

金属-介质-金属纳米天线阵列的模式特性及荧光发射调控

王晗, 臧昊峰, 鲁拥华*, 王沛

中国科学技术大学光学与光学工程系安徽省光电子科学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230026

摘要 设计一种支持多模式的金属-介质-金属纳米天线阵列结构, 分析结构中的模式特性及其调控的发光过程。利用时域有限差分的方法模拟该结构的透射谱和电场分布, 分析结构中局域表面等离子体模式和磁等离子体共振模式的特性以及激发光偏振调控的模式变化。将偶极子光源放在介质层中, 模拟该天线阵列结构调控荧光分子的发光过程。结果表明, 荧光分子的辐射和非辐射衰减速率增强因子、量子效率以及偏振特性受到了所提结构模式的有效调控; 在一定波长范围内改变激发光的偏振方向可以对发光谱进行调谐。

关键词 物理光学; 局域表面等离子体; 磁等离子体; 时域有限差分; 荧光辐射

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0426001

Mode Properties and Fluorescence Emission Mediation of Metal-Dielectric-Metal Nanoantenna Array

Wang Han, Zang Haofeng, Lu Yonghua*, Wang Pei

Anhui Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology, Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract In this paper, a metal-dielectric-metal nanoantenna array structure that supports multiple modes is designed. The mode properties and mediation for fluorescence emission of the proposed structure are analyzed. The transmission spectrum and electric field distribution of the proposed structure were simulated by the finite-difference time-domain method. Moreover, the mode properties of the localized surface plasmon mode and magnetic plasmon polaritons resonance mode, and the mode changes modulated by the excitation light polarization were analyzed. A dipole source was placed in the dielectric layer to simulate the luminescence process which the nanoantenna array structure regulating fluorescent molecule. The simulation results show that the radiation and non-radiation decay rate enhancement factors, quantum efficiency, and polarization characteristics of the fluorescence molecule are effectively modulated by the proposed structure. Besides, the emission spectrum can be tuned within a certain wavelength range by changing the polarization direction of excitation light.

Key words physical optics; localized surface plasmon; magnetic plasmon polariton; finite-difference time-domain; fluorescence radiation

OCIS codes 260.2510; 350.5400; 260.5740; 260.5430

1 引 言

金属微纳结构由于支持多种杂化耦合模式而拥有丰富的光学特性, 具有广泛的应用价值。构造微纳结构可以实现光波波长局域在纳米尺度和光波传输, 在表面增强拉曼散射^[1]、微纳传感探测^[2]、微纳光子器件设计和集成^[3]等领域有重要应用。利用金

属微纳结构调控荧光分子自发辐射效率是表面等离子体光子学领域最具应用前景的研究方向之一^[4-6], 被广泛应用于光学传感器^[7]、生物成像^[8]、发光设备^[9]以及太阳能电池等方面^[10]。研究表明, 表面等离子体共振可以将光场高效地局域在纳米尺度内, 通过改变荧光分子周围电磁场的局域态密度, 可实现增强^[11]或抑制^[12]荧光辐射的作用。单个纳米金

收稿日期: 2019-07-09; 修回日期: 2019-09-12; 录用日期: 2019-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(11674303, 61377053, 11574293)

* E-mail: yhlu@ustc.edu.cn

属颗粒天线周围可以产生局域表面等离子激元(LSP)模式^[13],将该共振模式与荧光分子的吸收峰或辐射峰相匹配,可以实现荧光激发增强^[14]或者荧光辐射增强^[15],然而单个纳米金属颗粒天线难以实现荧光激发和辐射速率的同时增强。将单个的金属颗粒排列成一维或二维阵列,当入射光波长与阵列周期相近时,会得到一个窄带的周期模式^[16-17]。此外,将一对金属纳米颗粒耦合成金属-介质-金属(MDM)三明治结构,可以产生纵向耦合的磁等离子激元(MPP)共振模式^[18-19]。将孤立的MDM三明治结构排成阵列,就可以同时支持LSP模式、MPP共振模式和周期模式。利用MDM阵列结构的多模式特性来调控荧光辐射,可以克服单一模式的缺陷,实现荧光分子激发-辐射的双增强,提高发光效率。据此,任远^[20]设计了一种MDM渔网超表面,该结构将LSP模式和MPP共振模式分别与荧光分子的吸收峰和辐射峰相匹配,实现了荧光辐射的激发-辐射双增强,但是这种渔网结构的大面积膜层会吸收荧光辐射,使损耗增大,并且周期模式的存在限制了荧光辐射的

波长调节范围。

为了解决以上问题,本文设计了一种可以实现荧光分子激发-辐射双增强的MDM纳米天线阵列结构。相对于MDM渔网超表面,该结构损耗小、波长调节范围大,通过改变激发光的偏振态可以在一个较大的波长范围内对荧光辐射的峰值进行有效调控。利用三维有限时域差分软件(FDTD Solutions)对MDM纳米天线阵列的模式特性进行计算,通过改变结构参数对模式的共振位置进行调谐,同时利用偶极子模型模拟了所提结构对荧光辐射的调控。

2 仿真结果

2.1 MDM 纳米天线阵列的模式特性及调控

图1(a)为MDM矩形纳米天线阵列结构示意图,使用FDTD Solutions来计算所提结构的透射谱和共振位置的电场分布,其中 H 表示电场方向, E 表示磁场方向, k 表示光传播方向。单个MDM颗粒的长 l 为100 nm,宽 w 为100 nm,以颗粒底面中心为原点,颗粒的长和宽分别为 x 轴和 y 轴建立坐

