

二维宽带相位梯度超表面设计及实验验证

李勇峰 张介秋 屈绍波 王甲富 吴翔 徐卓 张安学

Design and verification of a two-dimensional wide band phase-gradient meta-surface

Li Yong-Feng Zhang Jie-Qiu Qu Shao-Bo Wang Jia-Fu Wu Xiang Xu Zhuo Zhang An-Xue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 094101 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.094101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I9>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于超材料吸波体的低雷达散射截面波导缝隙阵列天线

Low-RCS waveguide slot array antenna based on a metamaterial absorber

物理学报.2015, 64(9): 094102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094102>

基于宽带吸波体的微带天线雷达散射截面缩减设计

Radar cross section reduction of microstrip antenna based on wide-band metamaterial absorber

物理学报.2015, 64(8): 084101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084101>

基于石墨烯的可调谐太赫兹光子晶体结构

Tunable terahertz photonic crystal structures containing graphene

物理学报.2015, 64(7): 074101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.074101>

共享孔径人工电磁媒质设计及其在高增益低雷达散射截面天线中的应用

Design of shared aperture metamaterial and its applications for high gain and low radar cross section antenna

物理学报.2015, 64(5): 054101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054101>

磁电耦合超材料本构矩阵获取方法的研究

A method of retrieving the constitutive parameter matrix of magnetoelectric coupling metamaterial

物理学报.2015, 64(4): 044101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044101>

# 二维宽带相位梯度超表面设计及实验验证\*

李勇峰<sup>1)</sup> 张介秋<sup>1)†</sup> 屈绍波<sup>1)</sup> 王甲富<sup>1)</sup> 吴翔<sup>1)</sup> 徐卓<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)

(2014年9月24日收到; 2014年11月2日收到修改稿)

针对圆极化波, 通过同极化反射超表面结构单元的空间排布, 设计实现了一种二维非色散高效相位梯度超表面. 同极化反射相位可以通过同极化反射超表面结构单元金属线的面内旋转来自由调控. 实现的相位梯度超表面可对左右旋入射波产生相反的相位梯度. 当线极化波入射到超表面上时, 反射波被分为两束向相反方向传播的圆极化波. 仿真了线极化波垂直入射时的反射功率密度谱, 仿真结果与理论上设计的异常反射方向一致. 制作了厚度为2 mm的超表面样品, 测试了其镜面反射率曲线. 实验结果表明, 线极化波垂直入射时, 超表面在9.5—19.0 GHz的镜面反射率降至-5 dB以下.

**关键词:** 极化转化, 异常反射, 相位梯度超表面, 宽带

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

**DOI:** 10.7498/aps.64.094101

## 1 引言

超表面是一种亚波长厚度的金属结构阵列, 或者可以近似为二维的超材料. 它可以实现对透射波或反射波的幅度和相位进行调制. 由于其深亚波长厚度及相位调制的特性, 超表面在电磁波极化调制、电磁波传播控制等方面具有重要的应用前景. 极化调制超表面<sup>[1-6]</sup>主要利用超表面结构的各向异性在电磁波通过时在两个正交方向上产生不同的相移来实现. 通过单层超表面结构设计可以实现反射型极化转化(主要包括: 线极化旋转<sup>[1,2]</sup>和线极化转化为圆极化波<sup>[3,4]</sup>), 通过双层或多层超表面设计实现了透射型极化旋转(主要包括: 线极化选择旋转<sup>[5]</sup>、线极化变圆极化波<sup>[6]</sup>及左右旋圆极化波的相互转化).

