

doi: 10.3788/gzxb20124108.0977

银纳米圆盘光天线的远场方向性研究

李宏光

(鲁东大学 电子与电气工程学院, 山东 烟台 264025)

摘要:采用时域有限差分方法计算了银纳米圆盘光天线模型的场分布,研究了光偶极天线的远场辐射特性随距离和厚度、半径变化的规律以及影响其远场方向性的因素. 研究发现,偶极子垂直放置在银纳米圆盘下方一定距离时,银盘厚度和半径的改变均可使方向性图中出现新的辐射模式,同时方向性增益得到增强. 通过对其近场的观察和分析可以得知,新的辐射模式的产生来源于高阶模式的局域表面等离子激元. 结果表明,背景材料为 GaN 时,产生高阶模式局域表面等离子激元的合适条件为电偶极子距银盘底部 40 nm. 另外,为了有效地支持高阶模式局域表面等离子激元的形成,银盘厚度与半径最小分别为 30 nm 和 100 nm. 本文的研究对掌握纳米银盘结构的光天线特性及其在光器件中的运用有重要意义.

关键词:光天线;表面等离子激元;纳米银盘;远场方向性

中图分类号: O431.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)08-0977-5

0 引言

纳米尺度的金属结构因其特殊的光学性质,吸引了很多研究者的关注. 在光频入射下,金属与介质的界面上会产生沿着界面传播的电磁场,即表面等离子激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs). 通过 SPPs 的作用,可以将电磁场局限在纳米尺度的范围,从而突破衍射极限,这在高分辨率成像^[1]及生物传感等领域^[2]具有很高的应用价值. 由于 SPPs 可以增强金属附近范围的态密度,从而提高 Purcell 因子,达到增强自发辐射率的目的. 所以,利用金/银纳米结构增强 LED 发光效率也吸引了很多研究者的兴趣^[3-4].

光天线是纳米尺度的金属结构,一般为规则形状的金属纳米粒子或由金属纳米粒子组成的阵列结构. 在入射电磁波(光)的激发下,SPPs 在金属的表面形成,对于单个粒子的情况,SPPs 会局域在金属粒子表面,表现出强烈的电磁近场,即局域表面等离子激元(Localized Surface Plasmons, LSPs). 在 LSPs 的影响下,金属纳米结构可以对偶极子的辐射产生特殊的调节作用.

目前,对于光天线的研究大多采用球体或者棒状及其所形成的阵列结构^[6-8],而文献^[8-11]则针对一些更加复杂的结构(例如纳米球壳及其阵列的纳

米天线结构、三维阵列或者对数周期的纳米阵列天线结构)开展了研究. 虽然这些复杂结构会带来很多新颖效应和较高的效率,但不可避免地带来制作难度增加以及应用范围较窄等限制因素. 于是,制作难度相对较低的圆盘形状纳米金属颗粒及其阵列结构,并且利用其产生的新颖的电磁特性,在光器件中得到了初步应用^[13-14].

为了探讨金属纳米圆盘结构对偶极子辐射的影响,本文将银盘作为光偶极天线模型,用时域有限差分(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)方法对不同参量的光天线结构进行计算. 研究发现,不同尺寸的银纳米圆盘对置于其下方的电偶极子辐射有不同的影响,当尺寸合适时,不仅方向性增益得到增强,而且在 LSP 的作用下,可以产生新的辐射模式. 这对于掌握光天线的特性以及在光器件中的应用具有重要的参考意义.

