

# 硅纳米十字架二聚体的单向性散射特性研究

张明\*, 吕靖薇, 杨琳, 许文静, 王建鑫, 刘超, 牟海维

东北石油大学电子科学学院, 黑龙江 大庆 163318

**摘要** 以硅十字架二聚体纳米天线为研究对象, 采用有限元法(FEM)系统研究其远场单向散射特性, 利用多极分解的方法对其散射特性进行解释。通过分析纳米天线中不同共振模式的响应对散射特性的影响, 发现这些共振模式的耦合作用导致了高介电材料硅十字架二聚体结构磁热点的产生和远场单向性散射, 为实现远场单向性可控的纳米天线提供了坚实的理论基础。

**关键词** 材料; 纳米天线; 散射特性; 磁热点; 单向散射

**中图分类号** O433.4

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP56.081601

## Unidirectional Scattering Properties of Silicon Nanocross Dimer

Zhang Ming\*, Lü Jingwei, Yang Lin, Xu Wenjing, Wang Jianxin, Liu Chao, Mou Haiwei

College of Electronics Science, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China

**Abstract** The far-field unidirectional scattering properties of silicon nanocross dimers are investigated systematically by the finite element method. The multipole decomposition method is used to explain the scattering properties of nanocross dimers. By the analysis of the effects of different resonance modes on the scattering properties of nanoantennas, it is found that the coupling of these resonance modes of silicon nanocross dimers leads to the formation of magnetic hotspots and the far-field unidirectional scattering. The adjustable optical properties of nanocross dimers may provide a solid theoretical foundation for achieving far-field unidirectional controllable nanoantennas.

**Key words** materials; nanoantennas; scattering properties; magnetic hotspots; unidirectional scattering

**OCIS codes** 160.4236; 290.2558; 350.5400

## 1 引言

近年来, 光和纳米尺度物质的相互作用在基础理论和实验方面的研究都得到了迅速发展, 随着纳米光学的不断成熟, 纳米科学已成为一种新的利用纳米量级物质的技术<sup>[1-6]</sup>。而光学纳米天线可以超过衍射极限, 在纳米量级控制光场。纳米天线是一种可将近场局域光场和远场辐射光场进行高效自由转换的纳米尺度装置, 能够实现集成光学器件上光子信息的传输, 因此纳米光学天线在太阳能电池<sup>[7]</sup>、量子信息技术<sup>[8]</sup>、光学<sup>[9]</sup>和生物感测<sup>[10-11]</sup>等领域有

广泛的应用, 拥有良好远场特性的纳米光学天线的设计具有非常重要的研究价值。纳米光学天线是金属纳米结构中一个重要的研究方向, 然而由于金属材料在可见光区域存在高损耗, 只有很少一部分基于局域表面等离激元的应用在实际中被实现<sup>[12-15]</sup>。同金属纳米材料相比, 高折射率电介质纳米颗粒在可见光区域的损耗非常小, 且能够产生金属材料所不具备的电磁类型光学共振, 故对高介电纳米天线散射特性的研究受到广泛关注<sup>[16]</sup>。

Kerker 等<sup>[17]</sup>通过研究磁性纳米材料的光散射效应, 发现纳米颗粒所支持的电磁模式能够控制光

**收稿日期:** 2018-09-29; **修回日期:** 2018-10-24; **录用日期:** 2018-11-22

**基金项目:** 东北石油大学青年自然科学基金(NEPUQN2014-05)、国家自然科学基金(51474069, 41472126)、中国博士后基金(2016M59150)、黑龙江省自然科学基金(E2016007, E2017010)、东北石油大学研究生创新科研项目(YJSCX2017-034NEPU)

\* **E-mail:** 525882916@qq.com

散射方向。在光与物质的相互作用中,由于磁偶极子跃迁和电偶极子跃迁相比有几个数量级的差别,因此磁场效应常常被忽略。然而光学磁共振特性在光处理中起着越来越重要的作用,通过构建合理结构可实现纳米材料在可见、近红外以及微波波段的零背向散射<sup>[18-21]</sup>。另外,增强磁偶极子发射在纳米激光器、荧光增强和传感器等领域有着广阔的应用前景。Crozier 等<sup>[22]</sup>从实验和仿真两方面研究了棒状、圆盘状、三角形等不同形状、不同结构、不同材料的光学纳米天线在中红外波段的局域场增强特性。研究发现,场增强最明显的是棒状纳米光学天线,并且由于其非对称的形状特性,棒状纳米天线的光学特性不同于其他的光学纳米天线。将该棒状结构复合十字架二聚体纳米结构应用于增强磁偶极子发射具有很好的创新性<sup>[23]</sup>。

