

双蝶形金属纳米光天线的远场特性研究

王冰 金杰 侯梓叶

天津大学电子信息工程学院, 天津 300072

摘要 为了提高对远场方向性调控的灵活性,提出双蝶形银纳米光天线,基于时域有限差分的方法研究了天线不同结构与尺寸的变化对远场方向性产生的影响。研究发现,由于局域表面等离激元的存在,偶极子源垂直放置于双蝶形银结构下表面一定距离时,远场方向图出现明显的旁瓣。天线长度的增加是方向图出现旁瓣的关键因素。天线臂之间夹缝的减小,使远场方向图中旁瓣增大,同时主瓣增益增大。天线厚度的增加使远场方向图出现旁瓣,主瓣增益先增大后减小。结果表明,双蝶形银纳米光天线能够改变与其相耦合的偶极子源的辐射方向性。

关键词 材料;金属纳米光天线;双蝶形银结构;时域有限差分;局域表面等离激元;远场方向性

中图分类号 O431.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.021601

Far-Field Characteristics of Double Butterfly-Shape Nano-Metallic Optical Antenna

Wang Bing Jin Jie Hou Ziye

School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract In order to improve the flexibility of the control to far-field directivity, the double butterfly-shap silver nanostructure optical antenna is put forward. The influence of the far-field directivity caused by different structures and sizes is researched based on finite difference time domain method. The research demonstrates that, because of the exist of localized surface plasmon, far-field pattern shows a significant side lobe when the dipole is placed beneath the structure vertically. The increase of length is the key factory to make the side lobe appears in the far-filed pattern. The decrease of the gap between antenna arms can make the side lobe and the main lobe gain increase in the far-field pattern. The increase in antenna thickness causes a side lobe in the far-field pattern and the main lobe gain first increases then decreases. The results show that double butterfly-shap silver nano optical antenna can change the radiation directivity of the coupling dipole source.

Key words materials; nano-metallic optical antenna; double butterfly-shap silver structure; finite difference time domain; localized surface plasmon; far-field directivity

OCIS codes 160.3900; 160.4760; 240.6680; 250.5403

1 引言

金属纳米光学天线是一种可以将光波高效耦合到亚波长尺度的金属纳米光子器件,它利用金属纳米粒子的局域表面等离激元(LSPs)共振这一独特的光学性质实现了传播场与局域场的相互转换^[1]。当光波与金属纳米粒子耦合时,其粒子中的自由电子会发生集体振荡,当电子的振荡频率与入射光波的频率一致时就会产生LSPs共振,共振时能量被束缚在金属表面附近,不仅实现了传播场与局域场的相互转换,而且激发出更强的局域电场^[2-4]。基于LSPs的金属纳米光天线对电磁场具有场约束、场增强以及重定向等作用,这些作用使金属纳米光学天线在众多领域颇受青睐,如太阳能利用、生物化学检测器、高分辨率成像、癌症治疗等^[5]。不同结构的金属纳米光天线具有不同的光学性能。目前研究的金属纳米光学天线多为对称振子结构、球体、棒状及其所形成的阵列结构、圆盘结构等^[6-8],这些结构简单,可调节的参数很少,对远场方向性的调控不

收稿日期: 2014-07-23; 收到修改稿日期: 2014-09-02; 网络出版日期: 2015-01-09

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20090032110027)

作者简介: 王冰(1992—),女,硕士研究生,主要从事纳米金属光学天线方面的研究。E-mail: hdwangbing@163.com

导师简介: 金杰(1962—),女,教授,博士生导师,主要从事光通信器件与光纤通信等方面的研究。

E-mail: jinjie@tju.edu.cn(通信联系人)

够灵活。为了克服这个缺陷,本文在传统蝴蝶结形对称阵子^[6]的基础上提出了双蝶形银纳米光天线,与其他结构的金属纳米光天线相比,双蝶形银纳米天线可以通过调节天线臂夹缝大小得到双蝶形和正方形两种不同的结构,因为其可以调节的参数多并能变换出不同的结构,所以对远场方向性的调控更加灵活方便,提高了天线的灵敏度,增强了对光的吸收能力。另外,它制作方便,容易与背景材料硅实现集成。

