



## 新型手性电磁超材料非对称传输性能设计分析

邱克鹏 骆越 张卫红

### Analysis and design of new chiral metamaterials with asymmetric transmission characteristics

Qiu Ke-Peng Luo Yue Zhang Wei-Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 214101 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200728

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200728>

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

可实现宽频带光波非对称传输的自准直效应光子晶体异质结构

Photonic crystal heterostructure with self-collimation effect for broad-band asymmetric optical transmission

物理学报. 2020, 69(18): 184214 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200538>

基于拓扑优化设计的宽频吸波复合材料

Broadband absorbent materials based on topology optimization design

物理学报. 2018, 67(21): 217801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181170>

微纳尺度体点导热的拓扑优化

Topology optimization of the volume-to-point heat conduction problem at micro- and nano-scale

物理学报. 2019, 68(20): 200201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190923>

手性声子晶体中拓扑声传输

Topological acoustic transports in chiral sonic crystals

物理学报. 2019, 68(22): 227802 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191007>

层状手性拓扑磁材料 $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$ 的磁学特性

Magnetic properties of layered chiral topological magnetic material  $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$

物理学报. 2020, 69(11): 117501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200007>

缺陷致非线性电路孤子非对称传输

Defect induced asymmetric soliton transmission in the nonlinear circuit

物理学报. 2017, 66(10): 100502 <https://doi.org/10.7498/aps.66.100502>

## 新型手性电磁超材料非对称传输性能设计分析\*

邱克鹏<sup>†</sup> 骆越 张卫红

(西北工业大学机电学院, 西安 710072)

(2020年5月14日收到; 2020年6月5日收到修改稿)

非对称传输型超材料在极化转换器与光电二极管等领域具有重要的研究意义及应用价值. 本文借助于结构设计中的拓扑优化技术, 设计出一种具有优异非对称传输特性的新型双层L型变体超材料结构, 实现了线性极化波在K波段及Ka波段的非对称传输现象; 数值仿真分析及实验结果表明, 其非对称传输系数在21.65 GHz处达到0.8562, 在28.575 GHz处达到0.8175, 并通过分析在谐振频点处的表面电流、电场分布, 阐明了双层L型变体超材料结构非对称传输性能的物理机理; 此外, 选取合理的几何参数并改变该结构金属层的旋转角度, 进一步实现了对非对称传输现象的调控, 并在K波段同时实现了线性极化波和圆极化波的非对称传输现象. 本文采用拓扑优化设计方法得到的非对称传输型手性超材料结构具有结构简单、易调控等优点, 且具有明确的方向性, 在手性超材料结构设计领域拥有广阔的应用前景.

**关键词:** 非对称传输, 可调性, 手性超材料, 拓扑优化**PACS:** 41.20.Jb, 02.60.Pn, 78.67.Pt, 81.05.Xj**DOI:** 10.7498/aps.69.20200728

## 1 引言

随着信息技术的快速发展, 电磁波在各个领域的应用越来越广泛: 在军用领域, 电磁波在雷达干扰与抗干扰, 武器装备隐身性能、降低其被侦测概率等方面具有重要的应用; 在民用领域, 电磁波在通信、医疗、环境监测及家用电子等方面均具有重要的应用. 因此, 如何有效调控电磁波特性并使之按照人类的意愿为人类所用是当前各个领域学者研究的热点. 传统材料对电磁波特性的调控主要是通过法拉第效应和双折射晶体来实现, 这种手段存在一定的局限性, 例如调控效率低, 工作频带窄或材料制备工艺复杂等<sup>[1,2]</sup>.

近年来, 超材料受到人们的广泛关注, 它具有天然材料所不具备的物理特性<sup>[2,3]</sup>, 因此可以实现许多奇特的电磁现象, 如负折射率<sup>[4,5]</sup>、负介电常数<sup>[6-8]</sup>、

负磁导率<sup>[6-8]</sup>等, 此外, 超材料也被广泛用于电磁波传输、损耗及极化特性的有效调控<sup>[9-18]</sup>. 超材料领域一个重要的研究方向是研究手性及相关电磁现象, 手性是指一个结构经过平移及旋转无法与其镜像重合的几何性质. 手性超材料是手性材料的一种, 可以表现出两种重要的电磁特性: 圆双折射和圆二色性, 圆双折射指结构旋转电磁波偏振平面的能力, 圆二色性指两种极化方式的右旋圆极化波(right-handed circularly polarized, RCP)和左旋圆极化波(left-handed circularly polarized, LCP)在手性介质中传播的差异. 后续的研究表明, 平面手性超材料还可以产生另一种新奇的现象: 非对称传输(asymmetric transmission, AT). 这一特殊的现象在2006年被Fedotov等<sup>[19,20]</sup>首次发现, 研究表明, 通过交换相对于结构的波传播方向, 入射电磁波的传输极化响应是不对称的. 这种奇特的现象不同于磁光法拉第效应的非互易性, 是由平面

\* 国家重点研发计划(批准号: 2017YFB1102800)和国家自然科学基金(批准号: 11772258)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [qiuqp@nwpu.edu.cn](mailto:qiuqp@nwpu.edu.cn)

手性效应引起的. 沿着电磁波的传播方向, 平面手性超材料结构单元的对称性被破坏, 因此, 相反传播方向的圆极化波与平面手性超材料接触, 将会面临旋向相反的手性结构. Menzel 等<sup>[21]</sup>在 2010 年对线性极化波的 AT 现象进行了研究, 值得注意的是, 线性极化波被认为是振幅与波长相同的 RCP 波与 LCP 波的叠加, 这种极化状态的电磁波在相反的传播方向同样面临旋向相反的手性结构. 综上所述, AT 现象被定义为入射波部分转换为相反的旋向, 这种转换的效率在相反的传播方向是不对称的. 目前研究人员提出了一些对线性极化波及圆极化波具有 AT 现象<sup>[22–26]</sup>的手性超材料结构. Stephen 等<sup>[27]</sup>利用互补手性超材料结构实现了 1.15 GHz 带宽的 AT 现象. Ji 等<sup>[28]</sup>率先利用拓扑优化技术实现了超宽带 AT 超表面中间层设计. Liu 等<sup>[29]</sup>基于 Babinet 原理, 设计出一种多功能手性超材料结构, 该结构能够对线性极化波及圆极化波同时产生 AT 现象. 此外, 利用一些特殊的材料及技术手段, 例如结构高度可调节<sup>[30]</sup>、基于 VO<sub>2</sub> 材料的温度控制<sup>[31]</sup>、以及石墨烯<sup>[32]</sup>和狄拉克半金属<sup>[33]</sup>材料费米能量的调节, 来实现对 AT 现象的动态调控也是研究的热点问题. 但是上述研究中设计手性超材料的方法大多是在已有结构的基础上改变参数大小来达到设计目的, 这种方法没有明确的方向性, 设计难度比较大; 并且设计的手性超材料功能较为单一, 实现动态调控的方法过于繁琐, 有较高的环境限制及技术要求.

本文利用结构设计中的拓扑优化技术来设计手性超材料构型, 通过对刻蚀在介质基板两侧的金属结构进行优化设计, 得到一种具有旋转对称性的

新型非对称传输型手性超材料结构. 数值仿真分析以及实验结果表明, 该结构具有优异的非对称传输现象, 其非对称传输系数在 21.65 GHz 处达到 0.8562, 在 28.575 GHz 处达到 0.8175. 并分析了该结构在谐振频点处的表面电流、电场分布, 以此来研究结构的物理机理<sup>[34,35]</sup>. 此外, 对影响结构性能的几何参数进行了综合分析, 选取合理的几何参数并改变该结构金属层的旋转角度, 实现对 AT 现象的调控, 使得在 K 波段对线性极化波及圆极化波均能产生 AT 现象. 对比已有的非对称传输型超材料结构, 本文提出的超材料结构制备方法简单, 设计具有明确的方向性, 实现调控的条件相对宽松, 并具有多功能的特点, 应用范围更加广泛, 更容易集成到相关设备中.