相位梯度超表面<sup>[7-19]</sup>是一种通过不同相移的超表面结构单元空间排布, 在面内方向形成相位梯度的各向异性超表面. 可以更加自由地控制反射

波或透射波束的传播方向. 传统的光学元件(平面镜、棱镜、透镜<sup>[20,21]</sup>等)及衍射结构(光栅等)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, 波在光学元件中传播的距离一般远大于波长. 当电磁波入射到两种介质的分界面上时, 反射波和透射波遵守经典的反射定律和折射定律(斯涅尔定律, Snell's Law). 超材料尤其左手材料<sup>[22-24]</sup>的研究表明, 利用左手材料也可使入射波发生异常反射, 但其仍然遵循经典折射定律, 只是引入了负折射率的概念. 相比之下, 相位梯度超表面通过深亚波长厚度的结构, 就可以实现对反射波束和折射波束的自由控制, 不再遵守经典的反射定律, 极大减小了光学器件的厚度和体积.

相位梯度超表面自其首次被提出后, 就受到了国内外学术界的广泛关注. Yu等使用V形结构在光波段成功实现了相位梯度超表面, 实现了异常折射<sup>[7]</sup>, 通过单元结构空间排布设计相位梯度, 实现了极化波盘、平面透镜及涡旋波阵面等<sup>[7-11]</sup>.

\* 国家自然科学基金(批准号: 61331005, 11204378, 11274389, 11304393, 61302023)、中国博士后科学基金(批准号: 2013M532131, 2013M532221)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: zhangjq0@163.com

Zhou 等采用 H 形结构设计实现了反射型相位梯度超表面<sup>[12]</sup>, 实现了将传播电磁波耦合为表面电磁波<sup>[25,26]</sup>. Grady 等基于高效的透射型线极化旋转超材料, 设计实现了高效的透射型异常折射超表面<sup>[13]</sup>. Huang 等通过不同旋向的短金属线结构单元空间排布, 实现了圆极化入射条件下的异常折射<sup>[14,15]</sup>. 在之前的工作中, 我们基于高效的同极化反射超表面结构单元, 设计实现了一维相位梯度超表面<sup>[16]</sup>.

本文基于圆极化波入射条件下的同极化超表面设计实现了二维宽带相位梯度超表面. 首先, 设计了一种圆极化波入射条件下的同极化反射超表面, 可以实现宽带、高效的同极化反射. 基于这种同极化反射超表面设计实现了二维, 宽带相位梯度超表面, 能够实现将线极化入射波异常反射为两束沿相反方向传播的圆极化波. 仿真与测试均表明: 线极化波入射时的镜面反射率表明在  $9.5 < f < 19.0$  GHz 的宽带频率范围内, 镜面反射率低于  $-5$  dB.

## 2 二维非色散相位梯度超表面设计

### 2.1 圆极化波入射条件下的同极化反射超表面设计

如图 1 所示, 为设计的圆极化波入射条件下的同极化反射超表面的单元结构示意图. 图中的黄色部分为金属线结构单元. 其尺寸参数 ( $b, l, w, w_1$ ) 如图中所示. 整个单元结构周期为  $a$ , 由三层组成: 最上层为金属线结构单元, 中间层是厚度为  $d$  的 FR4 介质基板 (介电常数  $\epsilon_r = 4.3$ , 损耗角正切值  $\tan\delta = 0.025$ ). 最下层为金属背板. 经优化得到的结构单元尺寸参数值在表 1 中给出.

表 1 单元结构尺寸参数值

Table 1. The values of the dimension parameters for the unit cell.

$a/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$l/\text{mm}$	$w/\text{mm}$	$w_1/\text{mm}$	$d/\text{mm}$
6	4.25	0.92	0.25	0.2	2

在圆极化波入射条件下, 被金属板反射后, 反射波任意两个正交方向上的电场分量之间的相位超前或者滞后关系与入射波一致, 而传播方向与入射波相反, 反射波的极化方式发生转化, 即左/右旋入射波被反射为右/左旋圆极化反射波. 因此, 本文提出并设计实现了圆极化波入射条件下的同极化

