

基于剪纸方法的一种可重构线极化转换空间序构超表面

王明照 王少杰 许河秀

Reconfigurable linear polarization conversion based on spatial-order kirigami metasurfaces

Wang Ming-Zhao Wang Shao-Jie Xu He-Xiu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 154101 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210188

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210188>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金属开口环谐振器超构分子中二次谐波偏振态的调控

Polarization state of second harmonic generation in split ring resonator based meta-molecule

物理学报. 2019, 68(21): 214205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190837>

基于方形开口环的超宽带线性极化转换器

Ultra-wideband linear polarization converter based on square split ring

物理学报. 2019, 68(11): 117801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190267>

一种宽带可重构反射型极化旋转表面

Broadband reconfigurable reflective polarization convertor

物理学报. 2018, 67(22): 224101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181041>

基于谐振环的太赫兹宽带偏振转换器件研究

A broadband polarization converter based on resonant ring in terahertz region

物理学报. 2017, 66(18): 180701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.180701>

基于单层线-圆极化转换聚焦超表面的宽带高增益圆极化天线设计

Broadband circularly polarized high-gain antenna design based on linear-to-circular polarization conversion focusing metasurface

物理学报. 2017, 66(6): 064102 <https://doi.org/10.7498/aps.66.064102>

一种复合型极化转换表面及其在天线辐射散射调控中的应用

Composite polarization conversion metasurface and its application in integrated regulation radiation and scattering of antenna

物理学报. 2020, 69(23): 234102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200797>

基于剪纸方法的一种可重构线极化 转换空间序构超表面^{*}

王明照[#] 王少杰[#] 许河秀[†]

(空军工程大学防空反导学院, 西安 710051)

(2021 年 1 月 26 日收到; 2021 年 2 月 17 日收到修改稿)

随着智能技术的发展, 具有可调的电磁波极化转换器件对于实际应用来说至关重要. 目前大多数基于 PIN 二极管、变容二极管来实现电可调, 这些方法操作简单、实时性强, 但仍存在平面序构调控自由度少、电路复杂、成本较高等问题. 鉴于此, 本文提出了一种基于剪纸结构的可重构极化转换超表面, 通过调节折叠角度 β 改变磁偶极子之间的相互作用从而调谐极化转换工作频率, 这种机械调控方法带来了更多调控自由度, 且成本低廉、便于调控. 为验证本文剪纸方法的可行性, 基于非对称手性开口环谐振器设计了一款具有可重构空间序构的双频线极化转换超表面. 实验结果表明, 当 $\beta = 10^\circ$, 线极化转换器工作于 5 和 5.8 GHz, 当 β 变化到 45° 时线极化转换器工作频段调谐到 5.8 和 7.2 GHz, 平均频率调控范围达 18.5%. 此外, 本文还分析了所提剪纸结构的泊松比和相对密度随 β 的变化规律, 泊松比随着 β 增大而增大, 且剪纸超表面的相对密度最小仅为未折叠情形下平面序构的 1.5%. 本文空间序构剪纸超表面为可重构线极化转换、多功能器件提供了新思路和新方法.

关键词: 可重构剪纸超表面, 极化转换, 开口环谐振器, 空间序构

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.70.20210188

1 引言

电磁超材料^[1,2]是一种人工复合材料, 因其具有自然物质无法实现的奇异电磁特性而备受关注. 超表面通常是指二维结构的电磁超材料, 它能够灵活的操纵电磁波^[3-7], 实现各种功能, 如涡旋波束超表面^[8]、聚焦超表面^[9]、极化转换超表面^[10-21]等. 极化转换又分为透射型^[10]和反射型^[12], 极化是电磁波的重要特征之一, 可应用于通信和雷达系统中^[22], 具有重要研究意义.

近年来随着智能技术的发展, 根据环境变化感

知重新配置结构单元从而改变电磁特性的需求越来越大, 目前大多数可调方法基于变容二极管^[23,24]、PIN 二极管^[25,26]、光电二极管^[27]等来实现电可调, 这些方法操作简单、实用性强, 但是仍存在平面序构调控自由度少、电路复杂、成本较高等问题. 2019 年 Tian 等^[26]通过 PIN 二极管作为开关, 可实现线-线极化、线-圆极化的实时快速转换, 但调控范围相对较小. 剪纸/折纸超材料^[28-32]的出现, 提供了更多的调控自由度, 不仅适用于力学方面^[28], 近几年在电磁领域^[29-32]也得到应用, 这种通过重构结构形状从而得到不同功能的空间序构超表面很好地解决了上述问题. 2019 年 Li 等^[31]

^{*} 中国科协军事青托计划 (批准号: 17-JCJQ-QT-003)、国防科技项目基金 (批准号: 2019-JCJQ-JJ-081) 和陕西省自然科学基金重点项目 (批准号: 2020JZ-33) 资助的课题.

[#] 同等贡献作者.

[†] 通信作者. E-mail: hxxuellen@gmail.com

提出的折纸超材料, 在外部机械力的作用下改变折叠角度, 可实现三种功能: 吸波器、镜面反射器、负反射器. 2020 年 Le 等^[32] 提出的剪纸超材料, 在外部力的作用下可重构出不同的状态, 从而实现带通滤波器、吸波器、反射器三种功能. 2017 年 Wang 等^[30] 提出的折纸超材料可实现圆极化转换, 但目前基于剪纸/折纸超材料实现多频线极化转换的文献仍鲜有报道.

本文设计了一种基于剪纸结构的可重构空间序构的多频线极化转换超表面, 通过调节折叠角度 β , 改变磁偶极子之间的相互作用从而调谐极化转换工作频率, 如图 1 所示. 设计的非对称手性开口环谐振器 (split ring resonator, SRRs) 可实现双频线极化转换, 实验结果表明当 $\beta = 10^\circ$, 线极化转换器工作于 5 和 5.8 GHz, 当 β 变化到 45° 时线极化转换工作频段调谐到 5.8 和 7.2 GHz, 平均频率调控范围达 18.5%. 此外还分析了所设计剪纸超表面的泊松比和相对密度随着 β 的变化规律, 泊松比与 β 成正比关系, 相对密度与 β 成反比关系且最小仅为未折叠情形下平面序构的 1.5%.

