

基于梯度超表面的反射型线-圆极化转换器设计

庄亚强 王光明 张小宽 张晨新 蔡通 李海鹏

Design of reflective linear-circular polarization converter based on phase gradient metasurface

Zhuang Ya-Qiang Wang Guang-Ming Zhang Xiao-Kuan Zhang Chen-Xin Cai Tong Li Hai-Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 154102 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.154102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154102>

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>

单层高效透射型相位梯度超表面的设计及实验验证

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

物理学报.2016, 65(15): 154101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154101>

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>

基于梯度超表面的反射型线-圆极化转换器设计*

庄亚强 王光明[†] 张小宽 张晨新 蔡通 李海鹏

(空军工程大学防空反导学院, 西安 710051)

(2015年12月2日收到; 2016年6月1日收到修改稿)

本文设计了同时具有线-圆极化转换和出射波偏折功能的反射型极化转换器. 通过六个不同结构参数的改进型十字结构四分之一波片组成一维相位梯度超表面, 将此超表面分别在 x 和 y 方向进行周期排布, 设计了极化转换器. 通过理论分析、仿真计算和实验测试, 验证了该极化转换器在 13.8—14.7 GHz 频带内实现了高效线-圆极化转换和奇异反射. 仿真并测试了镜面反射率、反射功率密度谱和轴比特性, 仿真结果和测试结果的一致性良好, 结果表明该极化转换器在 13.8—14.7 GHz 频带内的镜面反射率小于 -10 dB, 轴比小于 2 dB, 而且反射波的偏折方向与理论分析相一致.

关键词: 相位梯度超表面, 线-圆极化转换, 奇异反射

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf, 77.22.-d, 84.90.+a

DOI: 10.7498/aps.65.154102

1 引言

相位梯度超表面 (phase gradient metasurface, PGM) 是一种通过不同相移的亚波长单元空间排布, 在面内方向形成相位梯度的各向异性超表面. 通过渐变的周期单元实现相位梯度, 从而实现对电磁波传播的自由调控, 因此在奇异反射/透射^[1-3]、表面波耦合^[4-6]、极化调制^[7-19]等领域具有广泛的应用前景. 与频率选择表面 (frequency selective surface, FSS) 相比, FSS 是由同一种单元结构周期排列形成的, 其单元的设计更关注的是对透射幅度的调控, 而 PGM 单元的设计需要同时调控幅度和相位, 因此大多数 FSS 作为一种空间滤波器使用.

相位梯度超表面的概念由 Capasso 课题组于 2011 年首次提出, 通过设计结构渐变的 V 形纳米天线阵列实现了相位梯度超表面, 并在红外波段验证了奇异反射/折射满足广义斯涅耳定律^[1]. 周磊课题组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^[2]; 他们还设计了实现高效奇异反射和表面波耦合的

反射式 PGM, 并首次验证了梯度超表面能够高效耦合表面等离子激元的条件^[4]. 极化调制超表面凭借其超薄厚度和低损耗等优良特性, 引发了国内外学者的广泛关注^[7-19]. 极化调制是由电磁波入射时在超表面单元结构的两个正交方向的不同相移来实现的. Ma 等^[7]采用正交 I 形单元设计出了超薄宽带超表面, 能够实现线极化旋转和线-圆极化转换; 该课题组还采用双 V 形单元设计了实现超宽带高效线极化旋转功能的超表面^[8]. Li 等^[9]设计了双层透射型线圆极化转换超表面, 能够实现超宽带和高效工作; 同时, 文献^[10]采用双圆弧形单元实现了线极化旋转的宽带 PGM 的奇异反射. 我们课题组基于多层透射型梯度超表面, 设计实现了高效极化分离器^[11]. Grady 等^[12]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. 可以看出, 目前报道的大多数极化调制超表面只具备单一的极化调制功能, 对同时调控出射方向和出射波极化的超表面研究较少. 因此, 本文重点研究了同时具有奇异反射和线-圆极化转换功能的相位梯度超表面.

