

激光与光电子学进展

双层花瓣结构光学天线表面增强红外吸收特性研究

史兴政¹, 李春^{1*}, 范晓彦², 元光¹, 孙婉梅¹, 肖琳¹, 王哲栋¹, 王少东¹¹中国海洋大学信息科学与工程学院物理与光电工程学院青岛市光学光电子重点实验室, 山东 青岛 266100;²青岛科技大学数学物理学院, 山东 青岛 266061

摘要 设计了一种可用于中红外波段探测的双层花瓣结构光学天线, 利用有限时域差分方法, 分析了结构参数、入射光偏振方向对单层天线共振波长及尖端电场强度的影响。在优化单层结构的基础上, 计算了双层天线层间距(h)介于 $0.1\sim 0.8\ \mu\text{m}$ 时, 不同入射波长下上层天线尖端电场强度与入射光电场强度比值。为研究下层天线对于上层天线电场的增强机理, 固定入射光波长, 扩大天线层间距 h ($0.1\sim 3.6\ \mu\text{m}$), 对有无上层天线两种结构, 分析相同探测点电场强度比随 h 的变化。结果表明, $h < 1\ \mu\text{m}$ 时, 上层天线尖端电场增强主要来自于双层天线耦合增强, 其中 $h < 0.2\ \mu\text{m}$ 时, 上层天线尖端场强随着距离 h 的减小而降低, 主要因为近场耦合导致上层天线尖端能量转移到层间; $h > 1\ \mu\text{m}$ 时, 上层天线尖端电场增强主要来自于下层天线反射光的干涉增强。

关键词 表面光学; 光学天线; 表面增强红外吸收; 耦合增强; 干涉

中图分类号 O433

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220870

Study on Surface-Enhanced Infrared Absorption Characteristics of Double-Layer Petal-Structure Optical Antenna

Shi Xingzheng¹, Li Chun^{1*}, Fan Xiaoyan², Yuan Guang¹, Sun Wanmei¹, Xiao Lin¹, Wang Zhedong¹, Wang Shaodong¹

¹Optics and Optoelectronics Laboratory of Qingdao, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China;

²College of Mathematics and Physics, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, Shandong, China

Abstract A double-layer petal-structure optical antenna for mid-infrared detection is presented in this paper. The finite-difference time-domain method is used to analyze the effects of structural parameters and polarization direction of incident light on the resonant wavelength of the antenna and intensity of the electric field at the tip of the antenna. Based on the optimization of a single-layer structure, the ratios of the intensity of the electric field at the tip of the upper antenna to the intensity of the incident light are calculated with different incident wavelengths when the gap (h) between the two antennas is $0.1\sim 0.8\ \mu\text{m}$. To investigate the enhancing mechanism of the lower antenna on the electric field of the upper antenna, the variations of the electric-field intensity ratio of the same measured point with and without the upper antenna are analyzed under fixed incident wavelength and an enlarged gap h ($0.1\sim 3.6\ \mu\text{m}$). The results indicate that the enhancement of the electric field at the tip of the upper antenna is mainly attributed to the coupling effect of the double-layer antenna structure, with h being less than $1\ \mu\text{m}$. When h is less than $0.2\ \mu\text{m}$, the electric-field intensity at the tip of the upper antenna reduces with decreasing h . This is because the energy at the tip of upper antenna is transferred to the interlayer region owing to near-field coupling. However, when h exceeds $1\ \mu\text{m}$, the enhancement of the electric field at the tip of the upper antenna is mainly ascribed to the interference effect of the reflected light from the lower antenna.

Key words surface optics; optical antenna; surface-enhanced infrared absorption; coupling enhancement; interference

收稿日期: 2022-02-02; 修回日期: 2022-03-11; 录用日期: 2022-03-17; 网络首发日期: 2022-03-27

基金项目: 国家重点研发计划(SQ2019YFC140012)、国家自然科学基金(41476082)、电波环境特性及模化技术重点实验室基金(201803001)

通信作者: lichun08@ouc.edu.cn

1 引言

局域表面等离子体共振(LSPR)是当光照射贵金属材料的纳米颗粒上时引起的电子集体振荡现象,从而在贵金属结构表面纳米尺度的范围内产生极大的电场强度。利用该原理制作的纳米光学天线可以实现对生物化学分子的高灵敏度检测^[1-6]。光学天线局域表面等离子体共振波长和表面电场强度受到光学天线的材料、长度、厚度和宽度等一系列结构参数的影响^[7]。因此,通过对光学天线结构参数的控制和调整可以获得需要的共振波长,同时,共振波长对光学天线周围的环境变化十分敏感,改变入射光偏振态和周围环境折射率也可以对光学天线的共振波长进行调控^[8]。

表面增强红外共振吸收(SEIRA)是局域表面等离子体共振应用的重要方面,在中红外波段,光学天线利用局域表面等离子体实现了对低浓度分子的高灵敏度检测,即光学天线吸收红外光在其热点区域内实现对电场增强,当热点范围内分子的红外振动与局域表面等离子体发生耦合共振时,分子振动信号被提高了几个数量级,使得红外光谱技术的探测灵敏度得到极大的提高。因而,光学天线结构是获得增强红外信号的基础。

