

基于柔性基底的双层 J 型可拉伸手性太赫兹超表面

陈玉婷¹, 梁馨元², 钟昊天¹, 黄巍^{1,3}, 银珊^{1,3*}¹桂林电子科技大学光电工程学院, 广西 桂林 541004;²南瑞电力信息有限公司, 江苏 南京 210000;³广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 结构的手性在自然界中普遍存在, 通常表现为不能通过平移或旋转与其镜像结构重合的现象。因为光谱探测技术能够反映光和物质相互作用产生的丰富信息, 所以利用光学方法检测手性特征成为了探测和鉴别手性物质的常用手段。手性超表面能够通过人工设计达到极大的圆二色性(CD), 是物质检测和传感领域的研究热点。设计了一种可动态调控 CD 响应, 同时实现高传感性能的太赫兹手性超表面。该超表面以柔性材料为基底, 前后表面为四重旋转对称的 J 型金属结构。仿真结果表明: 该手性超表面在 0.760 THz 处能够产生高达 0.805 的强 CD 值; 通过二维方向等比例拉伸, CD 峰从 0.760 THz 红移至 0.650 THz 附近, 且能保持很高的 CD 信号; 同时, 其传感灵敏度高达 327 GHz/RIU, 且在相对拉伸形变量高达 20% 的拉伸过程中仍能较好地保持手性响应和传感性能。所设计的手性超表面在动态多功能器件、可穿戴传感器领域具有潜在的应用价值。

关键词 手性超表面; 柔性材料; 圆二色性; 太赫兹传感

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231394

Bilayered J-Shaped Stretchable Chiral Terahertz Metasurface Based on Flexible Substrate

Chen Yuting¹, Liang Xinyuan², Zhong Haotian¹, Huang Wei^{1,3}, Yin Shan^{1,3*}¹School of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;²Nari Group Corporation, Nanjing 210000, Jiangsu, China;³Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin 541004, Guangxi, China

Abstract Chirality of structure is prevalent in nature, which is usually manifest as the inability to coincide with its mirror structure by translation or rotation. Because spectrum detection techniques can reflect the abundant information of the interaction between light and matter, chiroptical spectroscopy has become a common method to investigate and identify chiral substances. Chiral metasurface can be artificially designed to achieve strong circular dichroism (CD), which is a research hot spot in the fields of matter detection and sensing. We propose a terahertz chiral metasurface that can dynamically control the CD response while achieving high sensing performance. The metasurface is based on a flexible material, and its top and bottom surfaces are J-shaped metal structures with four-fold rotational symmetry. The simulation results show that the chiral metasurface can produce a high CD value up to 0.805 at 0.760 THz. And by equally proportional stretching in two-dimensions, the CD peak redshifts from 0.760 THz to 0.650 THz maintaining a strong CD signal. Meanwhile, its sensing sensitivity can reach 327 GHz/RIU, and its chiral response and sensing performance are well maintained during the stretching process with the relative stretching deformation up to 20%. The designed chiral metasurface has potential applications in the field of dynamic multifunctional devices and wearable sensors.

Key words chiral metasurface; flexible material; circular dichroism; terahertz sensing

收稿日期: 2023-05-29; 修回日期: 2023-07-13; 录用日期: 2023-08-01; 网络首发日期: 2023-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(62005059)

通信作者: *yin@guet.edu.cn

1 引言

手性,指任意几何图形通过平移和旋转手段都无法与其镜像重合^[1],就像人的左右手,互为镜像却无法重合,其在分子生物学、医学和生物科学中具有巨大的研究价值。自然材料的光学响应微弱,甚至难以被检测出来。超材料是一种经过人工精心设计,具备天然材料所不具有的特殊性质,亚波长的周期性微结构材料^[2]。它的结构参数可以人为设定,以满足各种波段电磁波的响应要求。自Pendry^[3]提出的三维螺旋(“瑞士卷”)结构在理论上证明了没有金属线与谐振环的单一手性体也能够获得负折射后,手性超材料得到快速发展,大量三维结构的手性超材料涌现出来,并且得到了实验验证^[4-5]。但是三维手性超材料的加工制备困难,限制了其实际应用。虽然结构简单的单层金属二维手性超表面也能实现旋光性,但是它存在理论极限,难以达到三维超材料的高手性响应。为获得强的手性光学响应,同时降低加工难度,Rogacheva等^[6]提出了双层手性结构。与传统的三维手性超材料略有不同,它是通过两层金属之间的层间耦合来增强电磁响应,以获得更强的手性光学响应。这种双层金属结构比起普通的三维结构更易于加工制作,因此吸引了许多研究人员的目光^[7-8]。手性超材料的出现使材料的手性光学响应提高了几个数量级,从而能被应用于生物传感^[9]、检测^[10-11]、偏振^[12]、全息^[13]等领域。

目前大多数超表面一旦加工成型之后,结构无法改变,导致其功能较为单一。为提高超表面的多功能性,降低加工成本,可主动调控器件^[14]成为了一个研究热点。通常,研究人员在刚性衬底的超表面中加入复合材料,通过照明、电控、温控等方式进行主动调控。而柔性材料的出现为主动调控器件带来了新的选择。柔性材料作为基底材料时能够灵活调控其形态,贴合

