

基于超表面的无磁性材料环行器

邱天硕 王甲富 李勇峰 王军 闫明宝 屈绍波

Magnetless circulator based on phase gradient metasurface

Qiu Tian-Shuo Wang Jia-Fu Li Yong-Feng Wang Jun Yan Ming-Bao Qu Shao-Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 174101 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.174101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.174101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I17>

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>

基于超表面的无磁性材料环行器*

邱天硕 王甲富[†] 李勇峰 王军 闫明宝 屈绍波[‡]

(空军工程大学理学院, 西安 710051)

(2016年3月7日收到; 2016年6月27日收到修改稿)

目前, 广泛应用的环行器均需要铁氧体材料并外加偏置磁场以达到环行效果, 具有重量大, 对温度敏感等缺点. 本文基于透射型相位梯度超表面, 利用相位梯度超表面的异常折射特性, 基于几何光学原理设计了一种无需铁氧体材料 and 外加磁偏置的环行器. 实验结果说明, 在 20.8 GHz 附近, 该器件呈现显著的环行效果. 这种环行器重量显著降低, 对温度变化不敏感, 提供了一种环行器设计的新思路, 具有潜在的应用前景.

关键词: 超表面, 环行器, 非磁性材料, 异常折射

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

DOI: 10.7498/aps.65.174101

1 引言

环行器是微波收发系统的重要组成部分, 因其具有单向传输的特性而广泛应用于无线收发组件中, 有着不可替代的作用. 铁氧体环行器是将铁氧体材料置入到微波传输线中而形成的一种三端口非互易器件^[1]. 将进入其任一端口的入射波, 按照确定的方向顺序输出而且只能输出到下一个端口的器件. 其散射矩阵如下:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

然而, 铁氧体微波器件在进一步发展的过程中面临着许多问题, 由于铁氧体材料具有质量大, 价格昂贵等缺点. 而且, 铁氧体环行器通常需要采用永磁体提供磁场将铁氧体材料磁化到饱和, 这势必增加器件的体积和重量. 因此, 铁氧体环行器的进一步应用受到了很大的限制. 近年来, 自偏置永磁铁氧体环行器有了较大的发展, 在一定程度上解决

了外加永磁体质量大的问题, 但是自偏置铁氧体损耗较大, 导致自偏置环行器的损耗较大^[2,3]. 同样影响了自偏置铁氧体环行器的进一步发展与应用.

相位梯度超表面是一种亚波长厚度的能够调控电磁波传播特性的平面亚波结构阵列^[4-13]. 其基本理论为广义折射定律(斯涅耳定律)和广义反射定律^[4,5]. 相位梯度超表面利用亚波长尺寸结构单元在界面不同位置处引入不同的相位突变, 通过相位突变空间分布的设计, 改变电磁波的传播特性, 从而为电磁波传播的自由调控提供了一种新途径. 超表面自从被提出后就受到了国内外学者的广泛关注, 哈佛大学 Yu 等^[4]利用 V 型天线在光频段实现了相位梯度超表面. Nathaniel 等^[6]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.

本文基于相位梯度超表面对于电磁波传播方向的调控, 采用开口谐振环单元设计实现了透射型线极化转换相位梯度超表面^[14-16], 利用该透射型相位梯度超表面代替铁氧体和永磁体, 基于几何光学实现了工作在 K 波段的波导环行器, 仿真并分析了其微波传输特性.

* 国家自然科学基金(批准号: 61331005, 61501503, 11274389, 11304393, 11504428)和中国博士后科学基金(批准号: 2015M572561)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wangjiafu1981@126.com

[‡] 通信作者. E-mail: qushaobo@126.com

2 结构设计

2.1 相位梯度超表面结构设计

图1为设计的线极化转换超表面单元结构, 其中(a)为三维结构视图, (b)为中间层金属结构正视图. 单元周期为 $a = 4$ mm, 它由三层金属结构和两层介质间隙组成, 其中上层和下层的金属结构为正交的金属栅结构, 栅周期为 $p = 1$ mm, 金属栅线宽 $w = 0.2$ mm, 中间层金属结构为 45° 倾斜放置的圆形开口谐振环, 圆形开口谐振环线宽为 $w_r = 0.34$ mm, 外径为 $r = 1.75$ mm, 开口宽

