

文章编号 1004-924X(2024)07-0987-11

基于液态金属的跨波段超宽带极化转换超表面

邵亚楠^{1,2}, 李博文¹, 高世博^{1,2}, 邓永波^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:在无线通信领域,电磁波传播和极化方向调控对特定信号的识别与接收具有重要意义。提出了一种基于液态金属材料跨 X(8~12 GHz)和 Ku(12~18 GHz)波段超宽带极化转换电磁超表面,具有宽频带、高极化转换率、体积小、无机机械疲劳损伤、易共形、成本低等优点。该超表面能够实现从 7.595 GHz 到 17.712 GHz 超宽带范围内交叉极化转换或宽带圆极化转换的功能。当阶梯状液态金属结构宽度为 1.6 mm 时,在相对带宽为 79.9% 的 7.595~17.712 GHz 频带上,超表面极化转换率优于 90%,具有共极化向交叉极化转换的功能。当阶梯状液态金属结构宽度为 0.3 mm 时,在相对带宽为 12.30% 的 10.864~12.288 GHz 频带上,超表面具有线极化向圆极化转换的功能;在相对带宽为 3.54% 的 7.328~7.592 GHz 频带上,超表面的极化转换率优于 90%,具有共极化向交叉极化转换的功能。样品制备及其极化转换特性测试结果表明:实验结果与仿真结果的相对误差为 4.20%,理论设计与实验验证结果一致,进而验证了跨 X 和 Ku 波段超宽带极化转换电磁超表面的多功能性和有效性。

关键词:超表面;液态金属;极化转换;超宽带

中图分类号: TB34; O441.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243207.0987

Liquid metal based metasurface for cross-band and ultra-wideband polarization conversion

SHAO Yanan^{1,2}, LI Bowen¹, GAO Shibo^{1,2}, DENG Yongbo^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: dengyb@ciomp.ac.cn

Abstract: In wireless communication, controlling electromagnetic wave propagation and polarization direction is crucial for signal detection and reception. This study introduces a liquid metal-based electromagnetic metasurface for polarization conversion in the X (8-12 GHz) and Ku (12-18 GHz) bands. It offers benefits like ultra-wideband performance, high polarization conversion ratio, compactness, durability against mechanical fatigue, flexibility, and affordability. The metasurface consists of a periodic arrangement with a top step-shaped liquid metal structure, a middle dielectric layer, and a bottom copper foil, capable of ultra-

收稿日期: 2023-08-22; 修订日期: 2023-09-13.

基金项目: 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队项目 (No. YSBR-066); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51875545); 长春光机所所创新面上项目; 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 2023008783)

wideband cross-polarization conversion or wideband circular polarization conversion from 7.595 GHz to 17.712 GHz. With a 1.6 mm wide step-shaped liquid metal structure, it achieves over 90% polarization conversion ratio across 7.595-17.712 GHz with a 79.9% relative bandwidth, enabling co-polarization to cross-polarization conversion. At a 0.3mm structure width, it converts linear to circular polarization between 10.864-12.288 GHz with a 12.30% relative bandwidth. Additionally, in the 7.328-7.592 GHz band with a 3.54% relative bandwidth, it maintains over 90% polarization conversion ratio, facilitating co-to cross-polarization conversion. Experimental sample tests reveal a 4.20% relative error between experimental and simulated results, indicating strong theoretical and experimental correlation, thus confirming the metasurface's versatility and effectiveness.

Key words: metasurface; liquid metal; polarization conversion; ultra-wideband

1 引 言

极化转换器能够操控电磁波的极化状态,在电磁隐身^[1-2]、RCS 缩减^[3]、成像^[4]、传感^[5]、量子光学^[6]、卫星通信^[7]、天线设计^[8]和波束控制^[9-10]等方面的微波及光子器件领域有着广泛的应用。传统的极化调控器件利用法拉第效应或晶体光学活性,通过电磁波在自然界现有的双折射材料中的传播积累相位差,存在带宽窄、损耗高、体积大等问题。随着现代通信系统对器件集成度的要求越来越高,传统极化调控器件无法满足现代通信系统需求。超表面通过平面衬底上亚波长尺度的阵列结构调控电磁波传播,具有宽工作频带、体积小、成本低等优点。此外,超表面能够通过超薄的结构对电磁波振幅、相位和极化状态实现高效地超宽带调控,具有优异的电磁特性和电磁波调控能力。因此,超表面为克服传统极化调控器件的缺陷、满足现代通信系统需求提供了一种先进的技术途径。

目前,研究人员已提出了多种类型的极化转换超表面,可分为反射式与透射式两类。其中,反射式器件多由基于金属材料的共振结构阵列与金属底板构成,可实现宽带、可调的线-圆极化转换和线-线极化正交转换^[11-18];透射式器件通常由共振结构阵列与介质材料构成,多层结构之间的耦合可以进一步增大工作带宽^[19]。Zheng 等提出了一种基于超表面的宽带反射式极化转换器,可将线极化入射电磁波在相对带宽为 59.6% 的 6.53~12.07 GHz 频带内转换为正交极化反射

波,在相对带宽为 13.0% 的 13.70~15.60 GHz 频带内转换为圆极化反射波^[20]。Wang 等提出了一种基于单层介质衬底的宽带广角反射式线转圆极化转换器,实现了 55°斜入射角、相对带宽为 73.6% 的 15.3~33.1 GHz 频带内反射波的线-圆极化转换^[21]。Jia 等提出了一种具有线转圆极化特性的反射式超宽带超表面,在相对带宽为 129% 的 4.7~21.7 GHz 频带内将线极化入射波转换为圆极化反射波^[22]。Khan 等提出了一种超薄单层反射式多功能超表面,在相对带宽为 31.6% 的 8~11 GHz 频带内将线极化入射波转换为交叉极化反射波,同时在 7.5~7.7 GHz 和 11.5~11.9 GHz 两个频段上实现了线极化到圆极化的转换^[23]。Arneri 等提出了一种基于双层结构的宽带广角扫描线-圆极化转换的透射式极化转换器,实现了相对带宽为 24% 的线-圆极化转换^[24]。

