



利用数值模拟研究表面增强相干反斯托克斯拉曼散射增强基底

李健康 李睿

Numerical simulation study of surface enhancement coherent anti-Stokes Raman scattering reinforced substrate

Li Jian-Kang Li Rui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 104207 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201773

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201773>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双光子荧光与相干反斯托克斯拉曼散射显微成像技术的实验研究

Experimental study on two-photon fluorescence and coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy

物理学报. 2017, 66(10): 104204 <https://doi.org/10.7498/aps.66.104204>

液相硝基甲烷分子振动特性的相干反斯托克斯拉曼散射光谱

Coherent anti-Stokes Raman scattering spectrum of vibrational properties of liquid nitromethane molecules

物理学报. 2018, 67(2): 024208 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171828>

基于光强传输方程相位成像的宽场相干反斯托克斯拉曼散射显微背景抑制

Nonresonant background suppression in wide-field Coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy with transport of intensity equation based phase imaging

物理学报. 2017, 66(11): 114206 <https://doi.org/10.7498/aps.66.114206>

表面等离子激元“热点”的可控激发及近场增强光谱学

Surface plasmon resonance “hot spots” and near-field enhanced spectroscopy at interfaces

物理学报. 2019, 68(14): 147801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190305>

后退火处理对铟锡氧化物表面等离子激元共振特性的影响

Effect of annealing treatment on characteristics of surface plasmon resonance for indium tin oxide

物理学报. 2018, 67(17): 177802 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180435>

金属亚波长结构的表面增强拉曼散射

Surface-enhanced Raman scattering of subwavelength metallic structures

物理学报. 2019, 68(14): 147401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190458>

利用数值模拟研究表面增强相干反斯托克斯拉曼散射增强基底*

李健康 李睿†

(大连理工大学物理系, 大连 116024)

(2020年10月24日收到; 2020年11月20日收到修改稿)

为表面增强相干反斯托克斯拉曼散射 (surface enhancement coherent anti-Stokes Raman scattering, SECARS) 提供具有高增强、稳定性好的等离激元增强基底是十分重要的. 本文从实际出发, 在理论上设计了一种新的 SECARS 基底, 其可以利用结构自身的杂化共振与额外激发的电荷转移等离激元共振相互作用产生 Fano 共振, 并通过调节电荷转移等离激元共振来改变 Fano 共振的波长位置. 通过对 L-色氨酸 1557 cm^{-1} 处的拉曼模式的数值模拟得到的数据表明, 这种具有空间对称性的结构可以产生多个不依赖入射光偏振方向的高增强热点, 这些热点处的信号相对于普通相干反斯托克斯拉曼散射 (coherent anti-Stokes Raman scattering, CARS) 信号, 其增强因子普遍可以达到 10^{12} , 最大处可达到 10^{14} . 这种利用电荷转移等离激元来设计基底的方法可以在 SECARS 的实用性基底中得到应用并为其其他非线性光学工艺的设计提供了新的思路.

关键词: 表面增强相干反斯托克斯拉曼散射, 拉曼散射, 表面等离激元共振

PACS: 42.65.Dr, 71.45.Gm, 52.38.Bv

DOI: 10.7498/aps.70.20201773

1 引言

相干反斯托克斯拉曼散射 (coherent anti-Stokes Raman scattering, CARS) 是一种常用的能够检测到分子级振动的方法^[1-5], 在 CARS 中存在两道入射光束, 分别是泵浦光 (ω_p) 与斯托克斯光 (ω_s) 以及一道出射光束反斯托克斯光 ($\omega_{as} = 2 \times \omega_p - \omega_s$), 出射光的强度的关系可以用下面的关系式表示^[6,7]:

$$I_{\text{CARS}} = |\chi^{(3)}|^2 I_p^2 I_s, \quad (1)$$

其中 $\chi^{(3)}$ 代表物体的三阶极化率; I_p 指泵浦光强; I_s 指斯托克斯光强. 虽然 CARS 的检测灵敏度比拉曼散射强很多, 但对各种含量极低的物质的检测效果依然不够灵敏. 因此为了增强 CARS 的检测

