

文章编号 1004-924X(2013)06-1518-06

宽谐振区光学纳米天线的谐振

袁纵横^{1,2*}, 苏睿², 黄静¹

(1. 贵州民族大学 信息工程学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004)

摘要:提出了一种有双谐振频率和较宽谐振区域的纳米天线结构。利用有限积分法, 计算了由金构成的表面等离子体光学纳米天线的谐振特性, 研究了在谐振区域内谐振频率和谐振电场随位置变化的情况。结果表明, 在不同谐振频率下存在两个谐振电场, 在中间区域, 谐振频率为 270 THz, 在侧边间隙区, 谐振频率为 390 THz; 激励源为 1 V/m 时, 其谐振电场均达 700 V/m 以上, 是普通偶极子天线的 18 倍; 第一谐振区域的谐振场集中在 10~25 nm, 在此范围内, 谐振电场较大、谐振频率几乎不变; 加上折射率为 1.5 的玻璃衬底后, 天线的谐振电场达到 800 V/m, 与没有衬底时相比, 谐振频率变化很小。研究的天线结构在高性能的光学纳米天线、太阳能电池和生物传感器方面有潜在的应用价值。

关键词:表面等离子体; 谐振; 纳米光学天线; Drudel 模型

中图分类号: TN820 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132106.1518

Resonance of optical nano-antenna with wider resonant areas

YUAN ZONG-heng^{1,2*}, SU Rui², HUANG Jing¹

(1. School of Information Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China;

2. School of Electronic Engineering and Automation,

Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

* Corresponding author, E-mail: yuanzongheng@sina.com

Abstract: A nano-antenna with two resonant frequencies and wider resonant areas was constructed. On the basis of the finite integral method, the resonant properties of the surface plasmon optical nano-antenna constructed by Au were calculated and the resonant frequencies and resonant fields in resonant areas were mainly simulated. The experiments show that there are two resonant areas in different resonant frequencies, which are 270 THz at the middle gap and 390 THz at the side gap. Their resonant electric fields are up to 700 V/m, which is about 18 times higher than that of the common dipole antenna when the excitation field is 1 V/m. The resonance field at the first resonant area is confined at the central part from 10 nm to 25 nm along the Z-axis direction, the resonant frequency is almost not changed and the magnitude is greater. The structure with a glass substrate of refraction index of 1.5 is also considered, the resonant field is up to 800 V/m, whereas the resonant center frequencies are almost not changed. The proposed structure has potential applications to high-quality op-

收稿日期: 2013-01-04; 修订日期: 2013-02-04.

基金项目: 贵州省科技厅国际合作项目(黔科合外 G 字[2011]7035 号)

tical antennas, solar cells, and biosensors.

Key words: surface plasmon; resonance; optical nano-antenna; Drudel model

1 引言

表面等离子体激子是一种金属表面的电磁场局域化,它沿金属和介质的界面传播,并在垂直界面的方向呈指数衰减。光与金属纳米结构相互作用时,可以激发很多新颖的光特性,成为纳米光学领域的一个重要研究方向。随着现代微纳加工技术的进步,金属纳米结构的加工变得更加方便,使得关于利用表面等离子体谐振增强的效应器件的研究得到了快速发展。其中,提出不同的纳米结构,并对其谐振特性和应用进行研究是主要发展方向。

近十几年来,基于表面等离子体谐振(Surface Plasmon Resonance, SPR)的光学天线受到广泛重视,Robert^[1]在 1997 年通过使用蝶形近场光学探针,首先提出了光学天线的概念。2003 年,Crozier^[2]在中红外区域,对光学天线阵列的谐振电磁场进行了模拟和实验研究,研究了天线尺寸、形状和衬底对电磁场分布的影响。2005 年,Muhichiegl^[3]提出了一种基于 SPR 的半波长偶极子天线。2006 年,Crozier 等^[4]制作了纳米尺度的金光学纳米天线,在红外光谱区,光会聚成直径为 40 nm 的光点。近几年来,对基于 SPR 的器件和光学纳米天线的研究正在向更广泛的领域发展。2010 年,Kohoutek 等^[5]提出了一种新的纳米天线,由 Au-SiO₂-Au 单个与量子阱级联激光器集成,工作在中红外光谱区,使得入射光提高了 500 倍,增加了分子探测极限,也增加了光子和分子的相互作用。Chau 等^[6]研究了带有介质孔的碟形光学纳米天线,得到了在一个较宽光谱范围内可调的等离子体谐振。史林兴等^[7]设计了表面等离子体激元透镜,讨论了光栅周期对成像特性的影响。2011 年,Tiwari 等^[8]将纳米天线与金属-氧化物金属二极管耦合,制作了红外探测器阵列,实现了 THz 波的探测。David 等^[9]研究了金的单条和双条阵列纳米天线对多量子阱激光器发射效率的影响,结果证明,发射效率增强达到了 9 倍。Daniel 等^[10]研究了金纳米天线阵列的长范围和短范围的相互作用区。Jesly 等^[11]研究了三

