

# 一种双分裂环结构的线-圆和线-交叉极化转换器<sup>\*</sup>

杨祖宁<sup>1</sup> 伍铁生<sup>1,2,3</sup> 王义平<sup>2,3</sup> 曹卫平<sup>1</sup> 张顺岚<sup>1</sup>

(1. 桂林电子科技大学 信息与通信学院广西无线宽带通信与信号处理重点实验室 桂林 541004;

2. 深圳大学 光电工程学院光电子器件与系统教育部重点实验室 深圳 518060;

3. 深圳大学 光电工程学院广东省光纤传感技术粤港联合研究中心 深圳 518060)

**摘要:** 文中提出了一种高效、多功能的超表面极化转换器,该转换器由双分裂环谐振器周期阵列构成并置于 F4B-2 介电基板上。通过双分裂环谐振器的耦合效应可以有效拓展工作带宽。采用有限积分法对其极化特性进行分析。仿真结果表明:在 5.5~8.55 GHz 的频带(相对带宽为 43.4%),实现了线极化到圆极化的转换,其能量转换效率优于 99.5%;在 10.31~15.31 GHz 的频带(相对带宽为 39%),实现了线极化到其交叉极化的转换,其极化转换比大于 0.99。实验上,制备了样品并测试了其极化转换特性,实验结果与仿真结果基本吻合,验证了该转换器设计的合理性和有效性。所提出的超表面具有高效率、大工作带宽、多功能的特点,可应用于无线通信和极化操控设备。

**关键词:** 极化转换器 超表面 线-圆极化 线-交叉极化 高效

## A Linear-to-Circular and Linear-to-Cross Polarization Converter with Double Split Ring Structure

YANG Zu-ning<sup>1</sup>, WU Tie-sheng<sup>1,2,3</sup>, WANG Yi-ping<sup>2,3</sup>, CAO Wei-ping<sup>1</sup>, ZHANG Shun-lan<sup>1</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Wireless Broadband Communication and Signal Processing, School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

3. Guangdong and Hong Kong Joint Research Centre for Optical Fiber Sensors, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** A high-efficiency and multi-functional metasurface polarization converter that consists of a periodic array of double-split-ring resonators on an F4B-2 dielectric substrate is proposed. Through the interaction of double-split-ring resonators, the working bandwidth of the converter is effectively improved. The finite integral method is used to analyze the polarization characteristics. The simulation results show it can realize linear-to-circular polarization conversion over the frequency band from 5.5 GHz to 8.55 GHz (relative bandwidth of 43.4%), and its energy conversion efficiency is better than 99.5%. Moreover, linear-to-cross polarization conversion is also achieved in another frequency band from 10.31 GHz to 15.31 GHz (relative bandwidth is 39%), and its polarization conversion ratio is greater than 0.99. In the experiment, a sample is prepared and its polarization conversion characteristics are tested. The experimental results are in accordance with the simulation results, verifying the rationality and effectiveness of the converter design. The proposed metasurface has the characteristics of high efficiency, large working bandwidth, multifunctional capability, and can be applied to wireless communication and polarization manipulating devices.

**Key words:** polarization converter, metasurface, linear-to-circular polarization, linear-to-cross polarization, high-efficiency

\* 收稿日期: 2022-03-08; 修回日期: 2022-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(61805051); 广西自然科学基金(2018JJB170035, 2018AD19071, 2019GXNSFFA245002, 2020JJA170047); 广西无线宽带通信与信号处理重点实验室主任基金(GXKL06190118, GXKL06160102)

## 引言

极化转换器由于在极化调控方面具有灵活性,已经在天线、极化调控等方面得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>。然而,传统的极化装置通常是利用法拉第效应或晶体光学活性来实现,这就需要器件的尺度大于工作波长,而现代通信系统对器件的集成度要求越来越高,这限制了传统极化装置的实际应用范围。超表面作为一种亚波长周期阵列结构,提供了一种调控电磁波振幅、相位和极化的理想替代方案。过去几十年,研究人员提出了许多不同类型的超表面极化转换器<sup>[6-26]</sup>。其中,反射型极化转换器因操控简单而令人关注,它可以灵活地实现不同类型的极化转换,例如,线-圆极化转换和线-交叉极化转换。Hao等<sup>[6]</sup>首先提出了一种反射型超表面极化转换器,其结构由放置在介质层上表面的工字型金属贴片构成。由于工字型结构沿对角线方向非对称,使得其在正交方向上具有不同的电磁特性,从而在6.87 GHz和7.27 GHz频点处实现了理想的极化转换。Efstratios等<sup>[8]</sup>提出了一种由偶极子组成的各向异性阻抗表面结构,该结构具有线-圆极化转换功能,实现了超过60%的3 dB轴比带宽。Gao等<sup>[9]</sup>通过对耶路撒冷结构的水平臂对称开缝,在12.4~21 GHz的频带上实现了高性能的圆极化转换。Lin等<sup>[10]</sup>通过在超表面上加载介质层,极大地拓展了转换器的轴比带宽。但是,介质层的加载增加了转换器的剖面 and 加工成本。Cheng等<sup>[11]</sup>采用由分裂环和圆盘组成的复合结构,在0.65~1.45 THz的频带上实现了极化转换比大于0.8的线极化转换。接着,Chen<sup>[12]</sup>和Zhao<sup>[13]</sup>分别提出了它的变体,将极化转换比提升到了0.9。另外,三角形开口环等结构<sup>[14-19]</sup>也被用来实现线极化转换。

