

doi: 10. 3788/gzxb20174606. 0616003

倾斜 L 形手性结构的制备以及圆二色性

王刚, 张中月, 王莉

(陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 西安 710119)

摘 要: 在单层聚苯乙烯小球模板上, 制备了大面积倾斜 L 形手性结构. 通过倾斜角沉积技术, 在小球的一侧生长二氧化硅, 在二氧化硅上面沉积金属层; 在垂直方向沉积另一金属层, 使两个金属层具有不同高度从而形成倾斜 L 形手性结构. 研究发现, 通过控制二氧化硅的厚度, 可以实现倾斜 L 形手性结构的圆二色性的调控. 数值模拟结果表明, 倾斜 L 形手性结构的圆二色性机制符合 Born-Kuhn 模型理论.

关键词: 表面等离子激元; 纳米结构; 倾斜角沉积; 手性; 圆二色性

中图分类号: O433

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)06-0616003-7

Fabrication and Plasmonic Chirality of Tilted-L-shaped Nanostructure

WANG Gang, ZHANG Zhong-yue, WANG Li

(School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Large scale tilted-L-shaped chiral nanostructures were fabricated using oblique angle deposition on polystyrene nanosphere templates. SiO₂ layer is deposited on the polystyrene nanosphere templates and the Ag layer is deposited on the SiO₂ layer to form a metallic arm of tilted-L-shaped chiral nanostructures. Another metallic arm is deposited in the perpendicular direction on the polystyrene nanosphere templates directly. The chirality of tilt-L-shaped chiral nanostructures originated from the different altitude of two metallic arms. By manipulating the thickness of SiO₂ layer the circular dichroism can be easily manipulated. Finite element method was used to perform the simulation of tilt-L-shaped chiral nanostructures. Simulation results demonstrate that the circular dichroism mechanism of tilt-L-shaped chiral nanostructures can be explained by chiral plasmonic Born-Kuhn model.

Key words: Plasmonic; Nanostructures; Oblique angle deposition; Chiral; Circular dichroism

OCIS Codes: 160.4236; 310.6628; 240.6680; 240.3990

0 引言

手性是指一个结构不能与其镜像重合的性质^[1-2]. 右旋圆偏振光(Right Circularly Polarized, RCP)和左旋圆偏振光(Left Circularly Polarized, LCP)通过手性结构产生的不同光学响应, 被称为圆二色性(Circular Dichroism, CD)^[3]. 相比于手性分子, 金属手性纳米结构具有较强的局域表面等离子共振, 可以产生较强的 CD, 被广泛用于各个领域, 如生物监测^[4-5]、对映体传感^[1]、偏振转换^[6]和光电子的圆偏振器^[7-8]等.

为了产生强的 CD, 研究者们设计出多种多样的金属手性纳米结构, 如平面非手性结构、金属螺旋结构^[8]、多层结构^[9-14]等, 并探讨其产生 CD 的机制. 对于平面非手性结构, 需要斜入射激发结构, 结构上产生的感应电偶极子和磁偶极子在垂直于入射波的平面都有分量, 使入射光偏振旋转并产生光学手性. 对于螺旋结构, CD 的产生是由于沿螺旋不同振荡偶极子的耦合. 对于多层手性结构, 包括扭转交叉线^[9-11]、双层旋转弧

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61575117)和中央高校基本科研业务费专项(Nos. GK201601008, GK201603015)资助

第一作者: 王刚(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微纳结构的制备以及圆二色性. Email: gwang2015@126.com

导师: 张中月(1975—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为微纳光学与光子学、表面等离子激元学. Email: zyzhang@snnu.edu.cn

通讯作者: 王莉(1986—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为微纳光学与光子学、表面等离子激元学. Email: l.wang@snnu.edu.cn

收稿日期: 2016-12-22; **录用日期:** 2017-03-10

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

线^[12]、双层旋转 U 型^[16-18]、双层扭转十字^[19-20]、共轭万字形^[13]和互补十字^[14]等结构,它们产生 CD 的原因在于上下层两层金属结构上产生了反平行或平行电流.然而,倾斜光激发平面非手性结构受较多的条件限制,螺旋结构的制备较为昂贵,层与层金属结构的制备复杂且效率低.