反射超表面. 当圆极化波入射至图 1 所示的超表面上, 在与传播方向垂直的任意两个正交方向上, 反射波的电场分量之间的相位超前或滞后关系发生颠倒. 且传播方向与入射波相反, 因此实现了同极化反射. 对于上面设计的圆极化波入射条件下的同极化反射超表面, 利用 CST Microwave Studio 仿真计算得到左旋/右旋圆极化波垂直入射时的同极化转化率如图 2 所示. 其中的同极化转化率定义为

$$p = r_{LL(RR)}^2 / (r_{LL(RR)}^2 + r_{LR(RL)}^2),$$

$r_{LL(RR)}$  和  $r_{LR(RL)}$  分别为同极化反射系数和交叉极化反射系数. 从图 2 可以看出, 在 10.3—18.8 GHz 的宽带频率范围内, 同极化转化率均大于 92%.

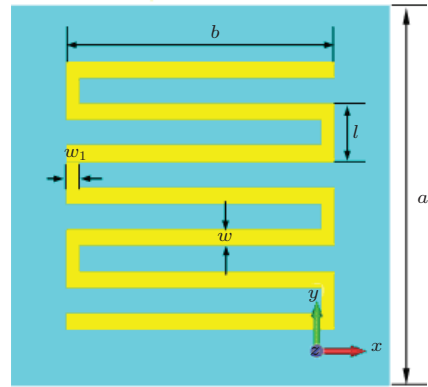


图 1 同极化反射超表面单元结构正视图

Fig. 1. The front view of the co-polarization reflection metasurface unit cell.

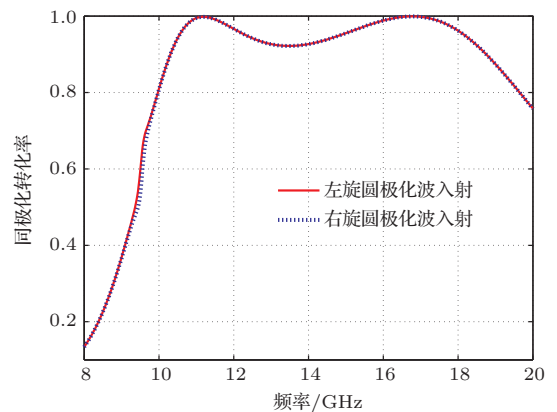


图 2 圆极化波垂直入射时的同极化转化率

Fig. 2. The co-polarization conversion ratio for circularly polarized waves normal incidence.

### 2.2 反射型非色散相位梯度超表面设计

基于上面设计的圆极化波入射条件下的同极化反射超表面, 设计了一种二维非色散相位梯度超

表面, 如图 3 所示为设计得到的二维相位梯度超表面的超单元结构正视图. 圆极化波入射时, 相邻单元之间的同极化反射相位差通过金属线结构单元的面内旋转来实现. 理论上, 反射相移  $\Delta\Phi$  与旋转角度  $\beta$  之间的关系可以表示为  $\Delta\Phi = \pm 2\beta$ , 其中入射波为左旋圆极化波时, 符号取 +; 相反地, 在右旋圆极化波入射时, 符号取 -. 因此, 相位梯度  $\nabla\Phi$  可以用下面的公式计算:

$$\nabla\Phi = \frac{\pm 2\beta}{a}, \quad (1)$$

其中,  $a$  为单元结构周期. 文中相邻单元之间的相移设计为  $\pi/3$ , 旋转角度  $\beta = \pi/6$ . 因此, 通过六个不同的小单元就可实现  $2\pi$  的相移. 通过这六种不同单元的空间排布, 组成如图 3 所示的超单元结构.  $x$  和  $y$  方向上的相位梯度  $\nabla\Phi_x = \nabla\Phi_y = \pi/3a$ . 根据广义反射定律, 圆极化波以  $(\theta_i, \varphi_i)$  方向入射时

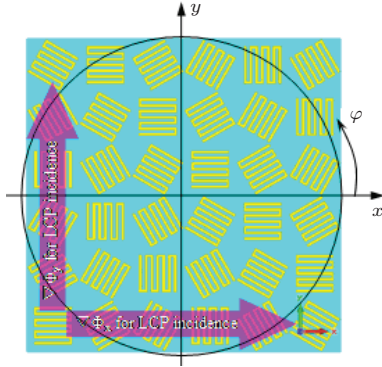


图 3 非色散相位梯度超表面超单元示意图

Fig. 3. Schematic view of the “super unit” for the dispersionless phase gradient metasurface.