上述极化转换电磁超表面,通常采用金、银、铜、铝合金等常规固体金属材料制作,存在难以共形、易机械疲劳、无法重构等问题。为了解决这些问题,研究人员开始关注无毒性的液态金属材料,如镓铟合金和镓铟锡合金。这种金属材料具有以下性能优势:(1)高强度、高硬度,液态金属的强度是铝、镁合金的 10 倍以上,不锈钢、钛合金的 1.5 倍以上;(2)极强的耐磨性和耐腐蚀性;(3)散热性、电磁性能等方面在轻合金中出类拔萃,而且在加热条件下不易变形、不易导热。因此,液态金属在天线和光学设备、柔性电路、超拉伸电线、传感器和电子皮肤以及柔性机器人等方

面具有广泛的应用前景。相比于传统超表面,基于液态金属的超表面具有显著优势。Liu等通过填充不同结构的液态金属,在3种工作状态下实现了雷达散射截面的减小^[25]。Lim等提出了一种宽带极化不敏感的吸波超表面,通过液态金属的流态变化实现吸收光谱的切换^[26]。尽管这些研究工作取得了一定的进展,但基于液态金属的极化转换超表面研究仍相对较少,且工作频段无法覆盖X波段的电磁波^[27-28]。X波段受天气环境等外界因素的影响较小,可以实现全天时、全天候的目标探测。Ku频段的频率高、增益高,天线尺寸较小。对于多功能设备,跨X和Ku波段的极化转换具有重要意义。因此,本文采用液态金属进行跨X和Ku波段的超宽带极化转换超表面设计,以解决已有极化转换超表面因采用传统固体金属材料,导致天线发生形态改变时金属出现断裂、疲劳、形变等机械损伤的问题,从而提升超表面的性能。

本文设计、制备并测试了跨X和Ku波段、具有交叉极化转换或线-圆极化转换功能的超宽带极化转换超表面,其周期性单元结构由不同宽度的阶梯状液态金属填充而成。相比于传统的极化转换超表面,该超表面具有宽频带、高极化转换率、体积小、无机械疲劳损伤、易共形和成本低等优点。

2 结构设计与仿真分析

2.1 结构设计

由于电磁超表面结构单元可以等效为电磁谐振腔,在设计超表面结构的过程中,首先对经典的微带谐振腔进行研究。图1为微带不同旋转角度下的S参数,由结果可知,微带旋转角度为45°时,谐振腔的谐振强度最大。复杂几何的谐振元件通常会产生多波段响应和整体增强的带宽,从根本上增加带宽。本文通过将微带结构合理变形成阶梯状,增加结构的设计自由度,并进行尺寸优化从而获得具有超宽带谐振效果的电磁超表面(图2)。

本文设计的阶梯状周期性超表面的具体结

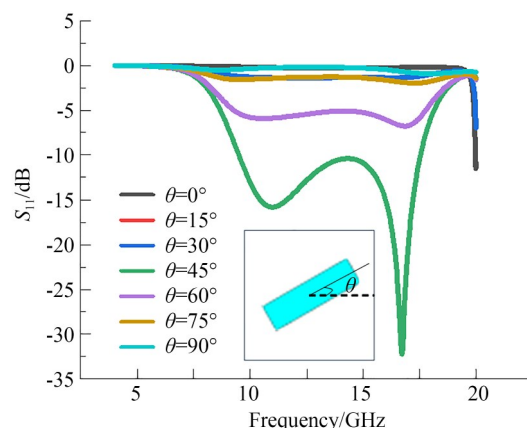


图1 不同倾斜角度微带谐振器的S参数

Fig. 1 S-parameters of microstrip resonators with different tilt angles

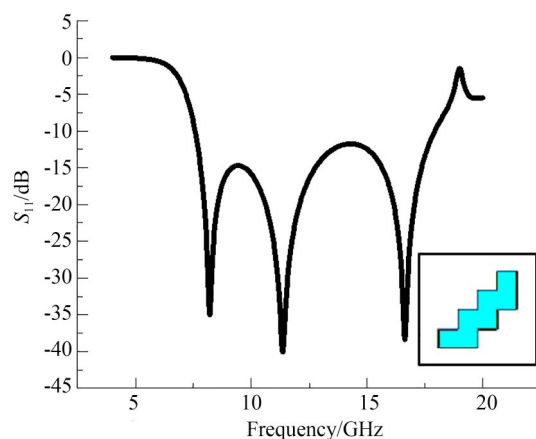


图2 阶梯状超表面的S参数

Fig. 2 S-parameters of step-shaped metasurface

构如图3所示,该超表面由金属反射底板、介质层、液态金属谐振器层、压敏胶和盖板5层结构组成。底端是电导率为 5.96×10^7 S/m,厚度为0.035 mm的铜箔;介质层由厚度为3 mm的PVC(聚氯乙烯)组成,利用激光雕刻机在介质层上雕刻液态金属通道;液态金属谐振器层是利用相对介电常数为7.41的镓铟锡合金填充介质上雕刻的通道构成的;最后,在顶端利用厚度为0.2 mm的压敏胶粘上厚度为0.3 mm的PVC盖板。周期性结构单元尺寸如图3所示,边长为10 mm,阶梯状单元结构和单元边缘之间的距离为1.8 mm,顶端金属阶梯状结构的宽度为1.6 mm。

