

对称破缺二聚体混合结构高 Q 圆二色性肖功利¹, 周嗣童¹, 杨宏艳^{2*}, 赖子凡¹, 陈佳宇¹, 李海鸥¹, 刘兴鹏¹, 陈赞辉¹¹桂林电子科技大学广西高校微电子器件与集成电路重点实验室, 广西 桂林 541004;²桂林电子科技大学光电工程学院, 广西 桂林 541004

摘要 圆二色性(CD)通常用来表征手性响应强度,在手性检测领域极具应用前景。本文提出了一种金衬底上对称性破缺的全介质二聚体混合结构,可在 721.1 nm 波段处产生高达 0.42 的强 CD,并且 CD 谱具有极窄的线宽,仅为 0.16 nm。通过琼斯矩阵对该结构进行了理论分析,采用时域有限差分(FDTD)法进行建模与仿真,研究结果表明,通过改变介质二聚体的尺寸大小或椭圆柱介质的旋转角(θ)和两个介质的相对位置(G)等参数可以对结构的 CD 响应进行相应的优化。并且通过电场分析发现,圆偏振光激发了二聚体的表面晶格共振(SLR),导致其 CD 谱具有高品质因子(Q)特性。基于此结构传感的灵敏度为 718.3 nm/RIU(灵敏度单位), Q 值可高达 4489.4。此外,该手性结构的周期单元可以实现数字成像功能,不同偏振光下具有不同的成像信号。高 Q 值 CD 的研究结果为高性能的手性传感及光学成像的研究奠定了一定的理论基础。

关键词 圆二色性; 对称破缺; 二聚体; 表面晶格共振

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231104

1 引言

手性是自然界中物体的最基本属性之一,它指的是一个物体的镜像结构不能通过任何旋转或平移的方式与其相重合的特性^[1]。手性通常通过圆二色性(CD)的形式来表征,其具体数值一般定义为对左旋圆偏振(LCP)光和右旋圆偏振(RCP)光的吸收差值^[2-3],其分子光谱常被用来测定食品中葡萄糖的含量,也是分析蛋白质二级结构及部分病毒分子相关性信息的重要工具^[4-6]。目前各种色谱法最常被用来进行手性分析,然而其具有样品处理繁琐、成本较高以及耗时较长等不足之处,随着手性食品、药物等领域的快速发展,迫切需要更加完善的手性分析方法^[7]。而高品质因子(Q)、高速的手性传感器可以弥补色谱法的不足,因此被广泛应用于化学、生物等领域的手性分析中。手性传感器可以与手性底物之间形成对应体,会产生有明显差异的 CD 信号,对手性底物进行测定^[8-9],因此,CD 谱也是手性传感中至关重要的部分^[10]。

由于等离子纳米手性结构在圆偏振光下可以激发出很强的局域表面等离激元共振(LSPR)和较强的 CD 响应,使其在高 Q 手性传感方面有着天然的优势。此外,具有较高 Q 的谐振结构会具有较低的辐射损耗,

以实现光和介质之间的有效相互作用。但大多数金属纳米结构会不可避免地出现较高的欧姆损耗,导致其具有相对较宽的线宽^[11]。表面等离激元(SPP)具有放大光学信号的能力,可以提高分子检测的可靠性。因此,基于 SPP 设计的手性超材料结构成为实现分子检测的有力手段^[12]。然而,SPP 与生物分子之间的耦合机制相对复杂,这极大地增加了金属纳米结构的设计难度。目前高 Q 值手性结构的设计方法已有不少报道,其中一种常见的方法是利用周期结构单元之间的 LSPR 与空间点阵支持的瑞利异常衍射光发生耦合作用会激发产生形成表面晶格共振(SLR),以及基于 SLR 的光电子器件具有大范围近场增强和低损耗等优点。例如,Fang 等^[13]提出了一种金属-绝缘体-金属(MIM)光栅结构,可以在斜入射下以及较宽的绝缘层宽度范围内激发出高 Q 值的面外四极 SLR,并且其 Q 值可高达 1036。然而由于金属直接参与了耦合谐振,导致其会无法避免一些额外的辐射损耗。此外,还有一些方法是利用石墨烯图案化结构来设计的,因为其具有比贵金属更低的阻尼和更显著的波局域化特性。Zhou 等^[14]提出了一种手性石墨烯等离子体阿基米德螺旋(AS)纳米结构,不但可以通过调整 AS 的圈数和化学势提高 CD,还可以实现高灵敏度的折射率传感,

收稿日期: 2023-06-06; 修回日期: 2023-07-15; 录用日期: 2023-08-03; 网络首发日期: 2023-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(62165004, 61805053)、广西自然科学基金(2023GXNSFAA026108)、桂林电子科技大学研究生创新项目(2022YCX047, 2021YCX040)

