

doi:10.3788/gzxb20184711.1131001

介质光栅/金属薄膜与银立方体复合结构的 SPs 研究

王向贤¹, 庞志远¹, 张东阳¹, 白雪琳¹, 冯旺军¹, 祁云平²

(1 兰州理工大学 理学院, 兰州 730050)

(2 西北师范大学 物理与电子工程学院, 兰州 730070)

摘要:理论设计了介质光栅/金属薄膜与银纳米立方体复合结构,通过有限元方法数值模拟计算了该结构中的超高电场增强因子.使用 442 nm 波长的激光作为表面等离子体的激发光源,研究不同尺寸银纳米立方体的消光谱以及不同光栅周期和厚度的反射光谱,得到的该复合结构的最优参数为:光栅周期 312 nm,厚度 90 nm,银纳米立方体 70 nm.在最优参数条件下,数值模拟了复合结构中的电场增强分布,介质光栅/金属薄膜与银纳米立方体复合结构由于存在局域表面等离子体和传播表面等离子体的共振耦合,使得光栅脊与银纳米立方体下顶点接触处热点的电场增强因子高达 1.53×10^6 .该复合结构产生的超高电场增强因子,有望应用于表面增强拉曼散射的研究.

关键词:介质光栅;银立方体;表面等离子体;电场增强;有限元方法

中图分类号:O433; O436

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)11-1131001-8

SPs of Composite Structure of Dielectric Grating/Metal Film with Silver Cube

WANG Xiang-xian¹, PANG Zhi-yuan¹, ZHANG Dong-yang¹,
BAI Xue-lin¹, FENG Wang-jun¹, QI Yun-ping²

(1 School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(2 College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: A composite structure of dielectric grating/metal film with silver nanocubes is theoretically designed, and the ultrahigh electric field enhancement factor in the composite structure is numerically simulated using the finite element method. The surface plasmons are excited by the laser with wavelength of 442 nm. By discussing the extinction spectrum of the silver nanocubes with different sizes, and the reflection spectra of the grating with different period and thickness, the optimal parameters are selected, which the side length of silver nanocubes is 70 nm, the period of grating is 312 nm and the thickness is 90 nm. Under the condition of optimal parameters, electric field intensity distribution in the composite structure is calculated. For the resonant coupling of local surface plasmon and propagation surface plasmon in the dielectric grating/metal film with silver nanocubes composite structure. The electric field enhancement factor of hot spot is as high as 1.53×10^6 , which exists in the position between grating ridge and the lower vertexes of silver nanocube. The ultrahigh electric field enhancement generated by the composite structure has the potential to be applied to the study of surface-enhanced Raman scattering.

Key words: Dielectric grating; Silver cube; Surface plasmon; Electric field enhancement; Finite element method

OCIS Codes: 310.0310; 050.2770; 050.6624; 240.0310; 240.6680

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61505074, 61865008)和国家重点基础研究发展计划(No.2013CBA01703)资助

第一作者:王向贤(1980-),男,副教授,博士,主要研究方向为微纳光学,表面等离子体光学,SERS.Email:wangxx869@126.com

收稿日期:2018-06-02;录用日期:2018-08-21

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

微纳结构作为表面等离子体(Surface Plasmons, SPs)光学研究的核心基础,一直是研究人员关注的热点,特别是在光刻^[1-3]、传感^[4-8]、太阳能电池^[9-11]以及表面增强拉曼散射(Surface Enhanced Raman Scattering, SERS)^[12-15]等领域更是得到了广泛的应用.最近几年,研究人员致力于微纳结构中热点处的电场增强的研究.在微纳结构中,由于局域电场增强主要取决于结构的几何形状和尺寸,因此,如何设计出具有超高电场增强的微纳结构,是研究人员优先考虑的因素.ZHANG Jie^[16]等运用离散偶极近似(Discrete Dipole Approximation, DDA)模拟并制备了银纳米颗粒修饰的碳纳米管阵列结构,在此结构中,银纳米粒子之间热点处的电场增加了近9倍.ZHANG Yi^[17]等研究了银纳米月牙和圆盘组装的结构,通过改变月牙与圆盘的间隙以及月牙两针尖的距离,得到了针尖处局域电场增强因子为670.WU Kai-yu^[18]等研究了硅柱银纳米帽阵列,通过改变硅柱的直径,在特定入射光波长激发下,得到了银纳米帽之间热点处的电场增强高达263.LAGARKOV A^[19]等研究了金纳米颗粒修饰的硅纳米锥阵列结构,得到了纳米锥上金纳米球之间热点处的电场增强为629.这些结构主要是金属纳米颗粒之间局域表面等离子体的相互耦合来提高电场增强,其结构单一,电场增强较小,为了进一步提高电场增强,研究人员制备了具有局域表面等离子体和传播表面等离子体相互耦合的复合结构.

