

文章编号: 2095-4980(2021)05-0800-04

## 全介质超表面中的手性太赫兹响应

李 杰, 郑程龙, 李继涛, 岳 震, 郝璇若, 张雅婷\*, 姚建铨

(天津大学 激光与光电子研究所, 天津 300072)

**摘 要:** 基于单层金属手性谐振器的超表面在垂直入射条件下很难激发较大的手性光学响应, 难以形成与电偶极矩不正交的面内磁偶极矩分量。光场在介质超原子中激发的位移电流可能引发面内磁矩, 进而实现高效的手性光学响应。基于无损的全硅超表面在太赫兹波段实现了巨大的手性响应。手性硅柱中的泄露波导模式同时激发了面内电偶和磁偶极矩, 从而引发了自旋选择的后向电磁辐射, 进而实现了太赫兹波的手性光学响应。利用线栅偏振片搭建了偏振相关的时域光谱测试系统, 测得透射光谱中的圆二色性峰值达 0.2。这种制备简单的全硅超表面为太赫兹手性超器件的设计提供了新的思路, 有望应用于太赫兹偏振成像、光谱检测等领域。

**关键词:** 太赫兹波; 手性; 全介质超表面; 圆偏振

**中图分类号:** TN914.42

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2021233

## Chiral optical response of all-dielectric metasurface in terahertz band

LI Jie, ZHENG Chenglong, LI Jitao, YUE Zhen, HAO Xuanruo, ZHANG Yating\*, YAO Jianquan  
(Institute of Laser and Optoelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** It is difficult to excite large chiral optical responses for metasurfaces based on single-layer metal resonators under normal incidence, because they are difficult to excite in-plane magnetic dipole moment that are not orthogonal to the electric dipole moment. The displacement current excited by optical field in the dielectric meta-atoms may induce an in-plane magnetic moment to achieve chiral optical responses. A huge chiral response is achieved in terahertz band based on the lossless all-silicon metasurface. The leaky waveguide mode in the chiral silicon pillar excites the in-plane magnetic dipole moment, which triggers the spin-selected backward electromagnetic radiation, and then realizes the chiral optical response of terahertz wave. A polarization-dependent TDS system is built by using wire grid polarizers, and the peak value of circular dichroism in the transmission spectrum reaches 0.2. This simple-prepared all-silicon metasurface provides a new idea for the design of terahertz chiral metadevices, and it is expected to be applied in the fields of terahertz imaging and spectral detection.

**Keywords:** terahertz wave; chirality; metasurface; circular polarization

物体的手性在自然界中广泛存在, 小到双螺旋结构的 DNA 分子、人的双手, 大到宇宙中的某些星系。圆偏振光的电场振荡轨迹在传播方向上呈现三维螺旋结构, 也具有手性。有趣的是, 光的手性与光学介质的手性具有相互作用, 即手性光学响应。这一现象可以简单地解释为手性光学介质对 2 种圆偏振光具有不同的折射率实部或者虚部, 它们分别对应着圆双折射效应及圆二色性。物质的圆二色性可用于手性异构体的区分, 在生物医药、化工等领域有着广泛应用<sup>[1-2]</sup>。然而, 自然材料的圆二色性主要由电子能级跃迁(电子学圆二色性(Electronic Circular Dichroism, ECD))或分子振动(振动圆二色性(Vibrational Circular Dichroism, VCD))引起, 非常微弱, 因此对测量精确度要求较高<sup>[3]</sup>。超表面是人工设计的二维亚波长超原子阵列, 在波前调控、局域场增强等方面具有独特优势<sup>[3-6]</sup>。手性或非手性超表面可能引发手性光场与手性物质的强相互作用, 因此被用于手性分子圆二色性增强<sup>[7-10]</sup>。

另一方面, 手性超表面本身对光场的操控极为重要<sup>[11]</sup>。与早期的三维螺旋结构超材料不同的是, 手性超表面更易于加工, 尤其是在近红外和可见光波段内。然而, 单层金属结构对垂直入射波难以实现明显的手性响应, 因

收稿日期: 2021-06-03; 修回日期: 2021-07-26

\*通信作者: 张雅婷 email:yating@tju.edu.cn

为它只能在金属面内形成传导电流,难以产生面内的磁偶极矩。为此,人们提出了若干种解决办法,例如采用 2 层甚至多层金属结构、具有反射金属板的反射式结构等<sup>[12-13]</sup>。与单层金属结构不同的是,无损电介质超表面可以在超原子内部形成位移电流,进而产生面内的磁偶极矩。哈佛大学 Federico Capasso 教授课题组利用介质纳米结构中的高阶偶极子在可见光波段实现了巨大的圆二色性<sup>[14]</sup>。近红外的手性介质超表面也被几个课题组提出<sup>[15-16]</sup>。在太赫兹波段,上述在低折射率衬底上加工高折射率超原子阵列的方案是困难的,因为需要上层微结构的厚度很厚。虽然也可以利用键合或粘连来实现类似的结构,但加工难度仍然较大且厚度不易控制。

