

DOI:10.16136/j.joel.2022.07.0796

基于超表面的高效宽带双极化转换器设计

付长凤^{1,2,3}, 董少华¹, 韩连福^{2*}

(1. 东北石油大学 物理与电子工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 常熟理工学院 电子信息工程学院, 江苏 苏州 215500; 3. 哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘要:超材料和超表面因表现出天然材料所不具备的特殊性能而广泛应用于电磁波调控。针对宽频带、高效率和小型化极化转换器应用需求,本文设计一款宽带高效反射型超表面双极化转换器。基于电磁波极化调控原理,在两角切方形贴片的基础上,设计一款圆角切方形贴片周期性阵列超表面,实现单一宽频带内高效率线极化和圆极化转换。研究表明,该极化转换器在 6.850—11.050 GHz 频段内极化转换效率 (polarization conversion ratio, PCR) 达 90%,且性能可维持在入射角 $\leq 45^\circ$ 范围内,覆盖整个 X 波段,实现高效率宽入射角线极化转换;在 6.225—6.402 GHz 和 12.562—13.472 GHz 频率范围内轴比 (axial ratio, AR) 低于 3 dB,实现高效率圆极化转换。此外,该超表面具有结构简单、宽入射角、加工方便等优点,可满足微波通信、显微成像等领域的应用需求。

关键词:超表面; 双极化; 极化转换; X 波段

中图分类号:O441 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2022)07-0686-08

Design of high-efficiency broadband dual-polarization converter based on metasurface

FU Changfeng^{1,2,3}, DONG Shaohua¹, HAN Lianfu²

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Changshu Institute of Technology, Suzhou, Jiangsu 215500, China; 3. School of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150000, China)

Abstract: Metamaterials and metasurfaces are widely used in electromagnetic wave control due to their special properties that natural materials do not possess. Aiming at the application requirements of broadband, high-efficiency and miniaturization of polarization converters, a dual-polarization converter based on broadband and high-efficiency reflective metasurface is designed. Based on the principle of polarization control of electromagnetic wave, a periodic array metasurface of circularly truncated square patch is designed to achieve efficient linear polarization and circular polarization conversion in a single broadband on the basis of the two-angle truncated square patch. The results show that the polarization conversion ratio (PCR) of the polarization converter exceeds 90% in the frequency band range from 6.850 GHz to 11.050 GHz, and performance can be maintained within the range of incident angle less than or equal to 45° , covering the whole X-band to realize the linear polarization conversion with high efficiency and wide incident angle. The axial ratio (AR) is less than 3 dB in the frequency range from 6.225 GHz to 6.402 GHz and range from 12.562 GHz to 13.472 GHz, which realizes high-efficiency circular polarization conversion. In addition, the metasurface has the advantages of simple structure, wide incident angle and convenient processing, which can meet the application needs in the fields of microwave communication, microscopic imaging and so on.

Key words: metasurface; dual-polarization; polarization conversion; X-band

* E-mail: lianfuhan@nepu.edu.cn

收稿日期: 2021-11-25 修订日期: 2021-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(51774092)、中国博士后基金(2016M601399)和黑龙江省自然科学基金(LH2020E012)资助项目

1 引言

由于电磁波广泛应用在成像显微镜、光学传感、分子生物技术和微波通信等领域,对其极化状态的调控受到科学界密切关注。传统的技术可以应用于天然材料的极化控制,如晶体的光学活性、法拉第效应、具有螺旋二级结构的蛋白质和手性液晶^[1]。但天然材料所制备的极化转换器通常具有体积大,带宽窄,响应依赖于入射角,在实际应用中极大受限。因此,要发展具有宽带和角度稳定响应的微型极化控制器,必须依赖人工结构。当入射电磁波极化方向与超表面设计极化方向不一致时会导致其性能恶化。实际应用环境中,需要侦测来波极化方向并自动调整超表面姿态,使来波极化方向与超表面响应方向一致,才能使超表面表现出良好的电磁响应,这无疑增加了设计和控制难度,不利于实际应用。因此,在雷达侦测^[2]、卫星通信等众多领域中,双极化甚至是多极化的超表面必将有更加广泛的应用前景。如何使超表面针对不同极化角度的入射电磁波均具备良好的电磁响应就显得尤为重要。