FU Qiang^[20]等研究了银纳米立方体与银光栅复合结构中的表面等离子体,发现复合结构中等离子体的相互作用明显高于单独的银纳米立方体.CROZIER K B^[21]等研究了二维周期性金纳米盘阵列、二氧化硅间隔层和金薄膜组成的复合结构,通过改变金纳米盘的尺寸和阵列周期,发现共振条件下复合结构中单个金纳米盘的场增强高达5000,远高于玻璃基片上单个金纳米盘的电场增强.ZHOU F^[22]等设计了一种用二氧化硅做间隔层的金纳米盘阵列和金薄膜复合结构,并用纳米蝴蝶结代替部分纳米盘产生缺陷,研究了局域表面等离子体和传播表面等离子体之间的相互共振耦合,这种复合结构热点处的电场增强因子高达 4.2×10^6 .但是,这些复合结构在制备上有一定难度且成本较高.

在特定波长的入射光照射下,金属纳米颗粒可以激发局域表面等离子体,介质光栅/金属薄膜结构可以激发传播表面等离子体.显然,局域表面等离子体和传播表面等离子体的共振耦合,可以进一步提高热点处的电场强度.相较于金属光栅而言,介质光栅制备简单、成本低廉而且损耗较小.介质光栅可以通过激光干涉方法很容易制备,银纳米立方体可以通过化学制备,而且其尺寸可以进行有效调控^[23].因此,本文设计了一种介质光栅/金属薄膜与银纳米立方体的复合结构,通过激发局域表面等离子体和传播表面等离子体的共振耦合,得到超高的电场增强.这种介质光栅/金属薄膜与银纳米立方体的复合结构,有望作为SERS衬底,用于超低浓度的检测.

1 SPs 激发及基本理论

图1为介质光栅/金属薄膜与银立方体复合结构示意图.此结构由下至上分别为二氧化硅基底、银薄膜、二氧化硅介质光栅和银纳米立方体,其中,光栅占空比为0.5,金属薄膜厚度为45 nm,银纳米立方体在光栅槽和光栅脊的中心位置.此外,由于SPs只能由TM偏振光激发,研究中选取波长为442 nm的TM偏振光正入射结构表面.

在TM偏振光作为激发光的条件下,介质光栅/金属薄膜与银纳米立方体复合结构中,银薄膜表面的传播表面等离子体和银纳米立方体的局域表面等离子体被激发,在激发传播表面等离子体、局域表面等离子体以及两种表面等离子体的相互共振耦合作用下,该结构热点处的电场可以得到很大的提高.在该结构中,银纳米立方体中被激发的表面等离子体的共振波长可以通过金属纳米颗粒的光散射理论^[24]描述为

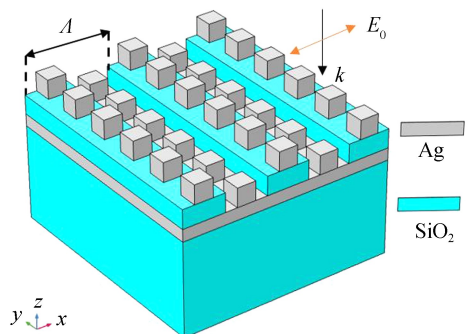


图1 介质光栅/金属薄膜与银纳米立方体复合结构示意图
Fig.1 Schematic of the composite structure of dielectric grating/metal film with silver nanocubes

$$\begin{aligned}\sigma_{sc} &= \frac{1}{I_0} \iint (\mathbf{n} \cdot \mathbf{S}_{sc}) dS \\ \sigma_{abs} &= \frac{1}{I_0} \iiint Q dV \\ \sigma_{ext} &= \sigma_{sc} + \sigma_{abs}\end{aligned}\quad (1)$$

式中, σ_{sc} 为纳米颗粒的散射截面, I_0 为入射光强度, \mathbf{n} 为由纳米颗粒表面向外的单位法向矢量, \mathbf{S}_{sc} 为坡印廷矢量; σ_{abs} 为纳米颗粒的吸收截面, Q 为纳米颗粒的功率损耗密度; σ_{ext} 为纳米颗粒的消光截面, 是散射截面和吸收截面的和. 通过对不同尺寸银纳米立方体消光谱的计算, 可以得到使用 442 nm 波长的激光作为 SPs 的激发光时, 所需银纳米立方体的最优尺寸.