度为 s , 开口谐振环两金属臂长度为 $l = 0.88$ mm, 线宽为 $w_l = 0.2$ mm. 两层介质间隙均采用厚度 $d_1 = d_2 = 1.5$ mm的F4B介质基板, 其相对介电常数 $\epsilon_r = 2.65$, 损耗角正切值 $\tan\delta = 0.001$. 利用此线极化转换超表面结构单元设计的线极化转换相位梯度超表面“超单元”中间层结构如图2所示. 其中, 每个“超单元”由六个单元组成, 前三个单元的开口宽度 $s = 3.2, 2.3$ 和 1.1 mm, 相邻单元之间的交叉极化透射相位差 $\Delta\beta = \pi/3$. 后三个单元可通过之前三种单元旋转 90° 得到并实现另外的 π 相移. 本文采用的相位梯度超表面由两个“超单元”阵列组成.

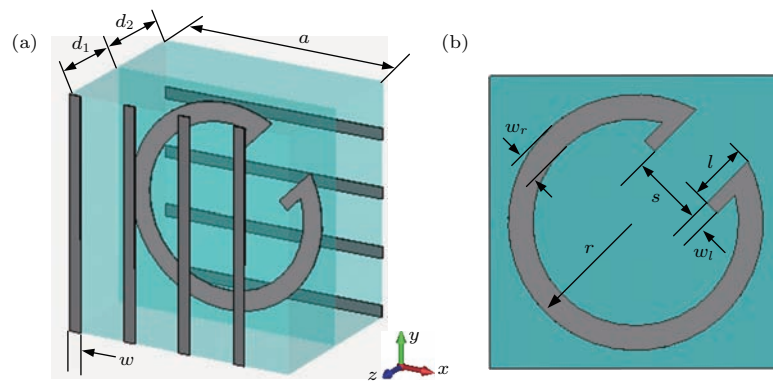


图1 透射型线极化转换超表面单元结构 (a) 三维视图; (b) 中间层结构正视图

Fig. 1. Schematic view of the unit of phase gradient metasurface: (a) Three-dimensional structure schematic; (b) the front view of the center layer of the unit.



图2 设计的线极化转换相位梯度超表面“超单元”中间层结构图

Fig. 2. The front view of the center layer of phase gradient metasurface unit cell.

2.2 环行器结构设计

图3为设计的环行器的结构视图, 其中图3(a)为三维结构视图, 图3(b)为该结构沿 y 方向的剖面图. 如图3所示, 波导外壳为厚度 $t = 0.3$ mm, 电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m的铜. 该波导结构入射端口长度为 10.3 mm, 宽度为 5.3 mm. 经过长度为 l_2 的喇叭形状过渡渐变, 变为截面 $6a \times 2a$ 的三端口波导, 在该处能够使波导端口恰好容纳下由两个“超单元”组成的相位梯度超表面. 三组相位梯度超表面关于环行器中心对称, 置于波导腔内.

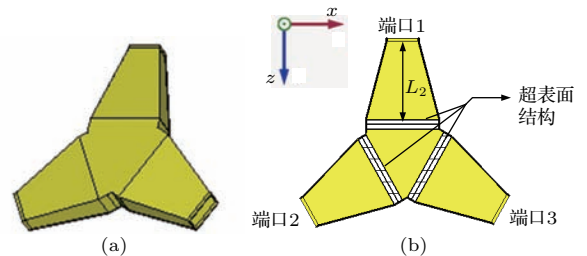


图3 环行器结构示意图 (a) 三维结构视图; (b) 沿 y 方向的剖面图

Fig. 3. Schematic view of the magnetless circulator based on phase gradient metasurface: (a) Three-dimensional structure schematic; (b) cross-section along y axis.