## 2 手性超材料非对称传输性能设计

### 2.1 设计原理

本文利用拓扑优化技术, 对刻蚀在介质基板两侧的金属结构进行优化设计, 拓扑优化是在一个结构设计域内确定材料和连接性的最佳布局的过程, 首先需要确定设计域. 在周期单元结构的表层及底层设计了尺寸范围为 6 mm × 6 mm 的设计域, 且均离散为 6 × 6 的正方形网格, 如图 1(a) 所示, 每个网格的边长为 1 mm, 则这 72 个网格的材料分布即为设计变量, 设定 0 代表设计变量的取值为空气, 1 代表设计变量的取值为金属铜, 则将 72 个网格的材料分布问题转换为 0 和 1 的取值问题. 为了使设计出的构型具有良好的极化转换特性, 同时简化计算量, 将表层设计域分为两部分, 这两部分以

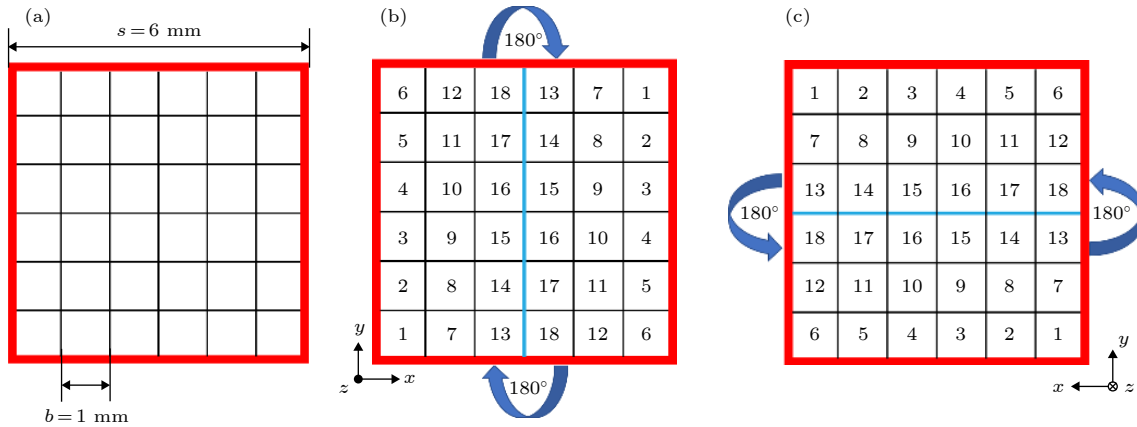


图 1 设计域原理图 (a) 6 × 6 正方形网格; (b) 表层设计域; (c) 底层设计域

Fig. 1. Schematic of design domain: (a) 6 × 6 square grid; (b) upper layer; (c) lower layer.

平面中心为轴心进行  $180^\circ$  旋转对称, 如图 1(b) 所示, 并将表层设计域分别绕  $z$  坐标轴与  $x$  坐标轴旋转  $90^\circ$  得到底层设计域, 如图 1(c) 所示. 这样, 最终的设计变量个数只有 18 个.

优化的目标是提升超材料结构的 AT 性能, 非对称传输系数  $\Delta$  被用来描述 AT 性能的强弱. 线性极化波的非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x/\Delta_{\text{lin}}^y$  定义为<sup>[36]</sup>

$$\Delta_{\text{lin}}^x = |T_{yx}|^2 - |T_{xy}|^2 = -\Delta_{\text{lin}}^y. \quad (1)$$

同时, 圆极化波的非对称传输系数  $\Delta_{\text{circ}}^+/\Delta_{\text{circ}}^-$  定义为

$$\Delta_{\text{circ}}^+ = |T_{-+}|^2 - |T_{+-}|^2 = \Delta_{\text{circ}}^-. \quad (2)$$

这里,  $T_{xy}$  和  $T_{yx}$  表示线性极化波交叉极化透射系数,  $T_{-+}$  和  $T_{+-}$  分别表示圆极化波的交叉极化透射系数. 非对称传输系数  $\Delta$  越接近于  $1/-1$ , 表示超材料的 AT 性能越强. 以线性极化波的非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x$  的绝对值为目标函数进行拓扑优化设计, 优化问题可以表示为

$$\begin{aligned} \max A(x_1, x_2, \dots, x_{18}) &= \left| |T_{yx}|^2 - |T_{xy}|^2 \right|, \\ \text{s.t. } x_i &= 0 \text{ or } 1, \\ 12 \text{ GHz} &\leq \omega \leq 30 \text{ GHz}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $x_i (i = 1, 2, \dots, 18)$  表示 18 个设计变量, 取值为 0 或者 1, 0 代表空气, 1 代表金属铜; 以  $\omega$  表示设计频率范围, 取值为  $12 \text{ GHz} \leq \omega \leq 30 \text{ GHz}$ . 采用遗传算法进行拓扑优化, 不断搜寻网格取值 0 或者 1 的最优组合. 遗传算法的每一代将生成 60 个种群, 整个算法的迭代次数上限为 100 次, 每一代中个体的杂交概率设定为 0.8、变异概率设定为 0.08. 对于每次生成的网格取值组合, 商用电磁分析软件 CST Microwave Studio 都会生成和模拟计算一个相应的布局. 随着拓扑优化的进行, 网格的取值组合在不断变化, 相应的布局也随之改变, 其对应的目标函数  $A$  也在不断增加. 当整个优化过程结束时, 可以通过界面操作找出最优的布局.

遗传算法迭代过程中构型的变化如图 2 所示. 取出典型的金属布局, 初始金属结构布局设定为分布在单元最外圈的双 L 型<sup>[37]</sup> 布局, 这种布局对应的结构具有一定的 AT 现象, 作为初始布局能够使得拓扑优化过程更具效率. 随着迭代过程的深入, 金属材料分布逐渐向中心聚集, 整体分布逐渐规整, 中间过程结果不断地接近最终结果, 在满足频率范围的同时 AT 性能逐步达到最优.

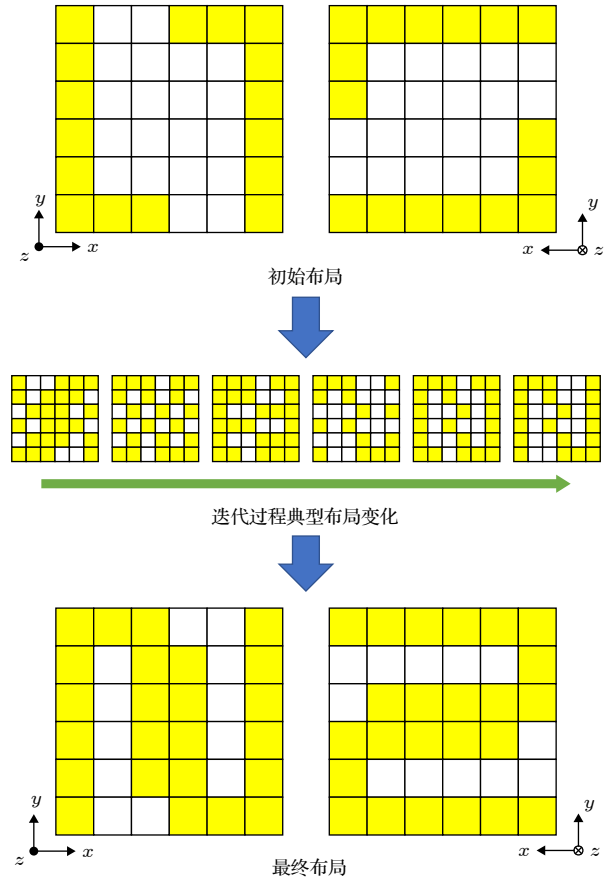


图 2 优化迭代过程中的构型变化

Fig. 2. Changing configuration during optimization iteration.