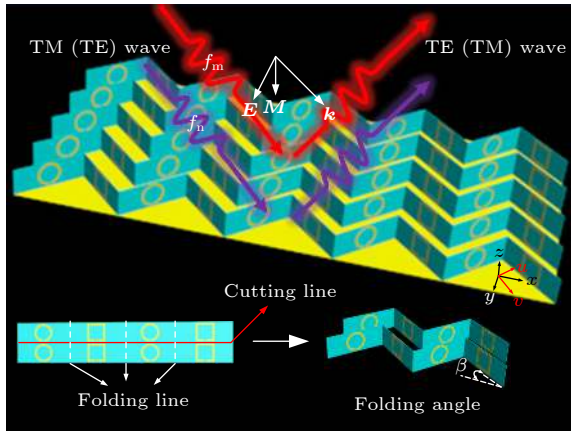


图 1 本文基于可重构空间序构剪纸超表面的双频线极化转换功能示意图 (k 代表波矢量方向, f_m, f_n 代表线极化转换的工作频率. 二维超表面按照剪裁线裁成条带结构, 条带结构再按照折叠线折叠可形成本文空间序构超表面, 然后通过改变折叠角度 β 可调谐 f_m)

Fig. 1. Schematic diagram of the dual-band linear polarization conversion based on reconfigurable spatial-order kirigami metasurfaces. Here, k represents the wave vector, and f_m, f_n represent the operation frequency of cross-polarization conversion. The spatial-order metasurface is constructed by cutting a two-dimensional metasurface into a sets of strips according to the cutting line, and then by folding these strips according to the folding line to form an assembled structure. The f_m of resulting metasurface can be adjusted by changing the folding angle β .

2 原理分析、设计与数值仿真

极化是电磁波的电场矢量按照某一规律振动的现象. 这里基于电磁场理论, 来分析电磁波入射到空间序构超表面结构后产生线极化转换及调控谐振频率的基本原理, 并为最终设计提供依据和指导. 如图 2 所示, 当超表面底部是金属板时, 电磁波垂直入射到超表面结构后, 透射系数为零, 当材料损耗较小时入射电磁波能高效率完美反射. 如图 2(a) 所示, 假设 y (TM) 极化电磁波向 z 轴负方向传播, 其中电场 (E) 沿 y 轴极化, 磁场 (H) 沿 x 轴方向. 设 x - y 轴绕着 z 轴逆时针方向旋转 45° 得到 u - v 轴. y 极化电磁波入射到超表面结构后, 其电场矢量可分解为沿 u 和 v 轴的两个分量, 这里设 $z = 0$, 所以电场可表示为

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{e}_u E_{iu} + \mathbf{e}_v E_{iv}, \quad (1)$$

其中, \mathbf{e}_u 和 \mathbf{e}_v 表示的是沿着 u 和 v 轴的单位矢量; E_{iu} 和 E_{iv} 代表的是沿着 u 和 v 轴的入射电场幅度. 电磁波入射到超表面结构反射后其电场矢量仍然可分解为沿着 u 和 v 轴的两个分量, 其表达式可写为

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{e}_u E_{ru} \cos(\omega t + \varphi_u) + \mathbf{e}_v E_{rv} \cos(\omega t + \varphi_v), \quad (2)$$

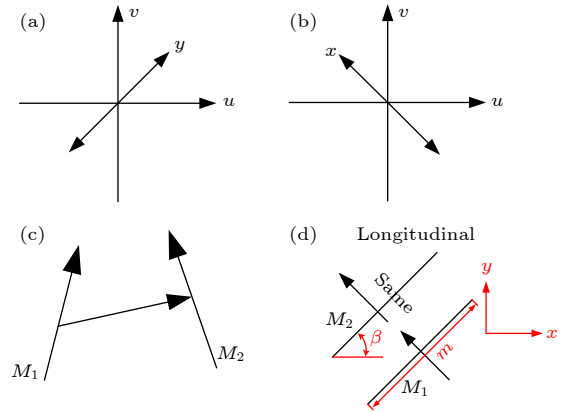


图 2 本文可重构空间序构剪纸超表面的线极化转换与频率调控原理示意图. u - v 坐标系下的 (a) y 极化入射电磁波与 (b) x 极化反射电磁波; (c) 任意两个空间放置磁偶极子的相互作用; (d) 两个磁偶极子同向纵向耦合

Fig. 2. Schematic principle for linear polarization conversion and operation frequency control of reconfigurable spatial-order kirigami metasurfaces. The (a) incident y -polarized and (b) reflected x -polarized electromagnetic (EM) waves under u - v coordinate. (c) The interaction between two magnetic dipoles placed in free space. (d) The longitudinally coupled magnetic dipoles in identical direction respectively.

其中: E_{ru} 和 E_{rv} 代表的是沿着 u 和 v 轴的反射电场幅度, 且满足 $\begin{bmatrix} E_{ru} \\ E_{rv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{yx} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{iu} \\ E_{iv} \end{bmatrix}$, 下标 x 和 y 表示电磁波极化方向, i 和 r 表示入射电磁波和反射电磁波, $r_{yy}(r_{xx})$ 表示 $y(x)$ 极化波入射 $y(x)$ 极化波的反射系数, $r_{yx}(r_{xy})$ 表示 $x(y)$ 极化波入射 $y(x)$ 极化波分量的反射系数; φ_u 和 φ_v 表示沿 u 和 v 轴方向的电场分量的相位; t 表示电磁波在超表面结构上的作用时间. 假设 φ_u 和 φ_v 的相位差为 $\Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_v$, 当 $\Delta\varphi = \pi$ 时, 也就是 E_{ru} 和 E_{rv} 反相, \mathbf{E}_r 可表示为 $\mathbf{E}_r = -\mathbf{e}_u E_{ru} \cos(\omega t + \varphi_u) + \mathbf{e}_v E_{rv} \cos(\omega t + \varphi_v)$, 当 $E_{ru}/E_{rv} = E_{iu}/E_{iv}$ 时合成的电磁波极化方向发生了 90° 旋转, 即反射后为 $x(\text{TE})$ 极化波, 产生了交叉极化转换, 如图 2(b) 所示. 这里定义 $y(x)$ 极化入射电磁波线极化转化效率为 $\text{PCR} = r_{yx}^2 / (r_{yx}^2 + r_{xx}^2)$ ($\text{PCR} = r_{xy}^2 / (r_{xy}^2 + r_{yy}^2)$).