目前,通过超表面实现更高效的极化转换已经成为研究电磁波极化调控的主要发展方向。为实现宽带高效极化转换,研究人员主要从设计多层结构、优化谐振单元两个方面着手研究。KHAN和TAHIR所提出的双缝分裂环谐振器^[1]可实现微波段内的线极化转换。通过该结构极化转换效率(polarization conversion ratio, PCR)的分析,其带宽窄、PCR低。KIM等^[3]提出的X波段宽带双极化转换器实现了较高PCR。GRADY等^[4]提出的线极化转换和反常折射超材料可用于太赫兹频段内的电磁波极化调控。林小芳等人研究的反射型超表面^[5]工作于Ku波段,工作带宽为16.1%,可实现双极化转换;毕杰栋等^[6]研究的频选表面极化转换器工作于C波段,工作带宽为19.8%,可实现双极化转换;缪宇等^[7]研究的极化转换器工作于S、C波段,可实现双极化转换,但工作带宽仅为3.102 GHz。本文所设计的双极化转换器工作频率覆盖整个X波段,可实现线-圆双极化转换,PCR大于0.8的相对带宽(relative bandwidth)为53.3%,且圆极化工作带宽较宽。

针对上述问题,如何实现极化转换器的高PCR和宽相对带宽是研究关键。本设计在两角切方形贴片^[8]周期性阵列的基础上,将其替换成圆角切方形贴片周期性阵列。该结构可实现X波段内宽带高效电磁波极化转换,并不断优化结构参数提高PCR和相对带宽。所提出的反射型极化

转换器可实现X波段内的高效宽带线极化转换和圆极化转换。此外,通过谐振频率处的表面电流分析进一步分析其双极化转换的物理机制。

2 极化转换器结构设计

极化转换器单胞3D示意图如图1(a)所示,转换器结构由各向异性超表面的周期阵列组成,如图1(b)所示。该转换器的单元由一个金属双圆切角方形贴片谐振器和一个厚度 h 为2.4 mm的玻璃环氧树脂覆铜板(FR-4)介电基板隔开的金属接地板组成。顶层和底层由电导率为 5.8×10^7 S/m,厚度为0.035 mm的铜膜构成。FR-4的相对介电常数为4.3,损耗正切角为0.025,经过优化后的单胞的几何参数为 $w=7$ mm, $l=6$ mm, $m=3$ mm, $h=2.4$ mm, $t=0.035$ mm。

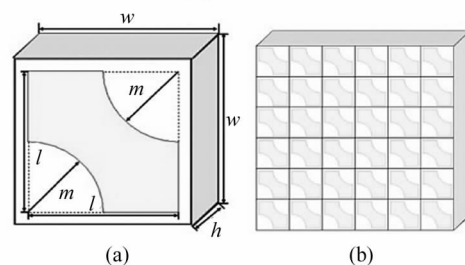


图1 三维示意图:(a) 单胞;(b) 极化转换器

Fig. 1 3D diagram of (a) unit cell
(b) polarization converter

反射场通常由 x 和 y 两个分量组成。交叉极化反射系数和共极化反射系数定义为下式:

$$\begin{cases} R_{xx} = |E_{rx}| / |E_{ix}| \\ R_{yx} = |E_{ry}| / |E_{ix}| \\ R_{xy} = |E_{rx}| / |E_{iy}| \\ R_{yy} = |E_{ry}| / |E_{iy}| \end{cases}, \quad (1)$$

式中, R_{yx} 表示入射波 E_i 为 x 极化,反射波 E_r 为 y 极化时的反射系数^[9]; R_{xy} 表示入射波 E_i 为 y 极化,反射波 E_r 为 x 极化时的反射系数;共极化反射系数 R_{xx} 表示入射波 E_i 和反射波 E_r 均为 x 极化时的反射系数; R_{yy} 表示入射波 E_i 和反射波 E_r 均为 y 极化时的反射系数。

用PCR来评估线性极化转换器的极化转换性能。当入射电场极化方向分别沿 y 轴、 x 轴,PCR计算式如下所示:

$$\begin{cases} PCR_y = \frac{|R_{xy}|^2}{|R_{xy}|^2 + |R_{yy}|^2} \\ PCR_x = \frac{|R_{yx}|^2}{|R_{yx}|^2 + |R_{xx}|^2} \end{cases}, \quad (2)$$

用 AR 来评估圆极化性能,当入射波为 y 极化时, AR 如式(3)所示:

$$AR = 10\lg \left| \frac{R_{xy}}{R_{yy}} \right| = 10\lg \sqrt{\frac{1 - \cos\Delta\Phi}{1 + \cos\Delta\Phi}}, \quad (3)$$

式中, $\Delta\Phi = \Phi_{yy} - \Phi_{xy}$,当相位差 $\Delta\Phi = 2k\pi \pm \pi/2$ (k 为整数)且 $|R_{xy}| = |R_{yy}|$ 时,轴比 $AR = 0$ dB,反射波将被转换成圆极化波。