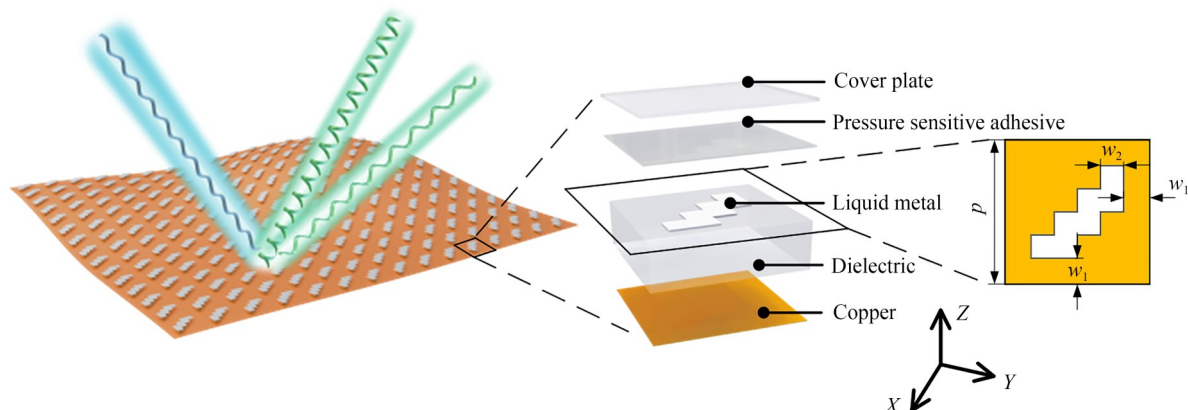


图3 超表面示意图(其中, w_1 为金属结构与边缘之间的距离, w_2 为金属结构的宽度, p 为周期结构的长度)

Fig. 3 Sketch of metasurface (where w_1 is the distance between the metal structure and the edge, w_2 is the width of the metal structure, and p is the length of the periodic structure)

2.2 仿真分析

本文采用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 优化超表面结构参数,模拟超表面的极化转换功能。在电磁仿真过程中,沿 X, Y 轴方向设置周期边界条件,沿 Z 轴方向设置开放边界条件,电磁波沿 Z 方向入射到超表面。在仿真结果中提取反射系数 r_{ij} ,其中,下标 i 和 j 表示反射电磁波极化方向。当线极化波入射时,反射系数与入射电场和反射电场之间的关系为:

$$r = \frac{E_R}{E_{in}} = \frac{|E_R|}{|E_{in}|} \exp[-i(\varphi_R - \varphi_{in})], \quad (1)$$

其中: E_R, E_{in} 分别为反射电场强度和入射电场强度, φ_R, φ_{in} 分别为反射电场和入射电场的强度相位。液态金属填充超表面通道之后,不同入射极化状态的电磁波反射系数如图4所示。在 7.536~17.232 GHz 频带上,交叉极化反射系数达 0.9 以上,且 X, Y 极化方向的共极化反射系数和交叉极化反射系数基本重合。超表面交叉极化转换性能采用极化转换率描述,即:

$$PCR = \frac{|r_{ij}|^2}{|r_{ij}|^2 + |r_{ji}|^2}, \quad (2)$$

极化转换的总能量转换率为:

$$ECR = \frac{|E_y^R|^2 + |E_x^R|^2}{|E_y^{in}|^2}, \quad (3)$$

其中: E_y^R, E_x^R, E_y^{in} 分别为反射的共极化电场强度、反射的交叉极化电场强度和入射电场强度。图5给出了液态金属将通道全部充满时的极化转

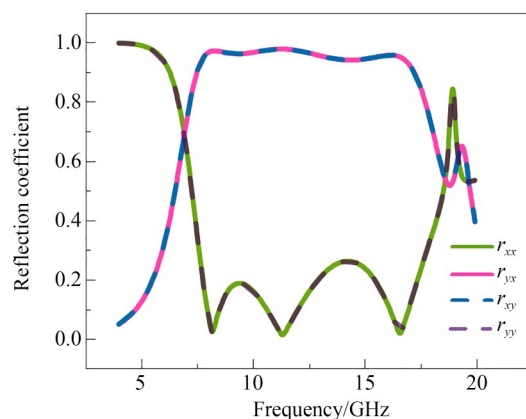


图4 超表面在不同极化状态入射波下的反射系数

Fig. 4 Reflection coefficient of proposed metasurface for incident waves with different polarization states

换率和极化转换的总能量转换率。可以看出,在相对带宽为 79.9% 的 7.536~17.712 GHz 频带上,该超表面的能量转换率优于 90%,最高可达 99.9%,即实现了共极化向交叉极化的转换。

为实现与其他器件共形,超表面要具有一定的入射角不敏感性。图9(a)为该超表面在不同入射角时的极化转换率,可以看出,该超表面随着入射角度的增加,极化转换的频带逐渐变窄,但在 7.648~14.864 GHz 频带内有较好的入射角不敏感特性。其谐振结构由具有柔性特质的液态金属构成,因此该器件具有共形能力,可以包覆在其他物体表面。

当该超表面阶梯状单元的宽度为 0.3 mm 时,能够在相对带宽为 12.3% 的 10.864~

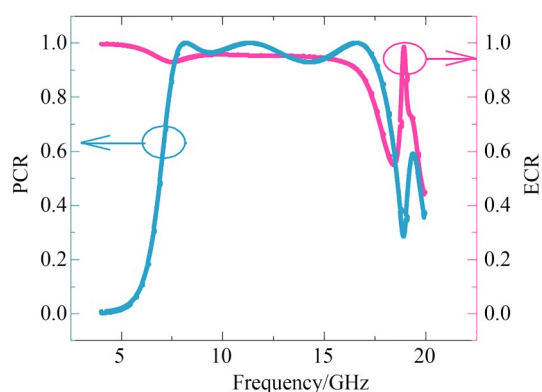


图5 超表面的极化转换率和总能量转换率

Fig. 5 Polarization conversion ratio and total energy conversion ratio of proposed metasurface