## 2.2 设计结果及实验验证

如图 3 所示优化所得最终结果, 在  $x-y$  平面上的周期尺寸为  $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ , 表层及底层金属结构的材料均为金属铜, 电导率为  $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ , 厚度  $t = 0.036 \text{ mm}$ , 在几何上表现为双层 L 型变体结构; 中间层介质基板的材料为 Rogers RO4350B, 其相对介电常数为 3.66, 损耗角正切为 0.004, 厚度  $d = 0.8 \text{ mm}$ .

为了验证优化结果, 通过商用电磁分析软件 CST Microwave Studio 建立结构的仿真模型,  $x-y$  平面的边界条件设置为元胞边界条件 (Unit Cell),  $z$  方向的边界条件设置为 open (add space), 利用频域求解器计算其传输系数矩阵,  $T_{xy}$ ,  $T_{yx}$ ,  $T_{xx}$ ,  $T_{yy}$  分别表示传输矩阵的 4 个元素, 其中  $T_{xx}$  和  $T_{yy}$  为共极化透射系数,  $T_{xy}$  和  $T_{yx}$  为交叉极化透射系数. 为了方便进行对比, 这里计算了初始结构及优化结构的传输系数矩阵, 结果如图 4 所示, 可以看出, 初始结构的交叉极化透射系数  $T_{yx}$  在 Ku 波段内的  $15.525 \text{ GHz}$  处以及 K 波段内的  $23.5 \text{ GHz}$  处

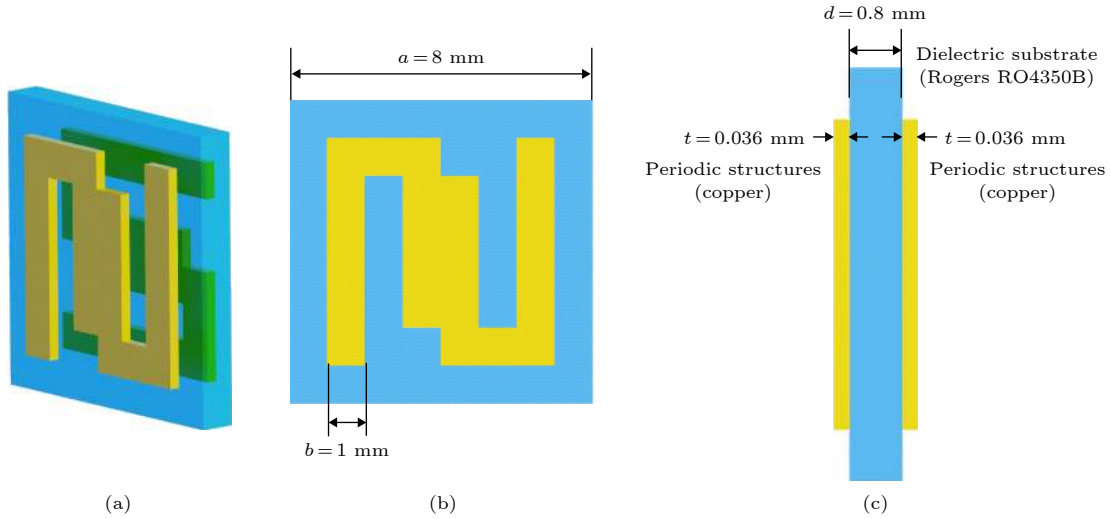


图3 优化单元仿真模型 (a) 3D视图; (b) 正视图; (c) 侧视图

Fig. 3. Optimization unit simulation model: (a) 3D view; (b) front view; (c) side view.

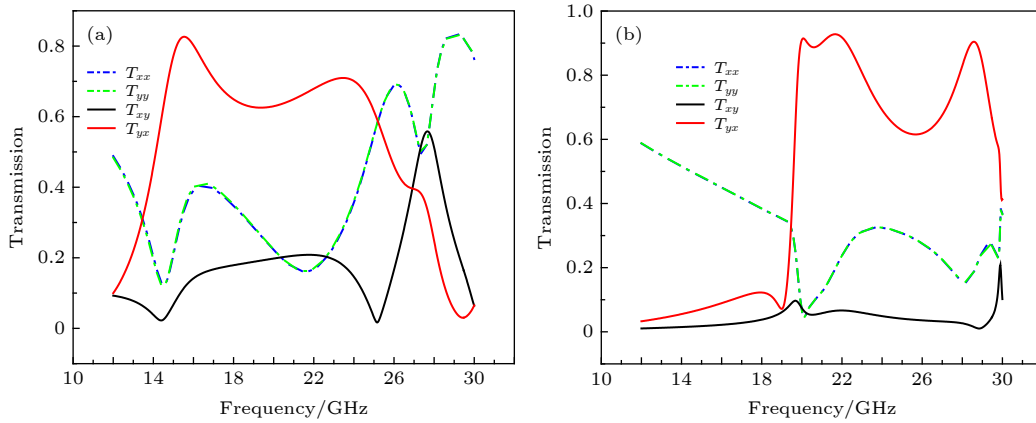


图4 电磁波沿 $-z$ 方向时, (a) 初始结构透射系数(幅值)和 (b) 优化结构透射系数(幅值)

Fig. 4. (a) Transmission coefficient (amplitude) of initial structure and (b) transmission coefficient (amplitude) of optimized structure under the condition of electromagnetic waves along the  $-z$  direction.

达到传输峰值, 分别为 0.8264 和 0.7097; 在对应频点处, 另一个交叉极化透射系数  $T_{xy}$  的值被限制在 0.2 以下, 同时, 共极化透射系数  $T_{xx}$  与  $T_{yy}$  相等, 在谐振频点处的值被限制在 0.5 以下. 作为对比, 优化结构的交叉极化透射系数  $T_{yx}$  在 K 波段内的 20.075 GHz 处、21.65 GHz 处和 Ka 波段内的 28.575 GHz 处达到传输峰值, 具体分别为 0.9146, 0.9276 和 0.9043; 在对应频点处, 另一个交叉极化透射系数  $T_{xy}$  的值被限制在 0.1 以下, 同时, 共极化透射系数  $T_{xx}$  与  $T_{yy}$  相等, 在谐振频点处的值被限制在 0.3 以下. 经过对比可知, 优化结构的交叉极化透射系数  $T_{yx}$  与  $T_{xy}$  差异更为显著, 具有更强的 AT 现象.

利用非对称传输系数  $\Delta$  描述结构的 AT 性能,

线性极化波的非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x/\Delta_{\text{lin}}^y$  可由 (1) 式计算得到. 这里计算了初始结构及优化结构的非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x/\Delta_{\text{lin}}^y$ , 结果如图 5 所示, 可以看出, 初始结构的非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x/\Delta_{\text{lin}}^y$  在 Ku 波段内的 15.5 GHz 处达到 0.670/-0.670, 在 K 波段内的 23.7 GHz 处达到 0.4737/-0.4737. 作为对比, 优化结构的非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x/\Delta_{\text{lin}}^y$  在 K 波段内的 20.075 GHz 处达到 0.8319/-0.8319, 在 K 波段内的 21.65 GHz 处达到 0.8562/-0.8562, 同时, 在 Ka 波段内的 28.575 GHz 处达到 0.8175/-0.8175. 经过对比可以看出, 拓扑优化显著提高了超材料结构的 AT 性能, 优化后的双层 L 型变体结构具有更好的 AT 特性, 并且其谐振频率蓝移, 谐振频点增加.