3 极化转换器工作原理

所设计极化转换器的工作原理如图2所示。入射电磁波沿 y 轴,分解为两个正交的 u 分量和 v 分量, u 轴和 v 轴分别由 x 、 y 轴倾斜 45° 得到,入射波 E_i 和反射波 E_r 可用式(4)和式(5)来表示:

$$E_i = \hat{y}E_i = \hat{u}E_{iu} + \hat{v}E_{iv}, \quad (4)$$

$$E_r = \hat{u}E_{ru} + \hat{v}E_{rv} = \hat{u}r_u E_{iu} + \hat{v}r_v E_{iv}, \quad (5)$$

式中, $\hat{u}$ 和 $\hat{v}$ 是单位矢量, r_u 和 r_v 分别是 u 轴和 v 轴上的反射系数。反射波也可写成式(6):

$$E_r = \hat{u}(r_{uu}E_{iu}e^{j\Phi_{uu}} + r_{uv}E_{iv}e^{j\Phi_{uv}}) + \hat{v}(r_{vu}E_{iu}e^{j\Phi_{vu}} + r_{vv}E_{iv}e^{j\Phi_{vv}}), \quad (6)$$

式中, r_{uu} 、 r_{uv} 、 r_{vu} 和 r_{vv} 是共极化和交叉极化反射系数的大小, Φ_{uu} 、 Φ_{uv} 、 Φ_{vu} 和 Φ_{vv} 分别是 u 轴和 v 轴上共极化和交叉极化反射系数的相位。

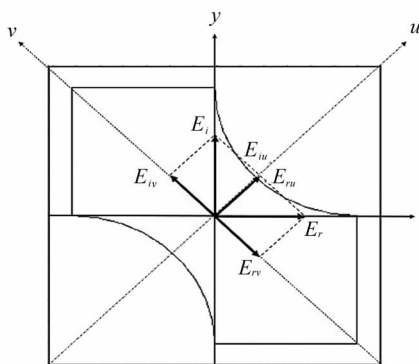


图2 极化转换器的工作原理

Fig. 2 Working principle of polarization converter

由于非对称结构,所设计极化转换器遵从各向异性特点,具有色散相关介电常数^[10]和磁导率^[11]。因此,反射波的相位和大小可能会发生差异。如果 $r_{uu} = r_{vv} \approx 1$, $r_{uv} = r_{vu} \approx 0$, $\Delta\Phi = \Phi_{uu} - \Phi_{vv} = 2k\pi \pm \pi$ (k 为整数),则 E_{ru} 、 E_{rv} 的合成场将沿 x 轴方向,如图2所示。这表明入射极化波旋转 $\pi/2$,发生交叉极化转换。在其他情况下,如果 $\Delta\Phi = \Phi_{uu} - \Phi_{vv} = 2k\pi \pm \pi/2$ (k 为整数),就可得到线极化转圆极化转换。

4 仿真结果分析

垂直入射 y 极化波时的模拟结果如图3所示。图3(a)为 y 极化波正入射时的共极化和交叉极化反射系数幅值,从图3(a)可以看出,共极化发生在 7.302 GHz 和 10.010 GHz 频率处,共极化反射系数幅值分别达到 -26.26 dB 和 -32.05 dB,而此时的交叉极化反射系数接近于 0 dB。因此,在共振频率下,入射的 y 极化波经超表面反射后变为 x 极化波。将共极化和交叉极化反射系数幅值线性化处理得到共极化和交叉极化反射系数,如图3(b)所示。从图中可以看出,在 6.840—11.060 GHz 频率范围内,当共极化反射系数低于 0.3 时,交叉极化反射系数高于 0.9。反射波相位差如图3(c)所示,因为 R_{xy} 的幅值在整个波段内显著高于 R_{yy} ,所以尽管相位差从 $-\pi$ 到 $3\pi/2$,但不会影响 PCR。 x 极化波正入射时的 PCR、 AR 如图3(d)所示。

从图中可以看出,在 6.840—11.060 GHz 频段范围内,PCR 值高于 0.9,实现较高极化转换效率,覆盖整个 X 波段。分析结果表明,该极化转换器可作为线极化转换器在整个 X 波段内有效使用。此外,在共振频率 7.302 GHz 和 10.010 GHz 处 PCR 值接近于 1。 y 极化入射波在 6.310 GHz 和 13.020 GHz 处,反射系数 $R_{xy} = R_{yy}$,相位相差分别是 $-\pi/2$ 和 $3\pi/2$, AR 值接近于 0,且在 5.830—6.680 GHz 和 11.540—17.010 GHz 频率范围内, AR 均小于 3 dB,表明反射波在 6.310 GHz 和 13.020 GHz 两频率处发生右旋圆极化。 AR 小于 3 dB 的频率范围就是圆极化转换的工作带宽。此外,当共极化和交叉极化反射系数之比在 0.8—1.6^[12] 之间且其位差在 $n\pi/2 \pm 0.03\pi$ (n 是奇数),则可准确估计圆极化转换器的性能。共极化和交叉极化反射系数之比如图4内插图所示,在 6.225—6.402 GHz 和 12.562—13.472 GHz 频率范围内共极化和交叉极化系数之比在 0.8—1.6 之间。结合图3(d)和图4可得,共极化和交叉极化反射系数之比在 0.8—1.6 之间时, AR 小于 1 dB,圆极化性能更好。