近几年对于LSPR结构设计有诸多研究和讨论,平面式光学天线凭借其较大的热点面积和电场强度成为研究的热门方向之一。2014年,Muskens团队^[9]研究了二聚体棒状阵列天线,二聚体棒状天线中间热点区域的电场强度远大于单根棒状末端,并且利用高密度的阵列结构有效增大了天线的热点区域,实现了高灵敏度检测。2019年, Lee等^[10]研究表明,相比于单根条形光学天线,弯曲形光学天线能有效地减少自身的辐射,从而局域更多的光能量产生更强的表面电场。利用平面复杂结构光学天线可以提高热点区域电场强

度,但进一步提高热点区域电场强度,从而实现光学天线的更高灵敏度检测,是光学天线设计面临的重要问题。双层光学天线结构是解决此问题的有效途径,其能够更好地局域入射光能量,有效提升天线热点区域电场强度^[11-12]。2015年, Halas团队^[13]设计了具有金镜层的二聚体扇形双层结构,扇形后端区域作为电子库可以提供大量电子,相比于平面二聚体扇形天线,实现了上层热点区域的场增强因子的提升。2017年, Halas团队^[14]利用金镜层制备了具有亚3 nm间隙的双层二聚体蝶形光学天线结构,极大提高上层热点区域的场增强因子,实现了超灵敏表面增强红外探测。虽然金镜双层结构可以实现上层天线热点区域电场强度的有效提升,但是双层结构的增强原理需要进一步分析,从而为光场的精确调控和实现热点区域更高电场增强提供理论支持。

基于以上思路,本文设计了一种双层花瓣状天线结构,在上层天线下方添加与上层天线相同结构参数的花瓣状光学天线。通过对单根花瓣状天线结构参数调控和模拟得出了最佳参数,实现了尖端区域电场增强。模拟了双层花瓣状光学天线结构,上层尖端热点电场强度可达到单层天线的2.74倍。通过改变上下层天线之间的距离 h 分析有无上层天线时的电场强度变化,得出在 $h < 1 \mu\text{m}$ 时上层天线的增强主要来自双层天线之间的耦合效果,在 $h > 1 \mu\text{m}$ 时上层天线的增强主要来自下层天线反射光的干涉增强效果。

2 模拟方法以及天线模型

本文采用有限时域差分法对天线进行了模拟。天线的结构参数如图1(a)、1(b)所示,花瓣形天线结构的尖端宽度设为 w_1 ,天线右端半圆盘结构半径为 r ,右端宽度 w_2 为半圆盘半径 r 的2倍,天线的长度为 l ,厚

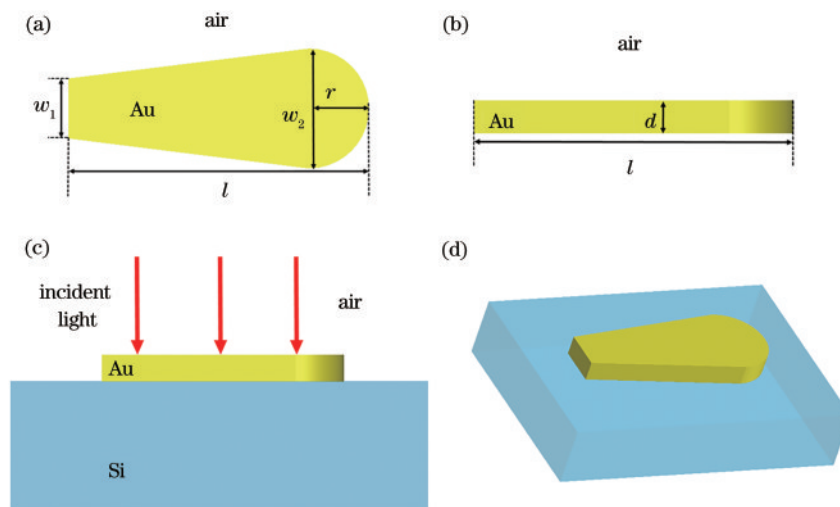


图1 天线模型和结构参数。(a)天线上视图;(b)天线前视图;(c)模拟示意图;(d)天线三维模型图

Fig. 1 Antenna model and structure parameter. (a) Top view of antenna; (b) front view of antenna; (c) schematic diagram of simulation; (d) 3D model of antenna

度为 d 。天线的上表面和光源保持距离为 $0.3 \mu\text{m}$ 不变,共振时天线热点区域始终位于尖端拐点,因此局域电场强度比值获取于距离光学天线尖端和 Si 基底上方分别为 5 nm 与 2 nm 远的监测点。平行的线偏振光从光学天线上方垂直入射,入射的平面波长范围取 $2\sim 16 \mu\text{m}$,入射光的初始相位为 0° ,基底材料为 Si,天线置于 Si 基底表面, Si 基底的厚度为 1 cm ,其厚度远大于天线厚度,如图 1(c)所示。天线周围网格尺寸为 5 nm 。图 1(d)是天线的三维模型图。