十字形结构具有结构简单和几何参数易于调

* 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

节的优点^[20], 但是其亚波长结构的反射相位调控范围无法满足本文所需的相移范围要求. 因此, 本文提出一种改进型十字单元, 在设计频段上反射相位实现了 340° 的调控范围. 本文设计了六个不同改进型十字结构四分之一波片, x 方向相邻单元的反射相位差为 -60° , 组成了具有线-圆极化转换功能的一维相位梯度超表面. 利用该一维超表面实现了线-圆极化转换器, 当线极化波垂直入射时, 偏折的反射波被转换为圆极化波, 并且偏折出射方向可以通过改变相位梯度进行调整.

2 反射型线圆极化转换PGM的设计

2.1 设计原理

由广义斯涅耳反射定律可得

$$\sin(\theta_r) - \sin(\theta_i) = \frac{\lambda_0}{2\pi n_i} \frac{d\varphi}{dx}, \quad (1)$$

式中, $\frac{d\varphi}{dx}$ 表示沿 x 方向的相位梯度, θ_i 为入射角, θ_r 为反射角, n_i 为入射空间介质的折射率, λ_0 为自由空间中的波长. 当电磁波从自由空间垂直入射时, $\theta_i = 0^\circ$, $n_i = 1$, 则反射波的出射方向为

$$\theta_r = \arcsin\left(\frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\varphi}{dx}\right). \quad (2)$$

一般情况下, 相位梯度超表面通过 n 个相似结构单元按一定的分布排列来覆盖 2π 的相移范围, 则每个单元的相移为 $\Delta\varphi = 2\pi/n$, 设单元周期为 p , 相位梯度 $\frac{d\varphi}{dx}$ 可表示为

$$\frac{d\varphi}{dx} = \Delta\varphi/p = 2\pi/np. \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式可得反射方向 θ_r 为

$$\theta_r = \arcsin(\lambda_0/np). \quad (4)$$

由(3)和(4)式可知, 当工作频率和单元周期确定后, 反射角 θ_r 取决于 n 的取值, n 值则由所设计的相位梯度确定.

线-圆极化转换的工作机理如下: 假定 x 极化电磁波 \mathbf{E}_x 沿 $-z$ 方向入射, 则反射波 x 极化分量 \mathbf{E}_{rx} 对应的反射系数为 R_{xx} , y 极化分量 \mathbf{E}_{ry} 对应的反射系数为 R_{yx} , 其幅度和相位的相互关系为

$$|\mathbf{E}_{rx}| = R_{xx} |\mathbf{E}_x|, \quad (5)$$

$$|\mathbf{E}_{ry}| = R_{yx} |\mathbf{E}_x|, \quad (6)$$

$$\text{Arg}(\mathbf{E}_{rx}) - \text{Arg}(\mathbf{E}_{ry}) = \text{Arg}(R_{xx}) - \text{Arg}(R_{yx}), \quad (7)$$

当 $|R_{xx}| = |R_{yx}|$ 且 $\text{Arg}(R_{xx}) - \text{Arg}(R_{yx}) = \pm 90^\circ$ 时, 反射波为圆极化波, 其中取“ $+90^\circ$ ”时反射波为右旋圆极化波, 取“ -90° ”为左旋圆极化波.

2.2 超表面单元结构设计

图1给出了改进型十字结构单元的示意图, 正方形单元结构由三层构成. 改进型十字结构单元的尺寸参数是根据所需的工作频点进行设计的, 通过调节单元的尺寸参数使得所需的工作频点位于单元的谐振频率附近, 这样才能更有效地调节单元的反射相位. 采用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 频域求解器的参数扫描功能对单元进行仿真. 边界条件设置如下: x 和 y 方向为 unit cell 周期性边界条件, z 方向上边界条件设为 open (and space), z 方向下边界条件设为电边界, 电磁波沿 $-z$ 方向垂直入射. 经过仿真优化, 最终确定单元周期为 $p = 6$ mm; 最上层的改进型十字结构金属线单元的基本尺寸参数分别为 $a = 0.2$ mm, $b = 0.4$ mm; 中间层为 $h = 1$ mm, $\epsilon_r = 4.3$, $\tan \delta = 0.003$ 的环氧玻璃布板; 最下层为金属地板, 厚度 $t = 0.036$ mm.