本文以硅十字架二聚体纳米天线为研究对象,利用有限元(FEM)数值方法系统地研究该纳米天线的远场单向性散射特性,结合多极分解方法对散射光谱能量模式的变化进行理论分析,并考察纳米二聚体能量模式的近场和远场分布特征,得到抑制背向散射和增强的前向散射,为设计和调控纳米天线的光学性质提供了更灵活的方案。

## 2 计算方法与理论模型

纳米天线工作在可见光和近红外波段,支持局域表面等离子体共振特性。为了深入分析光学纳米天线的特性,不同的光学共振模式可以感应出与其相对应的电流分布、电荷分布和远场分布,因此,光学模式可以利用多极矩描述。直角坐标系下的多极子展开可由矢量势的泰勒展开得到,即

$$\mathbf{p} = \int P(\mathbf{r}') d\mathbf{r}', \quad (1)$$

$$\mathbf{m} = -\frac{i\omega}{2} \int [\mathbf{r}' \times P(\mathbf{r}')] d\mathbf{r}', \quad (2)$$

$$\mathbf{T} = \frac{i\omega}{10} \int \{2\mathbf{r}'^2 P(\mathbf{r}') - [\mathbf{r}' \cdot P(\mathbf{r}')] \mathbf{r}'\} d\mathbf{r}', \quad (3)$$

$$\mathbf{Q}^e = 3 \int [\mathbf{r}' P(\mathbf{r}') + P(\mathbf{r}') \mathbf{r}'] d\mathbf{r}', \quad (4)$$

$$\mathbf{Q}^m = -\frac{2i\omega}{3} \int [\mathbf{r}' \times P(\mathbf{r}')] \mathbf{r}' d\mathbf{r}', \quad (5)$$

式中: $P(\mathbf{r}')$ 为入射光波在散射中产生的偏振; $\mathbf{r}'$ 为散射介质内体积元的半径矢量; $\omega$ 为角频率,单位是 rad/s。(1)~(5)式分别给出了电偶极矩 ED( $\mathbf{p}$ ),电四极矩 EQ( $\mathbf{Q}^e$ ),磁偶极矩 MD( $\mathbf{m}$ ),磁四极矩 MQ( $\mathbf{Q}^m$ )和旋磁偶极矩 TD( $\mathbf{T}$ )的公式<sup>[24]</sup>。与

(1)~(5)式相对应的多极矩辐射能量贡献总和为

$$I = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \left[ \frac{2\omega^4}{3c^3} |\mathbf{p}|^2 + \frac{2\omega^4}{3c^3} |\mathbf{m}|^2 + \frac{4\omega^5}{3c^4} \text{Im}(\mathbf{p} \cdot \mathbf{T}^*) + \frac{2\omega^6}{3c^5} |\mathbf{T}|^2 + \frac{\omega^6}{20c^5} |\mathbf{Q}^e|^2 + \frac{\omega^6}{20c^5} |\mathbf{Q}^m|^2 \right], \quad (6)$$

式中: $\epsilon_0$ 为真空中的介电常数,值为  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m; $c$ 为真空的光速,值为  $2.998 \times 10^8$  m/s。散射截面  $C_{\text{sca}}$  可以用辐射能量  $I$  和入射光波的能量  $I_{\text{inc}}$  的比值表示,其表达式为

$$C_{\text{sca}} = \frac{I}{I_{\text{inc}}}. \quad (7)$$

在分析光学纳米天线的散射特性时,光学共振模式是不可或缺的物理量。通过计算模型的光散射问题,即可以表征该模型对应纳米天线的表面等离子体共振特性。对于形状不规则的纳米天线的光学特性,则需要借助于数值仿真工具,采用基于有限元方法的 Comsol Multiphysics 软件预先定义需求的物理参量,然后对纳米天线系统建立模型并对系统进行数值求解,计算完成后即可得到所需要的物理参数,从而得到纳米天线的散射特性随几何尺寸及材料属性的变化规律。图 1 所示为硅十字架二聚体的结构示意图。对称光学纳米天线结构是由高介电材料硅十字架结构相对称的形式构成,纳米天线的长方体长度、宽度和高度的范围均为  $60 \sim 200$  nm,两个纳米十字架之间的间距为  $d = 5$  nm。其中一个纳米长方体的长度( $L_1$ )、宽度( $W_1$ )和高度( $H$ )分别为  $L_1 = 200$  nm、 $W_1 = 90$  nm、 $H = 90$  nm;另一个与其垂直的纳米长方体长度( $L_2$ )、宽度( $W_2$ )和高度( $H$ )分别为  $L_2 = 150$  nm、 $W_2 = 60$  nm、 $H = 90$  nm。在计算中,纳米天线的入射光为平面波,波矢平行于  $x$  轴方向,偏振平行于  $y$  轴方向。硅十字架二聚体材料的介电性质的相关数据引自 Palik 手册<sup>[25]</sup>,此结构放置在真空中( $\epsilon_d = 1$ )。