于柔性材料上的金属结构能随着材料的拉伸、弯曲、旋转等操作实现动态可调,因此被广泛用于电子皮肤^[15]、柔性显示器^[16]和生物传感^[17]等领域。

本文提出一种基于柔性基底——聚二甲基硅氧烷(PDMS)的双层金属手性太赫兹超表面,其上下两面由取向不同的具有四重旋转对称性的J型金属图案构成。该结构在0.760 THz处能产生圆二色性(CD)值高达0.805的CD信号。柔性材料制成的超表面具有很好的延展性,通过对其拉伸能实现对超表面电磁响应的动态调控。因此,模拟了该结构在不同拉伸程度下对CD信号的调控,并分析和讨论了CD信号产生的原因;同时还模拟了该结构在不同拉伸程度下的折射率传感能力。结果表明,在不同拉伸程度下,该结构均表现出良好的传感性能,可应用于动态多功能器件、可穿戴传感器以及手性光学探测。

2 仿真设计与原理

2.1 手性超表面的结构优化与仿真设计

PDMS是一种弹性体聚合物,因其低杨氏模量、低吸收损耗、低表面能及可与传统和先进的微/纳米制造技术相兼容等优点^[18],非常适合作为超表面的柔性基底。所设计的基于PDMS的手性超表面结构示意图如图1(a)所示,结构由两层具有四重旋转对称性(C₄symmetry)^[19-20]的J型图案组成,前后层的结构关于镜像对称。利用电磁仿真软件CST Microwave Studio对该结构进行模拟仿真。使用软件中的频域求解器,单元结构的边界条件设置为:z方向为open(add space);x和y方向为unit cell;网格尺寸通过自适应方法生成。将宽带圆偏振波作为激励源,可以在port处通过不同模式设置左旋圆偏振光(LCP)和右旋圆偏振光(RCP)。宽带圆偏振波沿+z方向正入射到超表面,初始背景环境为真空。

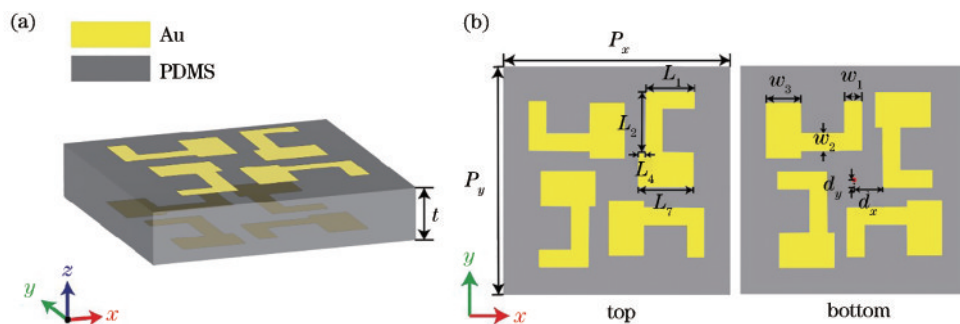


图1 手性超表面的示意图和结构参数。(a)单元结构示意图;(b)单元结构在xoy平面上的上层(左)和下层(右)的结构参数
Fig. 1 Schematic diagram and structural parameters of the chiral metasurface. (a) Schematic diagram of the unit structure; (b) Structural parameters of the top (left) and bottom (right) layers of the unit structure on the xoy plane

图1(b)展示了xoy平面上单元结构前(top)后(bottom)层的结构参数。优化后的单元结构几何参数为:沿x和y轴的周期 $P_x = P_y = 330 \mu\text{m}$;臂长

$L_1 = 85 \mu\text{m}$ 、 $L_2 = 105 \mu\text{m}$ 、 $L_3 = 95 \mu\text{m}$ 、 $L_4 = 12.5 \mu\text{m}$;线宽 $w_1 = 30 \mu\text{m}$ 、 $w_2 = 30 \mu\text{m}$ 、 $w_3 = 60 \mu\text{m}$;右上角的J形图案相对于中心点位移 $d_x = 50.0 \mu\text{m}$ 、 $d_y =$

-12.5 μm,并以中心点为旋转中心,完成四重旋转金属图案分布;金属图案的厚度为 0.2 μm;双层结构之间的厚度,即中间电介质层厚度 $t = 55 \mu\text{m}$;PDMS 的介电常数取 2.35;损耗正切值为 0.06^[21];由于金(Au)的延展性很好,在拉伸超表面时不易断裂,因此选用 Au 作为金属层,其电导率设为 $4.561 \times 10^7 \text{ S/m}$ ^[22]。

2.2 琼斯矩阵及 CD 表征

手性超材料的传输特性通常利用琼斯(Jones)矩阵来描述,因其可以将入射场和透射场或反射场的复振幅联系起来,所以也被称为传输矩阵。首先,假设超材料被向 +z 方向传播的圆偏振光激发,透射电场和入射电场通过 2×2 的复数矩阵联系起来^[19,23]:

$$\begin{bmatrix} E_t^x \\ E_t^y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{xx} & t_{xy} \\ t_{yx} & t_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i^x \\ E_i^y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i^x \\ E_i^y \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\text{lin}} \begin{bmatrix} E_i^x \\ E_i^y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: E_i^x 和 E_i^y 分别表示沿 x 方向极化的入射电场和透射电场;类似的, E_t^y 和 E_t^x 表示沿 y 方向极化的入射电场和透射电场; \mathbf{T}_{lin} 为线极化的透射矩阵; t_{ij} 中 i 表示出射偏振, j 表示入射偏振。为方便讨论,将 t_{ij} 项替换为 A、B、C、D,它们分别代表着实际的 \mathbf{T} 矩阵元,这 4 个分量互不相同,但是在某些对称性下服从相应关系。