本文用垂直光激发结构来实现 CD,设计了倾斜的手性结构.考虑人造纳米结构的制备条件和效率,选择 L 形手性结构,通过改变 L 形手性结构的两臂高度差来实现结构圆二色性.利用倾斜角沉积技术^[27]制备倾斜 L 形手性结构,分别研究了未蒸镀二氧化硅和蒸镀二氧化硅时,二氧化硅对倾斜 L 形手性结构 CD 的影响,即随着二氧化硅厚度的增加,CD 信号增大,并且共振峰位置红移.计算发现,二氧化硅对倾斜 L 形手性结构 CD 影响的趋势与实验描述的变化趋势一致,且倾斜 L 形手性结构与 Born-Kuhn 模型产生 CD 的机制一致^[11].在入射光激发下,倾斜 L 形手性结构的两个金属臂,产生了具有相位差的两个电偶极子,两个电偶极子可以产生 Bonding 和 Antibonding 模式,从而产生较大的 CD.

1 实验和计算方法

1.1 实验方法

用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)测试倾斜 L 形手性结构的形貌,如图 1.首先,用气液表面提拉法制备单层聚苯乙烯小球(Polystyrene Nanosphere, PS)模板.然后,在单层 PS 小球模板上,通过倾斜角沉积技术^[24-27]制备倾斜 L 形手性结构.小球模板与电子束沉积束流夹角为 4° ,蒸镀束流大小为 0.1 nm/s .如图 1(a)、(c),1 号箭头表示蒸镀二氧化硅方向,2 号箭头为银的方向,数字表示蒸镀顺序.先倾斜蒸镀 t_a 的二氧化硅,再蒸镀 t_b 的银,最后顺时针(或逆时针)旋转 PS 小球基底 90° ,蒸镀厚度为 t_b 的银.在此过程中,顺时针(逆时针) 90° 旋转后,蒸镀银(第二次蒸镀银)所制备的结构称为左手性结构(右手性结构)^[11-12].

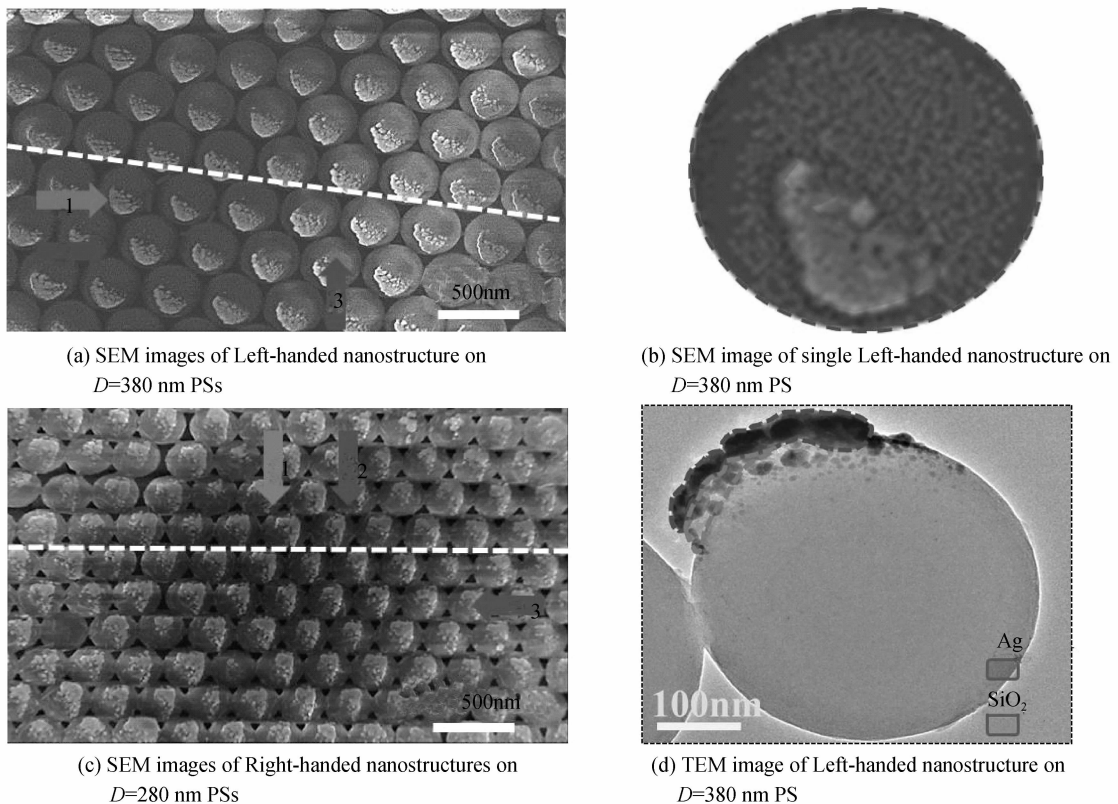


图 1 手性结构的 SEM 图和 TEM 图

Fig. 1 SEM and TEM image of chiral nanostructure

实验选用的单层小球模板直径分别为 $D=380 \text{ nm}$ 和 280 nm ,分别对应图 1(a)和图 1(c),图中为在基底样品表面上任意区域的倾斜 L 形手性结构.制作的单层 PS 小球模板呈现不同周期排列,故而倾斜 L 形手性结构也呈周期性排列,如图中虚线所示.在直径为 380 nm 小球上的 L 形手性结构选取任意单元结构分