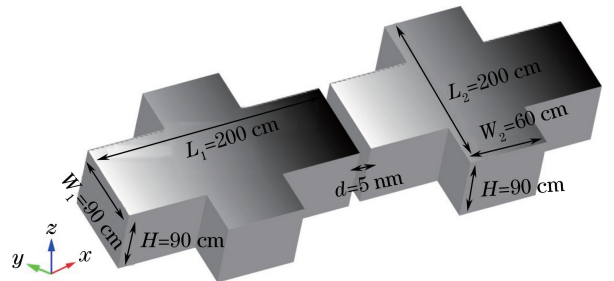


图 1 硅十字架二聚体的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of silicon nanocross dimer

### 3 结果与讨论

目前已有大量文献结果表明,通过对设计的高介电纳米天线的光学共振模式进行多极子展开(包含电偶极和磁偶极共振模式)可以实现多波长共振的单向散射特性<sup>[26-27]</sup>。除了ED、MD之外,更高阶的共振模式(包括TD)对高介电纳米天线的远场能量的调控也起到至关重要的作用。利用(1)~(5)式的多极矩辐射能量贡献可以将整体 $C_{\text{sca}}$ 中各阶模式的贡献分解出来,ED、EQ、MD、MQ和TD的散射截面可由多极矩辐射能量贡献与入射光波的能量 $I_{\text{inc}}$ 的比值来表示,总散射曲线(黄色实线)可由上述(7)式计算求得。多极子展开中各阶模式的贡献可以很好地诠释纳米天线的散射特性,如图2所示画出了硅十字架二聚体多极矩的散射截面图。从图中可以看出,总散射曲线有4个等离子体共振峰,波峰的位置分别为405,484,667,789 nm。这些等离子体共振峰是由硅十字架二聚体所支持的不同共振模式引起的,通过对不同共振模式进行多极子展开分解,描述了ED、EQ、MD、MQ和TD模式在散射效率谱线上的贡献。波长为405 nm处的共振峰是由MD、MQ和ED耦合作用的结果;波长484 nm处的共振峰是MD和MQ共同作用的结果;而波长667 nm和789 nm处的共振峰是MD作用的结果。EQ只有一个谱线宽度比较窄的位于405 nm的等离子体共振峰。TD散射效率比其他模式小很多倍,几乎可以忽略,即对散射截面的贡献很小。总散射曲线的共振峰是由MD占主导作用,硅十字架二聚体纳米天线的散射特性可应用在光处理中<sup>[28]</sup>。

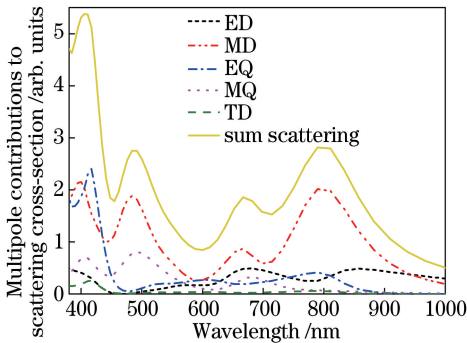


图2 硅十字架二聚体的多极模式对散射效率的贡献谱  
Fig. 2 Normalized multipole contributions to scattering cross-section of silicon nanocross dimer

图3所示为硅十字架二聚体的前向散射和前向散射/背向散射的散射光谱。纳米天线的前向散射

截面 $\sigma_{\text{FS}}$ 和背向散射截面 $\sigma_{\text{BS}}$ 定义为<sup>[29]</sup>

$$\sigma_{\text{FS}} = \int_{z>0} \mathbf{S}_{\text{scat}} \cdot \mathbf{n} dA / I_{\text{inc}}, \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{BS}} = \int_{z<0} \mathbf{S}_{\text{scat}} \cdot \mathbf{n} dA / I_{\text{inc}}, \quad (9)$$

式中: $\mathbf{n}$ 为单位外法向量; $I_{\text{inc}}$ 为入射场辐照度; $A$ 为单位目标面积的横截面;且 $\mathbf{S}_{\text{scat}}$ 定义为散射场的坡印廷矢量( $\text{W}/\text{m}^2$ )。