12.288 GHz频带上实现线极化向圆极化状态的转换。利用方位角表示超表面的极化状态,其表达式为:

$$\eta = \arctan\left(\left|E_x^R\right|/\left|E_y^R\right|\right). \quad (4)$$

图6显示出阶梯状单元宽度 w_2 分别为0.3 mm和1.6 mm时超表面反射电磁波的方位角,7.536~17.712 GHz频带反射电磁波的共极化方向场强趋近于0,方位角接近 90° ,即发生了共极化向交叉极化状态的转换;在10.864~12.288 GHz频带上,两极化方向分量的幅值相等且当两分量的相位差为 $\pi/2$,方位角接近 45° ,即发生了线极化向圆极化状态的转换。

金属阶梯状结构的宽度 w_2 为0.3 mm时,该超表面可以实现入射电磁波由线极化向圆极化的转换。超表面的圆极化转换性能利用轴比衡

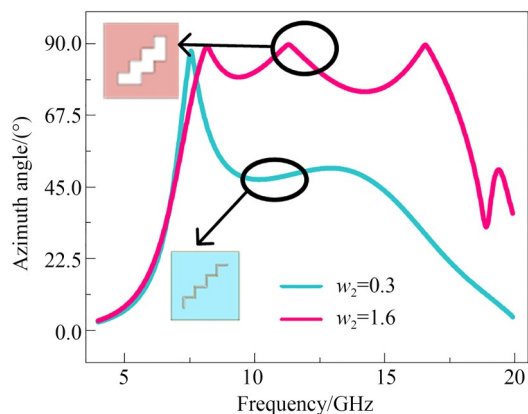
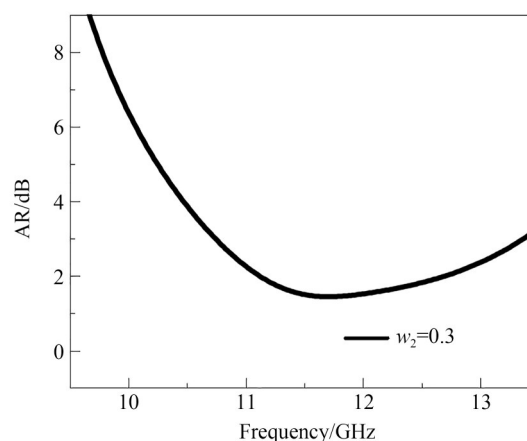
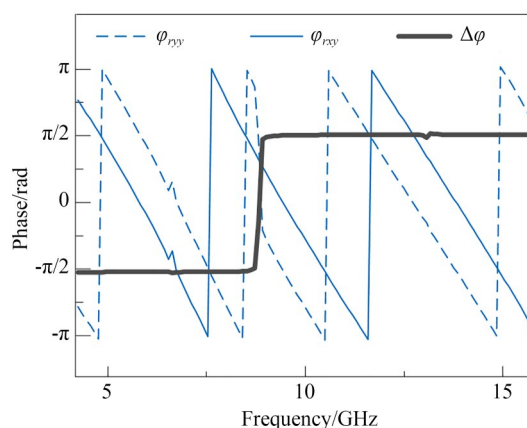


图6 不同阶梯宽度超表面的反射波方位角

Fig. 6 Azimuth angle of reflected wave of proposed metasurface for different step widths

量,如图7所示,可以看出在10.864~12.288 GHz频带上,轴比低于3 dB,即实现了线极化入射波向圆极化状态的转换。与线极化波不同,圆极化波在传送过程中以螺旋旋转的方式传播,其特征为:共极化出射波和交叉极化出射波的振幅相等,相位相差 $\pi/2$ 。如图8所示,在10.864~12.288 GHz频带上,两方向电磁波的相位差 $\Delta\varphi$ 为 $\pi/2$ 。

图7 阶梯宽度 $w_2=0.3$ mm时超表面的反射波轴比Fig. 7 Axial ratio of reflected wave of proposed metasurface with step width w_2 of 0.3 mm图8 阶梯宽度 $w_2=0.3$ mm时超表面的反射波相位Fig. 8 Phase of reflected wave of proposed metasurface with step width w_2 of 0.3 mm

2.3 物理机制

在电磁波照射下,超表面结构上会产生感应电流。根据谐振腔理论,该超表面可以视为二维谐振腔,此时超表面单元之间的缝隙可等效为电

容,导体上引起的感应电流可等效为电感,两者形成一个并联谐振回路,在特定频率的电磁波激励下发生共振,使得电磁波的极化方向重新定向。谐振腔的谐振频率与等效电容和等效电感之间的关系为:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (5)$$

对于上述二维谐振腔,需要通过分析电场分布计算出微带谐振腔的等效电容和等效电感。一种常见的方法是使用电场的能量密度和电场电势之间的关系来计算等效电容,分析磁场的分布和电流路径估算等效电感。其表达式为:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{U_0^2} \int_S \mathbf{E}_t \cdot \mathbf{E}_t^* dS, \quad (6)$$

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r}{I_0^2} \int_S \mathbf{H}_t \cdot \mathbf{H}_t^* dS, \quad (7)$$

其中: U_0, I_0 分别为两导体间的电压振幅和一个导体上的电流振幅, $\mathbf{E}_t, \mathbf{H}_t$ 分别为两导体间的横向复电场和复磁场。根据式(5)~式(7)可知,等效电容值和等效电感值与介质的介电常数、金属贴片的尺寸、介质基板的厚度有关。图9(b)为不同相对介电常数下的极化转换率,随着相对介电常数的增大,极化转换的频段逐渐红移。图9(c)给出了极化转换率随液态金属槽宽度的变化情况,可以看出,随着液态金属槽宽的增加,其极化转换率也在增加,对应的极化转换频段发生蓝移。图9(d)研究了超表面介质厚度对极化转换性能的影响,介质的厚度能够调节出射电磁波的相位,随着介质厚度从1.6 mm增加到3.2 mm,PCR超过90%的频带逐渐增大,频段逐渐红移;随着介质厚度的继续增大,实现极化转换的带宽逐渐减小,频段继续红移。可见,通过调整介质

