

文章编号: 1000-7032(2025)10-1961-08

基于单层介电超表面的红光波段手性响应

孙 浩, 鄢松岩, 周程扬, 张 韵*

(江苏大学机械工程学院 光电信息科学与工程系, 江苏 镇江 212013)

摘要: 具有手性响应的超表面在光学领域应用广泛, 大多数强手性响应的超表面结构通常由两层或多层亚波长结构通过旋转或偏移进行堆叠, 高对准精度的要求增加了制造难度与成本。本工作介绍了一种工作于红光波段的具有本征手性响应的单层介电超表面, 其在665 nm处的圆二色性透过率可达0.643。通过多极分解分析发现, 超表面中的光散射受多极子共振作用的共同影响。分析局部增强电场分布发现, 超表面利用具有 C_2 对称性的结构来调控干涉相长与相消, 进而实现超表面对圆偏振光的选择性透过。这些成果有助于拓展手性介电超表面在光学加密、显示、生物检测等领域的应用。

关键词: 介电超表面; 手性响应; 圆二色性; 可见光波段; 圆偏振光

中图分类号: O436 文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250120

CSTR: 32170.14.CJL.20250120

Chiral Response in Red Light Band Based on Single-layer Dielectric Metasurface

SUN Hao, YAN Songyan, ZHOU Chengyang, ZHANG Yun*

(Department of Optoelectronic Information Science and Engineering, School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

* Corresponding Author, E-mail: yzhang@ujs.edu.cn

Abstract: Metasurfaces with chiral responses are widely used in optics. To achieve a strong chiral response, most metasurface structures typically use two or more stacked layers of subwavelength structures with rotation or offset. However, the requirement for highly precise alignment increases the manufacturing difficulty and cost. This work introduces a single-layer dielectric metasurface with an intrinsic chiral response operating in the red light band. It has a circular dichroism transmittance of 0.643 at 665 nm. Multipole decomposition analysis reveals that the several dipoles dominate the Mie resonance affecting the light scattering behavior. By analyzing the locally enhanced electric field distribution, it is revealed that the metasurface employs a C_2 -symmetric structure to regulate constructive and destructive interference, enabling selective transmission of circularly polarized light. These findings could expand the application of chiral dielectric metasurfaces in optical encryption, displays, and biological sensing.

Key words: dielectric metasurface; chiral response; circular dichroism; visible light; circularly polarized light

1 引言

手性通常是指物体与其镜像无法通过旋转或平移完全重合的特性, 这种对称性破缺的特性在自然界中广泛存在^[1]。当偏振光束照射在亚波长

手性结构上时, 其所经历的电磁响应与手性结构的几何不对称性密切相关, 导致左旋圆偏振光 (Left-handed circularly polarized, LCP) 和右旋圆偏振光 (Right-handed circularly polarized, RCP) 的相位、振幅和偏振状态产生差异化改变, 进而表现出

收稿日期: 2025-04-17; 修订日期: 2025-05-02

基金项目: 江苏大学科研基金(19JDG020)

Supported by Jiangsu University Foundation (19JDG020)

圆二色性(Circular dichroism, CD)^[2-3]。

近年来,人工设计的超表面在操纵电磁波方面表现出非凡的性能,引起了人们的极大兴趣^[4-6]。与传统的手性结构相比,手性超表面具有显著的优势,例如制造更简单、设计灵活性更高、光-物质相互作用更强等^[7]。人们对它们在成像^[8]、传感^[9]和信息加密^[10]中的应用进行了广泛的研究。目前,大多数报道的手性超表面都是基于等离子体纳米结构设计的,这显著增强了光与物质之间的相互作用^[11-12]。然而,它们的性能通常受到高吸收和欧姆损耗等因素的限制。为了减轻这些限制,手性超表面的发展已转向介电超表面。这些由介电材料制成的手性超表面表现出极低的吸收损耗和相对较高的透射率。同时,介电超表面可以感应多极子的激发,这为它们带来了更高的自由度和可能性^[13-15]。

在众多光学波段中,工作于红光波段(通常指波长范围在 620~750 nm 的光波)的光电器件备受关注^[16-17]。一方面,红光具有较好的穿透能力,在生物成像、环境监测等领域有广泛应用^[18]。例如,在生物组织成像中,红光能够穿透较深的组织层,提供更全面的组织信息,且对生物样品的损伤较小。另一方面,红光波段能够与许多材料的光学响应特性相匹配,如其光子能量与半导体材料的能带结构相匹配,可用于制造红光发光二极管、激光器等光电器件,为手性超表面的设计和应用提供了理想的平台^[19]。

