

圆极化波反射聚焦超表面

李勇峰 张介秋 屈绍波 王甲富 吴翔 徐卓 张安学

Circularly polarized wave reflection focusing metasurfaces

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, 124102 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.124102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于雷达海杂波的区域性非均匀蒸发波导反演方法

Inversion of regional range-dependent evaporation duct from radar sea clutter

物理学报.2015, 64(12): 124101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124101>

基于高阻抗表面的多频带 Salisbury 屏设计

Design of multiband Salisbury screen based on high impedance surfaces

物理学报.2015, 64(11): 114101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114101>

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>

二维宽带相位梯度超表面设计及实验验证

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

物理学报.2015, 64(9): 094101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094101>

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>

圆极化波反射聚焦超表面*

李勇峰¹⁾ 张介秋^{1)†} 屈绍波¹⁾ 王甲富¹⁾ 吴翔¹⁾ 徐卓²⁾ 张安学³⁾

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11月1日收到; 2014年12月5日收到修改稿)

基于圆极化波入射条件下的高效同极化反射超表面实现了对圆极化反射波相位的自由调控, 设计了一维圆极化波反射聚焦超表面. 在中心频率 $f = 16$ GHz 附近, 右旋圆极化平面波入射时, 反射波聚焦于焦距 $L = 200$ mm 的实焦点; 左旋圆极化波入射时, 反射波近似聚焦于焦距 $L = -200$ mm 的虚焦点. 仿真计算得到聚焦波束的波束宽度、焦深. 结果表明, 这种圆极化反射聚焦超表面具有很好的聚焦效果, 同时具有长焦深和宽带特性.

关键词: 超表面, 同极化反射, 反射聚焦, 焦深

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

DOI: 10.7498/aps.64.124102

1 引言

超表面是一种亚波长厚度的准周期性结构阵列, 大多数超表面均为各向异性结构. 利用超表面可以对反射波或透射波的幅度、相位、极化方式和波束形状进行自由调控. 传统光学元件(如平面镜、棱镜、透镜)对于反射和透射波的波束形状、极化方式和传播方向的调制主要通过波束传播路径上的连续相位积累来实现^[1,2]. 通常, 波在光学元件中传播的距离远大于波长, 因此导致了光学元件相比于波长较大的厚度和体积, 限制了其在微波频段的应用. 超表面通过亚波长尺寸的谐振单元可以使反射或透射波发生相位突变, 通过产生不同相移的谐振单元的空间排布即可形成相位梯度超表面(phase gradient metasurface)^[3-25]. 因此, 亚波长厚度的超表面就可以实现对电磁波传播、波束形状和极化方式的自由调控. 利用超表面可以实现很多光学功能, 如: 光学聚焦^[5-9]、色散聚焦^[10]、异常折射^[11-19]、异常反射^[20-22], 1/4波盘^[12]和表面波

耦合等^[23-25].

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. 哈佛大学的 Yu 等^[11]使用“V”形光学天线结构在光波段实现了相位梯度超表面, 实现了异常折射, 将经典的反折射定律推广为广义反折射定律. 之后, 他们通过单元结构空间排布实现了极化波盘^[12]、平面透镜^[13]及涡旋波阵面等^[14]. 复旦大学周磊教授课题组采用“H”形结构设计实现了反射型相位梯度超表面, 将垂直入射的电磁波耦合为表面电磁波^[23]. Nathaniel 等^[15]基于高效的透射型线极化旋转超材料, 实现了高效的透射型异常折射超表面. Huang 等^[16]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. 在之前的工作中, 我们基于开口谐振环谐振器实现了特定极化电磁波垂直入射条件下的表面电磁波激发^[25]; 利用高效的同极化反射超表面结构单元, 设计实现了一种高效的反射型圆极化相位梯度超表面^[20]. 另外, 极化调制超表面^[26-29]利用超表面结构的各向异性对入射电磁

* 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

波的响应, 两个正交方向上产生不同的相移来实现对反射波和透射波极化方式的调制. 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^[26,27]和线极化转化为圆极化波), 通过双层或多层超表面设计实现了透射型极化转换(主要包括线极化选择旋转^[28]、线极化变圆极化波^[29]及左右旋圆极化波的相互转化).

