

文章编号: 2095-4980(2024)10-1073-08

基于悬链线结构的多功能二向色性超构表面

蓝翔, 邓钦荣, 张汶婷, 崔恒瑜, 唐紫依, 胡杰, 黄奕嘉

(四川师范大学 物理与电子工程学院, 四川 成都 610101)

摘要: 超构表面是一种由亚波长单元结构组成的人工表面, 展现出巨大的电磁波操纵潜力, 悬链线电磁学为超构表面的设计提供了新的思路和方法。本文提出一种基于悬链线结构的多功能二向色性超构表面, 能够在不同方向上实现对电磁波的选择吸收。仿真结果显示, 该器件可在红外区域实现 92% 的线性二色性(LD)和 96% 的圆二色性(CD)。这两种功能仅需改变电磁波的入射方向就可同时实现, 且两种功能在一定入射角范围内均具有较高的效率。此外, 还分析了不同几何参数对吸收性能的影响, 以及实现不同电磁波选择吸收的物理机制。该超构表面具有结构简单、便于集成以及应用范围广的优点, 在成像、传感和光谱等领域具有潜在的应用前景。

关键词: 超构表面; 悬链线; 线性二色性; 圆二色性; 左旋圆偏振; 右旋圆偏振; 吸收器

中图分类号: O441.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024197

Multifunctional dichroic metasurface based on catenary structure

LAN Xiang, DENG Qinrong, ZHANG Wenting, CUI Hengyu, TANG Ziyi, HU Jie, HUANG Yijia
(School of Physics and Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu Sichuan 610101, China)

Abstract: Metasurfaces are artificial surfaces composed of sub-wavelength unit structures, demonstrating tremendous potential for manipulating electromagnetic waves. Catenary electromagnetics provides new ideas and methods for the design of metasurfaces. This paper proposes a multifunctional dichroic metasurface based on a catenary structure, capable of selectively absorbing electromagnetic waves in different directions. Simulation results show that the device can achieve 92% Linear Dichroism (LD) and 96% Circular Dichroism(CD) in the infrared region. Both functions can be realized simultaneously by merely changing the incident direction of the electromagnetic waves, and both functions have high efficiency within a certain range of incident angles. In addition, the influence of different geometric parameters on the absorption performance is analyzed, as well as the physical mechanisms for selective absorption of different electromagnetic waves. This metasurface has the advantages of simple structure, easy integration, and a wide range of applications, and has potential application prospects in the fields of imaging, sensing, and spectroscopy.

Keywords: metasurface; catenary; Linear Dichroism; Circular Dichroism; Left-handed Circularly Polarized(LCP); Right-handed Circularly Polarized(RCP); absorber

二向色性, 包括线二色性(LD)和圆二色性(CD), 是指特定的材料在吸收线偏振电磁波或圆偏振电磁波时所表现出的偏振选择性吸收现象。自然界中许多物质都具有二向色性, 如蛋白质、病毒以及DNA等, 分析它们的二向色性响应, 对于理解和认识它们的结构十分重要, 因此二向色性在生物化学分析领域有着十分重要的价值。此外, 二向色性材料还在偏振成像、偏振探测以及偏振传感等光学与光子学领域被广泛使用。

传统材料的二向色性响应通常较弱, 需较长光程的积累以达到足够的对比度, 这限制了该类器件的进一步集成化和小型化。超构表面的出现为解决上述问题提出了新的可行性办法。超构表面是一种由亚波长单元结构组成的二维人工材料, 能够灵活有效地控制电磁波的振幅、相位、频率和偏振等特性^[1-4]。相对于传统光学器件, 基于超构表面设计的器件具有多样功能、超薄特性和便于集成等优势。在此基础上, 已经提出并实现了许多新颖的现象, 如异常折射和反射^[5-8]、完美吸收^[9-11]、电磁隐身斗篷^[12-14]以及高效全息^[15-18]等。超构表面吸收器

收稿日期: 2024-04-16; 修回日期: 2024-07-01

是超构表面器件的重要组成部分,同时也是电磁波防干扰技术和隐身技术的主要载体,因此该领域已成为电磁学和材料学的研究热点,但大部分的超构表面吸波器单元结构是各向同性的,其对电磁波的偏振状态并不敏感。目前,已有研究者提出利用超构表面实现高效率的二向色性。2014年, YAO等^[19]通过实验制备了一种线偏振电磁波吸波器,该吸波器通过各向异性的单元结构,并利用石墨烯的可调谐性实现了对线偏振电磁波的偏振选择吸收。2015年, E PLUM等^[20]通过手性单元结构设计的超构表面实现了CD,并通过实验测量出该器件对圆偏振电磁波的吸收率差值达76%。2021年, HUANG等^[21]提出了一种在正入射条件下产生LD和CD的超构表面。当相变材料处于非晶态时,在1550 nm波段处表现出81%的LD信号;将相变材料加热至晶态,超构表面发生变化,表现出86%的CD信号。目前大部分超构表面器件功能单一,能够单一实现LD或CD,同时实现上述两种功能并保持较高的工作效率还存在一定困难。悬链线电磁学的出现为解决超构表面器件低效率提供了新的解决思路和方法^[22]。悬链线是自由悬挂的链条在其自身重量下呈现的曲线,相关理论广泛用于工程与建筑领域中,其在电磁学中的应用直到最近才开始被研究。2015年, PU等^[23]利用悬链线型结构实现了相位完美匹配,设计了一类轨道角动量光束产生器。与传统设计相比,具有更高的工作效率和更宽的带宽。2019年, HUANG等^[24]将悬链线电磁模型推广到二维结构,并基于此方法设计了高效率的薄膜天线和宽带电磁吸收器。2021年, ZHANG等^[25]利用悬链线结构设计了具有178°大视场角的成像透镜。此外,悬链线电磁学也广泛用于偏振转换^[26]、相干吸收^[27]和结构光场^[28]等领域。