效果, 需要引入增强基底, 产生了新的检测方法即表面增强相干反斯托克斯拉曼散射. 其主要是设计新型的等离激元增强基底, 通过基底上的纳米粒子间的表面等离激元共振 (surface plasmon resonance, SPR) 的局部电磁场 (electromagnetic, EM) 来增强检测信号^[8-11]. 通过控制基底中纳米粒子的形状和结构可以进一步增强粒子的近场响应, 现在常用的增强基底材料多为金与银等金属, 近年来也有了利用特殊分子结构来代替金属作为基底材料的尝试^[12].

由等离激元杂化 (plasmon hybridization, PH) 模型可知^[13], 二聚体纳米粒子之间的共振会受到间隙区域中的介质电导率的影响, 中间材料会与纳米粒子的等离激元发生相互作用, 产生一种能与远场耦合的键合等离激元模式 (bonding dimer plasmon, BDP)^[14]. 而当纳米粒子之间被导电材料所连

* 国家自然科学基金 (批准号: 51972039)、兴辽英才计划 (批准号: XLYC1902122) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: DUT19LK19, DUT20YG132) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: rli@dlut.edu.cn

接, 由于电流会通过导电材料在纳米粒子之间流通, 纳米粒子的共振性质发生了剧烈的变化从而产生一种新的共振模式, 即电荷转移等离子体模式 (charge transfer plasmons, CTP)^[15–19], 同时其屏蔽作用将导致纳米粒子的键合等离子体模式趋于蓝移并形成一种称为屏蔽键合等离子体 (screened bonding dimer plasmon, SBDP) 模式^[16]的新模式. 新产生的 CTP 模式具有高度可调性, 可以在 SECARS 基底设计中发挥巨大应用.

近年来在 SECARS 基底的设计上, 首先设计出了利用大小不同的粒子进行杂化从而产生特定波长增强的基底, 利用这个思路提出了各种不同结构的基底, 其增强因子最高可以达到 10^{14} ^[20–24], 但这些基底对入射光的偏振方向十分敏感. 为了降低基底对入射光偏振方向的依赖性, 设计了具有空间对称性的 SECARS 基底结构, 其在各种偏振方向入射时都可以有 10^{10} 以上的增强因子^[25]的热点. 在这些工作的基础之上进一步提高基底增强效果的同时降低对偏振光方向的敏感性仍然是一个具有挑战性的问题.

本文设计了一种新的基底并利用有限元法在理论上计算了其增强效果. 发现这种结构可以将 CTP 与 SBDP 相结合产生 Fano 共振来有效地提高 SECARS 基底共振范围的可调谐性. 并且更重要的是其增强因子在各种偏振光下都可达到 10^{12} 以上. 这种具有高增强且不依赖于入射光偏振的基底可以为 SECARS 基底的实际使用带来更好灵活性, 也可以在其他非线性光学检测中得到应用.

2 研究方法

2.1 结构设计与模拟方法

图 1 是基底的结构与参数示意图, 中间的圆盘的半径为 r_1 , 外围圆盘的半径为 r_2 , 中心圆盘与外围圆盘间的距离 d , 所有的圆盘具有相同的厚度 h_1 , 外围圆盘间的导电结宽度为 l , 导电结与 Y 轴的夹角为 θ , 导电结的厚度为 h_2 , 导电结中心相对于中心圆盘原点的坐标为 $O_{(x,y)}$, 整个基底结构所采用的材料为金.

被检测材料采用了 L-色氨酸分子, 其是组成蛋白质的三种重要氨基酸之一, 在生物与医学中具有重要作用, 拉曼频移采用了其 1557 cm^{-1} 处的拉曼峰^[26].