近年来,国内外在红光波段的手性超表面研究取得了重要进展。哈尔滨工业大学肖淑敏教授团队提出了利用共振超表面实验实现固有手性响应的方法,设计的倾斜几何结构同时打破了平面内和平面外的对称性,在连续介质中观察到本征手性束缚态,其在红光波段的 CD 值高达 0.93, Q 值高达 2 663^[20]。南方科技大学刘言军团队开发了一种新型的摩尔纹超表面^[21],这种超表面由两片对称的双层悬空衍射光栅堆叠而成,在近红外波段展现出高达 0.21 的 CD 值,并且可以通过调整两片光栅之间的扭角来调节手性的符号和大小。亚利桑那州立大学姚宇团队基于介质超表面结构,设计了一种具有红绿光双色圆偏振滤光片,将由此制备的多光谱偏振滤光片集成到传感器上,实现了高斯托克斯测量精度的偏振成像与检测^[22]。然而,这些三维渐变结构或多层结构设计

的超表面给制备工艺带来了诸多挑战,降低超表面结构的工艺复杂性将有助于促进超表面光学器件的实际应用和产业化发展。

本文提出了一种由类“凹”型纳米结构组成的单层介电超表面,其展现出 C_2 对称性,可以在红光波段对 LCP 和 RCP 光进行选择性的传输。在 665 nm 圆偏振光照射下,所设计的超表面表现出较强的手性光学响应,其圆二色性透射率(Circular dichroism of transmittance, CDT)达到 0.643。对所提出的超表面中手性光学响应来源的分析表明,它主要是由纳米结构之间的耦合引起的近场光干涉引起的,并使用多极分解理论研究了手性响应背后的潜在机制。此外,单层结构的设计简化了制造过程。这些研究发现表明,单层介电超表面是在可见光谱中实现本征手性光学响应的优秀候选者,这为进一步研究手性光学响应和介电超表面的应用提供了新的思路。

2 单元结构设计

为获得具有红光波段手性响应的单层介电超表面,本文设计了一种基于非晶硅(a-Si)和二氧化硅(SiO_2)材料构成的超表面结构,如图 1 所示。该介电超表面针对相同工作波长下的 LCP 和 RCP 光,能够实现选择性的透射或反射。

所设计的超表面自上至下依次为由非晶硅构

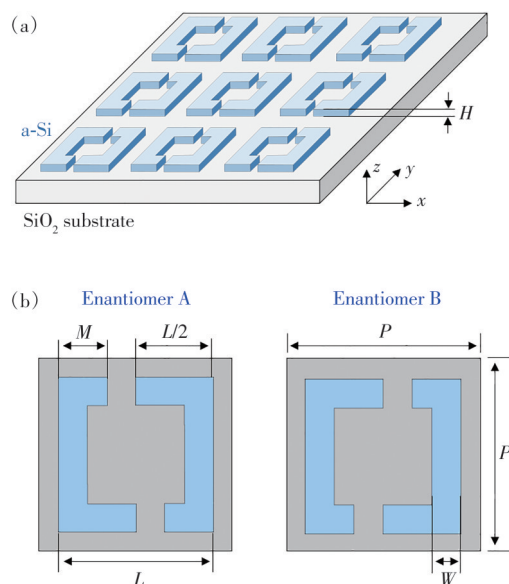


图 1 (a) 具有手性响应的单层介质超表面结构示意图; (b) 手性对称的对映体 A 和对映体 B 结构示意图

Fig.1 (a) Schematic diagram of the single-layer dielectric metasurface. (b) Structural parameters of enantiomer A and B

成的周期性排列基础结构单元,以及由二氧化硅构成的基底。组成超表面的基本结构单元的硅层,由一对厚度为 H 的类“凹”型结构组成,这一设计赋予了超表面的基础结构单元 C_2 对称特性,为超表面的设计与调控提供了更丰富的自由度。通过类“凹”型结构双臂长度的差异,打破了基础结构单元的镜面对称性,使得所设计的超表面能够产生强烈的手性光学响应。

图 1(b)中呈现了互为对映体的超表面 A 和 B 的俯视图,并对相关的结构参数进行了细致标注与说明。其中,基础单元结构的周期为 P ,硅基结构的周期为 L 。类“凹”型结构的参数包括长臂长度($L/2$)、短臂长度(M)以及宽度(W)。由于超表面 A 和 B 互为对映体,具有镜面对称性,它们对同一圆偏振光会表现出相反的手性光学响应。

基于 FDTD 仿真软件,超表面周边的介质设定为空气,其折射率取值为 1。衬底 SiO_2 的折射率设定为 1.46,其光学厚度设置为 1 000 nm。至于硅层材料的介电常数、磁导率等材料数据,则是依