在上述研究基础上,本文设计了一种基于悬链线结构的多功能二向色性超构表面。该超构表面可通过改变电磁波的入射方向实现对线偏振和圆偏振电磁波的选择性吸收。

1 结构与方法

图1为本文设计的基于悬链线结构的多功能二向色性超构表面,图2为设计的超构表面的单元结构示意图。超构表面的设计材料从上到下依次为金(Au)、氟化镁(MgF₂)、硅(Si)和金(Au)反射层。图2(b)中的红色线条为悬链线,其表达式为^[29]:

$$y = \frac{\Lambda}{\pi} \ln \left| \sec \left(\frac{\pi x}{\Lambda} \right) \right| \quad (1)$$

式中: x 和 y 分别为图1(d)中的横纵坐标数值; Λ 为悬链线结构的周期。

悬链线结构是通过将悬链线平移宽度 w 后获得的。利用商用电磁仿真软件CST Microwave Studio对单元结构进行参数扫描,得到优化后的几何参数。4层结构从上到下的厚度分别为 $h_1=100$ nm, $h_2=80$ nm, $h_3=350$ nm, $h_4=200$ nm,单元结构的周期 $P=5$ μm ,悬链线的周期 $\Lambda=0.8P$,悬链线的宽度 $w=200$ nm。仿真中, x 轴和 y 轴方向都采用unit cell作为边界条件, z 轴方向则采用open作为边界条件。为模拟LD的性能,采用Floquet模式(TE和TM)发射线偏振平面电磁波;为模拟CD的性能,将Floquet模式改为圆偏振模式(LCP和RCP),发射圆偏振平面电磁波。使用CST Microwave Studio中内置的电场监测器计算电场分布,金、氟化镁和硅的材料参数来自参考文献[30]。线偏振电磁波的吸收率 A_{TE} 和 A_{TM} 分别表示为:

$$A_{\text{TE}} = 1 - |r_{\text{TE} \rightarrow \text{TE}}|^2 - |r_{\text{TE} \rightarrow \text{TM}}|^2 \quad (2)$$

$$A_{\text{TM}} = 1 - |r_{\text{TM} \rightarrow \text{TM}}|^2 - |r_{\text{TM} \rightarrow \text{TE}}|^2 \quad (3)$$

式中: $r_{\text{TE} \rightarrow \text{TE}}$ 和 $r_{\text{TM} \rightarrow \text{TM}}$ 分别表示横电(Transverse Electric, TE)和横磁(Transverse Magnetic, TM)波的共极化反射振幅; $r_{\text{TE} \rightarrow \text{TM}}$ 和 $r_{\text{TM} \rightarrow \text{TE}}$ 分别表示它们的交叉极化反射振幅。由于底层为金属,在计算吸收率时,可不考虑透射振幅。为更清楚地表示不同线偏振电磁波的吸收差,引入LD进行表示:

$$LD = A_{\text{TE}} - A_{\text{TM}} \quad (4)$$

圆偏振电磁波吸收率 A_{LCP} 和 A_{RCP} 分别表示为:

$$A_{\text{LCP}} = 1 - |r_{\text{LCP} \rightarrow \text{LCP}}|^2 - |r_{\text{LCP} \rightarrow \text{RCP}}|^2 \quad (5)$$

$$A_{\text{RCP}} = 1 - |r_{\text{RCP} \rightarrow \text{RCP}}|^2 - |r_{\text{RCP} \rightarrow \text{LCP}}|^2 \quad (6)$$

式中: $r_{\text{LCP} \rightarrow \text{LCP}}$ 和 $r_{\text{RCP} \rightarrow \text{RCP}}$ 分别表示LCP和RCP波的共极化反射振幅; $r_{\text{LCP} \rightarrow \text{RCP}}$ 和 $r_{\text{RCP} \rightarrow \text{LCP}}$ 分别表示它们的交叉极化反射振幅。由于底层为金属,在计算吸收率时,可不考虑透射振幅。为更清楚地表示不同圆偏振电磁波的吸收差,引入CD进行表示:

$$CD = A_{\text{LCP}} - A_{\text{RCP}} \quad (7)$$

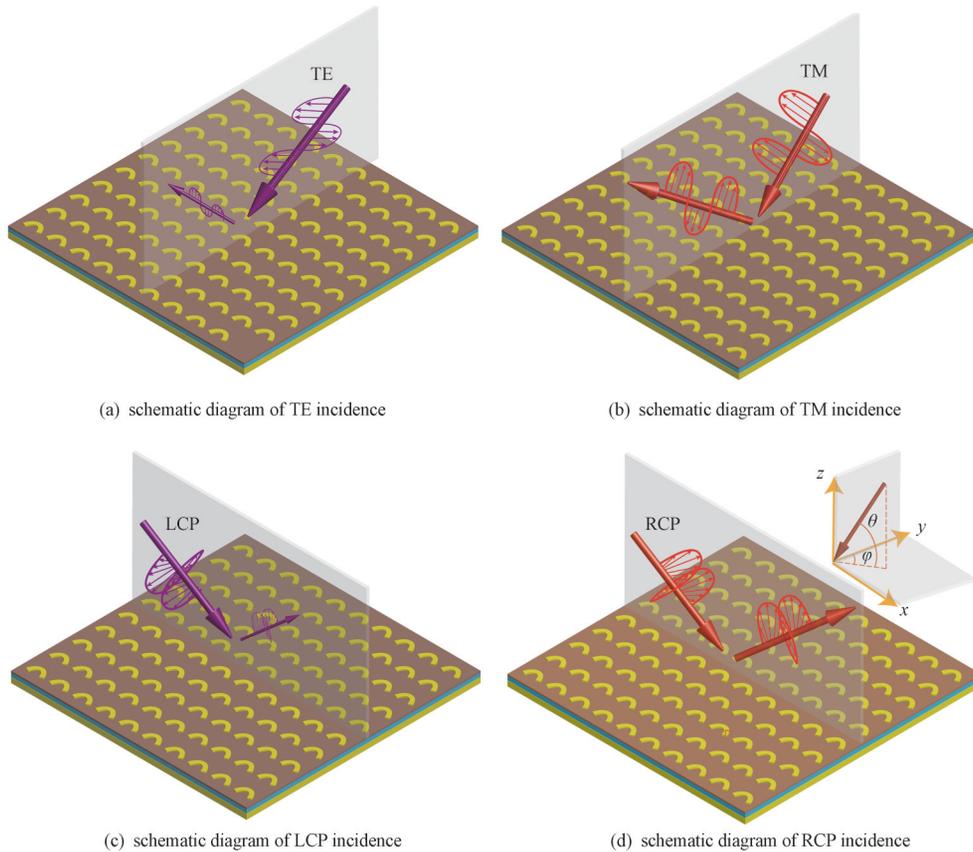


Fig.1 Schematic diagram of the proposed metasurface based on catenary structure

图 1 基于悬链线结构的超构表面工作示意图

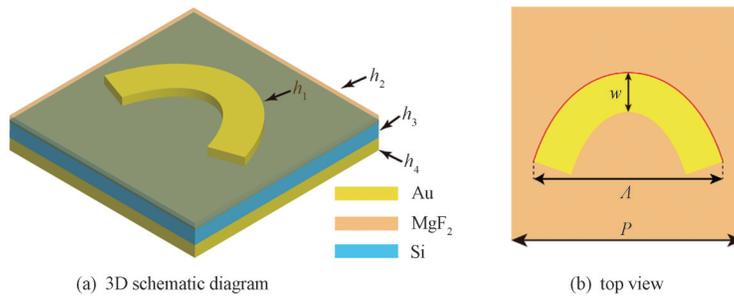


Fig.2 Schematic diagram of the unit structure of the metasurface

图 2 超构表面的单元结构示意图

2 结果与讨论

该超构表面可通过改变电磁波的入射方向实现对线偏振和圆偏振电磁波的选择性吸收。当线偏振电磁波以方位角 $\varphi=0^\circ$ 、入射角 $\theta=60^\circ$ 入射到器件上时，TE 电磁波几乎完全被吸收，而 TM 电磁波只有一小部分被吸收，器件表现出很强的 LD，如图 1(a)~(b) 所示；当圆偏振电磁波以方位角 $\varphi=90^\circ$ 、入射角 $\theta=60^\circ$ 入射到器件上时，LCP 电磁波几乎被完全吸收，而 RCP 电磁波只有一小部分被吸收，器件表现出很强的 CD，如图 1(c)~(d) 所示。当电磁波从方位角 $\varphi=0^\circ$ 入射时，此时对于电磁波，悬链线结构表现为对称结构，但实现圆二色性一般为手性结构；当器件旋转 90° 时，对于电磁波，悬链线结构表现为非对称结构，此时电磁波斜入射时，悬链线结构呈现出类似手性结构的性质。因此，该结构可以同时实现较强的 LD 和 CD，对光谱学、成像以及偏振测量等领域具有一定的应用价值。

为说明器件的 LD 特性，首先研究线偏振电磁波在方位角 $\varphi=0^\circ$ 和入射角 $\theta=60^\circ$ 的情况下，TE 电磁波和 TM 电磁波入射到所设计的器件时产生的电磁响应。由图 3(a) 可知，TE 电磁波和 TM 电磁波入射到器件上产生的交叉偏振态反射振幅 ($r_{TE \rightarrow TM}$ 和 $r_{TM \rightarrow TE}$) 完全一致且几乎为零，而 TE 电磁波和 TM 电磁波入射到器件上产生的相同偏振态

