 4 个劈裂环的偶极共振方向与在中间 y 轴上的两个劈裂纳米环的偶极共振方向相反,两者间的偶极矩相互抵消,导致了第一个亚辐射暗模式的形成。随着环间夹角 θ 的增大,劈裂纳米环八聚体外部 4 个劈裂纳米环与中间在 y 轴上的两个纳米环间的偶极矩相互抵消作用逐渐增强,劈裂纳米环八聚体总的偶极矩逐渐减小,从而使第一个法诺共振调制深度增加。劈裂纳米环间夹角 θ 为 60° 和 90° 的八聚体在入射光波长 λ 为 1075 nm 和 1090 nm 处的近场分布如图 4(d)、(e) 所示,劈裂纳米环八聚体中间在 x 轴上的两个劈裂纳米环偶极共振方向与周围 6 个劈裂纳米环的偶极共振方向相反,两者间的偶极矩相互抵消,导致第二个弱辐射阻尼的亚辐射暗模式形成。随着环间夹角 θ 的增大,劈裂纳米环间的耦合逐渐增强,第二个法诺共振的光谱位置出现了红移,但是劈裂纳米环八聚体第二个暗模式的辐射阻尼逐渐增加,导致第二个法诺共振调制深度的降低。劈裂纳米环八聚体在第三个法诺共振处的电场增强和电流密度矢量分布如图 4(f)、(g) 所示,从图中可以看出劈裂环八聚体中间在 x 轴上的两个劈裂纳米环几乎没有激发偶极共振模式,而周围的 6 个劈裂纳米环激发了强的四极共振模式,形成了第三个亚辐射暗模式,当这个暗模式与亮模式在光谱中相互重叠发生相消干涉时,在消光光谱中出现了第三个法诺共振。随着环间夹角 θ 变大,周围 6 个纳米环间的耦合逐渐增强,第三个法诺共振光谱位置出现了红移,而劈裂纳米环八聚体的净偶极矩逐渐增加导致了第三个法诺共振的调制深度逐渐降低。

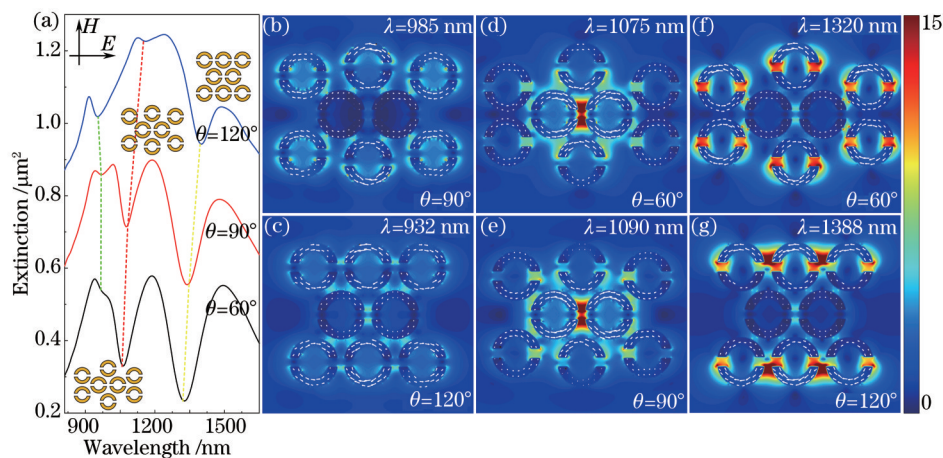


图 4 (a) 劈裂纳米环八聚体的消光光谱与夹角 θ 的关系;(b)~(g) 不同夹角 θ 的劈裂纳米环八聚体的近场增强和电流密度矢量分布
 Fig.4 (a) Extinction spectra of the plasmonic octamer clusters composed of split-nanorings versus the angle θ ;
 (b)~(g) near-field enhancement and current density vector distribution of plasmonic octamer clusters composed of split-nanorings with different angle θ