3 理论与结果分析

当一束线极化波以入射角度 θ_i 入射至一维透射型相位梯度超表面, 根据广义折射定律, 异常折射角度 θ_t 可通过下面的表达式计算得到:

$$\theta_t = \arcsin \frac{(\mathbf{k}_i \sin \theta_i + \nabla \Phi)}{k_i}, \quad (2)$$

其中 k_i 为入射电磁波的空间波矢大小, $\nabla \Phi$ 为相位梯度超表面提供的相位梯度.

图 4 为基于相位梯度超表面设计的环形器原理示意图, 当电磁波从波导端口 1 馈入, 经过喇叭形状渐变结构的传播, 入射至透射型相位梯度超表面, 经过超表面的异常折射作用, 透射电磁波偏转至端口 3 方向上的超表面. 经过超表面二次折射后从端口 3 出射, 而端口 2 无能量出射, 因此, 实现了环形器的传输特性. 本文设计的相位梯度超表面基于极化选择转换超表面结构单元. 电磁波从一侧入射时, 只有特定极化方式的线极化入射波被高效地异常折射, 且透射波转换为交叉极化波. 因此, 在上面设计的基于相位梯度超表面的环形器中, 入射电磁波应为 y 极化波, 在入射波穿过相位梯度超表面的三角形区域内, 透射波为 x 极化波, 为了使得透射的 x 极化波在三角形金属腔中能够传播, 我们采用喇叭状渐变结构使得三角形金属腔的高度近似等于波导入射端口的宽度.

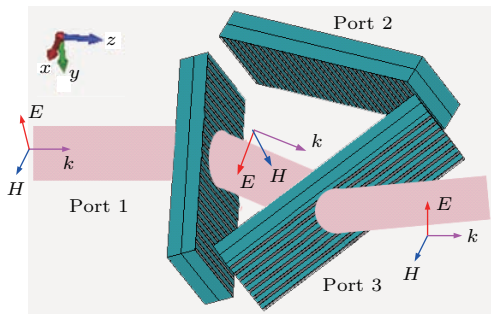


图 4 环形器原理示意图

Fig. 4. Schematic view of the circulation performance in the component.

要提高上面设计的环形器的性能, 尽量减小插入损耗和反射损耗, 增大隔离, 需要满足两个条件: 第一, 透射型相位梯度超表面需要具有很高的效率, 在电磁波透射的过程中尽量减小电磁波的损耗和反射, 增大电磁波的通过率, 同时, 当电磁波通过相位梯度超表面时, 透射波应具有合理的折射角

度. 第二, 目前高效率异常折射超表面通常是极化选择转换超表面. 这类超表面只对特定极化方式的电磁波产生异常折射作用, 当电磁波通过这类超表面时, 会发生极化旋转. 所以, 当电磁波在本环形器当中传播时, 从端口入射至超表面的电磁波是 y 方向极化的电磁波, 从超表面出射时, 电磁波为 x 方向极化. 因此, 环形器中电磁波的极化纯度将极大地影响环形器的传输性能.

本文利用电磁仿真软件 CST Microwave studio 对该环形器结构进行了仿真, x, y, z 方向上的边界条件均设为 open, 采用同轴馈电的方式在端口 1 加激励. 仿真求解该环形器的 S 参数、电场幅度分布和能流分布. 图 5 所示为仿真得到的该环形器的 S 参数, 从图 5 中可以看出: 该器件在 20.78—20.86 GHz 具有显著的环形器传输特性, 在该频率区间内回波损耗和隔离度均大于 15 dB, 插入损耗小于 0.5 dB.

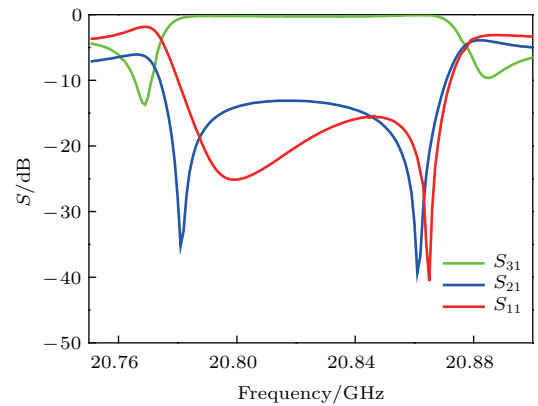


图 5 (网刊彩色) 环形器 S 参数仿真结果

Fig. 5. (color online) The simulated S parameters of the circulator based on metasurfaces.