本文提出一种基于全硅超表面实现太赫兹手性响应的新方案。仅仅利用无损的高阻硅进行单次深度刻蚀,在透射光谱中测量到了巨大的太赫兹圆二色性,这归功于硅柱中导模共振所形成的面内磁偶极矩。

## 1 超表面设计与仿真

全介质手性超表面方案如图 1 所示,以图中的功能为例,其面内镜像结构将具有相反的功能。当左旋圆偏振(Left-handed Circularly Polarized, LCP)太赫兹波入射时,大部分波将转化为右旋圆偏振(Right-handed Circularly Polarized, RCP)透射波,而当右旋圆偏振波入射时,将有相当一部分能量被反射掉且偏振旋向保持不变。为直观起见,图中没有画出 2 个入射分量未起作用的部分。

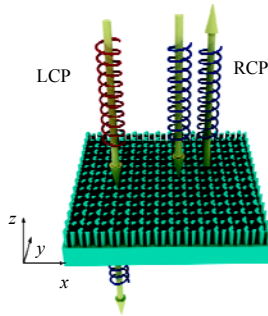
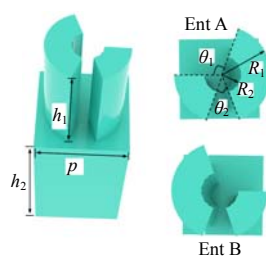
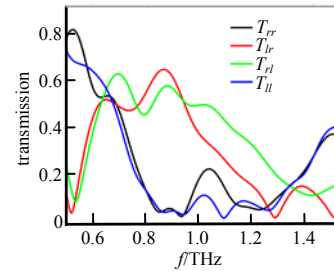


Fig.1 Schematic diagram of all-dielectric chiral metasurface

图 1 全介质手性太赫兹超表面示意图



(a) structure of the metasurface unit



(b) simulation results of the transmission spectrum

Fig.2 Metasurface unit and transmission

图 2 超表面单元结构尺寸及透射谱仿真结果

为实现上述功能,设计了如图 2(a)所示的手性介质单元。整个结构都由高阻硅构成,视为对太赫兹波没有吸收。本结构借鉴了传统的单层金属非对称开口环手性超表面结构,希望实现全介质的高效太赫兹手性超表面。由于太赫兹波段所需的硅单元尺寸较大,在低折射率衬底上制备硅层难度很大。因此设计了全硅结构,利用泄露波导模式实现手性响应。这种方式不仅能实现较高的圆二色性,且制备简单,可直接利用商用的硅片进行加工。单元周期  $p=190 \mu\text{m}$ , 外半径  $R_1=80 \mu\text{m}$ , 内半径  $R_2=30 \mu\text{m}$ , 2 个开口角度分别为  $20^\circ$  和  $70^\circ$ 。柱高  $h_1=200 \mu\text{m}$ , 衬底厚度  $h_2=300 \mu\text{m}$ ; 利用计算机模拟(Computer-Simulationstechnik, CST)微波工作室对该单元进行了时域仿真,其中  $x$  和  $y$  方向设置为周期边界条件,上下  $z$  方向均设置为开放边界。在计算区域底部添加一个平面波作为激励源,在单元上方  $100 \mu\text{m}$  处设置一个探针 probe 作为时域信号监测器。仿真过程中将硅的介电常数设置为 11.9, 分别入射  $x$  偏振和  $y$  偏振平面波,得到 4 个线偏振透射系数,根据式(1)将线偏振系数换算成 4 个圆偏振透射系数<sup>[17]</sup>:

$$\begin{pmatrix} T_{rr} & T_{rl} \\ T_{lr} & T_{ll} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} t_{xx} + t_{yy} + i(t_{xy} - t_{yx}) & t_{xx} - t_{yy} - i(t_{xy} + t_{yx}) \\ t_{xx} - t_{yy} + i(t_{xy} + t_{yx}) & t_{xx} + t_{yy} - i(t_{xy} - t_{yx}) \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中  $t_{i,j}(i,j=r,l)$  为圆偏振透射系数,  $j$  代表入射偏振,  $i$  代表检测偏振。利用上述方法仿真得到的结果如图 2(b)所示,可以发现 4 个曲线中的同偏振和交叉偏振分量都具有显著差异,显示出了手性响应。可以发现,超表面结构在谐振峰附近的交叉偏振系数较大,而同极化分量较小,这也符合手性超表面响应的一般特性。