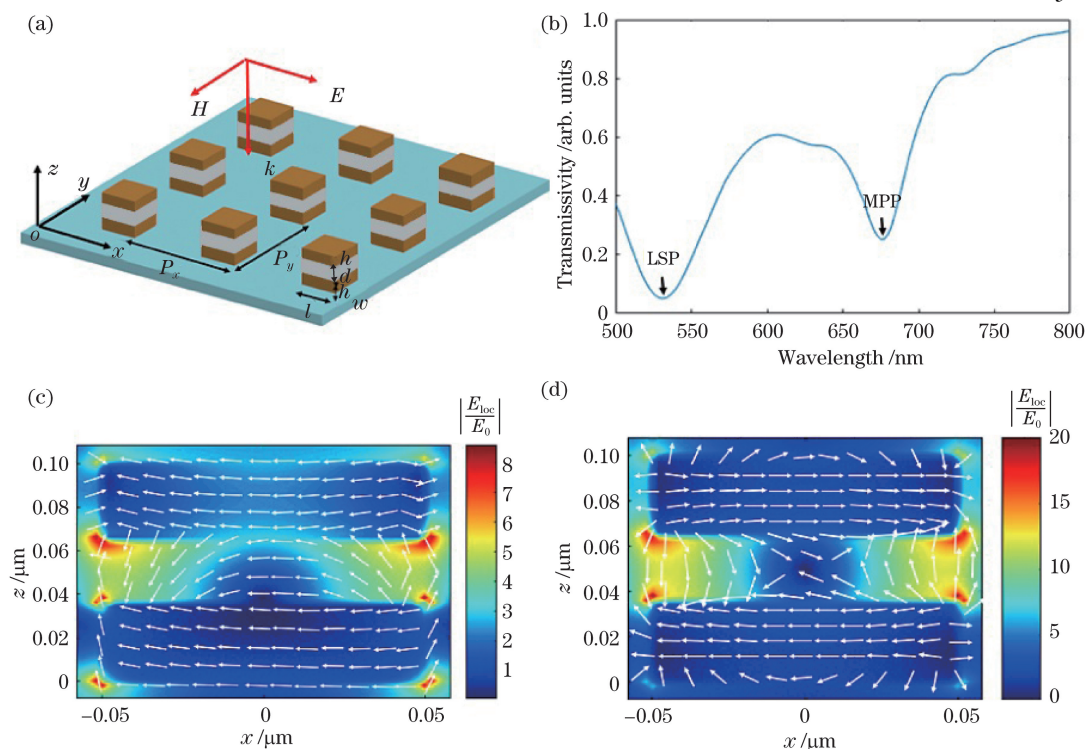


图1 仿真模型及仿真结果。(a) MDM纳米天线阵列结构示意图;(b)入射光偏振方向沿 x 轴时模拟得到的结构白光透射谱;(c)532 nm共振位置处 xoz 平面上的电场强度及电场矢量分布图;(d)671 nm共振位置处 xoz 平面上的电场强度及电场矢量分布图

Fig. 1 Simulation model and simulation results. (a) Schematic of MDM nanoantenna array structure; (b) simulated transmission spectrum of white light when polarization direction of incident light is along x axis; (c) electric field intensity and electric vector distribution map on xoz plane at resonant position of 532 nm; (d) electric field intensity and electric vector distribution map on xoz plane at resonant position of 671 nm

标系。上、下两层金属材料为 Ag, 高度 h 为 35 nm, 仿真模拟时 Ag 的介电系数采用 Palik 模型^[21]; 中间介质层为聚甲基丙烯酸酯 (PMMA), 折射率 n 为 1.49, 厚度 d 为 30 nm。整个结构放置在 SiO₂ 基底上, 背景折射率为 1。激发光为平面光源, 偏振方向沿 x 轴, 入射方向沿 z 轴负方向。在 x 方向和 y 方向设置周期边界, x 方向的阵列周期 P_x 为 300 nm, y 方向的阵列周期 P_y 为 300 nm。在 z 方向设置完全匹配层 (PML) 以消除边界反射波的影响。计算中采用的非均匀网格大小在 x 、 y 、 z 方向上均为 2 nm。

图 1(b) 为所提结构的白光透射谱, 可以看出, 在 $\lambda = 532$ nm 和 $\lambda = 671$ nm 处分别出现了一个透射谷, 这两个透射谷处 xoz 平面上的电场强度及电场矢量分布分别如图 1(c)、(d) 所示。由图 1(c) 发现, 532 nm 处上、下金属层中的电场矢量方向一致, 是一个电偶极模式, 为 LSP 模式。由图 1(d) 发现, 671 nm 处上、下金属层中电场矢量方向相反, 上、下金属层之间产生了环形电流, 并诱导产生了磁偶极矩, 为 MPP 模式。在这两个共振位置处, 介质内的电场强度得到了很大的增强, E_{loc} 为受结构影响的

局域电场强度, E_0 为自由空间的电场强度, $\left| \frac{E_{loc}}{E_0} \right|$ 为局域电场增强因子, 计算结果表明, 在 LSP 和 MPP 共振位置处介质层中电场强度的增强因子最大分别可达 7 和 16。

进一步研究结构参数的变化对共振位置的影响, 从而揭示出不同的参数对 LSP 和 MPP 模式的调节规律。每次模拟时只改变单一结构参数而保持其他结构参数与图 1(a) 一致, 即分别改变介质层的厚度 d 、 x 方向的周期 P_x 、颗粒 x 方向的长度 l 以及入射光偏振角度 θ 。图 2(a) 为 d 从 10 nm 变化到 50 nm, 步长为 10 nm 时模拟得到的透射谱。可以看出: 随着介质层厚度 d 的增加, LSP 的共振位置没有移动, 因为 LSP 模式主要依赖于结构的内几何尺寸, 而不受上、下金属层之间耦合的影响; 而 MPP 共振位置发生蓝移, 因为随着间隔层厚度的增加, 上、下金属层之间的耦合作用减弱, 单个金属颗粒支持的局域模式起主要作用, 磁共振波长将向局域模式的共振波长位置移动^[22]。MPP 共振波长随 d 变化的曲线如图 2(b) 所示。