如图 2(c) 所示两个空间放置的磁偶极子会相互作用, 当两个磁偶极子为单纯的纵向耦合时它们之间的相互作用能为 $V = \frac{M_1 \cdot M_2}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{M_1 \cdot M_2}{4\pi\epsilon_0 m^3 \sin^3 \beta}$ (r 对应后边提到的 l_y , 为两个磁偶极子之间的距离; M_1 和 M_2 为两个磁偶极矩的幅值; m 为介质板的长度; β 为折叠角度). 如图 2(d) 所示当 β 减小, 两个同向纵向放置的磁偶极子之间距离会减少, 两个磁偶极子会相互吸引使得系统变得更加稳定, 从而谐振频率向低频移动.

如图 3 所示, 基于上述理论我们对单元进行了精心设计, 并采用 CST Microwave Studio 2018 软件对其建模和数值仿真. 在频域计算单元反射幅度时, x 和 y 方向的边界条件设置为周期边界, 由于所设计单元工作于反射体系, Z_{\min} 方向边界条件设置为电边界, Z_{\max} 方向边界条件设为开放边界, 所有仿真均采用线极化平面波进行激励. 为进行全面分析, 选取了三种情形下的单元进行对比研究, 如图 3(a) 所示, 空间序构超表面单元仅在左侧斜面排列 SRRs, 其在 6.9 GHz 处反射波电场矢量的两个分量幅度基本一致且相位差 $\Delta\varphi$ 近似为 180° , 根据上述理论分析可知超表面单元能实现线极化转换, 且极化转换效率可达 99% 以上. 如图 3(b) 所示, 在单元右侧设计了开口方环谐振器, 在 5.5 GHz 反射波电场矢量的两个分量幅度基本一致且相位差 $\Delta\varphi$ 近似为 180° , 同理该频率处可实现线极化转换, 且转换效率可达 99% 以上. 如图 3(c) 所示, 在空间序构超表面单元的左、右侧面上分别设计两种

不同 SRRs, 单元在两个频段处的反射波电场矢量幅度基本一致且相位差 $\Delta\varphi$ 均近似为 180° , 因此可实现双频线极化转换, 转换效率依然在 99% 以上. 为调控工作频带 f_m , 分析了 y 极化波入射下图 3(c) 的电流分布, 如图 3(d) 所示, 超表面单元左侧 (右侧) 开口圆环 (方环) 谐振器形成闭环电流, 为磁谐振, 可等效为磁偶极子, 与相邻磁偶极子相互作用构成同向纵向耦合, 由于两开口环谐振器放置具有一定的角度, 沿着 u 和 v 轴的磁场分量相反, 一个穿进圆环谐振器一个穿出方环谐振器, 因此两开口环电流方向相反. 根据上述提到的磁偶极子耦合理论, 当增加折叠角度 β , 磁偶极子之间的距离会减小, 从而可降低线极化转换的工作频带 f_m , 反之则会使 f_m 升高, 达到了调谐器件极化转换工作频段的效果. 图 3(e) 所示为最终设计空间序构超表面单元的结构参数.

下面分析了两个 SRRs 与工作频段之间的关系, 如图 4 所示. 图 4(a) 和图 4(b) 表示的是左侧开口圆环谐振器宽度的影响, 可以看出改变开口圆环谐振器宽度 b_1 时, 仅会改变高频工作频带, 低频工作频带基本不受影响. 为进一步验证两个工作模式之间的关系, 下面分析了开口方环谐振器宽度 b_2 的影响, 如图 4(c) 和图 4(d) 所示. 改变开口方环谐振器的宽度, 低频工作频带会偏移, 高频工作频带几乎不受影响. 再一次验证了开口圆环谐振器工作在高频, 开口方环谐振器工作在低频, 两个模式可独立调控. 通过调节 SRRs 宽度改变工作频带是由于谐振的原因, 减小 SRRs 宽度, 增大了结构的等效电感, 根据公式 $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 可知谐振频率向低频移动. 当减小圆环的宽度 b_1 , 增大方环的宽度 b_2 , 高频工作频带会向低频移动, 低频工作频带会向高频移动, 两个工作频带不断靠近可调整到一个状态, 即提高极化转换的工作带宽.