尽管上述设计<sup>[1-20]</sup>具有良好的极化转换性能,但它们仅适用于某一种类型的极化转换,无法通过单个结构同时实现线-圆极化转换和线-交叉极化转换。为此,研究人员提出了多功能极化转换器<sup>[21-26]</sup>用来替换多个单功能极化转换器,从而降低集成系统的尺寸、复杂度和成本。最近,Liu等<sup>[21]</sup>通过分析双层L型超表面的传输特性,设计出了具有三频段的多功能极化转换器,并通过合理选择介质的类型和厚度,实现了良好的极化转换效果。但是,多层结构不仅增加了转换器的剖面,还导致了更高的加工成本。Mao等<sup>[22]</sup>采用双L型结构的单层多功

能反射超表面,实现了转换器的三频带(6.15~6.45 GHz,10.2~11.45 GHz和16.25~17.6 GHz)线-交叉极化转换和四频带(5.5~6.1 GHz,6.65~9.6 GHz,12.1~16 GHz和18.1~22.5GHz)的线-圆极化转换。其中,交叉极化转换比大于0.9,圆极化轴比小于3 dB。Zheng等<sup>[23]</sup>通过对称弯折线结构的研究,在宽频带上实现了极化转换比优于0.88的线-交叉极化转换;接着,在对称弯折线中间添加了带状线金属贴片用于调控极化状态,将该宽频带上的高频部分调整为线-圆极化转换,实现了转换器的双极化转换功能。Khan等<sup>[24]</sup>提出了鱼状结构的多功能超表面,该超表面能够将线极化波转换为交叉线极化波和圆极化波,其极化转换比优于0.95。Wahidi等<sup>[25]</sup>通过对六边形环开缝的研究,增加了交叉极化转换和圆极化转换的带宽。Pouyanfar等<sup>[26]</sup>利用非对称结构的电磁耦合作用,设计出具有高稳定性的多功能极化转换器。但是,其窄带的极化转换效果限制了它在现代超宽带通信的应用。综上所述,仍有必要研究低成本、高效的宽带多功能转换器。

本文利用分裂圆环和八边形分裂环的电磁共振特性,设计了一种低成本的高效宽带多功能极化转换器。该结构在10.31~15.31 GHz的频带内具有90°极化旋转器的特性,其极化转换比超过0.99。此外,在5.5~8.55 GHz的频率范围内也实现了优于2.2 dB轴比的线-圆极化转换。同时,实验结果与仿真结果具有良好的一致性。

## 1 设计和仿真

如图1所示,超表面由双分裂金属环周期阵列组成并放置在方形接地F4B-2基板的对角轴上。F4B-2的介电常数为2.65,介质损耗角正切值为0.001。另外,图1的插图还给出了超表面单元的示意图。该转换器的几何参数如下: $p=13.4$  mm, $R_o=6$  mm, $R_i=5.6$  mm, $L_o=3.2$  mm, $L_i=1.6$  mm, $w=1.4$  mm, $d=3.5$  mm。当线极化波激励该转换器时,它可以在不同频段将入射线极化波转换为圆极化或交叉线极化反射波。

采用专业电磁仿真软件CST对上述模型进行了建模和仿真。由于双分裂环结构沿对角线对称,因此 $y/x$ 极化入射波的反射特性一致。以沿 $-z$ 方向传播的 $y$ 极化平面波激励器件为例,反射波可以表示为

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{E}_{xr} \mathbf{e}_x + \mathbf{E}_{yr} \mathbf{e}_y = R_{xy} \mathbf{E}_{yi} \mathbf{e}_x + R_{yy} \mathbf{E}_{yi} \mathbf{e}_y \quad (1)$$