角形排列的银壳纳米圆柱的近场谐振。2012 年,黄茜等^[12]和熊尚等^[13]分别研究了 SPR 对拉曼散射和旋光效应的增强。张兵心等^[14]研究了温度可调的表面等离子体纳米光学吸收器件,实现了在近红外谱段 2 个频率处 100% 的吸收。

但在已有的报道中,有关在谐振区域内谐振频率随位置变化的研究较少见,且高的谐振增强通常是在较窄的区域获得。本文研究了在谐振区域场中,谐振频率和共振电场的变化情况。提出了一种具有较宽区域谐振场分布的纳米天线结构,并使用有限积分法和 CST 软件^[15-16]对其谐振特性进行了研究。

2 纳米天线结构及计算方法

2.1 天线结构模型

图 1 是所研究的带有双缝隙结构的纳米天线模型(B 型)和普通偶极子天线(A 型)。为了便于比较,将两者放在一起分析。构成天线的材料是金,其介电函数由改进的 Drude 模型表示。图 2 和图 3 分别是 XY 面的 XZ 面的剖视图及几何参数。天线的总体尺寸为 215 nm×32 nm×35 nm。经过对多组数据的比较分析,获得了优化后用于计算的各参数值,如表 1 所示。



图 1 A 型和 B 型纳米天线结构

Fig. 1 Structure schematics of two antennas; Type A and Tpe B

表 1 参数设置

Tab. 1 Parameter settings (nm)

参数	取值	参数	取值	参数	取值
l_1	80	ω_1	12	d_{\min}	7
l_2	20	ω_2	4	d_{side}	15
l_m	24	ω_m	4	h_{mid}	8
l_{block}	20	ω_d	8	h_{side}	7
l	215	ω	32	h	35

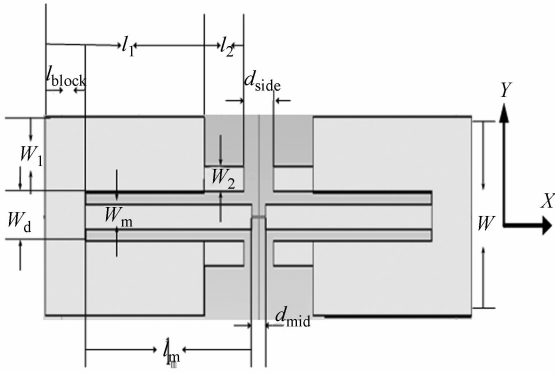


图 2 X-Y 平面视图

Fig. 2 Plane view of X-Y plane

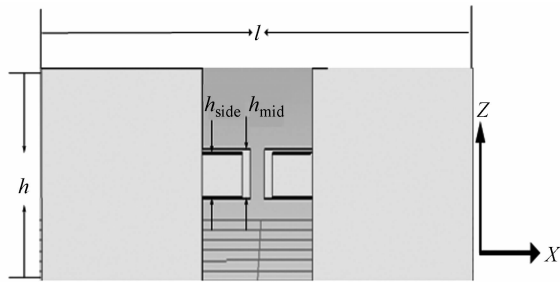


图 3 X-Z 面视图

Fig. 3 Side view of X-Z plane

2.2 Drude 模型近似

金的介电常数与光波长有关,其色散关系由改进的 Drude 模型^[17]表示:

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

式中, ω_p 是等离子体频率, γ 是碰撞频率, ϵ_{∞} 是频率为无穷大时的介电常数。在可见光和近红外光谱范围,各参数依据文献^[18]所采用数据,其中, $\epsilon_{\infty} = 9.5$, $\omega_p = 1.359\ 562\ 117\ 164\ 129\ 077 \times 10^{16}$ rad/s, $\gamma = 16\ 705\ 888\ 751\ 794.531$ 1/s。激励源设置为在电场强度为 1 V/m, 电场方向沿 X 轴, 为沿 Z 轴方向传播的平面波。