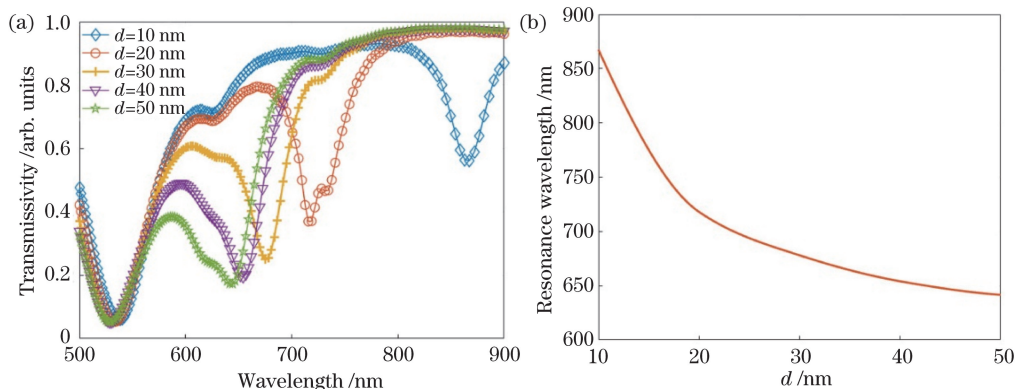


图 2 结构参数的变化对共振位置的影响。(a) 模拟得到的结构透射谱; (b) MPP 模式的共振位置随 d 的变化曲线

Fig. 2 Influence of structure parameters on resonance position. (a) Simulated transmission spectrum of the proposed structure; (b) change curve of resonance position of MPP mode with respect to d

图 3 为 x 方向的周期 P_x 从 280 nm 变化到 320 nm, 步长为 20 nm 时模拟得到的结构透射谱, 可以看出, 所提结构的 LSP 和 MPP 模式的共振位置基本不受阵列周期的影响, 因为这两种模式是跟单个颗粒有关的局域模式, 受颗粒间耦合的影响较小。

图 4(a) 为颗粒 x 方向的长度 l 从 80 nm 变化到 120 nm, 步长为 10 nm 时计算得到的透射谱, 可以看出, 随着颗粒 x 方向长度 l 的增加, 颗粒的 LSP 和 MPP 模式的共振位置均发生红移。LSP 模式和 MPP 模式的共振位置随 l 的变化曲线如图 4(b) 所

示。可以发现, 共振波长随 l 的变化曲线近似为一条直线, 且 MPP 模式的共振波长随 l 变化的直线斜率明显大于 LSP 模式, 表明 MPP 共振模式对颗粒长度的变化更加敏感。根据这一特性, 设置颗粒 x 方向长度 l 和 y 方向长度 w 为不同值, 通过改变入射光的偏振方向就可以对颗粒的共振谱进行调谐。

图 4(c) 为模拟入射光偏振角度改变时的结构透射谱, 颗粒 x 方向的长度 l 为 90 nm, y 方向的长度 w 为 120 nm。偏振角 θ 为偏振方向与结构 x 轴正方向之间的夹角, 入射光偏振角 θ 从 0° 变化到

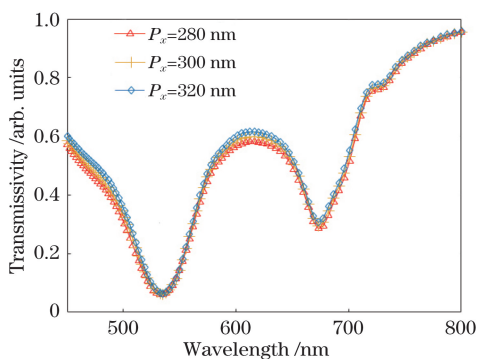


图 3 模拟得到的结构透射谱

Fig. 3 Simulated transmission spectra of proposed structure

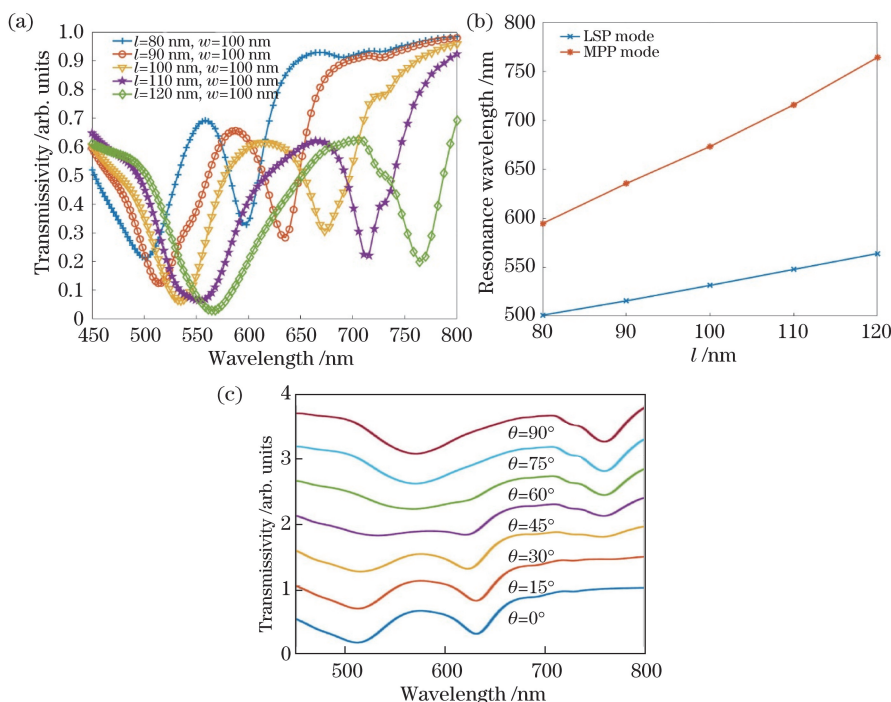


图 4 不同长度 l 和不同偏振角度对共振位置的影响。(a)模拟得到的结构透射谱;(b) LSP 和 MPP 模式的共振位置随 l 的变化曲线;(c) l 为 90 nm, w 为 120 nm, 步长为 15° 时的结构透射谱