3 单层结构光学天线红外增强特性

3.1 天线结构参数对天线红外增强特性的影响

随着天线长度从 $0.8 \mu\text{m}$ 增加到 $1.2 \mu\text{m}$,天线的共振波长在 $5.82\sim 8.35 \mu\text{m}$ 范围内线性增加,共振时局域表面等离激元激发电场强度与入射光电场强度比在 $14.50\sim 21.47$ 的范围内同样线性增强。由图 2(a)可知,天线的长度对于天线的共振波长和共振场强比有着很大的影响,所以天线长度对调控纳米天线的共振波长进入中红外波段具有决定性作用。选择长度为 $1 \mu\text{m}$ 的光学天线,此时天线对应的共振峰为 $7.08 \mu\text{m}$ 。关于天线的一阶共振和高阶共振以及天线长度对于共振波长的影响,根据共振波长 $\lambda_{\text{eff}}^{[1]}$:

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{2L}{m} na_1 + a_2, \quad (1)$$

式中: L 为天线的长度; m 为振动的模式数; n 为天线周围环境的折射率; a_2 与天线的入射相位相关; a_1 代表了天线本身的属性。可以看出在其他参数保持不变的情况下,共振波长 λ_{eff} 和天线的长度 L 呈线性关系,本文中的天线长度 l 代表 L 。所以天线的长度对天线的共振波长有很大的影响,可将天线的共振波长调控到中红外波段硝酸根振动波长附近。

改变天线右端宽度即半圆盘结构直径 ($0.2\sim 0.5 \mu\text{m}$)。从图 2(b)中可知,天线的共振波长随着直径尺寸的增加在 $6.31\sim 7.43 \mu\text{m}$ 范围内呈线性增加。当天线的半圆盘直径增加时,半圆盘在沿着天线长轴方向的半径也随之增加,所以天线的长度也会有所提升。共振时电场强度比随着半圆盘直径的增加有先升高后降低的趋势,当半圆盘结构的直径在 $0.2\sim 0.35 \mu\text{m}$ 范围内时,天线共振时电场强度比增加速度较快,在半圆盘直径到达 $0.35 \mu\text{m}$ 的时候达到顶峰,之后随着半圆盘直径的增加缓慢降低,对于本结构,当天线的直径增加到 $0.35 \mu\text{m}$ 之后,对共振时电场强度比的影响较小。由于天线的半圆盘直径对于天线共振时电场强度比变化影响不大,直径 w_2 为 $0.4 \mu\text{m}$ 被选择,是尖端宽度的 2 倍。

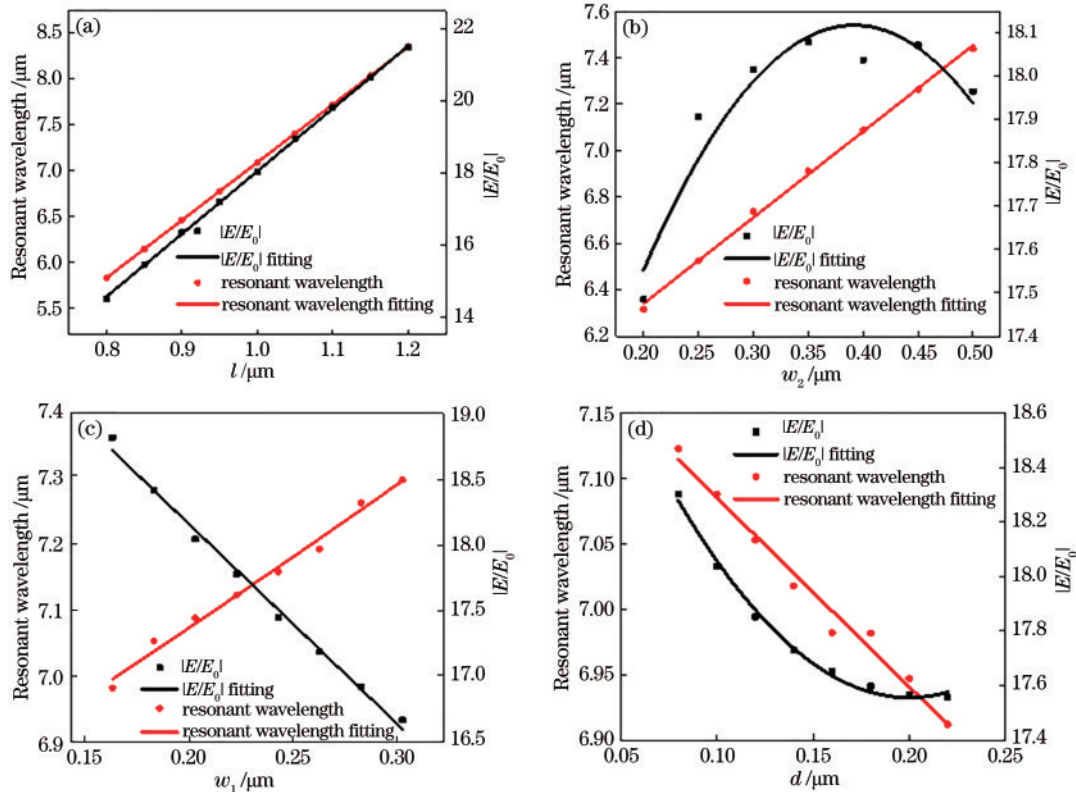


图 2 天线参数对天线红外增强特性的影响。(a)、(b)、(c)、(d)分别为不同 l 、 w_2 、 w_1 、 d 下共振波长及共振时 $|E/E_0|$ 变化的拟合曲线
Fig. 2 Influence of antenna parameters on infrared enhancement characteristics of antenna. (a), (b), (c), (d) are fitting curves of $|E/E_0|$ at resonant condition and resonant wavelength with different l , w_2 , w_1 , and d , respectively