为得到圆偏振光的传输矩阵,必须对基向量进行变换。由于传输矩阵 \mathbf{T} 可以把入射光和透射光联系起来,所以可以将其表达为从笛卡儿坐标系通过变化矩阵 $\mathbf{\Lambda}$ 转换为基于 LCP、RCP 的圆偏振坐标系:

$$\mathbf{t} = \mathbf{T}\mathbf{I} \rightarrow \bar{\mathbf{t}} = \mathbf{\Lambda}^{-1}\mathbf{T}\mathbf{\Lambda}\bar{\mathbf{I}} = \mathbf{T}_{\text{new}}\bar{\mathbf{I}}, \quad (2)$$

$$\mathbf{\Lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ i & -i \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中, \mathbf{t} 和 \mathbf{I} 分别是笛卡儿坐标下的透射光和入射光,而它们与圆基的关系分别为 $\mathbf{t} = \mathbf{\Lambda}\bar{\mathbf{t}}$ 、 $\mathbf{I} = \mathbf{\Lambda}\bar{\mathbf{I}}$,因此得到的圆偏振光透射矩阵 \mathbf{T}_{new} 表示为

$$\begin{bmatrix} t_{++} & t_{+-} \\ t_{-+} & t_{--} \end{bmatrix} = \mathbf{\Lambda}^{-1}\mathbf{T}\mathbf{\Lambda} =$$

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} A + D + i(B - C) & A - D - i(B + C) \\ A - D + i(B + C) & A + D - i(B - C) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: t_{++} 表示从 RCP 到 RCP 的同极化透射系数; t_{--} 表示从 LCP 到 LCP 的同极化透射系数; t_{+-} 表示从 LCP 到 RCP 的交叉极化透射系数; t_{-+} 表示从 RCP 到 LCP 的交叉极化透射系数。

CD 是由左旋圆极化波和右旋圆极化波吸收的差异引起的,因左旋和右旋折射率虚部的不同,表现为不同的吸收率或透过率。CD 通常由三维或多层结构的手性超材料实现,被广泛用于测量手性光学。所使用的 CD 的定义表示为

$$C_{\text{CD}} = T_{--} - T_{++} = |t_{--}|^2 - |t_{++}|^2, \quad (5)$$

式中: T_{++} 和 T_{--} 分别表示 RCP 和 LCP 的直接透射率。

3 仿真结果与讨论

3.1 结构的透射光谱及其 CD

C_4 型的 J 型手性超表面的仿真结果如图 2(a) 所示,实线和虚线分别表示 LCP 和 RCP 的直接透射谱。透射光谱 ($T_{ij} = |t_{ij}|^2$) 可以通过 CST 计算的透射传输系数 t_{ij} 得到, T_{ij} 中 i 表示出射偏振, j 表示入射偏振。从图 2(a) 中可以看出:在 0.760 THz 共振频率下, T_{++} 产生了一个共振峰;而 0.856 THz 共振频率处, T_{--} 和 T_{++} 都产生了一个小共振峰。LCP 和 RCP 透射率的差值越大,CD 现象越明显。图 2(b) 展示了结构的 CD 光谱。在 0.760 THz 共振频率处产生了约为 0.805 的 CD 值;0.856 THz 共振频率处产生了和 0.760 THz 处反向的只有不到 0.1 的 CD 值。为方便表示,将 0.760 THz 处的 CD 峰和 0.856 THz 处的 CD 谷分别标记为模式 I(mode I) 和模式 II(mode II)。

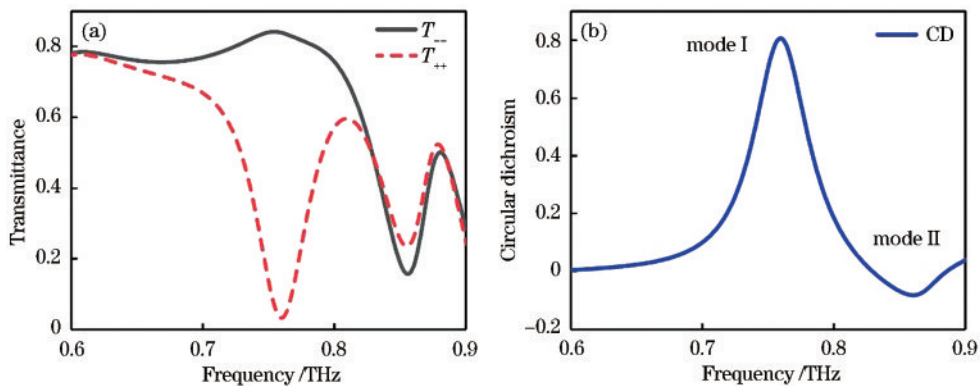


图 2 手性超表面的透射率和 CD 光谱。(a)透射率;(b) CD 光谱

Fig. 2 Transmittance spectrum and CD spectra of chiral metasurface. (a) Transmittance spectrum; (b) CD spectra

3.2 基于 Born-Kuhn 模型的理论分析

为探究所设计的超表面 CD 产生的物理机制,进一步模拟了在 LCP 和 RCP 的圆偏振光的激发下,手性

超表面在共振频率为 0.760 THz (mode I) 和 0.856 THz (mode II) 时的上下层的电场分布,归一化电场分布如图 3 所示。很明显,由于上下层金属结构不重合,其电

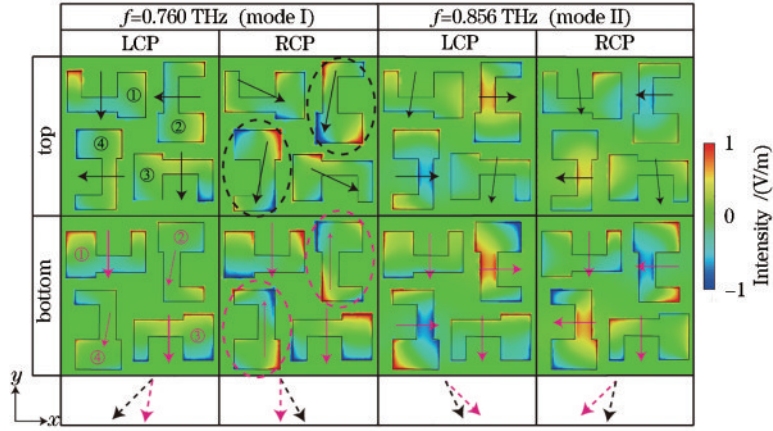


图 3 在 LCP 和 RCP 激发下,共振频率 $f = 0.760$ THz (mode I) 处和 $f = 0.856$ THz (mode II) 处的归一化电场分布和 xoy 平面的等效电偶极矩示意图