为验证上述所设计空间序构超表面的性能, 图 5 给出了最终设计空间序构超表面单元在不同折叠角度 β 下 y 极化和 x 极化电磁波入射下的线极化转换工作频谱. 由于当 β 为 0° 和 90° 时, 沿着 y 轴的周期 $l_y = m \sin \beta$ 或者沿着 x 轴的周期 $l_x = 2m \cos \beta$ 为 0, 在实际中没有物理意义, 因此下面选取 $0^\circ < \beta < 90^\circ$. 如图 5(a) 和图 5(c) 所示, 当 β 为 10° 时, 线极化转换工作于 4.7 和 5.7 GHz; 当 β 为 45° 时, 线极化转换工作频带被调谐到 5.5 和 6.9 GHz, 平均频率调控范围达 17.5%. 调控机理是因为 β 减

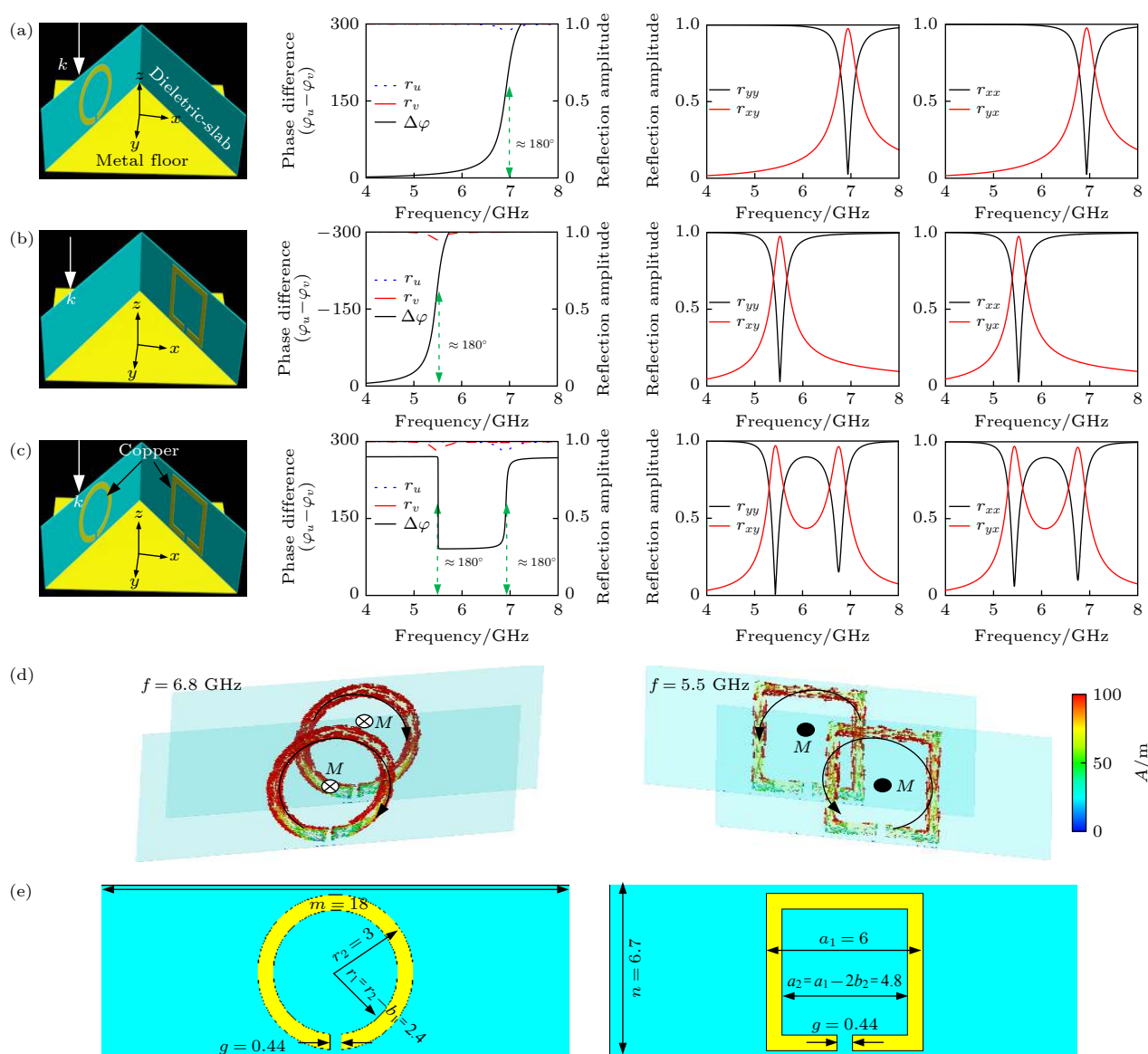


图 3 三种不同情形下空间序构超表面单元的结构与数值仿真电磁特性 (其中 φ_u (φ_v) 和 r_u (r_v) 分别表示沿 u (v) 轴方向电场分量反射相位和反射幅度, r_{yy} (r_{xx}) 表示 y (x) 极化波入射时同极化反射电磁波的幅度, r_{xy} (r_{yx}) 表示 y (x) 极化波入射时交叉极化反射电磁波的幅度) (a) 单元只有开口圆环谐振器; (b) 单元只有开口方环谐振器; (c) 单元同时包含开口圆环和开口方环谐振器; (d) 谐振频率 $f = 6.8$ 和 5.5 GHz 处超表面单元 SRRs 上的表面电流分布; (e) 最终空间序构超表面单元的结构, 结构参数依次为 $m = 18$ mm, $n = 6.7$ mm, $d = 0.1$ mm, $r_2 = 3$ mm, $r_1 = r_2 - b_1 = 2.4$ mm, $a_1 = 6$ mm, $a_2 = a_1 - 2b_2 = 4.8$ mm 和 $g = 0.44$ mm, 黄色部分为金属铜, 蓝色部分为介质板, 介质板采用聚酰亚胺板, 介电常数为 3.0, 电正切损耗为 0.001

Fig. 3. Layout and numerical characterizations of the spatial-order meta-atoms in three different situations of (a) only circular SRRs along left slope, (b) square SRRs along right slope, and (c) both circular and square SRRs along both slopes. Here, φ_u (φ_v) and r_u (r_v) represent the reflection phase and amplitude for components along u (v) axis, r_{yy} (r_{xx}) represent the reflection amplitude of the incident y (x)-polarized and reflected y (x)-polarized EM waves, r_{xy} (r_{yx}) represent the reflection amplitude of the incident y (x)-polarized and reflected x (y)-polarized EM waves. (d) The Surface current distribution on SRRs at resonant frequencies of $f = 6.8$ and 5.5 GHz. (e) Layout and geometrical parameters of the finally designed spatial-order meta-atom. They are $m = 18$ mm, $n = 6.7$ mm, $d = 0.1$ mm, $r_2 = 3$ mm, $r_1 = r_2 - b_1 = 2.4$ mm, $a_1 = 6$ mm, $a_2 = a_1 - 2b_2 = 4.8$ mm and $g = 0.44$ mm. The yellow color indicates metallic copper while blue represents dielectric slab, which is a FR4 board with dielectric constant of 3.0 and tangent loss of 0.001.