在实际应用中,电磁波入射角^[13]不可预测,因此需要考虑极化转换器入射角的稳定性。图5为不同入射角下所对应反射系数和 PCR 之间的变化关系。由图5(a)可知,在横向电极化下,随着入射角的增大,共极化反射系数增大,而交叉极化反射系数反而减小。图5(b)表示随着入射角的增大,PCR 略微减小,但在 6.84—11.06 GHz 频段范围内,PCR 值依

旧维持在 0.85 以上,且入射角高达 45° 。

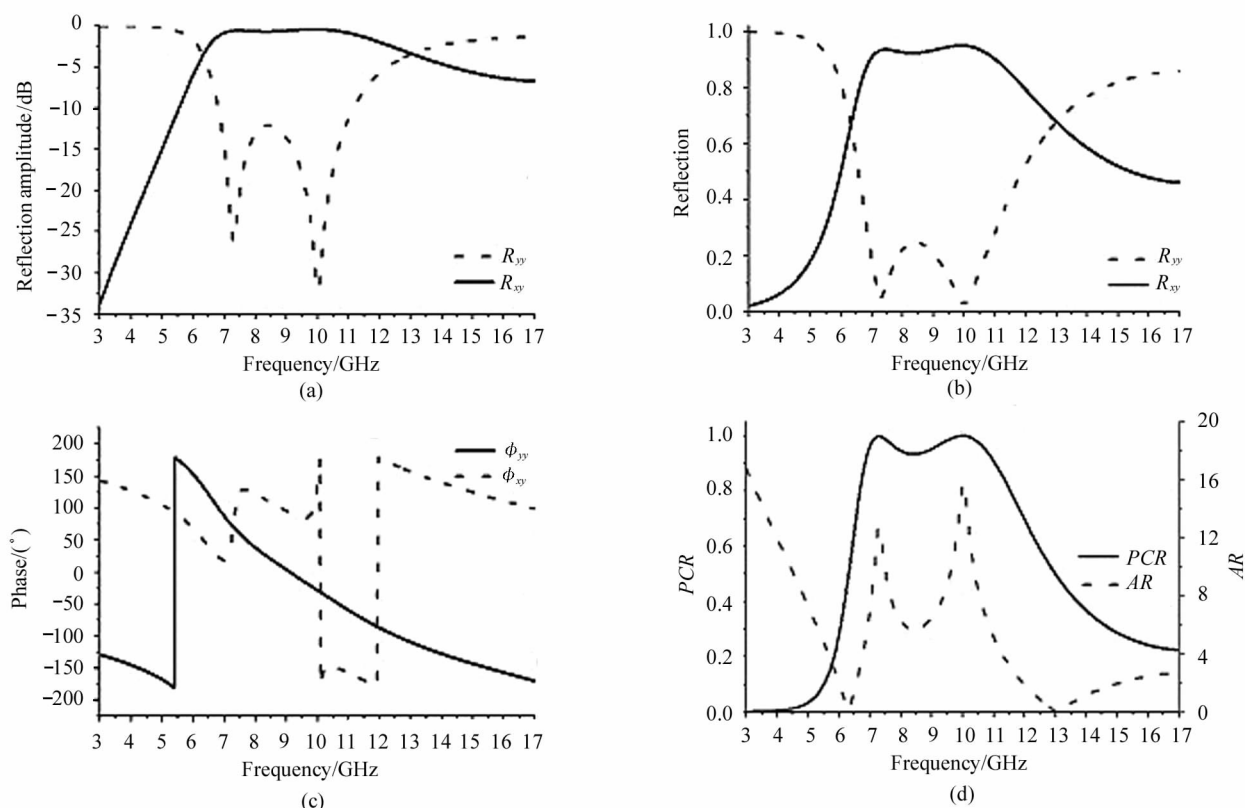


图3 (a) 反射幅值; (b) 反射系数; (c) 共极化和交叉极化反射系数的相位; (d) PCR 和 AR

Fig. 3 (a) Reflection amplitude; (b) Reflection coefficient;
(c) Phase of co-and cross-polarized reflection coefficients; (d) PCR and AR

