

基于交叉极化旋转相位梯度超表面的宽带异常反射

范亚 屈绍波 王甲富 张介秋 冯明德 张安学

Broadband anomalous reflector based on cross-polarized version phase gradient metasurface

Fan Ya Qu Shao-Bo Wang Jia-Fu Zhang Jie-Qiu Feng Ming-De Zhang An-Xue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 184101 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.184101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I18>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海面与其上方双矩形截面柱复合散射的混合算法研究

Study on composite electromagnetic scattering from the double rectangular cross-section columns above rough sea surface using hybrid method

物理学报.2015, 64(17): 174101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174101>

基于十字形结构的相位梯度超表面设计与雷达散射截面缩减验证

Design and radar cross section reduction experimental verification of phase gradient metasurface based on cruciform structure

物理学报.2015, 64(16): 164102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164102>

一种采用互补结构的宽阻带共模缺陷地滤波器

A broad stopband common-mode suppression defected ground structure filter with complementary structure

物理学报.2015, 64(16): 164101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164101>

基于变换光学的椭圆形透明聚集器的设计研究

Design and study of the elliptically cylindrical transparent concentrator based on transformation optics

物理学报.2015, 64(15): 154102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154102>

超材料谐振子间的电耦合谐振理论与实验研究

Theoretical and experimental study of the electric resonant coupling between two metamaterial resonators

物理学报.2015, 64(14): 144101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144101>

# 基于交叉极化旋转相位梯度超表面的 宽带异常反射\*

范亚<sup>1)</sup> 屈绍波<sup>1)†</sup> 王甲富<sup>1)‡</sup> 张介秋<sup>1)</sup> 冯明德<sup>2)</sup> 张安学<sup>3)</sup>

1)(空军工程大学理学院, 西安 710051)

2)(西安交通大学, 电子陶瓷与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

3)(西安交通大学电子信息工程学院, 西安 710049)

(2015年3月3日收到; 2015年4月13日收到修改稿)

设计实现了一种基于双圆弧形金属结构的宽带反射型极化旋转超表面, 在 7.9—20.1 GHz 的宽频带范围内交叉极化转换率达到 99%, 通过改变其结构参数可实现在保持高效的交叉极化转换率的条件下对交叉极化反射相位的自由调控. 基于六种不同结构参数极化旋转超表面结构单元的空间排布设计实现了一维宽带相位梯度超表面, 在宽频带内, 实现了异常反射. 测试了其镜面交叉极化反射率, 与仿真结果基本一致. 仿真计算了  $x$ -极化波入射时的电磁场分布和异常反射角度, 与理论计算结果基本一致. 仿真与测试结果均表明这种相位梯度超表面在 8.9—10 GHz 和 10.0—18.1 GHz 的两个宽带频率范围内可分别实现高效的表面波耦合和异常反射.

**关键词:** 超表面, 极化旋转, 相位梯度, 异常反射

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

**DOI:** 10.7498/aps.64.184101

## 1 引言

相位梯度超表面 (phase gradient metasurface, PGM) [1–3] 是一种亚波长厚度的各向异性结构, 能使入射电磁波发生相位突变, 并在其表面方向上产生相位梯度, 以此来控制反射波或透射波的传播方向 [2]. 传统的光学元件 [4–6] (平面镜、棱镜等) 均是通过传播路径上连续相位的积累来改变波束的传播方向, 其尺寸通常远大于波长. 超材料尤其是左手材料 [7,8] 的研究表明, 在某些频段具有负折射率的左手材料也可以使入射波发生异常折射, 但其依然遵守经典折射定律. 相比传统的光学元件和左手材料, 相位梯度 [9] 超表面在界面不同位置引入不同的相位突变, 通过对这些相位突变进行

设计, 控制反射波束和折射波束的方向. 在这种情况下, 电磁波传播不再遵守经典的反射定律和折射定律, 而是遵守广义反射定律和折射定律. 这样通过亚波长结构的相位梯度超表面实现对反射波和透射波的自由控制, 极大地减小了器件的厚度和体积, 其在现代隐身、通信、电子对抗等领域都具有重要的应用价值.