Fig. 4 Influence of different length l and polarization angle on resonance position. (a) Simulated transmission spectrum of proposed structure; (b) variation of resonance position of LSP and MPP modes with l ; (c) simulated transmission spectra of proposed structure, when l is 90 nm, w is 120 nm and step size is 15°

x 方向的长度 l_x 从 250 nm 变化到 290 nm 时的透射谱。与 MDM 纳米天线阵列结构相比,MDM 渔网超表面除了支持 LSP 模式和 MPP 模式外,还支持表面等离激元-布洛赫波(SPP-BW)模式。SPP-BW 是一种波导模式,电场不能很好地局域在空气孔周围,所以一般利用 LSP 模式和 MPP 模式来调控荧光辐射。由于 MPP 模式的共振波长大于 SPP-BW 模式的共振波长,只能从 SPP-BW 共振谷之后开始,通过 MPP 调控荧光辐射波长范围。而 MDM 纳米天线阵列中不含有 SPP-BW 模式,这就大大增大了 MPP 共振波长向短波拓展的范围,最短可到

90° ,步长为 15° 。周期 P_x, P_y 均为 300 nm,介质层厚度 d 为 30 nm。当入射光偏振角度从 0° 逐渐变化到 90° 时,可以观察到两个模式的共振位置逐渐红移, x 偏振下的共振模式逐渐消失, y 偏振下的共振模式逐渐显现,这一结果表明,通过简单操控入射光的偏振方向就可以实现光谱调制。

比较 MDM 渔网结构与 MDM 纳米天线阵列。图 5(a)为 MDM 渔网结构示意图,设置结构的周期 P_x 和 P_y 均为 400 nm,金属层厚度 h 为 35 nm,介质层厚度 d 为 30 nm,入射光沿 x 轴偏振入射,空气孔沿 y 方向的长度 l_y 为 250 nm。图 5(b)为空气孔

LSP 共振位置附近,使得所提结构辐射出的荧光具有更大的波长可调谐范围。

2.2 MDM 纳米天线阵列调控荧光辐射的研究

设计了支持 LSP 和 MPP 共振模式的 MDM 纳米天线阵列结构,并研究了结构参数对模式共振特性的影响,发现 LSP 模式和 MPP 模式可以将光场高效地局域在纳米尺度的介质层中,电场在介质层内会得到很大的增强,并且模式的共振位置具有可调谐的特点,这一特性可以被用来增强荧光分子的吸收和辐射效率,对设计发光器件、纳米激光器都有十分重要的指导意义。

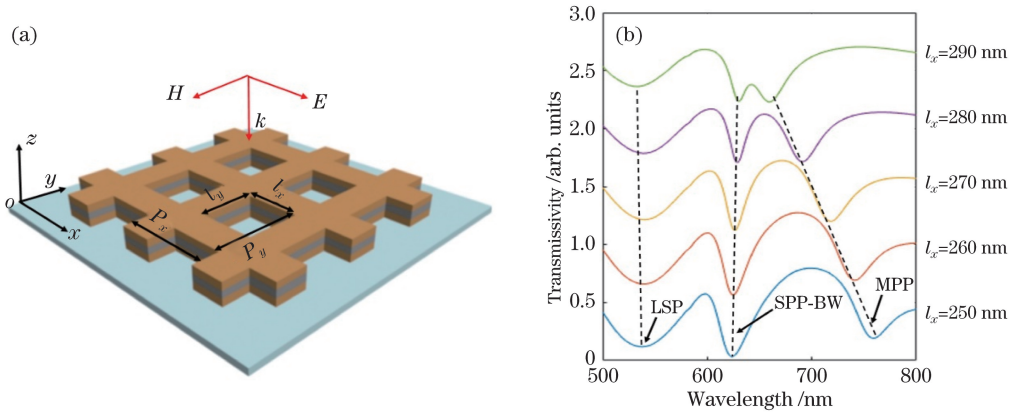


图 5 MDM 渔网超表面。(a)MDM 渔网超表面的结构示意图;(b)入射光偏振方向沿 x 轴时模拟得到的结构透射谱
Fig. 5 MDM fishnet metasurface. (a) Schematic of MDM fishnet metasurface; (b) simulated transmission spectra when polarization direction of incident light is along x axis

将偶极子光源放置在介质层中,模拟荧光分子发光,以研究 MDM 纳米天线阵列结构对荧光发光的调控。实验上常用 532 nm 波长的激光激发荧光分子,使其发光,所以首先模拟激发光波长为 532 nm 时 MDM 纳米天线阵列介质层内 xoy 平面上的总场电场强度和 x 、 y 、 z 方向上的分场电场强度分布,设置激发光的 θ 为 0° 、 45° 和 90° 。