由图3可知,前向散射呈现出的3个等离子体共振峰与前向散射/背向散射的比值( $\sigma_{\text{FS}}/\sigma_{\text{BS}}$ )呈现出的3个极大值位置不重合。 $\sigma_{\text{FS}}/\sigma_{\text{BS,max}}$ 波峰的峰位分别为434,612,857 nm。在波长为857 nm处,它的最大值约等于10,代表在此波峰处前向散射的能量远远大于背向散射的能量。该结果表明硅十字架二聚体具有相对较好的方向性。

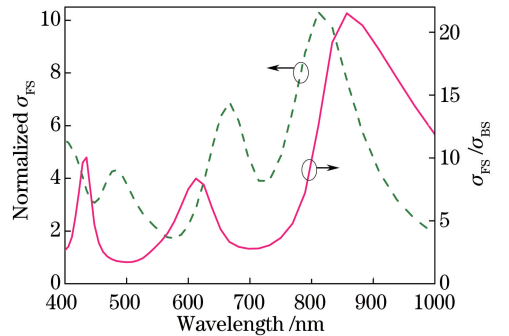


图3 硅十字架二聚体的前向散射和前向散射/背向散射的散射光谱

Fig. 3 Forward scattering and forward/backward ratio spectra for silicon nanocross dimer

为了阐明硅十字架二聚体的结构尺寸对前向散射/背向散射光谱的影响,研究了改变不同高度 $H$ 、不同宽度 $W_1$ 情况下光谱的变化规律。从图4(a)中可知,当硅十字架二聚体的高度 $H$ 从90 nm增大到150 nm时,3个等离子体共振峰峰位向长波长方向移动。并且,FS/BS强度最大值逐渐减小,这表明硅十字架二聚体的高度 $H=90$  nm时满足高定向散射特性。图4(b)中可以看出, $\sigma_{\text{FS}}/\sigma_{\text{BS}}$ 强度最大值随宽度 $W_1$ 的增大逐渐变小,且多极共振峰发生一定程度的红移。可以得出当硅十字架二聚体的高度 $H=90$  nm,宽度 $W_1=90$  nm时 $\sigma_{\text{FS}}/\sigma_{\text{BS}}$ 强度最大值达到最大,满足高定向散射特性。因此,改变结构的尺寸能够实现等离子体共振位置的移动,进一步说明了等离子体共振的可调谐性。

为研究硅十字架二聚体纳米天线的表面等离子体耦合作用的影响,二聚体结构的电场增强轮廓如

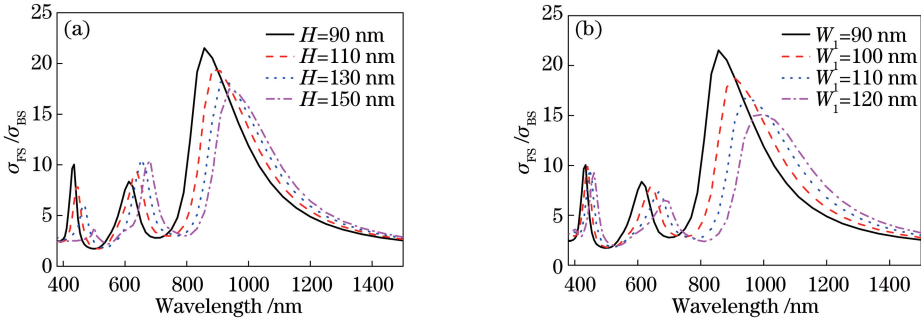


图 4 硅十字架二聚体的前向散射/背向散射的散射光谱。(a)不同高度;(b)不同宽度

Fig. 4 Forward/backward ratio scattering spectra for silicon nanocross dimer.

(a) Under different heights; (b) under different widths

图 5 所示,对应的共振波长  $\lambda$  分别为 405, 484, 667, 789 nm。从电场增强轮廓图中可以看出强烈的电场  $E_{\text{scat}}$  主要集中在纳米二聚体的中间间隙部分和纳米十字架的各个拐点处,且表面的电流密度分布呈现出环形的极化密度。当波长为 405 nm 时,电场主要分布在硅十字架二聚体结构的各个拐点处,其他部分的电场强度较弱。这种现象的产生主要是由

于表面等离子体的热点(高近场强度区域)被“推”到纳米天线的拐点,从而导致拐点处的场强增强<sup>[30]</sup>。在当波长为 484 nm 和 667 nm 时,硅十字架二聚体的中间间隙部分电场强度最强,各个拐点处的电场强度较强,源自于硅十字架二聚体结构等离子体的耦合作用。当波长为 789 nm 时,其中一个硅十字架结构的电场强度比另一个十字架结构的电场强度高。