本文基于圆极化波入射条件下的高效同极化反射型超表面, 实现了对反射圆极化波相位的自由调控. 通过不同同极化反射超表面结构单元的空间排布实现了一维圆极化反射聚焦超表面. 右旋圆极化平面波垂直入射时, 反射波聚焦于焦距 $L = 200$ mm 的实焦点处; 左旋圆极化波入射时, 反射波近似为反射聚焦于焦距 $L = -200$ mm 的虚焦点处. 仿真了 xoz 面内的场分布, 计算得到了 $f = 15.5, 16, 16.5$ GHz 时的聚焦波束宽度和焦深. 结果表明, 这种圆极化反射聚焦超表面具有很好的聚焦效果和一定的带宽, 反射聚焦波的波束宽度约等于波长, 焦深约等于 6 倍波长.

2 同极化反射超表面

图 1 为圆极化波入射条件下的同极化反射超表面单元结构正视图, 整个结构单元由三层结构组成: 金属背板、厚度 $d = 2$ mm 的 F4b (介电常数 $\epsilon_r = 2.65$, 损耗角正切 $\tan\delta = 0.001$) 介质基板和倾斜放置的“Z”形金属线阵列. 其中 a 为结构单元周期, w 为金属线宽, b 和 l 分别为金属线长度. 当圆极化波入射到金属板上时, 反射波在任意两个正交方向上电场分量之间的超前和滞后关系与入射波一致, 而其传播方向与入射波相反, 因此, 反射圆极化波与入射圆极化波的极化相反. 而当圆极化波入射至图 1 所示的同极化反射超表面上时, 反射波任

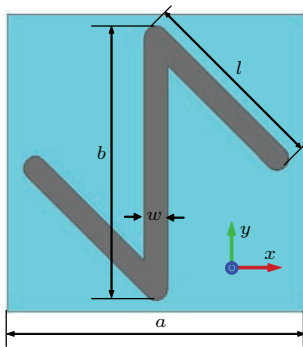


图 1 (网刊彩色) 同极化反射超表面单元结构正视图
Fig. 1. (color online) The front view of the co-polarization reflective metasurface unit cell.

意两个正交方向上的电场分量之间的相位超前和滞后关系相比于入射波发生颠倒, 同时, 反射波的传播方向与入射波相反, 从而导致反射圆极化波与入射圆极化的极化方式一致^[20]. 因此, 图 1 所示的超表面可以实现圆极化波入射条件下的高效同极化反射.

利用 CST Microwave Studio 电磁仿真软件仿真计算右旋圆极化波垂直入射时的反射系数, 仿真结果如图 2 (a) 所示, 从图 2 (a) 可以看出, 在 $14.0 \text{ GHz} < f < 26.5 \text{ GHz}$ 的宽带频率范围内, 同极

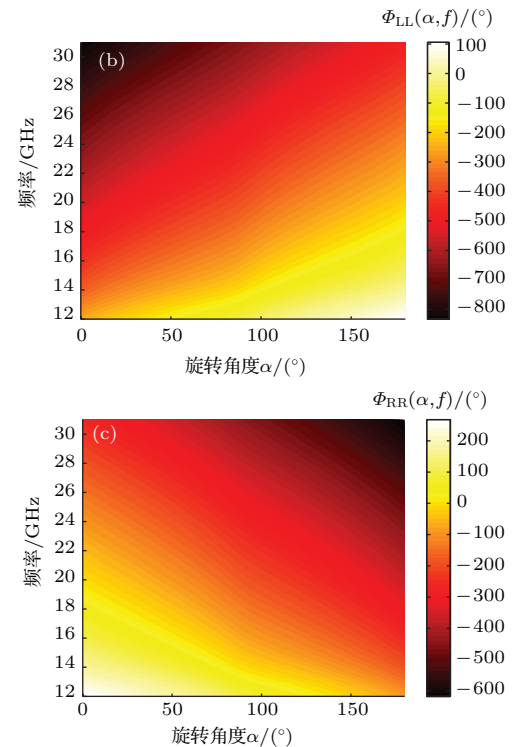
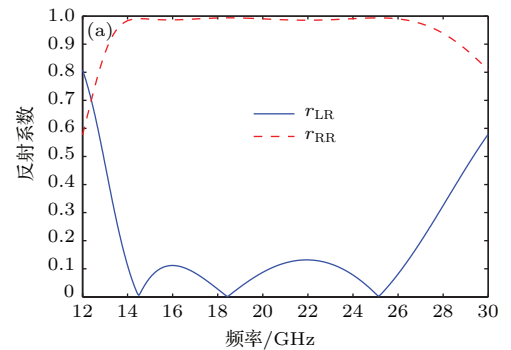