反射振幅($r_{TE \rightarrow TE}$ 和 $r_{TM \rightarrow TM}$) 的差异则较大。在 28.3 THz 处, $r_{TE \rightarrow TM} = r_{TM \rightarrow TE} = 0.3\%$, $r_{TE \rightarrow TE} = 22.3\%$, $r_{TM \rightarrow TM} = 98.9\%$ 。根据式(2)~(3), 可计算出 $A_{TE} = 94.40\%$, $A_{TM} = 2\%$ 。根据式(4)可得 $LD = 92\%$ 。因此, 该器件可作为一个性能较好的线偏振器。有趣的是, 当器件旋转 90° 后, 该器件能够实现对圆偏振电磁波的选择性吸收。从图 3(c) 可以看到, LCP 电磁波和 RCP 电磁波入射到器件上产生的交叉偏振态反射振幅($r_{LCP \rightarrow RCP}$ 和 $r_{RCP \rightarrow LCP}$) 也完全一致, 而 LCP 电磁波和 RCP 电磁波以方位角 $\varphi = 90^\circ$ 和入射角 $\theta = 60^\circ$ 的情况下入射到器件上产生的相同偏振态反射振幅($r_{RCP \rightarrow RCP}$ 和 $r_{LCP \rightarrow LCP}$) 的差异则较大。这种效果类似于线偏振电磁波的效果, 因此可以实现对圆偏振电磁波的选择吸收。根据式(5)~(6), 可计算出 $A_{LCP} = 97\%$, $A_{RCP} = 1\%$, 根据式(7)可得 $CD = 96\%$, 该器件也可作为一个性能较好的圆偏振器。由图 3(b) 和图 3(d) 可知, 整个仿真范围内始终具有 LD 和 CD , 这证实了该器件可在较宽的频率范围内工作。此外, 对部分超构表面的二向色性进行了比较, 结果如表 1 所示, 基于悬链线结构设计的超构表面同时具有较高的 LD 和 CD 。

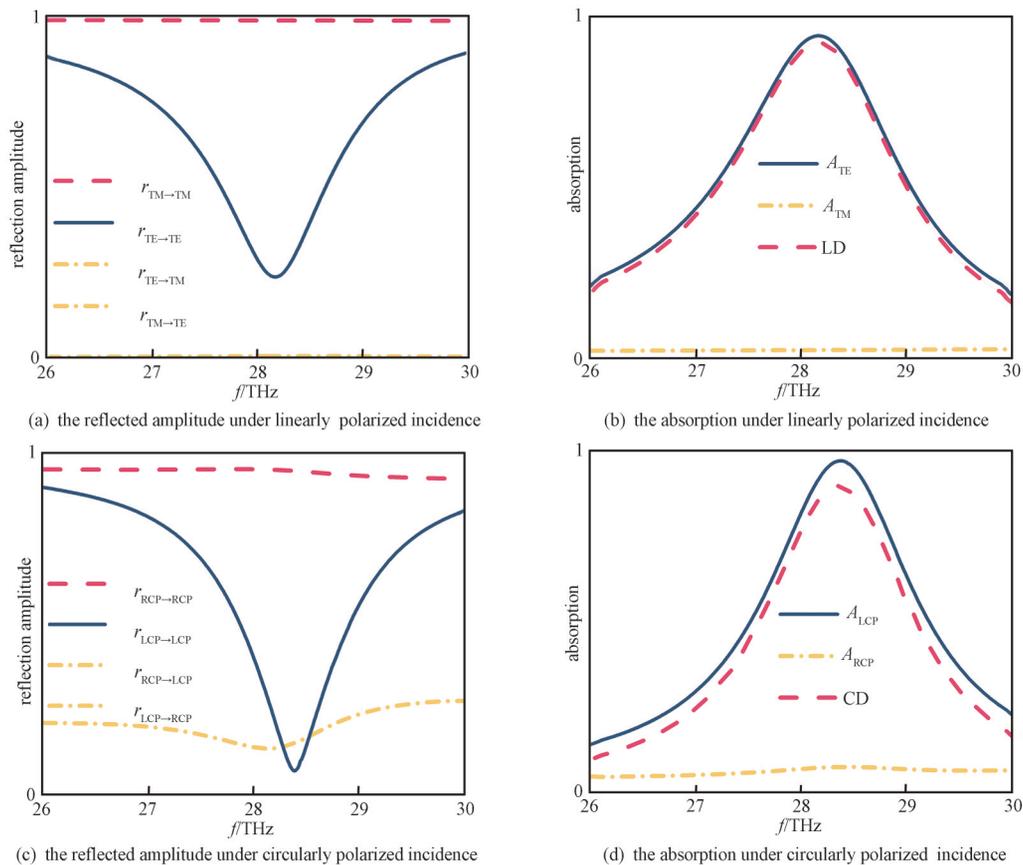


Fig.3 Reflected amplitude and absorption of linearly polarized and circular polarized electromagnetic waves

图 3 线偏振电磁波和圆偏振电磁波的反射振幅和吸收率

表 1 不同超构表面线性二色性和圆二色性比较

Table 1 Comparison of LD and CD of different metasurfaces

sample	type	incident angle/($^\circ$)	LD/%	CD/%	reference
1	transmission	35~55	81	86	[21]
2	reflection	40~70	87	97	[31]
3	transmission	45~80	90	90	[32]
4	reflection	90	—	90	[33]
5	reflection	40~70	92	96	this work

提出一种针对该类器件的加工制备方法: 首先, 利用磁控溅射技术在 2 mm 厚的石英衬底上溅射出厚度为 200 nm 的金膜作为反射层, 在金膜上沉积一层厚度为 350 nm 的硅, 在硅膜上沉积一层厚度为 80 nm 的氟化镁, 最后在氟化镁层上沉积一层厚度为 100 nm 的金; 其次, 在金膜上涂覆一层厚度为 300 nm 的 AZ1500 光刻胶层, 通过激光直写在上部光刻胶中形成目标图案; 最后, 利用离子束刻蚀将悬链线结构转移到金层, 并通过反应离子刻蚀去除残留的光刻胶。