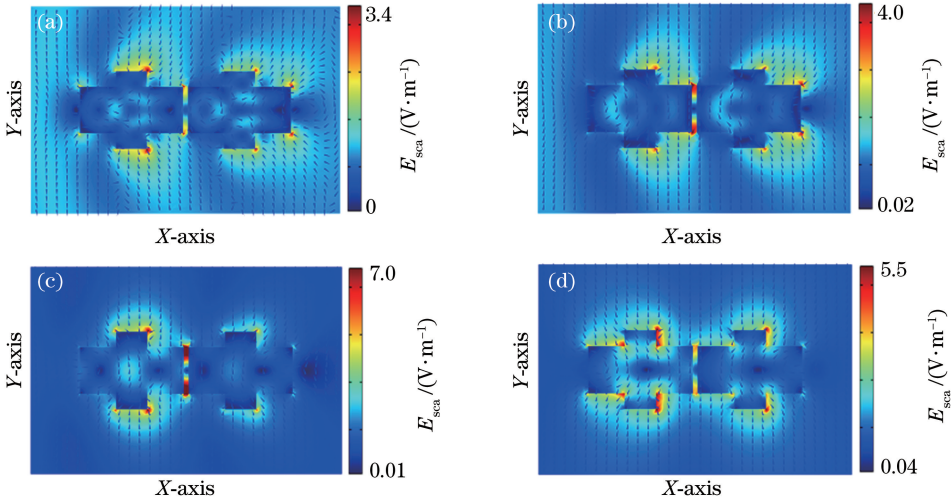


图 5 硅十字架二聚体的电场增强轮廓图。(a)  $\lambda=405$  nm;(b)  $\lambda=484$  nm;(c)  $\lambda=667$  nm;(d)  $\lambda=789$  nm

Fig. 5 Electric field enhancement profiles of silicon nanocross dimer. (a)  $\lambda=405$  nm; (b)  $\lambda=484$  nm;

(c)  $\lambda=667$  nm; (d)  $\lambda=789$  nm

图 6 给出 4 个共振峰峰位在 XOY 平面的磁场强度  $H_{\text{scat}}$  分布。这 4 个不同波长下的磁热点是不同的,当波长为 405 nm 时,纳米二聚体被切割为 8 个磁热点,在波长为 484 nm 和 789 nm 时只有两个磁热点,可明显看出在中心位置处有很强的磁场分布,这是由沿  $z$  轴方向的 MD 造成的。而当波长为 667 nm 时,纳米二聚体有 4 个磁热点且均匀地分布在其中两个横向的纳米长方体上。产生多个磁热点的原因是纳米天线的磁场分布不仅仅由 MD 主导,

而是由 MD 和其他模式共同相互耦合作用所导致的。高介电材料硅十字架二聚体纳米光学天线结构可以同时支持电、磁共振模式(MD、MQ、ED、EQ、TD),这些模式的耦合作用导致多个磁热点的产生。由于电介质材料本身的非辐射损耗很低,因此纳米二聚体在强磁热点的产生上具有重要应用价值<sup>[31]</sup>。

图 7 给出硅十字架二聚体纳米天线的电荷分布图。当波长为 405 nm 时,十字架二聚体纳米天线电荷分布表现为单个硅十字架结构四极共振模式的

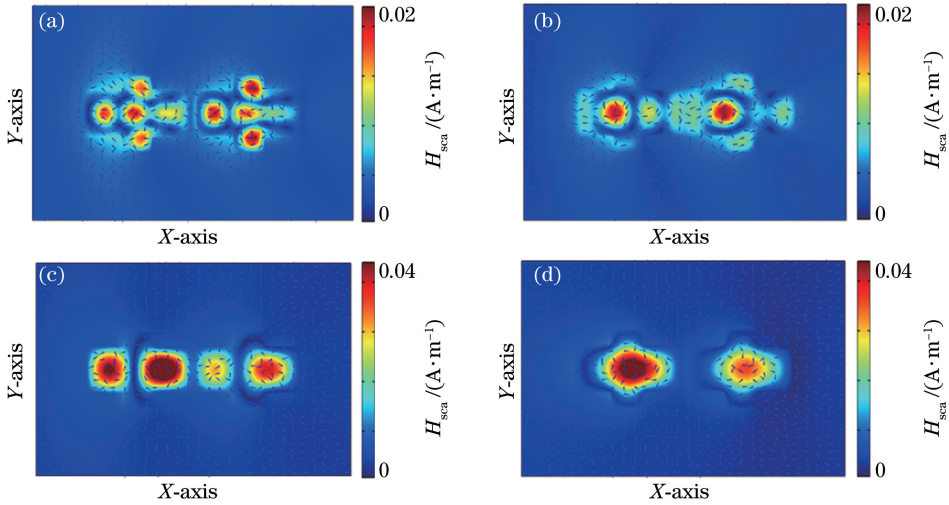


图 6 硅十字架二聚体的磁场增强轮廓图。(a)  $\lambda=405\text{ nm}$ ; (b)  $\lambda=484\text{ nm}$ ; (c)  $\lambda=667\text{ nm}$ ; (d)  $\lambda=789\text{ nm}$   
 Fig. 6 Magnetic field enhancement profiles of silicon nanocross dimer. (a)  $\lambda=405\text{ nm}$ ; (b)  $\lambda=484\text{ nm}$ ; (c)  $\lambda=667\text{ nm}$ ; (d)  $\lambda=789\text{ nm}$