进一步研究了劈裂纳米环缺口方向和入射光正入射偏振方向都沿 y 轴时,劈裂纳米环八聚体的消光光谱与环间夹角 θ 之间的关系。从图 5(a) 中可以看出,随着环间夹角 θ 的增大,消光光谱中的法诺共振均出现了蓝移,第一个系列(绿色虚线)的法诺共振调制深度逐渐增强。当劈裂纳米环间夹角 $\theta = 90^\circ$ 时,劈裂纳米环八聚体第二个系列(红色虚线)的法诺共振开始出现,并且随着 θ 的增大,第二个系列法诺共振的调制深度减弱。而第三个系列(黄色虚线)的法诺共振的调制深度无明显变化。图 5(b)~(g) 分别为劈裂纳米环八聚体相应法诺共振处的近场分布图,从图 5(b)、(c) 可以发现第一个系列亚辐射暗模式形成的原因是劈裂纳米环八聚体周围 6 个劈裂纳米环的偶极共振方向与中间在 x 轴上的两个劈裂纳米环的偶极共振方向相反,随着夹角 θ 的增大,劈裂纳米环八聚体总的净偶极矩减小,导致了第一个系列法诺共振调制深度增加。另外由于劈裂纳米环环间的等离激元耦合减弱,该法诺共振出现了蓝移。图 5(d)、(e) 分别为波长 $\lambda = 1070\text{ nm}$ 和 $\lambda = 1040\text{ nm}$ 处的近场分布图,从图中可以看出劈裂纳米环八聚体中间在 x 轴上的两个纳米环形成了四极共振模式,周围的 6 个劈裂纳米环激发了偶极共振模式,其中最外部的 4 个劈裂纳米环总的偶极矩方向与中间 y 轴上的两个劈裂纳米环的偶极矩方向相反,两者间相互抵消,劈裂纳米环八聚体总的净偶极矩很小,导致了第二个系列法诺共振的形成。第三个系列法诺共振处的近场分布如图 5(f)、(g) 所示,当 $\theta = 60^\circ$ 时劈裂纳米环八聚体中间在 x 轴上的两个劈裂纳米环及最外部 4 个劈裂纳米环都激发了四极共振模式,而中间 y 轴上两个劈裂纳米环几乎没有激发共振模式,此时最外部 4 个劈裂纳米环间的局部表面等离激元耦合十分强烈。当

劈裂纳米环间夹角 $\theta = 120^\circ$ 时,从图 5(g)中可以看出,劈裂纳米环八聚体中间在 x 轴上的两个劈裂纳米环四极共振逐渐减弱而最外部 4 个劈裂纳米环四极共振逐渐增强且起主要作用。随着劈裂纳米环间夹角 θ 的增大,劈裂纳米环八聚体最外部 4 个劈裂纳米环间局部表面等离激元耦合逐渐减弱,第三个法诺共振出现了蓝移。

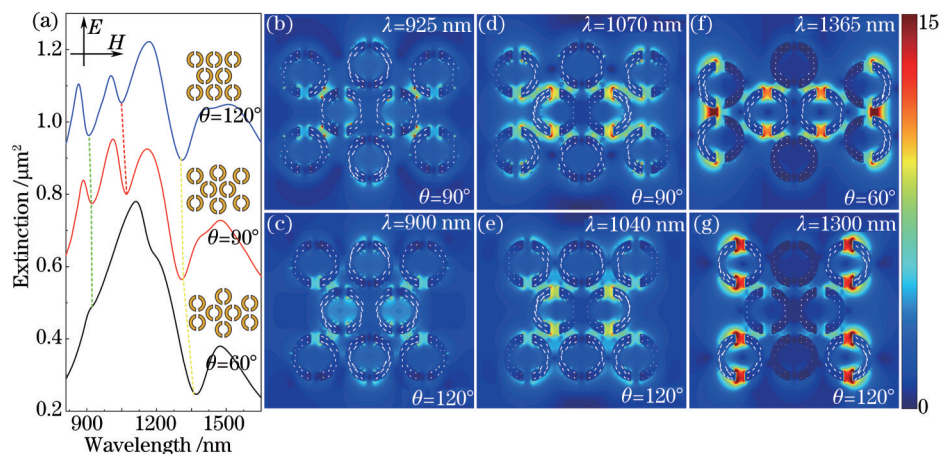


图 5 (a) 劈裂纳米环八聚体的消光光谱与夹角 θ 之间的关系; (b)~(g) 不同夹角 θ 的劈裂纳米环八聚体的近场增强和电流密度矢量分布

Fig.5 (a) Extinction spectra of the plasmonic octamer clusters composed of split-nanorings versus the angle θ ; (b)~(g) near-field enhancement and current density vector distribution of plasmonic octamer clusters composed of split-nanorings with different angle θ