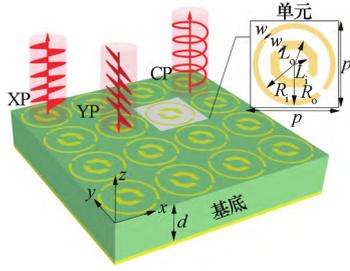


图 1 转换器整体结构图(插图)为超表面单元的示意图

由公式 (1) 可知,反射波的极化状态由交叉极化 ( $y-x$ ) 反射系数  $R_{xy} = |E_x^r| / |E_y^i|$  和共极化 ( $y-y$ ) 反射系数  $R_{yy} = |E_y^r| / |E_y^i|$  共同决定。同时,我们定义  $R_{yy}$  和  $R_{xy}$  的相位差为  $\Delta\varphi = \arg(R_{yy}) - \arg(R_{xy})$ 。当  $R_{xy} = R_{yy}$  且  $\Delta\varphi = 2n\pi \pm \pi/2$  ( $n$  是整数) 时,可实现理想的线-圆极化转换。另外,当  $R_{xy} = 1$  时,即可得到理想的交叉极化反射波。

图 2 (a) 给出了共极化反射系数  $R_{yy}$  和交叉极化反射系数  $R_{xy}$  的曲线。显然,在 5.5~8.55 GHz 的频率范围内  $R_{yy}$  和  $R_{xy}$  的幅度差小于 3 dB,这表明该频带正交方向上的反射波振幅几乎是相等的。此外,在 10.31~15.31 GHz 的频带内,  $R_{xy}$  的振幅趋近于 0 dB 且  $R_{yy}$  的振幅小于 -20 dB,这意味着在该频段内  $y$  极化入射波几乎都转换为  $x$  极化反射波。图 2 (b) 显示了在 5.5~8.55 GHz 的频率范围内  $R_{yy}$  和  $R_{xy}$  的相位差约为  $90^\circ$ 。为了进一步评估转换器的工作性能,图 2 (c) 和 (d) 分别给出了圆极化和交叉极化反射波的其他性能指标。从图 2 (c) 可以看出,圆极化反射波在 5.5~8.55 GHz 的频带内轴比 (AR,  $AR = ((R_{yy}^2 + R_{xy}^2 + \sqrt{a}) / (R_{yy}^2 + R_{xy}^2 - \sqrt{a}))^{1/2}$ , 其中  $a = R_{yy}^4 + R_{xy}^4 + 2R_{yy}^2 R_{xy}^2 \cos(2(\varphi_{yy} - \varphi_{xy}))$ ) 优于 2.2 dB 且能量转换效率 (ECE,  $ECE = R_{xy}^2 + R_{yy}^2$ ) 大于 99.5%。图 2 (d) 显示了交叉极化反射波的极化转换比 (PCR) 和功率效率 (PE), 其中  $PCR = R_{xy}^2 / (R_{xy}^2 + R_{yy}^2)$  且  $PE = R_{xy}^2$ 。可以看出,在 10.31~15.31 GHz 的频率范围内极化转换比超过 0.99。同时,功率效率优于 97.5%。图 3 给出了极化转换器的相对阻抗,在 10.31~15.31 GHz 频带内,相对阻抗的实部接近于 1,虚部接近于 0,即极化转换器与自由空间阻抗近似匹配,因此部分电磁波在结构内部被损耗。该损耗与材料损耗共同导致了极化转换比和功率效率之间的差异。上述计算结果表明,该极化转换器在工作频带内具备了优异的圆极化和交叉极化转换特性。

为了更直观地观察反射波的极化状态,我们计算了反射波的归一化椭圆率  $e$ , 它的定义为

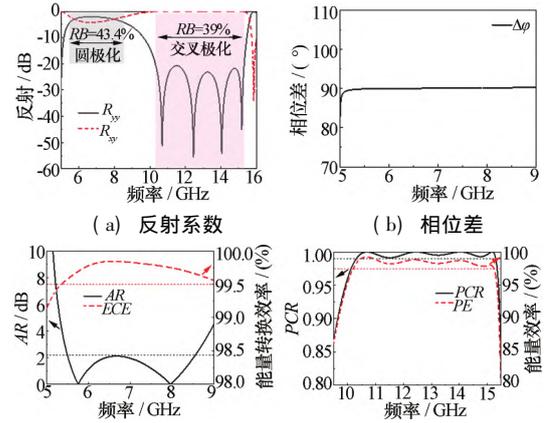


图 2 仿真结果

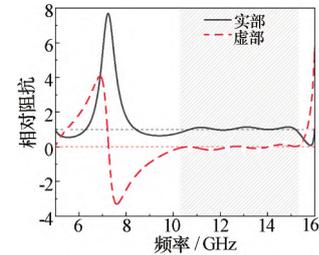


图 3 极化转换器的相对阻抗实部、虚部曲线

$$e = \frac{2 |R_{yy}| |R_{xy}| \sin\Delta\varphi}{|R_{yy}|^2 + |R_{xy}|^2} \quad (2)$$