Fig. 3 Normalized electric field distributions and equivalent electric dipole moments on the xoy plane at resonance frequency $f = 0.760$ THz (mode I) and $f = 0.856$ THz (mode II) under LCP and RCP excitations

场各有不同,导致了彼此之间的复杂耦合。为更好地分析超表面的电磁响应特性,将单元结构按照 4 个象限分为①~④个子结构(每个子结构含上下层金属结构)进行讨论,图 3 中用序号标记出了上层(top)和下层(bottom)的金属结构。同时,为更好地判断等效电偶极矩,用箭头标记了上层(top)和下层(bottom)各结构的等效电偶极矩方向,利用 Born-Kuhn 理论模型^[24-25]判断上下层的耦合方式。

观察 mode I 对应的电场分布可知:在 LCP 入射时,上下层对应的等效电偶极矩方向基本相同,即子结构的上下层等效电偶极矩在相交处聚集同性电荷,所以耦合模式是“反键模式”;在 RCP 入射时,子结构①③的上下层对应的等效电偶极矩方向相同,也为“反键模式”,但子结构②④上层与下层对应的等效电偶极矩方向(虚线框)相反,即上下层等效电偶极矩在相交处聚集异性电荷,所以呈现“成键模式”。该“成键模式”增强了上下层结构之间的耦合,所以此时引起了较强的 RCP 响应。对比之下,LCP 响应的归一化电场强度明显更弱,导致 mode I 处产生了较大的 CD 峰。同理,观察 mode II 的电场分布和等效电偶极矩方向,可以看出,无论是 LCP 入射还是 RCP 入射,4 个子结构的上下层均呈“反键模式”,且 LCP 和 RCP 响应的归一化电场强度接近,所以此时的 CD 峰较小。

4 拉伸程度对 CD 的影响及超表面传感性能的研究

4.1 拉伸程度对 CD 的影响

基于 PDMS 柔性材料的手性超表面具有很好的力学性质,可以通过拉伸调控 CD 信号。将超表面沿两个方向拉伸,即沿 xy 轴拉伸,变形可以表示为 $\epsilon_{xy} = \sigma_{xy}/E$,其中: ϵ_{xy} 为整个区域面积的变化量与初始面积的比值; σ_{xy} 为沿 xy 轴拉伸的应变; E 为 PDMS 的杨氏

模量^[26]。为简化计算,用相对拉伸形变量 ϵ' (拉伸后的变形量与初始状态下结构长度的比值)进行讨论,即 $\epsilon' = (l_1 - l_0)/l_0$,其中: l_0 为沿拉伸方向上超材料结构的原长; l_1 为沿拉伸方向施加应力后结构所达到的长度。拉伸的难易程度与所采用的柔性材料有关,柔性材料的杨氏模量越大,越不容易发生形变^[27]。

图 4(a)为沿 xy 方向被拉伸至不同相对拉伸形变量的手性超表面的透射谱,其中:实线表示 T_{--} ;虚线表示 T_{++} 。同时,为方便观察,图 4(b)描绘了被拉伸至不同相对拉伸形变量的手性超表面的 CD 谱。以相对拉伸形变量为 10% 为例,结构参数变化为: $P_x = 363 \mu\text{m}$ 、 $L_1 = 93.50 \mu\text{m}$ 、 $L_2 = 115.50 \mu\text{m}$ 、 $L_3 = 104.50 \mu\text{m}$ 、 $L_4 = 13.75 \mu\text{m}$ 、 $w_1 = 33 \mu\text{m}$ 、 $w_2 = 33 \mu\text{m}$ 、 $w_3 = 66 \mu\text{m}$ 、 $t = 45.45 \mu\text{m}$ 。mode I 从 0.760 THz 红移至 0.700 THz,同时 mode II 从 0.855 THz 红移至 0.800 THz。透射谱整体来说并没有明显的变形,mode I 的最大 CD 值经拉伸后从 0.805 降低至 0.740。继续拉伸结构至相对拉伸形变量为 20%,此时的结构参数变化为: $P_x = 396 \mu\text{m}$ 、 $L_1 = 102 \mu\text{m}$ 、 $L_2 = 126 \mu\text{m}$ 、 $L_3 = 114 \mu\text{m}$ 、 $L_4 = 15 \mu\text{m}$ 、 $w_1 = 36 \mu\text{m}$ 、 $w_2 = 36 \mu\text{m}$ 、 $w_3 = 72 \mu\text{m}$ 、 $t = 38.19 \mu\text{m}$ 。mode I 红移至 0.652 THz,同时 mode II 红移至 0.746 THz。对比 CD 谱,此时 mode I 的最大 CD 值为 0.65。此外,透射谱在 0.756 THz 处出现由晶格模造成的明显尖锐峰。通过本课题组先前的工作^[28]可知,晶格模的频率受结构周期和衬底的介电常数影响,当周期 P 增大,晶格模的频率就会红移,逐渐靠近 mode II 的共振频率,使得 mode II 的峰变得尖锐。但是由于 mode II 的 CD 值比 mode I 的 CD 值小很多,该手性超表面的手性光学特性主要由 mode I 贡献,而晶格模频率距离主共振峰还有一定距离,所以晶格模对 CD 值的影响可以忽略。