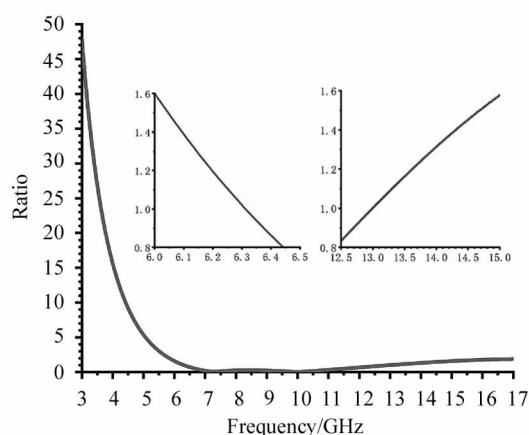


图4 共极化和交叉极化反射系数之比

Fig. 4 Ratio of co-and cross-polarized reflection coefficients

在横向电极化下,不同入射角的交叉极化和共极化反射系数的相位及相位差如图6所示。从图中可以看出,所设计极化转换器可以实现入射角达 45° 的线极化转换。在一定频率范围内,线极化转圆极化保持角度稳定,入射角高达 30° 。此外,所设计的

极化转换器在10GHz处的电介质衬底的厚度为0.035mm,其约为 0.08λ ,单胞周期为7mm,约为 0.23λ 。本文所提出的双极化转换器的宽入射角稳定的原因在于单胞周期远小于工作波长。因此,单胞周期小于工作波长的超表面可提高角度稳定性。

为进一步了解物理机制,在谐振频率7.302GHz和10.010GHz处,观察 u 、 v 分量下顶层和底层表面电流分布情况,如图7所示。从图中可以看出,对于 u 、 v 分量,顶层表面电流和底层表面电流是反向平行的。因此,在介电层中产生电流环,并形成磁共振。谐振频率附近的PCR叠加^[14]是实现高效宽带极化转换器的主要原因之一。

所设计单胞极化转换器的结构参数对极化转换性能有影响。极化转换器周期(w)对PCR的影响如图8(a)所示,其他参数保持不变。当 w 增加时,工作频带移到更高的频率,而PCR略微增加。为获得更宽的带宽和更高的PCR,选取 $w=7$ mm作为优化后的结果。 w 确定之后,对其他参数分别进行优化,如图8(b)、(c)、(d)所示。随着 l 、 m 和 h 的增加,工作

带宽逐渐增加,但 PCR 逐渐减小。综合考虑工作带和性能,确定几何参数如图 1 所示。

本文所提出的极化转换器与之前的研究结果对

比如表 1 所示。由表 1 可得,本文所提出的极化转换器可实现双极化转换且相对带宽较高。

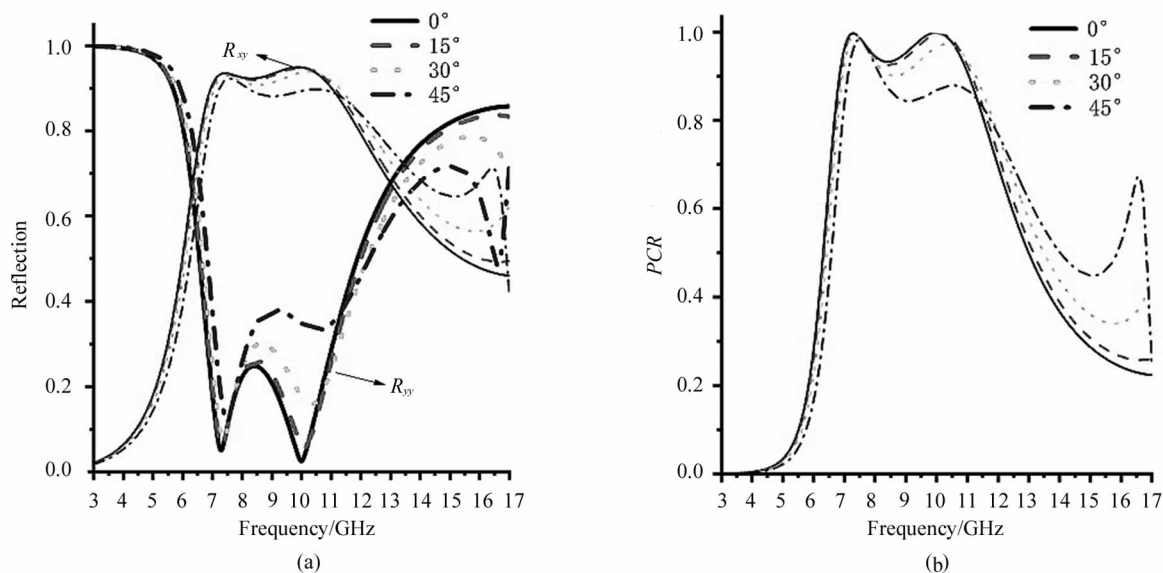


图 5 不同入射角下参数变化:(a) 交叉极化和共极化反射系数;(b)极化转换效率

Fig. 5 Parameter change under different incident angles: (a) Cross-and co-polarized reflection coefficients; (b) PCR

