

单层高效透射型相位梯度超表面的设计及实验验证

庄亚强 王光明 张晨新 张小宽 宗彬锋 马卫东 王亚伟

Design and experimental verification of single-layer high-efficiency transmissive phase-gradient meta-surface

Zhuang Ya-Qiang Wang Guang-Ming Zhang Chen-Xin Zhang Xiao-Kuan Zong Bin-Feng Ma Wei-Dong Wang Ya-Wei

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 154101 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.154101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于多开口田字形宽频带低损耗左手材料

[Broadband and low-loss left-handed materials based on multi-opening cross shape structures](#)

物理学报.2016, 65(16): 164101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164101>

基于梯度超表面的反射型线-圆极化转换器设计

[Design of reflective linear-circular polarization converter based on phase gradient metasurface](#)

物理学报.2016, 65(15): 154102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154102>

典型大气窗口太赫兹波传输特性和信道分析

[Atmospheric window characteristic and channel capacity of THz wave propagation](#)

物理学报.2016, 65(13): 134101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134101>

太赫兹波被动遥感卷云微物理参数的敏感性试验分析

[Sensitivity analysis of terahertz wave passive remote sensing of cirrus microphysical parameters](#)

物理学报.2016, 65(13): 134102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134102>

基于单层反射超表面的宽带圆极化高增益天线设计

[Broadband circularly polarized high-gain antenna design based on single-layer reflecting metasurface](#)

物理学报.2016, 65(10): 104101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104101>

单层高效透射型相位梯度超表面的设计及实验验证*

庄亚强 王光明[†] 张晨新 张小宽 宗彬锋 马卫东 王亚伟

(空军工程大学防空反导学院, 西安 710051)

(2016年3月4日收到; 2016年5月23日收到修改稿)

本文设计了一种单层高效透射型相位梯度超表面, 并通过仿真和实验进行了验证. 在圆极化波入射条件下, 超表面单元的交叉极化转化率大于90%的频带范围为14—15.8 GHz. 通过对单元的面内旋转可实现在保持高交叉极化透射幅度的前提下对交叉极化透射相位进行调控. 基于6个旋转步进为 30° 的超表面单元周期排布设计了一维相位梯度超表面, 该超表面对左/右旋圆极化波分别形成方向相反的相位梯度, 因此线极化波经过超表面后将会分离成两束对称传播的圆极化波. 15 GHz处的近场电场分布和远场归一化透射能量方向图的仿真结果表明, 奇异透射角仿真值为 33.5° , 与理论设计值(33.75°)符合得很好. 仿真并测试了透射功率密度谱, 结果表明在14.9—15.3 GHz频带范围内垂直入射的线极化波被高效分离成两束圆极化波. 相比于以往的透射型极化调制超表面, 该超表面具有工作效率高、厚度薄、重量轻等优点, 在电磁波传播和极化操控领域具有重要的应用价值.

关键词: 相位梯度超表面, 奇异透射, 高效

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf

DOI: 10.7498/aps.65.154101

1 引言

近几年, 超表面作为超材料的二维平面形式, 凭借其具有天然材料所不具备的超常物理特性, 以及二维结构的低损耗、易加工等优异性能, 可实现对电磁波的幅度、相位和极化等特性的自由操控, 在隐身技术^[1-3]、高性能天线^[4-6]、极化调制^[7-14]等方面得到了广泛应用.

作为超表面的重要组成部分, 相位梯度超表面(phase-gradient metasurface, PGM)由Capasso课题组在2011年通过V形结构在光波段首次实现^[15], 并验证了奇异折射满足广义斯涅耳折射定律. 由于相位梯度超表面在面内方向引入人工波矢, 与传统光学元件通过传播路径的相位积累实现改变波束传播方向相比, 在操控出射波的传播方向上具有更大的自由度, 超表面的亚波长厚度结构可

以极大地实现光学元件的小型化. 周磊课题组采用H形结构设计了光波段的反射式PGM, 在不同的入射角度下分别实现了负反射、正反射及表面波耦合^[16], 并首次验证了梯度超表面实现高效耦合表面等离激元的条件^[17]. 天津大学杨泉龙等^[18]实现了太赫兹频段范围内的波束聚焦, 设计出了太赫兹透镜. 在极化调制方面, Grady等^[7]基于高效的透射型太赫兹超材料, 设计了线极化旋转奇异折射超表面. 崔铁军课题组^[8]利用多谐振超表面设计了超宽带的极化转换反射型超表面. Zhang等^[9]设计了宽带宽角度下同时实现两种极化转换的反射型超表面. 赵晓鹏课题组^[10]采用手性超材料实现了高效极化旋转超表面. 屈绍波课题组^[11]采用开口椭圆环设计的超表面实现了超宽带的线极化旋转. 我们课题组^[12]基于多层透射型梯度超表面, 设计了高效极化分离器.