通信作者: *hyang@guet.edu.cn

但是其复杂的结构设计也加大了制造方面的难度。不同于上述方法,本文通过在金薄膜上放置低折射率的介质二聚体,利用了金膜的反射镜特性,将 SLR 产生的局域场从金属表面转移到介质顶部,从而形成了窄线宽的谐振模。因此本文所提出的方法不仅结构更加简单,也极大程度地避免了金属直接参与谐振而产生的欧姆损耗,在实际应用中具有更大的优势。

基于上述研究背景,本文提出了一种在金属衬底上构建对称性破缺全介质二聚体混合结构的方法,并采用时域有限差分(FDTD)法进行建模和仿真。首先,利用琼斯矩阵法对该结构进行了理论分析;接着通过电场响应分析该结构的 CD 产生机理以及窄线宽的原因;在此基础上,还讨论了二聚体结构的尺寸大小、圆柱的转动角度(θ)、方柱与圆柱介质之间的相对距离(G)和周围环境折射率等参数对 CD 模式的影响,并计算了其灵敏度(S)和 Q ,定量分析了其折射率传感特性。此外,本文构建了一个周期为 4×16 的单元来验证结构在成像领域的具体应用。本文方法为后续高性能手性传感器件和光学成像器件的设计提供了崭新

的思路。

2 建模及理论分析

2.1 模型建立

本文采用 FDTD Solutions 软件对设计的结构进行建模以及仿真,如图 1(a)所示为金属衬底上二聚体混合结构及其周期单元,该结构由上部的方柱和椭圆柱全介质聚合的二聚体和下部的金衬底组成,介质的折射率设置为 1.63,厚度 h 均为 450 nm;方柱的宽和长分别为 $a_1=118$ nm 和 $a_2=400$ nm;椭圆柱的短轴和长轴分别为 $b_1=160$ nm 和 $b_2=406$ nm; x 和 y 方向的周期分别为 $p_x=p_y=720$ nm,金衬底的厚度 d 满足反射镜即可,椭圆柱沿 z 方向逆时针旋转的角度定义为 θ 。

关于介质二聚体的制备工艺已有报道。首先可以通过电子束光刻技术在介质顶部制备掩模,然后通过刻蚀法除去多余的部分^[15-17],就可以得到所需要的二聚体结构,最后通过转移技术将二聚体转移到金衬底上即可。通过扫描电子显微镜(SEM)技术可以对所制备的样品进行表征和观察^[18]。

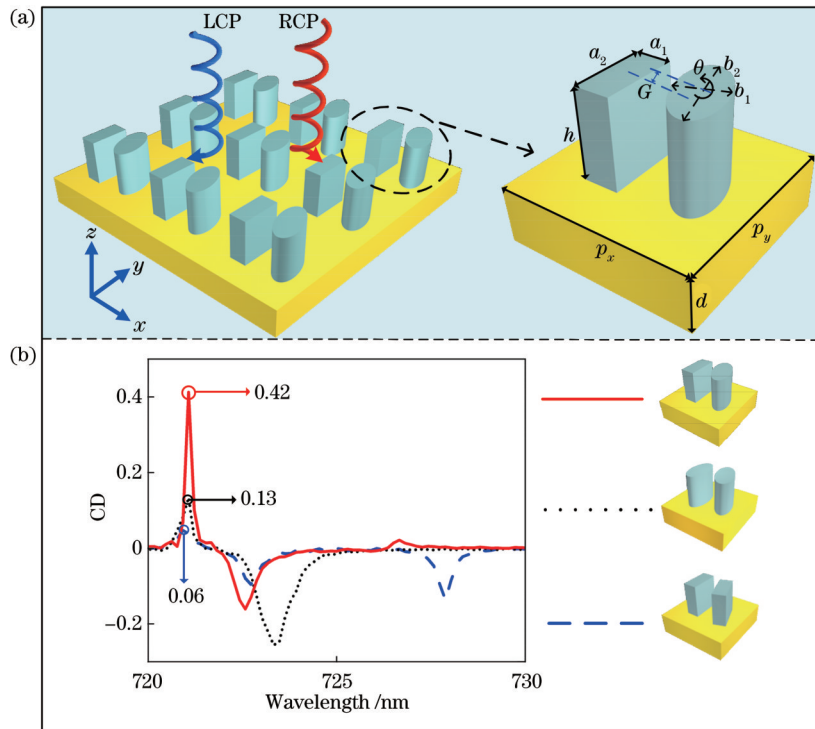


图 1 二聚体结构及不同组合结构的 CD 响应。(a)金属衬底上二聚体混合结构示意图及其周期单元;(b)三种不同二聚体结构的 CD 响应对比图

Fig. 1 Dimer structure and CD responses of different combinations of structures. (a) Schematic diagram of dimer hybrid structure on metal substrate and its periodic unit; (b) comparative plots of CD responses of three different dimer structures

2.2 理论分析

接下来,本文对该结构进行理论分析。假设圆偏振波(CP)沿 z 轴负方向入射,则入射场可表示为

$$E_i(r, t) = \begin{pmatrix} i_x \\ i_y \end{pmatrix} \cdot e^{i(kz - \omega t)}, \quad (1)$$