为了进一步验证所设计的环形器传输特性, 我们制作了该环形器, 环形器实物图照片如图 6 所示. 为了保证最佳测试效果, 将测试的端口连接 Agilent N5230 A 矢量网络分析仪, 另一端口接 50 Ω 匹配负载, 测试了环形器的 S 参数, 其结果如图 7 所示.

对比图 5 和图 7 可以看出, 测试结果和仿真结果的变化趋势基本吻合. 测试结果表明在 20.8 GHz 附近具有环形特性, 最小插入损耗为 0.8 dB, 隔离度和回波损耗都大于 10 dB. 本文所制作环形器仿真和实验结果有一定差异, 分析原因可归结为以下几点: 由于同轴位置的安装误差和探针长度和加工误差, 导致端口匹配变差, 馈波效率下降, 反射增

大; 波导壁不够光滑导致波导传输特性发生变化, 并且在某些位置由于密封不好出现了一定程度的漏波情况, 增大了插入损耗和回波损耗. 这些原因都或多或少地影响了环行器的插入损耗, 回波损耗和隔离度, 导致了实验结果与仿真结果的差异.

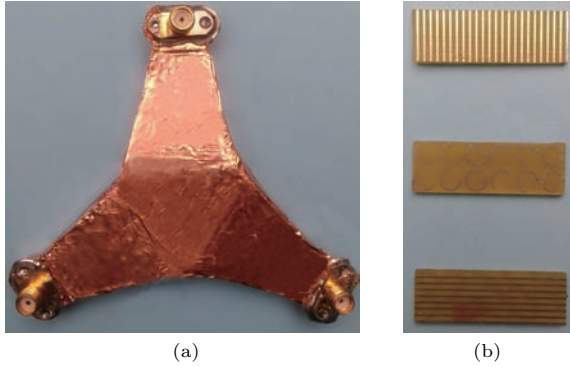


图6 (网刊彩色) 样品实物图 (a) 环行器; (b) 超表面
Fig. 6. (color online) The picture of the sample: (a) Circulator; (b) metasurface.

图8(a)和图8(b)分别为20.8 GHz处, 环行器中电场 y 分量和电场 x 分量分布仿真结果. 从图8(a)和图8(b)中可以看出, 入射波沿 y 方向极化, 第一次通过超表面后异常折射波沿 x 方向极化.

当电磁波第二次通过超表面出射时, x 极化波再次转变为 y 极化波. 入射电磁波在通过超表面时同时发生了异常折射和极化转换. 图8(c)所示的能量流仿真结果表明: 通过超表面的两次折射, 能量从端口1流向端口3, 与此同时在端口2处基本无能量流出, 这样就达到了环行器的传输特性, 由于该环行器端口结构的互易性, 三个端口都可以作为输入端口实现环行器的功能.

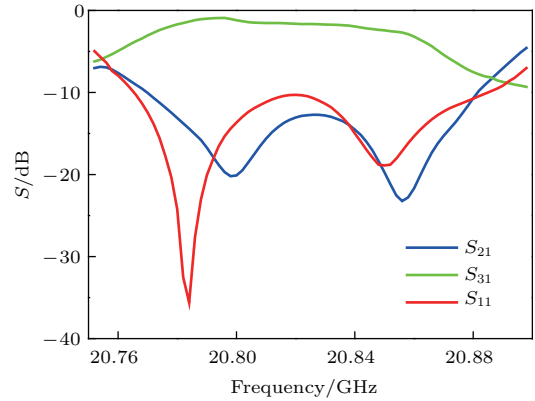


图7 (网刊彩色) 环行器 S 参数测试结果
Fig. 7. (color online) The measured S parameters of the circulator based on metasurfaces.