改变天线尖端宽度 w_1 ($0.16 \sim 0.30 \mu\text{m}$), 天线的共振波长随着天线尖端宽度的增加在 $6.98 \sim 7.29 \mu\text{m}$ 范围内升高, 如图 2(c) 所示, 共振场强比随着尖端的宽度增加逐渐减小。由于尖端宽度增加, 光学天线的尖端角度增大, 共振时尖端位置电荷密度在逐渐减小, 且入射光强度不变, 所以产生的局域电场强度比在 $16.67 \sim 18.81$ 之间逐渐降低, 尖端宽度对共振电场强度比的变化有一定影响。尖端宽度选取 $0.2 \mu\text{m}$, 在尖端宽度对共振电场强度比影响较小的情况下, 选择较大的尖端宽度尺寸可以提供更大的热点面积, 弥补了共振电场强度小的不足, 并且此时的共振波长能够达到 $7.08 \mu\text{m}$ 。

改变天线厚度 ($0.80 \sim 0.22 \mu\text{m}$), 从图 2(d) 中可知, 天线的共振波长和共振时电场强度比随着天线厚度的增加逐渐降低。对于共振波长, 天线厚度在 $0.8 \sim 0.22 \mu\text{m}$ 范围变化时, 天线的共振波长在 $6.91 \sim 7.12 \mu\text{m}$ 范围内总体呈线性降低的趋势。在光学天线中, 局域电场的增强集中在天线结构的尖角、狭缝或者拐角位置^[15]。表面等离极化激元(SPP)向尖端传播可以产生能量集中^[16]并且尖端位置电荷聚集导致其电荷浓度越大, 表面产生的电场强度越大^[17], 因此天线热点区域电场增强比变化映射了此位置电荷浓度的变化。由图 2(d) 可知, 当天线厚度增加时, 其电场增强比从 18.30 逐渐减小至 17.56 , 因此该位置电子浓度逐渐变小。相比于天线的长度对共振波长的影响, 天线厚度对天线共振波长的影响较小。在不影响共振时天线尖端电场强度比的情况下, 选择天线的厚度为 $0.1 \mu\text{m}$, 在尖端位置提供较大面积的热点区域, 提高监测灵敏度, 并且共振波长位于 $7.08 \mu\text{m}$ 。

3.2 入射光对天线红外增强特性影响

确定了天线的各项参数, w_1 为 $0.2 \mu\text{m}$, w_2 为 $0.4 \mu\text{m}$, d 为 $0.1 \mu\text{m}$, l 为 $1 \mu\text{m}$, θ 为 0° 。在保持天线的参数和天线与光源之间的距离 $0.3 \mu\text{m}$ 不变的情况下, 天线长轴和垂直入射平行光的偏振方向夹角在 $0 \sim 90^\circ$ 之间变化。由图 3 可知, 共振时天线局域表面等离基元激发电场强度与入射光电场强度比值随着 θ 的增加逐渐降低, 当 θ 在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间减小速率比较缓慢, 但是当 θ 大于 30° 时, 最大电场强度比随着 θ 的增加快速减小。对于共振波长随入射光偏振方向的变化, θ 为 0°

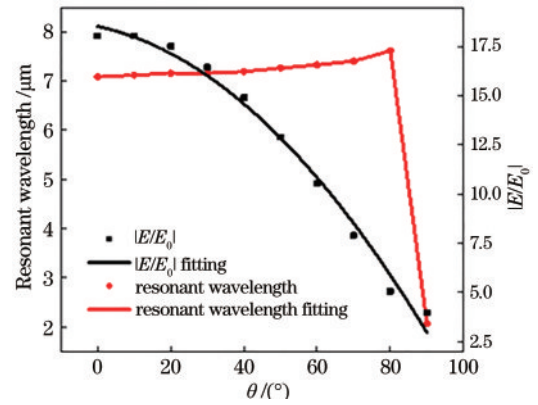


图 3 入射光对天线红外增强特性的影响

Fig. 3 Influence of incident light on infrared enhancement characteristics of antenna

时, 天线只在长轴方向产生等离子体共振, 天线的一阶共振波长为 $7.08 \mu\text{m}$, 随着 θ 增加到 80° 时共振波长在 $7.08 \sim 7.61 \mu\text{m}$ 范围内变化, 当 θ 达到 90° 时, 共振波长骤减到 $2.07 \mu\text{m}$ 。随着 θ 增加, 入射线偏振光在天线长轴和垂直于长轴方向都有分量, 所以天线产生的一阶共振峰随着 θ 的增加逐渐降低。但是当 θ 达到 90° 时, 入射线偏振光长轴方向分量彻底消失, 由于天线的共振波长和共振电场强度比受天线长度影响较大, 此时相当于一个长度为 $0.3 \mu\text{m}$ 并且宽度为 $1 \mu\text{m}$ 的光学天线, 所以产生的共振波长移动到 $2.07 \mu\text{m}$ 。选择 θ 为 0° 时沿天线长轴方向入射, 以便获得较大的共振波长和较大的电场强度比。