照 Palik 材料数据库进行导入操作。在仿真初始阶段,结构数据的设置如下:类“凹”型结构总长度(L)设置为 400 nm、长臂长度($L/2$)为 200 nm、短臂长度(M)为 125 nm、宽度(W)为 75 nm、基础单元结构周期(P)为 500 nm。入射光源采用两个具有正交偏振状态的平面波,以此来生成所需的圆偏振光。入射光源的波长范围为 400~800 nm,涵盖了可见光区域。在整个仿真过程中,无论是 LCP 光还是 RCP 光,均会沿着 z 轴的负方向垂直入射在超表面结构上。 x 和 y 方向的边界条件设定为周期性边界条件, z 方向上则采用完美匹配层边界条件。网格的设定则依据物理场的实际情况自动调整匹配。

3 结果与讨论

首先系统分析了超表面结构参数对其手性光学响应造成的影响,图 2 展示了在 400~800 nm 波段范围内,LCP 和 RCP 光垂直入射时,透射率随超表面结构的厚度(H)、结构总长度(L)、短臂长度(M)、宽度(W)和周期(P)的变化情况。

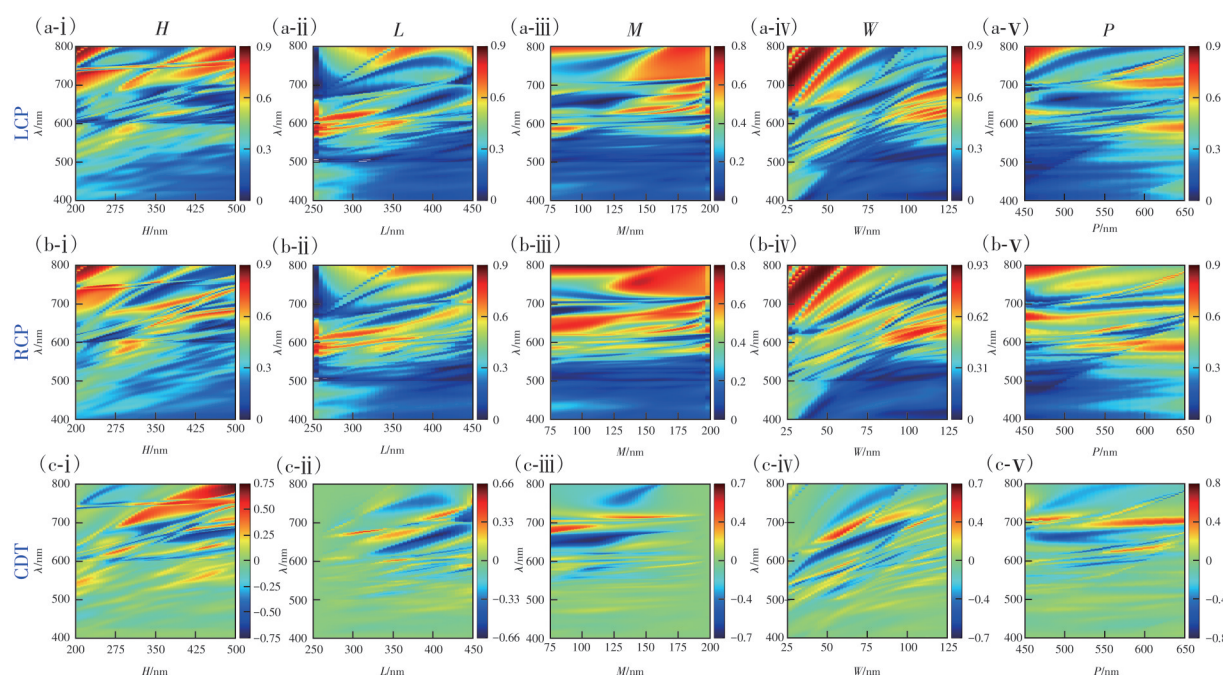


图 2 (a)~(c)超表面结构在 LCP、RCP 光正入射下的透射率以及 CDT 值随着不同结构参数(包括厚度 H 、结构总长度 L 、短臂长度 M 、宽度 W 和周期 P)变化的等值面图

Fig.2 (a)~(c)Three rows of contour plots of LCP light transmission spectra, RCP light transmission spectra, and CDT values, for various structural parameters

此外,图 2 还展示了圆二色性透射率(CDT)随结构参数变化的等值面图。本文中 CDT(公式中表示为 T_{CD})值的定义为 LCP 与 RCP 光垂直入射超表面时,它们透射率的差值,即:

$$T_{CD} = T_{LCP} - T_{RCP} \quad (1)$$

其中, T_{LCP} 和 T_{RCP} 分别代表超表面在 LCP 和 RCP 光照射下的透射率。

在图 2(a)、(b)两行透射率等值图中,红色代

表高透射率,蓝色代表低透射率。对比 LCP 与 RCP 的透射率等值图,对于不同结构参数,超表面在 LCP 和 RCP 垂直照射时,呈现出近乎一致的透射率分布,仅在部分区域存在差异,而这些差异正体现了超表面的手性光学响应。在图 2(c) CDT 等值图中,红蓝色分别代表正负极大值,当结构参数变化时,可以发现极值区域主要落在 600~700 nm 的红光波段区域。