介质光栅金属薄膜复合结构中的表面等离激元的激发需要满足波矢匹配条件

$$k_0 n_a \sin \theta + m \frac{2\pi}{\Lambda} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_{eff}}{\epsilon_m + \epsilon_{eff}}}\quad (2)$$

式中, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为激发光在真空中的波矢, θ 为激发光的入射角, n_a 为空气折射率, m 为衍射级数, Λ 为光栅周期, ϵ_m 为金属薄膜的介电常数, ϵ_{eff} 为光栅结构的有效介电常数. 通过数值模拟不同光栅厚度条件下, 光栅周期与反射率的关系曲线, 得到光栅的最优条件.

2 研究结果与讨论

2.1 银纳米立方体的尺寸优化

图 2(a) 为通过有限元方法数值模拟计算的不同尺寸的银纳米立方体的消光谱, 尺寸为 40 nm, 50 nm, 60 nm, 70 nm, 80 nm, 90 nm 和 100 nm 的银立方体的消光谱的峰值分别在 400 nm, 405 nm, 425 nm, 440 nm, 455 nm, 475 nm 和 490 nm, 其中, 尺寸为 70 nm 的银立方体消光谱峰的位置在 440 nm, 接近于本文选取的激发光波长, 因此, 计算中选取银纳米立方体的尺寸为 70 nm. 电场增强定义为入射光辐照下, 结构中的电场强度与入射光电场强度的比值的平方, 即 $|E/E_0|^2$. 图 2(b) 为 442 nm 激发光条件下, 选取银立方体和二氧化硅衬底的分界面作为 z 轴的坐标原点, 尺寸为 70 nm 的单个银纳米立方体在二氧化硅衬底上的电场增强分布, 其电场增强主要分布于顶点尖端处. 银纳米立方体下表面与二氧化硅介质层接触, 颗粒放置在空气中, 银纳米立方体顶点处所接触的介质不一样, 其电场增强分布也有所不同, 在银纳米立方体与二氧化硅接触的表面, 热点的电场增强最大, 其电场增强因子为 1.68×10^5 .

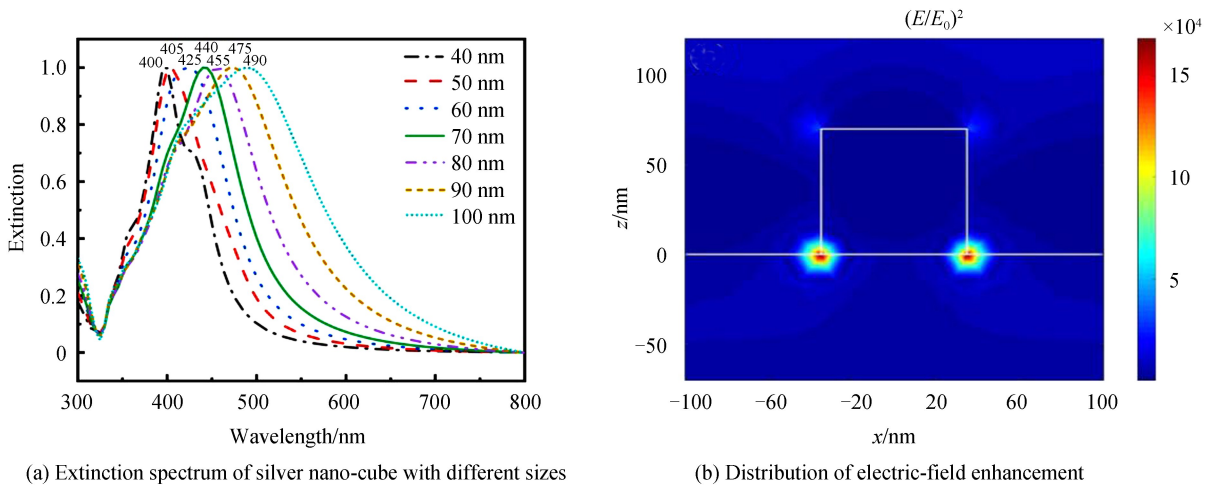


图 2 不同尺寸银纳米立方体的消光谱和尺寸为 70 nm 银纳米立方体的电场增强分布

Fig.2 The extinction spectrum of silver nano-cube with different sizes and the distribution of electric-field enhancement of 70 nm silver nano-cube