4 双层结构

4.1 结构示意图

单层花瓣状天线的局域表面等离激元激发电场强度与入射光电场强度比值为 18.03 , 为进一步提升天线的共振电场强度, 设计了如图 4(a) 所示的双层天线结构。基于优化的单层天线结构 (l 为 $1 \mu\text{m}$, w_1 为 $0.2 \mu\text{m}$, w_2 为 $0.4 \mu\text{m}$, w_2 为 $0.2 \mu\text{m}$), 在单层天线正下方的 Si 材料内平行放置一个结构参数完全相同的花瓣状天线, 从而构成双层天线结构。波长为 $2 \sim 16 \mu\text{m}$ 的线偏振光垂直于上层天线入射, 偏振方向依旧沿着天线的长轴。通过改变上下层天线之间的间距 h [图 4

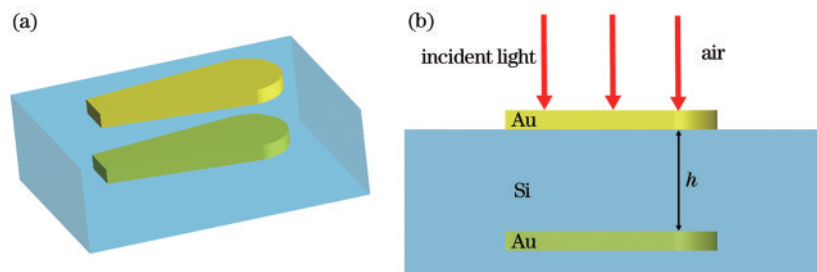


图 4 双层天线模型图。(a) 三维结构图; (b) 剖面结构图

Fig. 4 Model of double-layer antenna. (a) 3D structure diagram; (b) section structure diagram

(b)], 利用两层天线之间的近场耦合和干涉效应, 实现上层天线尖端位置电场的有效增强。

4.2 双层结构实现上层局域电场增强

上下层天线的结构参数保持一致, 改变上下两层天线的层间距离 h 从 $0.1 \mu\text{m}$ 到 $0.8 \mu\text{m}$, 如图 5 所示, 局域电场强度值获取于距离上层光学天线尖端和 Si 基底上方分别为 5 nm 与 2 nm 处。从图 5 可知, 共振时上层天线尖端处局域表面等离子体激发电场强度与入射光电场强度比值随 h 增加 ($0.1 \sim 0.25 \mu\text{m}$) 而升高, 间距 h 为 $0.25 \mu\text{m}$ 时场强比值达到最高 50.96 , 是单层花瓣状天线的 2.82 倍, 其共振波长为 $7.40 \mu\text{m}$ 。当 h 从 $0.25 \mu\text{m}$ 继续增加到 $0.8 \mu\text{m}$ 时, 上层天线的共振电场强度比随着 h 的增加开始降低。层间距 $0.8 \mu\text{m}$ 双

层天线共振电场强度比值为 32.03 , 相比于单层天线共振波长比 18.03 依旧有很大的提升。这是由于在双层天线层间近场耦合以及远场干涉效应增强了上层天线尖端电场强度, 对于耦合效应, 上层天线电偶极子会在下层天线上感应出极性相反的偶极子, 上下天线反向电场提高了上层天线尖端处电场强度。但是不同间距 h 对上层天线场强增强效果不同, 当 h 为 $0.25 \mu\text{m}$ 时, 对上层天线场强增强效果最好。双层花瓣天线共振波长随层间距增加也产生改变。当层间距从 $0.1 \mu\text{m}$ 增加到 $0.2 \mu\text{m}$, 共振波长受到两个天线耦合的影响发生蓝移; 当层间距在 $0.2 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 范围增加时, 共振波长在双层天线耦合的影响下逐渐红移至 $8.98 \mu\text{m}$ 。

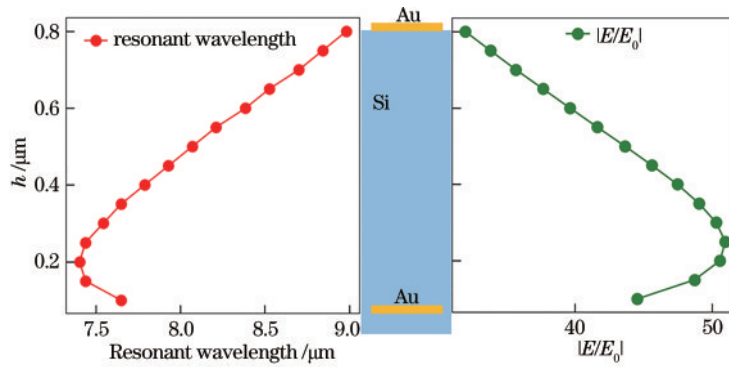


图 5 共振波长及共振 $|E/E_0|$ 随不同层间距的变化曲线

Fig. 5 Fitting curves of $|E/E_0|$ at resonant condition and resonant wavelength with different h