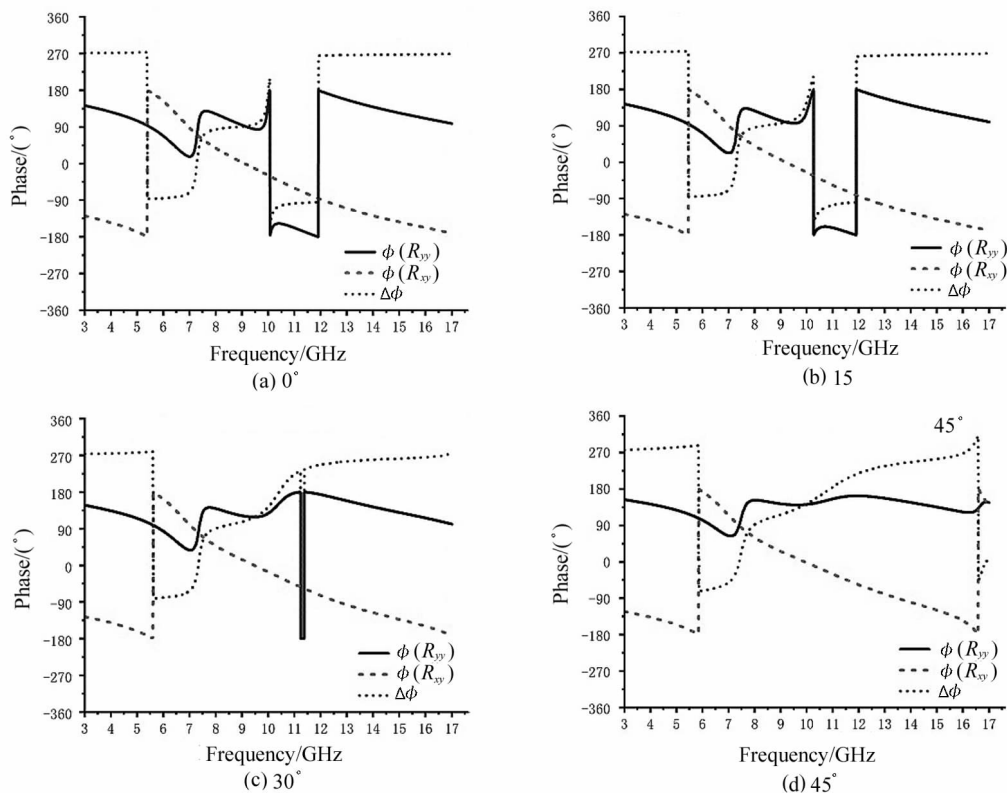


图 6 不同入射角下极化转换器的交叉极化和共极化反射系数的相位及相位差

Fig. 6 Phase and phase difference of cross-and co-polarized reflection coefficients of polarization converters at different incident angles

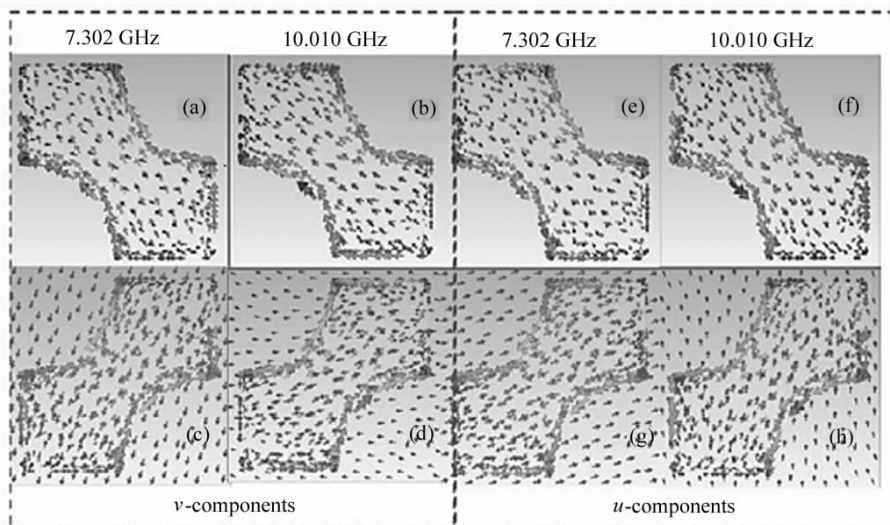


图 7 u 、 v 极化垂直入射下在 7.302 GHz 和 10.020 GHz 处表面电流分布:(a)、(b)、(e)和 (f)顶层表面电流分布;(c)、(d)、(g)和(h)底层表面电流分布