FDTD Solutions 模拟结果如图 6 所示。图 6 中线框为单个 MDM 颗粒的位置,从模拟的结果可

以看出, z 方向的电场强度远大于 x 、 y 方向的电场强度,因此用沿 z 轴振荡的偶极子光源来模拟荧光分子的发光过程。当激发光偏振方向 θ 为 0° 和 90° 时,电场增强最大的位置分别位于每个单颗粒中与 0° 和 90° 方向平行的两端,如图 6(a)、(i) 所示。而当激发光偏振方向 θ 为 45° 时,电场增强最大的位置位于每个单颗粒沿 $\theta = 45^\circ$ 的对角上,如图 6(e) 所示。当把沿 z 方向偏振的偶极子放置在颗粒边沿不同位置时,就可以模拟激发光的偏振变化对荧光辐射

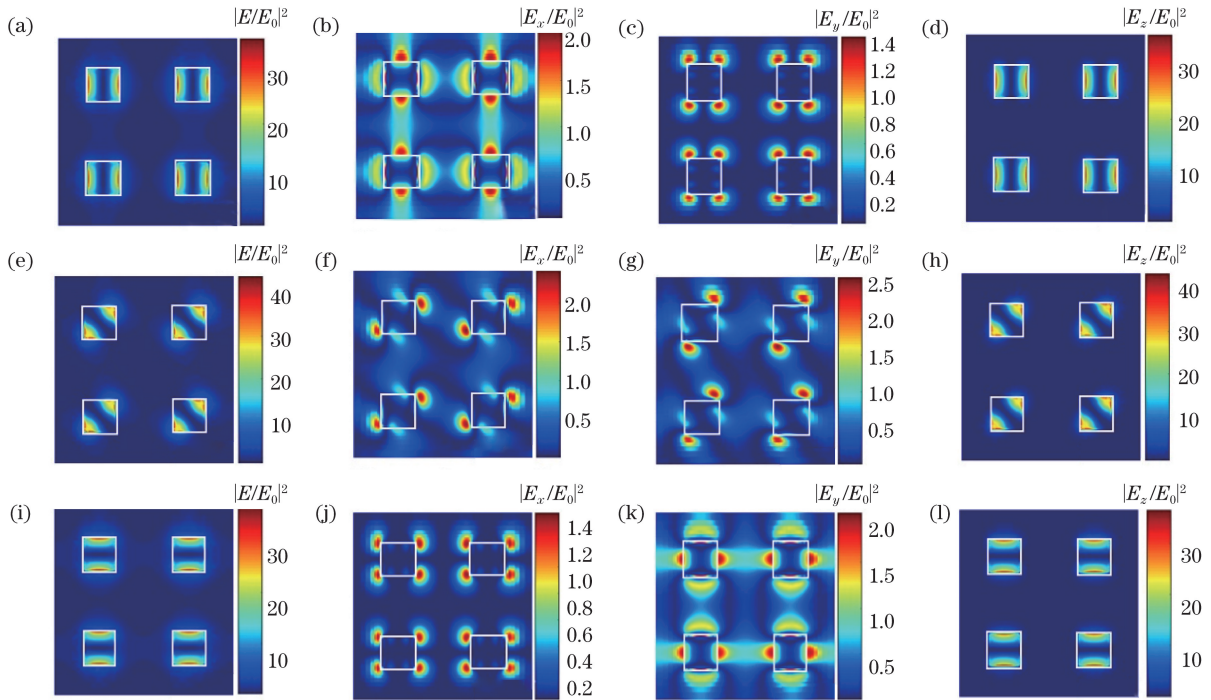


图 6 激发光波长为 532 nm 时,模拟得到的介质层内 xoy 平面上的总场电场强度和 x 、 y 、 z 方向分场电场强度分布。
(a)~(d) $\theta = 0^\circ$; (e)~(h) $\theta = 45^\circ$; (i)~(l) $\theta = 90^\circ$

Fig. 6 Total electric field and electric field in x , y , and z direction on xoy plane in dielectric layer when excitation light wavelength is 532 nm. (a)~(d) $\theta = 0^\circ$; (e)~(h) $\theta = 45^\circ$; (i)~(l) $\theta = 90^\circ$

的调节情况。

通常把荧光分子近似为准二能级发射体。对于激发波长为 λ_{ex} 的弱光(无饱和),激发速率增强^[23]为

$$\frac{\gamma_{ex}}{\gamma_{ex}^0} = \frac{|\mathbf{E}_{ex} \cdot \mathbf{n}_p|^2}{|\mathbf{E}_{ex}^0 \cdot \mathbf{n}_p|^2}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{n}_p 为荧光分子的单位方向向量; \mathbf{E}_{ex} 为局域激发电场; γ_{ex} 为纳米结构存在时的激发速率; 角标“0”为无纳米结构存在的情况。荧光分子在均一环境中的固有量子效率 η_0 ^[24] 可以表示为

$$\eta_0 = \frac{\gamma_r^0}{\gamma_r^0 + \gamma_{nr}^0}, \quad (2)$$

式中: γ_r^0 和 γ_{nr}^0 分别为辐射衰减速率和非辐射衰减速率。荧光分子在自由空间中的总衰减速率 γ^0 为

$$\gamma^0 = \gamma_r^0 + \gamma_{nr}^0. \quad (3)$$

当荧光分子受到纳米结构调控时,辐射衰减速率^[25]变成

$$\gamma_r = \gamma_{r,plasmon} + \gamma_r^0, \quad (4)$$

式中: $\gamma_{r,plasmon}$ 为表面等离激元辐射的荧光衰减速率。非辐射衰减速率^[26]变为

$$\gamma_{nr} = \gamma_{abs} + \gamma_{nr}^0, \quad (5)$$

式中: γ_{abs} 为金属结构导致的荧光淬灭。受到结构调控时量子效率^[27]可以表示为

$$\eta = \frac{\gamma_r}{\gamma_r + \gamma_{nr}} = \frac{\gamma_{r,plasmon} + \gamma_r^0}{\gamma_{abs} + \gamma_{r,plasmon} + \gamma_r^0 + \gamma_{nr}^0}. \quad (6)$$