采用时域有限差分(FDTD)的方法研究了天线与偶极子源距离、天线长度、相邻天线臂之间夹缝大小、天线厚度等多个参数的变化对远场方向性产生的影响。研究发现,不同的结构与尺寸可以使方向图产生不同大小的旁瓣及方向性增益。选择合适的结构与尺寸不仅可以得到明显的旁瓣,而且方向性增益得到明显增强。这对掌握光天线的特性以及在光器件中的应用具有重要的意义。

2 双蝶形银纳米光天线结构

2.1 结构模型

双蝶形银纳米结构模型的 xy 平面与 xz 平面如图1所示。 xy 平面上,四个天线臂由四个相同的三角形组成,天线臂长度 L 初始值设为80 nm,相邻天线臂之间夹缝的角度 θ 初始值设为 30° ,天线厚度为 H 初始值设为20 nm。图中的箭头 S 为偶极子激励源,垂直放置在双蝶形银纳米光天线中心的正下方,距离 N 初始值设为40 nm。

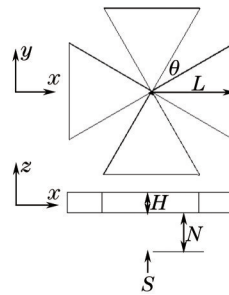


图1 双蝶形银纳米结构模型示意图

Fig.1 Sketch map of double butterfly-shap silver nanostructure model

金属在光波段表现为色散特性,其介电常数会随入射光频率的变化而变化。在Drude模型中,当电磁场入射到金属表面时,电子由于受到电场阻尼力的作用,其运动发生变化。电子的运动遵循牛顿运动定律,并且电子与原子核会发生碰撞。假设平均运动 γ 时间就会发生一次碰撞,则 γ 表示电子与原子核碰撞的几率。Drude模型可以得到某频率下金属的介电常数。选用银材料作为金属介质,为了更加准确地拟合银在可见光波段的介电常量,选择修正的Drude色散模型。

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \omega_p^2 / (\omega^2 + j\omega\gamma), \quad (1)$$

式中 ε_{∞} 为频率接近无穷大时的介电常数, ω_p 为等离激元的震荡频率, γ 为碰撞频率。根据光学手册上的数据^[9]进行曲线拟合计算,选择银在可见光频段的参数为 $\varepsilon_{\infty} = 5.887$, $\omega_p = 1.433 \times 10^{16}$ rad/s, $\gamma = 2.4871 \times 10^{13}$ Hz。

2.2 数值计算及分析方法

为了定量分析双蝶形银纳米光天线的远场方向性,通过计算角度方向性 $D(\varphi, \theta)$ 来表示远场分布对角度的依赖性,定义角度方向性 $D(\varphi, \theta)$ ^[10]为

$$D(\varphi, \theta) = 4\pi P(\varphi, \theta) / \int P(\varphi, \theta) d\Omega, \quad (2)$$

式中 $P(\varphi, \theta)$ 是系统辐射到远场的能量, φ 和 θ 分别是球坐标下的轴向角和极化角,积分球面的半径要求远大于一个入射光波长。

目前,主要用于电磁仿真的算法有矩量法、有限元法、频域有限差分法、离散偶极子近似法和时域有限差分法。其中,时域有限差分法是最早产生的,它直接将麦克斯韦旋度方程离散化,没有多余的误差来源,有较高的计算精度,并易于通过程序实现,具有广泛的通用性。另外,时域有限差分法还具有直接计算、节约存储空间及适合并行运算等优点。

采用时域有限差分算法来计算双蝶形银纳米光天线的远场辐射性^[11]。入射光波长 $\lambda = 600 \text{ nm}$, 整个仿真环境背景材料设置为硅(折射率3.5), 计算区域设置为 $2000 \text{ nm} \times 2000 \text{ nm} \times 2000 \text{ nm}$, 超出计算区域的部分, 采用完全匹配层(PML)来吸收外来波和避免非电磁反射^[12]。计算时将背景材料网格步长设置为 10 nm , 将银纳米结构的网格步长设为 1 nm 。为确保计算的精确性和稳定性, 并且尽可能降低对计算资源的消耗, 对模型中偶极子源与双蝶形银纳米光天线之间的区域进行局部网格加密, 加密后网格步长为 0.5 nm 。