## 2 实验验证与结果分析

根据图 2 中仿真得到的结构参数,加工了 2 种具有对称结构单元的超表面样品,扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)结果如图 3 所示,2 种镜像的结构分别称为手性对应体 A 和 B(Ent A 和 Ent B)。采用商用高阻硅(电阻率  $>2000 \Omega/\text{cm}$ ),结合紫外光刻和电感耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)蚀刻技术进行样品加工。使用标准光刻技术在直径为  $0.1016 \text{ m}$ 、厚度为  $500 \mu\text{m}$  硅片上形成  $6.8 \mu\text{m}$  厚的图案化正性光刻胶(AZ4620)

作为掩膜, 然后使用 ICP 蚀刻技术(STS MULTIPLEX ASE-HRM ICP ETCHER, 英国)对样品进行蚀刻, 最后将剩余的光刻胶洗掉, 得到最终样品。蚀刻深度约为 200  $\mu\text{m}$ , 剩余 300  $\mu\text{m}$  厚的硅层作为衬底。

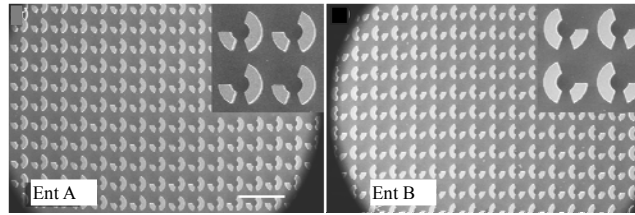


Fig.3 Scanning Electron Microscope(SEM) photos of the samples  
图 3 样品的 SEM 照片, 图中比例尺为 500  $\mu\text{m}$

利用太赫兹时域光谱系统对上述样品进行了测试, 由于系统本身只能发射和接收同偏振的太赫兹时域信号, 无法直接探测交叉偏振分量, 因此利用 4 个线栅偏振片搭建了偏振测量光路<sup>[18-19]</sup>。通过转动其中 2 个偏振片, 可以确定新的坐标参考系, 测量得到 4 个线偏振分量, 再进行数据处理得到圆偏振透射系数<sup>[17]</sup>和透射圆二色性曲线  $T_{\text{CD}}$ :

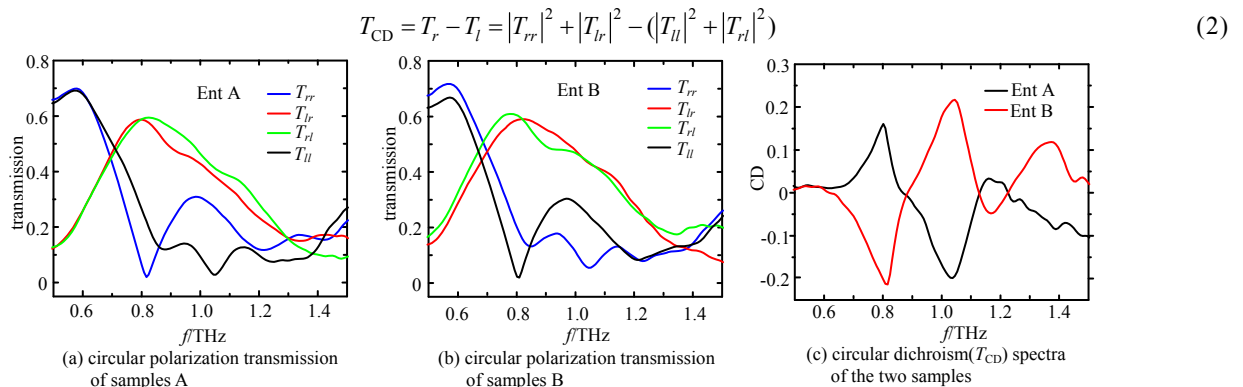


Fig.4 Measured results of the transmission spectra  
图 4 样品透射光谱测试结果

测得的 2 个样品的圆偏振透射系数如图 4(a)和 4(b)所示。可以看到, 2 种结构的左旋和右旋的 2 个分量对应相反, 这与理论上预测的一致。而透射系数的差异主要出现在 0.8 THz 和 1.0 THz 附近。图 4(b)中透射系数与图 2(b)中的测试仿真结果存在一些差异, 这可能是由于测试过程中需要多次转动偏振片和透射时域信号信噪比的降低所引起的。另一方面, 提出的超表面单元是通过形成泄露波导模式来产生圆偏振相关的后向散射, 且衬底较厚, 这将导致仿真和测试过程中时域信号的主峰和后面的回波信号界限不清晰。而所给出的是第一个主峰的信号, 因此在时间区间的选取上可能存在差别, 也可能引入频谱的差异。图 4(c)给出了 2 种结构的透射圆二色性谱, 也基本是互为相反值。其中 0.8 THz 附近略微的差异可能是测量过程中多次转动偏振片引入的。而高频部分(1.4 THz 及以上)则可能是由于测试系统在该频段内的低信噪比引起的。