图 2 (网刊彩色) (a) 右旋圆极化波垂直入射时的反射系数; (b) 左旋圆极化波和 (c) 右旋圆极化波入射时的同极化反射相位谱仿真结构

Fig. 2. (color online) (a) The simulated reflection coefficient under the normal incidence of right-handed circularly polarized waves. Co-polarization reflective phase spectra under the normal incidence of (b) left-handed and (c) right-handed circularly polarized waves.

化反射系数均大于 0.98. 同样地, 在同一频率范围内, 左旋圆极化波垂直入射时也可得到高效的同极化反射. 另外, 圆极化波入射条件下的同极化反射相位调制可以通过“Z”形金属线结构的的面内旋转来实现. 具体地, 同极化反射相移 $\Delta\Phi$ 与“Z”形金属线面内旋转角度 α 之间的关系为 $\Delta\Phi = \pm 2\alpha$, 其中, 左旋波入射时取“+”, 右旋波入射时取“-”. 图 2(b) 和图 2(c) 分别给出了仿真得到的左旋和右旋圆极化波入射时的同极化反射相位谱 $\Phi_{LL}(\alpha, f)$ 和 $\Phi_{RR}(\alpha, f)$, 图中横坐标表示“Z”形金属线的面内旋转角度 α , 纵坐标表示入射波的频率 f , 谱图中的颜色深度反映了同极化反射相位的大小. 可以看出, 同极化反射相位随旋转角度 α 线性变化, 且左旋波入射时的变化率与右旋波入射时的变化率相反. 因此, 在圆极化波入射条件下, 同极化反射波的相位可以通过“Z”形金属线的面内旋转自由控制.

3 圆极化反射聚焦超表面

图 3(a) 为平面波垂直入射至超表面时的反射聚焦原理示意图. 从图 3(a) 可以看出, 平面波从 $+z$ 方向垂直入射至超表面上, 反射波聚焦于实焦点 O 处, L 为焦距. 实现这一功能, 超表面上任意点对入射波的相位改变应满足:

$$\Delta\Phi(x) = k_0 \left(\sqrt{L^2 + x^2} - L \right), \quad (1)$$

其中 k_0 为自由空间中的波矢. 本文设计的圆极化波反射聚焦超表面中心频率 $f = 16$ GHz, 焦距 $L = 200$ mm. 根据方程 (1) 计算得到圆极化反射聚焦超表面的同极化反射相位空间分布如图 4 所示. 由图 4 可以看出, 实现平面波反射聚集所需的相位分布为抛物线分布. 由于同极化反射超表面在左旋和右旋圆极化波入射时的同极化反射相移相反, 因此, 对于右旋圆极化波入射的反射聚焦超表面, 在左旋圆极化波平面波垂直入射时, 其同极化反射波可近似看作聚焦于焦距 $L = -200$ mm 处的聚焦点 O' , 如图 3(b) 所示.