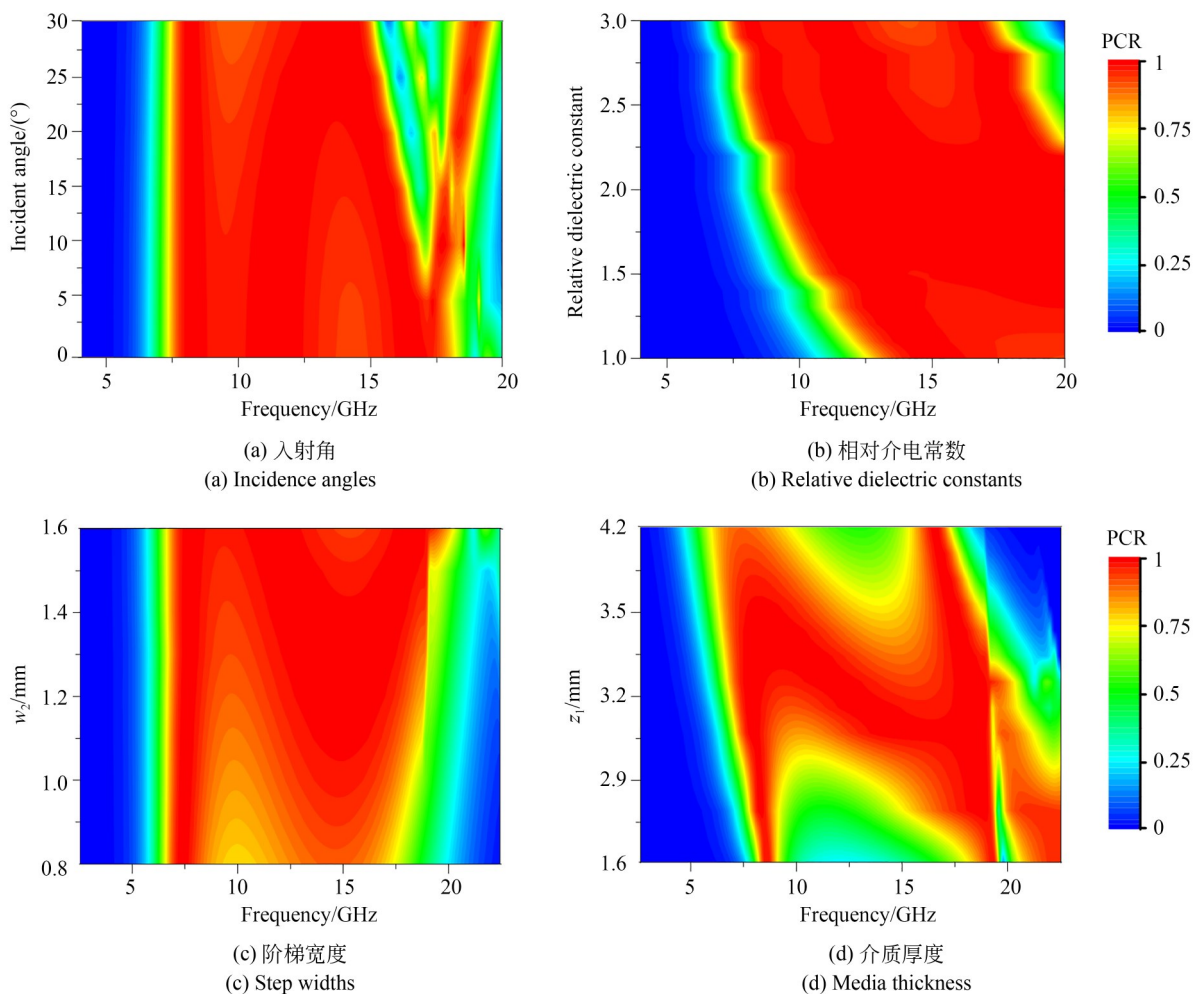


图9 参数对超表面极化转换率的影响

Fig. 9 Influence of parameters on polarization conversion ratio of proposed metasurface

的介电常数和基板的厚度、设计液态金属通道的形状尺寸可以调控极化转换超表面的工作频段和功能。

为了更加直观高效地研究超表面性能的物理机制,本文将 XOY 坐标系沿顺时针方向旋转 45° ,定义为 uov 正交坐标系,根据等效偶极子场谐振理论分析实现极化转换功能的表面电流。将 Y 极化入射电磁波沿着垂直方向分解,以仿真超表面单元几个频点的表面电流。线极化入射波和反射波可以表示为:

$$E_{in} = E_y = (\sqrt{2}/2)(\hat{u}E_0e^{ik_z z} + \hat{v}E_0e^{ik_z z}), \quad (8)$$

$$E_R = (\sqrt{2}/2)(\hat{u}r_u E_0 e^{i(k_z z + \varphi_u)} + \hat{v}r_v E_0 e^{i(k_z z + \varphi_v)}), \quad (9)$$

其中 r_u, r_v 为 u, v 方向的反射系数。在各向异性材料中,被分解至正交的两方向电磁波 E_u^R, E_v^R 具有可独立调控的波矢,使得金属表面的自由电子发生振荡,当顶层与底层的表面电流方向相反时,形成磁谐振;当顶层与底层的表面电流方向相同

时,形成电谐振。 u, v 轴上的磁谐振、电谐振分别调控 u, v 轴上的反射波电场分量的幅度和相位,从而实现极化转换。如图10(a)所示,在8.208 GHz处,谐振层电流与底板电流方向相反,在介质层中形成电流环,进而形成磁偶极子,并构成等效磁谐振器。由于磁偶极子产生的感应磁场指向右下方,它在 X 方向的磁场分量平行于入射磁场,不产生极化转换,而磁偶极子产生的感应磁场在 Y 方向上的磁场分量与入射电场方向平行,因此产生交叉极化转换。同理,如图10(b)所示,在16.496 GHz处,谐振层表面电流和底板表面电流方向相反,形成等效磁谐振。如图10(c)所示,在16.496 GHz附近,谐振层电流和底板感应电流方向相同,形成等效电谐振,感应电场在 X 方向的电场矢量与入射电场成 90° ,从而产生交叉极化。图11为4~20 GHz下谐振结构的最大表面电流,可见在5~7 GHz内,表面电流急剧升高,说明此时超表面结构发生了谐振。