当满足  $e = \pm 1$  时,表示电磁波为标准右旋/左旋圆极化波。从图 4 可以看出,在 5.5~8.55 GHz 的频带内归一化椭圆度约为 1,这表明入射的  $y$  极化波转换为右旋圆极化反射波。同时,在 10.31~15.31 GHz 的频率范围内,归一化椭圆度在 0 上下波动,说明了该反射波是线极化波。同理,转换器能够在 5.5~8.55 GHz 的频率范围内将  $x$  极化入射波转换为左旋圆极化反射波。

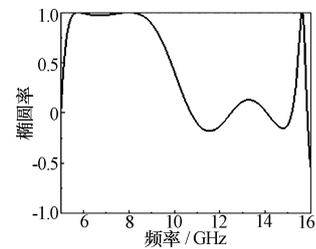


图 4 归一化椭圆率

此外,表 1 给出了该转换器与其它反射型极化转换器之间的比较。对比进一步表明,该转换器具有宽带、高效的线-圆极化和线-交叉极化转换性能。

表1 与其它反射型极化转换器的比较

参考文献	极化转换类型	相对带宽/(%)	圆极化转换效率/(%)	线极化转换比
[1]	线-圆	80	88	—
[3]	线-圆	43.7	80	—
[4]	线-线	89.7	—	0.9
[17]	线-线	62.5	—	0.9
[19]	线-线	61.9	—	0.96
[23]	线-圆/线-线	13/59.6	89	0.88
[25]	线-圆/线-线	38.5/28.6	>90	0.9
本文	线-圆/线-线	43.4/39	99.5	0.99

## 2 讨论

为了更好地分析该转换器的宽带特性,图5(a)和(b)比较了三种结构之间的反射系数。可以看出,双分裂环结构在宽频带上实现了低于-20 dB共极化反射振幅(黑色曲线)。同时,交叉极化反射振幅趋于0 dB。在这里,交叉极化转换的宽带性能是由10.7 GHz、12.46 GHz、14.04 GHz和15.18 GHz四个谐振频率点的叠加而成。由图5(a)可知,分裂圆环和八边形分裂环分别在10.04 GHz和15.71 GHz产生了谐振点。由于分裂圆环谐振器和八边形分裂环谐振器的相互作用,双分裂环结构出现了10.7 GHz、12.46 GHz、14.04 GHz和15.18 GHz四个谐振频率点。同时,在多重共振的作用下,双分裂环结构实现了超宽带的工作频带。此外,图5(a)和(b)也显示了在低频时双分裂环结构和分裂圆环结构仿真结果的一致性(黑色曲线和红色曲线)。但是,在高频部分反射系数发生剧烈变化,共极化反射系数迅速下降,而交叉极化反射系数迅速上升。由此可知,分裂圆环谐振器和八边形分裂环谐振器之间的共振耦合作用主要发生在高频部分。

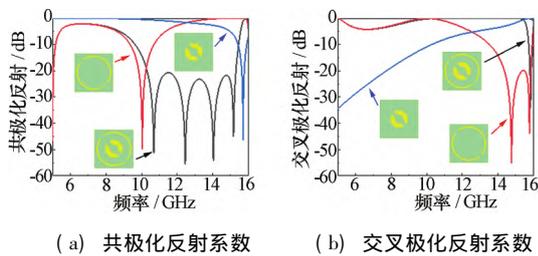


图5 三种不同结构的反射系数

在5.76 GHz、7.97 GHz、10.7 GHz、12.46 GHz、14.04 GHz和15.18 GHz频率下,所提出的极化转换器的顶层和底层的表面电流分布如图6(a)~(f)所示。从图6(a)和(b)中可以看出,在5.76 GHz和7.97 GHz的频率下,顶层表面电流主要集中在分裂圆环结构。然而,在10.7 GHz、12.46 GHz、14.04 GHz和