同极化反射超表面单元结构周期 $a = 4$ mm, 因此, 实现图 4 所示的同极化反射相移空间分布, 需要 61 个同极化反射单元结构. 图 5 为设计的 $f = 16$ GHz 时圆极化波反射聚焦超表面结构视图. 在右旋圆极化平面波入射时, 反射波为右旋圆极化波, 且聚焦于焦距 $L = 200$ mm 的焦点处; 在左旋

圆极化平面波入射时, 反射波近似为焦点位于焦距 $L = -200$ mm 处的反射波.

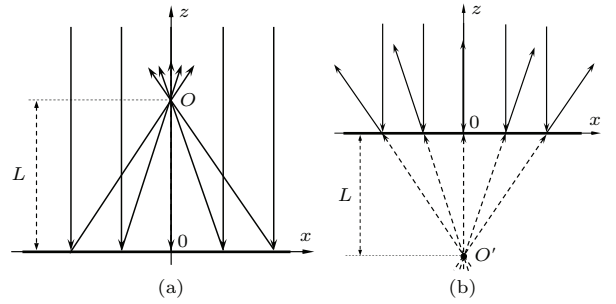


图 3 圆极化波反射聚焦超表面原理示意图

Fig. 3. The schematic diagram for the circularly polarized wave reflection focusing metasurface.

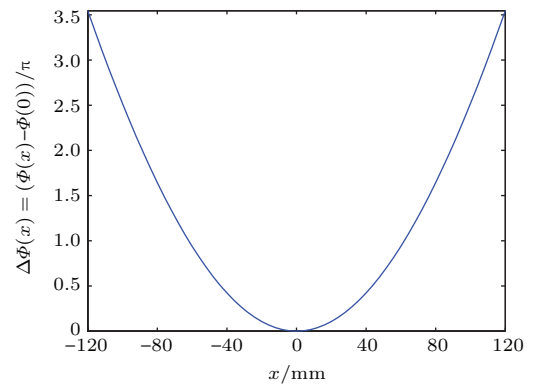


图 4 一维反射聚焦超表面反射相位空间分布

Fig. 4. The reflection phase spatial distribution for the one-dimensional reflective focusing metasurface.



图 5 (网刊彩色) 圆极化波反射聚焦超表面结构视图

Fig. 5. (color online) Schematic view of the circularly polarized wave reflective focusing metasurface.

为了验证上面设计的圆极化波反射聚焦超表面, 我们利用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 仿真计算了圆极化平面波垂直入射至圆极化反射聚焦超表面上的电场分布. 如图 6 所示, 圆极化平面波从 $+z$ 方向垂直入射, x , y 和 z 方向上的边界条件均设为 open add space. 图 6 为 $f = 16$ GHz、右旋圆极化平面波垂直入射时 xoz 面内的电场分布仿真结果, 其中图 6(a) 为电场 x 分量 $E_x(x, z)$ 分布, 图 6(b) 为电场 y 分量 $E_y(x, z)$ 分布. 可以看出:

电场 x 分量与 y 分量的分布几乎完全相同, 且 x 分量与 y 分量相位相差 90° , 表明反射波为圆极化波. 图 6(c) 为电场 $E(x, z)$ 分布, 图 6(d) 为电场幅

度 $E_0(x, z)$ 分布. 从图 6 可以看出, 反射波聚焦场强度远大于入射场的强度, 反射波全部聚焦在焦距 $L = 200$ mm 附近的焦点处.