* 国家自然科学基金(批准号: 61372034)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wgming01@sina.com

分析发现, 目前对单层极化调制相位梯度超表面主要集中在反射型, 而透射型极化调制相位梯度超表面大多采用多层结构实现高效工作^[4,19], 不可避免地带来加工难度大、成本高、不易于集成等缺点. 本文基于单元旋转技术设计了一种单层高效透射型相位梯度超表面, 能够有效克服上述缺点. 首先, 设计了圆极化波入射条件下的高效交叉极化透射超表面. 然后在此基础上设计了一维相位梯度超表面单元, 当圆极化波垂直入射时, 透射波转换为交叉极化波并发生了奇异透射, 当线极化波垂直入射时, 透射波被分离成两束传播方向对称旋向相反的圆极化波. 该单层 PGM 厚度仅为 1.5 mm, 相当于 0.075λ (λ 为工作波长), 与以往透射型极化调制超表面相比优势十分突出, 在电磁波传播及极化操控领域具有重要潜在应用价值.

2 高效透射型相位梯度超表面的设计

2.1 超表面单元设计

圆极化波的透射相位可以通过单元旋转手段进行调节. 假定右旋圆极化波沿 $+z$ 方向垂直入射到如图 1(a) 所示的超表面单元上, 入射波表示为

$$\mathbf{E}_i = (\hat{x} + j\hat{y}) e^{-jkz} e^{-j\omega t}. \quad (1)$$

那么透射波为

$$\mathbf{E}_t = (\hat{x}T_x + j\hat{y}T_y) e^{-jkz} e^{-j\omega t}, \quad (2)$$

式中, T_x 和 T_y 分别表示入射波 x 分量和 y 分量的透射系数. 当单元结构旋转 θ 时, 如图 1(b) 所示, 旋转后的坐标系 $x'oy'$ 与原坐标系 xoy 的关系为

$$\begin{cases} \hat{x} = \hat{x}' \cos \theta - \hat{y}' \sin \theta, \\ \hat{y} = \hat{x}' \sin \theta + \hat{y}' \cos \theta. \end{cases} \quad (3)$$

因此入射波在坐标系 $x'oy'$ 的表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_i' &= [(\hat{x}' \cos \theta - \hat{y}' \sin \theta) + j(\hat{x}' \sin \theta + \hat{y}' \cos \theta)] \\ &\quad \times e^{-jkz} e^{-j\omega t} \\ &= (\hat{x}' + j\hat{y}') e^{j\theta} e^{-jkz} e^{-j\omega t}. \end{aligned} \quad (4)$$

由于透射系数与坐标系的选择无关, 则透射波在坐标系 $x'oy'$ 中可表示为

$$\mathbf{E}_t' = (\hat{x}'T_x + j\hat{y}'T_y) e^{j\theta} e^{-jkz} e^{-j\omega t}. \quad (5)$$

当两个分量的透射幅度满足 $|T_x| = |T_y|$, 透射相位满足 $|\arg(T_x) - \arg(T_y)| = \pi$, 透射波在坐标系 xoy 中可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_t &= T_x (\hat{x}' - j\hat{y}') e^{j\theta} e^{-jkz} e^{-j\omega t} \\ &= T_x [x \cos \theta + y \sin \theta - j(-x \sin \theta + y \cos \theta)] \\ &\quad \times e^{j\theta} e^{-jkz} e^{-j\omega t} \\ &= T_x (\hat{x} - j\hat{y}) e^{j2\theta} e^{-jkz} e^{-j\omega t}. \end{aligned} \quad (6)$$

由 (6) 式可得, 右旋圆极化波经过该单元透射后被转化为左旋圆极化波, 且透射波相对于入射波的透射相移是旋转角度的两倍.