式中: ω 表示入射光的角频率; k 表示波矢; i_x 和 i_y 表示入射光的偏振态。该入射光经过手性结构阵列后的反射场可表示为

$$E_R(r, t) = \begin{pmatrix} R_x \\ R_y \end{pmatrix} \cdot e^{i(kz - \omega t)}. \quad (2)$$

入射波与反射波之间的关系可用琼斯矩阵^[19-20]来进行描述:

$$\begin{pmatrix} R_x \\ R_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{xx} & R_{xy} \\ R_{yx} & R_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_x \\ i_y \end{pmatrix} \quad (3)$$

琼斯矩阵表示为 $R_{IN} = \begin{pmatrix} R_{xx} & R_{xy} \\ R_{yx} & R_{yy} \end{pmatrix}$, 如果结构具有镜像不对称性, 则 $R_{xy} \neq R_{yx}$ 。变换后的圆偏振琼斯矩阵可以表示为

$$R_{cir} = \begin{bmatrix} R_{++} & R_{+-} \\ R_{-+} & R_{--} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{bmatrix} R_{xx} + R_{yy} + i(R_{xy} - R_{yx}) \\ R_{xx} - R_{yy} - i(R_{xy} + R_{yx}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{xx} - R_{yy} - i(R_{xy} + R_{yx}) \\ R_{xx} + R_{yy} - i(R_{xy} - R_{yx}) \end{bmatrix} \right\}, \quad (4)$$

式中: 主对角线元素表示为同向圆偏振态的反射系数(RCP入射-RCP反射, LCP入射-LCP反射); 副对角线的元素表示为交叉圆偏振态的反射系数(LCP入射-RCP反射, RCP入射-LCP反射)。综合上述公式可知, 当LCP波和RCP波同时入射本文设计的手性结构时, 由于其对称性被打破, 则主对角线元素存在 $R_{++} \neq R_{--}$, 因此结构将出现强烈的CD。

在相同的结构参数下, 本文对比了三种不同二聚体结构的CD响应。根据图1(b)的结果显示, 由方柱和椭圆柱组成的二聚体混合结构产生的CD值为0.42, 明显优于单独由椭圆柱组成的二聚体(0.13)和由方柱组成的二聚体(0.06)的CD值。这是因为椭圆柱结构具有特殊的旋光特性^[21], 常被用于电磁波的偏振操纵, 而方柱因其更加规则的结构属性而具有更合理的间隙距离使得谐振可以被更好地耦合在二聚体的间隙, 产生更窄的线宽^[22-223]。而本文所提的二聚体混合结构结合了二者的优点, 并且其对称性破缺程度也相对较大, 导致了其强烈的CD响应和极窄的CD谱线宽。因此, 本文将重点讨论这种二聚体混合结构。

由图2(a)可知, 该结构在波长为721.1 nm处对

LCP和RCP光的吸收存在较大差异, 在722.6 nm处差异较小, 而在726.5 nm处基本重合, 这就导致这三个点的CD响应也完全不同, 本文分别展示了这三个波长处在 $x-z$ 平面的电场分布, 如图2(b)~2(d)所示。图2(b)为721.1 nm处的场分布, 明显地表现出LCP和RCP光的表面晶格共振特征, 局域场基本全部被转移到二聚体的顶部, 这种场的提升可以有效避免非必要的辐射^[22], 因此具有极窄的线宽, 此外在RCP和LCP光下, 结构的电磁响应差异也很大, 导致了该结构对LCP和RCP光的自旋式吸收响应^[24], 因此在该点具有较强的CD响应。图2(c)展示了722.6 nm处的场分布, 可以发现RCP下电场主要集中于方柱一侧, 而LCP下主要集中于椭圆柱一侧, 这种差异导致了在此频点吸收性具有一定的差异, 但由于二者的场都集中于靠近金衬底一端, 因此会产生一定的额外损耗导致了相对较宽的线宽。而如图2(d)所示, 在LCP和RCP下的电场响应十分相似, 并无明显差异, 因此在726.5 nm处吸收谱几乎重合不存在CD响应, 并且因其电场集中在二聚体底部, 会造成更高的辐射损耗导致较宽的线宽。

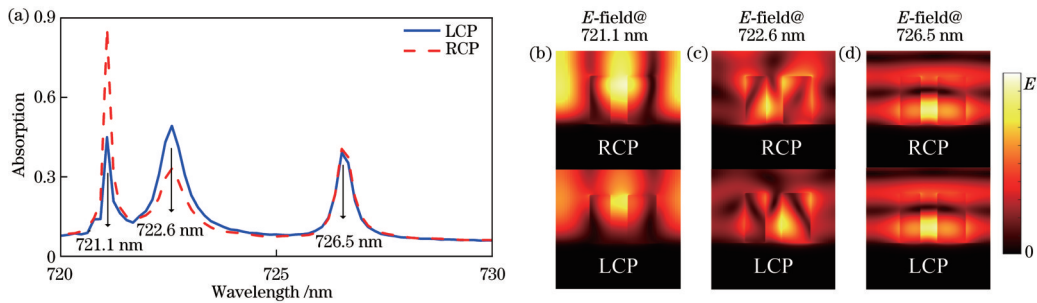


图2 提出的对称破缺二聚体混合结构的吸收系数及其 $x-z$ 平面的电场分布。(a)在RCP和LCP条件下, 波长为(b)721.1 nm; (c)722.6 nm; (d)726.5 nm