2011年, 哈佛大学 Yu 等 [1] 使用 V 形天线在光波段成功实现了相位梯度超表面, 实现了异常折射, 通过二维相位梯度超表面实现了涡旋波阵面. 2012年4月, 复旦大学周磊教授课题组 [10] 在《Nature Materials》上发表了关于超表面的重要研究结果, 提出了基于超材料等效参数分布的反射型超表面设计, 通过设计材料磁导率和介电常数的空间分布, 实现了能够将入射电磁波高效旋转为表面波

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61331005, 11274389, 61471388)、中国博士后科学基金 (批准号: 2013M532131, 2013M53221) 和陕西省基础研究计划 (批准号: 2011JQ8031, 2013JM6005) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: wangjiafu1981@126.com

模式的微波频段超表面, 并研究了在非理想情况下这种超表面的表面波转化效率. 而针对圆极化波, 英国伯明翰大学 Zentgraf 教授课题组采用不同旋转角度的纳米金属条阵列将左旋和右旋圆极化波转化为沿相反方向单向传播的表面等离激元 [11,12]. 2013年9月, 空军工程大学屈绍波教授课题组 [13] 采用周期性排布的六个不同结构参数的矩形开口谐振环 (split ring resonator, SRR), 在介质表面引入相同的突变相位, 实现了将特定极化的电磁波耦合成为表面电磁波 [14-17]. 可见, 相位梯度超表面确实可以实现将入射电磁波耦合成为表面波或使反射波发生异常偏折.

针对相位梯度超表面能够对反射波束自由控制, 本文首先设计了一种基于双圆弧形金属结构的宽带反射型极化旋转超表面. 基于这种极化旋转超表面结构可实现交叉极化反射相位的自由调控, 采用六个不同几何参数的双圆弧形金属结构周期性排布, 设计制作了一种反射型交叉极化旋转相位梯度超表面, 实现了在 8.9—18.1 GHz 宽频带范围内的高效极化旋转和异常反射.

## 2 相位梯度超表面设计

### 2.1 设计原理

如图 1 所示, 当一束电磁波以入射角度  $\theta_i$  入射至一维相位梯度超表面上 (图中红色箭头线所示), 其波矢为  $k_i$ ,  $k_i = k_0$  ( $k_0$  为自由空间中的波矢), 面内波矢分量为  $k_{ix} = k_0 \sin \theta_i$ . 由于相位梯度超表面面内方向上的相位梯度  $\nabla\Phi$  (图中绿色箭头所示), 入射波经超表面反射后, 反射波面内波矢分量可表示为  $k_{rx} = k_r \sin \theta_r$ .

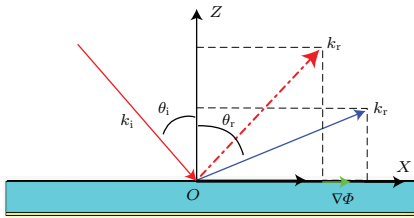


图 1 异常反射超表面设计原理示意图

Fig. 1. Schematic diagram for designed principle of anomalous reflective metasurface.

根据面内波矢量守恒, 且  $k_r = k_i$ , 可以得到

$$k_0 \sin \theta_r = k_0 \sin \theta_i + \nabla\phi. \quad (1)$$

超表面沿  $x$  方向形成的相位梯度可以表示为

$$\nabla\phi = \frac{\Delta\varphi}{L}, \quad (2)$$

式中  $\Delta\varphi$  表示大结构单元所产生的总相位差,  $L$  表示大结构单元的重复周期. 根据广义反射定律, 异常反射的反射角  $\theta_r$  可通过如下公式计算:

$$\theta_r = \arcsin \frac{(k_0 \sin \theta_i + \nabla\phi)}{k_0}. \quad (3)$$

从 (3) 式中可以看出, 当电磁波以一定入射角度入射至相位梯度超表面时, 如果其具有宽频带的相位梯度, 异常反射角度会随着频率的增大而减小. 当  $f < c\Delta\Phi/2\pi L(1 - \sin \theta_i)$  时, 反射波的反射角度将大于  $90^\circ$ . 因此, 当入射波频率为  $f_c = c\Delta\Phi/2\pi L(1 - \sin \theta_i)$  时, 称之为临界频率. 如果入射波频率  $f < f_c$ , 由于相位梯度超表面沿界面所产生的相位梯度大于入射波的波矢, 入射波将会被耦合成为表面波.