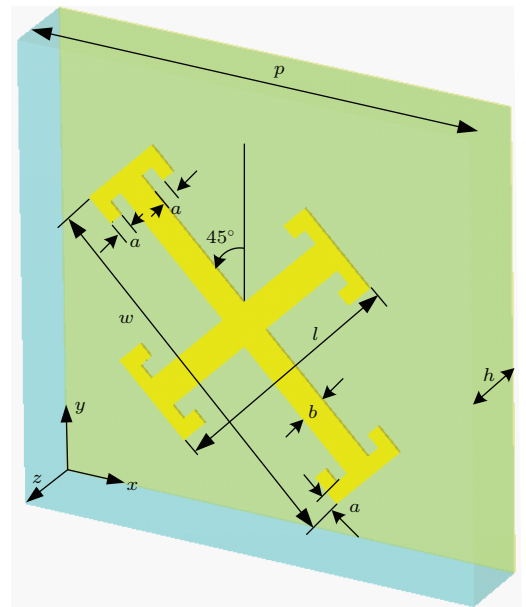


图1 (网刊彩色) 超表面单元结构示意图

Fig. 1. (color online) Schematic of the metasurface unit cell.

改进型十字结构单元是在传统十字结构末端加载了C形枝节,并沿逆时针方向旋转了45°.如果单元不旋转,要实现线圆极化转换功能,激励电场必须与x轴夹角45°.考虑到实验条件的限制,因此将单元进行了旋转.加载C形枝节的目的是为了拓宽单元反射相位的调控范围.利用CST分别对三种单元(分别记为单元1、单元2和单元3)的反射相位范围进行仿真,尺寸w固定为2.1 mm, l从2.1 mm到5.9 mm之间连续变化,在14.3 GHz处三种单元的主极化反射系数 R_{xx} 的相位随l的变化曲线如图2所示.比较单元1和单元2的相位曲线,可得单元2的反射相位范围仍然满足要求,而且还展宽了约10°.比较单元2和单元3的相位曲线可以得出,反射相位的覆盖范围在加载C形枝节后,从308°拓宽到了343°,并且由于C形枝节延长了电流路径,使得发生谐振处的l长度缩短,有利于单元的小型化.

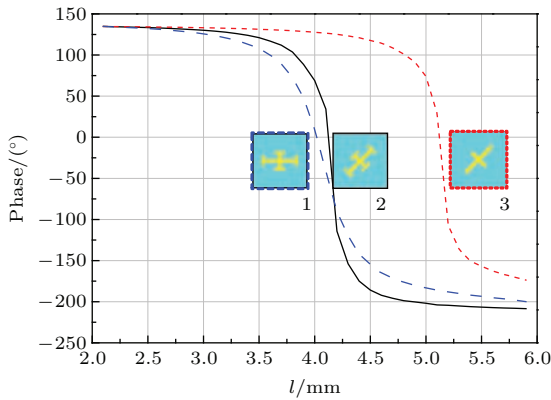


图2 (网刊彩色) 反射相位随尺寸l的变化曲线

Fig. 2. (color online) Reflection phases against dimension l.