Fig. 2 Absorption coefficient and electric field distribution in $x-z$ plane of proposed symmetrically broken dimer hybrid structure. (a) Under RCP and LCP conditions, wavelength being (b) 721.1 nm; (c) 722.6 nm; (d) 726.5 nm

3 结构与性能分析

当二聚体的几何结构参数发生变化时, CD谱峰值的位置和大小也会随之变化。因此, 本文可以通过改变结构参数的大小来研究这些参数对CD谱的影响。

灵敏度(S)通常用来衡量共振波长随周围环境折

射率变化的偏移程度, 其可以直接用来衡量传感器对于周围介质环境折射率变化的敏感度, 其表达式^[14]为

$$S = \frac{d\lambda}{dn}, \quad (5)$$

式中: $d\lambda$ 是由折射率变化引起的共振波长的变化量; dn 是折射率变化量。

Q是衡量折射率传感器性能的重要指标, Q的数

值可以直接展示传感器的传感性能,其表达式^[14]为

$$Q = \frac{S}{F_{\text{FWHM}}}, \quad (6)$$

式中, F_{FWHM} 表示共振峰的半峰全宽。

3.1 二聚体结构尺寸数值以及参数 θ 和 G 对 CD 的影响

首先,本文对二聚体的尺寸大小进行了参数扫描,

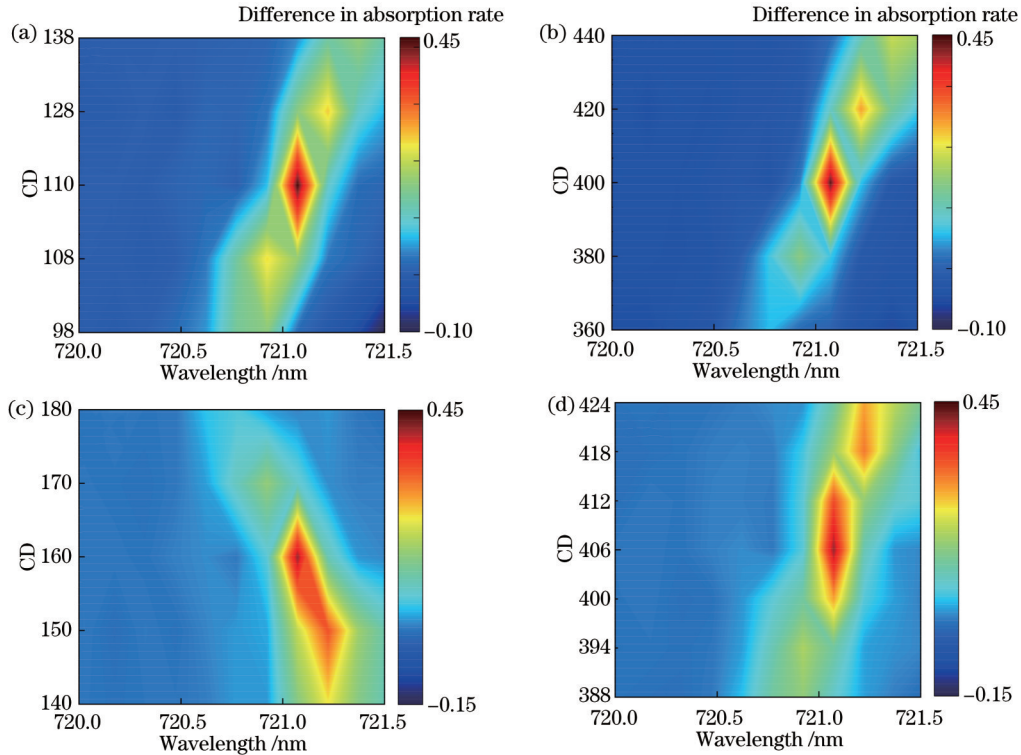


图 3 改变参数 a_1 、 a_2 、 b_1 和 b_2 对 CD 谱的影响。(a) a_1 ; (b) a_2 ; (c) b_1 ; (d) b_2

Fig. 3 Influence of changing parameters a_1 , a_2 , b_1 , and b_2 on CD spectrum. (a) a_1 ; (b) a_2 ; (c) b_1 ; (d) b_2

接下来探讨了二聚体圆柱的旋转角(θ)对 CD 谱的影响, θ 从 5° 变化到 23° ,其他参数保持不变。结果如图 4(a)所示,该结构的 CD 受 θ 的影响,在 $11^\circ \sim 20^\circ$ 的范围内时,结构的 CD 保持 0.4 以上的高响应状态,是因为 θ 在此范围内对二聚体结构的对称性破坏很强。