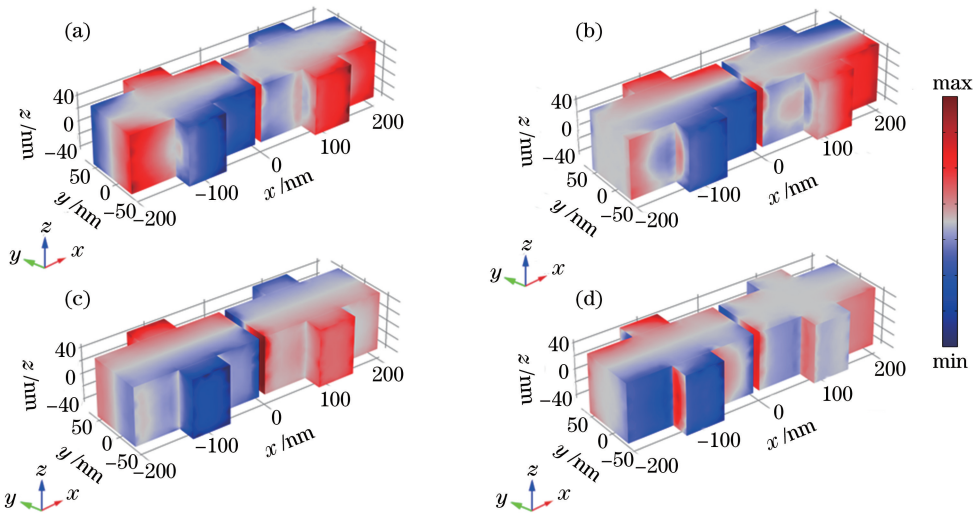


图 7 硅十字架二聚体的电荷分布图。(a)  $\lambda=405\text{ nm}$ ; (b)  $\lambda=484\text{ nm}$ ; (c)  $\lambda=667\text{ nm}$ ; (d)  $\lambda=789\text{ nm}$   
 Fig. 7 Surface charge distributions corresponding to silicon nanocross dimer. (a)  $\lambda=405\text{ nm}$ ; (b)  $\lambda=484\text{ nm}$ ; (c)  $\lambda=667\text{ nm}$ ; (d)  $\lambda=789\text{ nm}$

反对称和对称耦合之间的相互作用<sup>[32]</sup>。当波长为 484, 667, 789 nm 时, 纳米天线的电荷分布主要表现为偶极共振模式的反对称和对称耦合之间的相互作用, 通过电荷分布图验证了图 2 多极子展开的贡献。当波长为 789 nm 时, 纳米天线的电荷分布主要集中在其中一个硅十字架上, 表现为偶极共振模式, 此波长下的电荷分布与硅十字架二聚体的电场增强轮廓图的强度分布一一对应。

为了研究纳米天线二聚体单向性的优势, 给出了硅十字架二聚体纳米天线在不同  $\sigma_{FS}/\sigma_{BS}$  共振波长下的二维和三维远场分布图, 如图 8 所示。可以看出, 当波长为 434, 612, 857 nm 时, 不同的

能量模式表现出了方向性, 前向散射占主导地位, 背向散射被抑制。由此表明这个高介电纳米天线在不同波长位置处, 远场的能量大部分向 +x 方向辐射。在波长 857 nm 处, 远场能量基本向前辐射, 背向远场辐射能量基本为零。故硅十字架二聚体结构光学纳米天线具有单向性。硅十字架二聚体光学纳米天线可在波长 857 nm 处实现单向前向散射, 背向远场辐射能量基本为零, 即可实现在远场单向性散射。另外, 远场单向性散射可以由纳米天线的多极模式干涉所解释<sup>[33-34]</sup>。硅十字架二聚体高度可调节的光学特性为纳米天线设计提供了坚实的理论基础。