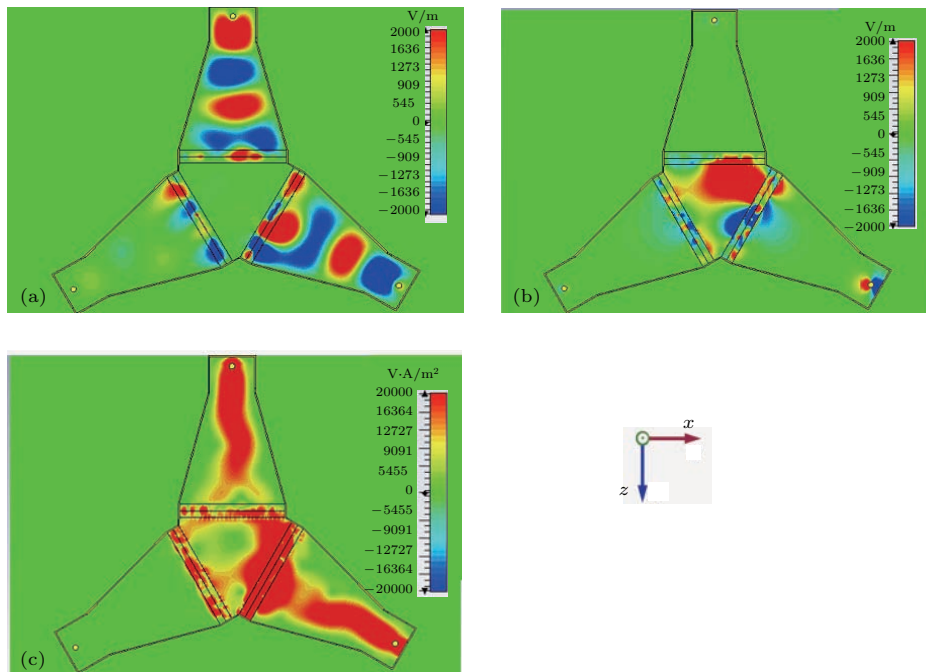


图8 (网刊彩色) $f = 20.8$ GHz时, 电场幅度分布和能流分布 (a) 电场 y 分量幅度分布; (b) 电场 x 分量幅度分布; (c) 能流分布

Fig. 8. (color online) $f = 20.8$ GHz, the distribution of (a) the electric field y -component; (b) the electric field x -component; (c) energy flow.

4 结 论

本文基于高效的透射型线极化转换相位梯度超表面设计了一种无需外加磁场和铁氧体的环行器, 分析了该环行器的实现机理和可行性, 设计并通过实验验证了线极化转换相位梯度超表面的异常折射特性和该环行器的传输特性. 仿真和实验结果都表明: 该环行器在 20.8 GHz 附近具有明显的环行特性. 该环行器提供一种无需外加磁场的新的设计思路, 具有潜在的应用前景.

在未来的研究中, 需要提升加工精度, 降低制作误差. 此外, 采取其他的馈电方式可以避免同轴馈电的阻抗匹配难题. 通过上述方式减弱环形器制作中的微小变化对电磁波传播特性的影响. 可以使用不需要极化转换的相位梯度超表面, 从而减小波导传播模式、尺寸对于电磁波的限制, 进而增大带宽; 也可以引入色散相位梯度超表面, 使不同频率的电磁波通过超表面时折射角度基本相同或者偏差很小; 适当引入自由空间以减小环行器的体积, 进一步提升环行器的性能.