4.3 上下层天线长轴夹角改变

图 6 中曲线 2 代表单层天线表面等离子体激发电场强度和入射光电场强度比值随波长的变化, 曲线 5、曲线 3、曲线 1 以及曲线 4 分别代表双层天线结构下层天线长轴相对于上层天线长轴旋转 0° 、 45° 、 90° 和 180° 时, 上下层天线尖端电场强度和入射光电场强度比值随入射光波长变化曲线。上下层天线层间距 h 保持 $0.25 \mu\text{m}$ 不变, 作为参照的红色曲线获取于具有相同

结构参数的单层天线。双层结构中上下天线长轴夹角为 0° 时电场强度比是最大的, 大小为 50.96 。当上下天线之间的夹角变成 45° 时的电场强度比相对于 0° 时下降至 32.26 。上下天线长轴夹角为 90° 时共振波长受到下层天线的影产生蓝移, 上下层天线垂直, 下层天线对于上层耦合增强效果消失, 上层天线尖端电场强度与单层天线时差别不大。当上下天线长轴夹角变成 180° 时, 上下层天线都可以沿着长轴方向产生共振 ($h =$

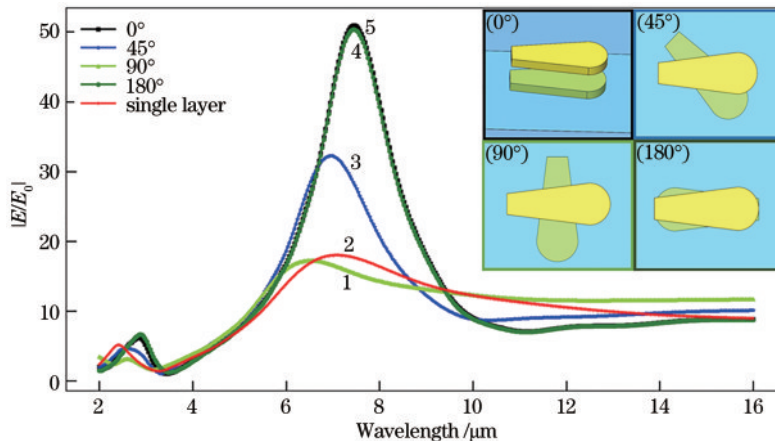


图 6 下层天线旋转不同角度后 $|E/E_0|$ 随入射光波长变化

Fig. 6 Variation of $|E/E_0|$ with incident wavelength in different rotation angles of lower antenna

0.25 μm),两个天线之间产生有效的耦合,所以场强比达到 50.36,接近 50.96。上下天线长轴夹角 180°时,上层天线尖端下方对应下层天线的半圆盘结构,但是场强比相比于夹角 0°时上层天线尖端对应下层天线尖端的场强比减小了 0.6,证明上层天线场强的提升主要来自双层结构的耦合增强。由于下层天线旋转 180°之后两个天线的尖端位置相反,导致耦合效果微弱于 0°时的耦合效果,所以场强比略有降低。

4.4 近场耦合与远场干涉效应分析

为了进一步讨论层间距对双层天线共振场强影响,扩大上下层天线间距 h 范围至 0.1~3.6 μm,分析双层结构上层天线尖端电场强度比,及去掉上层天线 Si 基底表面受到入射光和下层天线反射光干涉产生电场强度与入射光电场强度比值随层间距增加的变化。两种模型的入射光波长均为 7.26 μm,存在上层天线时场强测量点位于 Si 基底上方 2 nm 处,无上层天线时,场强测量点同样位于 Si 基底表面上方 2 nm 处,模型如图 7(a)插图(i)~(ii)所示。圆标曲线是双层结构

上层天线尖端位置电场强度比随层间距 h 变化的曲线。方标曲线为去掉上层天线,位于 Si 基底表面受到的入射光和下层天线反射光干涉后电场强度与入射光电场强度比值随层间距 h 的变化曲线,如图 7(a)所示,两种曲线变化基本符合正弦变化规律。对于方标曲线,波峰和波谷之间的间距为 $0.55 \pm 0.05 \mu\text{m}$ 。当距离大于 1 μm 时,圆标曲线的波峰和波谷之间距离为 0.55 μm,说明在距离足够远的情况下,双层天线的上层尖端电场强度比和去掉上层天线时的 Si 表面电场强度比的变化具有相似的规律。当距离小于 1 μm 的时候,方标曲线波峰和波谷之间距离依旧在 $0.55 \pm 0.05 \mu\text{m}$,圆标曲线的波峰和波谷之间距离改变,其距离增加到 0.85 μm。由此可知, $h < 1 \mu\text{m}$ 时,耦合增强效果占主导,完全掩盖了下层天线反射光的干涉相消效果。在距离较远时,上层天线的尖端电场增强来自于单层天线等离激元共振增强与下层天线反射光的干涉增强共同效果;层间距离较近时,上层天线的尖端电场增强来自于双层结构之间的耦合效果。