对于厚度参数,当硅层厚度(H)增加时,CDT 极值区域呈现向长波长移动的趋势,这可能和厚度增加带来的传输相位延迟增加有关。对于“凹”型结构的结构参数(总长度 L 、短臂长度 M 、宽度 W),其变化对短波长区域影响较小,高透射率和高 CDT 值的区域主要集中在长波长区域。根据布拉格衍射理论,超表面的谐振波长与结构的尺寸成正比,当结构参数增加时,谐振波长向长波长方向移动。此外,在短臂长度(M)的等值面图中,其 CDT 极值区域主要集中在小尺寸区域;当短臂长度(M)增加时,超表面结构的非对称性逐渐减弱,使得其圆二色性随着 M 增加而逐渐消失。最后,从 CDT 随基础结构单元周期(P)变化的等值面图中可以看出,基础结构单元的周期(P)的变化对于超表面的 CDT 的影响十分有限。通常情况下,周期(P)主要影响的是超表面的远场衍射效率,对于近场响应的影响十分微弱。综合结构参数影响的变化规律,具有高 CDT 值的超表面结构的设计参数如下:厚度($H=400$ nm)、结构总长度($L=400$ nm)、短臂长度($M=125$ nm)、宽度($W=75$ nm)和周期($P=500$ nm)。

在上述参数下,图 3(a)展示了在 400~800 nm 可见光波段内,对映体 A 对 LCP 和 RCP 光的透射光谱(T)与反射光谱(R)。当入射光波长处于 665 nm 时,对于垂直入射的 LCP 光,对映体 A 表现出的透射率接近于 0,反射率却高达 0.77;而对于垂直入射的 RCP 光,对映体 A 表现出的透射率高达 0.65,反射率则低至 0.09。图 3(b)则展示了对映体 B 在相同波段内,对 LCP 和 RCP 光的透射光谱(T)与反射光谱(R)。相同场景下,对映体 B 则表现出与对映体 A 相反的光学选择性,其对于 665 nm 的 LCP 和 RCP 光的透射率分别为 0.65 和 0。图 3(c)展示了对映体 A 与 B 的 CDT 响应光谱,在入射光波长为 665 nm 时,CDT 绝对值达到最大

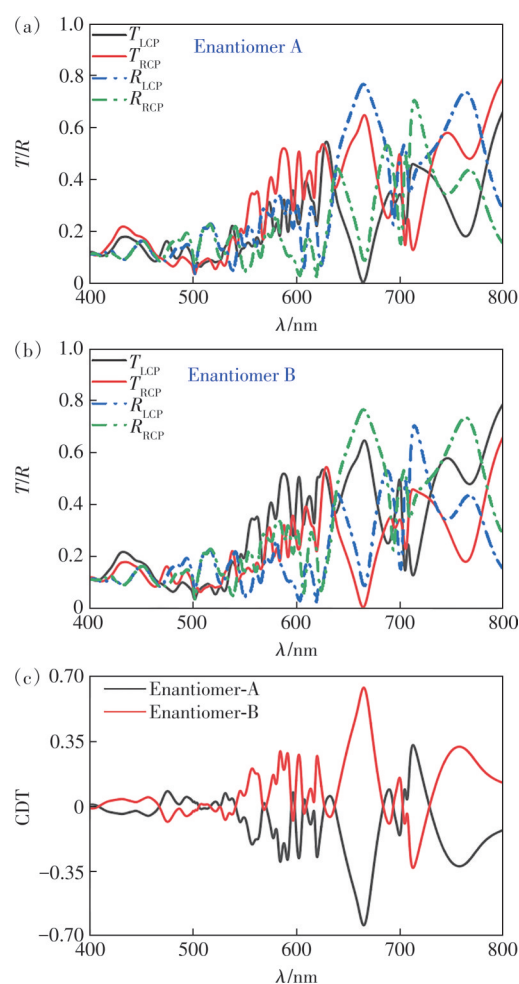


图 3 (a)~(b)对映体 A 和对映体 B 在 LCP 和 RCP 光正入射下的透射谱与反射谱;(c)对映体 A 和对映体 B 的 CDT 响应谱

Fig.3 (a)–(b) Transmittance and reflectivity of LCP and RCP light for enantiomer A and B, respectively. (c) CDT curves for the enantiomers A and B

值 0.643。与已报道的手性超表面相比,本研究提出的手性超表面在 CD 值、加工难度等方面具备一定优势。对映体 A 和对映体 B 通过具有低损耗特性的介电超表面的多极共振,实现了较强的手性光学响应。