参考文献

- [1] Harris V G, Geiler A, Chen Y, Yoon S D, Wu M, Yang A 2009 *J. Mag. Mag. Mater.* **321** 2035
- [2] Zuo X, How H, Somu S, Vittoria C 2003 *IEEE Trans. Magn.* **39** 3160
- [3] Carignan L P, Yelon A, Ménard D, Caloz C 2011 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **59** 2568
- [4] Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [5] Aieta F, Genevet P, Yu N, Kats A M, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 1702
- [6] Nathaniel K, Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, Zeng Y, Reiten M T, Azad A K, Taylor Z A, Dalvit D A R, Chen H T 2013 *Science* **340** 1304
- [7] 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]
- [8] Nader Engheta N 2011 *Science* **334** 317
- [9] Ni X, Emani N K, Kildishev A V, Boltasseva A, ShalaeV M 2012 *Science* **335** 427
- [10] 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* **34** 01304
- [11] Wei Z Y, Cao Y, Su X P, Gong Z J, Long Y, Li H Q 2013 *Opt. Express* **21** 010739
- [12] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Chen H, Xu Z, Zhang A X 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 221110
- [13] Yu J B, Ma H, Wang J F, Li Y F, Feng M D, Qu S B 2015 *Chin. Phys. B* **24** 098102
- [14] 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
- [15] Zhang X, Tian Z, Yue W, Gu J, Zhang S, Han J, Zhang W 2013 *Adv. Mater.* **25** 4567
- [16] Su X Q, Ouyang C M, Xu N N, Cao W, Wei X, Song G F, Gu J Q, Tian Z, O'Hara J F, Han J G, Zhang W L 2015 *Opt. Express* **23** 027152

Magnetless circulator based on phase gradient metasurface*

Qiu Tian-Shuo Wang Jia-Fu[†] Li Yong-Feng Wang Jun Yan Ming-Bao Qu Shao-Bo[‡]

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

(Received 7 March 2016; revised manuscript received 27 June 2016)

Abstract

Circulators are widely used microwave components that rely on magnetic materials. They have been a subject of extensively theoretical and experimental development for over 50 years. Nowadays, commercial circulators require ferrite and external bias magnetic field to realize circulation performance. However, ferrite circulators suffer major drawbacks: they are too heavy, incompatible with integrated circuit technologies, expensive, sensitive to temperature, etc. So, it is very hard to further improve the characteristic of traditional ferrite circulator. And it is important to overcome the major drawbacks of the traditional ferrite circulator. In this paper, the anomalous refraction feature of the phase gradient metasurface is utilized to realize nonreciprocal characteristics. Magnetless circulator based on phase gradient metasurface is proposed and then analyzed. The circulator consists of phase gradient metasurfaces and a three-port waveguide. Three metasurfaces are arranged into 60-degree angle with respect to each other. The metasurface shows high efficiency in anomalous refraction. With the help of phase gradient metamaterial, the signal can only be refracted to the next port in rotation along one direction. That makes the circulation performance. To design and optimize the circulator for better circulation performance, the numerical simulations are performed using the full-wave electromagnetic simulator CST Microwave Studio 2013. To verify the design of the circulator based on phase gradient metasurface, the circulator is fabricated using waveguide and metasurfaces. The scattering parameters of the magnetless circulator based on phase gradient metasurface are measured using a vector network analyzer (Agilent N5230A). The measured S-parameters show that the circulator exhibits good circulation performances at a frequency of 20.8 GHz. At 20.8 GHz, the insertion loss is 0.8 dB. And the return loss and isolation degree can reach -10 dB. In this paper, a new method is used to design the circulators. This work makes it possible to reduce the weight of the device. Moreover, it is also insensitive to temperature. Therefore, we can make a conclusion that the magnetless circulator based on phase gradient metasurface has potential value in application. However, there is still lots of work to do to improve the performance of the circulator. In future work, we will use wideband metasurfaces to broaden the bandwidth, improve the isolation degree, reduce the insertion loss, and reduce the return loss. And free space can be lead into the circulator to reduce the bulk of the circulator and improve the circulation performance.

Keywords: metasurface, circulator, magnetless material, anomalous refraction

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

DOI: 10.7498/aps.65.174101

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61331005, 61501503, 11274389, 11304393, 11504428) and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2015M572561).

[†] Corresponding author. E-mail: wangjiafu1981@126.com

[‡] Corresponding author. E-mail: qushaobo@126.com