超表面单元如图 1 所示, 整个单元结构周期为 $p = 6$ mm, 由三层构成, 上下两层黄色部分为金属线结构, 其尺寸参数分别为 $r_1 = 2.8$ mm, $r_2 = 2.6$ mm, $l_1 = 2.96$ mm, $l_2 = 1.21$ mm, $w = 0.2$ mm, $w_1 = 2.2$ mm. 中间层为厚度 $h = 1.5$ mm 的聚四氟乙烯玻璃布板 ($\epsilon_r = 2.65$, $\tan \delta = 0.001$). 利用 CST Microwave Studio 频域

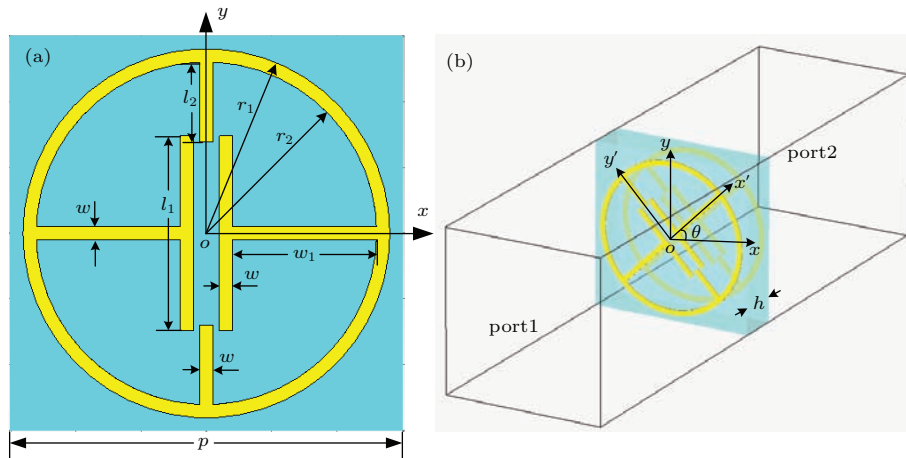


图 1 (网刊彩色) (a) 超表面单元的正视图; (b) 旋转超表面单元的透视图

Fig. 1. (color online) (a) The top view of unit cell; (b) the perspective view of rotated unit cell.

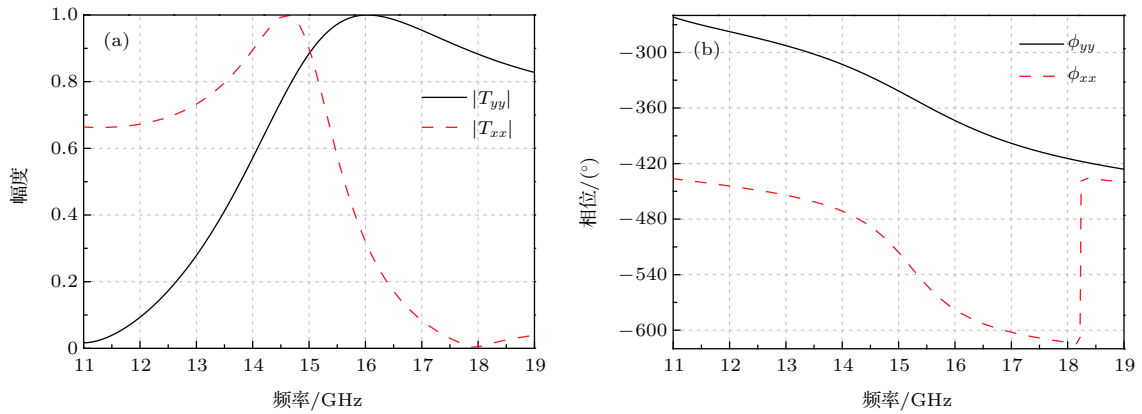


图2 超表面单元透射系数的仿真结果 (a) 透射幅度; (b) 透射相位

Fig. 2. The simulated transmission coefficient of metasurface: (a) Transmission magnitude; (b) transmission phase.

求解器对单元进行仿真, x 和 y 方向的边界条件设置为 unit cell 周期性边界条件, z 方向的边界条件设置为 open (and space), x -和 y -极化波从 port2 垂直激励, 仿真得到的单元同极化透射系数如图 2 所示.