2.3 计算方法

电磁场的数值分析方法主要有:有限元法、光束传播法、平面波展开法、时域有限差分法,以及有限积分法(Finite Integral Technique, FIT)。其中, FIT 是从麦克斯韦积分方程出发,用线积分和面积分在六面体网格上进行离散化,对所有的网格单元上的离散积分写成矩阵形式,最终形成显式矩阵方程,即等式的一边为未知量,另一边全部为已知量,通过求解这些矩阵方程获得场解,它

的特点是适合于所有频段的电磁仿真问题。由 FIT 所导出的矩阵方程保持了解析麦克斯韦方程的各种固有特性,如电荷守恒性和能量守恒性,且它的梯度、散度和旋度算子在 FIT 下均具有相对应的矩阵。这些矩阵均满足解析形式下的算子恒等式,这使得 FIT 具有非常好的数值收敛性。有限积分法的求解和有限差分法一样是“显式”的,其不需要矩阵求逆,计算机速度快。CST(Computer Simulation Technology)软件是一款专门面向 3D 电磁场的有效、精确的三维全波电磁场仿真工具,它采用有限积分法对麦克斯韦积分方程进行离散化迭代求解,仿真范围覆盖了从静场、瞬态场、简谐场、微波毫米波、光波及高能带电粒子。已经广泛被用于研究纳米光学天线的电磁场问题,得到了较好的结果。

3 结果和讨论

图 4 和图 5 分别是 A 型(普通偶极子天线)和 B 型天线结构中心区域谐振的频率和电场强度图。

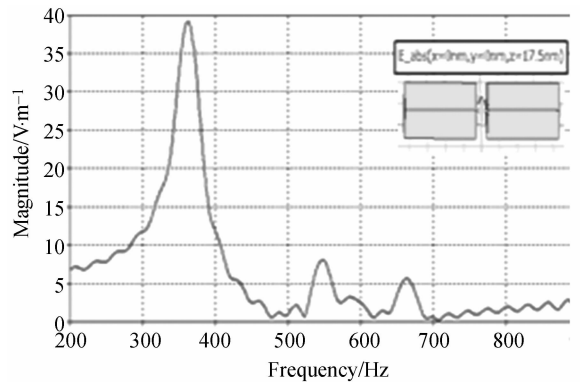


图 4 偶极子天线(A 型)中心的电场分布

Fig. 4 Electric field distribution at center of dipole antenna(Type A)

图 4 和图 5 插入的小图用于表明探测点位置。图 4 是偶极子天线中心的电场分布曲线。图 5 中的几条曲线分别为对应不同位置的谐振曲线。由图 5 可见,不同位置,谐振频率和场幅的关系不同,在中心区域, B 型天线的电场比普通偶极子天线强,其谐振电场幅度比偶极子天线大 18 倍左右,约为 700 V/m。除主谐振模以外,在高频区,还存在几个傍模,例如,在 $x = 0$ nm, $y = 0$ nm, and $z = 21.5$ nm 点的场谐振曲线中,有几个

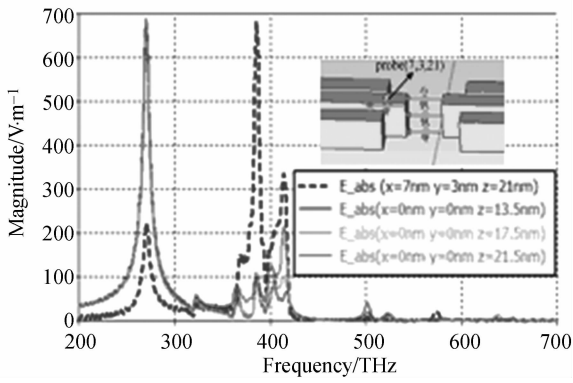


图 5 B 型天线的电场分布

Fig. 5 Electric field distribution of Type B antenna

小的谐振峰,较大的谐振电场为 210 V/m,在 415 THz 处,另外 2 个较小的分别为 108 V/m,对应频率为 386 THz,和 76 V/m,频率为 367 THz。除了中心部分的谐振区外,B 型结构还有另一个特点,在中间臂和边臂之间存在谐振区,即第二谐振区。在图 5 中,第二谐振区位于 $x=7\text{ nm}$, $y=3\text{ nm}$, $z=21\text{ nm}$ 周围,谐振电场在 385 THz 时达 700 V/m 左右,这接近可见光区域。其它 2 个幅度较小的是 326 V/m,谐振频率为 415 THz,222 V/m,谐振频率为 271 THz。