与纳米环八聚体相比,劈裂纳米环八聚体具有更丰富的光学特性,劈裂纳米环八聚体不仅能产生调制深度更大的法诺共振,同时改变缺口方向和入射光偏振方向时最多能产生三重法诺共振。相比 Dregely 等^[26]研究的等离子体聚合物中高阶法诺共振的激发和调制,本文中劈裂纳米环八聚体能激发更多重的法诺共振现象并且对法诺共振的调制深度和光谱位置有更大调制范围。

金属纳米结构多重法诺共振可以在多个波段同时产生很强的局域电磁场增强效应,对于表面增强拉曼散射应用领域,依据电磁场增强理论,表面增强拉曼散射增强因子取决于激发波长以及斯托克斯波长处局域电磁场的场强大小,在法诺共振处在金属纳米颗粒间产生强烈的电磁场,称为热点,此时金属纳米结构具有很强的局域电磁场增强效应,而这种电磁场增强效应又能够有效地提高分子的拉曼散射信号。高度局域在金属纳米颗粒间的电磁场对金属纳米结构周围的电磁介质特性有着天然的敏感性,当周围环境介电常数发生改变,如金属纳米结构表面有吸附物体时,其法诺共振位置将发生偏移,与此同时高度增强的电磁场增大了共振模式与表面吸附物体的相互作用强度,从而增强了金属纳米结构对周围环境变化的敏感性^[33]。因此利用提出的可产生多重法诺共振效应的体系,调整八聚体结构参数使得峰位匹配,可获得很大的表面增强拉曼散射增强因子和对周围环境变化的敏感性。

4 结 论

利用 FDTD 分别对纳米环八聚体和劈裂纳米环八聚体两种结构的消光光谱和近场分布进行了研究。研究表明在两种八聚体中产生不同的法诺共振现象,通过调整外部 4 个环间夹角的大小及入射光的偏振方向,纳米环八聚体中最多可以产生双重法诺共振,而劈裂纳米环八聚体最多可以产生三重法诺共振,此外法诺共振的调制深度和光谱位置都可以被调谐。这些结果可指导纳米环八聚体及劈裂纳米环八聚体结构的设计,以满足其在表面增强拉曼散射生物传感等方面的应用。