Fig. 7 Distribution of surface current at 7.302 GHz and 10.020 GHz under vertical incident of v - and u -components: (a), (b), (e) and (f) the top layer surface current distribution; (c), (d), (g) and (h) bottom layer surface current distribution

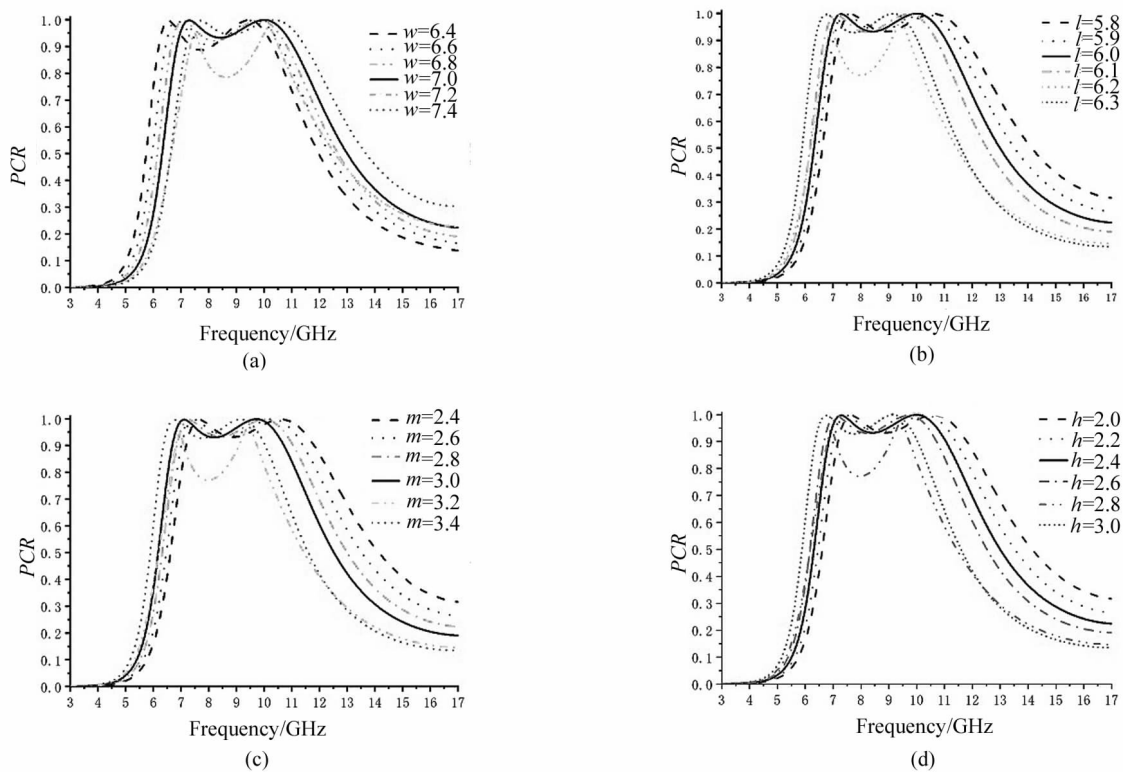


图 8 极化转换器不同单元参数变化时的 PCR:(a) w ; (b) l ; (c) m ; (d) h

Fig. 8 The variation of PCR with various unit cell parameters of polarization converter: (a) w ; (b) l ; (c) m ; (d) h

表 1 与其他极化转换器性能对比

Tab. 1 Performance comparison with other polarization converters

Reference	Ref. [5]	Ref. [6]	Ref. [15]	Ref. [16]	Ref. [17]	This work
Operating bandwidth/GHz	14.21-16.70	5.26-6.45	33.3-36.7	9.7-11.2	14.0-16.5	6.85-11.05
Relative bandwidth/%	16.1	19.8	9.7	37.9	16.4	53.3
Polarization mode	Linear-circular	Linear-circular	Linear	Linear	Linear	Linear-circular

5 结 论

本文设计了一款反射型超表面双极化转换器,在 6.850—11.050 GHz 频段内 PCR 达 90%,入射角可达 45°,覆盖了整个 X 波段,实现高效率宽入射角线极化转换;在 6.225—6.402 GHz 和 12.562—13.472 GHz 频率范围内实现高效率圆极化转换,AR 低于 3 dB。本文设计的超表面结构实现宽频带双极化转换,可用于微波通信、显微成像等领域。