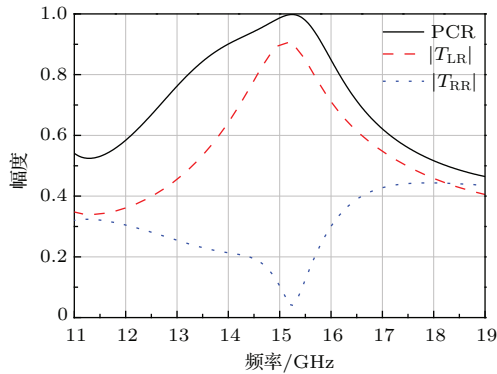


图3 圆极化波入射时的透射幅度和极化转换率

Fig. 3. The transmission magnitude and PCR under CP wave incidence.

由图 2 可以看出, 在 15 GHz 处, x -和 y -极化波的透射幅度相等且为 0.9, 两者的透射相位差约为 π , 因此该单元能够用于实现圆极化条件下的高效交叉极化透射. 接下来采用圆极化波激励验证单元的高效交叉极化透射性能, 边界条件设置与上述单元仿真的设置相同, 设置右旋圆极化波垂直激励, 透射幅度的仿真结果如图 3 所示, 可知交叉极化透射幅度 $|T_{LR}|$ 在 15 GHz 处达到最大值, 约为 0.9. 采用交叉极化转换率 (polarization conversion ratio, PCR) 表征交叉极化分量在透射波中所占的比例, PCR 的定义为

$$PCR = T_{LR}^2 / (T_{LR}^2 + T_{RR}^2), \quad (7)$$

式中, T_{LR} 为交叉极化透射系数, T_{RR} 为同极化透射系数. 由 (7) 式计算得到的 PCR 如图 3 中的黑色

实线所示, 可以得出, 在 14—15.8 GHz 频带内, 交叉极化转换率大于 90%, 表明右旋圆极化波经过该单元透射后将被高效转换为左旋圆极化波. 同理可得, 左旋圆极化波经过超表面单元后, 透射波将为右旋圆极化波.

2.2 高效透射型相位梯度超表面设计

针对圆极化波激励下, 所设计的高效透射型单元的交叉极化透射相位可以通过面内旋转调节, 因此本文基于六个不同旋向的单元空间排布实现了一维相位梯度超表面, 如图 4 所示, 相邻单元之间的旋转角度步进为 30° , 由上述理论分析可知相邻单元的透射相位差为 $\pm 60^\circ$, 左旋圆极化波入射时, 取“+”, 右旋圆极化波入射时, 取“-”. 采用 CST Microwave Studio 频域求解器分别对六个单元进行仿真验证, 15 GHz 处单元的交叉极化透射系数随旋转角度的仿真结果如图 5 所示. 由图 5 可以看出, 单元的交叉极化透射幅度不会随着旋转角度的变化而改变, 基本保持在 0.9 不变, 而交叉极化透射相位与旋转角度呈两倍的线性关系, 这与前文理论分析的结果相一致, 并且对入射的左/右旋圆极化波产生了方向相反的相位梯度.

当圆极化波垂直入射至相位梯度超表面时, 透射波将会产生奇异透射现象, 奇异透射角度可根据广义斯涅耳折射定律^[15]确定:

$$n_t \sin(\theta_t) - n_i \sin(\theta_i) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\varphi}{dx}, \quad (8)$$

式中, n_t 和 n_i 分别表示透射空间和入射空间的折射率, θ_t 和 θ_i 分别为透射角和入射角, $d\varphi/dx$ 表示沿 x 方向的梯度, λ_0 为自由空间中的波长. 当圆极化波从自由空间垂直入射并透射到自由空间时, 透

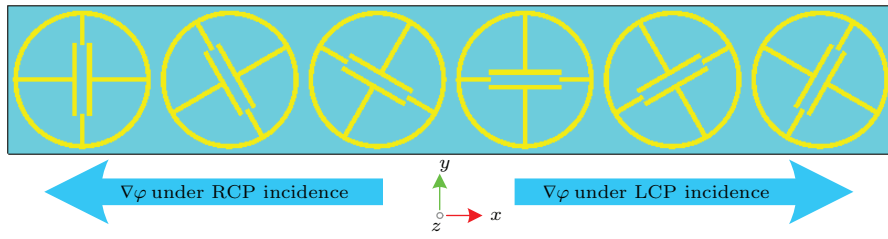


图4 (网刊彩色) 一维相位梯度超表面示意图

Fig. 4. (color online) Schematic view of the one-dimensional PGM.