图 6 是 XY 面中心探测点沿 Z 轴变化的计算结果。图 6 中的插图中,上图表示谐振电场幅度随 Z 变化的关系曲线,下图是谐振频率随 Z 的变化曲线,由图看出,谐振频率在近 40 nm 的范围内变化很小。图 6 表明在中心部分($x=0\text{ nm}$, $y=0\text{ nm}$),谐振电场大于 200 V/m 的范围约为 15 nm($Z:10\sim 25\text{ nm}$),而谐振频率几乎不变。这表明,在中央部分,谐振加强是局域化的,同时,在 Z 方向的较宽区域,能获得较大的谐振电场和变化较小的谐振频率。

以上现象的原因归功于局域表面等离子体共振。本结构可以看成是由 3 个偶极子天线所组成,它们各自形成共振的同时又互相作用,使得中间区域的谐振电场比单独一个偶极子时大。根据偶极子天线谐振的特点,偶极子天线的谐振频率和强度与天线的间隙有关,由于结构中间和两旁的偶极子间隙不同,它们的谐振曲线不同,因此,它们叠加后,在中间区域形成了一个具有谐振强度较大、且随位置变化小的较宽区域。

图 7 是考虑玻璃(折射率 $n=1.5$)衬底时,B 型结构的计算结果。与没有衬底时的图 6 相比,

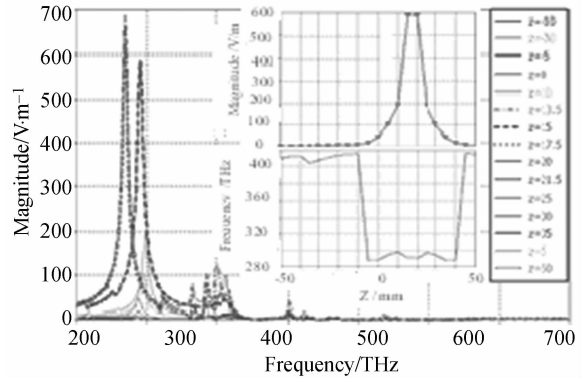


图 6 $x=0, y=0, Z$ 值为 $-50\text{ nm}\sim 50\text{ nm}$ 时的电场谐振变化图

Fig. 6 Electric field change chart with Z changed from -50 nm to 50 nm in $x=0$ and $y=0$

中央区的谐振电场从 700 V/m 增加到 800 V/m,谐振频率从 270 THz 变到 281 THz,而仍然存在较宽的谐振区域。产生的原因是由于衬底的折射率比空气的折射率大,波矢量也较大,较容易满足动量匹配条件,所以激发的表面等离子体谐振得到加强。

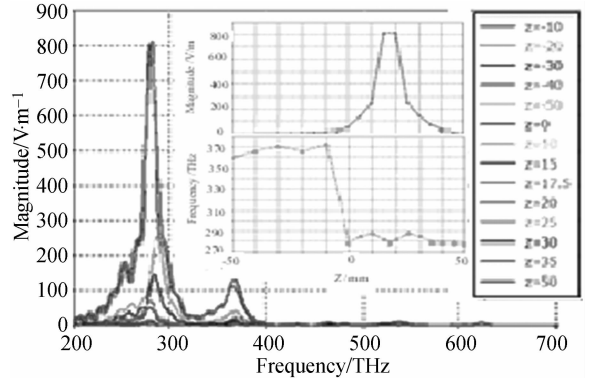


图 7 有衬底时 $x=0, y=0, Z$ 值从 -50 nm 到 50 nm 变化的电场谐振变化图

Fig. 7 Electric field change chart with Z changed from -50 nm to 50 nm in $x=0$ and $y=0$ with glass substrate

4 结 论

利用有限积分法和 CST 电磁模拟商业软件对带有缝隙和 3 个臂的纳米天线结构进行了研究,重点研究了谐振区域内,谐振频率和共振强度随位置的变化情况以及衬底的影响。结果表明存在不同谐振频率的 2 个强的谐振区域,在激励电

场为 1 V/m 时,其谐振强度达到了 700 V/m,比普通的偶极子天线高 18 倍左右。同时,除主要的谐振区外,还观察到存在 2 个相对小的谐振,其频率位于红外或可见光谱区。在位于中央部分的主谐振区,从 $z=10$ nm 到 $z=25$ nm 的区间内,谐振电场较大,超过 200 V/m。通过对考虑玻璃衬