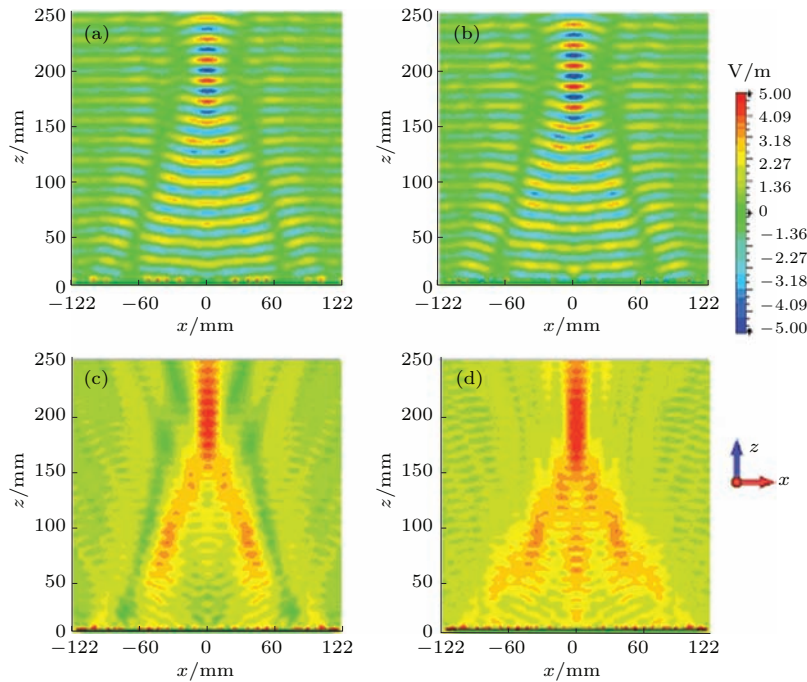


图 6 (网刊彩色) $f = 16$ GHz, 右旋圆极化平面波垂直入射时的电场仿真结果 (a) 电场 x 分量 $E_x(x, z)$ 分布; (b) 电场 y 分量 $E_y(x, z)$ 分布; (c) 电场 $E(x, z)$ 分布; (d) 电场幅度 $E_0(x, z)$ 分布

Fig. 6. (color online) The simulated electric fields under the normal incidence of right-handed circularly polarized waves at $f = 16$ GHz: (a) the distribution of the electric field x -component $E_x(x, z)$; (b) the distribution of the electric field y -component $E_y(x, z)$; (c) the distribution of the electric field $E(x, z)$; (d) the distribution of the electric field amplitude $E_0(x, z)$.

图 7 为仿真计算得到的右旋和左旋圆极化平面波垂直入射的电场 $E(x, z)$ 分布. 其中图 7(a) 为右旋圆极化平面波入射, 可以看出, 圆极化反射波全部聚焦于焦距 $L = 200$ mm 处的实焦点 O 处, 聚焦电场强度远大于入射波电场的强度; 图 7(b) 为左旋圆极化波入射, 可以看出, 左旋圆极化反射波的场分布可以近似看作聚焦于焦距 $L = -200$ mm 处的虚焦点 O' 的反射场. 如图 7 所示, 左旋波入射时 0 mm $< z < 250$ mm 区域内的场分布 (图 7(b)) 与右旋圆极化波入射时 400 mm $< z < 650$ mm (图 7(a) 中黑色虚线以上区域) 区域内的场分布基本一致. 因此, 右旋波入射时, 焦距 $L = 200$ mm, 焦点为实焦点 O ; 左旋波入射时, 焦距 $L = -200$ mm, 焦点为虚焦点 O' .

图 8 给出了 $f = 16$ GHz, xoz 面 [-122 mm $< x < 122$ mm, 160 mm $< z < 240$ mm] 区域内的电场能量谱仿真结果. 从图 8 可以看出: 焦点位于焦距 $L = 190$ mm 的面内, 如图中白色虚线所示; 在沿

轴向很宽的范围内, 反射场均具有很好的聚焦效果; xoz 面内的场完全聚焦于光轴 $x = 0$ mm 处; 横向面内其他区域的入射场远小于反射聚焦场. 因此, 这种圆极化反射聚焦超表面聚焦具有长焦深特性. 为了进一步分析圆极化反射聚焦超表面的焦深, 我们分别仿真计算了 $f = 15.5, 16, 16.5$ GHz 时的轴向 (z 向) 归一化电场强度, 如图 9 所示. 利用半宽度 (full width at half maxima) W_h 来度量焦深 [8,9], 其定义为电场强度为其峰值一半时的横向坐标宽度. 焦深有几何焦深和衍射焦深. 几何焦深与透镜的口径和焦距有关. 图 9 中用虚线标出了电场强度峰值所在的位置和电场强度为峰值一半时对应的 x 坐标. 可以看出: $f = 15.5, 16$ 和 16.5 GHz 时, 焦点分别位于 $L = 178.6526, 181.8626$ 和 185.8726 mm; 半宽度分别为 106.1991 mm [$134.1980, 240.4971$], 108.1390 mm [$139.3680, 247.5070$], 95.3741 mm [$149.9379, 245.3120$], 约等于 6 倍波长 ($6\lambda_0$). 因此, 这种圆极化反射聚焦超表面具有长焦深特性.