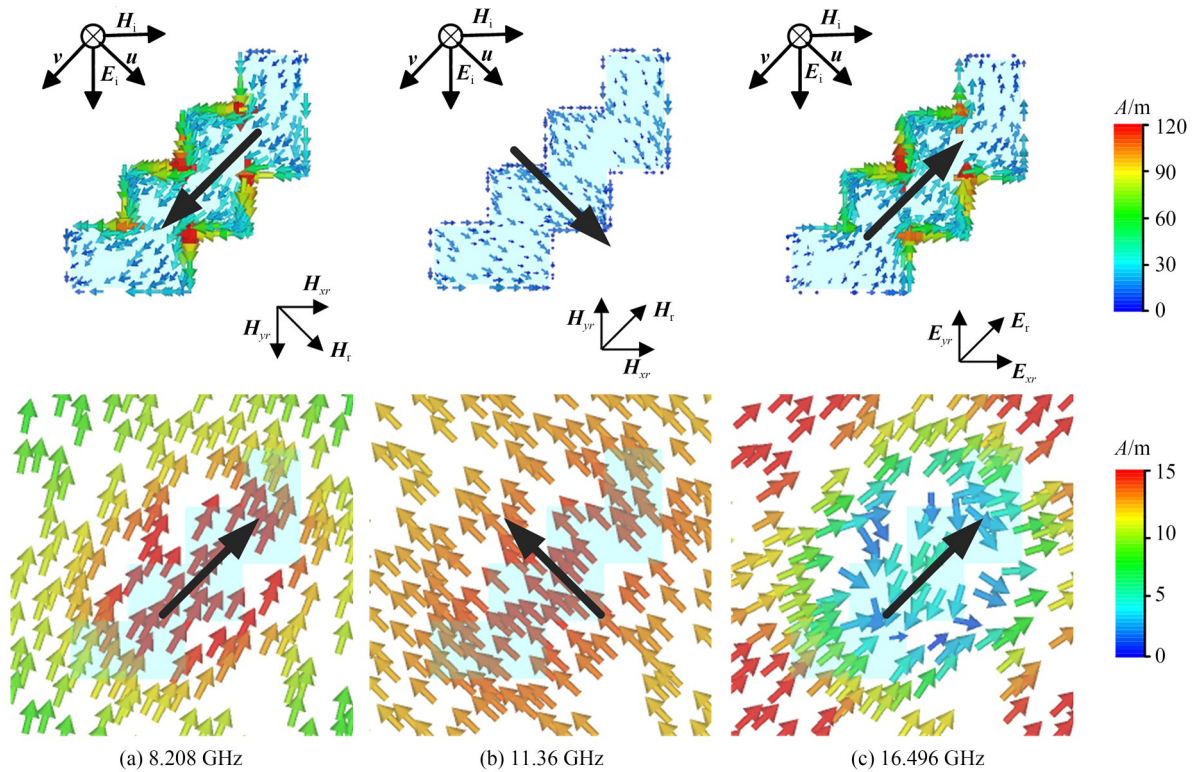


图10 超表面在不同谐振点处的表面电流(E_r 和 H_r 分别为偶极子产生的感应电场和感应磁场, E_i 和 H_i 分别为入射电场和入射磁场)

Fig. 10 Surface current of proposed metasurface at different resonant points (where E_r and H_r are the induced electric field and the induced magnetic field generated by the dipole, and E_i and H_i are the incident electric field and the incident magnetic field, respectively)

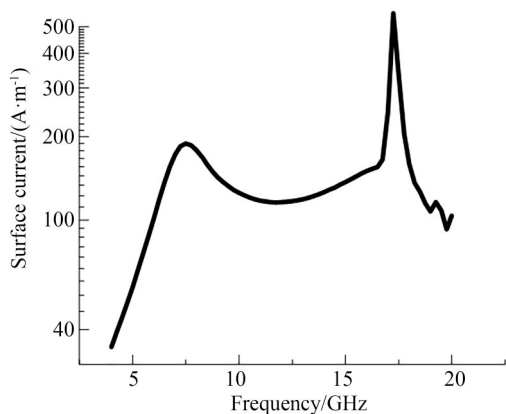


图 11 超表面谐振层的最大表面电流

Fig. 11 Maximum surface current of resonant surface of proposed metasurface

3 实验与结果讨论

为了验证上述结构设计和仿真结果,本文加工并测试了超表面器件。首先,使用激光雕刻机在 3 mm 厚的 PVC 介质上雕刻了深度为 0.15 mm 的 15×15 阵列单元结构沟槽;然后,利用压敏胶将盖板黏合在介质上,再将液态金属定量充入通道内并密封;最后将铜箔粘在介质背部,进而获得超表面器件。测试中,将一对间距为 30 cm,尺寸为 $20 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 的标准喇叭天线(发射天线和接收天线)连接到矢量网络分析仪。标准喇叭天线是一种常见的天线类型,通常用于微波和毫米波段,具有宽工作频带、高增益、宽角度覆盖、低副瓣辐射、结构简单和极化灵活等特性,能发射和接收各种极化角度的电磁波。样品放置于标准喇叭天线前方纵向距离 1.5 m 处,即测试条件符合远场。测量时,两个喇叭天线极化方向一致,得到共极化反射系数。保持发射天线的位置不变,将接收天线旋转 90° 使它与发射天线极化方向正交,测量得到器件的交叉极化反射系数(图 12)。

超表面样品的暗室测试装置如图 13 所示。超表面样品实物如图 14 所示,其单元阶梯状液态金属沟槽的尺寸参数 $w_1=1.8 \text{ mm}$, $w_2=1.6 \text{ mm}$,单元的周期数为 15×15 。这里对该超表面在 4~22 GHz 频段下的极化转换率进行了仿真和实测分析。将测试结果与现有文献进行比较(表 1),如极化转换功能、中心频率、相对带