### 3 结论

本文展示了一种利用无损介质超表面实现太赫兹手性响应的新方案。利用仿真软件得到了适当的结构参数, 并制备了 2 种具有镜像对称结构的超表面样品, 利用偏振相关的太赫兹时域光谱系统测量了圆偏振透射系数及  $T_{\text{CD}}$  光谱, 其中  $T_{\text{CD}}$  最大值达到 20%。这种基于无损介质的手性超表面制备简单, 有望应用于太赫兹通信、成像等领域。

#### 参考文献:

- [1] LU J, XUE Y, BERNARDINO K, et al. Enhanced optical asymmetry in supramolecular chiroplasmonic assemblies with long-range order[J]. Science, 2021, 371(6536):1368-1374.
- [2] CHEN L, ZHENG J, FENG J, et al. Reversible modulation of plasmonic chiral signals of achiral gold nanorods using chiral supramolecular template[J]. Chemical Communications, 2019(55):11378-11381.
- [3] CHOI W J, CHENG G, HUANG Z, et al. Terahertz circular dichroism spectroscopy of biomaterials enabled by kirigami polarization modulators[J]. Nature Materials, 2019, 18(8):820-826.

- [ 4 ] GENEVET Y P,KATS M A,AIETA F,et al. Light propagation with phase discontinuities:generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011,334(6054):333–337.
- [ 5 ] YU N,CAPASSO F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014,13(2):139–150.
- [ 6 ] WANG D,LIU F,LIU T,et al. Efficient generation of complex vectorial optical fields with metasurfaces[J]. *Light:Science & Applications*, 2021. doi:10.1038/s41377-021-00504-x.
- [ 7 ] ABDULRAHMAN N A,FAN Z,TONOOKA T,et al. Induced chirality through electromagnetic coupling between chiral molecular layers and plasmonic nanostructures[J]. *Nano Letters*, 2012,12(2):977–983.
- [ 8 ] GARCÍA-GUIRADO J,SVEDENDAHL M,PUIGDOLLERS J,et al. Enhanced chiral sensing with dielectric nanoresonators[J]. *Nano Letters*, 2020(20):585–591.
- [ 9 ] SOLOMON M L,HU J,LAWRENCE M,et al. Enantiospecific optical enhancement of chiral sensing and separation with dielectric metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2019,6(1):43–49.
- [10] 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.
- [11] JING L,WANG Z,MATURI R,et al. Gradient chiral metamirrors for spin-selective anomalous reflection[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017. doi:10.1002/lpor.201700115.
- [12] WANG Q,PLUM E,YANG Q,et al. Reflective chiral meta-holography: multiplexing holograms for circularly polarized waves[J]. *Light:Science & Applications*, 2018. doi:10.1038/s41377-018-0019-8.
- [13] LI J,ZHANG Y,LI J,et al. Amplitude modulation of anomalously reflected terahertz beams using all-optical active pancharatnam–berry coding metasurfaces[J]. *Nanoscale*, 2019,11(12):5746–5753.
- [14] ZHU A Y,CHEN W T,ZAIDI A,et al. Giant intrinsic chiro-optical activity in planar dielectric nanostructures[J]. *Light: Science & Applications*, 2018,7(2):17158. doi:10.1038/lsa.2017.158.
- [15] SEMNANI B,FLANNERY J,MARUF R Al,et al. Spin-preserving chiral photonic crystal mirror[J]. *Light:Science & Applications*, 2020. doi:10.1038/s41377-020-0256-5.
- [16] MA Z,LI Y,LI Y,et al. All-dielectric planar chiral metasurface with gradient geometric phase[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5):6067–6078.
- [17] MENZEL C,ROCKSTUHL C,LEDERER F. Advanced Jones calculus for the classification of periodic metamaterials[J]. *Physical Review A*, 2010. doi:10.1103/PhysRevA.82.053811.
- [18] LI S,WEI M,FENG X,et al. Polarization-insensitive tunable terahertz polarization rotator[J]. *Optics Express*, 2019,27(12): 16966–16974.
- [19] 尹波,马越,张晓玲,等. 宽入射角高效宽带超表面太赫兹线极化转换器[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2021,19(3): 361–365. (YIN Bo,MA Yue,ZHANG Xiaoling,et al. Terahertz high-efficiency broadband metasurface polarization converter with wide incident angle[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2021,19(3):361–365.)

#### 作者简介：

李 杰(1992–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹超构表面. email:li\_jie\_d@tju.edu.cn.

李继涛(1992–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹超构表面.

郝璇若(1995–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹技术.

郑程龙(1995–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹超构表面.

岳 震(1993–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹超构表面.

张雅婷(1983–), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为微纳光电子器件.

姚建铨(1939–), 男, 教授, 中科院院士, 主要研究方向为激光与非线性光学、太赫兹科学与技术.