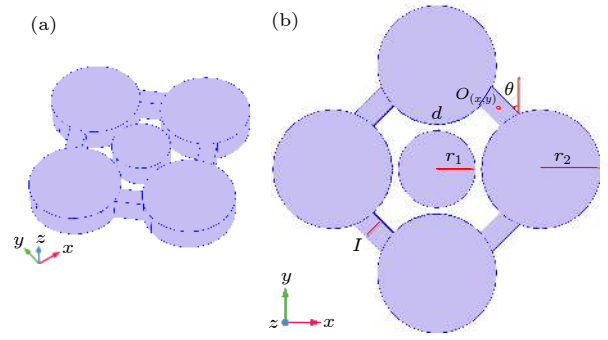


图 1 基底的结构示意图 (a) 与其对应的参数示意图 (b)
Fig. 1. Sketch of the structure(a) with the defined parameters and coordinate axis(b).

数值模拟方法采用有限元法 (finite element method, FEM), 使用的计算软件为 COMSOL Multiphysics 5.5 的波动光学模块. 在仿真模型中, 将基底模型置于空气中, 其周围是长方体的完美匹配层 (perfectly matched layer, PML), 其中使用了与波长厚度相同的 PML 来避免虚假边界反射. 模拟区域的背景折射率设置为 1, 金材料的数据采用软件提供的模型数据.

模拟结果中的散射截面 (Q_{sca}) 为散射系数与等效散射面积的比值 ($S_{\text{eff}} = \pi \times r_{\text{eff}}^2$, 其中等效半径 r_{eff} 由等效体积所定义 $V = 4\pi \times r_{\text{eff}}^3/3$, 其中 V 由所有的结构的体积相加得到), 所有散射截面均使用时域有限差分法 (finite difference time domain method, FDTD) 计算获得^[27]. 为了保持模拟结果的稳定, 在所有的计算过程中模拟区域与网格的大小保持不变.

3 结果与讨论

3.1 CTP 与 FANO 共振

等离激元低聚物中的 Fano 共振通常源自超辐射 (亮) 和亚辐射 (暗) 共振模式之间的破坏性干扰^[28,29]. 可以通过调节纳米粒子之间的距离与纳米粒子的大小来调节 Fano 共振的波长位置, 而 CTP 可以通过改变纳米粒子之间导电结的导电性来调节纳米结构的共振波长. 利用 CTP 与纳米结构自身的共振模式相结合产生 Fano 共振, 可以使基底的共振范围具有很高的可调谐性, 同时 CTP 共振也可以拓宽原有结构的共振范围到红外波长^[13].

由于改变圆盘结构的几何参数会导致其自身杂化共振波长位置的改变, 故在所有的模拟中圆盘的几何参数都保持不变. 从图 2 中可以看到, 调节

导电结的导电性能可以有效地控制 CTP 的共振波长. 当 l 从 30 nm 改变为 50 nm 时, 从图 2(a) 可以看到结的电导能力加强会导致 CTP 的共振峰向更高能量处偏移, 而其屏蔽作用也会导致 SBDP 的共振位置跟着短波长位置偏移, 所以第一个肩部位置会略微蓝移. 从图 2(b) 中可以看出, 结倾斜角度的变化对整体的共振影响都很小, 这符合 CTP 与杂化共振的特点. 图 2(c) 中可以看到, 随着中心坐标 $O_{(x, y)}$ 从 (70, 70) 增加到 (110, 110) 时, 在 80 nm 时会有蓝移, 而在 80 nm 之后都会有红移, 这是由于金盘的大小导致结的最佳电导位置为 85 nm, 从 70 到 80 nm 时导电性加强所以有了蓝移, 而从 80 nm 增加时导电性减弱所以有了红移. 从图 2(d) 中可以发现, 由于 h_2 的减小电导能力减弱, 由 CTP 引起的第二个肩部共振的位置会向着低能量的位置偏移, 但未对 SBDP 产生影响, 所以可以看到图中第一个肩部的位置变化不大, 第二个肩部的位置向着长波长位置偏移.