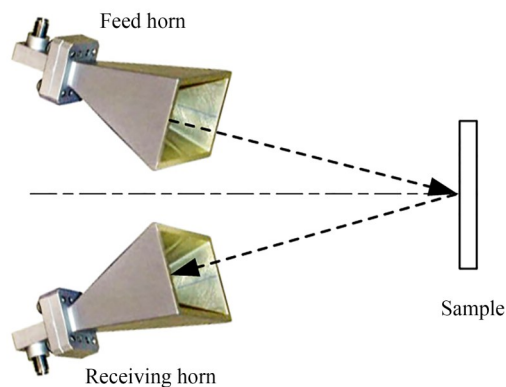


图 12 超表面样品测试示意图

Fig. 12 Schematic diagram of metasurface sample test

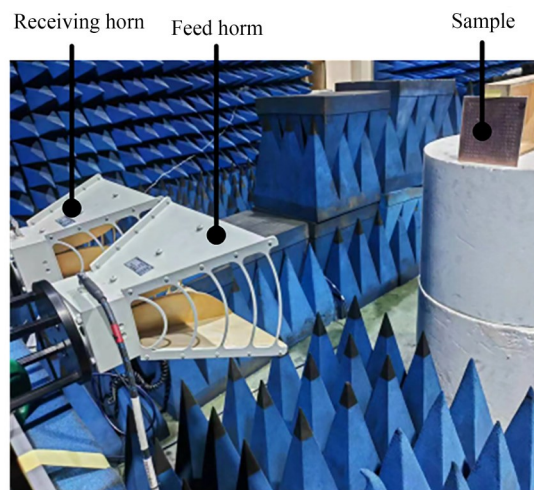


图 13 超表面样品测试实景

Fig. 13 Real scene of metasurface sample test

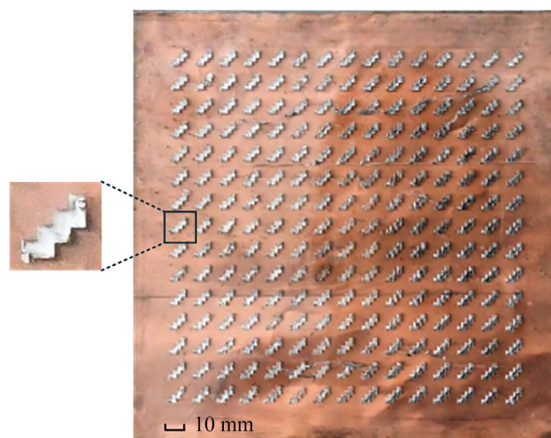


图 14 超表面样品

Fig. 14 Sample of proposed metasurface

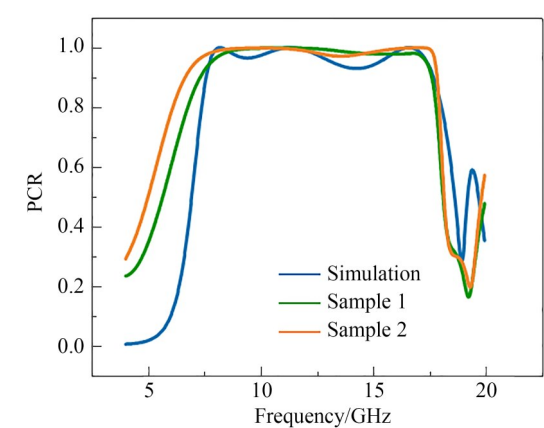


图 15 超表面仿真和测试结果

Fig. 15 Simulation and experimental results of proposed metasurface

宽和柔性等参数,可见本文设计的电磁超表面具有优异的带宽和材质性能。图 15 为阶梯状液态金属槽宽 $w_2=1.6\text{ mm}$ 时,超表面极化转换率的仿真和实验测试结果对比。测试结果表明,样品 1 在 $7.33\sim17.63\text{ GHz}$ 频带上能够实现共极化状态向交叉极化的转换,与仿真结果之间的相对误差为 4.20% ;样品 2 在 $6.66\sim17.87\text{ GHz}$ 频带上的极化转换率超过 90% ,实现了共极化状态向交叉极化的转换,与仿真结果之间的相对误差为 4.70% 。实验结果验证了本文所研制超表面的极化转换功能。在实验测试中,为避免零角度入射时发射喇叭天线和接收喇叭天线之间的信号耦合,人为设置标准喇叭天线之间的角度误差为 8° ,从而导致测试结果出现小幅度偏移。

表 1 与已报道的极化转换超表面的比较

Tab. 1 Comparison of polarization conversion between proposed and reported metasurfaces

Metasurface	Polarization conversion property	Center frequency/GHz	Fractional bandwidth/%	Flexibility
Ref. [20]	Linear-linear	9.3	59.6	No
	Linear-circular	14.7	13.0	
Ref. [21]	Linear-circular	24.2	73.6	No
Ref. [23]	Linear-linear	9.5	31.6	No
This work	Linear-linear	12.7	79.9	Yes

4 结 论

本文提出了一种基于液态金属的跨 X 和 Ku 波段的超宽带极化转换电磁超表面,该超表面由阶梯状阵列单元构成。当阶梯状液态金属宽度为 1.6 mm 时,在相对带宽 79.90% 的 $7.595\sim17.712\text{ GHz}$ 频带上,该超表面的极化转换率优于 90% ,具有共极化向交叉极化转换的功能。当阶梯状液态金属宽度为 0.3 mm 时,在相对带宽 12.30% 的 $10.864\sim12.288\text{ GHz}$ 的频带上,该超

表面具有线-圆极化转换的功能;在相对带宽为 3.54% 的 $7.328\sim7.592\text{ GHz}$ 的频带上,该超表面的极化转换率优于 90% ,具有共极化向交叉极化转换功能。极化转换特性测试结果表明,实验结果与仿真结果的相对误差为 4.20% ,理论设计与实验验证结果一致,从而验证了本文提出的跨 X 和 Ku 波段的超宽带极化转换电磁超表面的多功能性和有效性。该超表面具有宽频带、高极化转换率、体积小、无机械疲劳损伤、易共形和成本低等优点,具有重要的应用价值。

参考文献:

[1] YANG W, WANG T C, MAO J Q. Adaptive edge finite element method and numerical design for metasurface cloak[J]. *Computer Physics Communications*, 2023, 292: 108858.