1 计算模型和方法

本文采用银纳米圆盘粒子作为研究对象,结构模型如图 1. 图中箭头所示为垂直放置在银纳米圆盘正下方的电偶极子, T 表示圆盘的厚度, D 表示电偶极子与银圆盘的距离,圆盘半径用 R 表示. 计算中,银的介电常量采用修正 Drude 模型近似,其定义为

第一作者:李宏光(1964—),男,副教授,硕士,主要研究方向为仪器仪表以及纳米材料的应用. Email:lihg1964@163.com

收稿日期:2012-02-10;修回日期:2012-03-21

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\omega\gamma} \quad (1)$$

式中, ϵ_{∞} 、 ω_p 和 $1/\gamma$ 分别代表频率接近无穷大时的介电常量、等离激元振荡频率以及弛豫时间. 根据光学手册中的实验数据^[15]进行曲线拟合, 选取银在可见光频段的参量分别为: $\epsilon_{\infty} = 5.888$, $\omega_p = 1.433 \times 10^{16} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, $\gamma = 2.4871 \times 10^{13} \text{ Hz}$.

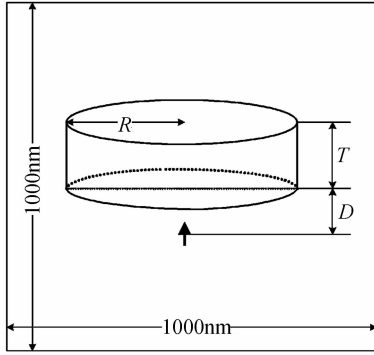


图1 计算模型
Fig. 1 Computational model

为了定量分析光天线的远场辐射特性, 本文通过计算天线模型的角度方向性 $D(\varphi, \theta)$ 来表示远场分布随角度的变化情况. 定义角度方向性 $D(\varphi, \theta)$ 为^[16]

$$D(\varphi, \theta) = \frac{4\pi P(\varphi, \theta)}{\iint P(\varphi, \theta) d\Omega} \quad (2)$$

式中: $P(\varphi, \theta)$ 是天线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; 式中分母部分的积分球面半径要求远大于一个入射光波长.

计算采用FDTD方法, 计算区域大小为 $1000 \times 1000 \times 1000 \text{ nm}^3$, 背景填充材料为氮化镓(GaN, 折射率为 2.5). 对于超出计算区域的部分, 采用完全匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)来吸收超出区域的辐射. 计算中背景材料的网格步长设置为 10 nm, 银纳米圆盘结构的网格步长设置为 1 nm. 对于电偶极子与圆盘距离比较近的情况, 为了确保计算的精确性和稳定性, 并尽可能降低对计算资源的消耗, 本文对电偶极子与纳米圆盘之间的区域进行局部网格加密, 加密后的网格步长设置为 1 nm.

2 计算结果与讨论

2.1 银盘与偶极子源的距离对方向性的影响

为了研究银纳米圆盘对偶极子辐射产生的影响, 首先设定圆盘直径 $L = 120 \text{ nm}$, 厚度 $T = 30 \text{ nm}$, 计算其远场方向性随距离 D 的变化情况. 入射光波长设定为 465 nm, D 的变化范围为 10~80 nm, 如图 2. 从图中可以看出, 主瓣方向性幅值随着 D 的增大表现出先增大后减小的趋势, 当 $D = 40 \text{ nm}$ 时, 主瓣幅值达到最大. 同时, 在距离为 40 nm 时, 两个主

瓣下方出现两个旁瓣, 对于其他距离的情况则无旁瓣出现. 当距离 D 较小或较大时, 方向性图与电偶极子的方向图在形状上的主要区别在于主瓣幅值的不同, 从总体来看, 距离小比距离大的主瓣幅值大.