底时的 B 型结构的分析,可知玻璃衬底对谐振电场有加强作用,对谐振频率影响较小。

所研究的结构可以通过改变参数、尺寸获得不同谐振波长、较大谐振电场和较宽的谐振区域。因此,在生物传感器,提高太阳能电池效率和其它方面具有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] ROBERT D G, ROBERT J S, DANIEL E P. Optical antenna: Towards a unity efficiency near-field optical probe [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 70(11): 1354-1356.
- [2] CROZIER K B, SUNDARAMURTHY A, KINO G S, *et al.*. Optical antenna: Resonators for local field enhancement [J]. *J. App Phys.* 2003, 94(7): 4632-4642.
- [3] MUHLSCHLEGEL P, EISLER H J, MARTIN O J F, *et al.*. Resonant optical antennas [J]. *Science*, 2005, 308(5728): 1607-1609.
- [4] CUBUKCU E, KORT E A, CROZIER K B, *et al.*. Plasmonic laser antenna [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(9): 093120-093123.
- [5] KOHOUTEK J, GELFAND R M, BONAKDAR A, *et al.*. Composite nano-antenna integrated with quantum [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2010, 22(21): 1580-1582.
- [6] CHAU Y F, YEH H H, TSAI D P. A new type of optical antenna: plasmonics nanoshell bowtie antenna with dielectric hole [J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2010, 24(11): 1621-1632.
- [7] 史林兴, 王莉, 李华, 等. 表面等离子体激元透镜设计及其数值计算[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 831-835.
SHI L X, WANG L, LI H, *et al.*. Design and numerical simulation of Plasmon polariton nanolens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 831-835. (in Chinese)
- [8] TIWARI B N, HOCHMEISTER A, JEGERT G, *et al.*. Nano Antenna Array for Terahertz Detection [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2011, 59(10): 2751-2757.
- [9] DAVID A, NIKOLAI B, AMIR N, *et al.*. Light emission rate enhancement from InP MQW by plasmon nano-antenna arrays [J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9807-9813.
- [10] DANIEL W, PABLO A, PABLO A G, *et al.*. Longitudinal and transverse coupling in infrared gold nano antenna arrays: long range versus short range interaction regimes [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(16): 15047-15061.
- [11] JESLY J, AJITH R, VINCENT M. Surface plasmon near-field resonance characteristics of silver shell nanocylinders arranged in triangular geometry [J]. *Appl. Opt.* 2011, 50(33): 6277-6282.
- [12] 黄茜, 熊绍珍, 赵颖, 等. 表面等离子体激元非线性表面增强拉曼散射效应[J]. *物理学报*, 2012, 61(15): 157801-1-157801-6.
HUANG Q, XIONG S ZH, ZHAO Y, *et al.*. Nonlinear phenomenon of surface enhanced raman scattering caused by surface Plasmon [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, 61(15): 157801-1-157801-6. (In Chinese)
- [13] 熊尚, 罗雪丰, 韩立. 纯金膜表面等离子体增强的旋光效应[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1525-1531.
XIONG SH, LOU X F, HAN L. Plasmon enhanced Magneto-optical effect on surface of pure gold film [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1525-1531. (in Chinese)
- [14] 张兵心, 陈淑芬, 付雷, 等. 一种温控的可调表面等离子体光学器件[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0723005-1-0723005-6.
ZHANG B X, CHEN S F, FU L, *et al.*. A Temperature -Controlled Tunable Plasmonic dual-Band Absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0723005-1-0723005-6. (in Chinese)
- [15] http://en.wikipedia.org/wiki/Computational_electromagnetics#Finite_integration_technique_. 28FIT. 29.
- [16] <http://www.cst.com/Content/Applications/Article/Article.aspx?id=317>.
- [17] JEONG S Y, SEUNG G L, PARK S G, *et al.*. Drude model for the optical properties of a nano-

scale thin metal film revisited [J]. *J. Korean Phys. Soc.*, 2009, 55(6):2552-2555.

[18] JOHNSON P B, CHRISTY R W. Optical con-

stants of the noble metals [J]. *Phys. Rev.*, 1972, B 6(12):4371-4381.

作者简介:



袁纵横(1957—),男,贵州印江人,教授,1982年于贵州工学院获得学士学位,1987年于电子科技大学研究生班毕业,2000年于电子科技大学获得博士学位,主要从事光电信息处理及表面等离子应用技术的研究。E-mail: yuanzongheng@sina.com



苏睿(1989—),男,江西南昌人,硕士研究生,2010年于南昌航空大学获得学士学位,主要研究表面等离子体及应用。E-mail: Suruihao@163.com



黄静(1981—),女,山东威海人,硕士,讲师,2006年于桂林电子科技大学获得学士学位,2010年于贵州大学获得硕士学位,主要从事微电子技术和光电检测的相关研究工作。E-mail: 81659620@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)