### 2.2 反射型极化旋转超表面单元结构设计

本文设计了一种斜置双圆弧形的开口谐振环 (SRR) 结构单元. 如图 2 所示, 整个单元由三层组成, 单元周期为  $a = 5$  mm, 中间层为厚度  $d = 3$  mm 的 F4B ( $\epsilon_r = 2.65 \tan \delta = 0.001$ ) 介质基板,  $t = 0.3$  mm 的金属作为背板; 在介质基板表面设计金属结构, 圆弧内径为  $r_1 = 2.1$  mm, 外径为  $r_2 = 2.3$  mm, 两圆弧间距  $l = 1.41$  mm; 两圆弧之间采用金属线连接, 其宽度为  $w = 0.2$  mm.

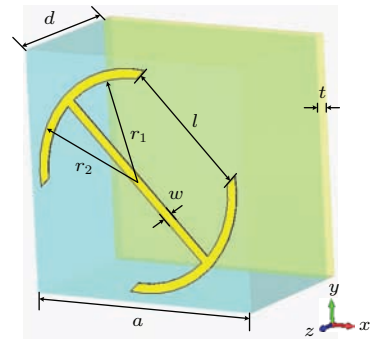


图 2 (网刊彩色) 线极化旋转超表面结构单元, 其优化得到的几何参数值分别为  $a = 5$  mm,  $d = 3$  mm,  $r_1 = 2.1$  mm,  $r_2 = 2.3$  mm,  $l = 1.41$  mm,  $w = 0.1$  mm. Fig. 2. (color online) Unit cell for linear-polarized conversion metasurface and optimized geometrical parameter:  $a = 5$  mm,  $d = 3$  mm,  $r_1 = 2.1$  mm,  $r_2 = 2.3$  mm,  $l = 1.41$  mm,  $w = 0.1$  mm.

在电磁仿真软件 CST MICROWAVE STUDIO 2011 中, 利用频域求解器进行仿真,  $x$  和  $y$  方

向边界条件设为 unit cell 周期性边界条件,  $z$  方向上边界条件设为 open and space, 电磁波沿  $z$  轴负方向垂直入射, 分别仿真在  $x$ -极化波和  $y$ -极化波入射时的同极化和交叉极化反射率, 结果如图 3 所示.

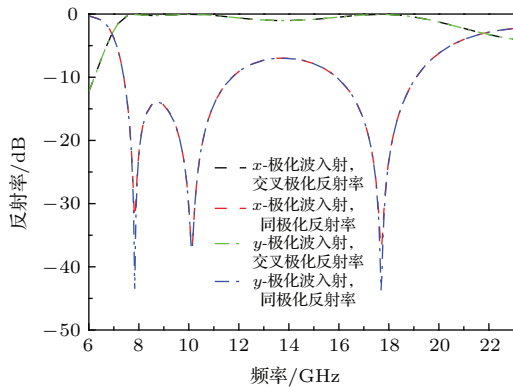


图 3  $x$ -极化波和  $y$ -极化波垂直入射时的反射率仿真结果  
Fig. 3. The simulated reflectivities under  $x$ -polarized and  $y$ -polarized waves normal incidence.

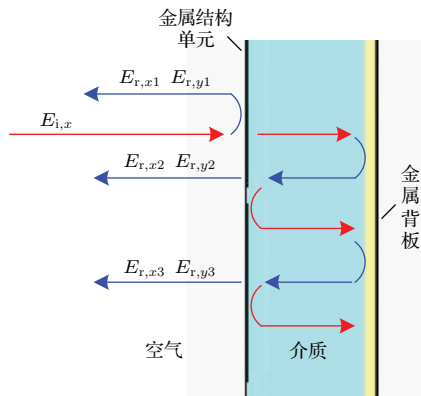


图 4 (网刊彩色) “类法布里-珀罗谐振腔”中多次反射示意图  
Fig. 4. (color online) Schematic of multiple reflection in the “Fabry-Pérot-like” cavity.