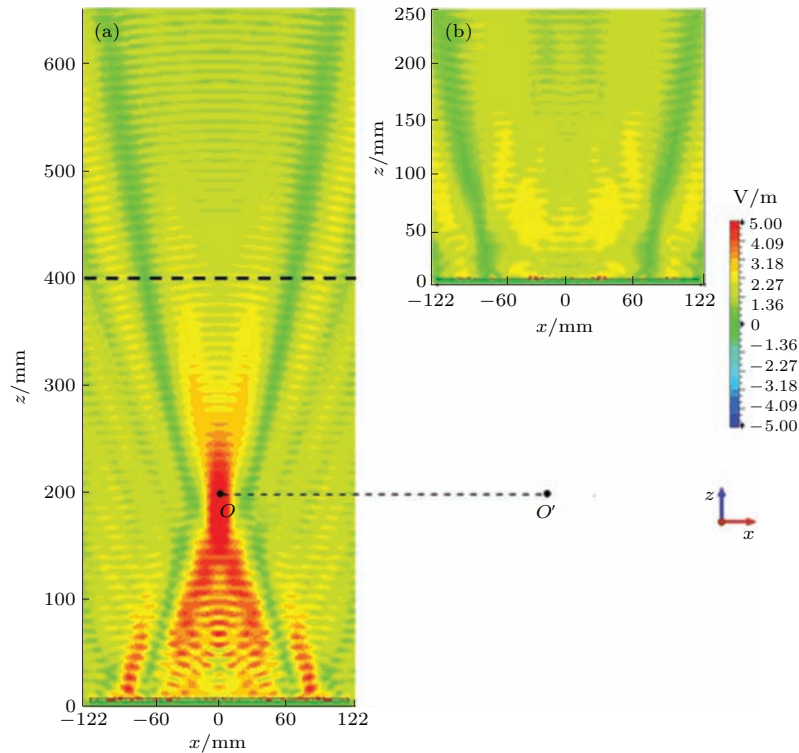


图7 (网刊彩色) (a) 右旋圆极化波和 (b) 左旋圆极化波垂直入射时的电场 $E(x, z)$ 分布

Fig. 7. (color online) The distributions of the electric field $E(x, z)$ under the normal incidence of (a) right-handed and (b) left-handed circularly polarized waves.

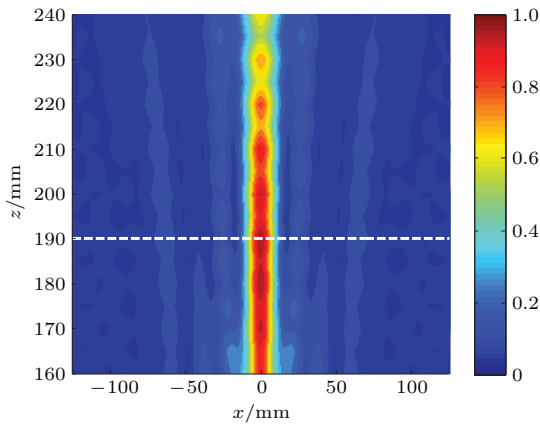


图8 (网刊彩色) 归一化电场能量谱

Fig. 8. (color online) Normalized electric field intensity spectrum.