15.18 GHz四个频率点处,分裂圆环和八边形分裂环结构皆有较大的电流强度,如图6(c)~(f)所示。这也验证了分裂圆环谐振器和八边形分裂环谐振器之间高频部分的相互耦合。

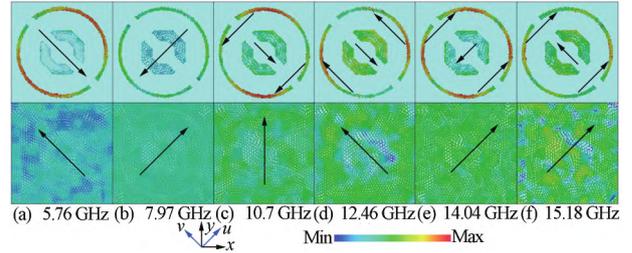


图6 顶层双分裂环结构和金属地板的表面电流分布

另一方面,顶层双分裂环结构和底部金属反射地板之间的电流可以通过“反对称”和“对称”耦合作用产生磁响应<sup>[1]</sup>和电响应<sup>[14]</sup>。在10.7 GHz频率下,顶层分裂圆环结构和八边形开口环结构的表面电流分别沿 $-u$ 方向和 $-v$ 方向流动,底部电流则是沿 $y$ 方向流动,如图6(c)所示。顶层双分裂环结构的表面电流都具有 $-y$ 方向的分量,它们与底部电流方向相反。因此,根据法拉第定律,可以视其为磁偶极子共振。图6(d)显示了在12.46 GHz频率处的表面电流分布,顶层开口圆环和八边形开口环结构的电流方向分别与地板上的电流方向相同和相反。因此,在12.46 GHz同时形成了电偶极子和磁偶极子共振。同理,在14.04 GHz的谐振也是电偶极子共振和磁偶极子共振的共同作用,如图6(e)所示。从图6(f)可以看出,在分裂圆环结构流动的电流方向与底部电流方向相同,从而导致了电偶极子共振激发。综上,10.7 GHz、12.46 GHz、14.04 GHz和15.18 GHz四个谐振频率点的相互耦合实现了该极化转换器的宽频带。

由于转换器单元结构是沿对角线对称的,我们定义了各向异性坐标系来研究其极化转换机制,并将沿 $-z$ 方向入射的 $y$ 极化电磁波分解成两个相等的正交分量( $u$ 和 $v$ 方向),如图7(a)所示。由于接地板的存在, $\mu$ 极化和 $v$ 极化的入射可以视为全反射。因此,入射波和反射波可以分别表示为

$$E_i = (E_{iu}e_u + E_{iv}e_v) e^{jkz} \quad (3)$$

$$E_r = (r_u E_{iu} e^{j\varphi_{ru}} e_u + r_v E_{iv} e^{j\varphi_{rv}} e_v) e^{-jkz} \quad (4)$$

其中 $r_u$ 和 $r_v$ 分别表示沿 $x$ 和 $y$ 方向的反射比, $\varphi_u$ 和 $\varphi_v$ 分别表示沿 $x$ 和 $y$ 方向的反射系数,则它们之间的相位差表示为 $\Delta\varphi = \varphi_{ru} - \varphi_{rv}$ 。当满足 $\varphi_u \approx \varphi_v$ 和 $\Delta\varphi = 2n\pi \pm \pi/2$ ( $n$ 是整数)时,即可得到理想的圆极化反射波。另外,在满足 $\varphi_u \approx \varphi_v$ 和 $\Delta\varphi = 2n\pi \pm \pi$ ( $n$ 是

整数) 条件下  $E_{ru}$  和  $E_{rv}$  的合成场将沿  $x$  方向。因此  $y$  极化入射波将旋转  $90^\circ$  转换为  $x$  极化反射波。

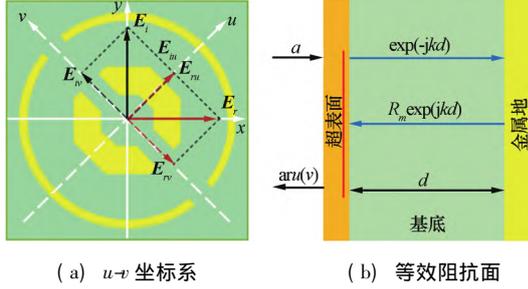


图 7  $u-v$  坐标系及等效阻抗面

为了验证上述理论分析,对  $u$  极化和  $v$  极化入射波进行数值仿真,结果如图 8 所示。可以看出,在两个工作频带(5.5~8.55 GHz 和 10.31~15.31 GHz)内  $u$  极化波和  $v$  极化波激励转换器产生的共极化反射振幅都约为 1。同时,在 5.5~8.55 GHz 和 10.31~15.31 GHz 的频率范围内它们之间的相位差分别约为  $90^\circ$  和  $180^\circ$ 。这表明在线极化入射波的激励下,该转换器能够分别在 5.5~8.55 GHz 和 10.31~15.31 GHz 的频带上实现高效的圆极化转换和交叉极化转换。