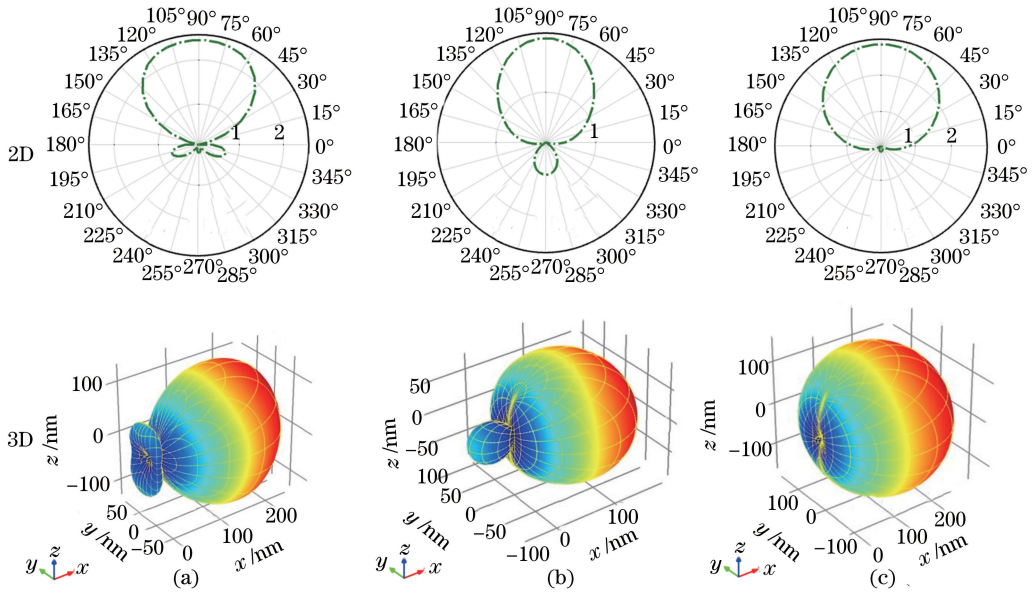


图8 硅十字架二聚体的二维、三维远场分布图。(a)  $\lambda=434\text{ nm}$ ;(b)  $\lambda=612\text{ nm}$ ;(c)  $\lambda=857\text{ nm}$

Fig. 8 2D and 3D far-field distributions corresponding to silicon nanocross dimer.

(a)  $\lambda=434\text{ nm}$ ; (b)  $\lambda=612\text{ nm}$ ; (c)  $\lambda=857\text{ nm}$

## 4 结 论

采用有限元方法系统研究了硅十字架二聚体纳米天线的散射特性,考察了纳米天线共振能量模式对其近场、远场分布的影响及其变化规律。研究结果表明:高介电材料硅十字架二聚体纳米光学天线结构可以同时支持电、磁共振模式(MD、MQ、ED、EQ、TD),这些模式的耦合作用导致多个磁热点的产生;硅十字架二聚体纳米天线可在不同波长位置处实现单向前向散射,后向远场辐射能量基本为零,即可实现在不同工作波长下的远场单向性散射。

## 参 考 文 献

- [1] Curto A G, Volpe G, Taminiu T H, *et al.* Unidirectional emission of a quantum dot coupled to a nanoantenna[J]. *Science*, 2010, 329(5994): 930-933.
- [2] Alisafae H, Fiddy M A. Nanoantennas for nanowire photovoltaics[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(11): 113107.
- [3] Stewart M E, Anderton C R, Thompson L B, *et al.* Nanostructured plasmonic sensors[J]. *Chemical Reviews*, 2008, 108(2): 494-521.
- [4] Li J X. Manipulation of the characteristics of light based on artificial microstructures[D]. Tianjin: Nankai University, 2016.  
李健雄. 人工微结构光场特性操控研究[D]. 天津: 南开大学, 2016.
- [5] Cui J, Ji B Y, Lin J Q. Plasmonic fano resonance in metallic disk-like nanostructure system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 060002.  
崔健, 季博宇, 林景全. 激发等离激元 Fano 共振的金属类圆盘纳米结构体系[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 060002.
- [6] Ma G H, Yu H, Liu Y Q, *et al.* Resonance radiation enhancement of metal nanometer surface plasmons[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 042601.  
马光辉, 于贺, 刘宇乾, 等. 金属纳米表面等离激元的共振辐射增强研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 042601.
- [7] Jahani S, Jacob Z. All-dielectric metamaterials[J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, 11(1): 23-36.
- [8] Alaeian H, Dionne J A. Controlling electric, magnetic, and chiral Dipolar emission with PT-symmetric potentials[J]. *Physical Review B*, 2015, 91(24): 245108.
- [9] Boudarham G, Abdeddaim R, Bonod N. Enhancing the magnetic field intensity with a dielectric gap antenna[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(2): 021117.
- [10] Manjavacas A. Anisotropic optical response of nanostructures with balanced gain and loss[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(7): 1301-1307.
- [11] Chen Y, Wang L W, Song J. Multifunctional