为阐明超表面的手性光学响应的产生机制,首先,运用 Mie 氏散射多极展开法对所设计的超表面的多极子散射功率进行了计算分析^[23-24]。以 LCP 和 RCP 光作为光源正入射到超表面,激发多极共振,进而分析各类极子的相应贡献。图 4 展示了对映体 A 在 LCP 和 RCP 光下,所激发的多极子的散射功率结果,其中五条曲线分别代表电偶极子(ED)、磁偶极子(MD)、环偶极子(TD)、电四极子(EQ)以及磁四极子(MQ)的散射功率,数据经过归一化处理。结果表明,超表面中的光散射

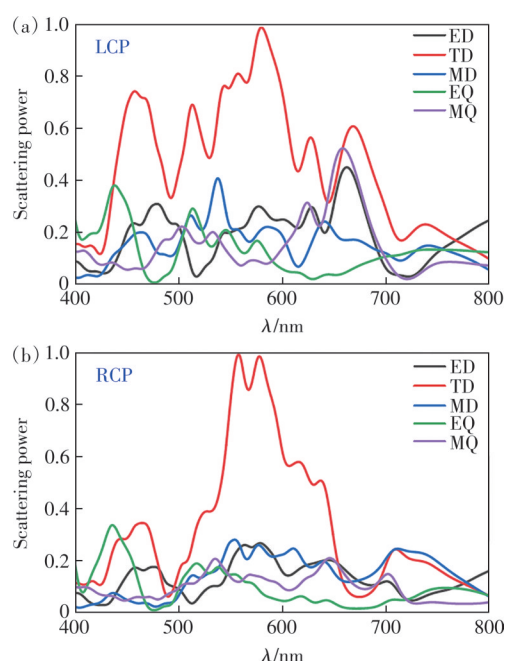


图 4 (a)~(b)对映体 A 在 LCP 和 RCP 光正入射下散射功率的多极分解,强度进行了归一化处理

Fig.4 (a)~(b)Scattering power of multipoles on enantiomer A with normally incident LCP and RCP light. Scattering power is normalized at the same scale

受多极子共振作用的共同影响,本文超表面结构中,来自于电偶极子、环偶极子、磁四极子三者的影响较为显著。一般情况下,强的多极共振能够极大地抑制背向散射并增强透射。在对映体 A 中,当 LCP 光正入射时,多极子的激发相对较强,这导致入射光束的散射现象加剧,透射率随之处于较低水平。与之形成鲜明对比的是,在 RCP 光的入射下,对映体 A 所产生的多极子激发变弱,入射光波受到超表面的散射程度因此得以降低,超表面能够呈现出较高的透射率,进而展现出较强的圆二色性透射率特性。

为进一步研究超表面对偏振光束的选择透过性的产生原因,还分析了不同偏振状态的偏振光入射时的局部增强电场分布。图 5(a)、(b)分别为 y 偏振光、 x 偏振光正入射到对映体 A 时,结构表面分别激发出两种不同的共振模式(TE 模和 TM 模)。这两种模式各自对应的电场能够进行相互叠加,进而对整体电场分布产生影响。一组具有 $\pm\pi/2$ 相位差的 x 偏振光和 y 偏振光可以组成 LCP 和 RCP 光,在圆偏光正入射的情况下,超表