析,倾斜 L 形手性结构臂宽分别约为 $w_1 = 80 \pm 10 \text{ nm}$ 和 $w_2 = 100 \pm 10 \text{ nm}$, 长度分别约为 $l_1 = 160 \pm 10 \text{ nm}$ 和 $l_2 = 120 \pm 10 \text{ nm}$, 如图 1(b). 由于束流是斜入射, 所以实际厚度与设定的厚度不一样^[28]. 制备中设定二氧化硅的厚度为 $T_a = 30 \text{ nm}$, 实际二氧化硅厚度为 $t_a = 20 \pm 3 \text{ nm}$; 设定二氧化硅为 $T_a = 40 \text{ nm}$ 和 50 nm 时, 实际厚度为 $t_a = 25 \pm 3 \text{ nm}$ 和 $30 \pm 3 \text{ nm}$; 而在制备中, 选择蒸镀材料金属银, 设定的厚度为 $T_b = 30 \text{ nm}$, 实际厚度为 $t_b = 20 \pm 3 \text{ nm}$. 在 $D = 280 \text{ nm}$ 小球上蒸镀材料同样会存在这种现象. 图 1(d) 表示, 在 $D = 380 \text{ nm}$ 小球模板上制备的倾斜 L 形手性结构透射电子显微镜 (Transmission Electron Microscope, TEM).

本文应用 Chirscan (Applied Photophysics Ltd) CD 光谱仪测量样品的圆二色性. 在室温条件下, 采用正入射激发倾斜 L 手性结构, 采集的谱线范围在 $300 \sim 900 \text{ nm}$ 波段.

1.2 结构和计算方法

基于图 1(b) 的 SEM 形貌, 建立了单个右手倾斜 L 手性结构的模型, 如图 2. 建模参量选取如下: 周期为 $P_x = 500 \text{ nm}$ 和 $P_y = 500 \text{ nm}$, L 形手性结构两臂宽分别取 $w_1 = 80 \text{ nm}$ 和 $w_2 = 100 \text{ nm}$; 两臂长度分别取 $l_1 = 120 \text{ nm}$ 和 $l_2 = 160 \text{ nm}$; 银厚度为 $t_b = 20 \text{ nm}$, 二氧化硅厚度为 t_a . 图 2 中 I 浅色材料为金属银, 银的介电常量取自实验结果^[27]; 深色材料为二氧化硅, 折射率取 $n = 1.45$.

本文应用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真

软件数值研究倾斜 L 手性结构阵列的透射特性. 透射率定义为通过倾斜 L 形手性结构的出射功率 P_{out} 与入射口的入射功率 P_{in} 之比, 即 $T = P_{out}/P_{in}$. 圆偏振光垂直照射在该阵列结构上, 右旋(左旋)光照射下的透射系数为 T_{RCP} (T_{LCP}), 圆二色性表示为: $\Delta T = T_{RCP} - T_{LCP}$ ^[21].

2 结果与讨论

为了研究二氧化硅厚度 t_a 对倾斜 L 形手性结构 CD 的影响, 制备并采集不同二氧化硅厚度 t_a 时, 倾斜 L 形手性结构的 CD 谱线, 如图 3. 左手结构的 CD 谱线用带三角图标的浅色实线表示, 右手性结构用黑色实线表示. 结果表明, 左手和右手结构的 CD 信号呈镜像分布, 信号强度随着小球上蒸镀二氧化硅厚度的增大而增大.