- nanophotonics technology for precise biomedical applications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0307003.
- 陈越, 王璐玮, 宋军. 面向精准化生物医学的多功能纳米光子学技术[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0307003.
- [12] Wu D J, Wu X W, Cheng Y, *et al.* Dual-frequency plasmon lasing modes in active three-layered bimetallic Ag/Au nanoshells [J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(19): 191909.
- [13] Li J Q, Verellen N, Vercruyssen D, *et al.* All-dielectric antenna wavelength router with bidirectional scattering of visible light[J]. Nano Letters, 2016, 16(7): 4396-4403.
- [14] Qin F F, Liu Z Z, Zhang Z, *et al.* Broadband full-color multichannel hologram with geometric metasurface [J]. Optics Express, 2018, 26(9): 11577-11586.
- [15] Guo Q B, Liu X F, Qiu J R. Research progress of ultrafast nonlinear optics and applications of nanostructures with localized plasmon resonance[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0703005.  
郭强兵, 刘小峰, 邱建荣. 局域表面等离子体纳米结构的超快非线性光学及其应用研究进展[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0703005.
- [16] Alù A, Engheta N. Wireless at the nanoscale: Optical interconnects using matched nanoantennas [J]. Physical Review Letters, 2010, 104(21): 213902.
- [17] Kerker M, Wang D S, Chew H. Surface enhanced Raman scattering (SERS) by molecules adsorbed at spherical particles: Errata[J]. Applied Optics, 1980, 19(24): 4159-4174.
- [18] Li Y, Xu K, Ding P, *et al.* Zero-backward scattering by Metallo-Dielectric core-shell nanostructures [J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2017, 47(8): 084208.  
李艳, 许坤, 丁佩, 等. 金属-电介质纳米核壳结构的零背向散射特性[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2017, 47(8): 084208.
- [19] Liu W, Miroshnichenko A E, Neshev D N, *et al.* Broadband unidirectional scattering by magneto-electric core-shell nanoparticles [J]. ACS Nano, 2012, 6(6): 5489-5497.
- [20] Naraghi R R, Sukhov S, Dogariu A. Directional control of scattering by all-dielectric core-shell spheres[J]. Optics Letters, 2015, 40(4): 585-588.
- [21] Person S, Jain M, Lapin Z, *et al.* Demonstration of zero optical backscattering from single nanoparticles [J]. Nano Letters, 2013, 13(4): 1806-1809.
- [22] Crozier K B, Sundaramurthy A, Kino G S, *et al.* Optical antennas: Resonators for local field enhancement[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94(7): 4632-4642.
- [23] Yang Z J. Fano interference of electromagnetic modes in subwavelength dielectric nanocrosses [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2016, 120(38): 21843-21849.
- [24] Evlyukhin A B, Fischer T, Reinhardt C, *et al.* Optical theorem and multipole scattering of light by arbitrarily shaped nanoparticles[J]. Physical Review B, 2016, 94(20): 205434.
- [25] Palik E D. Handbook of optical constants of solids [M]. New York: Academic Press, 1985: 286-295.
- [26] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and scattering of light by small particles[M]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 1998.
- [27] Garcia-Etxarri A, Gómez-Medina R, Froufe-Pérez L S, *et al.* Strong magnetic response of submicron silicon particles in the infrared[J]. Optics Express, 2011, 19(6): 4815-4826.
- [28] Chen Y H, Liu G Q, Huang K, *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.
- [29] Jain P K, Huang W, El-Sayed M A. On the universal scaling behavior of the distance decay of plasmon coupling in metal nanoparticle pairs: A plasmon ruler equation [J]. Nano Letters, 2007, 7(7): 2080-2088.
- [30] Maurer T, Nicolas R, Lévêque G, *et al.* Enhancing LSPR sensitivity of Au gratings through graphene coupling to Au film [J]. Plasmonics, 2014, 9(3): 507-512.
- [31] Nazir A, Panaro S, Proietti Zaccaria R, *et al.* Fano coil-type resonance for magnetic hot-spot generation [J]. Nano Letters, 2014, 14(6): 3166-3171.
- [32] Das P, Lourenço-Martins H, Tizei L H G, *et al.* Nanocross: A highly tunable plasmonic system [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2017, 121(30): 16521-16527.
- [33] Lü J, Mu H W, Liu Q, *et al.* Multi-wavelength

unidirectional forward scattering in the visible range in an all-dielectric silicon hollow nanodisk [J]. Applied Optics, 2018, 57(17): 4771-4776.

[34] Chen Y. Designs and applications of bowtie aperture

optical antenna[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.

陈杨. 领结形纳米孔光学天线的设计及应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.