2.2 介质光栅/金属薄膜结构的参数优化

在数值模拟优化光栅结构时, 选取 442 nm 波长的激发光、银薄膜厚度 45 nm、光栅占空比为 0.5, 选取金

属薄膜和二氧化硅衬底的分界面作为 z 轴的坐标原点. 在不同光栅厚度条件下, 数值模拟计算了反射率和光栅周期的关系, 如图 3(a). 研究发现, 不同光栅厚度都有一个与之对应的最优周期, 随着光栅厚度增大, 与之对应的光栅的最优周期减小. 在该条件下, 进一步数值模拟计算了光栅的反射光谱, 如图 3(b). 结果表明, 共振峰的位置在 442 nm, 这和入射的激发光波长相同. 经过反射光谱的分析, 选取光栅结构的最优参数为: 周期 312 nm, 厚度 90 nm. 图 3(c) 为最优参数条件下, 介质光栅/金属薄膜结构的电场增强分布, 以及在介质光栅与金属薄膜分界面 ($z=45$ nm) 处不同位点的电场增强因子. 在金属薄膜与介质光栅界面, 其热点处的电场增强因子高达 4.13×10^5 .

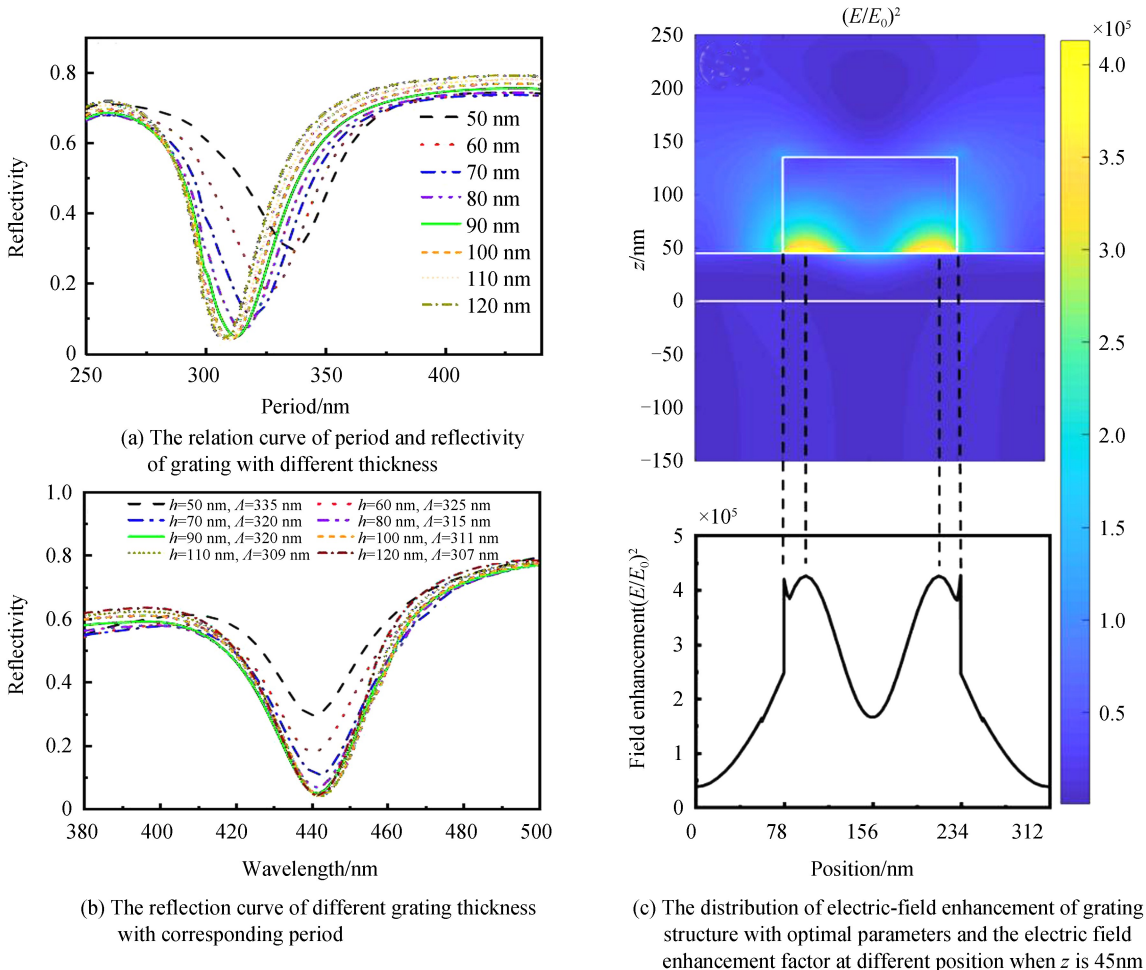


图 3 不同参数条件下的反射率及最优参数条件下电场增强分布图和 $z=45$ nm 时不同位置处的电场增强因子
Fig.3 The reflectivity of grating with different parameters and the distribution of electric-field enhancement of grating structure with optimal parameters and the electric field enhancement factor at different position when z is 45 nm