2.3 一维相位梯度超表面的设计

在CST中对单元特性进行仿真时,其他单元参数保持不变,调节尺寸w和l可以实现对x和y正交方向上反射电磁波的相位和幅度的调控.本文沿x方向设计相位梯度,选取了6个不同结构参数的四分之一波片形成反射相位梯度.则在x方向上相邻单元之间的相位差为-60°,同时每个单元在x和y方向上满足90°的相位差.在设计第一个单元的具体尺寸时,首先固定尺寸w为2.1 mm不变,通过调节l使得该单元在x和y方向的反射相位差为90°,反射幅度均为0.5;然后再调节尺寸w,使下一个单元与上一个单元的在x方向上的反射相位保持-60°的相位差,随后再改变尺寸l,使得y方向的反射相位和反射幅度满足要求,依此类推.通过仿真优化,组成超单元的6个单元的尺寸参数和反射系数如表1所列.将6个单元沿x方向依次相邻排列构成超单元,如图3所示.从表1可以看出,相邻单元之间严格满足60°的相位差,可以构成线性相位梯度;并且每个单元在x方向和y方向上的反射相位严格保持着90°的相位差,从而确保组成相位梯度超表面的每个结构单元都具有四分之一波片特性.不同单元的反射电场幅度在正交方向近似相等,均为0.5.良好的线性相位梯度和幅度一致性保证了高效的极化转换功能和偏折效应.

由于该结构单元满足中心对称性,因此当y极化波垂直入射时,在y方向和x方向上的反射相位分别为 $\text{Arg}(R_{yy}) = \text{Arg}(R_{xx})$, $\text{Arg}(R_{xy}) =$

表1 不同结构单元的尺寸

Table 1. The values of the dimension parameters for different unit cells.

单元序号	1	2	3	4	5	6
w/mm	2.10	3.77	3.97	4.10	4.24	4.63
l/mm	3.90	4.03	4.17	4.37	5.65	3.50
$\text{Arg}(R_{xx})/(\text{°})$	88.96	28.85	-29.38	-89.72	-145.06	-209.22
$\text{Arg}(R_{yx})/(\text{°})$	-1.01	-61.14	-119.67	-179.66	-235.01	-299.24
$\text{Mag}(R_{xx})$	0.48	0.51	0.49	0.50	0.51	0.49
$\text{Mag}(R_{yx})$	0.52	0.49	0.51	0.50	0.49	0.51

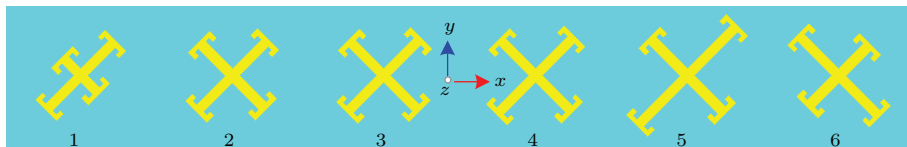


图3 (网刊彩色) 一维相位梯度超表面的超单元正视图

Fig. 3. (color online) Front view of supercell of the one-dimensional PGM.

$\text{Arg}(R_{yx})$, 反射幅度分别为 $\text{Mag}(R_{yy}) = \text{Mag}(R_{xx})$, $\text{Mag}(R_{xy}) = \text{Mag}(R_{yx})$. 因此垂直入射的 $x(y)$ 极化波将被奇异反射, 并转化为右(左)旋圆极化.

3 仿真与实验验证

3.1 仿真与结果分析

基于设计的超单元, 此处设计了大小为 $216 \text{ mm} \times 216 \text{ mm}$ 线-圆极化转换器. 具体设计方法如下: 用6个超单元在 x 方向依次相邻排列, 然后将该 $216 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 一维阵列在 y 方向上延拓35次, 构成了 $216 \text{ mm} \times 216 \text{ mm}$ 的二维阵列. 为了验证所设计的极化转换器, 利用 CST Microwave Studio 的时域求解器对极化转换器进行全波仿真, x, y 和 z 方向上的边界条件均设置为 open (add space), 入射电磁波 E_x 沿 $-z$ 方向垂直入射, 对超表面进行激励. 图4给出了二维阵列和线圆极化转换示意图. 仿真得到的镜面反射率如图5中黑色实线所示, 可以看出, 镜面反射率小于 -10 dB 的频率范围为 $13.8\text{--}15.2 \text{ GHz}$, 在 14.3 GHz 处出现了反射低谷, 反射率小于 -25 dB . 这是由于超表面的相位梯度设计, 导致垂直入射到超表面上的电磁波发生了奇异反射, 从而有效降低了垂直方向的反射率.