从仿真结果中可知,  $x$ -极化波和  $y$ -极化波分别垂直入射时, 线性极化旋转超表面在 7.9—20.1 GHz 频率范围内, 能将  $x$ -极化波 ( $y$ -极化波) 转换为  $y$ -极化波 ( $x$ -极化波), 其极化转换率达到 99%. 其高效的极化转换率是由于介质基

板同金属背板形成了一个“类法布里-珀罗”谐振腔<sup>[18]</sup>. 如图 4 所示,  $E_{i,x}$  为入射波电场,  $E_{r,xj}$  和  $E_{r,yj}$  ( $j = 1, 2, 3, \dots$ ) 分别为第  $j$  次同极化和交叉极化部分反射波的电场, 入射波在介质基板内多次反射, 同极化反射波干涉相消使得同极化反射波减弱, 交叉极化反射波相干叠加使得交叉极化反射波增强, 从而导致了高效的极化转换率.

### 2.3 反射型交叉极化旋转相位梯度超表面结构设计

进一步研究发现, 上述双圆弧形金属超表面结构单元, 通过改变两圆弧之间的距离  $l$ , 可以在很宽的频带范围内改变电磁波垂直入射时的交叉极化反射相位, 获得几乎不随频率改变而改变 (即非色散) 的相位梯度. 采用 CST Microwave Studio 频域求解器计算其交叉极化反射相位, 边界条件设为 unit cell, 沿  $y$  方向上设计相位梯度. 选取了 6 个不同结构参数的双圆弧形结构单元在 8.9—18.1 GHz 频段内形成宽带非色散交叉极化反射相位梯度, 同时, 六种单元结构均具有高效的交叉极化转换率. 图 4 所示为相位梯度超表面“超单元”结构正视图. “超单元”在  $y$  方向上相邻小单元之间的交叉极化反射相位差为  $-\pi/3$ , 其相位分布区间涵盖  $[0, 2\pi]$ . 六个超表面小单元结构的交叉极化反射相位仿真结果如图 6 所示. 小单元结构 (1), (2), (3) (如图 5 所示) 所对应的圆弧间距分别为  $l_1 = 0.65$  mm,  $l_2 = 1.41$  mm,  $l_3 = 1.80$  mm; 小单元结构 (4), (5), (6) 所对应的圆弧间距也为  $l_4 = 0.65$  mm,  $l_5 = 1.41$  mm,  $l_6 = 1.80$  mm, 但与前三个小单元结构相比, 后三个结构单元是在前者基础上, 绕圆环的圆心旋转  $90^\circ$  得到的. 六个单元的交叉极化反射率仿真结果如图 7 所示, 在 8.9—18.1 GHz 频段范围内, 六个极化转化超表面单元结构的交叉极化转换率均在 90% 以上.

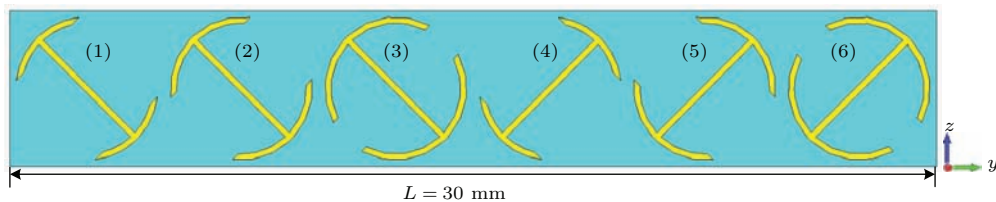


图 5 相位梯度超表面“超单元”结构正视图  
Fig. 5. Front view of “super unit” of the phase gradient metasurface.



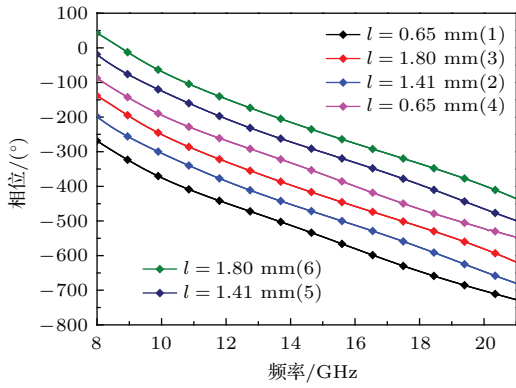


图6 (网刊彩色) 六种极化转换超表面单元结构交叉极化反射相位仿真结果

Fig. 6. (color online) The simulated cross-polarized reflection phase of six polarized conversion unit cells.