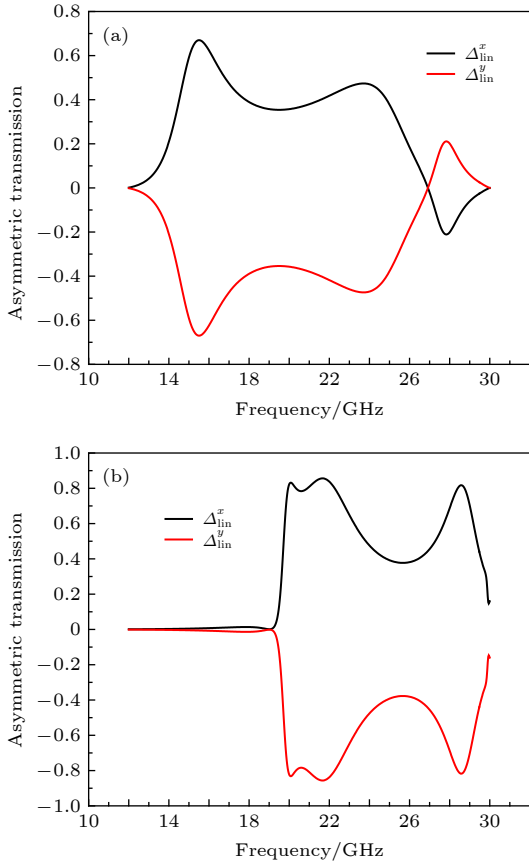


图 5 (a) 初始结构非对称传输系数  $\Delta_{lin}^x/\Delta_{lin}^y$ ; (b) 优化结构非对称传输系数  $\Delta_{lin}^x/\Delta_{lin}^y$   
 Fig. 5. (a) Asymmetric transmission coefficient of initial structure  $\Delta_{lin}^x/\Delta_{lin}^y$ ; (b) asymmetric transmission coefficient of optimized structure  $\Delta_{lin}^x/\Delta_{lin}^y$ .

为了实验验证对设计的非对称传输型超材料, 采用印刷电路板工艺加工样品, 这里加工制作了初始结构及优化结构, 如图 6 所示, 样品的尺寸为  $180\text{ mm} \times 180\text{ mm}$ , 由  $20 \times 20$  个基本单元组成. 测试系统如图 7 所示, 两个标准的喇叭天线作为收发信号源连接到矢量网络分析仪 (E8363B), 并保持两个喇叭天线在同一高度. 其中一个喇叭分别发射  $x$  极化波和  $y$  极化波入射到样品表面, 另一个喇叭分别接收经样品透射的  $y$  极化波和  $x$  极化波, 经矢量网络分析仪计算可得到初始结构与优化结构的交叉极化透射系数  $T_{yx}$  与  $T_{xy}$ .

图 8 和图 9 为实验结果与仿真结果的对比. 其中, 蓝色虚线代表实验测量曲线, 红色实线代表仿真计算曲线, 可以看到, 实验结果与仿真结果符合得较好, 在谐振频点处, 实验测得的交叉极化透射系数的幅值与仿真计算的结果略有出入, 可能的原因归结为以下两点: 一是样品的加工精度不够, 二是实验环境对测量有一定的影响.

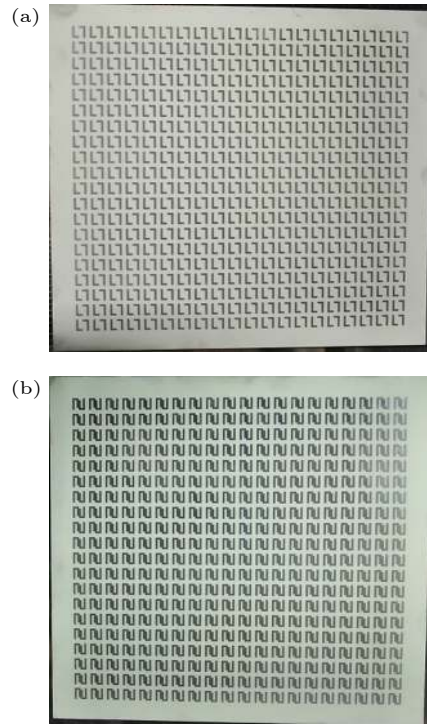


图 6 样品图 (a) 初始结构; (b) 优化结构  
 Fig. 6. Sample drawing: (a) Initial structure; (b) optimized structure.

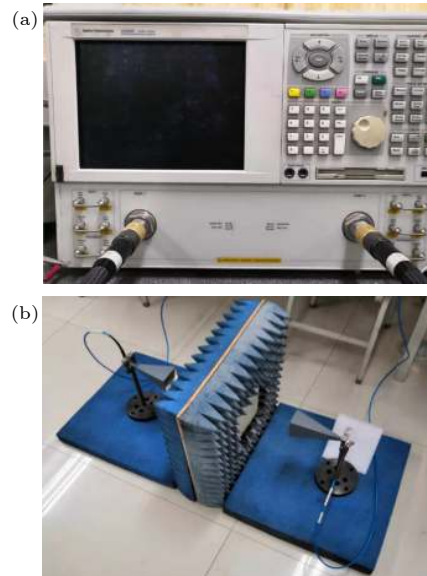


图 7 (a) 矢量网络分析仪; (b) 喇叭天线测试图  
 Fig. 7. (a) Vector network analyzer; (b) horn antenna test chart.

为了进一步探究优化结构实现 AT 现象的物理机理, 选取  $20.075, 21.65, 28.575\text{ GHz}$  这 3 个谐振频点观察结构表层及底层金属的表面电流分布, 如图 10—12 所示, 图中箭头方向代表电流流动的方向. 在谐振频点  $20.075\text{ GHz}$  处, 表层及底层金属结构产生的表面电流反向平行, 形成感应磁场,

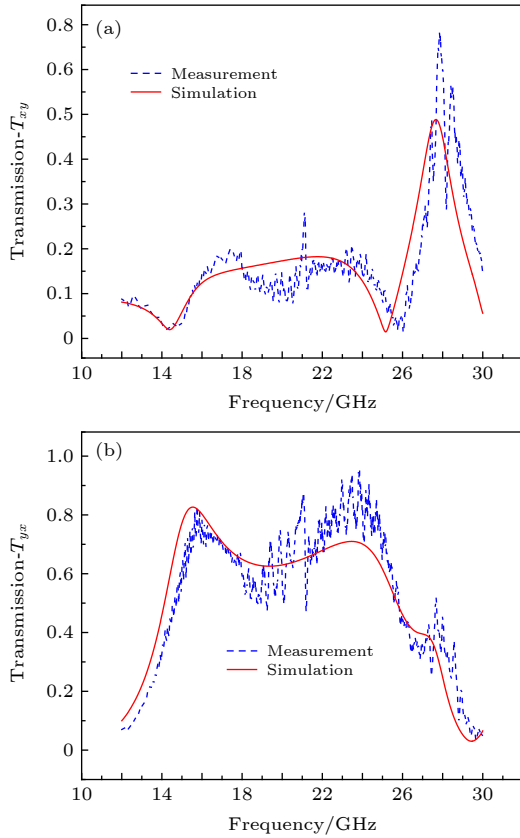


图 8 初始结构交叉极化透射系数 (a)  $T_{xy}$ ; (b)  $T_{yx}$   
 Fig. 8. Cross polarization transmission coefficient of initial structure: (a)  $T_{xy}$ ; (b)  $T_{yx}$ .

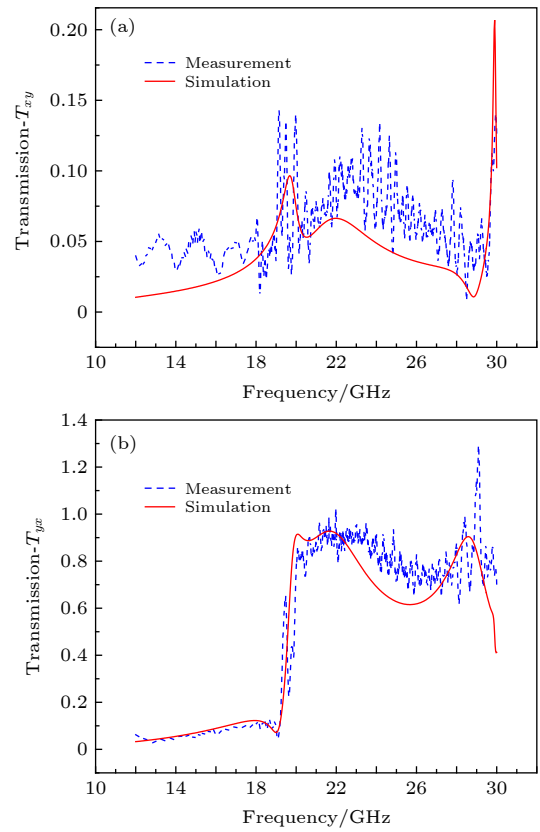


图 9 优化结构交叉极化透射系数 (a)  $T_{xy}$ ; (b)  $T_{yx}$   
 Fig. 9. Cross polarization transmission coefficient of optimized structure: (a)  $T_{xy}$ ; (b)  $T_{yx}$ .