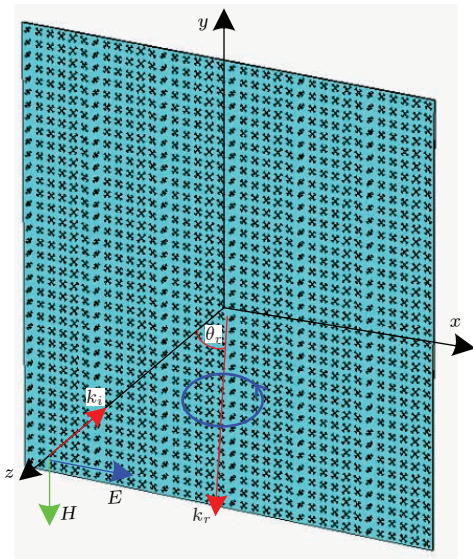


图4 (网刊彩色) 奇异反射和极化转换示意图

Fig. 4. (color online) Schematic diagram of anomalous reflection and polarization conversion.

为了验证镜面反射率的低谷是由于奇异反射现象引起的, 并且更直观地观察奇异反射现象,

图6给出了 $13\text{--}16 \text{ GHz}$ 频段内 xoz 平面的反射功率密度谱. 从图6中可以看出, 在 $13.5\text{--}15.6 \text{ GHz}$ 频率范围内, 大部分反射波偏离了垂直方向, 并且随着频率的增大, 奇异反射角不断减小, 在该频带外, 由于线性相位梯度不再满足, 反射波主要集中于垂直方向. 该现象有力地解释了镜面反射率的低谷是由于奇异反射造成的. 图6中用“☆”标注了基于广义斯涅耳反射定律计算的奇异反射角, 可见仿真得到的奇异反射角与理论设计值符合得很好. 从图6中还可以看出, 在镜面反射率低于 -10 dB 的频段内 ($13.8\text{--}15.2 \text{ GHz}$), 几乎没有镜像反射, 表明反射波几乎完全偏离了垂直方向. 接下来通过轴比特性分析反射波的圆极化性能. xoz 平面内 $\theta_r = 35.6^\circ$ (中心频率 $f = 14.3 \text{ GHz}$ 时奇异反射角) 时轴比随频率变化的仿真结果如图7中的实线所示. 结果表明, 轴比小于 3 dB 的频段为 $13.4\text{--}15.3 \text{ GHz}$, 且 14.3 GHz 处的轴比小于 1 dB , 表明该频段内反射波的圆极化性能良好.

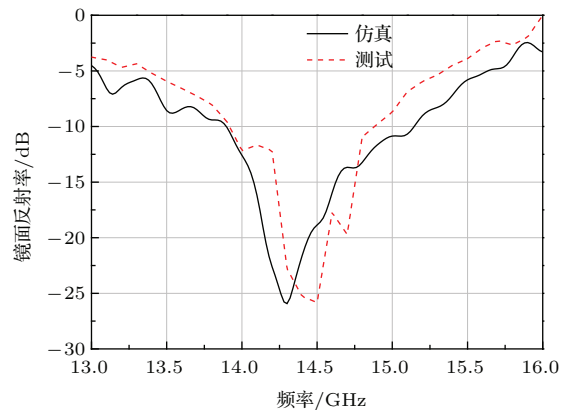


图5 镜面反射率仿真和测试结果

Fig. 5. The simulated and measured results of mirror reflectivity.

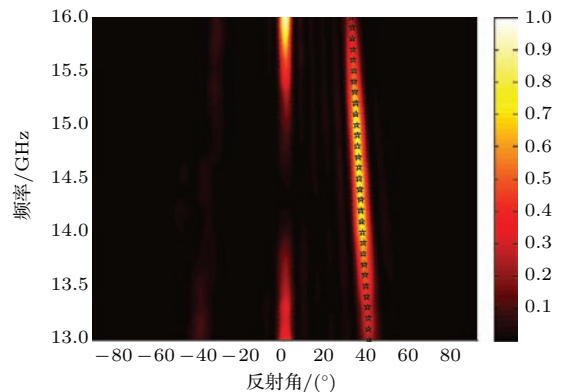


图6 (网刊彩色) x 极化波垂直入射时 xoz 平面内的反射功率密度谱

Fig. 6. (color online) The reflective power intensity spectra at xoz plane for x -polarized wave normal incidence.