3.2 基底结构在不同偏振光入射下的增强因子

为了定量评估此 SECARS 基底的增强作用, 采用 L-色氨酸分子 1557 cm^{-1} 处的拉曼模式, 同时在模拟中使用 1064 nm 波长的激光作为泵浦光束. 在此拉曼频移模式下, 相应的斯托克斯和反斯托克斯波长分别应在 912 nm 和 1275 nm 的波长处. 通过优化参数, 将泵浦波长, 斯托克斯光与反斯托克斯光与散射光谱的中心位置与两肩部位置相匹配, 在此情况下 SECARS 能有最大的增强效果^[20,21].

根据相关的理论分析^[9], 相对于没有基底的常规 CARS, 在 SECARS 工艺中其增强 G_{SECARS} 因子可以通过以下三个特征频率 ω_p , ω_s , ω_{as} 处的电场增强幅度的乘积给出:

$$G_{\text{SECARS}} = |E_{(\omega_p)}/E_{0(\omega_p)}|^4 \times |E_{(\omega_s)}/E_{0(\omega_s)}|^2 \times |E_{(\omega_{\text{as}})}/E_{0(\omega_{\text{as}})}|^2. \quad (2)$$

由于结构的对称性, 可以从图 3 看到各个角度的散射系数与 Fano 共振的波长位置完全相同.

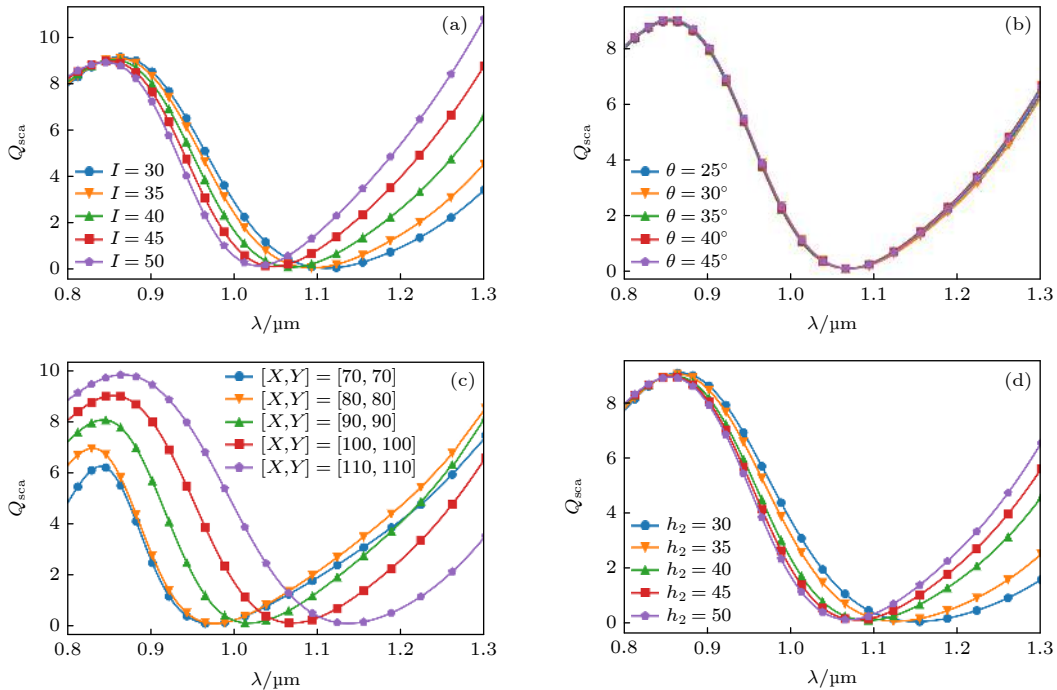


图 2 圆盘参数不变 ($r_1 = 63 \text{ nm}$, $r_2 = 97 \text{ nm}$, $d = 10 \text{ nm}$, $h_1 = 50 \text{ nm}$) 改变导电结参数时散射系数的变化 (a) $\theta = 45^\circ$, $h_2 = 50 \text{ nm}$, $O_{(x, y)} = (100, 100)$, 改变结的宽度 l 从 30 到 50 nm; (b) $l = 40 \text{ nm}$, $h_2 = 50 \text{ nm}$, $O_{(x, y)} = (100, 100)$, 改变倾斜角度 θ 从 25° 到 45° ; (c) $l = 40 \text{ nm}$, $\theta = 45^\circ$, $h_2 = 50 \text{ nm}$, 改变中心坐标 $O_{(x, y)}$ 从 (70, 70) 到 (110, 110); (d) $l = 40 \text{ nm}$, $\theta = 45^\circ$, $O_{(x, y)} = (100, 100)$, 改变结厚度 h_2 从 30 到 50 nm