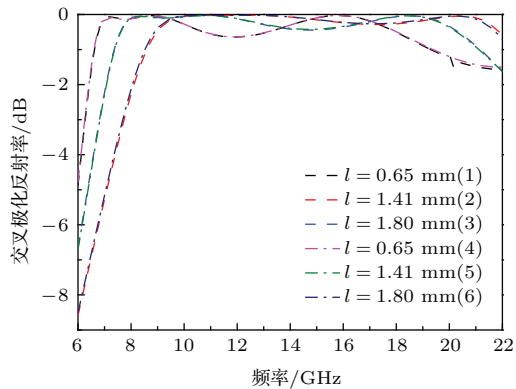


图7 (网刊彩色) 六种极化旋转超表面单元结构的交叉极化反射率仿真结果

Fig. 7. (color online) The simulated cross-polarization reflectivities of six polarized conversion unit cells.

### 3 仿真与实验验证

#### 3.1 仿真

为了验证设计的相位梯度超表面, 利用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 的时域求解器计算其镜面反射率, 仿真示意图如图 8.  $x$ ,  $y$  和  $z$  方向均设置为 open and space, 在  $z$  方向上距离超表面 150 mm 处设置 port 端口, 入射波电场方向沿  $x$  方向, 入射波沿  $-z$  方向入射, 入射波频率范围为 8—20 GHz, 仿真得到的超表面的异常反射谱如图 9 所示 (横坐标表示频率, 纵坐标表示反射角度, 颜色深度表示反射波的强度). 从图中可以看出, 垂直入射至超表面的线极化波, 由于介质表面的超表面结构单元作用, 发生极化旋转, 电场方向由  $x$  方向旋转为  $y$  方向, 并且由于相位梯度超表面沿  $y$  方向存在相位梯度, 垂直入射的电磁波发生了异常反射. 当入射波的频率  $f < f_c = 10$  GHz 时, 反射波由于相位梯度超表面的作用被耦合成表面波;

当入射波频率  $f > f_c = 10$  GHz 时, 反射波发生了明显的异常反射, 并且随着入射波频率的不断增大, 其异常反射角在不断地减小. 为了进一步分析, 图 10 分别给出了入射波  $f = 12, 14, 16, 18$  GHz 时的  $y$ -方向电场分量图, 图中白色箭头为异常反射方向. 当入射波频率为 14 GHz 时, 其对应的异常反射角为  $44.4^\circ$  (如图 10 (b) 所示), 这与根据 (3) 式理论计算的异常反射角  $45.5^\circ$  基本相符. 如表 1 所列, 在误差不超过  $\pm 3^\circ$  时, 仿真和理论计算的结果基本符合. 二者存在一定的偏差, 是由于计算反射相位时采用的周期性边界条件, 单元之间的耦合较强; 组成相位梯度超表面后, 由于几何参数的不同, 其单元间耦合程度相比于计算反射相位是单元间的耦合程度要弱. 因此, 实际的相位梯度和设计的相位梯度存在一定的偏差.

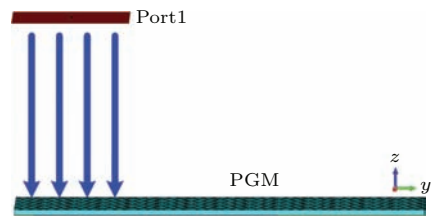


图8 仿真示意图

Fig. 8. Schematic diagram for simulation.

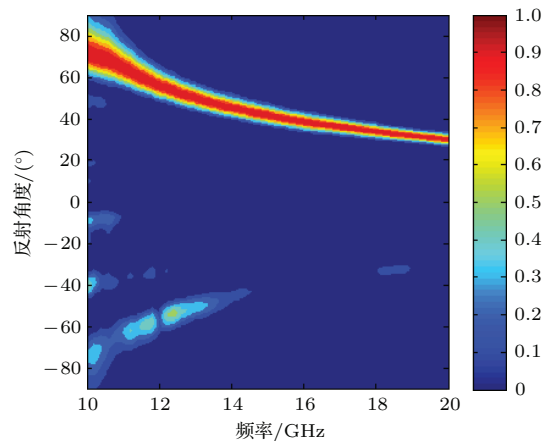


图9 (网刊彩色)  $x$ -极化电磁波垂直入射时超表面的异常反射谱

Fig. 9. (color online) Anomalous reflection spectrum under  $x$ -polarized wave normal incidence.