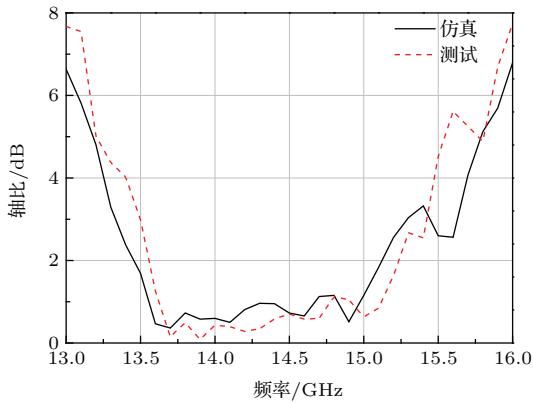


图7 xoz 平面内 $\theta_r = 35.6^\circ$ 时反射波的轴比
Fig. 7. The axial ratio of reflective wave at $\theta_r = 35.6^\circ$ in xoz plane.

3.2 实验验证

根据以上仿真优化的超表面结构参数, 采用印刷电路板技术加工了所设计的极化转换器测试样品, 总尺寸为 $216\text{ mm} \times 216\text{ mm}$, 由 36×36 个超表面单元组成, 介质基板采用厚度 $h = 1\text{ mm}$ 的环氧玻璃布板, 金属表面进行了镀锡处理以防止因金属氧化影响实验结果. 整个测试过程采用自由空间法在微波暗室中进行, 测试样品和实验设置如图8所示.

将测试样品竖直固定在旋转泡沫塔的中心位置, 在旋转泡沫塔上固定一个用于发射 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, 两个喇叭的中心与样品的中心点保持在同一高度. 当发射喇叭与测试样品的距离满足远场条件 ($2D^2/\lambda$) 时, 才能保证入射到测试样品上的电磁波为平面波, 在本文中远场条件为 1.3 m . 在测试实验样品前, 先用与测试样品尺寸相同的金属平板对测试系统进行校准测试, 其测试结果与后续样品的测试结果的比值可以有效减小测试系统固有误差的影响. 首先测试样品的镜面反射率. 为了减小发射喇叭对反射电磁波遮挡的影响, 将泡沫塔旋转 10° , 此时两个喇叭与样品中心的连线与样品法线方向均有 5° 的夹角, 测试结果如图5中虚线所示. 测试样品的反射功率密度谱时, 通过泡沫塔的旋转等效为接收喇叭的旋转, 测得 $\theta_r = 35.6^\circ$ 角度上反射波的轴比信息如图7中的虚线所示, xoz 面内反射角 θ_r 从 -90° 到 90° 范围内的反射功率密度谱的测试结果如图9所示.

从镜面反射率的测试结果可以看出, 反射低谷

出现在 14.5 GHz , 镜面反射率低于 -10 dB 的频率范围为 $13.8\text{—}14.7\text{ GHz}$. 与仿真结果相比, 带宽有所变窄, 这主要是由于高频段的奇异反射角较小, 使得部分奇异反射的电磁波被接收, 导致镜面反射率升高. 轴比的测试结果表明, 在 $13.5\text{—}15.4\text{ GHz}$ 频段内, 反射波的轴比均小于 3 dB , 与仿真结果基本符合. 从反射功率密度谱的测试结果可知, 反射电磁波的大部分能量在 $14\text{—}15.5\text{ GHz}$ 频段内明显