2.3 介质光栅/金属薄膜与银立方体复合结构的电场增强

研究介质光栅/金属薄膜与银纳米立方体复合结构中的电场增强. 由于结构的周期性, 本文选择一个周期进行模拟. 图 4 为入射光 442 nm, 同样选取金属薄膜和二氧化硅衬底的分界面作为 z 轴的坐标原点, 在最优参数结构条件下复合结构中的电场增强分布以及特殊位置的电场增强因子. 研究发现, 热点主要分布在光栅槽中银纳米立方体的上顶点以及光栅脊与银纳米立方体下顶点接触处.

图 4 (a)、(b)、(c) 和 (d) 分别为介质光栅/金属薄膜与银纳米立方体复合结构中 $z=205$ nm、 $z=45$ nm、 $z=115$ nm 和 $z=135$ nm 时, 截面线上不同位置处的电场增强因子. 其中, $z=135$ nm 时, 截面线上热点处的电场增强最大. 经过计算, 得到的最大场强位置在光栅脊与银纳米立方体下顶点接触处, 其热点处电场增强因子高达 1.53×10^6 . 与单独的银纳米立方体结构、介质光栅/金属薄膜结构比较, 复合结构的电场增强因子有很大提高, 这是由于复合结构中同时激发的传播表面等离子体和局域表面等

离子体相互共振耦合. 接下来, 对介质光栅/金属薄膜结构是否有银纳米立方体复合做进一步讨论.