研究不同结构参数对器件吸收性能的影响。如图 4(a) 所示, 当介质层硅的厚度 h_3 从 320 nm 增加至 440 nm 时,

在圆偏振电磁波入射下，LCP 波的吸收峰蓝移，吸收率也轻微增加；如图 4(b)所示，当悬链线结构的周期 A 从 $0.76P$ 增加至 $0.90P$ 时，在圆偏振电磁波入射下，LCP 波的吸收峰蓝移，吸收率几乎不变。有趣的是，将悬链线结构旋转 180° 后，该结构对圆偏振光的选择吸收产生反转，可以实现对 LCP 波的高效反射和对 RCP 波的高效吸收，如图 4(c)所示。在此基础上，设计了一种在不同频率分别吸收 LCP 波和 RCP 波的超构表面，如图 4(d)所示，该超构表面由 2 个周期不同且朝向相反的悬链线单元结构组成。该超构表面对 LCP 波的吸收峰值频率约为 27.5 THz，对 RCP 波的吸收峰值频率约为 28.7 THz。因此，可通过调整器件的结构参数和几何特性，实现对电磁波吸收性能的精细调节和优化。

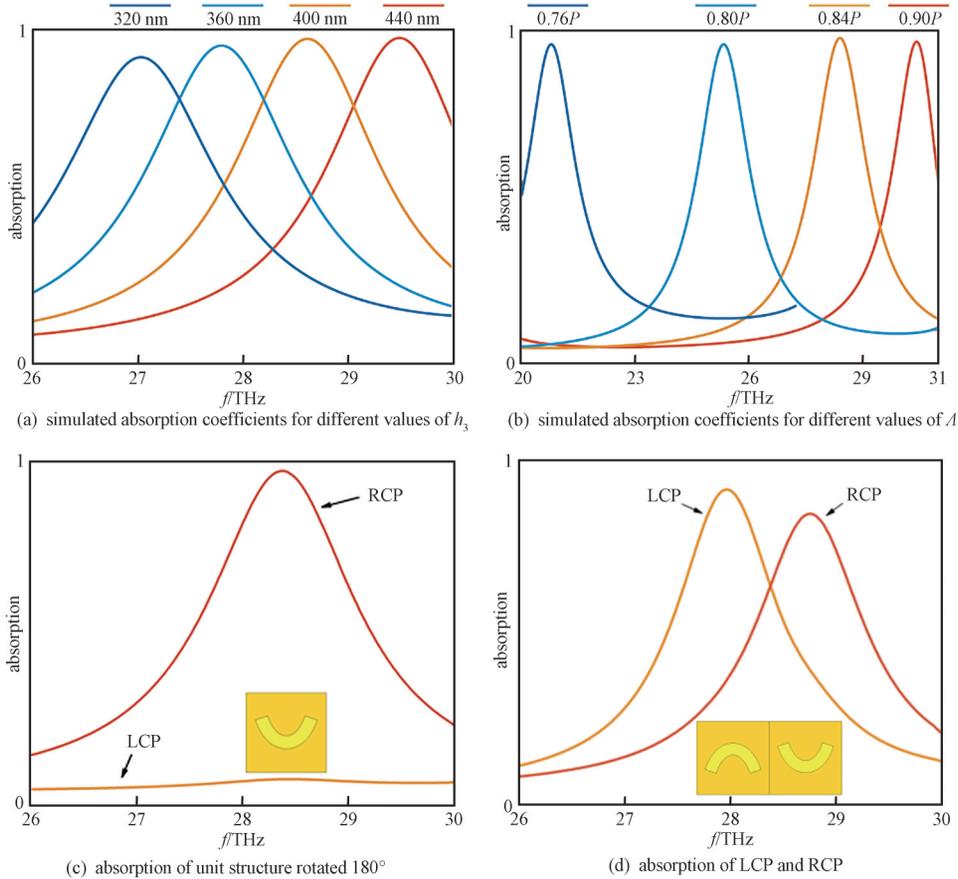


Fig.4 Effect of different structural parameters and geometric properties on the absorption performance

图4 不同结构参数和几何特性对吸收性能的影响

实际应用中，除了要求器件具有较高的二向色性外，也不能忽视器件对电磁波入射角度的稳定性。图 5 为模拟不同入射角度入射时，器件对线偏振和圆偏振电磁波的吸收性能的影响结果。如图 5(a)所示，在 TE 波以 $\varphi=0^\circ$ ， θ 在 $30^\circ\sim 70^\circ$ 范围内变化时，器件的 TE 波吸收率随入射角度增加略微红移。从图 5(b)可以看出，TM 波入射时，吸收率随着入射角略微减小，最大吸收值仍小于 20%。如图 5(c)所示，随着入射角度减小，LD 略微减小，但在入射角度 $40^\circ\sim 70^\circ$ 之间仍能保持线性二色性大于 80%。此外，如图 5(d)~(e)所示，器件在圆偏振电磁波以 $\varphi=90^\circ$ ， θ 在 $30^\circ\sim 70^\circ$ 范围内变化时，LCP 波的吸收率随入射角度增大而增加，而 RCP 波的吸收率随入射角度增大而减小。如图 5(f)所示，CD 在入射角度 $40^\circ\sim 70^\circ$ 之间仍保持大于 80%。通过以上分析结果可以得出，该器件可以在较大的入射角范围内保持较强的线性二色性和圆二色性。