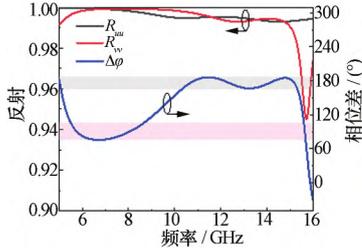


图 8  $u$  和  $v$  极化波入射时反射系数及相对相位差

进一步,我们从等效阻抗角度研究极化转换器的工作机理<sup>[27-28]</sup>。如图 7(b) 所示,超表面和底部接地层之间被厚度为  $d$  的衬底相互隔开。此外,入射和反射电场可分别表示为  $E_i = (E_{iu}e_u + E_{iv}e_v) e^{jkz}$  和  $E_r = (r_u E_{iu} e^{j\varphi_{ru}} e_u + r_v E_{iv} e^{j\varphi_{rv}} e_v) e^{-jkz}$ 。因此,通过采用传输矩阵法<sup>[29]</sup>,根据麦克斯韦方程组的边界条件, $u$  极化和  $v$  极化入射波的反射系数可以表示为:

$$r_{u(v)} = \frac{Z_{u(v)} [1 - e^{2jkd}] - Z_{u(v)} \sqrt{\epsilon_r} [1 + e^{2jkd}] - Z_0 [1 - e^{2jkd}]}{Z_{u(v)} \sqrt{\epsilon_r} [1 + e^{2jkd}] + Z_0 [1 - e^{2jkd}] + Z_{u(v)} [1 - e^{2jkd}]} \quad (5)$$

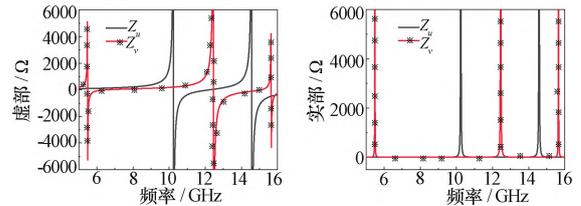
进一步参考文献[30],在  $u$  和  $v$  方向上的频率相关阻抗的表达式可以定义为:

$$Z_{u(v)} = \frac{Z_0}{\frac{1 - r_{u(v)}}{1 + r_{u(v)}} - \sqrt{\epsilon_r} \frac{e^{-jkd} + e^{jkd}}{e^{-jkd} - e^{jkd}}} \quad (6)$$

其中  $Z_0 = 377 \Omega$  和  $k = \sqrt{\epsilon_r} k_0$  分别是自由空间阻抗和电介质的波矢量。由于极化转换器沿  $u$  方向和  $v$  方向的结构并不一致,极化转换器在  $u$  方向和  $v$  方向呈现出来不同的电磁特性,导致了  $u$  方向和  $v$  方向的阻抗之间的差异性。因此,其相位差可以在一定频带内保持稳定。基于上述分析,当相位差等于  $\pm\pi$  时,线极化入射波将转换为其正交反射波。进一步,我们通过公式(6)计算了  $u$  极化和  $v$  极化入射波的频率相关阻抗,如图 9(a) 和 (b) 所示。从图 9(a) 可以看出,在频率 10.24 GHz 和 14.57 GHz 上的虚部为零,在频率 5.48 GHz、12.45 GHz 和 15.64 GHz 上  $Z_v$  的虚部为零。而这些频率对应的阻抗的实部都趋向于无穷大,如图 9(b) 所示。因此,所提出的极化转换器在这些频点的等效阻抗远大于自由空间阻抗,即  $Z(\omega) \gg Z_0$ 。据我们所知,复反射系数可以定义为:

$$R(\omega) = \frac{Z(\omega) - Z_0}{Z(\omega) + Z_0} \quad (7)$$

从而导致了  $R(\omega) \approx 1$ 。因此,在这些谐振频率下该结构可以视为高阻抗表面或人工磁导体。在 10.24 GHz 和 14.57 GHz 频率下,该结构未与分量共振,因此接地金属板会在  $E_v$  分量上产生  $180^\circ$  的相移。同理,在 5.48 GHz、12.45 GHz 和 15.64 GHz 频率下,接地金属板会赋予  $E_u$  分量  $180^\circ$  的相移。因此,在这些谐振频率下,反射的  $E_u$  和  $E_v$  分量之间的相位差为  $\pi$ ,导致了沿  $x$  方向的反射。



(a) 阻抗的虚部 (b) 阻抗的实部

图 9 传输矩阵法计算得到的沿  $u$  和  $v$  方向的等效阻抗响应

另外,在线-圆极化转换频段范围内,极化转换器在  $u$  和  $v$  方向上具有不同的阻抗特性,如图 9(a) 和 (b) 所示。因此,极化转换器在正交方向上的反射波存在相位差。从图 8 可以看出,  $u$  和  $v$  方向上的反射系数近似相等且相位差接近  $90^\circ$ 。因此,该极化转换器在 5.5~8.55 GHz 的频带范围内实现了线-圆极化转换。