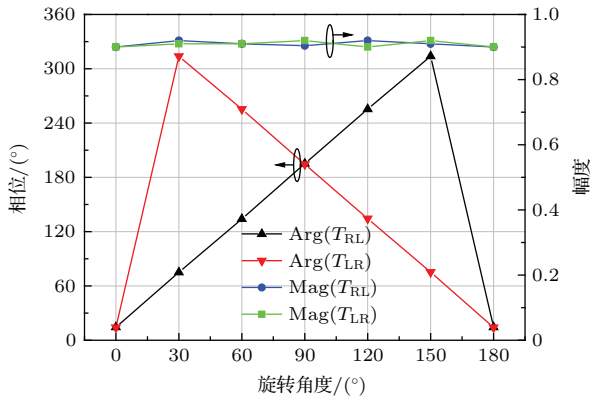


图5 (网刊彩色) 不同旋转角度单元的透射系数仿真结果
Fig. 5. (color online) The simulated transmission coefficient of unit cells for different rotation angles.

射角为 $\theta_t = \arcsin\left(\frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\varphi}{dx}\right)$. 在本文设计中, $f = 15$ GHz 处的透射角 $\theta_t = \pm 33.75^\circ$.

3 仿真与实验验证

3.1 仿真与结果分析

众所周知, 线极化波可以分解为两个旋向相反且幅度相等的圆极化波分量, 因此当线极化波垂直入射至该超表面时, 由于该超表面对左旋和右旋圆极化波产生方向相反的相位梯度, 线极化波将被分离成两束沿对称方向传播的圆极化波. 将图 4 所示的一维相位梯度超表面分别在 x 和 y 方向进行周期排布, 形成大小为 $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$ 的有限大超表面, 通过 CST Microwave Studio 时域求解器对有限大超表面进行仿真, x , y 和 z 方向的边界条件均设置为 open (and space), 激励采用 x 极化平面波垂直入射. 接下来分别从近场和远场两个方面验证该超表面对圆极化波所具有的高效奇异透射功能. 图 6 (a) 给出了近场电场分布的仿真结果, 图中黑色箭头标注的波束为垂直入射的 x 极化波, 绿色箭头标注的波束为右旋圆极化透射波, 黄色箭头标注的波束为左旋圆极化透射波. 由电场分布图可直

观地看出, 垂直入射的 x 极化平面波经过超表面后被分离成两束平面波, 并且传播方向关于法线方向对称, 验证了该超表面对不同旋向的圆极化波具有方向相反的相位梯度, 与理论分析相一致. 图 6 (b) 给出了 15 GHz 处的远场归一化能量方向图, 可以看出, 该超表面在 15 GHz 处具有较高的透射率, 垂直入射的电磁波能够完全透过超表面, 透射波为沿方向对称且能量相等的两束圆极化波. 两个透射峰分别出现在 $\theta_t = \pm 33.5^\circ$, 而基于广义斯涅耳折射定律得到的理论值为 $\theta_t = \pm 33.75^\circ$, 可见两者符合得较好, 角度的微小差异是因为有限大超表面在仿真中存在的边缘效应所导致的.