3 仿真结果与分析

3.1 天线与偶极子源距离对远场方向性的影响

为了找到偶极源放置的最佳位置, 仿真环境的背景材料设为易于实现集成的材料Si, 入射光波长设为 $\lambda = 600 \text{ nm}$, 天线尺寸大小与入射光波长有关, 根据入射光波长, 设置天线模型尺寸如下: 天线臂长度 $L = 80 \text{ nm}$, 天线厚度 $H = 20 \text{ nm}$, 相邻天线臂之间的夹缝 $\theta = 30^\circ$, 天线与偶极子源的距离 N 从 10 nm 逐渐增加到 60 nm 。图2为不同距离的远场方向图。从图中可以看出, 远场方向图只在距离 $N = 40 \text{ nm}$ 处出现了明显的旁瓣, 距离太小或者太大都不能使方向图出现旁瓣。另外, 主瓣增益随着距离 N 的增加先变大后减小并在 $N = 40 \text{ nm}$ 时达到最大 3.4 dB 。

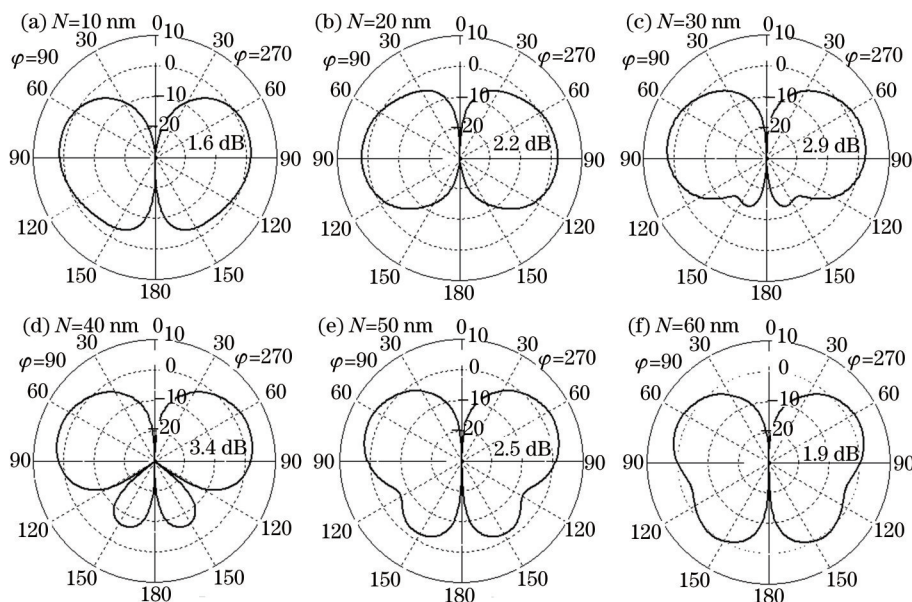


图2 不同距离的远场方向图

Fig.2 Far-field patterns of different distances

旁瓣的出现与金属纳米粒子的LSPs有关^[13]。LSPs的存在影响了双蝶形银纳米光天线表面的电流分布进而影响了其远场方向性, 使之更容易出现旁瓣, LSPs越强对远场方向性的影响也就越大。为了证明LSPs对远场方向性的影响, 保持模型的其他参数不变, 只将天线材料银换为不受LSPs影响的理想导体(PEC), 如图3所示。图3(b)中, 材料换为理想导体后并没有旁瓣出现, 主瓣增益也远远小于银材料的 3.4 dB 。这说明, 旁瓣的产生确实是由LSPs的作用引起的。