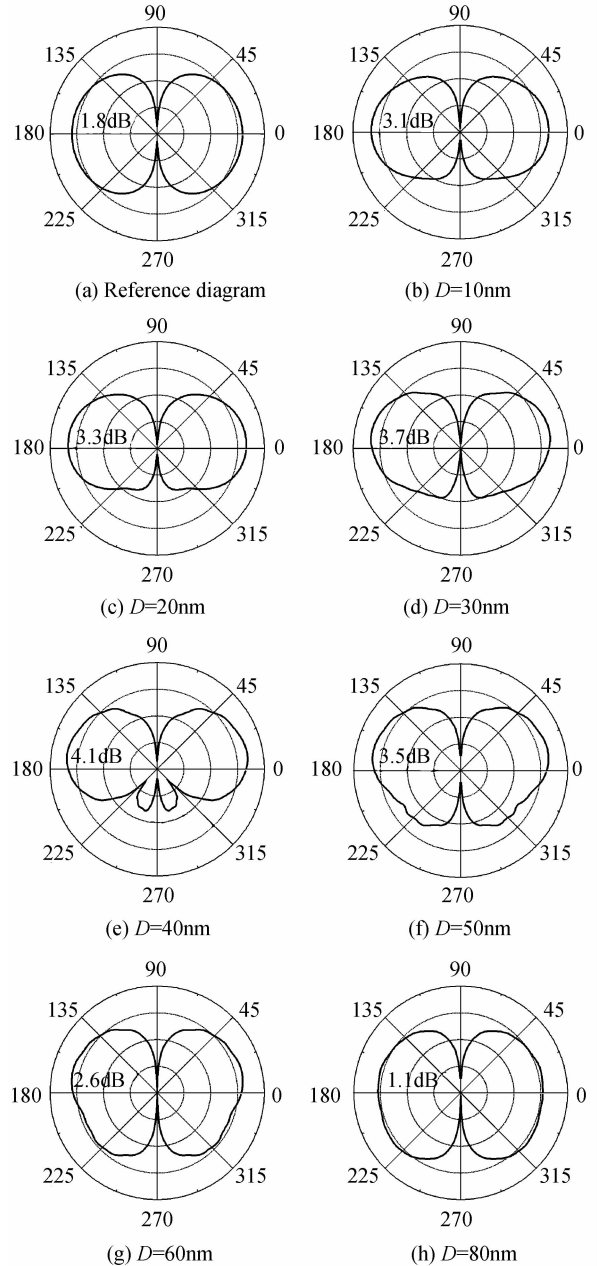


图2 不同距离 D 对远场方向性的影响

Fig. 2 The influence to the far-field pattern by different distances (D)

银平面上产生的 SPPs 散射场在介电常量为 ϵ_1 的背景材料中的穿透深度 Z 可以表示为^[4]

$$Z = \frac{\lambda}{2\pi} \left[\frac{\epsilon_1 - \text{Re}(\epsilon_{\text{Ag}})}{\epsilon_1^2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

背景材料为 GaN 时, 代入数据可得 SPPs 的穿透深度约为 42 nm, 正与图 2(e) $D = 40 \text{ nm}$ 情况下方向图中出现新的辐射模式相吻合. 结合图 2 可以得出: 距离为 40 nm 时, LSP 与源耦合产生新的辐射模式, 距离小于 40 nm 时, LSP 与源的相互作用并未

产生新的辐射模式,但会引起方向性增益的增大,而当距离大于 40 nm 时,由于 LSP 无法与源耦合,所以方向性不会产生明显变化。

2.2 银盘厚度对方向性的影响

将距离 D 固定为 40 nm,改变圆盘的厚度 T ,进一步研究远场方向性随厚度的变化情况,如图 3。从图中可以发现,银盘的厚度小于 20 nm 时,远场方向图形状不会受到明显影响,厚度大于 20 nm 时,方向图中开始出现旁瓣并且旁瓣的方向性增益随着厚度的增大而逐渐增大,但同时主瓣的方向性增益随之减小,当厚度在 60 nm 以上时,方向图的形状以及旁瓣和主瓣的增益表现出趋于稳定的状态。