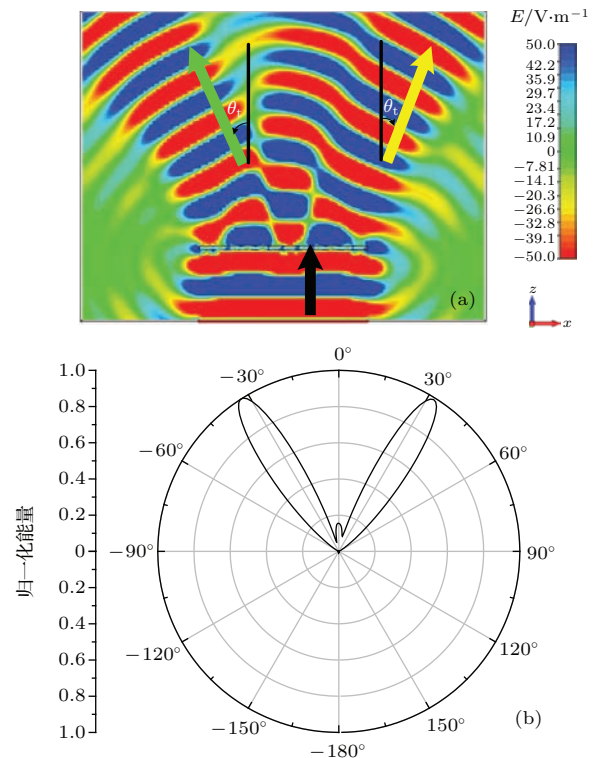


图6 (网刊彩色) $f = 15$ GHz, x 极化波垂直入射的仿真结果 (a) x 分量电场分布图; (b) 归一化能量方向图

Fig. 6. (color online) The simulation results under x -polarized wave normal incidence at $f = 15$ GHz: (a) Distribution of x component of electric field; (b) normalized power pattern.

为了研究该超表面进行高效奇异透射的工作带宽,图7给出了14.5—16 GHz频带内 x 线极化波垂直入射时 xoz 平面的归一化透射功率密度谱,它是由频段内各频点的归一化能量方向图合成得到的.横坐标为透射角,纵坐标为频率,采用颜色深浅来表征能量强弱,用黑色“☆”符号标记基于广义斯涅耳折射定律得到的奇异透射角理论值.由图可知,在整个频带内,透射波的能量主要沿两个对称的方向传播,并且传播方向与理论计算值相符合,奇异透射角度随着频率的增大而减小.特别是在14.9—15.3 GHz频带内,几乎全部能量都分布在两个奇异透射方向,而在该频段外,能量除了分布在奇异透射方向上,还分布在常规的法线方向上,这是由于相位梯度在该频段外不再严格满足所导致的.

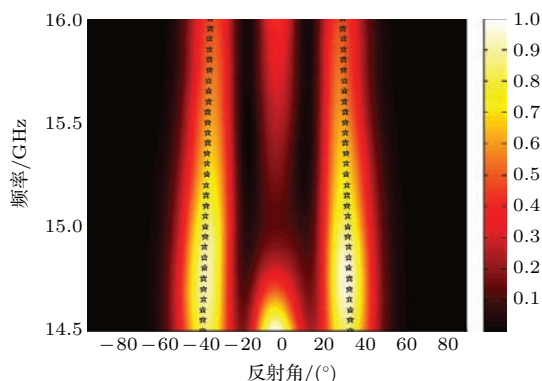


图7 (网刊彩色) x 极化波垂直入射时, xoz 面上的透射功率密度谱

Fig. 7. (color online) The transmissive power intensity spectra at xoz plane for x -polarized wave normal incidence.

3.2 样品加工与实验测试

为了验证所设计的相位梯度超表面,采用印刷电路板技术加工了尺寸为360 mm × 360 mm的超

表面实验样品,如图8(a)所示,介质基板采用厚度 $h = 1.5$ mm的聚四氟乙烯玻璃布板.整个测试过程采用自由空间法在微波暗室中进行,实验测试平台如图8(b)所示.

在测试过程中,首先将样品竖直固定在旋转泡沫塔的中心,在样品的正前方固定一个用于发射 x 极化电磁波的标准增益喇叭,在泡沫塔正前方的支架上固定一个用于接收电磁波的标准增益喇叭,两个喇叭的中心保持在同一高度.在测试时,通过泡沫塔的旋转来等效接收喇叭的旋转,从而可以接收不同方向的回波能量.在测试超表面样品前,先用与测试样品尺寸相同的金属平板对测试系统进行归一化校准,可以有效减小后续测试过程中的测量误差.测得的 xoz 面上透射功率密度谱如图9所示,图中黑色“☆”符号表示由广义斯涅耳折射定律得到的奇异透射角理论值.

从图9可以直观地观察到:垂直入射的 x 极化波经过超表面后,透射波被分离成沿对称方向传播的两束波,而且传播方向与基于广义折射定律计算的理论值符合得较好,同时也说明了测试结果与仿真结果的一致性.测试结果相对于仿真结果的微小偏移是由于用于发射天线与超表面的距离较近,导致其辐射出的波与仿真时设置的平面波无法完全等效;另外,加工所采用的介质基板材料参数与仿真中设置的材料参数存在的细微差别也是原因之一.从实测结果还可以得出,在奇异透射出的两束主波束之间还存在一些副瓣,造成实测结果不像仿真结果那么纯净,这是因为发射天线辐射出的电磁波有一部分从测试样品的边缘绕射过去并被接收.但是,总体上该测试结果验证了所设计的超表面具有高效奇异透射功能.