的异常反射方向为

$$\varphi_r = \arctan \frac{k_i \sin \theta_i \sin \varphi_i + \nabla\Phi_y}{k_i \sin \theta_i \cos \varphi_i + \nabla\Phi_x}, \quad (2)$$

$$\theta_r = \arcsin \left\{ \frac{1}{k_i} \left[ (k_i \sin \theta_i \sin \varphi_i + \nabla\Phi_y)^2 + (k_i \sin \theta_i \cos \varphi_i + \nabla\Phi_x)^2 \right]^{1/2} \right\}, \quad (3)$$

其中,  $k_i$  为入射波的波数. 圆极化垂直入射时, 在  $f = 13$  GHz 时,  $\varphi_r = 45^\circ$ ,  $\theta_r = 65.03^\circ$ .

### 3 仿真与结果分析

众所周知, 一束线极化波可以分解为两束不同极化的圆极化波: 左旋圆极化波和右旋圆极化波. 因此, 当一束线极化波入射到上面所设计的超表面上时, 由于超表面对于左旋和右旋圆极化波产生的大小相等、方向相反的相位梯度, 线极化入射波被分解为两束圆极化波, 且沿相反的方向发生异常反射. 同时, 由于二维相位梯度超表面的异常反射使得镜面反射率降低. 另外, 斜入射时, 异常反射波将偏离入射面. 如图 4 所示为  $f = 13$  GHz 时, TE 波垂直入射条件下仿真得到的远场散射图, 其中图 4(a) 为  $z$  视图, 从图中可以看出: 入射波被异常反射为两束沿相反方向传播的圆极化波, 异常反射面位于  $\varphi_r = 45^\circ$  的面内. 图 4(b) 为  $\varphi_r = -45^\circ$  视图, 从图中很容易得到异常反射角  $\theta_r \approx 65^\circ$ , 与理论上设计的异常反射方向一致.

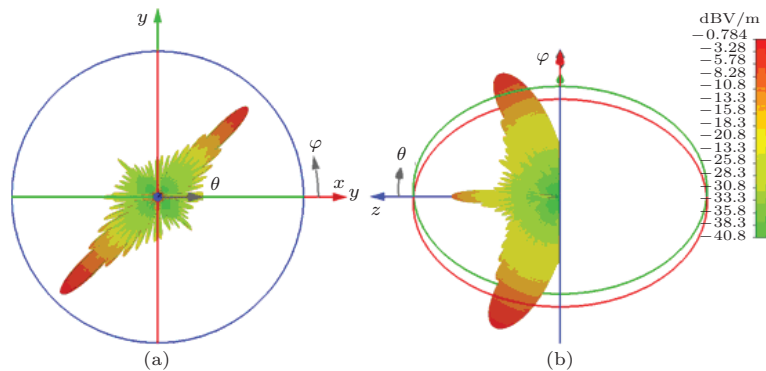


图 4 (网刊彩色)  $f = 13$  GHz, TE 波垂直入射时的远场散射图 (a)  $z$  视图; (b)  $\varphi_r = -45^\circ$  视图

Fig. 4. (color online) The farfield scattering for TE wave normal incidence at  $f = 13$  GHz (a)  $z$ -view; (b)  $\varphi_r = -45^\circ$ -view.