为进一步阐明二向色性的物理机制，对所设计结构在不同电磁波的电场分布情况进行分析。图 6 为 $\varphi=0^\circ$ 和 $\theta=60^\circ$ 时的线偏振电磁波入射，以及 $\varphi=90^\circ$ 和 $\theta=60^\circ$ 时的圆偏振电磁波入射下的归一化电场分布。从图 6(a)和图 6(c)可见，在 TE 波和 LCP 波入射下，悬链结构两侧以相同或相反的幅度被激发；从图 6(b)和图 6(d)可见，在 TM 波和 RCP 波入射下，悬链结构两侧的激发幅度非常小。实际上，在 TE 波和 LCP 波入射下，器件呈现出一种独特的电场分布，即所谓的“陷阱模式”^[34-35]。在“陷阱模式”下，大部分入射波的能量转化为表面波^[36]，器件产生的散射场非常弱，极大地减少了电磁波与自由空间的耦合，实现了较高的电磁吸收。由于悬链线结构在工作波长处具有各向异性的电磁响应，因此实现二向色性的关键在于悬链线结构。底部金属层厚度大于入射电

磁波的趋肤深度,能有效地防止电磁波的透射。同时,中间的2个介质层与上下两层金属形成了法布里-珀罗(F-P)腔,可进一步增加该器件的二向色性,从而实现高效的电磁波选择性吸收。实际上,器件的CD也可以通过悬链线结构的外在手性进行解释。虽然悬链线结构本身不具备手性,但在斜入射下会破坏结构的对称性。因此,结构的外在手性可以实现良好的CD效果^[37]。

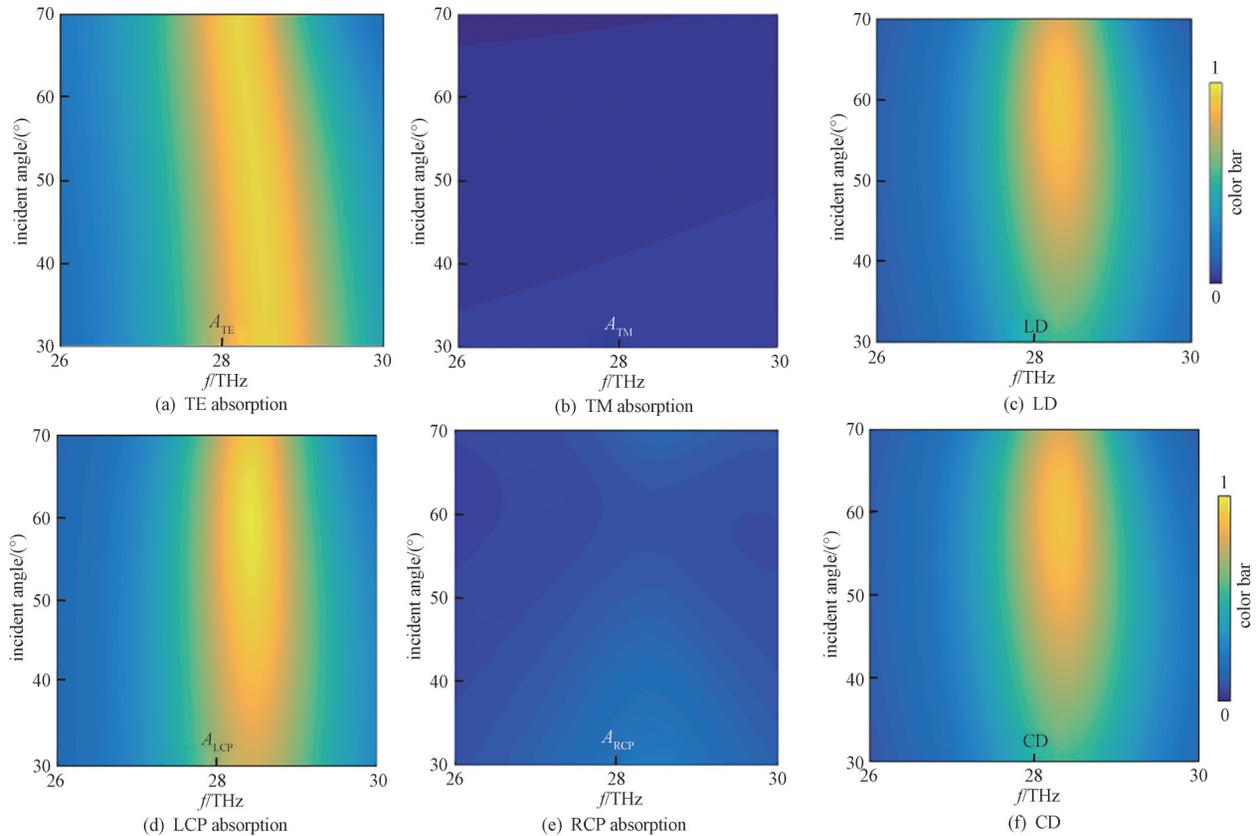


Fig.5 The dependence of the device on different electromagnetic waves at different incident angles