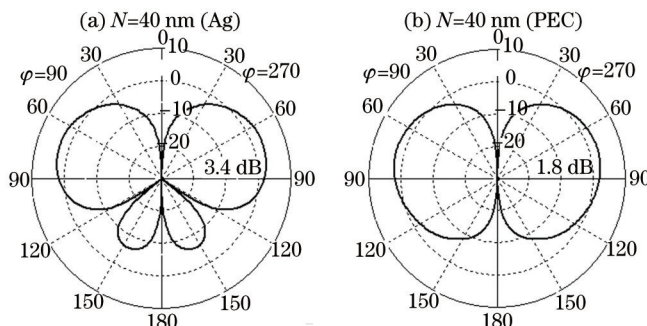


图3 银金属材料与PEC材料的对比

Fig.3 Silver material contrast with PEC material

经计算,银表面上产生的LSPs散射场在Si这种材料中的穿透深度恰好约为 $40\text{ nm}^{[14]}$ 。当偶极子源与双蝶形银纳米光天线的距离较小时,即 $N < 40\text{ nm}$ 时,距离小于LSPs散射场在Si中的穿透深度,LSPs与源的相互作用并未产生新的辐射模式,LSPs并没有对远场方向性产生影响。距离 $N = 40\text{ nm}$ 时,天线底部产生的LSPs与偶极子源相互耦合产生了局域场增强高阶的LSPs模式从而使主瓣的下方出现了旁瓣,同时主瓣增益增大到 3.4 dB 。而当距离大于 40 nm 时,天线产生的LSPs无法与偶极子源相互耦合,所以旁瓣渐渐变小消失,同时主瓣增益减小。

3.2 天线长度对远场方向性的影响

为了研究长度 L 变化对偶极子源辐射方向性的影响,设定仿真环境的背景材料为Si,入射光波长 $\lambda = 600\text{ nm}$,距离 $N = 40\text{ nm}$,厚度 $H = 20\text{ nm}$,相邻天线臂之间的夹缝 $\theta = 30^\circ$ 固定不变。长度 L 的变化范围从 50 nm 到 100 nm 。图4为不同长度所对应的远场方向图,从图中能够看出,随着 L 的增加,方向图中主瓣的下方渐渐出现了旁瓣,并且长度越长旁瓣越明显。另外,随着 L 的增加,主瓣增益也随之增大,由 $L = 50\text{ nm}$ 的 1.9 dB 增大到 $L = 100\text{ nm}$ 的 4.4 dB 。

出现这种现象的原因是,当 L 较小时,天线表面只存在较弱的零阶LSPs模式,随着 L 的增大,双蝶形银纳米天线下表的高阶LSPs模式被激发从而改变了远场方向性使之出现旁瓣,同时局域电场大大增强,主瓣增益增大。