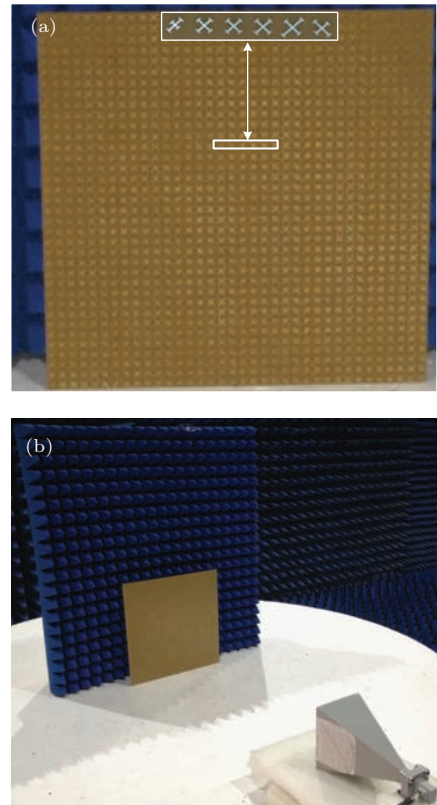


图8 (网刊彩色) (a) 测试样品; (b) 实验设置
Fig. 8. (color online) (a) The measurement sample; (b) the measurement setup.

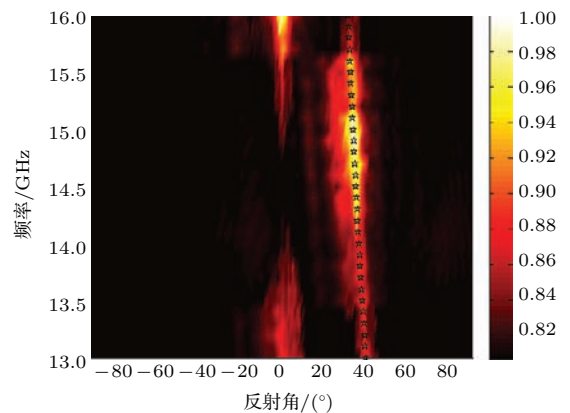


图9 (网刊彩色) 反射功率密度谱的测试结果
Fig. 9. (color online) The measured results of reflective power intensity spectra.

偏离了样品表面的法线方向,而且偏离角度与理论设计值相符合.但是功率密度谱的测试结果不如仿真结果纯净,主要考虑由以下两方面因素造成:一是因为实验过程中远场条件未能严格满足,导致入射到样品表面的电磁波是近似平面波;二是由于加工所使用的介质板材料参数无法与仿真所设置的材料参数严格保持完全一致,测试过程中还存在不可避免的固有误差.但是,测试结果还是能够验证该相位梯度超表面具备高效的奇异反射功能.

4 结 论

本文基于一维相位梯度超表面设计了一种具有奇异反射功能的线-圆极化转换器.组成超表面的每个单元具有四分之一波片特性,因此能够实现线-圆极化转换功能.通过设计相位梯度,可以实现反射波的出射方向发生偏折.仿真并测试了线极化波垂直入射至超表面样品的镜面反射率、反射波轴比和反射功率密度谱,仿真和测试结果具有良好的一致性.在13.8—14.7 GHz频率范围内,镜面反射率小于-10 dB,奇异反射角的仿真值与理论设计值基本一致,表明由于反射波的偏折特性导致超表面的镜面反射率明显降低;同时该频段内反射波的轴比小于2 dB,说明反射波具有良好的圆极化特性.所设计的反射型极化转换器具有质量轻、效率高、性能优良,在微波工程、通信系统等领域中具有重要的潜在应用价值.