### 3 实验验证

为了实验验证该设计,使用标准印刷工艺在 3.5 mm 厚的衬底(F4B-2)上制备了  $20 \times 20$  单元(面

积为 268 mm×268 mm) 的实验样品。然后,在图 10 所示的小型微波暗室对实验样品进行了测量。

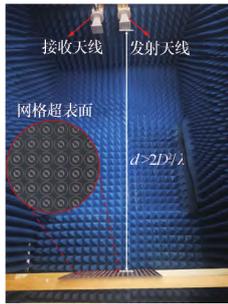


图 10 实验样品和实验装置示意图

将一对标准喇叭天线(发射天线和接收天线)连接到矢量网络分析仪,样品放置于它们的下方。测量时,两个喇叭天线极化方向一致,得到共极化反射系数。接着,保持发射天线的位置不变,将接收天线旋转 90°使它与发射天线极化方向正交,测量得到交叉极化反射系数。如图 11(a)所示,实验结果与仿真结果基本一致。进一步,把实验数据(共极化与交叉极化反射系数)代入公式  $AR = \left( \frac{|R_{yy}|^2 + |R_{xy}|^2 + \sqrt{|R_{yy}|^4 + |R_{xy}|^4 + 2|R_{yy}|^2 |R_{xy}|^2 \Delta\varphi}}{|R_{yy}|^2 + |R_{xy}|^2 - \sqrt{|R_{yy}|^4 + |R_{xy}|^4 + 2|R_{yy}|^2 |R_{xy}|^2 \Delta\varphi}} \right)^{1/2}$  和  $PCR = R_{xy}^2 / (R_{xy}^2 + R_{yy}^2)$ , 得到相应的 AR 和 PCR 曲线,结果如图 11(b)所示。可以看出,实验结果与仿真结果具有良好的一致性,验证了该转换器的有效性。

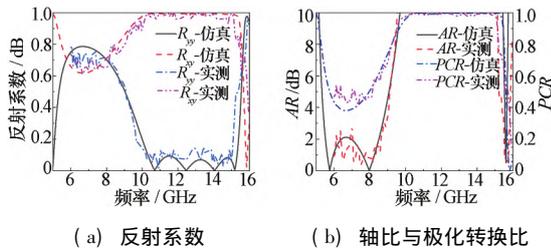


图 11 仿真与实验结果

此外,对实验结果和仿真结果的微小差异进行了研究,如图 12 所示。

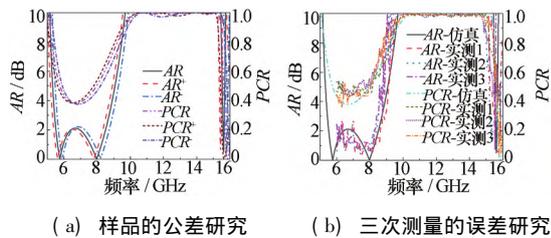


图 12 仿真与实验结果的差异研究(彩色图片参见本刊电子版)

图 12(a) 为样品的公差研究,符号 (+) 表示所提出结构的所有尺寸都增加了 0.1 mm(估计的制造精度),符号 (-) 表示所提出结构的所有尺寸都减小

了 0.1 mm。可以看出,结构尺寸的增加或减小会导致器件工作频带向低频或高频移动。图 12(b) 为三次测试结果的对比,其具有微小的差异。因此,实验样品加工和测量过程产生的误差导致了实验结果和仿真结果的差异。

## 4 结论

本文提出了一种可在不同的宽频带内实现高效线-圆和线-交叉极化转换的反射型极化转换器。仿真结果表明,该转换器在 5.5~8.55 GHz 的频带实现了能量转换效率优于 99.5% 的线-圆极化转换。此外,能够在 10.31~15.31 GHz 的频带将线极化入射波高效地转换为交叉线极化反射波,相对带宽为 39% 且极化转换比大于 0.99。实验结果与仿真结果的趋势基本一致。由于其线-圆和线-交叉极化转换的高效性,该器件在极化操控设备和天线设计中有潜在应用价值。

## 参考文献

- Jiang Y N, Wang L, Wang J, et al. Ultra-wideband high-efficiency reflective linear-to-circular polarization converter based on metasurface at terahertz frequencies [J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27616-27623
- Akgol O, Unal E, Altintas O, et al. Design of metasurface polarization converter from linearly polarized signal to circularly polarized signal [J]. *Optik*, 2018, 161: 12-19
- Nama L, Nilotpal L, Bhattacharyya S, et al. A metasurface-based, ultrathin, dual-band, linear-to-circular, reflective polarization converter [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2021, 63(4): 100-110
- 王世彬, 王光明, 郭文龙, 等. 基于超构表面的高效宽带交叉极化转换器设计 [J]. *微波学报*, 2018, 34(4): 60-64
- Wang S B, Wang G M, Guo W L, et al. Design of high efficiency wideband cross polarization converter based on metasurface [J]. *Journal of Microwaves*, 2018, 34(4): 60-64
- 缪余, 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
- 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
- Hao J M, Yuan Y, Ran L X, et al. Manipulating electromagnetic wave polarizations by anisotropic metamaterials [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(6): 063908
- Zhang Z, Cao X Y, Gao J, et al. Broadband metamaterial