图5 器件对不同电磁波在不同入射角时的依赖关系

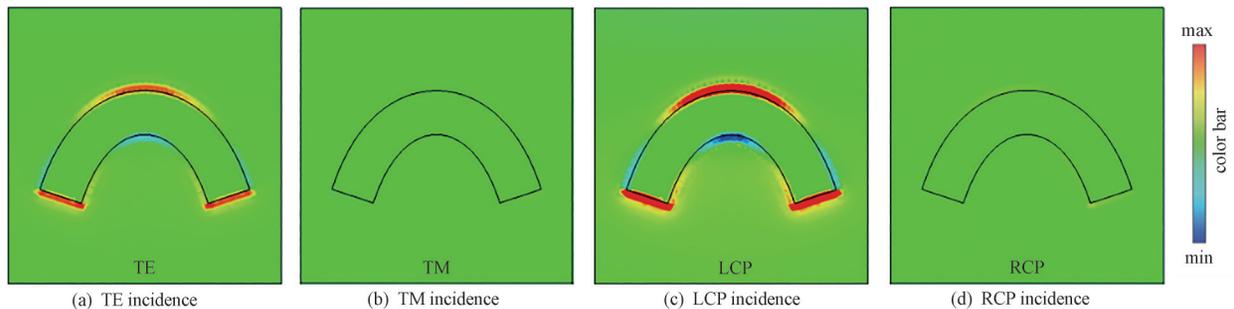


Fig.6 Electric field distribution of xoy plane of unit structure under different incident electromagnetic waves

图6 单元结构在不同电磁波入射下 xoy 平面的电场分布

3 结论

本文设计了一种基于悬链线结构的红外波段超构表面吸收器,该吸收器由金、氟化镁、硅介质层和金反射层共同构成。当线偏振电磁波以方位角 $\varphi=0^\circ$ 和入射角 $\theta=60^\circ$ 入射时,该超构表面可在 28.3 THz 处吸收 TE 波并反射 TM 波;当圆偏振电磁波以方位角 $\varphi=90^\circ$ 和入射角 $\theta=60^\circ$ 入射时,该超构表面可在 28.3 THz 处吸收 LCP 波并反射 RCP 波。这两种功能可在正交方位角下实现,且几乎没有干扰。通过调节单元结构的参数实现吸收峰值频率的移动,以及对 LCP 波和 RCP 波在不同频率上同时吸收。该器件在电磁波大角度入射时,仍能够保持良好的 LD 和 CD。该研究在一定程度上丰富了悬链线电磁学的相关内容,对手性吸收、手性探测和手性成像等领域具有一定的研究价值。

参考文献：

- [1] LUO Xiangang. Subwavelength electromagnetics[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2016,9(2):138–150. doi:10.1007/s12200–016–0632–1.
- [2] LUO Xiangang. Metamaterials and metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(14): 1900885. doi: 10.1002/adom.201900885.
- [3] LUO X G, TSAI D P, GU M, et al. Extraordinary optical fields in nanostructures: from sub-diffraction-limited optics to sensing and energy conversion[J]. *Chemical Society Reviews*, 2019,48(8):2458–2494. doi:10.1039/c8cs00864g.
- [4] YU N F, GENEVET P, AIETA F, et al. Flat optics: controlling wavefronts with optical antenna metasurfaces[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013,19(3):4700423. doi:10.1109/JSTQE.2013.2241399.
- [5] HUANG Yijia, XIAO Tianxiao, XIE Zhengwei, et al. Single-layered phase-change metasurfaces achieving efficient wavefront manipulation and reversible chiral transmission[J]. *Optics Express*, 2022,30(2):1337–1350. doi:10.1364/OE.447545.
- [6] HUANG Yijia, XIAO Tianxiao, XIE Zhengwei, et al. Single-layered reflective metasurface achieving simultaneous spin-selective perfect absorption and efficient wavefront manipulation[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021,9(5):2001663. doi:10.1002/adom.202001663.
- [7] HUANG Yijia, XIAO Tianxiao, CHEN Shuai, et al. All-optical controlled-NOT logic gate achieving directional asymmetric transmission based on metasurface doublet[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2023,6(7):220073. doi:10.29026/oea.2023.220073.
- [8] YUE Zhen, LI Jitao, LI Jie, et al. Terahertz metasurface zone plates with arbitrary polarizations to a fixed polarization conversion[J]. *Opto-Electronic Science*, 2022,1(3):210014. doi:10.29026/oes.2022.210014.
- [9] YANG Zhengmei, ZHOU Yanming, CHEN Yiqin, et al. Reflective color filters and monolithic color printing based on asymmetric Fabry-Perot cavities using nickel as a broadband absorber[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016,4(8):1196–1202. doi:10.1002/adom.201600110.
- [10] MA Ju, HUANG Yijia, PU Mingbo, et al. Inverse design of broadband metasurface absorber based on convolutional autoencoder network and inverse design network[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020,53(46):464002. doi:10.1088/1361–6463/aba3ec.
- [11] YU P, BESTEIRO L V, HUANG Y J, et al. Broadband metamaterial absorbers[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(3): 1800995. doi:10.1002/adom.201800995.
- [12] YANG Yihao, JING Liqiao, ZHENG Bin, et al. Full-polarization 3D metasurface cloak with preserved amplitude and phase[J]. *Advanced Materials*, 2016,28(32):6866–6871. doi:10.1002/adma.201600625.
- [13] HUANG Yijia, PU Mingbo, ZHANG Fei, et al. Broadband functional metasurfaces: achieving nonlinear phase generation toward achromatic surface cloaking and lensing[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019,7(7):1801480. doi:10.1002/adom.201801480.
- [14] QIAN Chao, ZHENG Bin, SHEN Yichen, et al. Deep-learning-enabled self-adaptive microwave cloak without human intervention[J]. *Nature Photonics*, 2020,14(6):383–390. doi:10.1038/s41566–020–0604–2.
- [15] GAO Hui, FAN Xuhao, XIONG Wei, et al. Recent advances in optical dynamic meta-holography[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2021,4(11):210030. doi:10.29026/oea.2021.210030.
- [16] DENG Zilan, DENG Junhong, ZHUANG Xin, et al. Diatomic metasurface for vectorial holography[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(5): 2885–2892. doi:10.1021/acs.nanolett.8b00047.
- [17] ZHENG G X, MÜHLENBERND H, KENNEY M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015,10(4):308–312. doi:10.1038/nnano.2015.2.
- [18] ZHANG Xiaohao, PU Mingbo, GUO Yinghui, et al. Colorful metahologram with independently controlled images in transmission and reflection spaces[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019,29(22):1809145. doi:10.1002/adfm.201809145.
- [19] YAO Y, SHANKAR R, KATS M A, et al. Electrically tunable metasurface perfect absorbers for ultrathin mid-infrared optical modulators[J]. *Nano Letters*, 2014,14(11):6526–6532. doi:10.1021/nl503104n.
- [20] PLUM E, ZHELUDEV N I. Chiral mirrors[J]. *Applied Physics Letters*, 2015,106(22):221901. doi:10.1063/1.4921969.
- [21] HUANG Hui, QIN Shuai, JIE Kaiqian, et al. Dynamic generation of giant linear and circular dichroism via phase-change metasurface[J]. *Optics Express*, 2021,29(25):40759–40769. doi:10.1364/OE.446028.
- [22] LUO Xiangang, PU Mingbo, GUO Yinghui, et al. Catenary functions meet electromagnetic waves: opportunities and promises[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020,8(23):2001194. doi:10.1002/adom.202001194.
- [23] PU Mingbo, LI Xiong, MA Xiaoliang, et al. Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum[J]. *Science Advances*, 2015,1(9):e1500396. doi:10.1126/sciadv.1500396.