如图 5 所示, 为利用 CST Microwave Studio 软件仿真得到的线极化波垂直入射条件下,  $\varphi_r = 45^\circ$  平面内的异常反射功率密度谱. 入射波的电场强度沿  $x$  方向极化. 从图中可以看出, 电磁波垂直入

射时, 反射波功率主要位于  $\pm\theta$  方向上, 而垂直方向上几乎无反射. 当入射波的频率  $f < 12$  GHz 时, 异常反射角度大于  $90^\circ$ , 因此, 垂直入射的线极化波耦合为两束表面波沿超表面传播. 图中的“o”给



出了理论计算得到的异常反射角. 可以看出, 仿真结果与理论值完全符合. 图6给出了TE波垂直入射时镜面反射率的仿真结果. 从图中可以看出, 在10—20 GHz的宽带频率范围内, 镜面反射率均低于-10 dB.

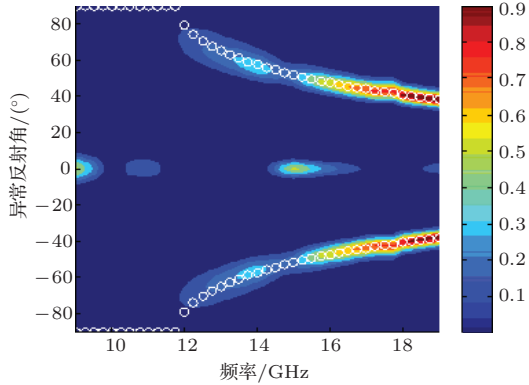


图5 (网刊彩色) 线极化波垂直入射时,  $\varphi = 45^\circ$  方向上的反射功率密度谱

Fig. 5. (color online) The reflective power intensity spectra at  $\varphi = 45^\circ$  for linearly polarized wave normal incidence.

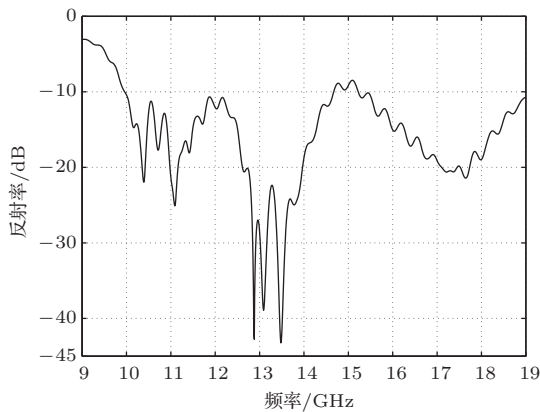


图6 垂直入射条件下的镜面反射率仿真结果

Fig. 6. The simulated mirror reflectivity for waves normal incidence.

#### 4 实验验证

为了进一步验证我们的设计, 采用印刷电路板技术制作了一块超表面样品 (尺寸: 324 mm  $\times$  324 mm), 如图7所示, 其中的插图为其中的一个超单元结构放大图. 介质基板采用厚度  $d = 2$  mm的FR4. 图8(a)给出了实验测试平台示意图, 如图所示, 两个标准增益的喇叭天线固定在圆形转台的两个旋臂上, 其中一个作为发射天线, 另一个作为接收天线工作. 样品竖直固定在圆形转台的中心. 旋转旋臂使得发射天线和接收天线相对于测试样品组成  $4^\circ$  的夹角. 整个测试过程在暗室中进

行. 图8(b)给出了TE波垂直入射时测试得到的镜面反射率曲线. 结果表明, 在  $9.5 \text{ GHz} < f < 19.0 \text{ GHz}$  的超宽带频率范围内, 镜面反射率均低于 -5 dB, 在  $12 \text{ GHz} < f < 14.8 \text{ GHz}$  和  $16.2 \text{ GHz} < f < 19.0 \text{ GHz}$  两个宽带频带内, 镜面反射率小于 -10 dB, 其中镜面反射率最低达到 -27 dB. 线极化到圆极化的异常反射率可以从镜面反射率中得到, 且异常反射的左旋圆极化波和右旋圆极化波的能量相等. 从图中可以看出: 测试结果与仿真结果基本一致. 测试结果相对于仿真结果有微小的偏移, 主要由于实际样品的FR4基板介电常数和损耗与仿真中使用的材料介电常数和损耗之间存在