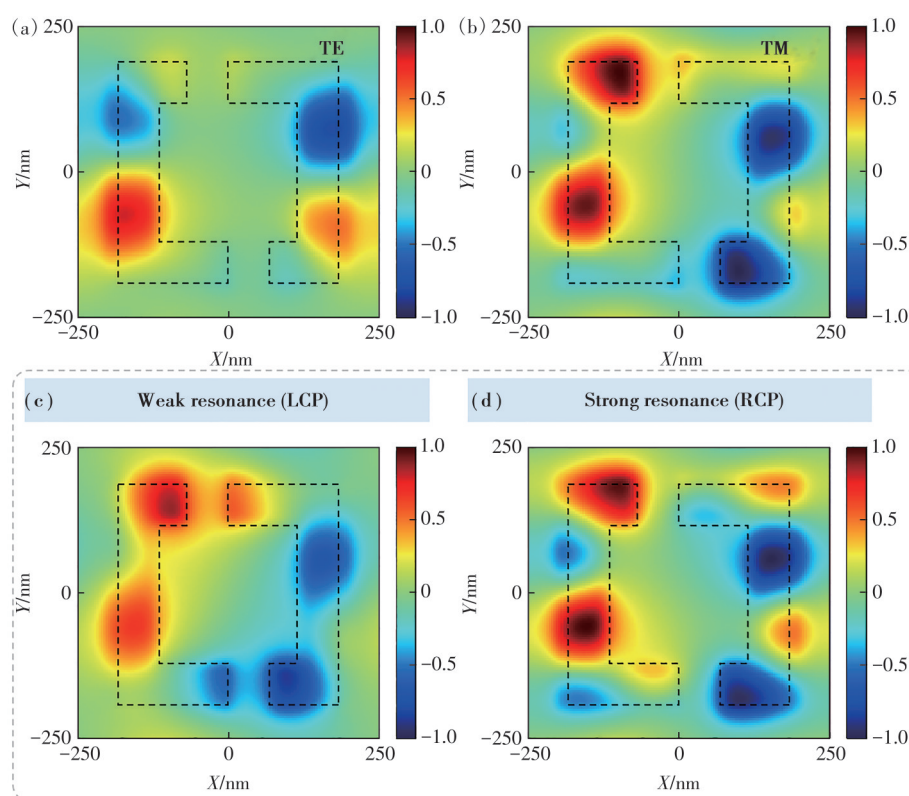


图 5 (a)~(b)对映体 A 在 665 nm 的 y 偏振光(TE)和 x 偏振光(TM)正入射时,局部电场强度分布;(c)~(d)对映体 A 在 665 nm 的 LCP 和 RCP 光正入射时,呈现出不同强度的共振对比

Fig.5 (a)~(b)Distributions of the real part of the z -component of the electric field on enantiomer A, with normally incident y -polarized (TE) and x -polarized (TM) waves, respectively. (c)~(d) Electric field distribution on enantiomer A, with normally incident LCP and RCP light

面对应两种共振模式的局域增强电场可以旋转叠加,实现电场间的相长干涉与相消干涉,进而实现对透射光自旋选择性地增强或削弱。图 5(c)展示了 LCP 光照射对映体 A 时,与 TE 和 TM 模式相关的局域电场在 665 nm 处发生相消干涉。图 5(d)展示了 RCP 光照射对映体 A 时,电场在 665 nm 处发生相长干涉。对于对映体 B, TE 和 TM 模式间的相位差恰好与对映体 A 相反,局域电场的干涉情况也与对映体 A 呈现出恰好相反的结果。这些结果清晰地表明,所提出的超表面的手性光学响应产生的关键因素之一是圆偏振光的 x 分量和 y 分量激发的局域增强电场的选择性干涉。

进一步地,通过电场分布的变化规律可以深入分析结构参数变化对超表面响应波长的影响规律。以厚度参数为例,图 6 展示了对映体 A 在不同厚度(H)和不同波长(λ)的 RCP 光正入射下,电

场强度分布变化。当厚度为 400 nm 时,对映体 A 在 665 nm 的 RCP 入射光呈现出电场相长干涉。若将硅层厚度增加至 410 nm,则在相同的 665 nm 波长光束照射下,其电场强度有所减弱,这是由于厚度的增加带来 x 偏振光和 y 偏振光传输相位延时的增加,它们通过旋转叠加实现的相长干涉无法保持。为恢复相长干涉,可以通过增加光束波长(图 6(d)),从而减少 x 偏振光和 y 偏振光传输相位延时,进而恢复通过旋转叠加实现的相长干涉。另一方面,当入射光波长单独变化时(图 6(c)),其电场的相长干涉同样会削弱,因此超表面呈现出厚度增加,其手性响应波长变长的变化趋势。