参考文献

- [1] Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [2] 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
- [3] Wang J F, Qu S B, Ma H Xu Z, Zhang A X, Zhou H, Chen H Y, Li Y F 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 201104
- [4] Sun S L, He Q, Xiao S Y, Xu Q, Li X, Zhou L 2012 *Nature Mater.* **11** 426
- [5] 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
- [6] 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
- [7] Ma H F, Wang G Z, Kong G S, Cui T J 2014 *Opt. Mater. Express* **4** 1717
- [8] Gao X, Han X, Gao W P, Li H Q, Ma H F, Cui T J 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 3522
- [9] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Zheng L, Pang Y Q, Xu Z, Zhang A X 2015 *J. Appl. Phys.* **117** 044501
- [10] 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]
- [11] 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** 5269
- [12] 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
- [13] Liu W W, Chen S, Li Z C, Cheng H, Yu P, Li J X, Tian J G 2015 *Opt. Lett.* **40** 3185
- [14] Ding X M, Monticone F, Zhang K, Zhang L, Gao D L, Burokur S N, Lustrac A, Wu Q, Qiu C W, Alù A 2015 *Adv. Mater.* **27** 1195
- [15] Chen H Y, Wang J F, Ma H, Qu S B, Xu Z, Zhang A X, Yan M B, Li Y F 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 154504
- [16] Shao J, Li J, Wang Y H, Li J Q, Chen Q, Dong Z G 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 243503
- [17] Zhao Y, Alù A 2013 *Nano Lett.* **13** 1086
- [18] Zhang L B, Zhou P H, Chen H Y, Lu H P, Xie J L, Deng L J 2015 *Appl. Phys. B* **120** 617
- [19] Li L, Li Y J, Wu Z, Huo F F, Zhang Y L, Zhao C S 2015 *Proc. IEEE* **103** 1057
- [20] 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]

Design of reflective linear-circular polarization converter based on phase gradient metasurface*

Zhuang Ya-Qiang Wang Guang-Ming[†] Zhang Xiao-Kuan Zhang Chen-Xin
Cai Tong Li Hai-Peng

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

(Received 2 December 2015; revised manuscript received 1 June 2016)

Abstract

Manipulating the propagating direction and polarization state of electromagnetic wave is always fascinating and used in a wide field. One of the approaches to achieving this aim is typically based on steering the propagation phase of wave traveling inside an optical medium, such as dielectric lens. Nevertheless, this approach creates new problems, such as high loss, bulky volume and fabrication difficulty. Recently, metasurface was found to be a two-dimensional equivalence of metamaterial, which attracted a great deal of attention because of its unique properties and capability of manipulating and controlling electromagnetic waves on a sub-wavelength scale. So metasurface serves as an alternative approach to dealing with the loss and fabrication issues, and opens a door for bridging the gap between the fundamental research of the artificial structures and their device applications.

A reflective phase gradient metasurface (PGM) achieving the linear-to-circular (LTC) polarization conversion and anomalous reflection simultaneously is designed in this paper. Firstly, the conventional cross-shaped structure is modified for enlarging the phase range. Then, six modified cross-shaped structures are designed cautiously to serve as quarter wave-plates, and achieve 60° phase difference between adjacent structures. The reflection phase difference between x - and y -direction components is 90° , and their magnitudes are both equal to 0.5. Secondly, a one-dimensional PGM is constructed by distributing six modified cross-shaped quarter wave-plates one by one. Furthermore, an LTC polarization converter with an area of $216\text{ mm} \times 216\text{ mm}$ is designed by placing 36×6 one-dimensional PGMs periodically. The mirror reflectivity and axial ratio are simulated and measured to verify the performances of LTC polarization conversion and anomalous reflection. The measured sample is fabricated by printing circuit board technique through using FR4 substrate, and a free space method is adopted in measurement in the anechoic chamber. In addition, the operating bandwidth can be evaluated from the reflective power density spectra. The measured results of mirror reflectivity, reflective power density spectra and axial ratio characteristic are in good agreement with the corresponding simulations, which shows that the mirror reflectivity is lower than -10 dB ; the axial ration is lower than 2 dB within the frequency band of $13.8\text{--}14.7\text{ GHz}$. Meanwhile, the theoretical reflection angles from the generalized Snell law are consistent with the CST microwave studio simulated results and measured results. Compared with the reported LTC polarization converters, the proposed LTC polarization converter not only achieves polarization conversion, but also can manipulate the output wave direction, thereby it has an important promising application value for microwave engineering and communication system.

Keywords: phase gradient metasurface, linear-to-circular polarization conversion, anomalous reflection

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf, 77.22.-d, 84.90.+a

DOI: 10.7498/aps.65.154102

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

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