参 考 文 献

- 1 Cao J, Sun T, Grattan K T V. Gold nanorod-based localized surface plasmon resonance biosensors: A review[J]. Sensor Actuator B, 2014, 195: 332-351.
- 2 Kelly K L, Coronado E, Zhang L L, *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 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.
- 4 Zhang X Y, Hu A M, Zhang T, *et al.*. Self-assembly of large-scale and ultrathin silver nanoplate films with tunable plasmon resonance properties[J]. ACS Nano, 2011, 5(11): 9082-9092.
- 5 Zhang X Y, Zhang T, Hu A M, *et al.*. Controllable plasmonic antennas with ultra narrow bandwidth based on silver nano-flags[J]. Appl Phys Lett, 2012, 101: 153118.
- 6 Kessentini S, Barchiesi D, Andrea C D, *et al.*. Gold dimer nanoantenna with slanted gap for tunable LSPR and improved SERS[J]. J Phys Chem C, 2014, 118(6): 3209-3219.
- 7 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.
- 8 Zhang Haopeng, Jiang Tao, Gao Yongfeng, *et al.*. Single molecule detection by SERS of a spaser-based bowtie nanoantenna[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0908002.
- 张昊鹏, 姜 涛, 高永峰, 等. 表面等离子体受激辐射放大领结型纳米天线的SERS单分子探测[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0908002.
- 9 Zhang Y, Grady N K, Ayala-Orozco C, *et al.*. Three-dimensional nanostructures as highly efficient generators of second harmonic light[J]. Nano Lett, 2011, 11(12): 5519-5523.
- 10 Ren Mengxin, Xu Jingjun. Surface plasmon polariton enhanced nonlinearity and applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080002.
- 任梦昕, 许京军. 表面等离子体激元增强非线性的原理及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080002.
- 11 Atwater H A, Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices[J]. Nat Mater, 2010, 9(3): 205-213.
- 12 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.
- 13 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.
- 14 Fang Z Y, Cai J Y, Yan Z B, *et al.*. Removing a wedge from a metallic nanodisk reveals a Fano resonance[J]. Nano Lett, 2011, 11(10): 4475-4479.
- 15 Luo Tingjun, Wan Lingyu, Huang Jiqin, *et al.*. Shape optimization and analysis of sensing properties of localized surface plasmon resonances for triangle metal nanoparticles[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0524002.
- 罗庭军, 万玲玉, 黄继钦, 等. 三角形金属纳米结构的局域表面等离共振传感特性与优化分析[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0524002.
- 16 Hao F, Larsson E M, Ali T A, *et al.*. Shedding light on dark plasmons in gold nanorings[J]. Chem Phys Lett, 2008, 458(4-6): 262-266.
- 17 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.
- 18 Zhang Q, Wen X, Li G, *et al.*. Multiple magnetic mode-based Fano resonance in split-ring resonator/disk nanocavities [J]. ACS Nano, 2013, 7(12): 11071-11078.
- 19 Ayala-Orozco C, Liu J G, Knight M W, *et al.*. Fluorescence enhancement of molecules inside a gold nanomatryoshka[J]. Nano Lett, 2014, 14(5): 2926-2933.
- 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 Hamidi S M, Oskuei M A. Adjustable surface plasmon resonance with Au, Ag, and Ag@Au core-shell nanoparticles[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(3): 031601.
- 22 Bernd M, Thorsten S, Mario H. Third harmonic mechanism in complex plasmonic Fano structures[J]. ACS Photonics, 2014, 1(6): 471-476.
- 23 Liu H, Leong E S P, Wang Z. Multiple and multipolar Fano resonances in plasmonic nanoring pentamers[J]. Advan Opt

- Mater, 2013, 1(12): 978–983.
- 24 Liu S D, Zhang M J, Wang W J, *et al.*. Tuning multiple Fano resonances in plasmonic pentamer clusters[J]. Appl Phys Lett, 2013,102(13): 133104–133105.
- 25 Liu S D, Yang Y B, Chen Z H, *et al.*. Excitation of multiple Fano resonances in plasmonic clusters with D_{2h} point group symmetry[J]. J Phys Chem C, 2013, 117(27): 14218–14228.
- 26 Dregely D, Hentschel M, Giessen H. Excitation and tuning of higher-order Fano resonances in plasmonic oligomer clusters[J]. ACS Nano, 2011, 5(10): 8202–8211.
- 27 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.
- 28 Wu C, Khanikaev A B, Shvets G. Broadband slow light metamaterial based on a double-continuum Fano resonance[J]. Phys Rev Lett, 2011, 106(10): 107403.
- 29 Chang W S, Lassiter J B, Swanglap P, *et al.*. A plasmonic Fano switch[J]. Nano Lett, 2012, 12(9): 4977–4982.
- 30 Ye J, Wen F, Sobhani H, *et al.*. Plasmonic nanoclusters: Near field properties of the Fano resonance interrogated with SERS[J]. Nano Lett, 2012, 12(3): 1660–1667.
- 31 Yang P, Ding S, Chen F, *et al.*. Application of surface-enhanced Raman spectrum technology in detecting environment pollutants[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 030003.
- 32 Johnson P B, Christy R W. Optical constants of noble metals[J]. Phys Rev B, 1972, 6(12): 4370–4379.
- 33 Li Zhiyuan, Li Jiafang. Recent progress in engineering and application of surface plasmon resonance in metal nanostructures[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(32): 2631–2661.
- 李志远, 李家方. 金属纳米结构表面等离子体共振的调控和利用[J]. 科学通报, 2011, 56(32): 2631–2661.

栏目编辑: 吴秀娟