此外,还探讨了方柱与椭圆柱之间相对距离(G)对 CD 谱的影响,对参数 G 从 $-20 \sim 50$ nm 进行扫描,结果如图 4(b)所示, G 在 $13 \sim 18$ nm 之间的 CD 响应很强,超过 0.4。对称性是影响琼斯矩阵中对角线元素的重要因素,这会导致不同圆偏振光的吸收差异,从而影响结构的 CD 响应。因此可以通过改变参数如旋转角度 θ 或相对距离 G 来打破结果对称性,实现对称破缺从而达到优化 CD 结果的目的^[20]。

3.2 折射率对传感性能的影响

经过研究发现,周围环境折射率的变化对该结构反射光谱有着明显的影响。在 RCP 光下观察其传感特性,通过观察反射系数可以看出,当改变周围介质的折射率时,反射谱的峰值会发生红移现象。如图 5(a)

其他参数保持一致,结果如图 3 所示。其中图 3(a)和 3(b)分别展示了方柱的短边 a_1 和长边 a_2 对 CD 的影响,而图 3(c)和 3(d)分别展示了椭圆柱短轴 b_1 和长轴 b_2 对 CD 的影响。根据图 3 所示的结果可知,参数 $a_1=118$ nm、 $a_2=400$ nm 和 $b_1=160$ nm、 $b_2=406$ nm 时为最优的结构参数,此时对结构的对称性可以达到最大程度的破坏,因此 CD 响应最为强烈。

所示,在反射谱中存在其他两处共振峰也随周围环境折射率的变化而变化。这为 CD 峰检测手性传感提供了新思路。然而,在本次设计中,关注的重点是提高 Q 值。因为其他两处 CD 谱的峰值略低且相对较宽,所以本文不考虑,本文所有的计算结果都是基于第一个峰(mode)得到的。

经过计算,得到了该传感器的灵敏度,并在图 5(b)中绘制了共振波长与折射率变化量的关系图,可以直观地反映出传感器的灵敏度。结果显示,mode 的灵敏度为 (718.3 ± 24.2) nm/RIU (灵敏度单位)。同时,还计算了不同折射率下的半峰全宽(FWHM)和 Q ,如图 5(c)所示,最小的 FWHM 可达 0.16 nm,对应最高的 Q 值高达 4489.4。因此,可用于设计高性能手性传感器件。

3.3 成像方面的应用

为了展示本文设计在成像系统方面的应用,本文构建了一个周期为 4×16 的结构单元,如图 6(a)所示。其中二聚体与其镜像结构各自组成了一个 4×4 的小单元并交叉排列。分别展示了其在 RCP 和 LCP 光入