小, 沿着 y 方向的周期 $l_y = m \sin \beta$ 减小, 根据磁偶极子耦合理论可知相邻两个面上磁偶极子之间的吸引力会增大, 所以谐振频率会向低频移动, 即极

化转换的工作频带会向低频移动. 当 β 为 45° 时 l_y 和 l_x 达极大值, 入射电磁波在 u 和 v 方向上的分量相同, 根据第 2 节理论分析可知极化转换效率

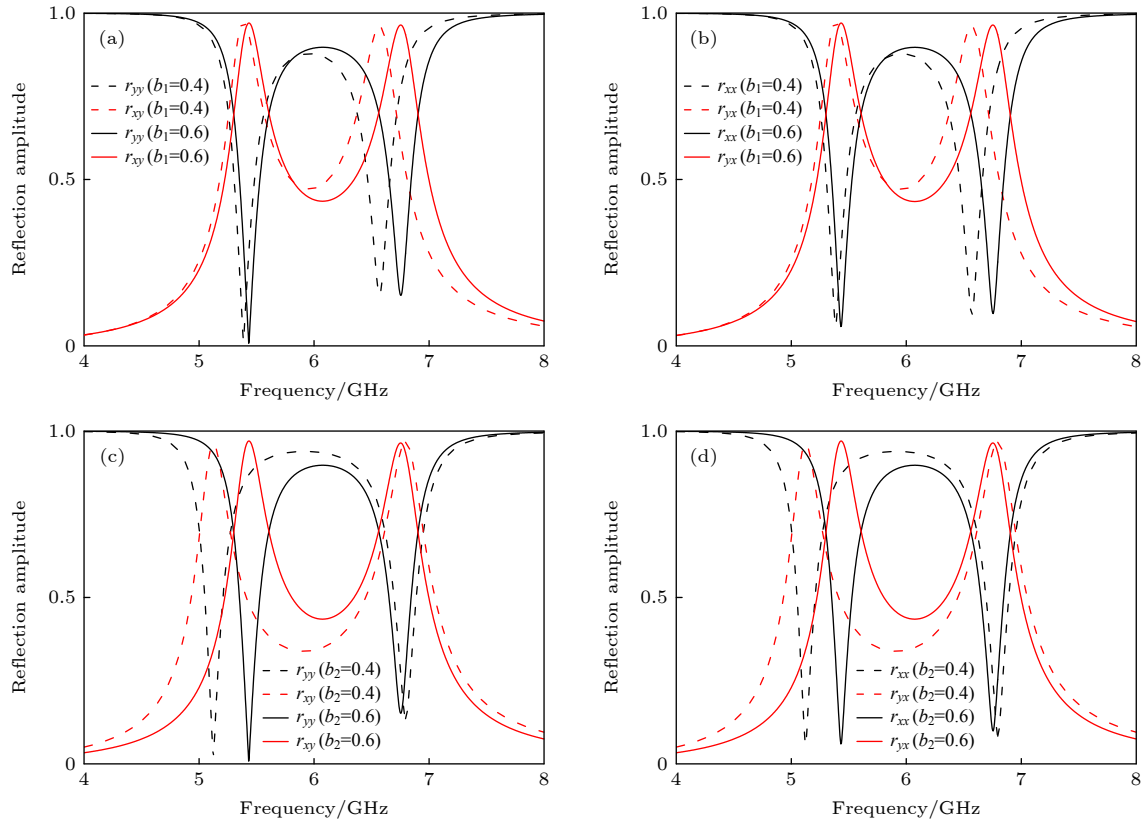


图4 最终设计的空间序构超表面单元在不同宽度开口圆环和方环谐振器的电磁波反射幅度仿真结果 (a) y 极化和(b) x 极化平面电磁波入射时的反射幅度随开口圆环宽度 b_1 变化的关系; (c) y 极化和(d) x 极化平面电磁波入射时的反射幅度随开口方环宽度 b_2 变化的关系

Fig. 4. Finite-difference time-domain (FDTD) calculated reflection amplitude of the finally designed spatial-order meta-atom based on circular SRRs and square SRRs for different widths. Reflection amplitude as a function of (a), (b) b_1 and (c), (d) b_2 under (a), (c) y -polarized and (b), (d) x -polarized plane wave of normal incidence.

达到最大. 如图 5(b) 和图 5(d) 所示, β 在其他角度时交叉极化转换效率减小, 当 $\beta = 5^\circ$ 时可作为同极化镜面反射器, 且 β 增大时, 极化产生切换且极化转换工作频带会向高频移动, 与理论分析一致.

3 样品制作与实验

如图 6 所示, 为进一步验证所设计空间序构剪纸超表面的极化转换频率调谐能力, 加工了实验样品并进行了实验验证. 如图 6(a) 所示, 样品的制作过程主要有四步: 第一步将加工好的平面序构超表面沿照剪裁线裁成条带结构; 第二步将条带结构按照折叠线折叠; 第三步在金属板上粘贴带有折痕的纸张, 用来保证折叠角度的准确性; 第四步将条带结构通过强力胶粘贴到纸张上, 样品制作完成. 不同折叠角度的样品只需要打印好不同角度的结构即可制作. 为减少环境的影响, 所有实验结果都是