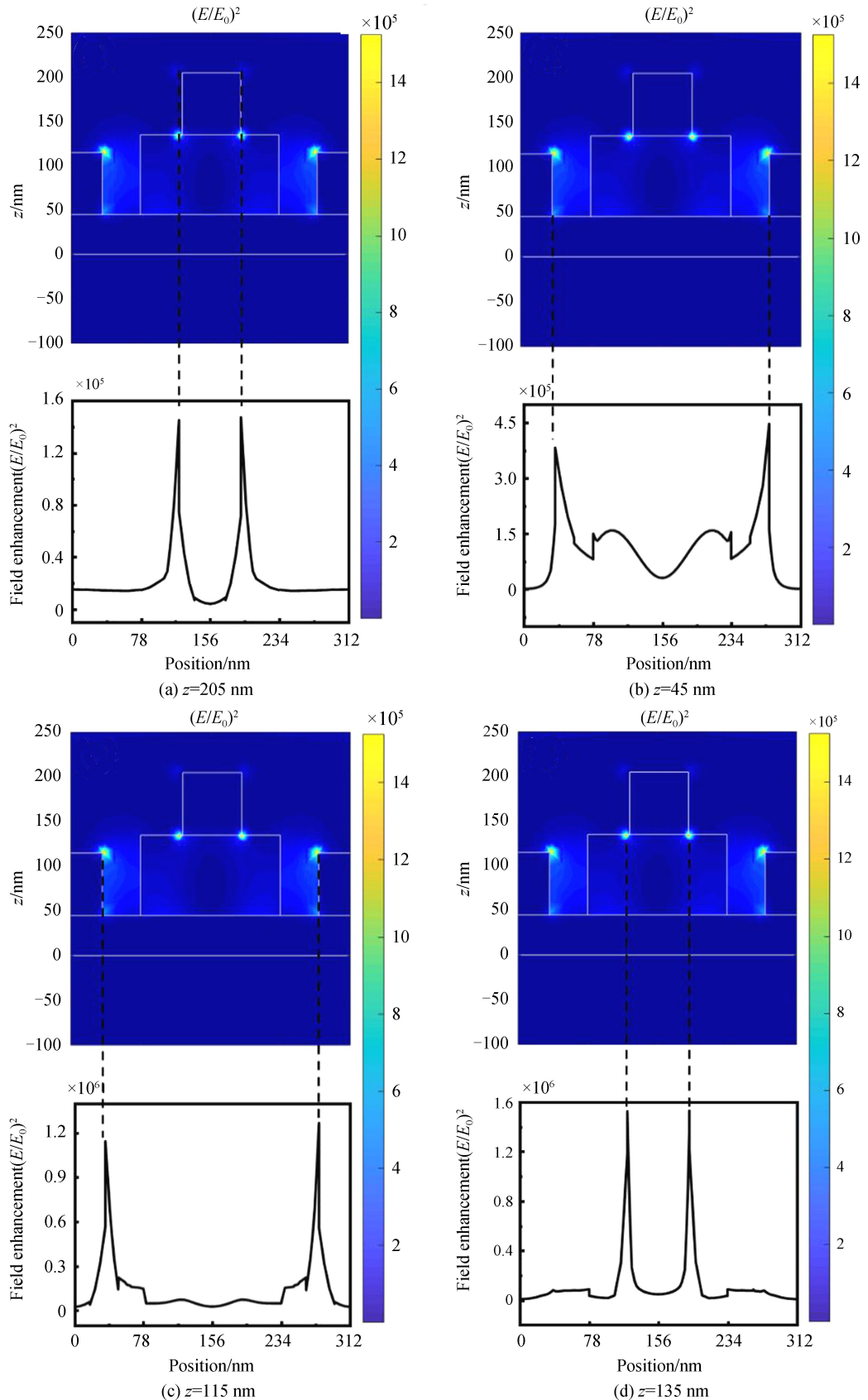


图 4 介质光栅/金属薄膜与银纳米立方体复合结构中的电场增强分布和不同位置处的电场增强因子
 Fig.4 The distribution of electric-field enhancement of composite structure of dielectric grating/metal film with silver nano-cube and electric field enhancement factor at different position

2.4 复合结构和单一结构电场增强比较

为了说明复合结构中电场增强的优势,进一步比较研究了复合结构和单一结构中热点处的电场增强.442 nm 激发光条件下,70 nm 的单个银纳米立方体在二氧化硅衬底上的热点处的电场增强因子的最大值为 1.68×10^5 ,该最大值远小于60 nm至110 nm光栅厚度条件下复合结构中的电场增强因子.图5为不同光栅厚度和相应的周期条件下复合结构和单一的介质光栅/金属薄膜结构中热点处的电场增强.复合结构中,热点主要分布在光栅槽中银纳米立方体的上顶点处和光栅脊上银纳米立方体的下顶点处.光栅槽中的银纳米立方体热点处的电场增强相对比较稳定,且在60 nm至120 nm的光栅厚度条件下,均大于单一的介质光栅/金属薄膜结构中的电场增强因子;在60 nm至110 nm光栅厚度条件,复合结构中光栅脊与银纳米立方体下顶点热点处的电场增强因子均高于单一的介质光栅/金属薄膜结构,且当光栅厚度大于100 nm时,光栅脊与银纳米立方体下顶点热点处的电场增强因子开始变小,光栅厚度为120 nm,其热点处的电场增强因子甚至小于介质光栅/金属薄膜结构的电场增强因子,这主要是由于光栅的厚度影响了传播表面等离子体对光栅脊上银纳米立方体的作用.在光栅厚度为90 nm、周期312 nm时的最优参数条件下,复合结构中热点处的电场增强因子最高达 1.53×10^6 ,比单一的银纳米立方体的电场增强因子高出 1.36×10^6 ,比介质光栅/金属薄膜结构的电场增强因子高出 1.12×10^6 .

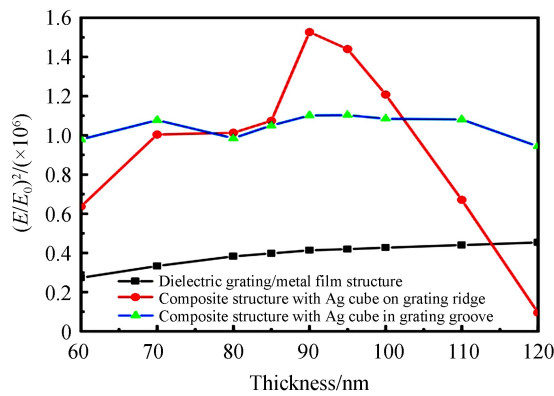


图5 不同光栅厚度和相应的周期条件下复合结构和介质光栅/金属薄膜结构中热点处的电场增强

Fig.5 The electric field enhancement at hot spot position in composite structure and dielectric grating/metal film structure with different grating thickness and corresponding period