Fig. 2. When the parameters of the disc are unchanged ($r_1 = 63 \text{ nm}$, $r_2 = 97 \text{ nm}$, $d = 10 \text{ nm}$, $h_1 = 50 \text{ nm}$) that the scattering spectrum depend on geometrical parameters: (a) Vary l with $\theta = 45^\circ$, $h_2 = 50 \text{ nm}$, $O_{(x, y)} = (100, 100)$; (b) vary θ with $l = 40 \text{ nm}$, $h_2 = 50 \text{ nm}$, $O_{(x, y)} = (100, 100)$; (c) vary $O_{(x, y)}$ with $l = 40 \text{ nm}$, $\theta = 45^\circ$, $h_2 = 50 \text{ nm}$; (d) vary h_2 with $l = 40 \text{ nm}$, $\theta = 45^\circ$, $O_{(x, y)} = (100, 100)$.

图 4(a) 为在基底表面检测到的电场强度的空间分布, 在左右间隙中的热点具有最强的电场, 可以看

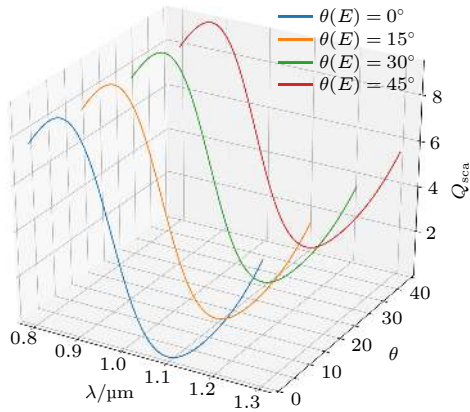


图 3 入射光不同偏振角度时的相同参数 ($l = 35 \text{ nm}$, $h_2 = 50 \text{ nm}$, $O_{(x,y)} = (100, 100)$, $r_1 = 63 \text{ nm}$, $r_2 = 97 \text{ nm}$, $d = 10 \text{ nm}$) 结构的散射系数, 偏振角度定义为入射光偏振方向与结构 Y 轴夹角

Fig. 3. Scattering spectra for various excitation polarizations with the same parameters ($l = 35 \text{ nm}$, $h_2 = 50 \text{ nm}$, $O_{(x,y)} = (100, 100)$, $r_1 = 63 \text{ nm}$, $r_2 = 97 \text{ nm}$, $d = 10 \text{ nm}$), and the polarization angle is defined as the angle between the polarization direction and the Y-axis.

到不同的三个波长处的电场增强具有相同的空间分布, 这为 SECARS 提供了有利条件. 图 4(b) 为计算出的 G_{SECARS} 因子空间分布, 在 $\theta = 0^\circ$ 的情况下, 在左右间隙处观察到两个高度局限的热点其 $G_{\text{SECARS}} = 1.6 \times 10^{14}$, 在此热点旁边也可以观察到存在一片强度不弱的增强区域. 当 $\theta = 45^\circ$ 时, 在四个间隙处同时激发了多个具有相同幅度的热点, 其 $G_{\text{SECARS}} = 5 \times 10^{12}$, 不过由于能量的分散其最大强度将是各种偏振情况下最低的. 另外, 可以通过降低外盘与内盘之间的距离来进一步增强其热点处的 G_{SECARS} 因子, 这已在类似系统中得到了证明^[30,31].