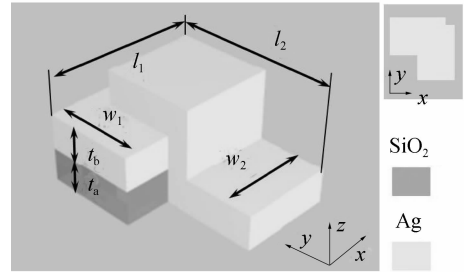
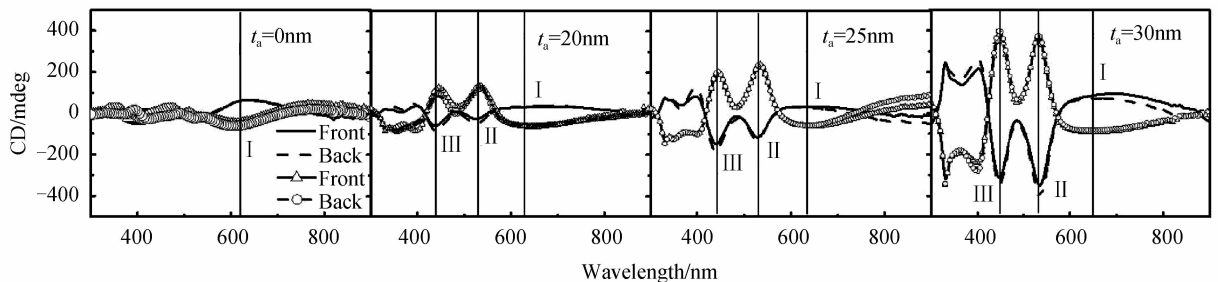
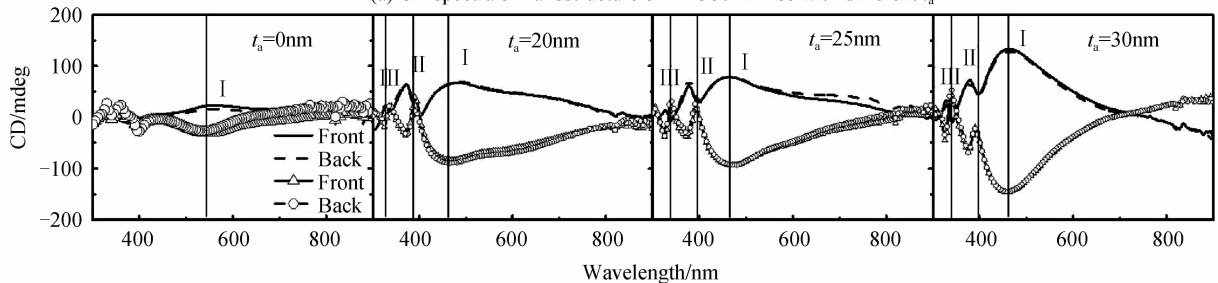


图 2 右手性结构

Fig. 2 Geometric model of the Right-handed chiral nanostructure



(a) CD spectra of nanostructure on $D=380\text{nm}$ PSs with different t_a



(b) CD spectra of nanostructure on $D=280\text{nm}$ PSs with different t_a

图 3 不同 t_a 时, 结构 CD 光谱

Fig. 3 CD spectra of nanostructure with different t_a

在 $D=380\text{ nm}$ 小球上,不同二氧化硅厚度 t_a 对倾斜 L 形手性结构的 CD 谱线影响,如图 3(a)所示.对于右手性结构,未蒸镀二氧化硅时,即 $t_a=0\text{ nm}$ 时,在 $565\text{--}740\text{ nm}$ 波段有一个明显的 CD 模式 I 信号,模式 I 最大信号约在 $\lambda=635\text{ nm}$ 处,强度约为 65 mdeg .当蒸镀二氧化硅 $t_a=20\text{ nm}$ 时,在 $480\text{--}565\text{ nm}$ 和 $415\text{--}480\text{ nm}$ 波段,出现两个新的特征模式信号 II 和 III,最大 CD 信号分别在 $\lambda=525\text{ nm}$ 和 $\lambda=440\text{ nm}$ 处,强度分别为 -26.5 和 -58 mdeg ;在二氧化硅厚度 $t_a=30\text{ nm}$ 时,模式 II 和 III 的分别位于 $490\text{--}575\text{ nm}$ 和 $420\text{--}490\text{ nm}$ 波段,最大 CD 信号分别在 $\lambda=530\text{ nm}$ 和 $\lambda=445\text{ nm}$ 处,强度分别为 -339 和 -316 mdeg ,对于模式 I 位于 $575\text{--}900\text{ nm}$ 波段,最大信号约在 $\lambda=650\text{ nm}$ 处,约为 86 mdeg ,相比于未蒸镀二氧化硅时,信号增强约 1.33 倍.结果表明,在 L 形手性结构蒸镀二氧化硅,出现两个新的共振模式 II 和 III,随着 t_a 增加,模式 I、II、III 处的 CD 信号明显增强,并发生红移.二氧化硅膜层 t_a 的增加导致倾斜 L 形手性结构的长度增加,从而导致 CD 峰谷红移.