表1 异常反射角度理论计算与仿真结果对比  
Table 1. Comparison of anomalous angle in theoretical calculation and simulation.

频率	12 GHz	14 GHz	16 GHz	18 GHz
计算结果	$56.44^\circ$	$45.58^\circ$	$38.68^\circ$	$33.74^\circ$
仿真结果	$54.02^\circ$	$44.42^\circ$	$38.1^\circ$	$33^\circ$

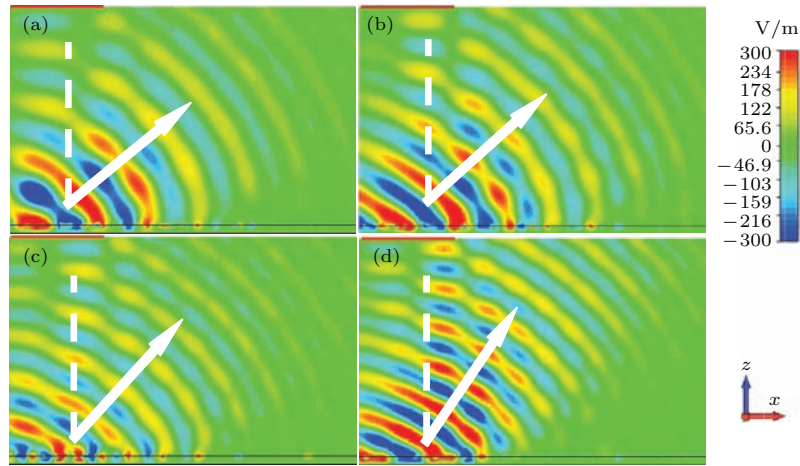


图10 (网刊彩色) 反射波电场  $y$ -分量分布 (a)  $f = 12$  GHz; (b)  $f = 14$  GHz; (c)  $f = 16$  GHz; (d)  $f = 18$  GHz  
 Fig. 10. (color online) Distribution of the  $y$ -component of the electric field: (a)  $f = 12$  GHz; (b)  $f = 14$  GHz; (c)  $f = 16$  GHz; (d)  $f = 18$  GHz.

### 3.2 实验验证

根据上面的设计, 利用平面印刷电路板技术加工制作了  $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$  的相位梯度超表面测试样品, 如图 11 (a) 所示, 其中插图为  $1 \times 6$  的超单元阵列结构放大图. 样品采用厚度为  $d = 3\text{ mm}$  的 F4B 基板, 金属表面镀锡以防止因金属氧化影响实验结果. 采用自由空间法在微波暗室中进行测试, 测试平台示意图如图 11 (b), 两标准增益喇叭天线固定在一圆形转台的两个旋臂上, 样品竖直固定于转台中心处, 一个喇叭天线作为发射天线, 发射  $x$ -极化电磁波, 另一个喇叭用作接收天线, 接收  $y$ -极化电磁波, 两喇叭天线紧靠在一起, 垂直置于相位梯度超表面. 测试时, 先用两同极化的喇叭对与超表面同尺寸的金属平板归一化校准, 再用两不同极化的喇叭天线测试超表面样品的交叉极化镜面反射率, 测试结果如图 12 所示. 在  $8.9\text{--}18.1\text{ GHz}$  频率范围内, 样品镜面反射率测试结果均小于  $-10\text{ dB}$ , 与仿真结果基本一致.

从图 12 可以看出: 实验测试结果与仿真结果不能完全符合, 其原因主要是样品的加工误差和测试误差. 加工制作时所采用材料的参数(介电常数)与仿真中所选取的材料参数不完全相同, 导致频率偏移; 在测试过程中, 样品距离收发天线比较近, 导致在异常反射角度较小时部分异常反射波被接收天线接收, 使得镜面反射率增大. 但是, 在整个频率范围内, 测试结果与仿真结果基本符合, 验证了该相位梯度超表面具有宽带、高效的交叉极化旋转特性和异常反射特性.