在空旷地带下进行的. 如图 6(b) 所示, 两个线极化喇叭一个作为发射线极化电磁波, 另一个作为接收线极化电磁波. 两个线极化喇叭均是双脊喇叭天线, 其在 2—18 GHz 以内产生的驻波比小于 2.0, 将两个喇叭天线连接在 AV3672B 矢量网络分析仪上用来发射和接收电磁波信号, 然后进行数据处理. 如图 6(c) 和图 6(d) 所示是 y 极化和 x 极化入射电磁波的反射幅度, 实验结果表明当折叠角度 $\beta = 10^\circ$ 时, 线极化转换工作于 5 和 5.8 GHz, 当 $\beta = 45^\circ$ 时, 线极化转换工作于 5.8 和 7.2 GHz, 平均频率调控范围达 18.5%. 实验结果与仿真结果基本吻合, 验证了所设计空间序构超表面具有调控极化转换工作频带的能力. 在未来应用中, 在超材料底部可通过用铰链结构固定折叠角度 β , 每个铰链都通过程序进行控制, 根据环境所需通过程序进行计算做到智能控制铰链的张开角度, 从而改变 β 实现智能调控.

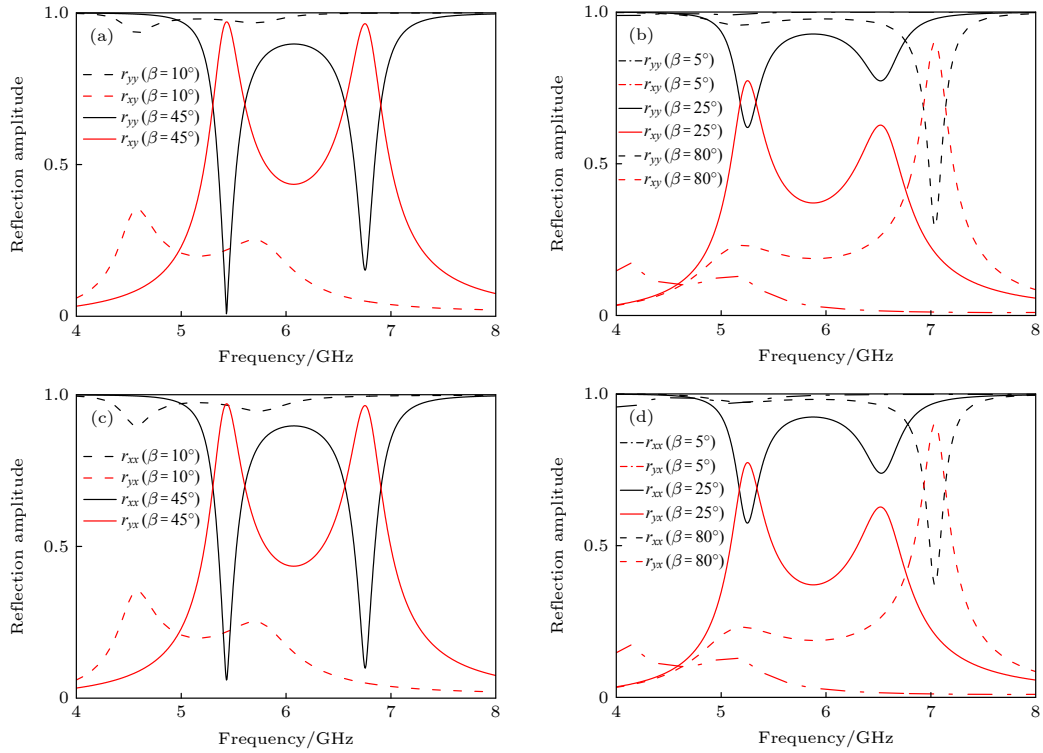


图 5 最终设计空间序构超表面的电磁波反射幅度在不同折叠角度 β 下的仿真结果 (a), (b) y 极化与 (c), (d) x 极化平面电磁波入射时的反射幅度

Fig. 5. FDTD calculated reflection amplitude of EM waves of the finally designed spatial-order metasurfaces at different folding angles β : the reflection amplitude of the incident (a), (b) y -polarized and (c), (d) x -polarized EM waves.

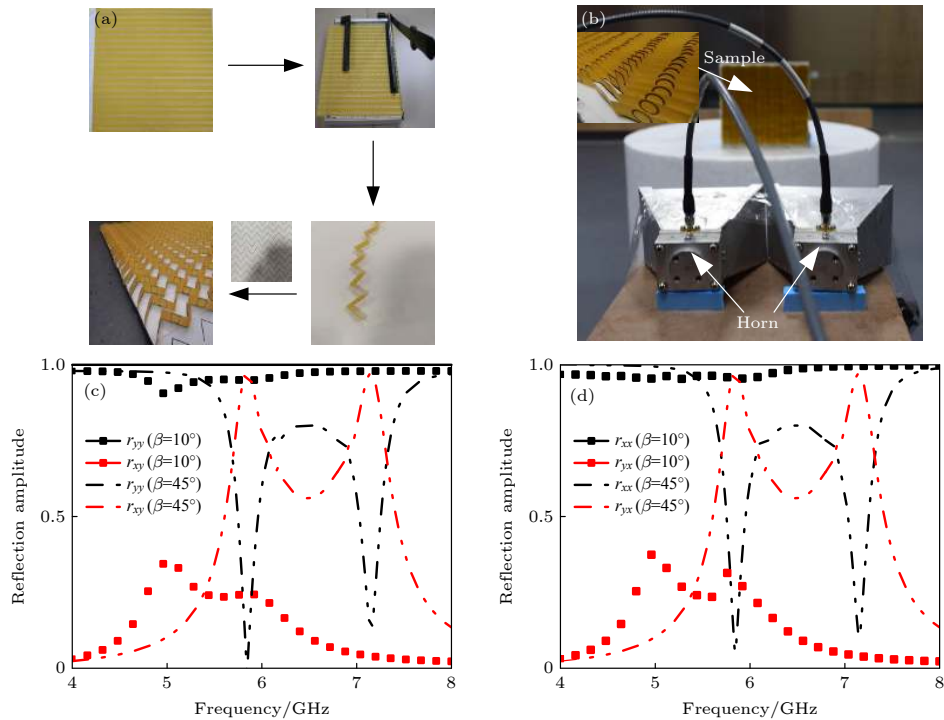


图 6 实验表征及不同极化入射下的测试同极化和交叉极化系数幅度频谱 (a) 样品制作过程; (b) 实验测试环境; (c) y 极化波入射与 (d) x 极化波入射时电磁波在不同折叠角度下的反射幅度

Fig. 6. Experimental characterization and measured co-polarization and cross-polarization reflection amplitude spectrum under different polarizations: (a) The fabrication process of sample; (b) experimental setup; reflection amplitude at different folding angle β under (c) y -polarized and (d) x -polarized EM waves.