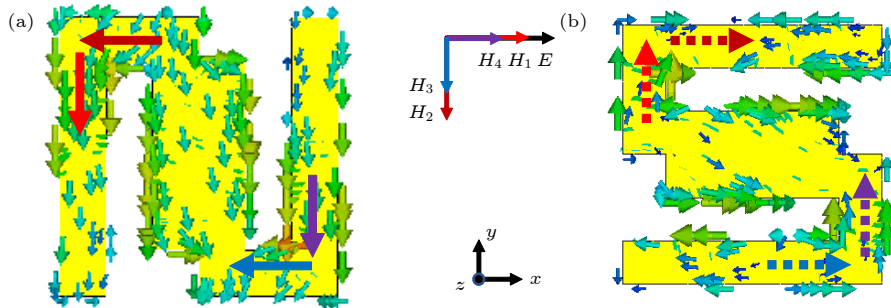


图 10  $f = 20.075$  GHz 时的表面电流 (a) 优化结构表层表面电流; (b) 优化结构底层表面电流  
 Fig. 10. Surface current at  $f = 20.075$  GHz: (a) On the upper surface of the optimized structure; (b) on the lower surface of the optimized structure.

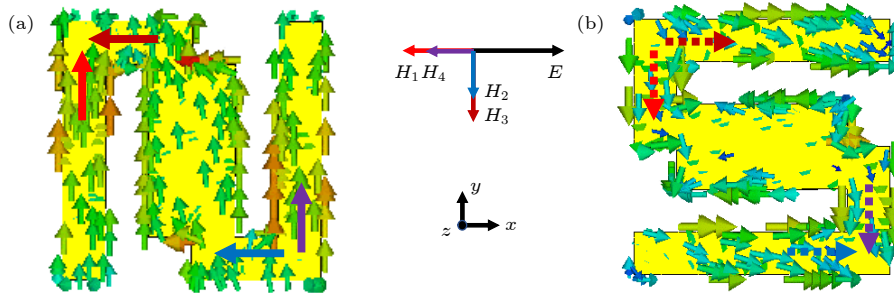


图 11  $f = 21.65$  GHz 时的表面电流 (a) 优化结构表层表面电流; (b) 优化结构底层表面电流  
 Fig. 11. Surface current at  $f = 21.65$  GHz: (a) On the upper surface of the optimized structure; (b) on the lower surface of the optimized structure.

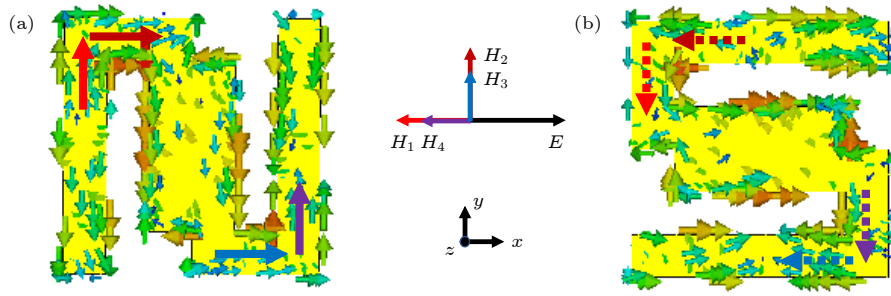


图 12  $f = 28.575$  GHz 时的表面电流 (a) 优化结构表层表面电流; (b) 优化结构底层表面电流

Fig. 12. Surface current at  $f = 28.575$  GHz: (a) On the upper surface of the optimized structure; (b) on the lower surface of the optimized structure.

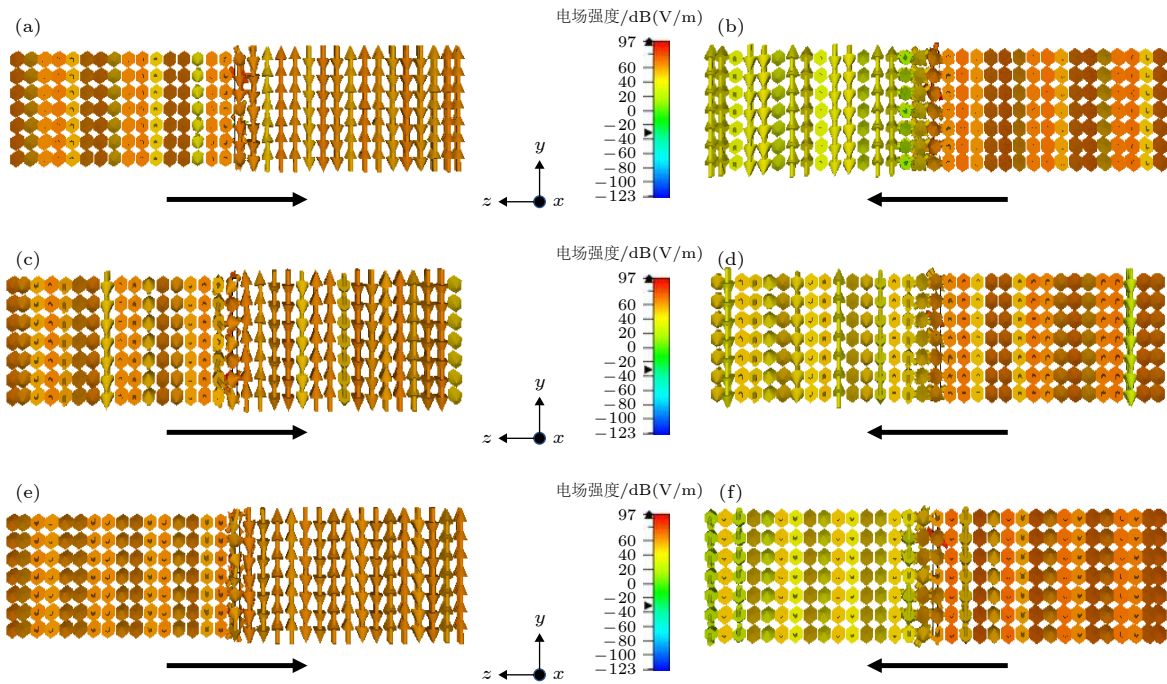


图 13 线性  $x$  极化波沿  $-z$  及  $+z$  方向入射时优化结构两侧电场分布 (a), (b)  $f = 20.075$  GHz; (c), (d)  $f = 21.65$  GHz; (e), (f)  $f = 28.575$  GHz

Fig. 13. Electrical field distributions on both sides of the optimized structure when the linear  $x$ -polarized wave is incident along the  $-z$  and  $+z$  directions: (a), (b)  $f = 20.075$  GHz; (c), (d)  $f = 21.65$  GHz; (e), (f)  $f = 28.575$  GHz.

方向用彩色箭头标记为  $H_1, H_2, H_3, H_4$ ;  $H_2$  和  $H_3$  与入射波电场方向垂直, 无法产生交叉耦合, 则不能产生极化转换的效果, 而  $H_1$  和  $H_4$  与入射波电场方向平行, 导致极化转换的产生. 类似的现象在谐振频点 21.65 GHz 及 28.575 GHz 处可以观察到, 感应磁场  $H_1$  和  $H_4$  与入射波电场方向平行, 同样可以形成极化转换.