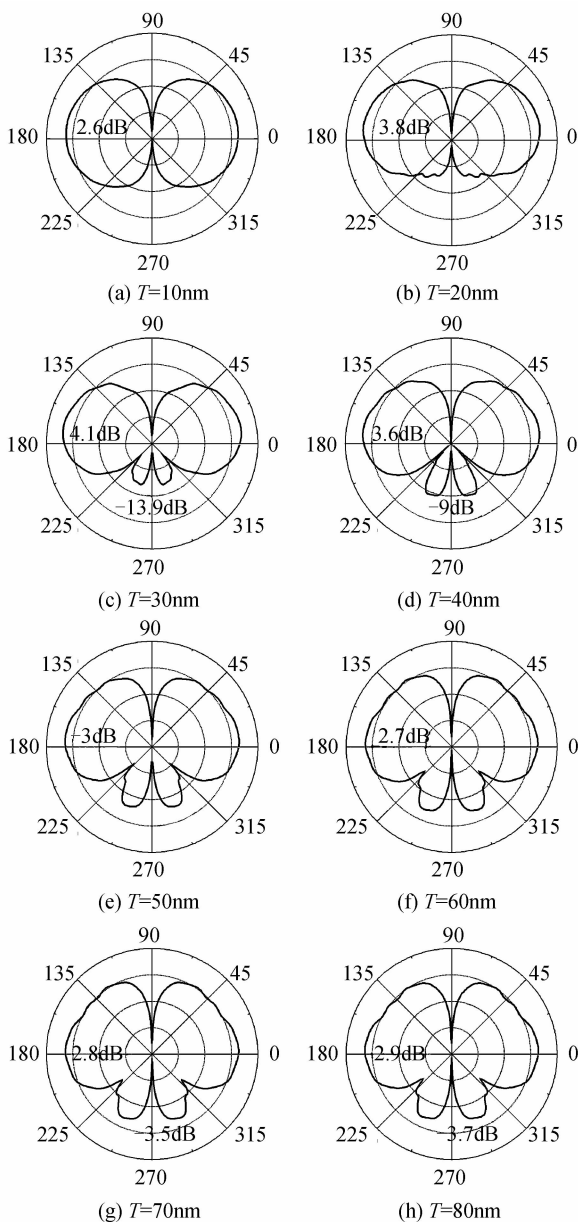


图 3 银圆盘厚度对远场方向性的影响

Fig. 3 The influence to the far-field pattern by different thicknesses (T)

为了进一步研究厚度不同对偶极子辐射的影响,分别提取了 $T=10$ nm、40 nm 和 80 nm 的切向

电场图,如图 4。在近场分布图中,观察到银盘的上下表面都出现了强烈的电场,这表示有大量的电荷聚集,正是 LSP 模式的特征。当 $T=10$ nm 时,电磁场能量穿过银盘传播,银盘上下两面没有生成明显的局域增强场,于是对偶极子的辐射没有产生很大影响。当 $T=40$ nm 时,银盘顶面与底面部分均产生了局域增强场 LSP 模式,底部的 LSP 与源相互作用,形成高阶的 LSP 模式,这使得方向图中产生旁瓣。同时,底部 LSP 与顶部 LSP 模式在银盘内部耦合,将偶极子能量传递到上方,这使得向上的能量得到增加,方向性增益得到提高。而当 $T=80$ nm 时,由于厚度较大,电磁场能量难以穿透,在银盘顶部无法产生 LSP 模式,一方面导致向上的方向性增益减小,另一方面底部 LSP 模式携带能量得到增加,从而方向图中的旁瓣增益得到提高。