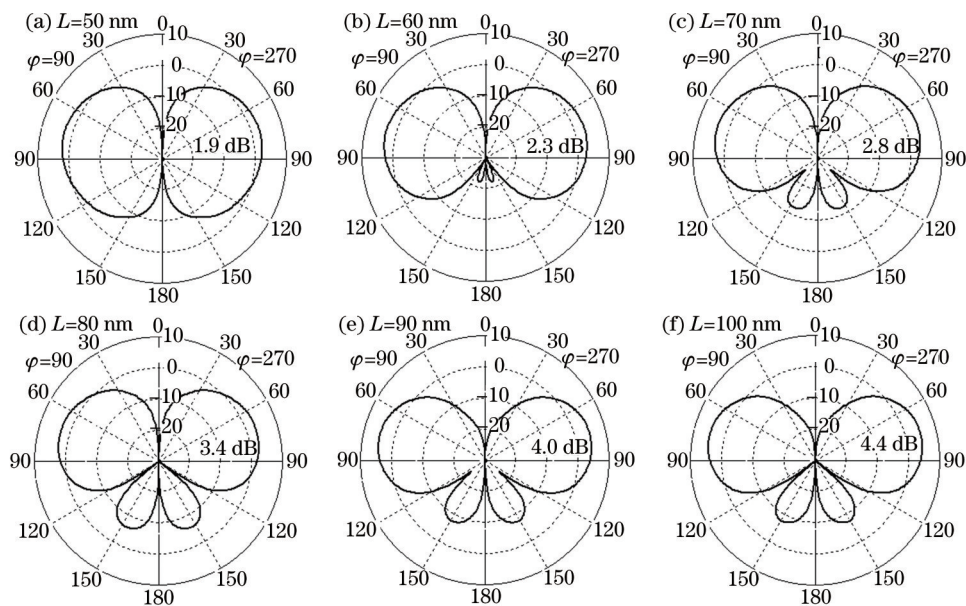


图4 不同长度的远场方向图

Fig.4 Far-field patterns of different lengths

3.3 相邻天线臂之间的夹缝对远场方向性的影响

设定其他参数固定不变, θ 从 80° 逐渐减小到 0° 。得到的远场方向图如图5所示。为了更具体更形象的研究夹缝大小对远场方向性的影响,提取了 $\theta = 80^\circ$ 、 $\theta = 60^\circ$ 及 $\theta = 0^\circ$ 的切向近场电场分布图,结果如图6所示。从近场电场分布图及远场方向图中得知, $\theta = 80^\circ$ 时,天线上下表面没有生成明显的局域场增强,方向图并未出现旁瓣,随着角度的减小, $\theta = 60^\circ$ 时,旁瓣渐渐出现并且越来越明显,同时主瓣增益增大并在 $\theta = 0^\circ$ 时达到最大,此时,天线上下表面都产生了较强的局域场增强,并在下表面形成了高阶LSPs模式。

$\theta = 80^\circ$ 时相邻天线臂之间的夹缝较大,偶极子源辐射出的电磁场从夹缝处传播出去导致入射到天线表面的能量大大减小,天线表面不能形成较强的LSPs,所以对远场方向图没有影响,主瓣增益也只有 2.2 dB 。 $\theta = 60^\circ$ 时,夹缝变小,天线表面积变大,天线表面得到的能量增加,天线上下表面形成LSPs并在下表面产生了局域场增强高阶LSPs模式,使方向图出现旁瓣,同时主瓣增益变大,增大至 3.0 dB 。随着角度继续减小,夹缝进一步变小,天线的表面积随之增大,天线表面得到的电磁场能量大大增加,下表面产生较强的局域场增强高阶LSPs模式,使方向图出现更加明显的旁瓣,主瓣增益也继续变大。当角度减小到 0° 时,天线表面积增大到最大,天线表面得到的电磁场能量也最大,因此方向图中出现最大的旁瓣,主瓣增益也达到最大 4.0 dB 。