参考文献:

- [1] KHAN M I, TAHIR F A. A broadband cross-polarization conversion anisotropic metasurface based on multiple plasmon resonances[J]. Chinese Physics, 2018, 27(1): 014101.
- [2] HUANG X C, FU Q H, ZHANG F L. Research advances of metasurface[J]. Aero Weaponry, 2016(1): 28-34.
黄新朝,付全红,张富利.超表面研究进展[J].航空兵器, 2016(1): 28-34.
- [3] KIM T N, THI M N, HONG Q N, et al. Simple design of efficient broadband multifunctional polarization converter for X-band applications[J]. Scientific Report, 2021, 11(1): 1-12.
- [4] GRADY N K, HEYES J E, CHOWDHURY D R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. Science, 2013, 340 (6138): 1304-1307.
- [5] LIN X F, ZHANG X, MENG X H. A reflective metasurface that can realize linear-circular and linear-cross polarization conversion[J]. Journal of Science of Teachers' College and University, 2020, 40(6): 36-40.
林小芳,张旭,孟祥辉.一种可以实现线-圆和线-交叉极化转换的反射型超表面[J].高师理科学刊, 2020, 40(6): 36-40.
- [6] BI J D, LIU W, ZHENG H Y, et al. A frequency selective surface based circular-to-linear polarization converter

with high conversion efficiency[J]. Electronic Components and Materials, 2020, 39(4): 51-55.

毕杰栋,刘伟,郑洪予,等.一款高效率频率选择表面圆-线极化转换器[J].电子元件与材料, 2020, 39(4): 51-55.

- [7] MIAO Y, WANG P, YAN Z M, et al. Design of wideband linear to circular polarization converter based on transmissive metasurface[J]. Journal of Microwaves, 2021, 37(3): 40-46.
缪宇,王平,严仲明,等.基于透射型超表面的宽带线圆极化转换器设计[J].微波学报, 2021, 37(3): 40-46.
- [8] ZHUANG Y Q, WANG G M, ZHANG X K, et al. Design of reflective linear-circular polarization converter based on phase gradient metasurface[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(15): 154102.
庄亚强,王光明,张小宽,等.基于梯度超表面的反射型线-圆极化转换器设计[J].物理学报, 2016, 65(15): 154102.
- [9] XU J, LI R Q, WANG S Y, et al. Ultra-broad band and linear polarization converter based on anisotropic metasurface[J]. Optics Express, 2018, 26(20): 26235-26241.
- [10] Zhao J C, Cheng Y Z. A high-efficiency and broad band reflective 90° linear polarization rotator based on anisotropic metamaterial[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2016, 122(10): 255.
- [11] WANG Z, LUO Y, KOU J Q, et al. Design of broadband high efficiency linear polarization converter based on metasurface[J]. Electronic Components and Materials, 2021, 40(2): 163-167+178.
汪竹,罗燕,寇家琪,等.基于超表面的宽带高效线极化转换器设计[J].电子元件与材料, 2021, 40(2): 163-167+178.
- [12] LIU S B. Design of a transparent linear-to-circular polarization conversion metasurface[J]. Electronic Components and Materials, 2017, 36(9): 18-21.
刘双兵.一种透射型线-圆极化转换超表面设计[J].电

子元件与材料,2017,36(9):18-21.

- [13] KANG Y R, CHEN S W, HE Y G, et al. Metasurface polarization converter based on split rectangular rings and patches[J]. *Electronic Components and Materials*, 2019, 38(10):68-73.

康跃然,陈思伟,何永刚,等.矩形开口环-贴片结构超表面极化转换器特性研究[J]. *电子元件与材料*, 2019, 38(10):68-73.

- [14] YU H C, CAO X Y, GAO J, et al. A design of ultra-broadband reflective polarization conversion meta-surface[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2018, 19(3):60-65.

于惠存,曹祥玉,高军,等.一种超宽带反射型极化转换超表面设计[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2018, 19(3):60-65.

- [15] ZHU X C, HONG W, WU K, et al. A novel reflective surface with polarization rotation characteristic[J]. *IEEE An-*

tennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12:968-971.

- [16] SHI H Y, LI J X, ZHANG A X, et al. Broadband cross polarization converter using plasmon hybridizations in a ring/disk cavity [J]. *Optics Express*, 2014, 22(17):20973-20981.

- [17] ZHANG L B, ZHOU P H, LU H P, et al. Ultra-thin reflective metamaterial polarization rotator based on multiple plasmon resonances[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14:1157-1160.

作者简介:

韩连福 (1977—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事超构表面设计与表征方面的研究.