图 4(c)为不同拉伸程度与最大 CD 值对应频率的

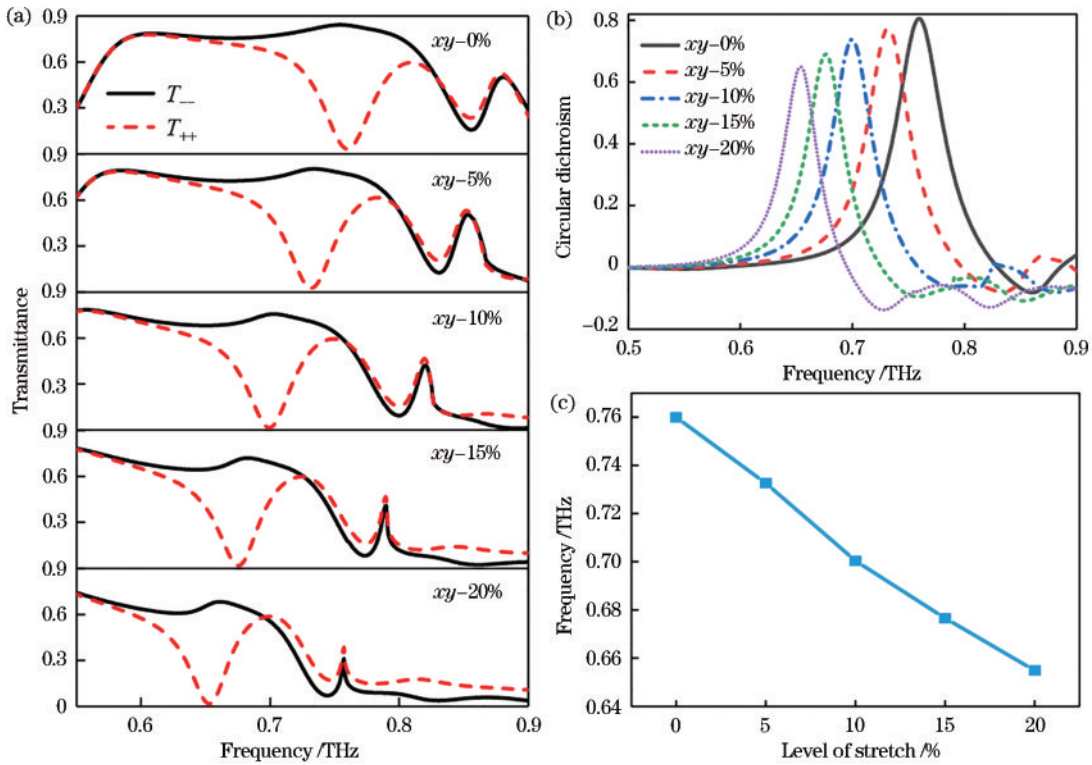


图 4 沿 xy 方向被拉伸至不同相对拉伸形变量的手性超表面的透射谱和 CD 光谱以及拉伸程度与最大 CD 值频率的关系。(a)透射谱;(b) CD 光谱;(c)不同拉伸程度与最大 CD 值频率的关系

Fig. 4 Transmittance spectrum, CD spectrum of the bilayered chiral metasurface stretched in the xy direction at different relative stretching deformation and the relationship between different tensile degrees and the frequency of the maximum CD value. (a) Transmittance spectrum; (b) CD spectrum; (c) relationship between different tensile degrees and the frequency of the maximum CD value

函数关系。可以明显看出它们呈现负相关,即随着拉伸程度增加,最大 CD 值对应的频率减小,产生红移现象。出现的红移现象可以利用 Born-Kuhn 理论模型进行解释:在 RCP 圆偏振光照射下,激发出“反键模式”,同性电荷集中在结构的堆叠处,产生斥力,当超表面被拉伸,正负电荷的距离更大,等效电偶极矩变长,导致了共振频率的红移。

4.2 不同拉伸程度下超表面的传感性能分析

使用 CST 进行不同环境折射率的仿真模拟,以研究超表面的传感性能。首先,根据介电常数与折射率之间的关系,即 $n = \sqrt{\epsilon\mu}$,其中: n 为折射率; ϵ 和 μ 分别为介电常数和磁导率,将 background 中材料的介电常数设置为 n^2 ,磁导率设置为 1,折射率设置为 1.33~1.55(使用该折射率范围模拟手性超表面在不同折射率的液体中的传感性能)。传感器的灵敏度^[22,29]通常定义为

$$S = \Delta f / \Delta n, \quad (6)$$

式中: Δf 为谐振频率偏移量; Δn 为折射率 n 的相对变化量。

其次,对未拉伸前的结构进行折射率环境变化模拟。如图 5(a)所示,当折射率从 1.33 增加到 1.55 时,直接透射谱 T_{++} 的 mode I 从 0.660 THz 红移至 0.588 THz,这是因为空间环境的折射率会改变共振

波长。且可以看到,在周围环境为空气时存在的 mode II 已经消失,这是由晶格膜的抑制作用造成的^[28]。利用仿真模拟得到不同环境折射率的直接透射谱 T_{++} 的共振峰,计算得到此时的传感器灵敏度 S 为 327 GHz/RIU。同时提取了不同折射率下的 CD 谱,如图 5(b)所示。最大 CD 值从 0.721 下降到 0.618,依然保持了较大的 CD 值;CD 峰从 0.662 THz 红移到 0.592 THz,与透射率 T_{++} 共振峰位接近。另外,为直观描述灵敏度,提取了共振频率位置 f 与折射率 n 的关系,如图 5(c)所示,共振频率 f 随折射率 n 的增大而减小,两者呈线性变化。通过线性拟合,得到未被拉伸时器件的相关系数 ($R^2=0.9994$),说明 f 和 n 呈良好的线性关系。由于所设计超表面中强 CD 的主要贡献来源于 T_{++} 的强共振响应,为简化计算,可以采用透射率 T_{++} 进行传感特性的计算。