在 $D=280\text{ nm}$ 小球上制备的左手结构,未蒸镀二氧化硅时,采集的信号有一个明显的模式 I 信号,蒸镀二氧化硅后,同样出现两个新的模式信号 II 和 III,随着二氧化硅厚度 t_a 增大,CD 信号增强,并发生红移,其变化趋势与图 3(a)的变化趋势一致,如图 3(b)所示.图 3(b)与 3(a)相比,在 280 nm 小球上制备的倾斜 L 手

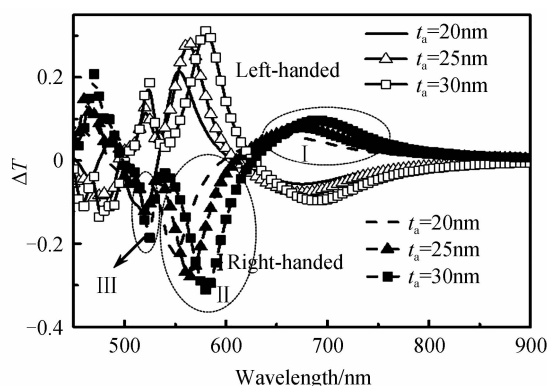


图 4 不同 t_a 时,手性结构的数值计算 CD 谱线

Fig. 4 Simulation CD spectra of chiral nanostructure with different t_a

性结构,随着小球直径减小,制备所得的倾斜 L 形手性结构变小^[27]且采集的谱线会发生蓝移,即共振模式 I、II 和 III 处 CD 信号蓝移.为了验证 RCP 和 LCP 通过结构后的转换对 CD 信号的影响,分别对样品进行前面和后面入射采集 CD 谱线,样品前面入射用实线表示,样品后面入射虚线表示,带圆圈符号的粉色虚线表示入射左手性结构,红色虚线表示为入射右手性结构 CD 谱线.从前面入射和后面入射采集的 CD 谱线可以看出,即图 3 模式 I、II、III 处实线和虚线特征 CD 信号差异不大,倾斜 L 形手性结构的 CD 信号受 RCP 和 LCP 的转化影响较小,可以忽略不计.在倾斜 L 形手性结构金属银厚度 $t_b=20\text{ nm}$ 时,通过数值模拟计算不同二氧化硅 t_a 厚度对倾斜 L 形手性结构 CD 光谱的影响,如图 4 所示.结果表明,倾斜 L 形手性结构和其对映体的 CD 光谱是镜像对称的.随着二氧化硅厚度 t_a 的增加,CD 信号增大,并且共振峰位置红移.其变化趋势与实验描述的变化趋势一致.

为了研究倾斜 L 形手性结构产生 CD 的原因,图 5 给出了二氧化硅厚度为 $t_a=30\text{ nm}$ 时的 RCP

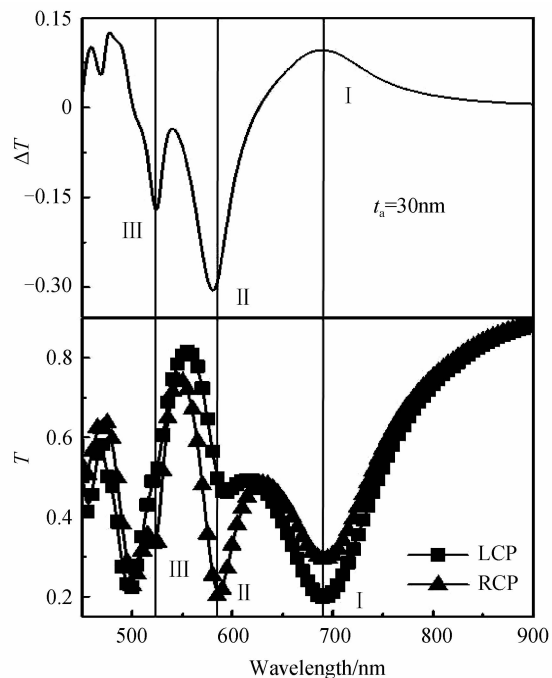


图 5 右手性结构的 CD 谱线以及 RCP 和 LCP 透射光谱
Fig. 5 CD spectrum, RCP and LCP transmittance spectra of Right-handed chiral nanostructure

和 LCP 的透射曲线,透射谷 $\lambda_I=690\text{ nm}$ 、 $\lambda_{II}=580\text{ nm}$ 、 $\lambda_{III}=525\text{ nm}$ 分别对应于 CD 光谱中的模式 I、II 和 III.