另一方面, 当  $x$  极化波分别沿  $-z$  方向和  $+z$  方向入射时, 优化结构两侧的电场分布如图 13 所示, 其中黑色箭头方向代表电磁波传播方向. 在谐振频点 20.075 GHz 处,  $x$  极化波沿  $-z$  方向入射时, 如图 13(a) 所示, 传输波的电场极化方向沿  $y$  方向,

说明了该结构具备极化转换能力;  $x$  极化波沿  $+z$  方向入射时, 如图 13(b) 所示, 传输  $y$  极化波的电场极化强度很低, 说明  $x$  极化波难以转换为  $y$  极化波. 图 13(c)、图 13(d) 及图 13(e)、图 13(f) 也分别在谐振频点 21.65 GHz 及 28.575 GHz 处显示了同样的现象, 这证明该结构具有 AT 效应.

### 3 非对称传输性能的可调性分析

在采用拓扑优化技术获得具有优异非对称传输性能手性超材料结构后, 还可改变手性超材料结构的几何参数, 如介质层厚度  $d$ 、金属层厚度  $t$  和

优化过程网格边长  $b$ , 分析对 AT 特性的影响, 选择合理的几何参数, 能够进一步调节并提高该结构的 AT 特性, 同时实现谐振频点的移动. 在此基础上, 开展非对称传输性能的可调性设计, 实现电磁波的传输模式在非对称传输和对称传输之间切换. 本工作通过调节该结构金属层的旋转角度  $\theta_1$  与  $\theta_2$ , 实现了线性极化波及圆极化波 AT 现象传输模式的调节, 并且在 K 波段同时实现了线性极化波及圆极化波的 AT 现象.

### 3.1 几何参数对 AT 特性的影响

首先分析介质层厚度  $d$  改变所带来的影响. 令  $d$  分别取 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 mm, 表层及底层金属结构厚度  $t = 0.036$  mm, 优化过程网格边长  $b = 1$  mm, 中介质层宽度  $a = 8$  mm, 此时该结构的非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x$  见图 14, 随着介质层厚度  $d$  的增加, 谐振频率红移. 同时, 谐振频率处  $\Delta_{\text{lin}}^x$  的峰值随介质层厚度的增加变化不一致, 而是先增大后减小, 当  $d = 0.9$  mm 时, 非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x$  取得最大值 0.91, 此时该结构的 AT 效果最佳.

其次分析金属层厚度  $t$  改变所带来的影响. 令  $t$  分别取 0.036, 0.108, 0.18, 0.252, 0.324 mm, 优化过程网格边长  $b = 1$  mm, 中介质层厚度  $d = 0.8$  mm, 宽度  $a = 8$  mm, 此时该结构的非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x$  如图 15 所示, 随着金属层厚度  $t$  的增加, 谐振频率蓝移. 同时, 谐振频率处  $\Delta_{\text{lin}}^x$  的峰值随金属层厚度的增加变化不一致, 而是先增大后减小, 当  $t = 0.252$  mm 时, 非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x$  取得最大值 0.92, 此时该结构的 AT 效果最佳.

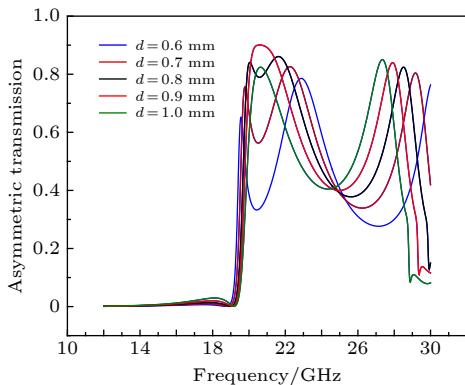


图 14 线性  $x$  极化波沿  $-z$  方向入射时优化结构介质层厚度  $d$  对非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x$  的影响

Fig. 14. Effect of the thickness  $d$  of dielectric layer on the asymmetric transmission coefficient  $\Delta_{\text{lin}}^x$  when linear  $x$ -polarized wave is incident in the  $-z$  direction.

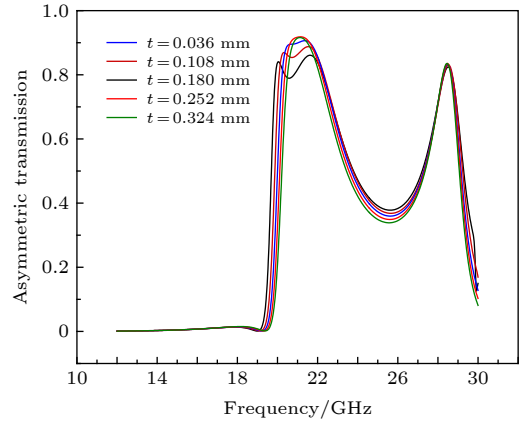


图 15 线性  $x$  极化波沿  $-z$  方向入射时优化结构金属层厚度  $t$  对非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x$  影响

Fig. 15. Effect of the thickness  $t$  of the optimized structural metal layer on the asymmetric transmission coefficient  $\Delta_{\text{lin}}^x$  when the linear  $x$ -polarized wave is incident in the  $-z$  direction.

最后分析优化过程网格边长  $b$  改变所带来的影响. 令  $b$  分别取 0.9, 0.95, 1.0, 1.05, 1.1 mm, 表层及底层金属结构厚度  $t = 0.036$  mm, 中介质层厚度  $d = 0.8$  mm, 宽度  $a = 8$  mm, 此时该结构的非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x$  如图 16 所示, 随着网格边长  $b$  的增加, 谐振频率红移. 同时, 谐振频率处  $\Delta_{\text{lin}}^x$  的峰值随网格边长的增加而增加, 当  $b = 1.1$  mm 时, 非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x$  取得最大值 0.89, 此时该结构的 AT 效果最佳.

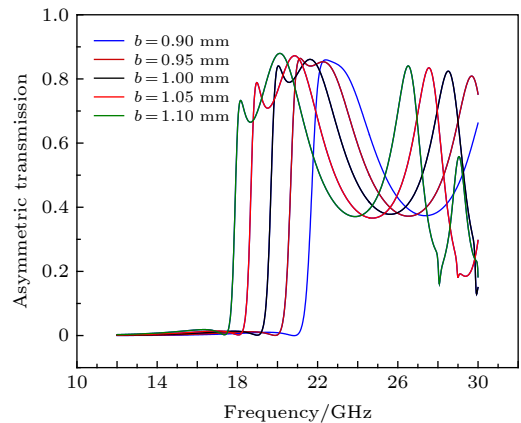


图 16 线性  $x$  极化波沿  $-z$  方向入射时优化结构网格边长  $b$  对非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x$  影响

Fig. 16. Effect of the small square side length  $b$  on the asymmetric transmission coefficient  $\Delta_{\text{lin}}^x$  when the linear  $x$ -polarized wave is incident in the  $-z$  direction.

由以上分析可以看出, 优化结构的几何参数对其谐振频率和 AT 特性有着很大的影响. 因此, 通

过可调性设计合理调整结构参数可以获得更好的 AT 特性.

### 3.2 AT 特性的可调性分析

通过综合分析对比几何参数对手性超材料结构 AT 性能影响, 选取  $d = 1 \text{ mm}$ ,  $t = 0.036 \text{ mm}$ ,  $b = 1 \text{ mm}$ ,  $a = 9 \text{ mm}$ , 可同时实现对线性极化波和圆极化波产生非对称传输现象, 并通过改变表层及底层金属的旋转角度, 产生对 AT 特性的调控. 如图 17 所示, 其中表层与底层的旋转角度分别定义为  $\theta_1$  与  $\theta_2$ .