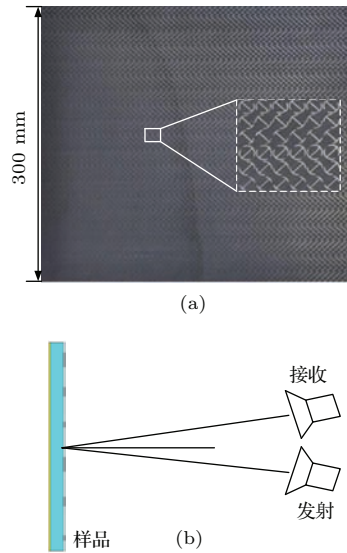


图 11 (a) 相位梯度超表面样品 ( $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ ); (b) 测试方法示意图  
 Fig. 11. (a) PGM sample ( $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ ); (b) schematic diagram of the experiment setup.

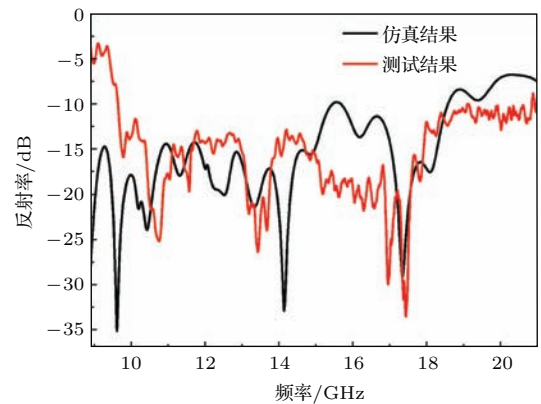


图 12 (网刊彩色) 相位梯度超表面镜面反射率仿真与测试结果  
 Fig. 12. (color online) The measured and simulated mirror reflectivities of PGM.

## 4 结 论

本文设计了一种基于双圆弧形金属结构的交叉极化旋转超表面, 在 7.9—20.1 GHz 频率范围内, 实现了将  $x$ -极化波旋转为  $y$ -极化波, 其极化转换率高达 99%. 基于这种超表面单元结构可实现交叉极化反射相位的自由调控, 通过改变金属结构的几何参数, 选取了六个具有稳定相位差、相位分布涵盖  $2\pi$  的单元结构进行周期性排列, 设计并制作出反射型交叉极化旋转相位梯度超表面. 该超表面在 8.9—18.1 GHz 范围内能高效地实现交叉极化和异常反射. 仿真和计算了电磁波垂直入射至超表面时的镜面反射率、电磁场分布以及不同频率的入射波的异常反射角, 并在微波暗室中实测了样品的镜面反射率, 测试结果与仿真结果、理论计算结果基本一致. 在 8.9—18.1 GHz 频率范围内, 所设计的超表面的镜面反射率均小于  $-10$  dB, 并且随着频率的增大, 其异常反射角不断减小, 异常反射角度与理论计算结果基本一致. 这种交叉极化旋转相位梯度超表面具有质量轻、体积小、工作频带宽等特性, 在隐身领域、通信领域具有一定的应用前景.