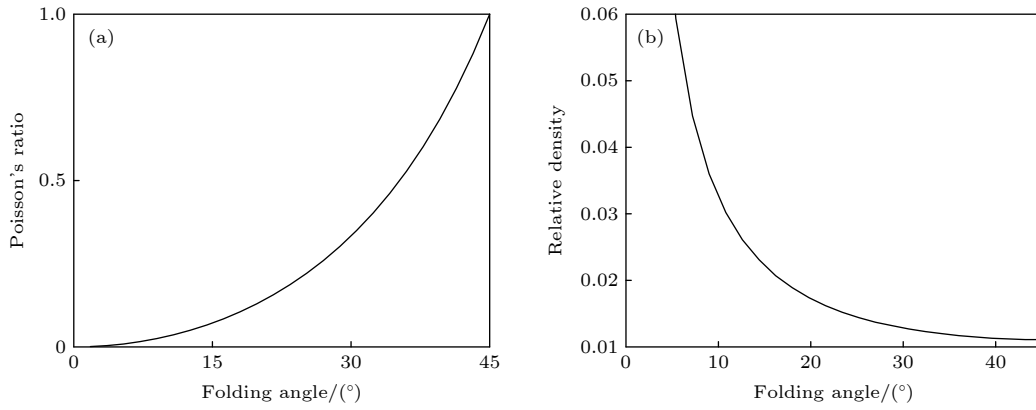


图 7 最终设计的空间序构超表面在不同折叠角度下的 (a) 泊松比和 (b) 相对密度

Fig. 7. (a) Poisson's ratio and (b) relative density of the finally designed spatial-order metasurfaces as a function of different folding angles.

下面分析了所提剪纸超表面的泊松比和相对密度, 如图 7 所示. 泊松比指的是拉伸力方向上横向收缩应变与纵向拉伸应变绝对值的比值, 即 $v = -(dw/w)/(dl/l)$. 本文所设计空间序构剪纸超表面单元周期宽度 $w = m \cos \beta$, 长度 $l = m \sin \beta$, 可得出泊松比为 $v = -(dw/w)/(dl/l) = \tan^2 \beta$. 泊松比与折叠角度 β 之间的关系如图 7(a) 所示, 可看到当 β 增大时, 泊松比也随之增大 (泊松比大小反映横向变形的程度). 相对密度指的是超表面体积与所占投影空间体积的比值, 即 $\rho = d \cdot (m \cdot n) / (H \cdot L \cdot W)$. 本文所设计空间序构剪纸超表面单元的高度 $H = n$, 长度为 $L = m \cos \beta$, 宽度为 $W = m \sin \beta$, 可得到相对密度 $\rho = \frac{d \cdot (m \cdot n)}{H \cdot L \cdot W} = \frac{0.1}{18 \sin \beta \cos \beta}$. 如图 7(b) 所示, 相对密度 ρ 与 β 成反比关系, 当 β 增大到 45° 时, 其相对密度最小且为未折叠情形下平面序构的 1.5%.

4 总 结

本文基于剪纸方法设计了一种非对称手性 SRRs, 可实现双频线极化转换, 通过调节折叠角度 β , 可调谐线极化转换的工作频带 f_m . 为验证本文方法的可行性, 加工了样品进行实验, 测试结果表明平均频率调控范围达 18.5% 以上, 且所设计剪纸空间序构超表面的最小相对密度仅为未折叠情形下平面序构的 1.5%, 相同体积下极大减小了样品的重量. 相对基于 PIN 二极管、变容二极管的平面序构电可调技术, 本文剪纸空间序构超表面具有更多的调控自由度, 且成本低、轻便, 为可重构线极化转换、多功能器件提供了新思路和新方法.

参考文献

- [1] Mei Z L, Zhang L, Cui T J 2016 *Science & Technology Review* **34** 27 (in Chinese) [梅中磊, 张黎, 崔铁军 2016 科技导报 **34** 27]
- [2] Wang Y Z, Xu H X, Wang C H, Wang M Z, Wang S J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 134101 (in Chinese) [王彦朝, 许河秀, 王朝辉, 王明照, 王少杰 2020 物理学报 **69** 134101]
- [3] Xu H X, Sun S, Tang S, Ma S, He Q, Wang G M, Cai T, Li H P, Zhou L 2016 *Sci. Rep.* **6** 27503
- [4] Xu H X, Ma S, Luo W, Cai T, Sun S, He Q, Zhou L 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 193506
- [5] Xu H X, Tang S, Ma S, Luo W, Cai T, Sun S, He Q, Zhou L 2016 *Sci. Rep.* **6** 38255
- [6] Zheng G, Mühlenbernd H, Kenney M, Li G, Zentgraf T, Zhang S 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 308
- [7] Wang C, Xu H X, Wang Y, Zhu S, Wang C, Mao R 2020 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53** 365001
- [8] Li X N, Zhou L, Zhao G Z 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 238101 (in Chinese) [李晓楠, 周璐, 赵国忠 2019 物理学报 **68** 238101]
- [9] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Wu X, Xu Z, Zhang A X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 124102 (in Chinese) [李勇峰, 张介秋, 屈绍波, 王甲富, 吴翔, 徐卓, 张安学 2015 物理学报 **64** 124102]
- [10] Guo W L, Wang G M, Li H P, Hou H S 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 074101 (in Chinese) [郭文龙, 王光明, 李海鹏, 侯海生 2016 物理学报 **65** 074101]
- [11] Yu H C, Cao X Y, Gao J, Yang H H, Han J F, Zhu X W, Li T 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 224101 (in Chinese) [于惠存, 曹祥玉, 高军, 杨欢欢, 韩江枫, 朱学文, 李桐 2018 物理学报 **67** 224101]
- [12] Fan Y, Qu S B, Wang J F, Zhang J Q, Feng M D, Zhang A X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 184101 (in Chinese) [范亚, 屈绍波, 王甲富, 张介秋, 冯明德, 张安学 2015 物理学报 **64** 184101]
- [13] Wei Z, Cao Y, Fan Y, Yu X, Li H 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 221907
- [14] Feng M, Wang J, Ma H, Mo W, Ye H, Qu S 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 074508
- [15] Chen H, Wang J, Ma H, Qu S, Xu Z, Zhang A, Yan M, Li Y 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 154504
- [16] Shi H, Zhang A, Zheng S, Li J, Jiang Y 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 034102
- [17] Yin J. Y., Wan X, Zhang Q, Cui T J 2015 *Sci. Rep.* **5** 12476
- [18] Chen M, Chang L, Gao X, Chen H, Wang C, Xiao X, Zhao D 2017 *IEEE Photonics J.* **9** 4601011