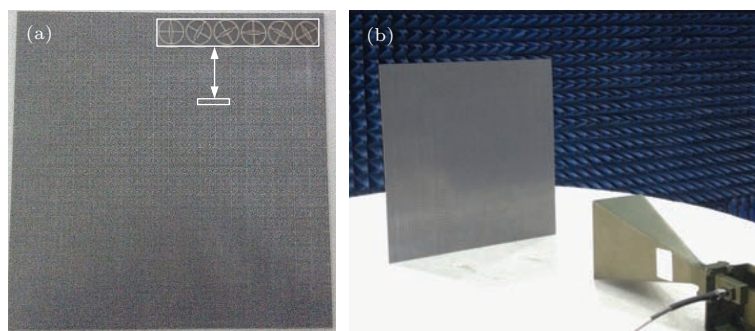


图8 (网刊彩色) (a) 测试样品; (b) 实验测试平台

Fig. 8. (color online) (a) The measurement sample; (b) the experimental measurement setup.

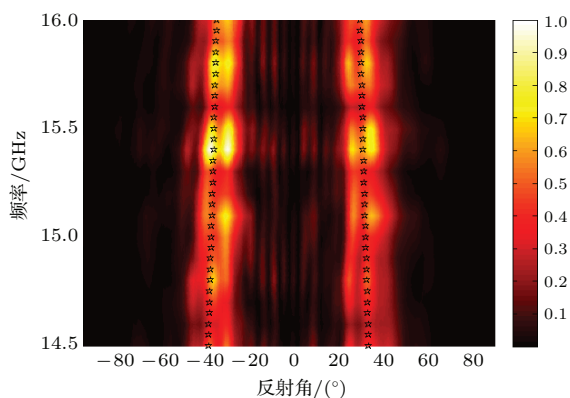


图9 (网刊彩色) 透射功率密度谱的测试结果

Fig. 9. (color online) The measured results of transmissive power intensity spectra.

4 结 论

本文设计并加工了一种单层超薄高效透射型相位梯度超表面. 首先, 设计了一种圆极化波入射条件下的交叉极化透射超表面单元, 在14—15.8 GHz频率范围内, 交叉极化转化率均大于90%. 该超表面单元的交叉极化透射相位可以通过面内旋转进行自由调控, 且透射幅度不会随着旋转角度的改变而变化, 因此选取了六个不同旋向的单元设计了一维相位梯度超表面. 该超表面对左/右旋圆极化波具有方向相反的相位梯度, 当线极化波垂直入射时, 出射波将被分解成两束传播方向对称的圆极化波. 分别从近场仿真结果和远场仿真结果验证了高效奇异透射性能, 仿真并测试了线极化波垂直入射条件下的透射功率密度谱, 测试结果与仿真结果、理论设计结果基本一致, 在14.9—15.3 GHz频率范围内, 垂直入射的线极化波被完全分解为两束对称传播的圆极化波. 本文设计的超表面具有厚度薄(仅为1.5 mm, 约为工作波长的 $3/40$)、效率高等优势, 在电磁波传播和极化操控领域具有重要的应用前景.

参考文献

[1] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Chen H Y, Xu Z, Zhang A X 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 221110