图 6 为 $t_a=30\text{ nm}$ 时的右手结构在共振模式处的表面电荷分布,以此为例,分析 I、II、III 模式处的表面等离激元共振模式. 浅色表示正电荷,深色表示负电荷. 箭头表示电偶极子的方向,分别用 \mathbf{P}_{Ia} 、 \mathbf{P}'_{Ia} 、 \mathbf{P}_{Ib} 、 \mathbf{P}'_{Ib} 、 \mathbf{P}_{IIa} 、 \mathbf{P}'_{IIa} 、 \mathbf{P}_{IIb} 、 \mathbf{P}'_{IIb} 、 \mathbf{P}_{IIIa} 、 \mathbf{P}'_{IIIa} 、 \mathbf{P}_{IIIb} 和 \mathbf{P}'_{IIIb} 表示. P 和 P' 分别代表 LCP 和 RCP 激发下的等效电偶极子,下角标 I、II、III 代表模式, a 和 b 分别代表倾斜 L 形手性结构的两个金属臂. 当 $t_b=20\text{ nm}$, t_a 分别为 20 nm 和 25 nm 时,右手性倾斜 L 形手性结构在不同共振波长处的表面电荷分布有与 $t_b=20\text{ nm}$, $t_a=30\text{ nm}$ 类似的分布和相同的表面等离激元共振模式.

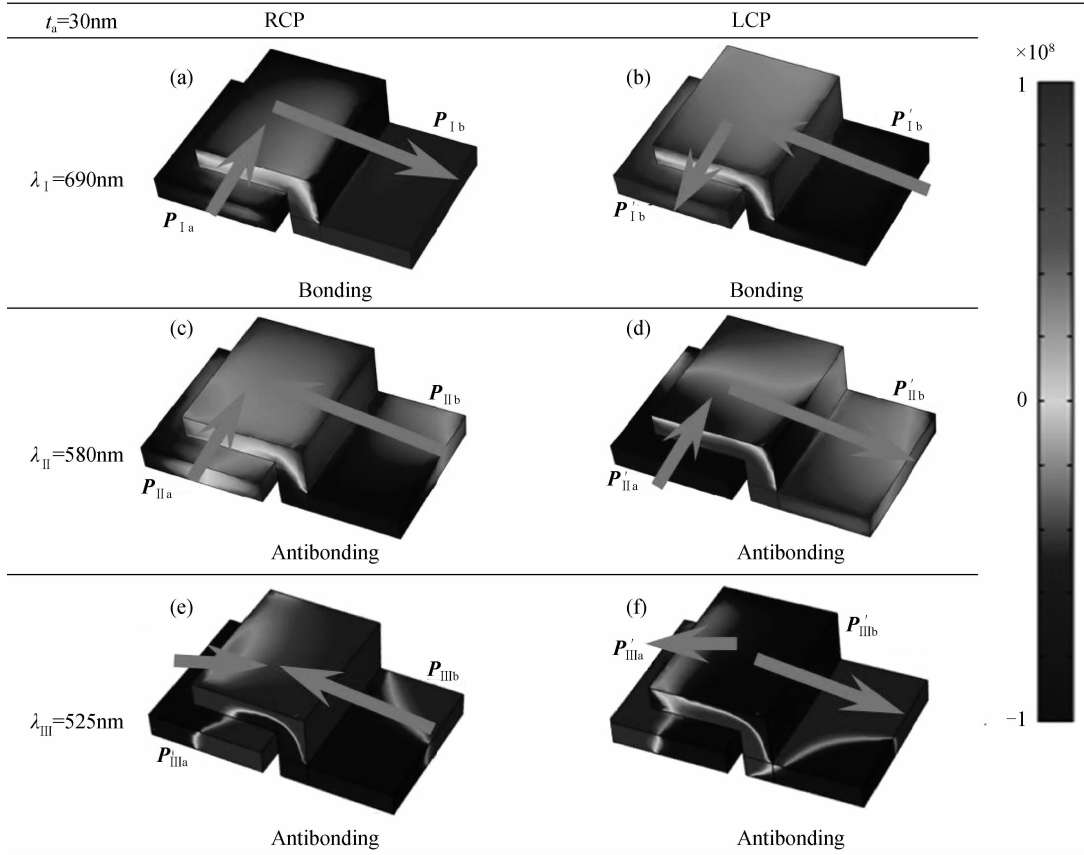


图 6 右手性结构在不同共振波长处的表面电荷分布

Fig. 6 At different resonant wavelengths, the near-field charge density distributions of Right-handed chiral nanostructure