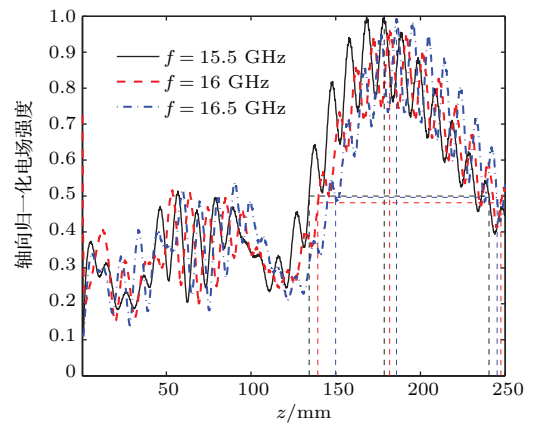


图9 (网刊彩色) 轴向归一化电场强度

Fig. 9. (color online) The normalized electric field intensity profiles along the z -axis.

为了得到圆极化反射波聚焦波束的波束宽度, 我们分别仿真计算了 $f = 15.5, 16, 16.5$ GHz 时, 右旋圆极化平面波垂直入射条件下焦距 $L = 200$ mm 处的横向归一化电场强度, 如图 10 所示. 从图 10 可以看出, 圆极化反射波均聚焦于光轴 $x = 0$ 附近, 在 $f = 15.5, 16, 16.5$ GHz 时对应的聚焦波束的光轴所在位置分别为 $x = 0.245, 0.245, -0.245$ mm. $f = 16, 15.5$ GHz 时的聚焦场强度远

大于 $f = 16.5$ GHz 时的聚焦场强度. 利用半宽度定义聚焦波束的波束宽度, 图 10 中用虚线标注了反射电场强度峰值及峰值一半对应的 x 坐标. 可以得到 $f = 15.5, 16$ 和 16.5 GHz 时的波束宽度分别为 18.7851 mm $[-9.3901, 9.3951]$, 18.3901 mm $[-9.1951, 9.1951]$, 18.1601 mm $[9.0801, 9.0801]$, 均近似等于波长. 同时, 这种反射聚焦超表面在 $f = 15.5, 16, 16.5$ GHz 时均具有很好的聚焦效果,

因此具有宽带特性.

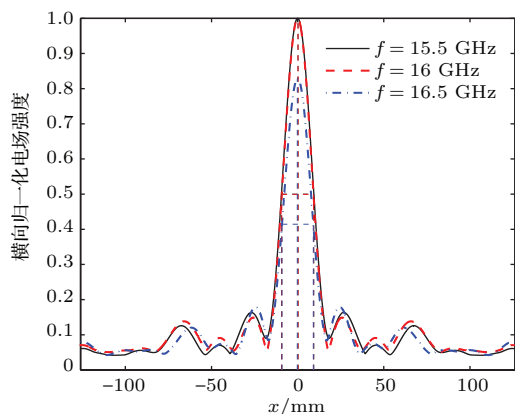


图 10 (网刊彩色) 横向归一化电场强度 ($L = 200$ mm)

Fig. 10. (color online) Transverse normalized electric field intensity ($L = 200$ mm).

4 结 论

本文基于圆极化波入射条件下的同极化反射超表面设计实现了圆极化波反射聚焦超表面, 对于垂直入射的右旋圆极化平面波, 反射右旋圆极化波聚焦于焦距 $L = 200$ mm 的实焦点; 对于垂直入射的左旋圆极化平面波, 反射场近似聚焦于焦距 $L = -200$ mm 处的虚焦点. xoz 面内的场分布仿真结果表明: 这种圆极化反射聚焦超表面具有长焦深特性, 且具有一定的带宽; 聚焦波束宽度与波长近似相等.

参考文献

[1] Pinchuk A O, Schatz G C 2007 *J. Opt. Soc. Am.* **24** 2313
 [2] Paul O, Reinhard B, Krolla B, Beigang R, Rahm M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 241110
 [3] Yu N F, Capasso F 2014 *Nat. Mater.* **13** 139
 [4] Francesco M, Andrea A 2014 *Chin. Phys. B* **23** 047809
 [5] Lee J H, Yoon J W, Jung M J, Hong J K, Song S H, Magnusson R 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 233505
 [6] Li X, Xiao S Y, Cai B G, He Q, Cui T J, Zhou L 2012 *Opt. Lett.* **37** 4940
 [7] Pors A, Nielsen M G, Eriksen R L, Bozhevolnyi S I 2013 *Nano Lett.* **13** 829