- [2] Wu C J, Cheng Y Z, Wang W Y, He B, Gong R Z 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 164102 (in Chinese) [吴晨骏, 程用志, 王文颖, 何博, 龚荣洲 2015 物理学报 **64** 164102]
- [3] Xu H X, Wang G M, Qi M Q, Liang J G, Gong J Q, Xu Z M 2012 *Phys. Rev. B* **86** 205104
- [4] Li H P, Wang G M, Xu H X, Cai T, Liang J G 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 5144
- [5] Zhu H L, Cheung S W, Liu X H, Yuk T I 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 2891
- [6] Xu H X, Wang G M, Liang J G, Qi M Q, Gao X 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **61** 3442
- [7] Nathaniel K. Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, Zeng Y, Reiten M T, Azad A K, Taylor A J, Dalvit D A R, Chen H T 2013 *Science* **340** 1304
- [8] Gao X, Han X, Cao W P, Li H O, Ma H F, Cui T J 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 3522
- [9] Zhang L B, Zhou P H, Chen H Y, Lu H P, Xie J L, Deng L J 2015 *Appl. Phys. B* **120** 617
- [10] Song K, Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2014 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47** 505104
- [11] Yu J B, Ma H, Wang J F, Feng M D, Li Y F, Qu S B 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 178101 (in Chinese) [余积宝, 马华, 王甲富, 冯明德, 李勇峰, 屈绍波 2015 物理学报 **64** 178101]
- [12] Cai T, Wang G M, Zhang X F, Liang J G, Zhuang Y Q, Liu D, Xu H X 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 5629
- [13] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Chen H Y, Zheng L, Xu Z, Zhang A X 2014 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47** 425103
- [14] Shi H Y, Li J X, Zhang A X, Jiang Y S, Wang J F, Xu Z, Xia S 2015 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **14** 104
- [15] Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [16] Sun S L, Yang K Y, Wang C M, Juan T K, Chen W T, Liao C Y, He Q, Xiao S Y, Kung W T, Guo G Y, Zhou L, Tsai D P 2012 *Nano Lett.* **12** 6223
- [17] Sun S L, He Q, Xiao S Y, Xu Q, Li X, Zhou L 2012 *Nature Mater.* **11** 426
- [18] Yang Q L, Gu J Q, Wang D Y, Zhang X Q, Tian Z, Ouyang C M, Ranjan S, Han J G, Zhang W L 2014 *Opt. Express* **22** 25931
- [19] Monticone F, Estakhri N M, Alù A 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 203903

Design and experimental verification of single-layer high-efficiency transmissive phase-gradient metasurface*

Zhuang Ya-Qiang Wang Guang-Ming[†] Zhang Chen-Xin Zhang Xiao-Kuan
Zong Bin-Feng Ma Wei-Dong Wang Ya-Wei

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

(Received 4 March 2016; revised manuscript received 23 May 2016)

Abstract

Polarization characteristic is an important feature of electromagnetic (EM) wave. Manipulating polarization state and controlling propagation direction of EM wave by phase-gradient metasurface (PGM) have become a research hotspot in recent years. However, using transmissive PGM for polarization manipulation often suffers a low efficiency. To alleviate this problem, multilayered structure was utilized. However, it often suffered bulky volume and design complexity. Therefore, engineering a thin high-efficiency transmissive PGM with polarization manipulation is a pressing and challenging issue. In this paper, a single-layer high-efficiency transmissive PGM with cross-polarization conversion and anomalous refraction is designed. To illustrate the working mechanism, the PGM is comprehensively investigated through theoretical analysis, EM simulations and experimental measurements. The unit cell evolving from an electric-field-coupled resonator is carefully designed to exhibit a Pancharatnam-Berry phase gradient. Each rotated element irradiated separately by the normally-incident left-handed circularly polarized (LHCP) and right-handed circularly polarized (RHCP) waves is simulated in CST microwave studio. The results show that the cross-polarization transmission magnitude keeps over 0.9 and does not change as the rotation angle varies. Moreover, the phase shift is twice the rotation angles and the direction of refracted beam is opposite under the above two different polarizations. In addition, the cross-polarization conversion ratio is above 0.9 from 14 GHz to 15.8 GHz. On the premise of high transmission magnitude, the phase of the cross-polarized transmission can be freely manipulated via varying axis orientation. By spatially arranging six unit cells in rotation angle steps of 30° , a PGM with a phase difference of 60° between adjacent unit cells is designed. As is well known, linearly-polarized (LP) EM waves can be decomposed into LHCP and RHCP waves with equal amplitudes. Therefore, an LP wave through the PGM will be separated into two counterpropagating CP waves. The high-efficiency anomalous refraction of the PGM is verified from simulated near-field electric field distributions and far field normalized power patterns. The simulated refracted angle is 33.5° , which is in accordance with the theoretical designed value (33.75°). Moreover, the transmissive power intensity spectrum under the normally-incident LP waves is simulated and measured. The simulated and measured results are in good agreement with each other, showing that the transmitted wave is perfectly split into two counterpropagating waves from 14.9 GHz to 15.3 GHz. Compared with the available transmissive PGMs, our proposed PGM features high efficiency and thin structure with only single layer, making the proposed PGM a promising alternative to manipulating propagation and polarization of EM waves.

Keywords: phase-gradient metasurface, anomalous refraction, high efficiency

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf

DOI: 10.7498/aps.65.154101

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61372034).

[†] Corresponding author. E-mail: wgming01@sina.com