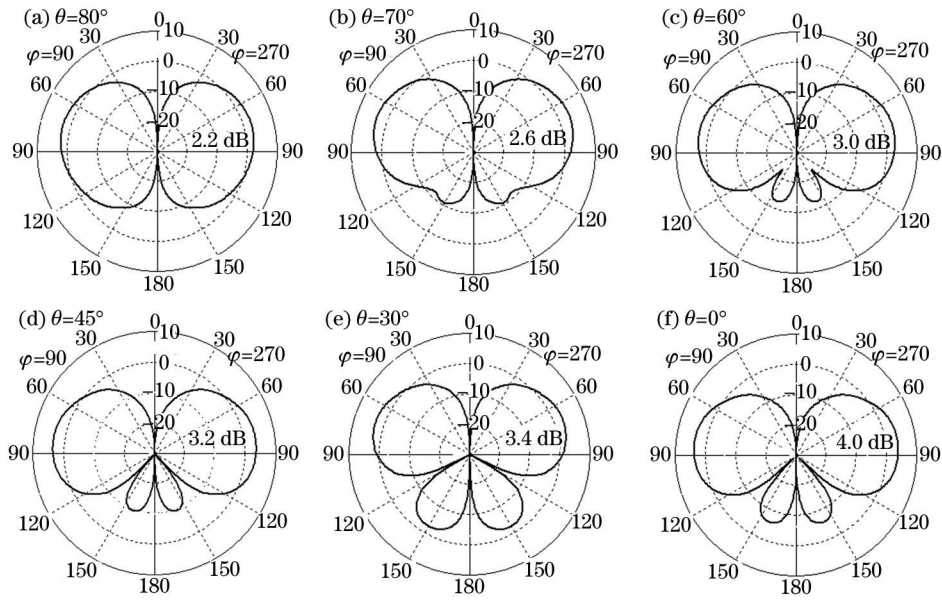


图5 不同夹缝大小的远场方向分布图

Fig.5 Far-field patterns of different gap sizes

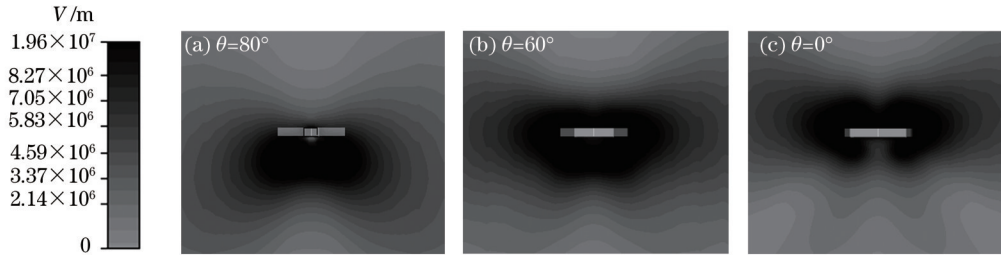


图6 不同夹缝大小的近场电场切向分布图

Fig.6 Near-field tangential electric field of different gap sizes

3.4 天线厚度对远场方向性的影响

设定参数 $N=40\text{ nm}$, $L=80\text{ nm}$, $\theta=30^\circ$, 入射光波长 $\lambda=600\text{ nm}$, 背景材料为 Si。厚度 H 从 10 nm 增加到 50 nm 。图7为不同厚度的远场方向图。从图中可以看出,随着厚度 H 的增加,旁瓣逐渐变大,主瓣增益先

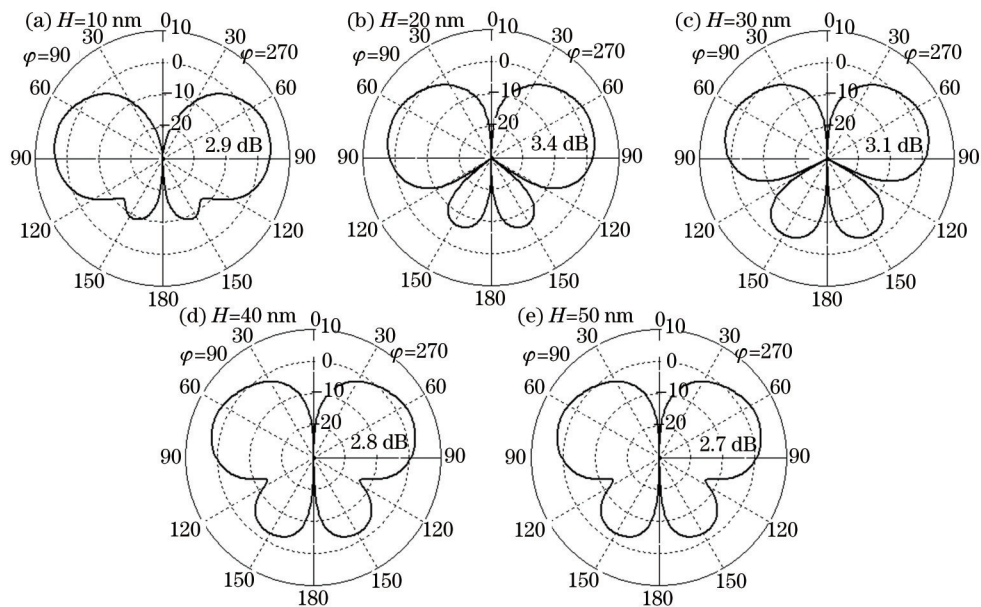


图7 不同厚度的远场方向图

Fig.7 Far-field patterns of different thicknesses

增大后减小。随着厚度的继续增加,方向图趋于稳定,旁瓣不再那么明显但旁瓣增益并未减小。

当厚度 $H=10$ nm 时,偶极子源辐射出的电磁场可以穿透双蝶形银纳米光天线传播出去,天线的上下表面产生的 LSPs 较弱,所以对远场方向性影响不大^[8],只出现了很小的旁瓣。厚度 $H=20$ nm 时,天线的上下表面都产生了较强的 LSPs 模式,并在下表面形成了 LSPs 高阶模式,因此方向图下方出现了明显的旁瓣,主瓣增益也提高到 3.4 dB。当 $H=40$ nm 时,电磁场能量未能穿透天线,导致天线上表面不能形成 LSPs,而这时天线下表面的 LSPs 得到增强,主瓣增益减小到 2.8 dB,而旁瓣增益并未随之变小。