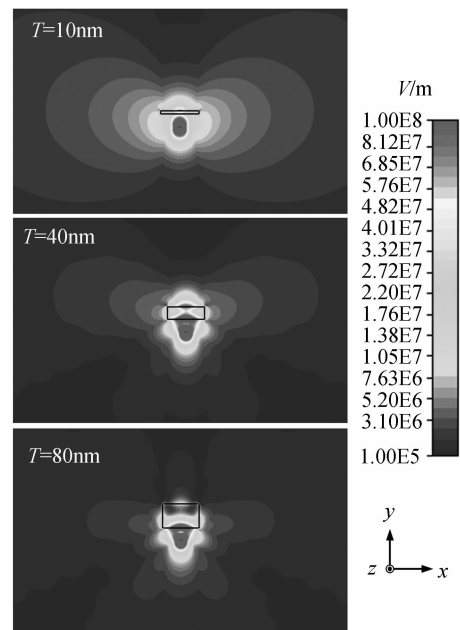


图 4 银盘厚度分别为 10 nm、40 nm 和 80 nm 对应的近场分布图

Fig. 4 Near-field distribution of optical antenna models with 10 nm, 40 nm and 80 nm thickness nanodisk respectively

2.3 银盘半径对方向性的影响

选定 40 nm 为银盘厚度,改变其半径,观察方向性的变化,如图 5。从图中可以看到,在半径小于 50 nm 时,方向图形状没有明显改变,从半径 50 nm 开始,方向图的下半部分出现旁瓣,并且随着半径的增大,旁瓣所占的比例也越来越大,当半径增大到 100 nm 时,主瓣与旁瓣的差距已经变得很小了(图 5(h))。另外,当半径为 80 nm 以及更大时(图 5(f)~(h)),方向图的上半部分还出现非常小的旁瓣,这说明,当银盘的半径较大时,有新的辐射模式形成。

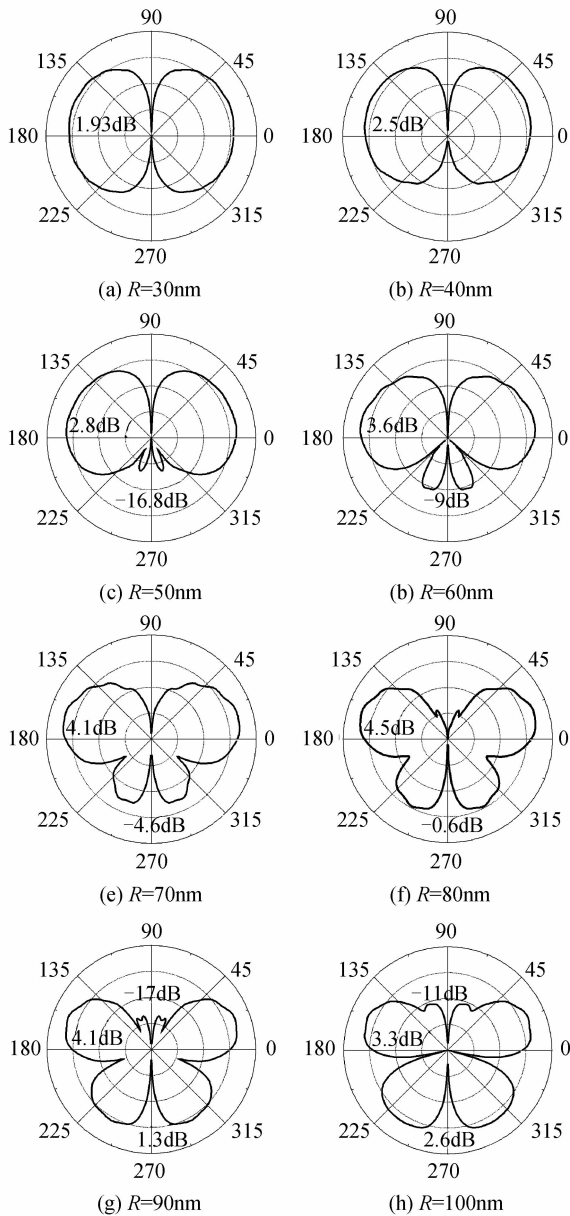


图5 银盘半径对远场方向性的影响
Fig. 5 The influence to the far-field pattern by different radiuses (R)