将  $\theta_1$  与  $\theta_2$  分别从  $0^\circ$  调节至  $90^\circ$ , 以此来观察超材料结构 AT 性能的变化. 选取具有代表性的结果: 令  $\theta_1 = 15^\circ$ , 将  $\theta_2$  从  $0^\circ$  调节至  $90^\circ$ , 针对线性极化波超材料结构非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x$  如图 18 所示, 随着  $\theta_2$  角度的增加, 非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x$  先逐渐变大, 然后变小, 进而再变大, 同时谐振频点也随之移动. 当  $\theta_2 = 15^\circ$  时, 超材料结构的非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x$  最高达到 0.63, 当  $\theta_2 = 75^\circ$  时, 非对称传输

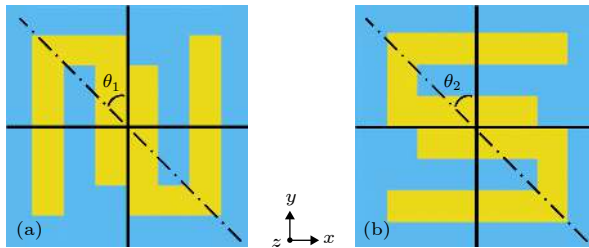


图 17 旋转角度 (a)  $\theta_1$ ; (b)  $\theta_2$

Fig. 17. Rotation angle: (a)  $\theta_1$ ; (b)  $\theta_2$ .

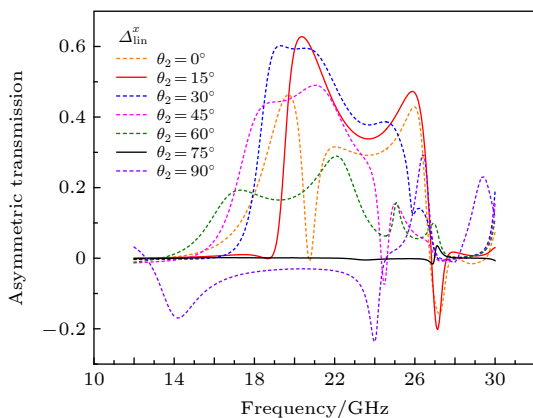


图 18 线性  $x$  极化波沿  $-z$  方向入射时底层金属旋转角度对非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x$  影响

Fig. 18. Influence of the rotation angle of the underlying metal on the asymmetric transmission coefficient  $\Delta_{\text{lin}}^x$  when the linear  $x$ -polarized wave is incident in the  $-z$  direction.

系数  $\Delta_{\text{lin}}^x$  趋向于 0, 表明针对线性极化波, 该手性超材料结构由非对称传输型超材料变为对称传输型超材料. 这也表明通过改变旋转角度能够有效调控手性超材料结构对线性极化波的传输模式.

同时, 为了探究该手性超材料结构针对圆极化波的 AT 现象, 分析计算了随着  $\theta_1$  与  $\theta_2$  的变化所对应的非对称传输系数  $\Delta_{\text{circ}}^-$ . 仍令  $\theta_1 = 15^\circ$ , 将  $\theta_2$  从  $0^\circ$  调节至  $90^\circ$ , 结果如图 19 所示, 随着  $\theta_2$  角度的增加, 超材料结构的  $\Delta_{\text{circ}}^-$  先逐渐变大, 然后变小, 进而再变大, 同时谐振频点也随着移动; 当  $\theta_2 = 45^\circ$  时, 超材料结构的  $\Delta_{\text{circ}}^-$  最高达到 0.66; 当  $\theta_2 = 75^\circ$  时, 超材料结构对圆极化波的  $\Delta_{\text{circ}}^-$  趋向于 0, 表明针对圆极化波, 该手性超材料结构由非对称传输型超材料变为对称传输型超材料. 这也表明通过改变旋转角度能够有效调控手性超材料结构对圆极化波的传输模式.

综合以上分析, 当  $\theta_1 = 15^\circ$ ,  $\theta_2 = 45^\circ$  时, 该手性超材料结构对线性极化波及圆极化波的非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x/\Delta_{\text{lin}}^y$  及  $\Delta_{\text{circ}}^+/\Delta_{\text{circ}}^-$  的结果如图 20 所示, 在 21 GHz 处对线性极化波的非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x$  达到 0.5, 在 24.5 GHz 处对圆极化波的非对称传输系数  $\Delta_{\text{circ}}^-$  达到 0.66, 说明旋转角度的改变不仅能够调控该结构的 AT 性能, 并且使得该结构在 K 波段同时实现了线性极化波及圆极化波的 AT 现象. 这种能够调控 AT 现象, 同时具有多种功能的电磁超材料结构在实际应用中有着广泛的应用价值.

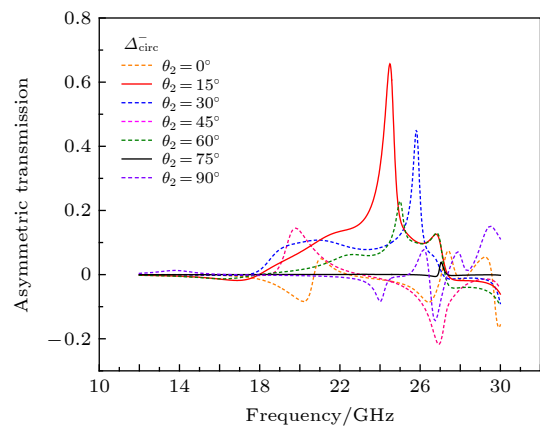


图 19 圆极化波沿  $-z$  方向入射时底层金属旋转角度对非对称传输系数  $\Delta_{\text{circ}}^-$  影响

Fig. 19. Influence of the rotation angle of the underlying metal on the asymmetric transmission coefficient  $\Delta_{\text{circ}}^-$  when a circularly polarized wave is incident in the  $-z$  direction.

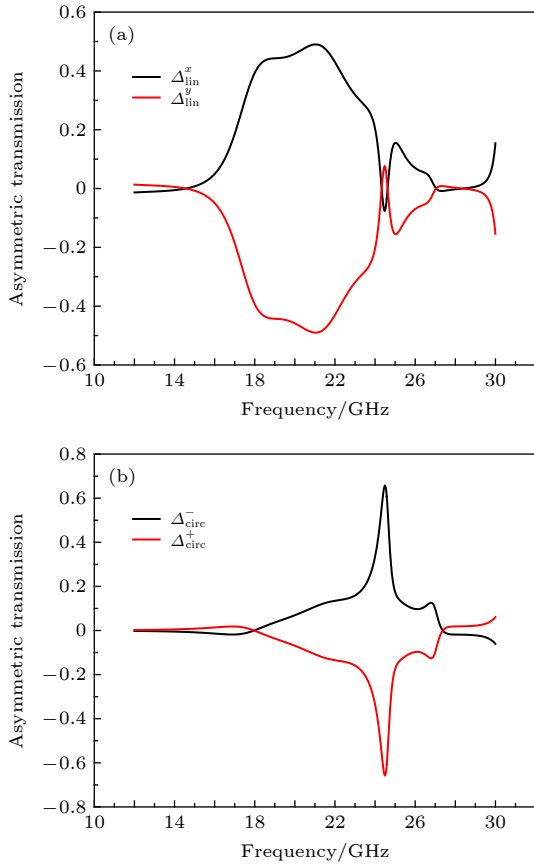


图 20 (a) 线性极化波非对称传输系数  $\Delta_{\text{lin}}^x/\Delta_{\text{lin}}^y$ ; (b) 圆极化波非对称传输系数  $\Delta_{\text{circ}}^+/\Delta_{\text{circ}}^-$

Fig. 20. (a) Asymmetric transmission coefficient of linearly polarized wave  $\Delta_{\text{lin}}^x/\Delta_{\text{lin}}^y$ ; (b) asymmetric transmission coefficient of circularly polarized wave  $\Delta_{\text{circ}}^+/\Delta_{\text{circ}}^-$ .