通过上述研究发现,介质光栅/金属薄膜与银纳米立方体的复合结构中的电场增强因子,高于单独的介质光栅/金属薄膜结构,高于单独的银纳米立方体结构.这是因为,介质光栅/金属薄膜结构中只存在传播表面等离子体,银纳米立方体结构中只存在局域表面等离子体.介质光栅/金属薄膜与银纳米立方体复合后,当入射光照射介质光栅/金属薄膜时,自由电子受光波作用发生共振,激发传播表面等离子体.当入射光照射银纳米立方体时,入射光与银纳米立方体中的自由电子发生共振,银纳米立方体对光子能量产生很强的吸收作用,使得银纳米立方体表面的自由电子发生极化,在银纳米立方体内形成偶极子,从而形成局域表面等离子体.同时,介质光栅/金属薄膜中的传播表面等离子体也将部分能量传递给银纳米立方体中的偶极子,即传播表面等离子体进一步激发了银纳米立方体中的局域表面等离子体,且发生了传播表面等离子体和局域表面等离子体的共振耦合,这使得银纳米立方体的极化作用明显增强,诱发的偶极子也极大地增强,从而导致了局部电场的进一步增强^[25].即,当界面有传播表面等离子体时,除了入射的自由空间光外,表面等离子体的能量,也可以通过局域表面等离子体与传播表面等离子体的耦合,进一步将能量局域在纳米立方体的顶点处,实现局域场增强.因此,复合结构中同时激发的传播表面等离子体和局域表面等离子体以及它们之间的共振耦合导致了复合结构中电场增强因子高于单一结构.

3 结论

用442 nm激光作为表面等离子体的激发光源,在金属薄膜厚度45 nm、占空比0.5的条件下,研究了介质光栅/金属薄膜与银纳米立方体复合结构中局域表面等离子体和传播表面等离子体的共振耦合.通过有限元方法数值模拟研究,发现复合结构的热点主要分布在光栅槽中银纳米立方体的上顶点处和光栅脊上银纳

米立方体的下顶点处,且热点处电场增强因子与银纳米立方体的尺寸、光栅周期和厚度有关.复合结构的优化参数为,光栅周期 312 nm、厚度 90 nm,银纳米立方体的尺寸为 70 nm,在该条件下,光栅脊与银纳米立方体下顶点接触处的电场增强因子高达 1.53×10^6 .复合结构由于银纳米立方体激发的局域表面等离子体与介质光栅/金属薄膜激发的传播表面等离子体之间的强共振耦合作用,使得复合结构具有很高的电场增强因子.这种介质光栅/金属薄膜与银纳米立方体的复合结构有望制备成高灵敏度的表面增强拉曼散射衬底.