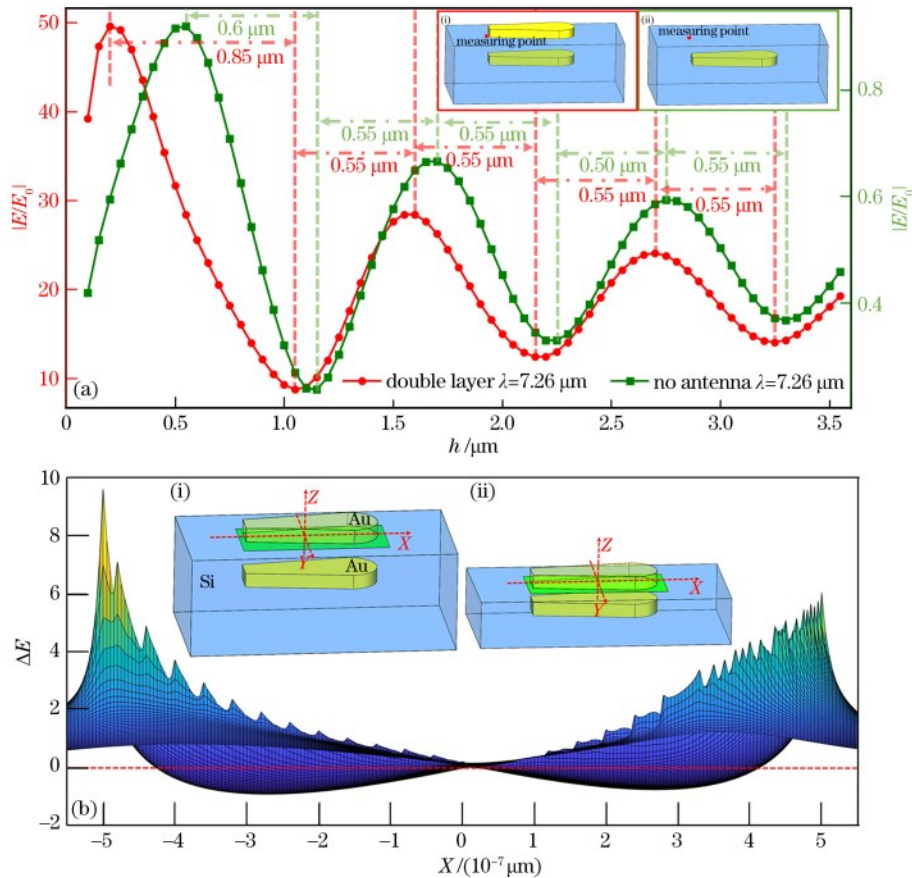


图 7 双层光学天线结构耦合与干涉增强的界定。(a)有上层天线情况下同一点处电场强度比随着距离(h)变化曲线;(b)面场强比差值 ΔE 在 XZ 面投影图

Fig. 7 Definition of coupling and interference enhancement with double-layer optical antenna structure. (a) Curve of $|E/E_0|$ in different h at same point with/without upper antenna; (b) projection of surface field intensity ratio difference ΔE on XZ plane

为了分析双层结构天线其上层天线尖端能量转移分布,选取层间距分别为 0.1 μm 和 0.2 μm 双层天线为研究对象,均计算两种层间距双层天线其上层天线

下表面下方 2 nm 处,长 1.1 μm,宽 0.5 μm 区域内电场强度与入射电场强度比值,表示为 $E_{0.1\mu\text{m}}/E_0$ 和 $E_{0.2\mu\text{m}}/E_0$ 。该区域位于 Si 基底内,建立 XYZ 坐标

系,如图 7(b)插图(i)~(ii)所示。定义面场强比差值 ΔE 为

$$\Delta E = E_{0.2\mu\text{m}}/E_0 - E_{0.1\mu\text{m}}/E_0 \quad (2)$$

图 7(b)为两个面场强比差值 ΔE 在 XZ 面投影图,从图中看出,在横坐标 $X = -0.5 \mu\text{m}$ 的尖端位置和 $X = 0.5 \mu\text{m}$ 的半圆盘边缘处差值 $\Delta E > 0$,可知层间距 $h = 0.2 \mu\text{m}$ 时上层天线尖端的电场强度比大于层间距 $h = 0.1 \mu\text{m}$ 尖端的电场强度比; X 取值在 $-0.425 \sim 0.425 \mu\text{m}$ 层间区域时 $\Delta E < 0$,说明层间距 $h = 0.2 \mu\text{m}$ 时的上层天线层间的电场强度比小于距离 h 为 $0.1 \mu\text{m}$ 层间的电场强度比。由上面分析可得,当层间距离减小到 $0.1 \mu\text{m}$ 时,尖端处电场强度减小是由于尖端能量转移到了天线层间区域^[18]。