4 结 论

在这项工作中, 使用导电结来连接纳米粒子, 这种结构将纳米粒子的自身杂化模式与 CTP 共振模式相结合, 所引起的 Fano 共振有效的拓展了纳米结构的共振范围, 其对称性的结构使其能够不局限于特定的偏振光. 在对 L-色氨酸 1557 cm^{-1} 的拉

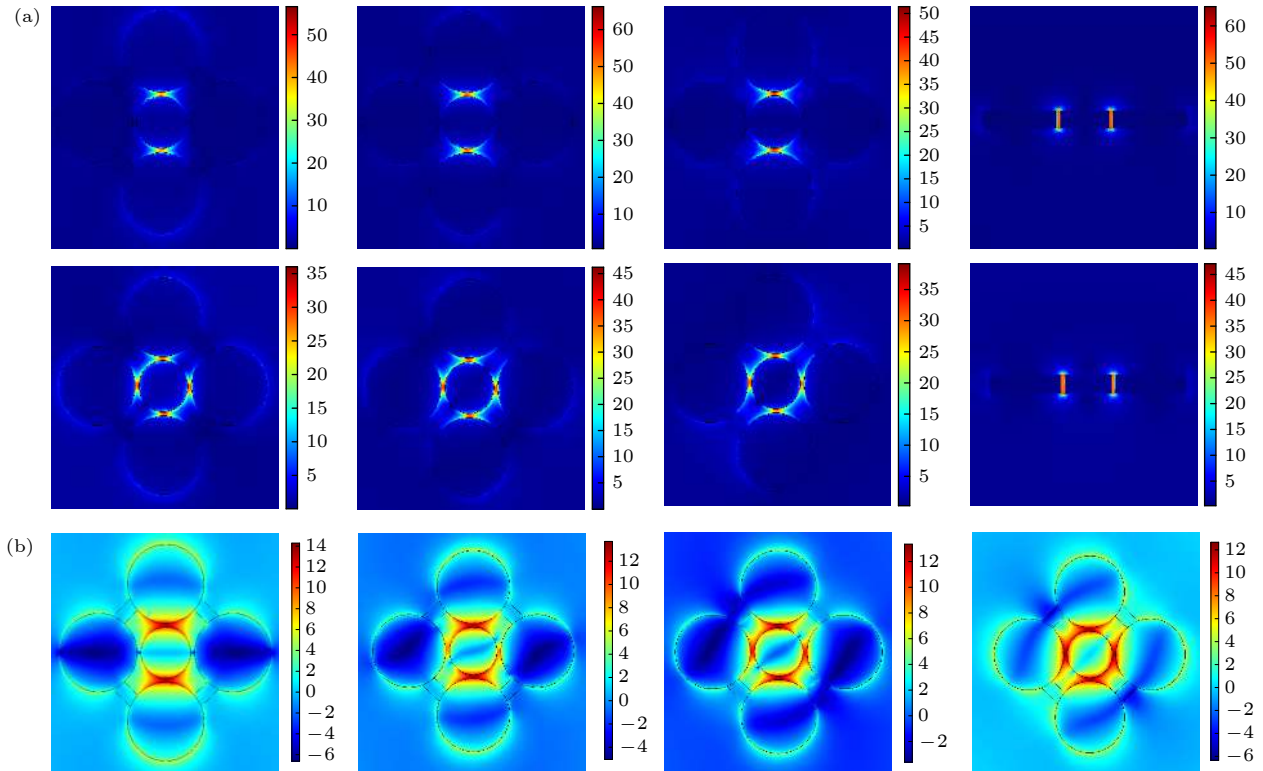


图 4 (a) 入射光偏振方向沿基底的 Y 轴方向时与入射光偏振方向与基底的 Y 轴的夹角为 45° 时基底表面 912 nm, 1064 nm, 1275 nm 三个波长处与 1064 nm 时基底中心 YZ 横截面处的电场强度空间分布; (b) 当入射光偏振方向沿基底的 Y 轴方向夹角 θ 为 0° , 15° , 30° , 45° 时基底表面对应的增强 G_{SECARS} 因子的对数空间分布图

Fig. 4. (a) The spatial distributions of enhanced electric field amplitude ($|E/E_0|$) in the top surface plane of the structure at three characteristic wavelengths for two polarizations; (b) the corresponding SECARS map for various polarizations. From the top to bottom, the polarization angle θ equals to 0° , 15° , 30° , 45° , respectively.