参考文献

- [1] LIU Zhao-wei, WEI Qi-huo, ZHANG Xiang. Surface plasmon interference nanolithography[J]. *Nano Letters*, 2005, **5**(5): 957.
- [2] PANG Zhi-yuan, TONG Huan, WU Xiao-xiong, *et al.* Theoretical study of multiexposure zeroth-order waveguide mode interference lithography[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2018, **50**: 335.
- [3] WANG Ru, WANG Xiang-xian, YANG Hua, *et al.* Theoretical investigation of adjustable period sub-wavelength grating inscribed by TE₀ waveguide modes interference lithography[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(9): 97-103.
王茹, 王向贤, 杨华, 等. TE₀ 导模干涉刻写周期可调亚波长光栅理论研究[J]. *物理学报*, 2016, **65**(9): 97-103.
- [4] ABUTOAMA M, ABDULHALIM I. Angular and intensity modes self-referenced refractive index sensor based on thin dielectric grating combined with thin metal film[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, **23**(2): 72-80.
- [5] DIAZ-VALENCIA B F, MEJÍA-SALAZAR J R, OLIVEIRA O N, *et al.* Enhanced transverse magneto-optical kerr effect in magneto plasmonic crystals for the design of highly sensitive plasmonic (Bio) sensing platforms[J]. *ACS Omega*, 2017, **2**(11): 7682-7685.
- [6] NAIR S, ESCOBEDO C, SABAT R G. Crossed surface relief gratings as nanoplasmonic biosensors[J]. *ACS Sensors*, 2017, **2**(3): 379-385.
- [7] ZHANG Dong-yang, WANG Xiang-xian, WANG Ru, *et al.* A refractive index sensor based on composite structure of dielectric grating with metal films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(11): 1124001.
张东阳, 王向贤, 王茹, 等. 一种介质光栅金属薄膜复合结构的折射率传感器[J]. *光学学报*, 2017, **37**(11): 1124001.
- [8] LUO Yun-han, MAO Pei-ling, CHEN Chao-ying, *et al.* Side-polished fiber coupled plasmon resonance based on triangle nano-rod array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(4): 0406004.
罗云瀚, 毛培玲, 陈超英, 等. 光纤耦合三角形金柱阵列的表面等离子体共振[J]. *光子学报*, 2015, **44**(4): 0406004.
- [9] JANG Y H, JANG Yu-jin, KIM S, *et al.* Plasmonic solar cells: from rational design to mechanism overview[J]. *Chemical Reviews*, 2016, **116**(24): 14982-15034.
- [10] WANG C C D, CHOY W C H, DUAN C, *et al.* Optical and electrical effects of gold nanoparticles in the active layer of polymer solar cells[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, **22**(3): 1206-1211.
- [11] CHANG Shuai, LI Quan, XIAO Xu-dong, *et al.* Enhancement of low energy sunlight harvesting in dye-sensitized solar cells using plasmonic gold nanorods[J]. *Energy & Environmental Science*, 2012, **5**(11): 9444-9448.
- [12] HUANG Yu, ZHANG Xian, RINGE E, *et al.* Tunable lattice coupling of multipole plasmon modes and near-field enhancement in closely spaced gold nanorod arrays[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 23159.
- [13] CHEN Chen, QI Zhi-mei. Nanoporous gold films prepared by sputtering-dealloying combination for total internal reflection SERS measurement[J]. *Optical Materials Express*, 2016, **6**(5): 1561.
- [14] LI Jun-peng, ZHOU Jun, JIANG Tao, *et al.* SERS characteristics of sea urchin-like gold nanoparticles dependent on their surface morphology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(4): 0419001.
李军朋, 周骏, 姜涛, 等. 海胆状金纳米粒子表面形貌对表面增强喇曼散射特性的影响[J]. *光子学报*, 2015, **44**(4): 0419001.
- [15] PILPAVICIUS J, KALEINIKAITE R, PUCETAITE M, *et al.* Controllable formation of high density SERS-active silver nanoprism layers on hybrid silica-APTES coatings[J]. *Applied Surface Science*, 2016, **377**: 134-140.
- [16] ZHANG Jie, ZHANG Xiao-lei, LAI Chun-hong, *et al.* Silver-decorated aligned CNT arrays as SERS substrates by high temperature annealing[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(18): 21157-66.
- [17] ZHANG Y, JIA T Q, FENG D H, *et al.* Quadrupole plasmon resonance mode in nanocrescent /nanodisk structure: Local field enhancement and tunability in the visible light region[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **98**(16): 3771.
- [18] WU Kai-yu, RINDZEVICIUS T, SCHMIDT M S, *et al.* Plasmon resonances of Ag capped Si nanopillars fabricated using mask-less lithography[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(10): 12965-78.
- [19] LAGARKOV A, BOGINSKAYA I, BYKOV I, *et al.* Light localization and SERS in tip-shaped silicon metasurface[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(15): 17021-17038.
- [20] FU Qiang, ZHANG Dou-guo, CHEN Yi-kai, *et al.* Surface enhanced raman scattering arising from plasmonic interaction between silver nano-cubes and a silver grating[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(4): 041122.
- [21] CROZIER K B, CHU Y. Experimental study of the interaction between localized and propagating surface plasmons[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(3): 244-6.

-
- [22] ZHOU Fei, LIU Ye, CAI Wei-ping. Huge local electric field enhancement in hybrid plasmonic arrays[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(5): 1302.
- [23] YI Ming-fang, ZHANG Dou-guo, WANG Pei, *et al.* Plasmonic interaction between silver nano-cubes and a silver ground plane studied by surface-enhanced raman scattering[J]. *Plasmonics*, 2011, **6**(3): 515-519.
- [24] BOHREN C F, HUFFMANUFFMAN D R. Absorption and scattering of light by small particles (wiley science paperback series)[J]. *Optics & Laser Technology*, 1998, **31**(1): 328-328.
- [25] CESARIO J, QUIDANT R, BADENES G, *et al.* Electromagnetic coupling between a metal nanoparticle grating and a metallic surface.[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(24): 3404.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61505074, 61865008) and the National Key Basic Research Program of China (No. 2013CBA01703)

引用格式: WANG Xiang-xian, PANG Zhi-yuan, ZHANG Dong-yang, *et al.* SPs of Composite Structure of Dielectric Grating/Metal Film with Silver Cube[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11): 1131001

王向贤, 庞志远, 张东阳, 等. 介质光栅/金属薄膜与银立方体复合结构的 SPs 研究[J]. 光子学报, 2018, **47**(11): 1131001