接下来,用同样的方法对沿 xy 方向被拉伸至相对拉伸形变量达到 10% 和 20% 的超表面进行折射率环境变化的仿真模拟。如图 6(a)所示,和未拉伸前的仿真结果类似,当超表面沿 xy 方向被拉伸至相对拉伸形变量达到 10% 时,折射率变化使 T_{++} 透射峰从 0.60 THz 红移到 0.53 THz,此时灵敏度 S 为 314 GHz/RIU。图 6(b) 为此共振频率的位置 f 随折射率 n 的变化,其中:蓝点表示不同折射率 n 对应的共振频率 f ;绿线表示线

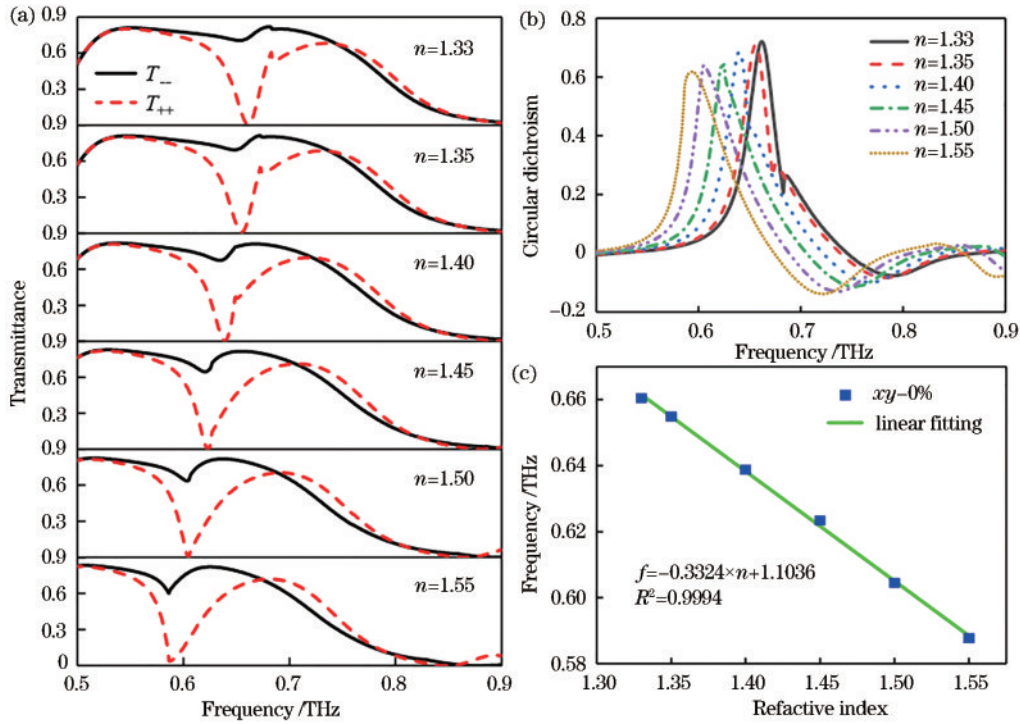


图 5 未拉伸超表面在不同折射率中的透射谱和 CD 光谱以及 T_{++} 的共振频率与折射率的对应关系。(a)透射谱;(b) CD 光谱;
(c) T_{++} 的共振频率与折射率的对应关系

Fig. 5 Transmittance spectrum and CD spectrum of the unstretched metasurface with different refractive indices and the relationship between the resonant frequency and refractive index of T_{++} . (a) Transmittance spectrum; (b) CD spectrum; (c) relationship between the resonant frequency and refractive index of T_{++}