曼模式的数值模拟表明基底的增强 G_{SECARS} 因子在最大情况下能达到 10^{14} 量级, 有很多区域可以达到 10^{10} 量级以上的增强. 与先前工作中提出的等离激元基底相比, 此结构有两个突出的优点: 1) 拓宽了基底的共振范围, 为实际 SECARS 基底的应用提供了更大的灵活性; 2) 激发了多个 G_{SECARS} 因子最高至 10^{14} 的热点, 从而提高了捕获检测分子的可能性, 为今后的 SECARS 实验提供理论依据. 同时这些发现也为 SECARS 以及其他非线性光学过程 (如四波混频和受激拉曼散射) 的新型等离子体衬底的设计迈出了重要的一步.

参考文献

- [1] Minck R W, Terhune R W, Rado W G 1963 *Appl. Phys. Lett.* **3** 181
- [2] Begley R F, Harvey A B, Byer R L 1974 *Appl. Phys. Lett.* **25** 387
- [3] Duncan M D, Reintjes J, Manuccia T J 1982 *Opt. Lett.* **7** 350
- [4] Shi K, Li H, Xu Q, Psaltis D, Liu Z 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 093902
- [5] Liu S L, Liu W, Chen D N, Qu J L, Niu H B, 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 064204 (in Chinese) [刘双龙, 刘伟, 陈丹妮, 屈军乐, 牛憨笨 2016 物理学报 **65** 064204]
- [6] Steuwe C, Kaminski C F, Baumberg J J, Mahajan S 2011 *Nano Lett.* **11** 5339
- [7] Krafft C, Dietzek B, Schmitt M, Popp J 2012 *J Biomed. Opt.* **17** 040801
- [8] Koo T W, Chan S, Berlin A A 2005 *Opt. Lett.* **30** 1024
- [9] Chew H, Wang D, Kerker M 1984 *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* **1** 56
- [10] Addison C J, Konorov S O, Brolo A G, Blades M W, Turner R F B 2009 *J. Phys. Chem. C* **113** 3586
- [11] Dmitri V V, Alexander M S, Xia H, Kai W, Pankaj K J, Elango M, Steven E W, George W, Alexei V S, Marlan O S 2012 *Sci. Rep.* **2** 891
- [12] Shutov A D, Yi Z, Wang J, Sinyukov A M, He Z, Tang C, Chen J, Ocola E J, Laane J, Sokolov A V, Voronine D V, Scully M O 2018 *ACS Photonics* **5** 4960
- [13] Prodan E, Nordlander P 2004 *J. Chem. Phys.* **120** 5444
- [14] Halas N J, Lal S, Wei-Shun C, Link S, Nordlander P 2011 *Chem. Rev.* **111** 3913
- [15] Fontana J, Charipar N, Flom S R, Naciri J, Piqué A, Ratna B R 2016 *ACS Photonics* **3** 904
- [16] Fontana J, Ratna B R 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 011107
- [17] Huang Y, Ma L, Hou M, Xie Z, Zhang Z 2016 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18** 2319
- [18] Liu L, Wang Y, Fang Z, Zhao K 2013 *J. Chem. Phys.* **139** 064310
- [19] Pérez-González O, Zabala N, Borisov A G, Halas N J, Nordlander P, Aizpurua J 2010 *Nano Lett.* **10** 3090
- [20] Zhang Y, Wen F, Zhen Y R, Nordlander P, Halas N J 2013 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **110** 9215
- [21] Zhang Y, Zhen Y R, Neumann O, Day J K, Nordlander P, Halas N J 2014 *Nat. Commun.* **5** 4424
- [22] He J N, Fan C Z, Ding P, Zhu S M, Liang E J 2016 *Sci. Rep.* **6** 20777
- [23] Kim K H, Rim W S 2019 *Appl. Phys. A* **125** 1
- [24] Arpan D, Erik M V 2020 *JEOS:RP* **16** 1
- [25] Tian M, Zhao Y, Wan M, Ji P, Li Y, Song Y, Yuan S, Zhou F, He J, Ding P 2018 *Phys. Lett. A* **382** 3187
- [26] Maiti N, Thomas S, Jacob J A, Chadha R, Mukherjee T, Kapoor S 2012 *J. Colloid Interface Sci.* **380** 141
- [27] li Y Q, Jian G S, Wu S F, 2006 *Chin. Opt. Lett.* **4** 671 (in Chinese) [李亚琴, 简国树, 吴世法 2006 中国光学快报 (英文版) **4** 671]
- [28] Hentschel M, Saliba M, Vogelgesang R, Giessen H, Alivisatos A P, Liu N 2010 *Nano Lett.* **10** 2721
- [29] Hentschel M, Dregely D, Vogelgesang R, Giessen H, Liu N 2011 *ACS Nano* **5** 2042
- [30] Encina E R, Coronado E A 2011 *J. Phys. Chem. C* **115** 15908
- [31] Lovera A, Gallinet B, Nordlander P, Martin O J F 2013 *ACS Nano* **7** 4527