- [19] Yu Y, Xiao F, He C, Jin R, Zhu W 2020 *Opt. Express* **28** 11797
- [20] Wang M, Zhai Z 2020 *Front. Phys.* **8** 527394
- [21] Kong X, Wang Q, Jiang S, Kong L, Yuan J, Yan X, Wang X, Zhao X 2020 *Sci. Rep.* **10** 17843
- [22] Chambers B 1999 *Smart Mater. Struct.* **8** 64
- [23] Chen K, Feng Y, Monticone F, Zhao J, Zhu B, Jiang T, Zhang L, Kim Y, Ding X, Zhang S, Alù A, Qiu C W 2017 *Adv. Mater.* **29** 1606422
- [24] Li L, Cui T J, Ji W, Liu S, Ding J, Wan X, Li Y B, Jiang M, Qiu C W, Zhang S 2017 *Nat. Commun.* **8** 197
- [25] Cui T J, Qi M Q, Wan X, Zhao J, Cheng Q 2014 *Light-Sci. & Appl.* **3** e218
- [26] Tian J, Cao X, Gao J, Yang H, Han J, Yu H, Wang S, Jin R, Li T 2019 *J. Appl. Phys.* **125** 135105
- [27] Zhang X G, Jiang W X, Jiang H L, Wang Q, Tian H W, Bai L, Luo Z J, Sun S, Luo Y, Qiu C W, Cui T J 2020 *Nat. Electron.* **3** 165
- [28] Jiang W, Ma H, Feng M, Yan L, Wang J, Wang J, Qu S 2016 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** 315302
- [29] Jing L, Wang Z, Zheng B, Wang H, Yang Y, Shen L, Yin W, Li E, Chen H 2018 *NPG Asia Mater.* **10** 888
- [30] Wang Z, Jing L, Yao K, Yang Y, Zheng B, Soukoulis C M, Chen H, Liu Y 2017 *Adv. Mater.* **29** 1700412
- [31] Li M, Shen L, Jing L, Xu S, Zheng B, Lin X, Yang Y, Wang Z, Chen H 2019 *Adv. Sci.* **6** 1901434
- [32] Le D H, Xu Y, Tentzeris M M, Lim S 2020 *Extreme Mech. Lett.* **36** 100670

Reconfigurable linear polarization conversion based on spatial-order kirigami metasurfaces*

Wang Ming-Zhao # Wang Shao-Jie # Xu He-Xiu †

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

(Received 26 January 2021; revised manuscript received 17 February 2021)

Abstract

With the development of intelligent technology, it is essential to develop polarization-conversion devices with adaptable electromagnetic (EM) performance for practical applications. Up to now, most of attempts have relied on PIN diodes and varactor diodes for electrical tuning, typically featuring simplicity and timeliness. However, the shortcomings are also notable, such as less degrees of freedom (DoFs), more complex circuits and more expensive. In view of this, here we propose a kind of spatial-order metasurface for reconfigurable polarization conversion based on kirigami concept. By adjusting the folding angle β , the interaction between neighboring dipoles can be progressively changed and thus the operation frequency of polarization conversion can be shifted. Such a mechanical reconfigurable strategy brings about more DoFs for tuning and is cheaper and extraordinary convenient in practice. To verify the feasibility of our concept, a proof-of-concept spatial-order kirigami metasurface is proposed for the dual-band reconfigurable linear polarization conversion based on asymmetric chiral split ring resonators (SRRs). Experimental results show that the linear polarization operates at 5 and 5.8 GHz when folding angle is $\beta = 10^\circ$, these frequencies are shifted to 5.8 and 7.2 GHz when $\beta = 45^\circ$: a tuning range is expanded by 18.5%. In addition, the Poisson's ratio and relative density of proposed kirigami metasurface as a function of β are also theoretically analyzed. The results show that the Poisson's ratio increases with the value of β increasing. The relative density can be reduced to 1.5% of its unfolded planar counterpart. Our spatial-order kirigami metasurface strategy paves the way for implementing the reconfigurable linear polarization conversion and multifunctional devices.

Keywords: reconfigurable kirigami metasurfaces, polarization conversion, split ring resonators, spatial-order

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.70.20210188

* Project supported by the Youth Talent Lifting Project of the China Association for Science and Technology (Grant No. 17-JCJQ-QT-003), the National Defense Program of China (Grant No. 2019-JCJQ-JJ-081), and the Key Program of Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2020JZ-33).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: hxxuellen@gmail.com