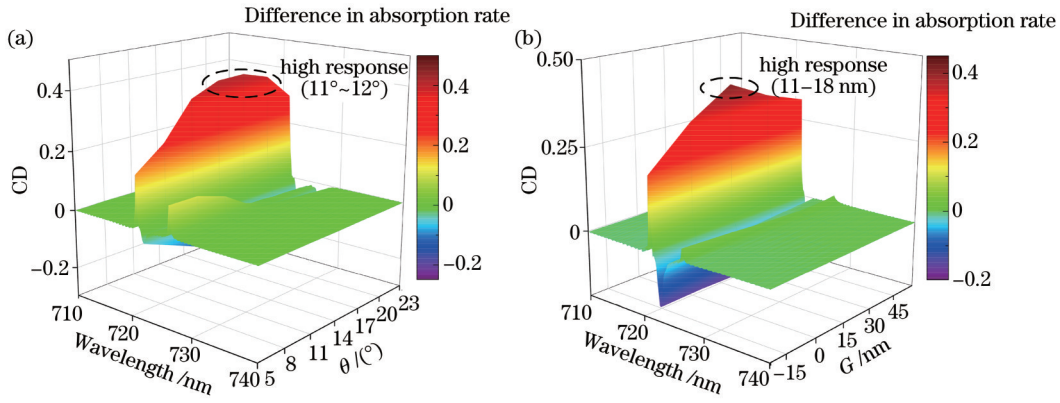


图 4 改变参数 θ 和 G 对 CD 谱的影响。(a) θ ; (b) G

Fig. 4 Influence of changing parameters θ and G on CD spectrum. (a) θ ; (b) G

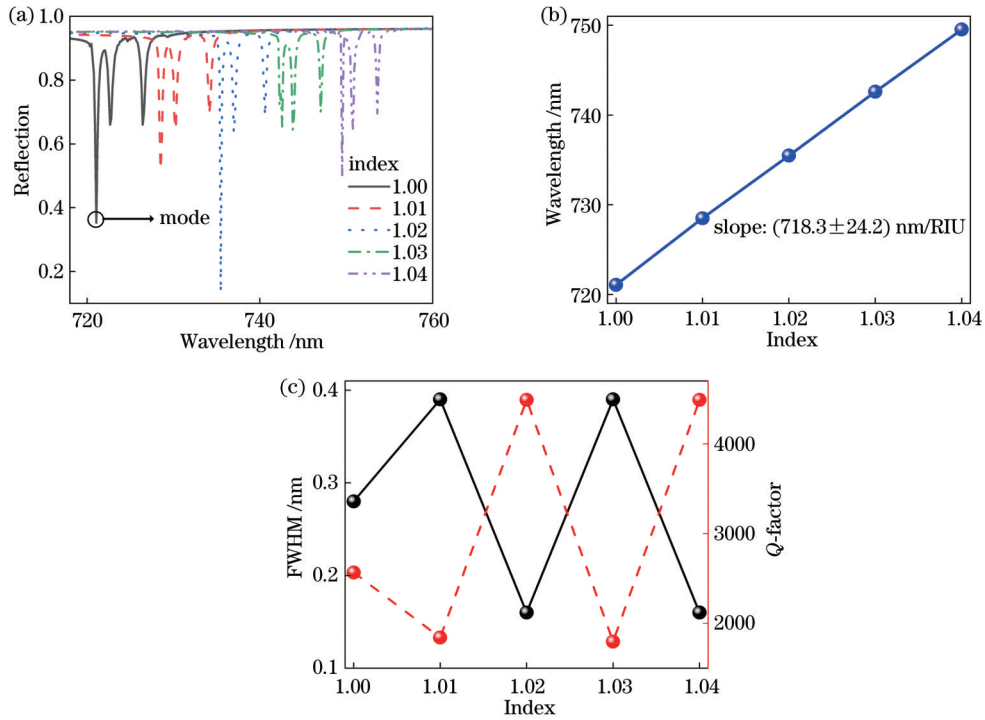


图 5 对称破缺二聚体混合结构的传感特性。(a) 不同折射率条件下的反射光谱; (b) 折射率与共振波长的关系; (c) 不同折射率条件下的 FWHM 和 Q 的关系图

Fig. 5 Sensing properties of symmetry-broken dimeric hybrid structure. (a) Reflection spectra under different refractive indexes' conditions; (b) relationship between refractive index and resonance wavelength; (c) relationship between FWHM and Q under different refractive indexes' conditions

射下的近场响应,其中电场的强响应为数字信号“1”,弱响应为数字信号“0”。如图 6(b)所示为 RCP 下的 x - y 平面的电场响应,可以直接观察到此时的数字信号响应为“1010”;图 6(c)展示了 LCP 下的电场响应,看到此时的数字信号为“0101”。在不同的圆偏振光下显示出了不同的数字信号,因此可以通过控制偏振光来操纵成像信号,在成像加密等领域有着重要的应用价值。

最后,本文总结了近年来关于高 Q 光学器件的研究结果,并将其与本文设计进行对比,如表 1 所示。可以发现,本文设计具有较高的 Q 值,这是较低的能量损

耗导致了较窄的 FWHM 所产生的结果。

4 结 论

本文提出了一种金衬底上对称性破缺电介质二聚体混合结构。该结构由下方的金衬底和上方的非对称二聚体结构组成,其中二聚体由方柱和椭圆柱全介质混合而成。通过改变二聚体结构的尺寸大小、 θ 和 G 等参数,可以调谐该结构的 CD 响应。通过电场分析,在圆偏振光作用下激发 SLR 所产生的场强会全部局域在二聚体顶部,从而产生高的 Q 值。此外,还验证了该结构的传感性能,并且计算结果显示,灵敏度为

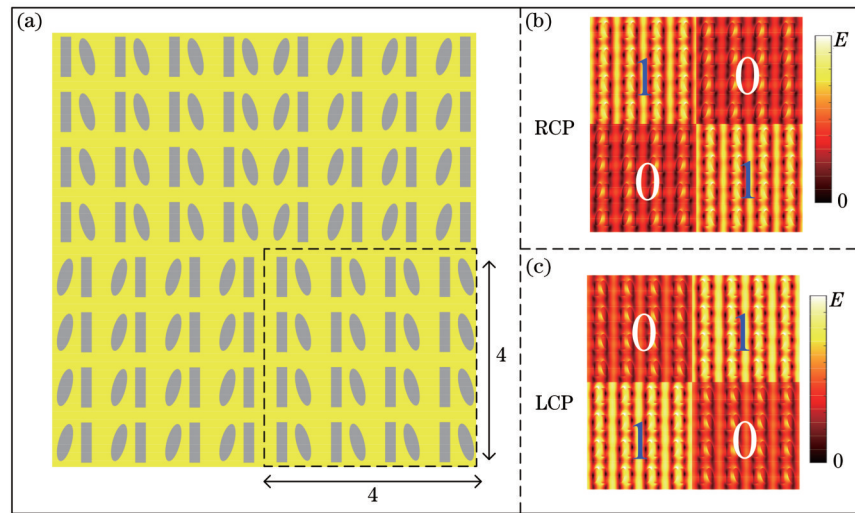


图 6 近场数字成像结构单元。(a)结构单元阵列图;(b)RCP光入射时的近场响应;(c)LCP光入射时的近场响应

Fig. 6 Near-field digital imaging structural units. (a) Structural unit array diagram; (b) near-field response at RCP light incidence; (c) near-field response at LCP light incidence