## 4 结 论

本文通过拓扑优化技术设计出了一种新型双层 L 型变体手性超材料结构, 数值仿真分析及实验结果表明, 该手性超材料结构具有优异的非对称传输现象, 其非对称传输系数在 21.65 GHz 处达到 0.8562, 在 28.575 GHz 处达到 0.8175, 在此基础上分析了该超材料结构在谐振频点处的表面电流、电场分布, 阐明其非对称传输的物理机理. 此外, 对影响结构性能的几何参数进行了综合分析, 选取合理的几何参数, 同时改变超材料结构金属层的旋转角度, 以此实现对 AT 现象的调控, 并且在 K 波段同时实现了线性极化波及圆极化波的 AT 现象. 拓扑优化技术在设计特定功能的超材料方面具有重要作用, 本文通过拓扑优化设计出的非对称传输型超材料结构制备方法简单, 设计方法具有明确的方向性, 实现调控的条件相对宽松, 并具有多功能的特点, 在极化转换器、光电二极管、电子通

信等领域有着广阔的研究与应用前景.

## 参考文献

- [1] Xu J, Li R Q, Jiang X P, Wang S Y, Han T C 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 117801 (in Chinese) [徐进, 李荣强, 蒋小平, 王身云, 韩天成 2019 物理学报 **68** 117801]
- [2] Jin K, Liu Y Q, Han J, Yang C M, Wang Y H, Wang H N 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 134201 (in Chinese) [金柯, 刘永强, 韩俊, 杨崇民, 王颖辉, 王慧娜 2017 物理学报 **66** 134201]
- [3] Silva A, Monticone F, Castaldi G, Galdi V, Alu A, Engheta N 2014 *Science* **343** 6167
- [4] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [5] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 5514
- [6] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nasser N, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [7] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [8] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J, Member 1999 *IEEE Trans. on Microw. Theory.* **47** 2075
- [9] Caloz C, Itoh T 2004 *IEEE Microw. Mag.* **5** 34
- [10] Liu D Y, Yao L F, Zhai X M, Li M H, Dong J F 2014 *Appl. Phys. A* **116** 9
- [11] Yang Y, Wang W, Moitra P, Kravchenko I I, Briggs D P, Valentine J 2014 *Nano Lett.* **14** 1394
- [12] Baena J D, Tisco J P, Slobozhanyuk A P, Glybovski S B, Belov P A 2015 *Phys. Rev. B* **92** 245413
- [13] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [14] Yu N, Aieta F, Genevet P, Kats M A, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 6328
- [15] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [16] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 5801
- [17] Ganesel J K, Thiel M, Rill M S, Decker M, Bade K, Saile V, Freymann G, Linden S, Wegener M 2009 *Science* **325** 1513
- [18] Tretyakov S, Nefedov I, Sihvola A, Maslovski S, Simovski C 2003 *J. Electromagnet. Wave.* **17** 695
- [19] Fedotov V A, Mlyonov P L, Prosvirnin S L, Rogacheva A V, Chen Y, Zheludev N I 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 167401
- [20] Fedotov V A, Schwanecke A S, Zheludev N I, Khardikov V V, Prosvirnin S L 2007 *Nano Lett.* **7** 1996
- [21] Menzel C, Helgert C, Rockstuhl C, Kley E B, Tünnermann A, Pertsch T, Lederer F 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 253902
- [22] Mutlu M, Akosman A E, Serebryannikov A E, Ozbay E 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 213905
- [23] Singh R, Plum E, Menzel C, et al. 2009 *Phys. Rev. B* **80** 153104
- [24] Plum E, Fedotov V A, Zheludev N I 2011 *J. Opt.* **13** 024006
- [25] Shi J H, Liu X C, Yu S, Lv T T, Zhu Z, Ma H F, Cui T J 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 191905
- [26] Wu L X, Zhang M, Zhu B, Zhao J M, Jiang T, Feng Y J 2014 *Appl. Phys. B* **117** 527
- [27] Stephen L, Yogesh N, Subramanian V 2018 *J. Appl. Phys.* **123** 033103
- [28] Ji W, Cai T, Wang B, Wang G G, Li H P, Wang C Y, Hou H S, Zhang C B 2019 *Opt. Express* **27** 2844
- [29] Liu W B, Wu W, Huang L R, Ling Y H, Ba C F, Li S, Chun Z H, Li H H 2019 *Opt. Express* **27** 33399
- [30] Song Q H, Wu P C, Zhu W M, et al. 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 151105
- [31] Liu M, Xu Q, Chen X Y, et al. 2019 *Sci. Rep.* **9** 4097

- [32] Zhao J X, Song J L, Xu T Y, Yang T X, Zhou J H 2019 *Opt. Express* **27** 9773
- [33] Dai L L, Zhang Y P, F. O'Hara J, Zhang H Y 2019 *Opt. Express* **27** 35784
- [34] Novitsky A V, Galynsky V M, Zhukovsky S V 2012 *Phys. Rev. B* **86** 075138
- [35] Mühlig S, Menzel C, Rockstuhl C, Lederer F 2011 *Met. Mater.* **5** 64
- [36] Mirzamohammadi F, Nourinia J, Ghobadi C, Majidzadeh M 2019 *Int. J. Electron. Commun. (AEÜ)* **98** 58
- [37] Liu D J, Xiao Z Y, Ma X L, Ma Q W, Xu X X, Wang Z H 2015 *Opt. Commun.* **338** 359

## Analysis and design of new chiral metamaterials with asymmetric transmission characteristics\*

Qiu Ke-Peng<sup>†</sup> Luo Yue Zhang Wei-Hong

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

( Received 14 May 2020; revised manuscript received 5 June 2020 )

### Abstract

Asymmetric transmission (AT) metamaterials are extensively studied and applied in the fields of polarization converters and photodiodes. In order to further improve the properties of polarization conversion and unidirectional conduction in the high frequency band and to implement their tunability, the novel chiral electromagnetic metamaterials are studied. By the topology optimization technique, a new type of double-layer L-shaped variant metamaterial structure with excellent asymmetric transmission characteristics is designed. The objective function is to maximize the asymmetric transmission coefficient for the linear polarization wave. The rotationally symmetrical design domain is determined by considering polarization conversion and computation efficiency simultaneously. The design domain of upper layer is divided into two parts which are both the 180° rotationally symmetrical. The design domain of the upper layer and lower layer are the 90° rotationally symmetrical around the  $x$  and  $z$  axis respectively. Therefore, the number of design variables is only 18. Asymmetric transmission of linear polarization wave in the K band and Ka band are implemented. Numerical simulation results and experimental results show that the optimized chiral metamaterial has excellent asymmetric transmission characteristics, and its asymmetric transmission coefficient reaches 0.8562 at a frequency of 21.65 GHz and 0.8175 at a frequency of 28.575 GHz. Its asymmetric transmission mechanism is expounded by analyzing the electric field and surface current distribution at the resonance frequency. Based on the optimized chiral metamaterials, the reasonable geometric parameters are selected and the rotation angle of the metal layer is changed in order to further achieve the tunable AT characteristics. First, the influences of the dielectric substrate layer, the thickness of the metal layer and the side length of the grid on resonance frequency and asymmetric transmission coefficient are analyzed respectively, which provides the basis for the reasonable adjustment of the structural parameters to obtain better asymmetric transmission characteristics. After the reasonable geometric parameters are determined, the rotational angle of the upper metal layer and lower metal layer are changed. The linearly and circularly polarized wave are simultaneously achieved in the K band. In this article, the topology optimization technique is used to design the asymmetric transmission chiral metamaterial structure. The design process has a clear direction. The optimized asymmetric transmission chiral metamaterial has the simple structure type and the easy tunability of its asymmetric transmission characteristics. It can be used widely and easily in the fields of polarization converters and photodiodes. This design method has a broad application prospect in the chiral metamaterial field.

**Keywords:** asymmetric transmission, tunability, chiral metamaterials, topology optimization

**PACS:** 41.20.Jb, 02.60.Pn, 78.67.Pt, 81.05.Xj

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200728

\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFB1102800) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11772258).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [qiukp@nwpu.edu.cn](mailto:qiukp@nwpu.edu.cn)