通过将结构参数进行适当调整,能够控制实现局域增强电场进行相长干涉或相消干涉,从而实现超表面对透射光自旋选择性地增强或削弱,最终达到对传播光束的有效调控。

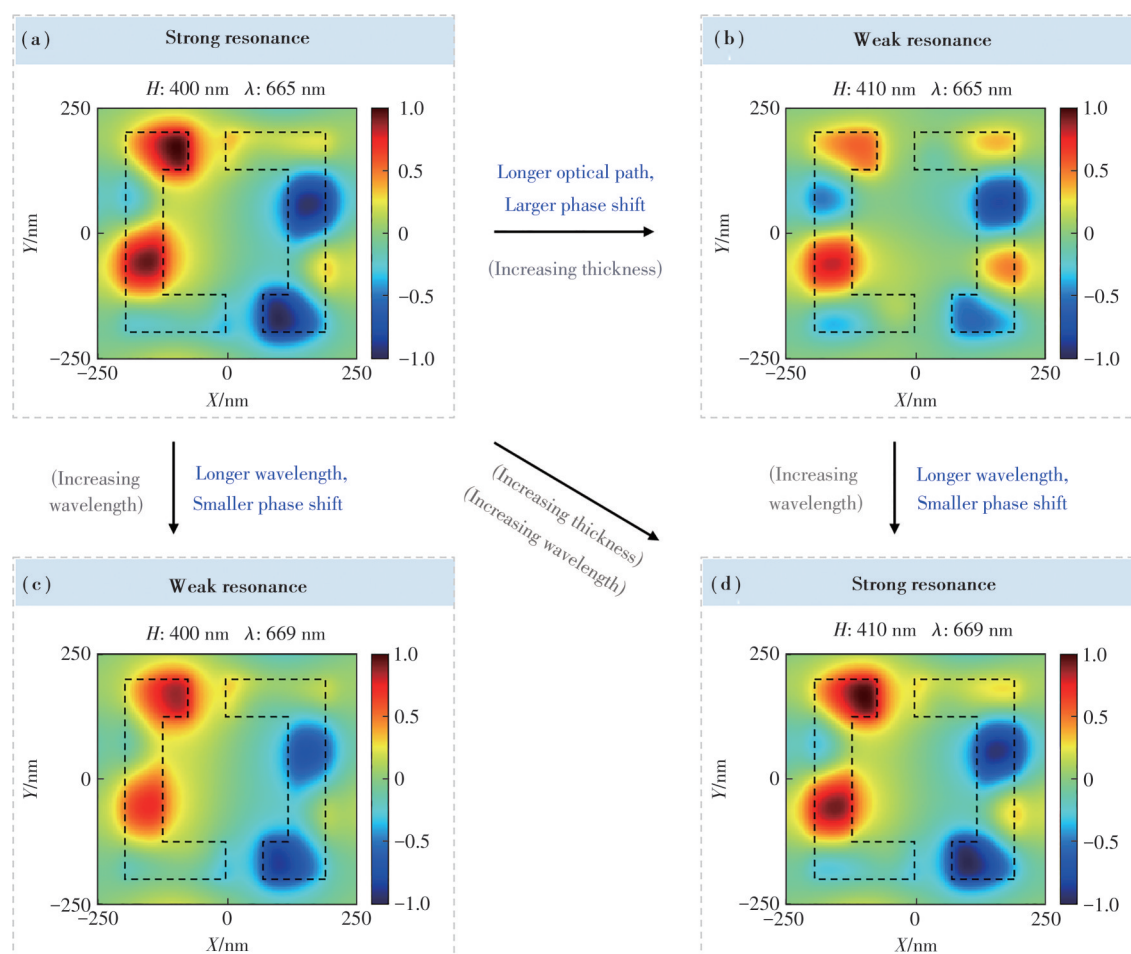


图 6 (a)~(d)对映体 A 在不同厚度 H 和不同波长 λ 的 RCP 光正入射时的电场强度分布

Fig.6 (a)~(d) Distribution of electric field of the enantiomer A with different thicknesses and wavelengths under normally incident RCP light

4 结 论

本文提出了一种工作于红光波段的具有手性响应特征的单层介电超表面,介电超表面由置于二氧化硅衬底上的硅层材料构成,为具有 C_2 对称性的两个类“凹”型结构单元。研究了超表面结构参数变化对圆偏振光束的选择透过性的影响,优化了结构参数,在 665 nm 处获得最大圆二色性透射率 0.643。基于 Mie 氏散射多极展开,发现超表面中的光散射受电偶极子、环偶极子、磁四极子

三者的共同影响。通过分析不同偏振状态的偏振光入射时的局部增强电场分布,解释了超表面结构对透射光自旋选择性地增强或削弱。这样一种结构简单、基于单层介电超表面设计的红光手性器件,有望在信息加密等领域获得极大的应用潜力。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250120>

参 考 文 献:

- [1] HENTSCHEL M, SCHÄFERLING M, DUAN X Y, *et al.* Chiral plasmonics [J]. *Sci. Adv.*, 2017, 3(5): e1602735.
- [2] BASIRI A, CHEN X H, BAI J, *et al.* Nature-inspired chiral metasurfaces for circular polarization detection and full-Stokes polarimetric measurements [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2019, 8: 78.
- [3] DENG Y J, WANG M Z, ZHUANG Y L, *et al.* Circularly polarized luminescence from organic micro-/nano-structures [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2021, 10(1): 76.
- [4] 夏仲文, 华鉴瑜, 陈林森, 等. 基于微纳光子器件的光场裸眼 3D 显示技术 [J]. *液晶与显示*, 2022, 37(5): 562-572.
- XIA Z W, HUA J Y, CHEN L S, *et al.* Light field glasses-free three-dimensional display technology based on micro-nano photonic devices [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2022, 37(5): 562-572. (in Chinese)
- [5] KHALIQ H S, NAUMAN A, LEE J W, *et al.* Recent progress on plasmonic and dielectric chiral metasurfaces: fundamentals, design strategies, and implementation [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2023, 11(16): 2300644.
- [6] LININGER A, PALERMO G, GUGLIELMELLI A, *et al.* Chirality in light-matter interaction [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(34): 2107325.
- [7] SO S, MUN J, PARK J, *et al.* Revisiting the design strategies for metasurfaces: fundamental physics, optimization, and beyond [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(43): 2206399.
- [8] ZHANG J C, CHEN M K, LIANG Y, *et al.* Nanoimprint meta-device for chiral imaging [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(49): 2306422.
- [9] ZHANG C, HU H T, MA C M, *et al.* Quantum plasmonics pushes chiral sensing limit to single molecules: a paradigm for chiral biodetections [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 2.
- [10] LI Z C, JIANG Y F, LIU W W, *et al.* Hybrid bilayer plasmonic metasurfaces with intrinsic chiral optical responses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 122(18): 181702.
- [11] OGIER R, FANG Y R, SVEDENDAHL M, *et al.* Macroscopic layers of chiral plasmonic nanoparticle oligomers from colloidal lithography [J]. *ACS Photonics*, 2014, 1(10): 1074-1081.
- [12] NAEEM T, KIM J, KHALIQ H S, *et al.* Dynamic chiral metasurfaces for broadband phase-gradient holographic displays [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2023, 11(5): 2202278.
- [13] KHALIQ H S, KIM I, ZAHID A, *et al.* Giant chiro-optical responses in multipolar-resonances-based single-layer dielectric metasurfaces [J]. *Photonics Res.*, 2021, 9(9): 1667.
- [14] ZOGRAFOPOULOS D C, TSILIPAKOS O. Recent advances in strongly resonant and gradient all-dielectric metasurfaces [J]. *Mater. Adv.*, 2023, 4(1): 11-34.
- [15] HUANG L J, XU L, POWELL D A, *et al.* Resonant leaky modes in all-dielectric metasystems: fundamentals and applications [J]. *Phys. Rep.*, 2023, 1008: 1-66.
- [16] 纪泽婷, 邓高强, 王昱森, 等. 具有组分渐变量子垒层的氮极性 InGa_N 基红光 LED 仿真研究 [J]. *发光学报*, 2024, 45(12): 2037-2044.
- JI Z T, DENG G Q, WANG Y S, *et al.* Simulation on nitrogen-polar ingan-based red light-emitting diodes with compositionally

- graded quantum barrier layer [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(12): 2037-2044. (in Chinese)
- [17] 何航宇, 冯志鹏, 庄国亮, 等. 应用于色转换显示的红光钙钛矿发光材料研究现状 [J]. *发光学报*, 2025, 46(2): 273-284.
- HE H Y, FENG Z P, ZHUANG G L, *et al.* Current status of red perovskite light emitting materials for color conversion displays [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(2): 273-284. (in Chinese)
- [18] 赖溥祥, 赵麒, 周颖颖, 等. 深层生物组织光学技术发展及其应用(特邀) [J]. *中国激光*, 2024, 51(1): 0107003.
- LAI P X, ZHAO Q, ZHOU Y Y, *et al.* Deep-tissue optics: technological development and applications (invited) [J]. *Chin. J. Lasers*, 2024, 51(1): 0107003. (in Chinese)
- [19] ZHANG N N, SUN H R, LIU S H, *et al.* Gold nanoparticle enantiomers and their chiral-morphology dependence of cellular uptake [J]. *CCS Chem.*, 2022, 4(2): 660-670.
- [20] CHEN Y, DENG H C, SHA X B, *et al.* Observation of intrinsic chiral bound states in the continuum [J]. *Nature*, 2023, 613(7944): 474-478.
- [21] CEN M J, WANG J W, CHENG M, *et al.* Moiré metasurfaces with tunable near-infrared-I chiroptical responses for biomolecular chirality discrimination [J]. *Nanoscale*, 2025, 17(4): 1970-1979.
- [22] ZUO J W, BAI J, CHOI S, *et al.* Chip-integrated metasurface full-Stokes polarimetric imaging sensor [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2023, 12(1): 218.
- [23] EVLYUKHIN A B, FISCHER T, REINHARDT C, *et al.* Optical theorem and multipole scattering of light by arbitrarily shaped nanoparticles [J]. *Phys. Rev. B*, 2016, 94(20): 205434.
- [24] TEREKHOV P D, BABICHEVA V E, BARYSHNIKOVA K V, *et al.* Multipole analysis of dielectric metasurfaces composed of nonspherical nanoparticles and lattice invisibility effect [J]. *Phys. Rev. B*, 2019, 99(4): 045424.



孙浩(2001-),男,安徽滁州人,硕士研究生,2022年于江苏大学获得学士学位,主要从事半导体光电子材料与器件的研究。

E-mail: 2529802470@qq.com



张韵(1988-),男,江苏淮安人,博士,教授,2017年于谢菲尔德大学获得博士学位,主要从事三族氮化物光电材料及器件的研究。

E-mail: yzhang@ujs.edu.cn