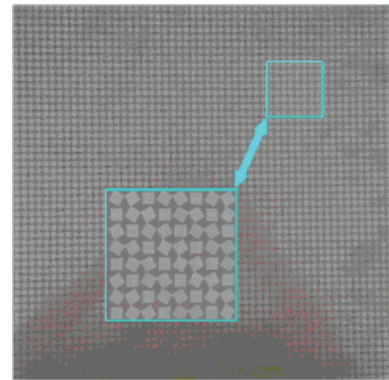


图7 超表面加工样品照片 (324 mm  $\times$  324 mm)

Fig. 7. The photograph of the fabricated metasurface sample (324 mm  $\times$  324 mm).

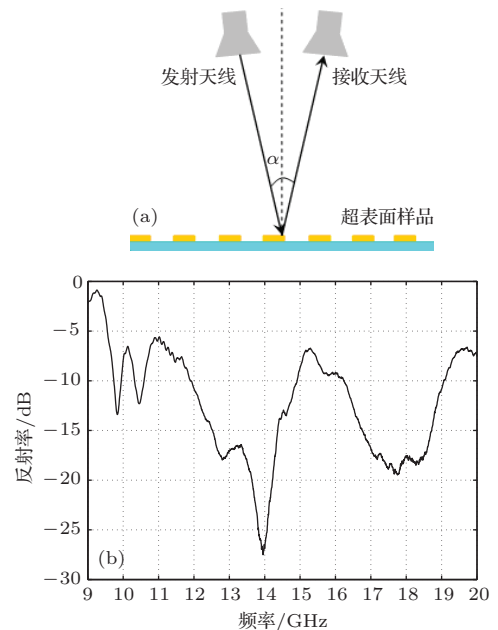


图8 (a) 超表面镜面反射率测试方法示意图; (b) 电磁波垂直入射时的镜面反射率测试结果

Fig. 8. (a) Schematic diagram of mirror reflectivity measurement method; (b) the measured mirror reflectivity for waves normal incidence.

细微差别. 另外, 由于测试过程中接收天线到超表面样品的距离(约等于转台悬臂长度)比较近, 导致异常反射波一部分被接收天线接收. 因此实验测试得到的镜面反射率大于仿真得到的镜面反射率.

## 5 结 论

本文设计实现了二维宽带反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高效同极化反射超表面, 基于这种极化旋转超表面单元设计实现了一种二维反射型相位梯度超表面. 当线极化波入射到超表面上, 被超表面异常反射为两束圆极化波, 且由于二维的相位梯度设计, 反射波偏离入射面, 与入射面成 $45^\circ$ 角. 由于宽带异常反射, 镜面反射率下降. 实验测试结果表明: 在 $9.5 \text{ GHz} < f < 19.0 \text{ GHz}$ 的宽带频率范围内, 镜面反射率均小于 $-5 \text{ dB}$ , 与仿真结果基本一致.