量子效率的增强倍数为 η/η_0 , 量子效率的增强倍数与荧光分子和微纳结构之间的距离有关。荧光

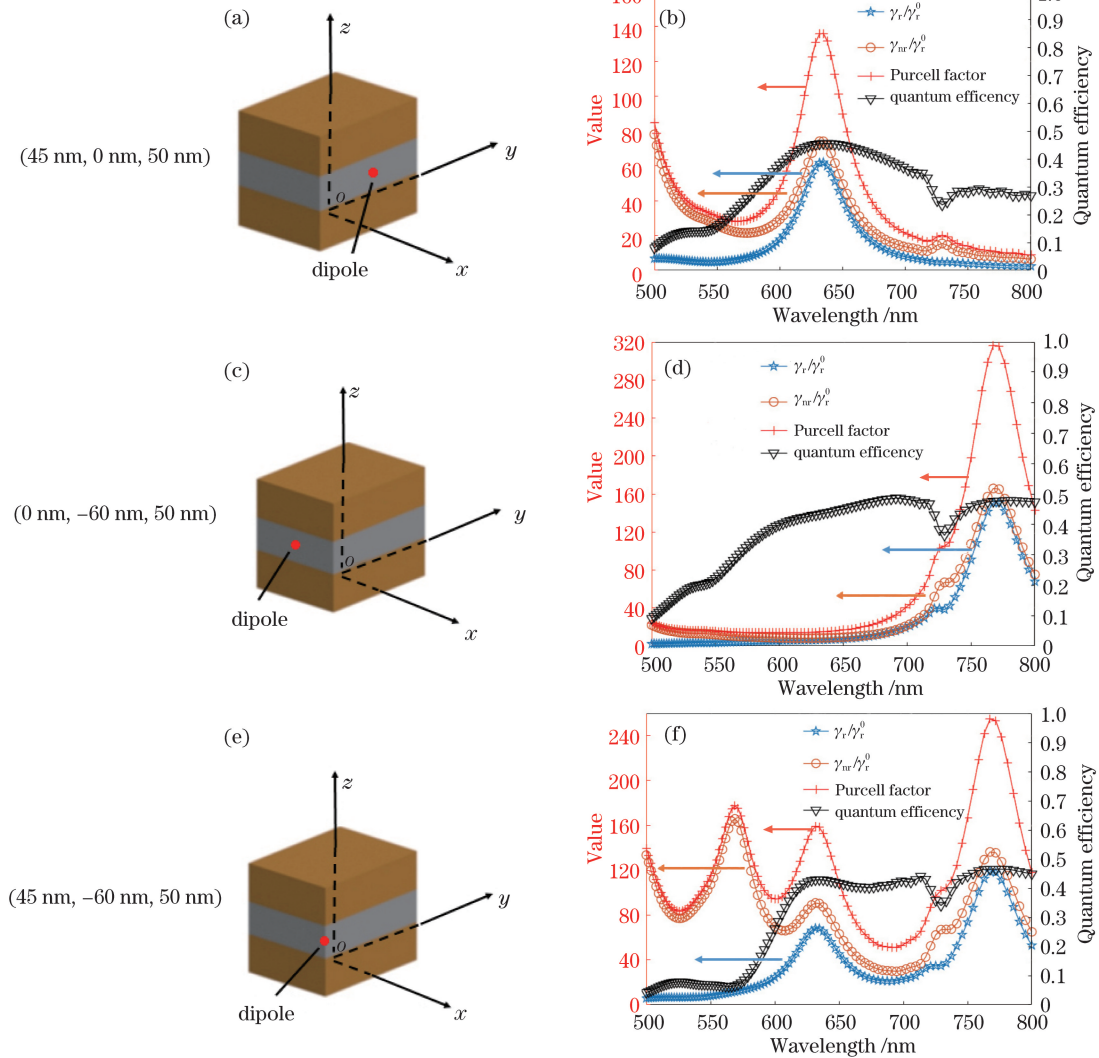


图 7 偶极子的位置以及对应的性质。(a)(c)(e)偶极子位于不同位置处的结构示意图;

(b)(d)(f)偶极子的发光分子的辐射和非辐射衰减速率增强因子、Purcell 因子以及量子效率

Fig. 7 Positions of dipole and corresponding properties. (a)(c)(e) Schematic when dipole is located at different positions; (b)(d)(f) radiative and non-radiative decay rate enhancement factor, Purcell factor and quantum efficiency of luminescent molecules of dipole

分子受到结构调控的总衰减速率 $\gamma_{sp}^{[28]}$ 为

$$\gamma_{sp} = \gamma_r + \gamma_{nr} \quad (7)$$

总衰减速率的增强用 Purcell 因子 (F_p) 表示:

$$F_p = \frac{\gamma_{sp}}{\gamma^0} \quad (8)$$

以颗粒底面的中心为坐标原点,以颗粒的长和宽分别为 x 轴和 y 轴建立坐标系,颗粒 x 轴的长度 l 为 90 nm, y 轴长度 w 为 120 nm,设置周期边界 P_x 和 P_y 均为 300 nm, d 为 30 nm, h 为 35 nm。偶极子的位置分别为:(45 nm, 0 nm, 50 nm),如图 7(a)所示;(0 nm, -60 nm, 50 nm),如图 7(c)所示;(45 nm, -60 nm, 50 nm),如图 7(e)所示。分别计算这三种情况下发光分子的 Purcell 因子、量子效率及辐射和非辐射衰减速率增强因子,结果如图 7(b)、(d)、(f)所示。