## 参考文献

- [1] Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **333** 334
- [2] Ni X J, Emani N K, Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M 2012 *Science* **335** 427
- [3] Aieta F, Genevet P, Yu N F, Kats M A, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 1702
- [4] Pinchuk A O, Schatz G C 2007 *J. Opt. Soc. Am.* **2007** 24
- [5] Paul O, Reinhard B, Krolla B, Beigang R, Rahm M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 241110
- [6] Pendry J B, Schurig D, Smith D R 2006 *Science* **312** 1780
- [7] Wang J F, Zhang J Q, Ma H, Yang Y M, Wu X, Qu S B, Xu Z, Xia S 2010 *Acta Phys. Sin.* **60** 087802 (in Chinese) [王甲富, 张介秋, 马华, 杨一鸣, 吴翔, 屈绍波, 徐卓, 夏颂 2010 物理学报 **59** 1851]
- [8] Zeng R, Xu J P, Yang Y P, Liu S T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6446 (in Chinese) [曾然, 许静平, 羊亚平, 刘树田 2007 物理学报 **56** 6446]
- [9] Yu N F, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [10] Sun S L, He Q, Xiao S Y, Xu Q, Li X, Zhou L 2012 *Nature Materials* **11** 426
- [11] Huang L L, Chen X Z, Bai B F 2013 *Science & Applications* **2** e70
- [12] Huang L L, Chen X Z, Holger M, Li G X, Bai B F, Tan Q F, Jin G F, Thomas Z, Zhuang S 2012 *Nano Letters* **2012** 5750
- [13] Wang J F, Qu S B, Ma H, Xu Z, Zhang A X, Zhou H, Chen H Y, Li Y Y 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 201104
- [14] Shi H Y, Li J X, Zhang A X, Jiang Y S, Wang J F, Xu Z, Xia S 2014 *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* **23** 56483
- [15] Quan J, Tian Y, Zhang J, Shao L X 2011 *Chin. Phys. B* **20** 047201
- [16] Kats A V, Savel'ev S, Yampol'skii V A, Noril F 2008 *Phys. Rev. Lett.* **98** 073901
- [17] Wang W S, Zhang L W, Zhang Y W, Fang K 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024203 (in Chinese) [王五松, 张利伟, 张冶文, 方恺 2013 物理学报 **62** 024203]
- [18] Nathaniel K G, Jane E H, Dibakar R C, Zeng Y, Matthew T R, Abul K A, Antoinette J T, Diego A R Dalvit, Chen H T 2013 *Science* **123** 5399

# Broadband anomalous reflector based on cross-polarized version phase gradient metasurface\*

Fan Ya<sup>1)</sup> Qu Shao-Bo<sup>1)†</sup> Wang Jia-Fu<sup>1)‡</sup> Zhang Jie-Qiu<sup>1)</sup>  
Feng Ming-De<sup>2)</sup> Zhang An-Xue<sup>3)</sup>

1) (Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

2) (Key Laboratory of Electronics Materials Research of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

3) (School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

( Received 3 March 2015; revised manuscript received 13 April 2015 )

## Abstract

Phase gradient metasurface (PGM) is a new way to control reflective beam and refractive beam. By means of PGM, wave-fronts can be controlled in a more freedom way. The generalized Snell's law was put forward first by Nanfang Yu et al. [Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **333** 334] to describe the anomalous refraction on PGM. Anomalous refraction and out-of-plane reflection were then demonstrated using PGM composed of V-shaped nanoantennas. As deeper research about PGM, many reflective PGMs are also proposed. Typical examples are the reflective PGM using H-shaped resonators by Lei Zhou's group and using split-ring resonators by Shaobo Qu's group, both acting as high-efficiency surface wave couplers. However phase gradient of most PGMs above are achieved in a narrow-band and cannot change the polarizations. Anomalous reflection can only be realized in a certain narrow-band, and anomalous reflective angles cannot be precisely predicted. In this paper, a polarized conversion metasurface based on double-circular metallic resonator is first designed. The conversion successfully achieves ultra-wideband cross-polarization for linearly-polarized waves within a broadband of 12.2 GHz (from 7.9–20.1 GHz) with more than 99% cross-polarized reflectance. On the premise of high efficiency, reflective phase can be regulated by changing geometrical parameter of double-circular metallic structure. Then a broadband one-dimensional dispersive phase gradient metasurface comprised of six unit cells periodically arrayed above substrate is designed and fabricated. The PGM can perfectly achieve anomalous reflection. Measured result about its specular reflectivity is in good agreement with simulated result. Moreover, the measurement results of E-field distribution and anomalous reflective angle nearly accord with simulation results. Anomalous reflective angle is precisely predicted based on the generalized Snell's law. Both simulation and experiment verify that the PGM can make incident waves efficiently coupled as surface waves from 8.9–10 GHz and anomalously reflected in a range from 10 GHz to 18.1 GHz.

**Keywords:** metasurface, polarization conversion, phase gradient, anomalous reflection

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

**DOI:** 10.7498/aps.64.184101

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61331005, 11274389, 61471388), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. 2013M532131, 2013M532221), and the Fundamental Research Project of Shanxi Province, China (Grant Nos. 2011JQ8031, 2013JM6005).

† Corresponding author. E-mail: [qushaobo@mail.xjtu.edu.cn](mailto:qushaobo@mail.xjtu.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [wangjiafu1981@126.com](mailto:wangjiafu1981@126.com)