5 结 论

利用有限时域差分方法,研究了结构参数对单层花瓣状光学天线红外增强特性的影响以及双层结构的层间耦合和干涉对上层天线热点区域电场增强的机理。研究表明,天线的结构参数(宽度、厚度、长度、尖端宽度、半圆盘直径)和环境参数(光源偏振方向)对光学天线的共振波长和电场增强有不同程度的影响。对于单层天线结构,入射光激发天线热点处的电场增强比值可达 18.03。对于双层天线结构,上层天线电场增强比值最大可达 50.96,是单层结构的 2.82 倍。固定层间距离 $h = 0.25 \mu\text{m}$ 时,通过调节上下天线长轴夹角,可证明上层天线的尖端电场增强主要来自于上下层之间的耦合效应。为进一步分析下层天线对上层天线的影 响,增大上下层天线之间的距离 h ($0.1 \sim 3.6 \mu\text{m}$),探讨了耦合和干涉对于上层天线的不同增强效果,得出层间距 $h < 1 \mu\text{m}$ 时,上层天线电场增强主要来自于层间耦合;层间距 $h > 1 \mu\text{m}$ 时,上层天线电场增强主要来自下层天线的干涉增强。综上,对双层结构光学天线电场增强机理的分析为深入研究双层天线提供了理论支持,该结构为实现更高的局域电场增强提供了一种可行方案。

参 考 文 献

- [1] 李楠楠,章瀚,王建方. 局域表面等离子体增强红外吸收[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49(12): 30-43.
Li N N, Zhang H, Wang J F. Surface-enhanced infrared absorption[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2019, 49(12): 30-43.
- [2] Dregely D, Neubrech F, Duan H G, et al. Vibrational near-field mapping of planar and buried three-dimensional plasmonic nanostructures[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2237.
- [3] Limaj O, Etezadi D, Wittenberg N J, et al. Infrared plasmonic biosensor for real-time and label-free monitoring of lipid membranes[J]. Nano Letters, 2016, 16(2): 1502-1508.

- [4] Huck C, Neubrech F, Vogt J, et al. Surface-enhanced infrared spectroscopy using nanometer-sized gaps[J]. ACS Nano, 2014, 8(5): 4908-4914.
- [5] Li Y Q, Su L, Shou C, et al. Surface-enhanced molecular spectroscopy (SEMS) based on perfect-absorber metamaterials in the mid-infrared[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 2865.
- [6] Dong B W, Ma Y M, Ren Z H, et al. Recent progress in nanoplasmonics-based integrated optical micro/nano-systems[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(21): 213001.
- [7] 马守宝,刘琼,钱晓晨,等. 铝纳米颗粒表面等离子体共振峰可控性研究[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0931001.
Ma S B, Liu Q, Qian X C, et al. Controllability study of surface plasmon resonance spectra of aluminium nanoparticles[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0931001.
- [8] 洪昕,王晨晨. 单芯帽纳米颗粒的光学性质[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0524001.
Hong X, Wang C C. Optical properties of single core-capped nanoparticles[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0524001.
- [9] Abb M, Wang Y D, Papasimakis N, et al. Surface-enhanced infrared spectroscopy using metal oxide plasmonic antenna arrays[J]. Nano Letters, 2014, 14(1): 346-352.
- [10] Wei J X, Li Y, Chang Y H, et al. Ultrasensitive transmissive infrared spectroscopy via loss engineering of metallic nanoantennas for compact devices[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(50): 47270-47278.
- [11] Bochterle J, Neubrech F, Nagao T, et al. Angstrom-scale distance dependence of antenna-enhanced vibrational signals[J]. ACS Nano, 2012, 6(12): 10917-10923.
- [12] Srajer J, Schwaighofer A, Ramer G, et al. Double-layered nanoparticle stacks for surface enhanced infrared absorption spectroscopy[J]. Nanoscale, 2014, 6(1): 127-131.
- [13] Brown L V, Yang X, Zhao K, et al. Fan-shaped gold nanoantennas above reflective substrates for surface-enhanced infrared absorption (SEIRA)[J]. Nano Letters, 2015, 15(2): 1272-1280.
- [14] Dong L L, Yang X, Zhang C, et al. Nanogapped Au antennas for ultrasensitive surface-enhanced infrared absorption spectroscopy[J]. Nano Letters, 2017, 17(9): 5768-5774.
- [15] 徐娅,边捷,张伟华. 局域表面等离子体纳米光学传感器的原理与进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(20): 202407.
Xu Y, Bian J, Zhang W H. Principles and processes of nanometric localized-surface-plasmonic optical sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(20): 202407.
- [16] Stockman M I. Nanofocusing of optical energy in tapered plasmonic waveguides[J]. Physical Review Letters, 2004, 93(13): 137404.

- [17] 刘家源, 安志勇, 李亚红, 等. 表面等离子体激元共振的场增强理论研究[J]. 光电技术应用, 2015, 30(4): 11-15, 54.
Liu J Y, An Z Y, Li Y H, et al. Theoretical research on field enhancement of surface plasma polariton[J]. Electro-Optic Technology Application, 2015, 30(4): 11-15, 54.
- [18] 杨柳, 蒋世磊, 孙国斌, 等. 等离激元增强金属-硅组合微结构近红外吸收[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2124003.
Yang L, Jiang S L, Sun G B, et al. Plasmonic enhanced near-infrared absorption of metal-silicon composite microstructure[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2124003.