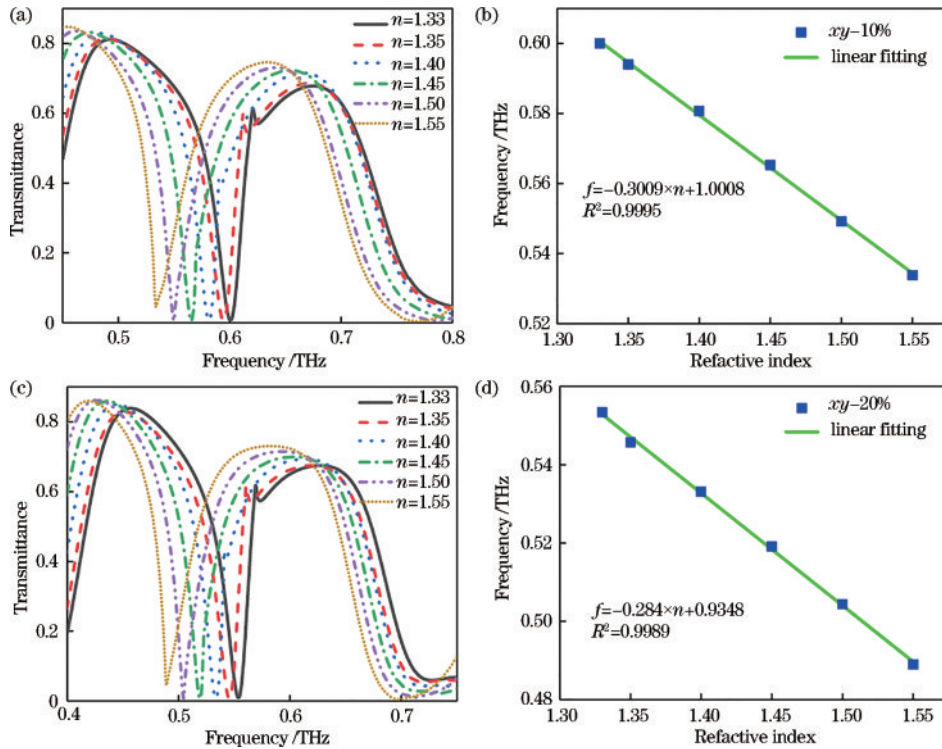


图 6 当手性超表面沿 xy 方向被拉伸至相对拉伸形变量达到 10% 和 20% 时,不同折射率的透射谱 T_{++} 和其共振频率 f 与折射率 n 的对应关系。(a)透射谱 T_{++} ($\epsilon' = 10\%$); (b) f 与 n 的对应关系 ($\epsilon' = 10\%$); (c)透射谱 T_{++} ($\epsilon' = 20\%$); (d) f 与 n 的对应关系 ($\epsilon' = 20\%$)

Fig. 6 Transmittance T_{++} and the relationship between resonance frequency f of T_{++} and the refractive index n with different refractive indices when the chiral metasurface is stretched in the xy direction until the relative stretching deformation reaches 10% and 20%. (a) Transmittance T_{++} ($\epsilon' = 10\%$); (b) f vs. n ($\epsilon' = 10\%$); (c) transmittance T_{++} ($\epsilon' = 20\%$); (d) f vs. n ($\epsilon' = 20\%$)

性拟合的结果。线性拟合得出相关系数 $R^2=0.9995$, 说明共振频率 f 和折射率 n 呈线性的负相关变化。当超表面沿 xy 方向被拉伸至相对拉伸形变量达到 20% 时, 其透射谱如图 6(c) 所示。折射率变化使 T_{++} 透射峰从 0.554 THz 红移到 0.489 THz, 灵敏度 S 约为 295 GHz/RIU。图 6(d) 为此时共振频率的位置 f 随折射率 n 的变化, 虽然两者的线性拟合结果的相关系数 R^2 略有降低, 仅有 0.9989, 但仍能说明共振频率 f 和折射率 n 呈线性负相关变化。综上所述, 所设计的手性超表面在不同的拉伸程度下仍然具备比较好的灵敏度

和传感性能, 具备了可佩戴式折射率传感的应用潜能。

另外, 表 1 展示了部分研究者设计的手性超材料的传感性能, 用来比较不同工作波段手性器件的最大 CD 值、最大传感灵敏度以及动态调控性能。如 Sun 等^[30] 设计的手性超材料的工作范围包含着本工作的工作频率, 传感性能优于本工作的传感性能, 同时最大 CD 值能达 0.962, 但是它并不具备动态调控能力。而所设计的结构在可以主动调控的同时, 依然保持较高的 CD 值和此工作频率下较好的传感性能, 这为多功能器件的设计提供了更多思路。

表 1 部分已报道的手性超材料的传感性能

Table 1 Sensing properties of chiral metamaterials have been reported

Chiral metamaterial	Operating frequency /wavelength	Maximum CD value	Maximum sensitivity S	Adjustable
Zhou L, et al. ^[31]	20.00–30.00 μm	0.536	10000 nm/RIU	Yes
Guglielmelli A, et al. ^[32]	0.40–1.28 μm	0.450	761 nm/RIU	No
Peng R H, et al. ^[33]	1.20–1.50 μm	0.570	333 nm/RIU	Yes
Lin Y N, et al. ^[34]	66.0–76.0 THz	0.905	14150 GHz/RIU	Yes
Sun B, et al. ^[30]	0.5–4.0 THz	0.962	1780 GHz/RIU	No
Ours	0.4–0.9 THz	0.805	327 GHz/RIU	Yes

5 结 论

设计了基于 PDMS 柔性基底的具有双层四重旋转变对称性的 J 型手性超表面, 通过仿真模拟, 研究了其圆偏振透射谱和 CD 谱的特性。结果显示, 该超表面在 0.760 THz 范围内能产生高达 0.805 的 CD 值。通过结合电场分布与 Born-Kuhn 理论模型, 同时辅以电场强度分析, 解释了产生 CD 现象的原因。由于柔性材料具有可拉伸的动态可调特性, 通过仿真模拟计算了不同拉伸程度下该超表面的透射谱和 CD 谱, 虽然 CD 值有所减小, 但仍能达到 0.650 以上。同时, 还模拟了在不同折射率的背景环境下, 该超表面的传感特性。结果表明: 在未拉伸的情况下, 手性超表面的灵敏度能达到 327 GHz/RIU; 将超表面拉伸至相对拉伸形变量为 20%, 灵敏度能保持在 295 GHz/RIU。该手性超表面在动态多功能器件、可穿戴传感器以及手性光学探测方面具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Cui Y H, Kang L, Lan S F, et al. Giant chiral optical response from a twisted-arc metamaterial[J]. Nano Letters, 2014, 14(2): 1021-1025.
- [2] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. Science, 2001, 292(5514): 77-79.
- [3] Pendry J B. A chiral route to negative refraction[J]. Science, 2004, 306(5700): 1353-1355.
- [4] Zhang S, Park Y S, Li J, et al. Negative refractive index in chiral metamaterials[J]. Physical Review Letters, 2009, 102(2): 023901.