[8] Jiang X Y, Ye J S, He J W, Wang X K, Hu D, Feng S F, Kan Q, Zhang Y 2013 *Opt. Express* **21** 30030
 [9] Hu D, Wang X K, Feng S F, Ye J S, Sun W F, Kan Q, Klar P J, Zhang Y 2013 *Adv. Opt. Mater.* **1** 186
 [10] Huang Y W, Zhao Q C, Kalyoncu S K, Torun R, Lu Y, Capolino F, Boyraz O 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 161106
 [11] Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
 [12] Yu N, Aieta F, Genevet P, Kats M A, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 6328
 [13] Aieta F, Genevet P, Kats M A, Yu N F, Blanchard R, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 4932
 [14] Aieta F, Genevet P, Yu N, Kats M A, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 1702
 [15] 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
 [16] Huang L, Chen X, Mühlenbernd H, Li G, Bai B, Tan Q, Jin G, Zentgraf T, Zhang S 2012 *Nano Lett.* **12** 5750
 [17] Pfeiffer C, Grbic A 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 197401
 [18] Ni X, Emani N K, Kildishev A V, Boltasseva A, Shalae V M 2012 *Science* **335** 427
 [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] 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
 [21] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Chen H Y, Xu Z, Zhang A X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 084103 (in Chinese) [李勇峰, 张介秋, 屈绍波, 王甲富, 陈红雅, 徐卓, 张安学 2014 物理学报 **63** 084103]
 [22] Sun S, 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
 [23] Sun S L, He Q, Xiao S Y, Xu Q, Li X, Zhou L 2012 *Nat. Mater.* **11** 426
 [24] Huang L L, Chen X Z, Bai B F, Tan Q F, Jin G F, Zentgraf T, Zhang S 2013 *Light: Sci. Appl.* **2** e70
 [25] 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
 [26] Feng M D, Wang J F, Ma H, Mo W D, Ye H J, Qu S B 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 074508
 [27] 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
 [28] Zhao Y, Alù A 2011 *Phys. Rev. B* **84** 205428
 [29] Zhu H L, Cheung S W, Chung K L, Yuk T I 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **61** 4615

Circularly polarized wave reflection focusing metasurfaces*

Li Yong-Feng¹⁾ Zhang Jie-Qiu^{1)†} Qu Shao-Bo¹⁾ Wang Jia-Fu¹⁾ Wu Xiang¹⁾
Xu Zhuo²⁾ Zhang An-Xue³⁾

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 and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

(Received 1 November 2014; revised manuscript received 5 December 2014)

Abstract

The phase profiles of the reflected circularly polarized waves can be freely manipulated by virtue of a co-polarization reflective metasurface. Based on the co-polarization reflective metasurface, a circularly polarized wave reflection focusing metasurface can be achieved, it can make the reflected waves focus at a focal spot under the normal incidence of circularly polarized plane waves. In this paper, a reflection focusing metasurface is designed. It is found that around the central frequency $f = 16$ GHz, the reflected waves focus on a focal spot above the metasurface with a focal distance $L = 200$ mm under the normal incidence of right-handed circularly polarized waves. However, in the case of normal incidence of left-handed circularly waves, the reflected waves focus on an imaginary focal spot below the metasurface with the focal distance $L = -200$ mm. The beam-width at the focal spot and focal depth are also calculated by using CST Microwave Studio. The simulation results indicate that the beam-width at the focal spot is approximately equal to the operating wavelength. Therefore, the circularly polarized wave reflection focusing metasurface has a good performance for focusing the reflected waves. In addition, the proposed focusing metasurface displays the advantages of the long focal depth and the broad operating bandwidth.

Keywords: metasurface, co-polarization reflection, reflection focusing, focal depth

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

DOI: [10.7498/aps.64.124102](https://doi.org/10.7498/aps.64.124102)

* 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