[2] LIAO J M, JI C, YUAN L M, *et al.* Polarization-insensitive metasurface cloak for dynamic illusions with an electromagnetic transparent window [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15 (13): 16953-16962.

[3] XING W T, SI L M, DONG L, *et al.* Rapid design of hybrid mechanism metasurface with random coding for terahertz dual-band RCS reduction [J]. *Optics Express*, 2023, 31(17): 28444-28458.

- [4] FARZIN P, SOLEIMANI M. Graphene-based metasurface for real-time control of three electromagnetic wave modes and polarization state [J]. *Diamond and Related Materials*, 2023, 139: 110279.
- [5] XU H X, WANG Y Z, WANG C H, *et al.* Deterministic approach to achieve full-polarization cloak [J]. *Research*, 2021, 2021: 6382172.
- [6] BAI J, YAO Y. Highly efficient anisotropic chiral plasmonic metamaterials for polarization conversion and detection[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(9): 14263-14274.
- [7] WU G B, DAI J Y, CHENG Q, *et al.* Sideband-free space-time-coding metasurface antennas [J]. *Nature Electronics*, 2022, 5: 808-819.
- [8] JIA X L, KAPRAUN J, WANG J X, *et al.* Metasurface reflector enables room-temperature circularly polarized emission from VCSEL[J]. *Optica*, 2023, 10(8): 1093.
- [9] 王进东, 叶文成, 张伟婷, 等. 超构表面红外分光阵列设计[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(4): 674-681.
WANG J D, YE W CH, ZHANG W T, *et al.* Design of infrared metasurface splitter arrays [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(4): 674-681. (in Chinese)
- [10] LI N, ZHENG S L, YANG H, *et al.* A broadband dual-polarized reflective metasurface for THz OAM communication [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2024, 72(2): 1302-1311.
- [11] WANG J W, HUANG Z A, WAN X, *et al.* Polarization and direction-of-arrival estimations based on orthogonally polarized digital programmable metasurfaces [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2023, 56(46): 465001.
- [12] LI Z, WAN C W, DAI C J, *et al.* Actively switchable beam-steering via hydrophilic/hydrophobic-selective design of water-immersed metasurface [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(17): 2100297.
- [13] HUANG X J, MA X, LI X W, *et al.* Simultaneous realization of polarization conversion for reflected and transmitted waves with bi-functional metasurface[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 2368.
- [14] ZENG L, ZHANG H F, ZHANG D. A tunable metamaterial-based linear-to-circular polarization converter regulated solid state plasma in S-band [J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(12): 125103.
- [15] ZHAO Y J, YANG R C, WANG J Y, *et al.* Dual-mode terahertz broadband polarization conversion metasurface with integrated graphene-VO₂ [J]. *Optics Communications*, 2022, 510: 127895.
- [16] HU Q, CHEN K, ZHANG N, *et al.* Arbitrary and dynamic poincaré sphere polarization converter with a time-varying metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(4): 2101915.
- [17] YU H C, CAO X Y, GAO J, *et al.* Design of a wideband and reconfigurable polarization converter using a manipulable metasurface[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(11): 3373.
- [18] LIANG Y, DONG Y Y, JIN Y X, *et al.* Terahertz vortex beams generated by the ring-arranged multilayer transmissive metasurfaces [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2022, 127: 104441.
- [19] LIN B Q, WU J L, DA X Y, *et al.* A linear-to-circular polarization converter based on a second-order band-pass frequency selective surface [J]. *Applied Physics A*, 2016, 123(1): 43.
- [20] ZHENG Q, GUO C J, DING J. Wideband metasurface-based reflective polarization converter for linear-to-linear and linear-to-circular polarization conversion[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(8): 1459-1463.
- [21] WANG H B, CHENG Y J, CHEN Z N. Wideband and wide-angle single-layered-substrate linear-to-circular polarization metasurface converter [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(2): 1186-1191.
- [22] JIA Y, LIU Y, ZHANG W, *et al.* Ultra-wideband metasurface with linear-to-circular polarization conversion of an electromagnetic wave[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(3): 597-604.
- [23] KHAN M I, KHALID Z, TAHIR F A. Linear and circular-polarization conversion in X-band using anisotropic metasurface [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 4552.
- [24] LIU Y, LIU Z S, WANG Q, *et al.* Low-RCS antenna array with switchable scattering patterns employing microfluidic liquid metal alloy-based metasurface [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(12): 8955-8960.
- [25] LIM D, LIM S. Liquid-metal-fluidically switchable metasurface for broadband and polarization-in-

- sensitive absorption [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 40854-40859.
- [26] WU P C, ZHU W M, SHEN Z X, *et al.* Broad-band wide-angle multifunctional polarization converter via liquid-metal-based metasurface [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(7): 1600938.
- [27] SANUSI O M, WANG Y, ROY L. Reconfigurable polarization converter using liquid metal based metasurface [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(4): 2801-2810.

作者简介:



邵亚楠(1999—),女,黑龙江佳木斯人,硕士研究生,2021年于东北农业大学获得学士学位,主要从事电磁超表面的研究。E-mail: shaoyanan2021@163.com

通讯作者:



邓永波(1985—),男,山东临朐人,博士,研究员,博士生导师,2007年于青岛大学获得学士学位,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事微纳光学和微流体方面的微纳功能结构拓扑优化研究。E-mail: dengyb@ciomp.ac.cn