4 结 论

采用时域有限差分的算法研究了双蝶形银纳米光天线各个参数的变化对远场方向性的影响,并利用 LSPs 理论对结果进行了分析。研究发现,通过调节双蝶形银纳米光天线的结构与尺寸可以实现对远场方向性的调控,得到多种不同的辐射模式。当偶极子源垂直放置于双蝶形银结构下表面 40 nm 时,远场方向图出现明显的旁瓣,其他距离则不能。长度是方向图出现旁瓣的关键因素,因为它的增加可以激发出高阶的局域表面等离子体共振模式。天线臂之间夹缝的减小,使远场方向图中旁瓣增大,同时主瓣增益增大。厚度太大使天线上表面不能产生 LSPs,下表面 LSPs 变强,主瓣增益减小。

方向性是一个表征天线能力的重要参数,方向图指明了天线最强辐射方向在空间的分布情况。双蝶形银纳米光天线的存在改变了与其相耦合的偶极子源的辐射方向性,利用该功能可在纳米尺度上把几乎没有方向性的分子源进行凝聚向某个方向辐射,有望应用于平面传感器、太阳能利用、高速数据处理等^[15]。对双蝶形银纳米光天线的远场方向性进行了分析,对充分了解双蝶形银纳米光天线的特性以及应用具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Y C Lin, Y C Jian, J H Jiang. A study on the wet etching behavior of AZO (ZnO:Al) transparent conducting film[J]. Appl Surf Sci, 2008, 254(9): 2671-2677.
- 2 Chen Yuegang, Liu Guangqun. Simulation investigation of optical wave enhanced transmission through a subwavelength hole on metal film by using nano-antenna[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(9): 091601.
陈跃刚, 刘广群. 纳米天线增强光波透过金属薄膜上亚波长小孔的模拟研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(9): 091601.
- 3 K B Crozier. Optical antennas: Resonators for local field enhancement[J]. J Appl Phys, 2003, 94(7): 4632-4642.
- 4 R Ding, H Dai, M Li, *et al.*. The application of localized surface plasmons resonance in Ag nanoparticles assisted Si chemical etching[J]. Appl Phys Lett, 2014, 104(1): 011602.
- 5 Li Zhiyuan, Li Jiafang. Recent progress in engineering and application of surface plasmon resonance in metal nanostructures[J]. China 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.
- 6 F Jackel, A A Kinkhabwala, W E Moerner. Gold bowtie nanoantennas for surface-enhanced Raman scattering under controlled electrochemical potential[J]. Chemical Physics Letters, 2007, 446(4): 339-343.
- 7 Jiang Shuangfeng. Study of Nanometer Metal Optical Antenna Far-Field Characteristics[D]. Jinan: Shandong University, 2011.
蒋双凤. 纳米金属光天线远场特性的研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- 8 Li Hongguang. Far-field characteristics of silver nanodisk optical antenna[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(8): 977-981.
李宏光. 银纳米圆盘光天线的远场方向性研究[J]. 光子学报, 2012, 41(8): 977-981.
- 9 P B Johnson, R W Christy. Optical constants of the noble metals[J]. Phys Rev B, 1972, 6(12): 4370-4379.
- 10 A Mohammadi, V Sandoghdar, M Agio. Gold nanorods and nanospheroids for enhancing spontaneous emission[J]. New Journal of Physics, 2008, 10(10): 105015.
- 11 S T Chu, S K Chaudhuri. A finite-difference time-domain method for the design and analysis of guided-wave optical structures[J]. J Lightwave Technol, 1989, 7(12): 2033-2038.
- 12 H Xie, F M Kong, K Li. The electric field enhancement and resonance in optical antenna composed of Au nanoparticles [J]. J Electromagnet Wave, 2009, 23(4): 534-547.
- 13 Jiang Shuangfeng, Kong Fanmin, Li Kang, *et al.*. Study of far-field directivity of optical dipole antenna[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(4): 045103.
蒋双凤, 孔凡敏, 李康, 等. 光偶极天线的远场方向性研究[J]. 物理学报, 2011, 60(4): 045103.
- 14 Y Lin, K Li, F Kong, *et al.*. Comprehensive numeric study of gallium nitride light-emitting diodes adopting surface-plasmon-mediated light emission technique[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(4): 942-951.
- 15 D Dregely, R Taubert, J Dorfmueller, *et al.*. 3D optical Yagi-Uda nanoantenna array[J]. Nature Communications, 2011, 2: 267

栏目编辑: 苏 岑