表 1 不同结构的结果对比。

Table 1 Comparison of results for different structures

Structure	FWHM /nm	$S /$ ($\text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$)	Q / RIU^{-1}
Li's work ^[25]	20	—	36.3
Ding's work ^[26]	80	—	22.5
Zhou's work ^[14]	101.82	7000	68.75
Chen's work ^[8]	1	80.6	80.6
This work	0.16	718.3	4489.4

(718.3 ± 24.2) nm/RIU, Q 值也高达 4489.4。最后, 本文构建了一个周期为 4×16 的结构单元, 在 RCP 和 LCP 光下近场响应的数字信号结果分别为“1010”和“0101”, 因此可以通过操纵圆偏振光对成像信号的结果进行调控。该结构在高性能传感和偏振操纵器件等领域具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Hentschel M, Schäferling M, Duan X Y, et al. Chiral plasmonics[J]. *Science Advances*, 2017, 3(5): e1602735.
- [2] Woody R W. circular dichroism[M]//Methods in enzymology. Amsterdam: Elsevier, 1995: 34-71.
- [3] Beaulieu S, Comby A, Descamps D, et al. Photoexcitation circular dichroism in chiral molecules[J]. *Nature Physics*, 2018, 14(5): 484-489.
- [4] Cunha F C, de Holanda R C, Secchi A R, et al. Simultaneous absorption of UV-vis and circular dichroism to measure enantiomeric concentrations of praziquantel under nonlinear conditions[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2020, 241: 118645.
- [5] Ngamdee K, Ngeontae W. Circular dichroism glucose biosensor based on chiral cadmium sulfide quantum dots[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 274: 402-411.
- [6] Spencer S E F, Rodger A. Bayesian inference assessment of protein secondary structure analysis using circular dichroism data - how much structural information is contained in protein circular dichroism spectra?[J]. *Analytical Methods*, 2021, 13(3): 359-368.
- [7] 熊斐, 李莉. 手性传感器研究进展[J]. *有机化学*, 2018, 38(11): 2927-2936.
Xiong F, Li L. Advances in development of chiral sensors[J]. *Chinese Journal of Organic Chemistry*, 2018, 38(11): 2927-2936.
- [8] Chen Y, Zhao C, Zhang Y Z, et al. Integrated molar chiral sensing based on high-Q metasurface[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(12): 8696-8703.
- [9] Zhu F, Li X Y, Li Y C, et al. Enantioselective circular dichroism sensing of cysteine and glutathione with gold nanorods [J]. *Analytical Chemistry*, 2015, 87(1): 357-361.
- [10] 桂丽丽, 冯懋宇, 廖祥莱, 等. 手性超构表面研究进展及应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(5): 0500001.
Gui L L, Feng M Y, Liao X L, et al. Research progresses and applications of chiral metasurfaces[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(5): 0500001.
- [11] Niehusmann J, Vörckel A, Bolivar P H, et al. Ultrahigh-quality-factor silicon-on-insulator microring resonator[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(24): 2861-2863.
- [12] 徐云川, 江达飞, 王春早. 基于环偶极子共振的高 Q 值超材料传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(9): 0906011.
Xu Y C, Jiang D F, Wang C Z. High- Q metamaterial sensor based on toroidal dipole resonance[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(9): 0906011.
- [13] Fang X Y, Xiong L, Shi J P, et al. High- Q quadrupolar plasmonic lattice resonances in horizontal metal-insulator-metal gratings[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(7): 1546-1549.
- [14] Zhou H J, Su S J, Ma H X, et al. Chiral graphene plasmonic Archimedes' spiral nanostructure with tunable circular dichroism and enhanced sensing performance[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 31954-31966.
- [15] Askew H J, Jarvis K L, Jones R T, et al. Electron beam lithography nanopatterning of plasma polymers[J]. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2021, 222(12): 2100026.
- [16] Steingrüber R, Ferstl M, Pilz W. Micro-optical elements fabricated by electron-beam lithography and dry etching technique using top conductive coatings[J]. *Microelectronic Engineering*, 2001, 57/58: 285-289.
- [17] Sharma P, Ponte F, Lima M J, et al. Plasma etching of polycarbonate surfaces for improved adhesion of Cr coatings[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 637: 157903.