同样地,本文也提取了三种不同半径情况下的切向电场分布图,如图6。 $R=30\text{ nm}$ 时,虽然银盘的底部和顶部均有LSP的模式产生,但是由于其水平方向的尺寸小,两种模式的存在对整体的方向性并未产生明显的影响。当 $R=50\text{ nm}$ 时,银盘底部产生高阶的LSP模式,这产生了方向图中的旁瓣。半径 R 为 100 nm 时,银盘顶部也产生了高阶模式的LSP,这使得方向图中形成了另一个旁瓣。这说明:当银盘半径较小时,LSP只有基本模式,可称之为零阶模式;随着银盘半径的增加,底部和顶部相继出现高阶的LSP模式,这种模式的存在改变了银盘表

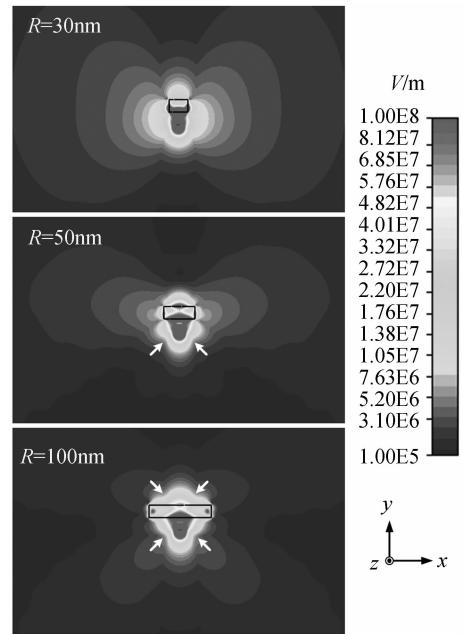


图6 不同半径银盘的辐射近场图
Fig. 6 Near-field distribution of optical antenna models with 30 nm , 50 nm and 100 nm radius nanodisk respectively

面电流分布,继而对整个的方向性产生影响。

3 结论

本文利用FDTD方法,计算了纳米银盘光天线结构的远场方向性和近场分布特性,阐述了不同参数的银盘结构对垂直放置的偶极子辐射的影响。通过对银盘与源的距离以及厚度和半径的扫描,可以得出:1)距离在 40 nm 左右时,LSP与源耦合作用形成新的辐射模式,距离较小或较大时,新的辐射模式均未形成;2)银盘厚度是银盘表面形成强烈的LSP的重要因素,当厚度合适时,不仅下表面会形成能够与源强烈耦合的LSP模式,而且银盘上下表面的LSP可以传递能量,增强整体的方向性增益;3)半径是影响高阶模式LSP形成与否的关键因素,随着半径的增大,银盘下表面和上表面相继会形成高阶LSP模式,从而对整个的方向性产生显著影响。

通过采用数值分析手段,本文对银盘结构光天线的远场特性以及影响远场方向性的局域表面等离子元模式进行了初步的理论研究和探讨,这对掌握银盘结构光天线特性以及银纳米圆盘结构在GaN基光器件中的应用具有一定的理论参考价值。基于本结构的实验研究工作的开展,仍需进行进一步地深入研究。