倾斜 L 形手性结构产生 CD 的机制可以用 Born-Kuhn 模型来解释^[11,27]. RCP 激发下,在 $\lambda_I=690\text{ nm}$ 共振波长处,具有相位差的 \mathbf{P}_{Ia} 和 \mathbf{P}_{Ib} 两个电偶极子形成 Bonding 模式,如图 6(a)箭头所示. LCP 激发下,在 $\lambda_I=690\text{ nm}$ 共振波长处,两个电偶极子同样形成 Bonding 模式,如图 6(b)箭头所示. 图 6(a)和图 6(b)表面电荷分布强弱可知,在 $\lambda_I=690\text{ nm}$ 波长处的 CD 模式 I,主要由金属臂 l_2 上产生的高度差产生. 同理,RCP 激发结构,在 $\lambda_{II}=580\text{ nm}$ 共振波长处,两个电偶极子形成 Antibonding 模式;LCP 激发结构,两个电偶极子形成 Antibonding 模式. 模式 II 主要由金属臂 l_1 上的不同高度差产生. RCP 激发结构,在 $\lambda_{III}=525\text{ nm}$ 处的 CD 模式 III,两个电偶极子形成 Antibonding 模式,LCP 激发结构,在 $\lambda_{III}=525\text{ nm}$ 处的共振模式 III,两个电偶极子同样形成 Antibonding 模式,CD 模式 III 主要由金属臂 ω_1 上的不同高度差产生. RCP 和 LCP 分别激发倾斜 L 手性结构,均形成具有高度差的两个电偶极子,其可以形成 bonding 模式和 Antibonding 模式. RCP 激发右手金属倾斜 L 手性结构,比 LCP 更易激发出 Bonding 模式,LCP 激发右手金属倾斜 L 手性结构,比 RCP 更易激发出 Antibonding 模式,因此,当 RCP 经过右手倾斜 L 手性结构后,右手倾斜 L 手性结构形成的局域表面等离激元,对 RCP 影响比 LCP 小,所以右手倾斜 L 手性结构形成 Bonding 模式处,CD 信号为正. 同理,当 LCP 经过右手倾斜 L 手性结构后,右手倾斜 L 手性结构形成的局域表面等离激元,对 LCP 影响比 RCP 小,右手倾斜 L 手性结构形成 Antibonding 模式处,CD 信号为负.

3 结论

本文通过倾斜角沉积技术,在单层 PS 小球模板上,大面积地制备倾斜 L 形手性结构.将倾斜 L 形手性结构的一条金属臂沉积在二氧化硅上面,使得制备出该结构的两个金属臂具有不同的高度差.本文研究了不同厚度的二氧化硅对倾斜 L 形手性结构的 CD 影响,并数值模拟计算研究倾斜 L 形手性结构产生 CD 的原因. RCP 和 LCP 激发倾斜 L 形手性结构,产生具有相位差的两个电偶极子形成 Bonding 模式和 Antibonding 模式,即倾斜 L 形手性结构与 Born-Kuhn 模型产生的 CD 机制相同.研究表明,可以通过优化二氧化硅的厚度来实现调节倾斜 L 形手性结构的 CD. 倾斜 L 形手性结构的制备以及 CD 的研究,在未来设计金属手性纳米结构产生强 CD,用来探测生物监测、对映体传感、偏振转换和光电子的圆偏振器等领域,有着一定的指导意义.