- [18] Chang T H P, Thomson M G R, Yu M L, et al. Electron beam technology—SEM to microcolumn[J]. *Microelectronic Engineering*, 1996, 32(1/2/3/4): 113-130.
- [19] Zhang R R, Zhao Q L, Wang X A, et al. Controlling asymmetric transmission phase in planar chiral metasurfaces[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(3): 495-505.
- [20] Ali Kuntman M, Kuntman E, Arteaga O. Asymmetric scattering and reciprocity in a plasmonic dimer[J]. *Symmetry*, 2020, 12(11): 1790.
- [21] Kruk S, Hopkins B, Kravchenko I I, et al. Invited Article: Broadband highly efficient dielectric meta-devices for polarization control[J]. *APL Photonics*, 2016, 1(3): 030801.
- [22] Ao X Y. Surface mode with large field enhancement in dielectric-dimer-on-mirror structures[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1091-1094.
- [23] Albella P, Poyli M A, Schmidt M K, et al. Low-loss electric and magnetic field-enhanced spectroscopy with subwavelength silicon dimers[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2013, 117(26): 13573-13584.
- [24] Goerlitzer E S A, Mohammadi R, Nechayev S, et al. Chiral surface lattice resonances[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(22): 2001330.
- [25] Li Y, Bai Y, Zhang Z Y, et al. Enhanced circular dichroism of plasmonic chiral system due to indirect coupling of two unaligned nanorods with metal film[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(23): 6742-6747.
- [26] Ding C C, Rui G H, Gu B, et al. Phase-change metasurface with tunable and switchable circular dichroism[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(10): 2525-2528.

Circular Dichroism with High Q Factor of Symmetry-Broken Dimeric Hybrid Structure

Xiao Gongli¹, Zhou Sitong¹, Yang Hongyan^{2*}, Lai Zifan¹, Chen Jiayu¹, Li Haiou¹,
Liu Xingpeng¹, Chen Zanhui¹

¹Key Laboratory of Microelectronic Devices and Integrated Circuits of Guangxi Colleges, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;

²School of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China

Abstract

Objective Circular dichroism (CD) molecular spectroscopy is often employed to determine the glucose content in food and is also an important tool to analyze the secondary structure of proteins and related property information of some viral molecules. However, chromatographic methods commonly adopted for chiral analysis are difficult to meet the rapid development in food, medicine, and biochemistry due to their shortcomings such as cumbersome sample processing, high cost, and much consumed time. Thus, there is an urgent need for more high-performance chiral analytical methods. High- Q and high-speed chiral sensors can solve these problems to a large extent and thus have been extensively applied to the chiral analysis of various fields, with the emergence of various high- Q chiral metamaterial structures.

Methods Compared with the traditional chiral structure approaches, we can not only achieve stronger CD and maximize the higher Q factor by avoiding the metal radiation loss but also have a relatively simple structure. By placing a symmetry-broken dielectric dimer structure with a low refractive index on the bottom Au film, the mirror properties of the Au film are utilized to transfer the local field generated by surface lattice resonance (SLR) from the metal surface to the media top, which produces a resonant mode with a narrow linewidth. We simulate the structure using finite difference time domain (FDTD) solutions and theoretically analyze it by the Jones matrix method. The effects of parameters on the CD mode are discussed, such as the dimensional size of the dimer structure, the rotation angle of the ellipsoid column (θ), the relative distance between the square column and the ellipsoid medium (G), and the refractive index of the surrounding environment. Meanwhile, the sensitivity (S) and Q are calculated to quantitatively analyze sensing properties of the refractive index, and a cell with a period of 4×16 is arrayed to validate the structure for specific applications in imaging.

Results and Discussions First, we verify the mechanism that the proposed dielectric dimer hybrid structure has a strong CD response and narrow linewidth by analyzing the x - z planar electric field. Then the parameter scanning optimization reveals that the CD of the structure can be optimal at $a_1=118$ nm, $a_2=400$ nm and $b_1=160$ nm, $b_2=406$ nm, and that the CD response intensity can be tuned by varying θ and G . The data results show good performance in sensing, with a sensitivity of (718.3 ± 24.2) nm/RIU, a minimum FWHM of 0.16 nm, and a corresponding maximum Q factor of 4489.4. Additionally, the cell structure exhibits two different digital imaging signals "1010" and "0101" under RCP and LCP lights respectively, which can be manipulated by controlling the polarized light. Thus it is possible to manipulate the imaging signal by controlling the polarized light, which is valuable in areas such as imaging encryption.

Conclusions We present a symmetry-broken dielectric dimer hybrid structure on a Au substrate. The structure consists of a gold substrate below and an asymmetric dimer structure above, where the dimer consists of a mixture of square-column and elliptical-column all-media. The CD response of the structure can be tuned by varying the dimensional size, θ , and G of the dimer structure. By electric field analysis, the field intensity generated by the SLR excitation in the presence of circularly polarized light will be fully localized at the top of the dimer, leading to a high Q factor. Meanwhile, the sensing performance of the structure is also verified and calculated to show a sensitivity of (718.3 ± 24.2) nm/RIU and a Q factor of up to 4489.4. Finally, we array a structured unit with a period of 4×16 , and the results of the digital signals of the near-field response under RCP and LCP lights are "1010" and "0101". Thus, the results of the imaging signals can be modulated by manipulating circularly polarized light. This has potential applications in high-performance sensing and polarization manipulation devices.

Key words circular dichroism; symmetry-broken; dimer; surface lattice resonance