参考文献

- [1] ZHANG Zhi-you, DU Jing-lei, LI Min, *et al.* Optimal design of superfocusing lens configuration based on surface plasmon polariton coupling plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2524-2528.
张志友, 杜惊雷, 李敏, 等. 基于表面等离子体激元耦合相位板超聚焦透镜结构的优化设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2524-2528.
- [2] LIN Kai-qun, LU Yong-hua, LUO Yan-hua, *et al.* Temperature characteristics of portable surface plasmon resonance sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2229-2233.
林开群, 鲁拥华, 罗艳华, 等. 便携式表面等离子体共振传感器温度特性[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2229-2233.
- [3] CHUANG W H, WANG J Y, YANG C C, *et al.* Numerical study on quantum efficiency enhancement of a light-emitting diode based on surface plasmon coupling with a quantum well [J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2008, **20**(16): 1339-1341.
- [4] LIN Y Z, LI K, KONG F M, *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.
- [5] ANDREA A, NADER E. Wireless at the nanoscale: optical interconnects using matched nanoantennas [J]. *Physical Review Letters*, 2010, **104**(21): 213902-1-213902-4.
- [6] MANMOHAN S S, BORIS D F, ABRAHAM N. Theory of energy transfer interactions near sphere and nanoshell based plasmonic nanostructures[C]. *SPIE*, 2011, **8096**: 80961G-1-80961G-16.
- [7] OLIVIA N, MARTIJN W, MORTENSEN N A. Surface plasmon modes of a single silver nanorod: an electron energy loss study[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(16): 15371-15379.
- [8] ANDREY E M, LVAN S M, ARTHUR R D, *et al.* An arrayed nanoantenna for broadband light emission and detection[J]. *Physica Status Solidi RRL*, 2011; 1-3 (DOI: 10.1002).
- [9] AKRAM A, SHABNAM G, HOSSEIN M. An optical reflectarray nanoantenna[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(1): 123-133.
- [10] DANIEL D, RICHARD T, JENS D, *et al.* 3D Optical yagi-uda nanoantenna array[J]. *Nature Communications*, 2011, **2**(267): 1-7.
- [11] ZHAO Wei, ZHAO Xiao-peng. Relationship of surface plasmon polaritons and nanoparticles morphology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 556-560.
赵伟, 赵晓鹏. 纳米粒子形貌与表面等离子体激元关系[J]. *光子学报*, 2011, **40**(4): 556-560.
- [12] PEI J N, TAO J L, ZHOU Y H, *et al.* Efficiency enhancement of polymer solar cells by incorporating a self-assembled layer of silver nanodisks [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2011, **7**(95): 3281-3286.
- [13] ZHU J, LI J J, ZHAO J W. Distance-dependent fluorescence quenching efficiency of gold nanodisk effect of aspect ratio-dependent plasmonic absorption[J]. *Plasmonics*, 2011, **10**(28): 1-7.
- [14] WONG H M K, RIGHINI M, GATES J C, *et al.* On-a-chip surface plasmon tweezers[J]. *Applied Physics Letter*, 2011, **99**(8): 061107-1-061107-3.
- [15] JOHNSON P B, CHRISTY R W. Optical constants of the noble metals[J]. *Physical Review B*, 1972, **6**(12): 4370-4379.
- [16] MOHAMMADI A, SANDOGHDAR V, AGIO M. Gold nanorods and nanospheroids for enhancing spontaneous emission[J]. *New Journal of Physics*, 2008, **10**(10): 105015-1-105015-14.

Far-field Characteristics of Silver Nanodisk Optical Antenna

LI Hong-guang

(School of Electric and Electronic Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China)

Abstract: The near-field distribution of silver nanodisk optical antenna was calculated with Finite-Difference Time-Domain method. The influence to the far-field characteristics by different parameters such as the distance between nanodisk and dipole, thickness and radius of nanodisk, was discussed. The research demonstrated that when the dipole was placed vertically beneath the nanodisk, the variation of thickness or radius could lead to new radiation mode in the far-field pattern and give rise to the enhancement of directivity gain. Through the observation and analysis to near-field, it could be obtained that the new radiation mode was caused by the high order localized surface plasmon (LSP) mode. The optimization results pointed out that as the background material was set as GaN, for the sake of producing high order LSP mode, the suitable distance between nanodisk and dipole was 40 nm. Furthermore, in order to effectively support the high order LSP mode, the thickness and radius of nanodisk were at least 30 nm and 100 nm respectively. These results provided a theoretical reference to master the characteristics of nanodisk optical antenna as well as the practical application in optical devices.

Key words: Optical antenna; Surface plasmon; Nanodisk; Far-field directivity