图 7(b)显示,激发光偏振方向沿 x 轴时,即偶极子位于 (45 nm, 0 nm, 50 nm) 处,在波长为 635 nm 时, Purcell 因子、辐射和非辐射衰减速率增强因子以及量子效率都能取得最大值,荧光辐射强度达到峰值,峰值的位置对应 MPP 波长。图 7(d)显示,当激发光偏振方向沿 y 轴时,即偶极子位于 (0 nm, -60 nm, 50 nm) 处,荧光辐射的峰值出现在波长 770 nm 处,对应激发光偏振方向沿 y 轴时的 MPP 波长。图 7(f)显示,当 $\theta = 45^\circ$ 时,即偶极子位于 (45 nm, -60 nm, 50 nm) 处,在 635 nm 和 770 nm 这两个 MPP 共振模式的波长处均得到荧光辐射增强,在荧光辐射峰附近量子效率同时能保持较高的数值(0.4~0.5)。结果证明,MDM 纳米天线阵列结构可以提高荧光分子的辐射和非辐射衰

速率增强因子以及量子效率,荧光辐射峰位置与结构 MPP 共振位置重合,通过调节激发光的偏振方向可以对荧光辐射峰的位置进行调谐。

图 8 为荧光辐射峰为 650 nm 时 MDM 渔网结构和 MDM 纳米天线阵列结构的量子效率,可以看出,在 500~800 nm 波长范围内,MDM 纳米天线阵列的量子效率大于 MDM 渔网超表面。这是因为与 MDM 渔网结构相比,MDM 纳米天线阵列结构刻蚀掉了大面积的膜层,被膜层吸收的荧光辐射减少,被远场接收到的荧光辐射增加,因此 MDM 纳米天线阵列结构损耗更小。

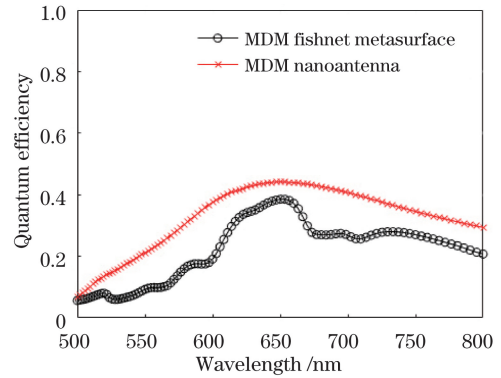


图 8 荧光辐射峰位于 650 nm 时 MDM 渔网超表面和 MDM 纳米天线阵列结构的量子效率

Fig. 8 Quantum efficiency of MDM fishnet metasurface and MDM nanoantenna structure when peak of fluorescent emission is at 650 nm

在激发光偏振方向沿 x 轴和 y 轴这两种情况下,对放置在 MDM 纳米天线阵列介质层中的偶极子辐射到远场的电场强度在 x 、 y 、 z 方向的分量大小进行计算,结果如图 9 所示。

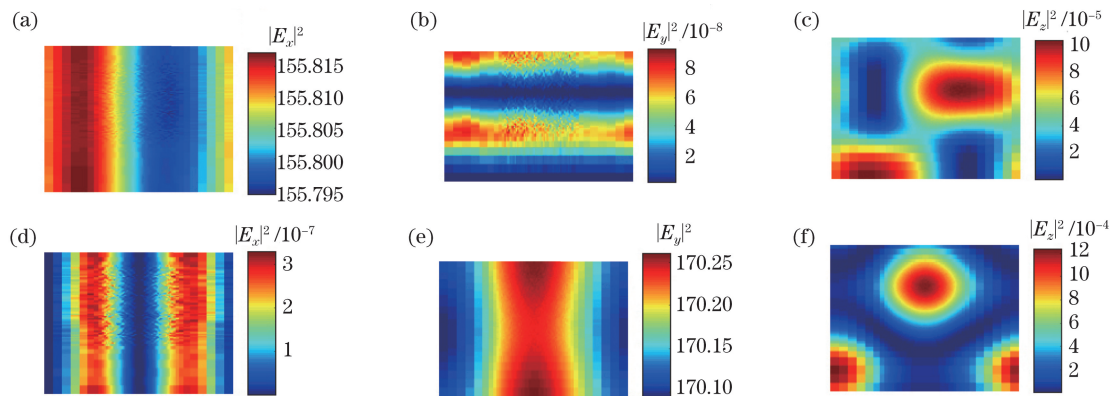


图 9 x 和 y 方向上电场强度的各方向分量分布。(a)~(c)偶极子受到 x 方向偏振的激发光激发时,在 635 nm 处测得的结果;(d)~(f)偶极子受到 y 方向偏振的激发光激发时,在 770 nm 处测得的结果

Fig. 9 Distribution of electric field intensity in each direction at x and y direction. (a)~(c) Results are obtained at 635 nm when dipole is excited by the x polarization laser; (d)~(f) results are obtained at 770 nm when dipole is excited by the y polarization laser

图 9(a)~(c)为当介质层内的偶极子受到沿 x 方向偏振的激发光激发时,在辐射峰 635 nm 处测得的偶极子辐射到远场的电场强度各方向分量的大小,可以看出,电场强度在 x 方向的分量远大于在其他两个方向的电场强度分量。图 9(d)~(f)为当介质层内的偶极子受到沿 y 方向偏振的激发光激发时,在辐射峰 770 nm 处测得的偶极子辐射到远场的电场强度各方向分量的大小,可以看出,这种情况下的电场强度在 y 方向的分量远大于在其他两个方向的电场强度分量。由此证明:通过改变激发光的偏振方向,可以改变荧光辐射光谱的形状,且荧光辐射在相应的 MPP 波长处具有良好的偏振特性。