Numerical simulation study of surface enhancement coherent anti-Stokes Raman scattering reinforced substrate*

Li Jian-Kang Li Rui[†]*(Department of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)*

(Received 24 October 2020; revised manuscript received 20 November 2020)

Abstract

Plasma nanostructures are of particular significance for serving as a substrate for spectroscopic detection and identification of individual molecules. By combining the excitation wavelength of the molecule with the resonance wavelength of the nanostructure, the sensitive single-molecule Raman detection can be achieved. A high and stable plasma substrate for coherent anti-Stokes Raman scattering(CARS) is very useful for developing the surface-enhanced coherent anti-Stokes Raman scattering (SECARS). In the plasma nanostructures, the strong coupling of plasmonic nanoparticles with an inter-particle gap smaller than the diameter of the individual nanoparticles results in the hybridization of the optical properties of these individual nanoparticles. There are also the charge transfer plasmons(CTP) appearing in conductive bridging nanoparticles. Their unique properties make linked nanosystems a suitable candidate for building artificial molecules, nanomotors, sensors, and other optoelectronic devices. In this work, we, starting from reality, theoretically design a new linked nanosystem SECARS substrate where Fano resonance can be generated by the plasmon hybridization (PH) model resonance and the charge transfer plasmon resonance. The introduction of charge transfer plasma improves the tunability of structural resonance. By adjusting the conductivity of the conductive junction, the wavelength of the charge transfer plasma resonance can be easily adjusted to change the wavelength position of the Fano resonance. The data obtained by numerical simulation of the Raman mode at 1557 cm^{-1} of L-tryptophan when a 1064 nm light source is used as the pump light show that this spatially symmetrical structure can generate multiple high-enhancement hot spots that do not depend on the polarization direction of the incident light. Ordinary CARS signal can generally be enhanced by 10^{12} , and its maximum can reach 10^{14} . Due to the ultrastrong field enhancement and insensitive-to-polarization, this method of using charge transfer plasma to design a substrate can be used in the practical substrate of SECARS and provide new ideas for designing other nonlinear optical processes such as four wave mixing and stimulated Raman scattering.

Keywords: surface enhancement coherent anti-Stokes Raman scattering, Raman scattering, surface plasmon resonance

PACS: 42.65.Dr, 71.45.Gm, 52.38.Bv

DOI: [10.7498/aps.70.20201773](https://doi.org/10.7498/aps.70.20201773)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51972039), the Liaoning Revitalization Talents Program, China (Grant No. XLYC1902122), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant Nos. DUT19LK19, DUT20YG132).

[†] Corresponding author. E-mail: rlid@dlut.edu.cn