- [5] Gansel J K, Thiel M, Rill M S, et al. Gold helix photonic metamaterial as broadband circular polarizer[J]. Science, 2009, 325(5947): 1513-1515.
- [6] Rogacheva A V, Fedotov V A, Schwanecke A S, et al. Giant gyrotropy due to electromagnetic-field coupling in a bilayered chiral structure[J]. Physical Review Letters, 2006, 97(17): 177401.
- [7] Feng J Y, Wu L P, Shi S Y, et al. Asymmetric transmission of circularly polarized waves in a bi-layered extrinsic chiral metamaterial[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2020, 34(10): 1410-1419.
- [8] Ma X L, Huang C, Pu M B, et al. Circular dichroism and optical rotation in twisted Y-shaped chiral metamaterial [J]. Applied Physics Express, 2013, 6(2): 022001.
- [9] Fan F, Zhong C Z, Zhang Z Y, et al. Terahertz chiral sensing and magneto-optical enhancement for ferromagnetic nanofluids in the chiral metasurface[J]. Nanoscale Advances, 2021, 3(16): 4790-4798.
- [10] Zhao Y, Askarpour A N, Sun L Y, et al. Chirality detection of enantiomers using twisted optical metamaterials [J]. Nature Communications, 2017, 8: 14180.
- [11] Zhang Z Y, Zhong C Z, Fan F, et al. Terahertz polarization and chirality sensing for amino acid solution based on chiral metasurface sensor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2021, 330: 129315.
- [12] Cheng Z Z, Cheng Y Z. A multi-functional polarization convertor based on chiral metamaterial for terahertz waves [J]. Optics Communications, 2019, 435: 178-182.
- [13] Wang Q, Plum E, Yang Q L, et al. Reflective chiral meta-holography: multiplexing holograms for circularly polarized waves[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 25.
- [14] 易南宁, 宗容, 龚江, 等. 基于镂空蝶形石墨烯的宽带可调太赫兹偏振转换器[J]. 激光与光电子学进展,

- 2021, 58(17): 1716001.
- Yi N N, Zong R, Gong J, et al. Broadband tunable terahertz polarization converter based on hollow butterfly-shape graphene[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1716001.
- [15] Huang X, Guo W, Liu S Y, et al. Flexible mechanical metamaterials enabled electronic skin for real-time detection of unstable grasping in robotic manipulation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(23): 2109109.
- [16] Deng Y, Guo X G, Lin Y S, et al. Dual-phase inspired soft electronic sensors with programmable and tunable mechanical properties[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(7): 6423-6434.
- [17] Zhang X Y, Chen K L, Lin Y S, et al. Flexible metamaterial nanograting for biosensing application[J]. *Optical Materials*, 2021, 122: 111679.
- [18] Moran I W, Briseno A L, Loser S, et al. Device fabrication by easy soft imprint nano-lithography[J]. *Chemistry of Materials*, 2008, 20(14): 4595-4601.
- [19] Menzel C, Rockstuhl C, Lederer F. Advanced Jones calculus for the classification of periodic metamaterials[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(5): 053811.
- [20] Wu W, Liu W B, Chun Z H, et al. Optical rotation and electromagnetically induced transparency in a chiral metamaterial with C_4 symmetry[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29496-29512.
- [21] Walia S, Shah C M, Gutruf P, et al. Flexible metasurfaces and metamaterials: a review of materials and fabrication processes at micro- and nano-scales[J]. *Applied Physics Reviews*, 2015, 2(1): 011303.
- [22] 王书宁, 王子兰, 曹曦. 基于柔性超材料的太赫兹超高灵敏度生物传感器设计[J]. *电子元件与材料*, 2021, 40(9): 882-887.
- Wang S N, Wang Z L, Cao T. Design of terahertz ultra-high sensitivity biosensor based on flexible metamaterial [J]. *Electronic Components and Materials*, 2021, 40(9): 882-887.
- [23] Qu Y, Zhang Y, Wang F, et al. A general mechanism for achieving circular dichroism in a chiral plasmonic system[J]. *Annalen Der Physik*, 2018, 530(11): 1800142.
- [24] Yin X H, Schäferling M, Metzger B, et al. Interpreting chiral nanophotonic spectra: the plasmonic born-Kuhn model[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(12): 6238-6243.
- [25] Qi J X, Zhang M D, Zhang Y G, et al. Multiband circular dichroism from bilayer rotational F4 nanostructure arrays[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(2): 479-484.
- [26] Xu R J, Luo J, Sha J, et al. Stretchable IR metamaterial with ultra-narrowband perfect absorption[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(10): 101907.
- [27] Zang J F, Zhao X H, Cao Y P, et al. Localized ridge wrinkling of stiff films on compliant substrates[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2012, 60(7): 1265-1279.
- [28] Yin S, Zeng D H, Zhang M K, et al. Phase mismatch induced suppression of eigenmode resonance in terahertz metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2022, 30(11): 19176-19184.
- [29] 张旭, 赵本磊, 吴波, 等. 基于 Fano 共振的全介质超表面传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(17): 1728001.
- Zhang X, Zhao B L, Wu B, et al. All-dielectric super-surface sensor based on Fano resonance[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(17): 1728001.
- [30] Sun B, Yu Y Y. Optical refractive index sensor based on the conjugated bilayer Γ -shaped chiral metamaterials[J]. *Optik*, 2019, 182: 587-593.
- [31] Zhou L, Wang Y K, Zhou J X, et al. Tunable circular dichroism of stretchable chiral metamaterial[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(4): 042008.
- [32] Guglielmelli A, Nicoletta G, Valente L, et al. Numerical modeling of 3D chiral metasurfaces for sensing applications[J]. *Crystals*, 2022, 12(12): 1804.
- [33] Peng R H, Liu J X, Xiao D, et al. Microfluid-enabled fine tuning of circular dichroism from chiral metasurfaces [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52(41): 415102.
- [34] Lin Y N, Chen K J, Yi X R, et al. Asymmetric interface excited chirality and its applications in reconfiguration[J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 33222-33228.