参考文献

- [1] MARTIN S, DANIEL D, MARIO H, *et al.* Tailoring enhanced optical chirality: Design principles for chiral plasmonic nanostructures[J]. *Physical Review X*, 2012, **2**(3): 1-9.
- [2] VALEV V K, BAUMBERG J J, SIBILIA C, *et al.* Chirality and chiroptical effects in plasmonic nanostructures: fundamentals, recent progress, and outlook[J]. *Advanced Materials*, 2013, **25**(18): 2517-2534.
- [3] HE Yi-zhuo, GEORGE K L, WHITNEY I, *et al.* Tunable three-dimensional helically stacked plasmonic layers on nanosphere monolayers[J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(4): 1976-1981.
- [4] LIU Wen-jing, LIU Di, ZHU Zhe-ning, *et al.* DNA induced intense plasmonic circular dichroism of highly purified gold nanobipyramids[J]. *Nanoscale*, 2014, **6**(9): 4498-4502.
- [5] MOCHIDA Y, CABRAL H, MIURA Y, *et al.* Bundled assembly of helical nanostructures in polymeric micelles loaded with platinum drugs enhancing therapeutic efficiency against pancreatic tumor[J]. *ACS Nano*, 2014, **8**(7): 6724-6738.
- [6] JUSTYNA K G, MICHAEL L, ANDREAS F, *et al.* Tapered gold-helix metamaterials as improved circular polarizers [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(10): 1-3.
- [7] JUSTYNA K G, MICHAEL T, MICHAEL S R, *et al.* Gold helix photonic metamaterial as broadband circular polarizer [J]. *Science*, 2009, **325**(5947): 1513-1515.
- [8] VIDAL X, KIM W J, BAEV A, *et al.* Coupled plasmons induce broadband circular dichroism in patternable films of silver nanoparticles with chiral ligands[J]. *Nanoscale*, 2013, **5**(21): 10550-10555.
- [9] ZHAO Y, BELKIN M A, ALU A. Twisted optical metamaterials for planarized ultrathin broadband circular polarizers [J]. *Nature Communication*, 2012, **3**(870): 1-7.
- [10] LIN Wu, YANG Zhen-yu, Cheng Yong-zhi, *et al.* Electromagnetic manifestation of chirality in layer-by-layer chiral metamaterials[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(5): 5239-5246.
- [11] YIN Xing-hui, SCHAFFERLING M, METZGER B, *et al.* Interpreting chiral nanophotonic spectra: the plasmonic Born - Kuhn Model[J]. *Nano Letters*, 2013, **13**(12): 6238-6243.
- [12] CUI Yong-hao, KANG Lei, LAN Shou-feng, *et al.* Giant chiral optical response from a twisted-arc metamaterial[J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(2): 1021-1025.
- [13] CAO Tun, ZHANG Lei, ROBERT E S, *et al.* Strongly tunable circular dichroism in gammadion chiral phase-change metamaterials[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(23): 27841-27851.
- [14] LI Zhao-feng, ALICI K B, COLAK E, *et al.* Complementary chiral metamaterials with giant optical activity and negative refractive index[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **98**(161907): 1-3.
- [15] ZHANG Z Y, ZHAO Y P. The visible extinction peaks of Ag nanohelices: A periodic effective dipole model[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **98**(083102): 1-3.
- [16] DECKER M, ZHAO R, SOUKOULIS C M, *et al.* Twisted split-ring-resonator photonic metamaterial with huge optical activity[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(10): 1593-1595.
- [17] LI Zhao-feng, ZHAO Rong-kuo, KOSCHNY T, *et al.* Chiral metamaterials with negative refractive index based on four "U"split ring resonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(081901): 1-3.
- [18] XIONG Xiang, SUN Wei-hua, BAO Yong-jun, *et al.* Construction of a chiral metamaterial with a U-shaped resonator assembly[J]. *Physics Review B*, 2010, **81**(7): 1-6.
- [19] DONG Jian-feng, ZHOU Jiang-feng, KOSCHNY T, *et al.* Bi-layer cross chiral structure with strong optical activity and negative refractive index[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(16): 14172-14179.
- [20] DECKER M, RUTHER M, KRIEGLER C E, *et al.* Strong optical activity from twisted-cross photonic metamaterials [J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(16): 2501-2053.
- [21] FENG C, WANG Z B, LEE S, *et al.* Giant circular dichroism in extrinsic chiral metamaterials excited by off-normal incident laser beams[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(10-11): 2750-2754.

- [22] MAOZ B M, MOSHE A B, VESTLER D, *et al.* Chiroptical effects in planar achiral plasmonic oriented nanohole arrays [J]. *Nano Letters*, 2012, **12**(5): 2357-2361.
- [23] TIAN Xiao-rui, FANG Yu-rui, ZHANG Bai-le, *et al.* Multipolar Fano resonances and Fano-Assisted optical activity in silver nanorice heterodimers[J]. *ACS Photonics*, 2014, **1**(11): 1156-1164.
- [24] ESLAMI S, GIBBS J G, RECHKEMMER Y, *et al.* Chiral nanomagnets[J]. *ACS Photonics*, 2014, **1**(11): 1231-1236.
- [25] GIBBS J G, MARK A G, ESLAMI S, *et al.* Plasmonic nanohelix metamaterials with tailorable giant circular dichroism [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(213101): 1-4.
- [26] YEOM Bong-jun, ZHANG Hua-nan, ZHANG Hui, *et al.* Chiral plasmonic nanostructures on achiral nanopillars[J]. *Nano Letters*, 2013, **13**(11): 5277-5283.
- [27] WANG Yong-kai, DENG Jun-chen, WANG G, *et al.* Plasmonic chirality of L-shaped nanostructure composed of two slices with different thickness[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(3): 2307-2317.
- [28] HE Yu-ping, WU Jin-song, ZHAO Yi-ping. Designing catalytic nanomotors by dynamic shadowing growth[J]. *Nano Letters*, 2007, **7**(5): 1369-1375.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61575117) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Nos. GK201601008, GK201603015)