## 参考文献

- [1] Feng M D, Wang J F, Ma H, Mo W D, Ye H J, Qu S B 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 074508
- [2] Chen H Y, Wang J F, Ma H, Qu S B, Xu Z, Zhang A X, Yan M B, Li Y 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 154504
- [3] Huang X J, Yang D, Yang H L 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 103505
- [4] Ma H F, Wang G Z, Kong G S, Cui T J 2014 *Opt. Mater. Express* **4** 1717
- [5] Zhao Y, Alu A 2011 *Phys. Rev. B* **84** 205428
- [6] Zhu H L, Cheung S W, Chung K L, Yuk T I 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **61** 4615
- [7] Yu N, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [8] Aieta F, Genevet P, Yu N, Kats M A, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 1702
- [9] Genevet P, Yu N F, Aieta F, Lin J, Kats M A, Blanchard R, Scully M O, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 013101
- [10] Yu N F, Capasso F 2014 *Nat. mater.* **13** 139
- [11] Yu N, Aieta F, Genevet P, Kats M A, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 6328
- [12] Sun S L, He Q, Xiao S Y, Xu Q, Li X, Zhou L 2012 *Nat. Mater.* **11** 426
- [13] 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
- [14] Huang L L, Chen X Z, Bai B F, Tan Q F, Jin G F, Zentgraf T, Zhang S 2013 *Light: Science & Applications* **2** e70
- [15] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, Li G X, Bai B F, Tan Q F, Jin G F, Zentgraf T, Zhang S 2012 *Nano Lett.* **12** 5750
- [16] 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
- [17] 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
- [18] Francesco M, Andrea A 2014 *Chin. Phys. B* **23** 047809
- [19] Sun Y Y, Han L, Shi X Y, Wang Z N, Liu D H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104201 (in Chinese) [孙彦彦, 韩璐, 史晓玉, 王兆娜, 刘大禾 2013 物理学报 **62** 104201]
- [20] Pinchuk A O, Schatz G C 2007 *J. Opt. Soc. Am.* **24** 2313
- [21] Paul O, Reinhard B, Krolla B, Beigang R, Rahm M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 241110
- [22] Pendry J B, Schurig D, Smith D R 2006 *Science* **312** 1780
- [23] Xu X H, Wu X, Xiao S Q, Gan Y H, Wang B Z 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084101 (in Chinese) [徐新河, 吴夏, 肖绍球, 甘月红, 王秉中 2013 物理学报 **62** 084101]
- [24] Wang J F, Zhang J Q, Ma H, Yang Y M, Wu X, Qu S B, Xu Z, Xia S 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1851 (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]
- [25] Kats A V, Savel'ev S, Yampol'skii V A, Nori F 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 073901
- [26] Zhang H F, Cao D, Tao F, Yang X H, Wang Y, Yan X N, Bai L H 2010 *Chin. Phys. B* **19** 027301

# Design and verification of a two-dimensional wide band phase-gradient meta-surface\*

Li Yong-Feng<sup>1)</sup> Zhang Jie-Qiu<sup>1)†</sup> Qu Shao-Bo<sup>1)</sup> Wang Jia-Fu<sup>1)</sup> Wu Xiang<sup>1)</sup>  
Xu Zhuo<sup>2)</sup> Zhang An-Xue<sup>3)</sup>

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

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

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

( Received 24 September 2014; revised manuscript received 2 November 2014 )

## Abstract

For dealing with circularly polarized waves, a high-efficient two-dimensional dispersionless phase-gradient meta-surface is devised and achieved by spatially arranging co-polarized reflective metasurface unit cells. The phase of the co-polarized reflection can be freely modulated via a rotating metallic wire of the co-polarized reflective metasurface unit cell in-plane. The achieved phase gradient metasurface can produce opposite-sign phase gradient for left-and right-handed circularly polarized incident waves. During linearly polarized wave incidence, the reflected waves will decompose into two counter-directionally propagating circularly polarized waves. Reflective power density spectra for the linearly polarized wave in normal incidence are simulated, which are well consistent with the theoretically designed anomalous reflection direction. A 2 mm thick sample is fabricated and the mirror reflectivity curve is measured. Experimental results show that for linearly polarized wave normal incidence, the mirror reflectivity is reduced to below  $-5$  dB in a wide band from 9.5 to 17.0 GHz.

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

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

**DOI:** 10.7498/aps.64.094101

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 61331005, 11204378, 11274389, 11304393, 61302023), the National Science Foundation for Post-doctoral Scientists of China (Grant Nos. 2013M532131, 2013M532221), and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant Nos. 2011JQ8031, 2013JM6005).

† Corresponding author. E-mail: [zhangjiq0@163.com](mailto:zhangjiq0@163.com)