3 结 论

设计一种金属-介质-金属纳米天线阵列结构,通过 FDTD Solutions 模拟发现这种结构可以同时支持 LSP 和 MPP 共振模式,这两种模式可以将光场高效地局域在介质层中,且共振位置可以通过改变颗粒的大小、介质层的厚度、激发光的偏振方向等参数进行调谐。由于介质层内共振波长处的场增强效应,发光分子置于介质层中时,其激发速率、辐射和非辐射衰减速率增强因子以及量子效率都会受到所提结构的共振模式调控,分子发光的辐射峰与结构的 MPP 共振位置重合,具有偏振依赖性,通过改变激发光的偏振方向可以调节发光光谱的形状。同时发光分子的远场辐射在相应的 MPP 波长处表现出偏振特性,其偏振方向依赖于激发光偏振方向。本文结论为发光过程的调控及纳米激光的实现提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] Starowicz Z, Wojnarowska-Nowak R, Ozga P, et al. The tuning of the plasmon resonance of the metal nanoparticles in terms of the SERS effect[J]. *Colloid and Polymer Science*, 2018, 296(6): 1029-1037.
- [2] Rajput M, Sinha R K. Effect of different plasmonic nano-inclusion on double negative-semiconductor photonic crystal in visible region: gain assistance and all-angle negative refraction[J]. *Journal of Electronic Science and Technology*, 2010, 8(1): 10-15.
- [3] Ozbay E. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions[J]. *Science*, 2006, 311(5758): 189-193.
- [4] Pelton M. Modified spontaneous emission in nanophotonic structures[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(7): 427-435.
- [5] Schuller J A, Barnard E S, Cai W S, et al. Plasmonics for extreme light concentration and manipulation[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(3): 193-204.
- [6] Hess O, Pendry J B, Maier S A, et al. Active nanoplasmonic metamaterials[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(7): 573-584.
- [7] Bauch M, Dostalek J. Collective localized surface plasmons for high performance fluorescence biosensing [J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 20470-20483.
- [8] El-Sayed I H, Huang X H, El-Sayed M A. Surface plasmon resonance scattering and absorption of anti-EGFR antibody conjugated gold nanoparticles in cancer diagnostics: applications in oral cancer [J]. *Nano Letters*, 2005, 5(5): 829-834.
- [9] Zhou W, Dridi M, Suh J Y, et al. Lasing action in strongly coupled plasmonic nanocavity arrays [J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(7): 506-511.
- [10] Xu Q, Liu F, Meng W S, et al. Plasmonic core-shell metal-organic nanoparticles enhanced dye-sensitized solar cells[J]. *Optics Express*, 2012, 20(S6): A898-A907.
- [11] Tsakmakidis K L, Boyd R W, Yablonovitch E, et al. Large spontaneous-emission enhancements in metallic nanostructures: towards LEDs faster than lasers [Invited] [J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 17916-17927.
- [12] Wei D, Chen S, Liu Q. Review of fluorescence suppression techniques in Raman spectroscopy [J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2015, 50(5): 387-406.
- [13] Willets K A, van Duyne R P. Localized surface plasmon resonance spectroscopy and sensing [J]. *Annual Review of Physical Chemistry*, 2007, 58(1): 267-297.
- [14] Ming T, Zhao L, Yang Z, et al. Strong polarization dependence of plasmon-enhanced fluorescence on single gold nanorods[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(11): 3896-3903.
- [15] Akselrod G M, Argyropoulos C, Hoang T B, et al. Probing the mechanisms of large Purcell enhancement in plasmonic nanoantennas[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(11): 835-840.
- [16] Zhou W, Odom T W. Tunable subradiant lattice plasmons by out-of-plane dipolar interactions[J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(7): 423-427.
- [17] Kravets V G, Schedin F, Grigorenko A N. Extremely narrow plasmon resonances based on diffraction coupling of localized plasmons in arrays of metallic nanoparticles [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(8): 087403.

- [18] Tang C J, Zhan P, Cao Z S, et al. Magnetic field enhancement at optical frequencies through diffraction coupling of magnetic plasmon resonances in metamaterials[J]. *Physical Review B*, 2011, 83(4): 041402.
- [19] Alae R, Albooyeh M, Yazdi M, et al. Magnetolectric coupling in nonidentical plasmonic nanoparticles: theory and applications[J]. *Physical Review B*, 2015, 91(11): 115119.
- [20] Ren Y. Research on the fabrication, mode properties and fluorescence emission mediation of metal-dielectric-metal composite metasurface [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018:34-50.
任远. 金属-介质-金属复合超表面的制备、模式特性及其荧光辐射调控研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018:34-50.
- [21] Palik E D. Handbook of optical constants of solids [M]. New York: Academic Press, 1985:350-357.
- [22] Liu S, Vaskin A, Campione S, et al. Huygens' metasurfaces enabled by magnetic dipole resonance tuning in split dielectric nanoresonators [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(7): 4297-4303.
- [23] Bharadwaj P, Novotny L. Spectral dependence of single molecule fluorescence enhancement[J]. *Optics Express*, 2007, 15(21): 14266-14274.
- [24] Magde D, Wong R, Seybold P G. Fluorescence quantum yields and their relation to lifetimes of rhodamine 6G and fluorescein in nine solvents: improved absolute standards for quantum yields[J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2007, 75(4): 327-334.
- [25] Ford G W, Weber W H. Electromagnetic interactions of molecules with metal surfaces[J]. *Physics Reports*, 1984, 113(4): 195-287.
- [26] Kinkhabwala A, Yu Z F, Fan S H, et al. Large single-molecule fluorescence enhancements produced by a bowtie nanoantenna[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(11): 654-657.
- [27] Bauch M, Toma K, Toma M, et al. Plasmon-enhanced fluorescence biosensors: a review[J]. *Plasmonics*, 2014, 9(4): 781-799.
- [28] Rose A, Hoang T B, McGuire F, et al. Control of radiative processes using tunable plasmonic nanopatch antennas[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(8): 4797-4802.