- [24] HUANG Yijia, LUO Jun, PU Mingbo, et al. Catenary electromagnetics for ultra-broadband lightweight absorbers and large-scale flat antennas[J]. *Advanced Science*, 2019,6(7):1801691. doi:10.1002/adv.201801691.
- [25] ZHANG Fei, PU Mingbo, LI Xiong, et al. Extreme-angle silicon infrared optics enabled by streamlined surfaces[J]. *Advanced Materials*, 2021,33(11):e2008157. doi:10.1002/adma.202008157.
- [26] GUO Yinghui, MA Xiaoliang, PU Mingbo, et al. High-efficiency and wide-angle beam steering based on catenary optical fields in ultrathin metalens[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018,6(19):1800592. doi:10.1002/adom.201800592.
- [27] LI Xiong, PU Mingbo, WANG Yangqin, et al. Dynamic control of the extraordinary optical scattering in semicontinuous 2D metamaterials[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016,4(5):659-663. doi:10.1002/adom.201500713.
- [28] GUO Yinghui, HUANG Yijia, LI Xiong, et al. Polarization-controlled broadband accelerating beams generation by single catenary-shaped metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019,7(18):1900503. doi:10.1002/adom.201900503.
- [29] LUO Xiangang, PU Mingbo, LI Xiong, et al. Broadband spin Hall effect of light in single nanoapertures[J]. *Light: Science & Applications*, 2017,6(6):e16276. doi:10.1038/lsa.2016.276.
- [30] PALIK E D. *Handbook of optical constants of solids*[M]. San Diego:Academic Press, 1998.
- [31] HUANG Yijia, XIE Xin, PU Mingbo, et al. Dual-functional metasurface toward giant linear and circular dichroism[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020,8(11):1902061.
- [32] WANG Shuai, DENG Zilan, WANG Yujie, et al. Arbitrary polarization conversion dichroism metasurfaces for all-in-one full Poincaré sphere polarizers[J]. *Light: Science & Applications*, 2021,10(1):24. doi:10.1038/s41377-021-00468-y.
- [33] ZOU H L, NASH G R. Efficient mid-infrared linear-to-circular polarization conversion using a nanorod-based metasurface[J]. *Optical Materials Express*, 2022,12(12):4565. doi:10.1364/ome.473926.
- [34] PLUM E, FEDOTOV V A, ZHELUDEV N I. Extrinsic electromagnetic chirality in metamaterials[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2009,11(7):074009. doi:10.1088/1464-4258/11/7/074009.
- [35] PLUM E. Extrinsic chirality: tunable optically active reflectors and perfect absorbers[J]. *Applied Physics Letters*, 2016,108(24):241905. doi:10.1063/1.4954033.
- [36] JIANG Ruizhe, MA Qian, LIANG Jingcheng, et al. A single-layered wideband and wide-angle transparent metasurface for enhancing the EM-wave transmissions through glass[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023,71(8):6593-6605. doi:10.1109/TAP.2023.3281879.
- [37] CAO Tun, WEI Chenwei, MAO Libang, et al. Extrinsic 2D chirality: giant circular conversion dichroism from a metal-dielectric-metal square array[J]. *Scientific Reports*, 2014(4):7442. doi:10.1038/srep07442.

作者简介:

蓝翔(1998-), 男, 硕士, 主要研究方向为微纳光学. email:lanxiang2468@163.com.

邓钦荣(2000-), 男, 硕士, 主要研究方向为微纳光学.

张文婷(1999-), 女, 硕士, 主要研究方向为微纳光学.

崔恒瑜(2000-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微纳光学.

唐紫依(1998-), 女, 硕士, 主要研究方向为微纳光学.

胡杰(1997-), 男, 硕士, 主要研究方向为微纳光学.

黄奕嘉(1993-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为亚波长电磁学、微纳光学与等离子体光学.