- reflectors for polarization manipulation based on cross/ring resonators [J]. *Radio Engineering*, 2016, 25(3): 436-441
- (8) Doumanis E, Goussetis G, Gomez-Tornero J L, et al. Anisotropic impedance surfaces for linear to circular polarization conversion [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(1): 212-219
- (9) Gao X, Yu X Y, Cao W P, et al. Ultra-wideband circular-polarization converter with micro-split Jerusalem-cross metasurfaces [J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(12): 128102
- (10) Lin B Q, Lv L T, Guo J X, et al. An ultra-wideband reflective linear-to-circular polarization converter based on anisotropic metasurface [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 82732-82740
- (11) Cheng Y Z, Withayachumnankul W, Upadhyay A, et al. Ultrabroadband reflective polarization converter for terahertz waves [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(18): 181111
- (12) Chen H Y, Wang J F, Ma H, et al. Broadband perfect polarization conversion metasurfaces [J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(1): 253-257
- (13) Zhao J C, Cheng Y Z. A high-efficiency and broadband reflective 90° linear polarization rotator based on anisotropic metamaterial [J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(10): 255
- (14) Gao X, Han X, Cao W P, et al. Ultrawideband and high-efficiency linear polarization converter based on double V-shaped metasurface [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(8): 3522-3530
- (15) Lin B Q, Da X Y, Wu J L, et al. Ultra-wideband and high-efficiency cross polarization converter based on anisotropic metasurface [J]. *Microwave & Optical Technology Letters*, 2016, 58(10): 2402-2405
- (16) Jia Y T, Liu Y, Zhang W B, et al. Ultra-wideband and high-efficiency polarization rotator based on metasurface [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(5): 051901
- (17) Zheng Q, Guo C J, Liu H X, et al. Wideband and high efficiency reflective polarization rotator based on metasurface [J]. *Journal of Electromagnetic Waves & Applications*, 2018, 32(3): 265-273
- (18) Guo L W, Li S M, Jiang X, et al. Ultra-wideband polarization rotation reflective metasurface based on monolayer rhombus hollow structure [J]. *AIP Advances*, 2018, 8(9): 095205
- (19) Liu Z M, Zhao B, Jiao C H, et al. Broadband cross-polarization conversion metasurface based on cross-shaped resonators [J]. *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 2021, 127(11): 825
- (20) Liu Y Q, Qiao Q, Fu Y, et al. Reflective triple-band line-to-circular polarization conversion based on diamond-shaped graphene metasurface [J]. *Optical Materials*, 2021, 114: 110984
- (21) Liu X B, Zhang J S, Li W, et al. Three-band polarization converter based on reflective metasurface [J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 924-927
- (22) Mao C Y, Yang Y, He X X, et al. Broadband reflective multi-polarization converter based on single-layer double-L-shaped metasurface [J]. *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 2017, 123(12): 767
- (23) Zheng Q, Guo C J, Ding J. Wideband metasurface-based reflective polarization converter for linear-to-linear and linear-to-circular polarization conversion [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(8): 1459-1463
- (24) Khan M I, Khalid Z, Tahir F A. Linear and circular-polarization conversion in X-band using anisotropic metasurface [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 4552
- (25) Wahidi M S, Khan M I, Tahir F A, et al. Multifunctional single layer metasurface based on hexagonal split ring resonator [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 28054-28063
- (26) Pouyanfar N, Nourinia J, Ghobadi C. Multiband and multifunctional polarization converter using an asymmetric metasurface [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 9306
- (27) Li F, Chen H Y, Zhang L B, et al. Compact high-efficiency broadband metamaterial polarizing reflector at microwave frequencies [J]. *IEEE Trans. on Microw. Theory and Techn.*, 2019, 67(2): 606-614
- (28) Mohsen K, Changiz G, Javad N. Metasurfaces for wide-band and efficient polarization rotation [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(3): 1799-1804
- (29) Figotin A, Vitebskiy I. Oblique frozen modes in periodic layered media [J]. *Phys. Rev. E, Stat. Phys. Plasmas Fluids Relat. Interdiscip. Top.*, 2003, 68(3): 036609
- (30) Pu M, Hu C G, Wang M, et al. Design principles for infrared wide-angle perfect absorber based on plasmonic structure [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(18): 17413-17420

杨祖宁 男,1997年生,硕士生。主要研究方向:微波器件。

伍铁生(通信作者) 男,1983年生,博士,副教授。主要研究方向:微纳光电子器件。

E-mail: tieshengw@163.com

张顺岚 女,1974年生,博士生。主要研究方向:无线电通信关键技术。