物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

一种基于超材料的宽带、反射型90° 极化旋转体设计

韩江枫　曹祥玉　高军　李思佳　张晨

Design of broadband reflective 90° polarization rotator based on metamaterial

Han Jiang-Feng　Cao Xiang-Yu　Gao Jun　Li Si-Jia　Zhang Chen

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 65, 044201 (2016)　DOI: 10.7498/aps.65.044201
在线阅读 View online: http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044201
当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I4

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

部分相干刃型位错光束的谱 Stokes 奇点
Spectral Stokes singularities of partially coherent edge dislocation beams
物理学报.2016, 65(1): 014202　http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014202

用波晶片相位板产生角动量可调的无衍射涡旋空心光束
Generation of no-diffraction hollow vertex beams with adjustable angular momentum by wave plate phase plates
物理学报.2015, 64(23): 234209　http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234209

一种双反射壁型二维光子晶体窄带滤波器
A narrow bandpass filter based on two-dimensional photonic crystals with two reflectors
物理学报.2015, 64(22): 224202　http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224202

基于双粒子耦合的单层介质柱阵列对电磁波的调控
Rectifying electromagnetic waves by a single-layer dielectric particle array based on dual-particle coupling
物理学报.2015, 64(22): 224201　http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224201

阿基米德螺旋微纳结构中的表面等离激元聚焦
Focusing surface plasmon polaritons in archimedes' spiral nanostructure
物理学报.2015, 64(19): 194201　http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194201

一种基于超材料的宽带、反射型90°极化旋转体设计*

韩江枫 曹祥玉† 高军 李思佳 张晨

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2015 年 7 月 31 日收到; 2015 年 11 月 3 日收到修改稿)

根据各向异性媒质理论, 设计了一种宽带、反射型超材料极化旋转体, 能够将线极化波极化方向旋转 90°, 极化转化率大于 90% 的工作带宽为 5.5—14.5 GHz. 该极化旋转体由两层介质板、金属双开口谐振环和金属底板周期排列构成, 具有各向异性的特点, 单元两对角线方向的电场分量反射系数相同, 反射相位相差 180°, 导致其极化旋转特性. 利用表面电流分布图, 分析不同极化波入射时该极化旋转体的谐振状态, 实验和仿真结果符合较好. 该极化旋转体在新型天线设计和隐身技术等方面具有广阔的应用前景.

关键词: 极化旋转体, 宽带, 超材料, 各向异性

PACS: 42.25.Bs, 42.25.Ja, 78.20.Bh, 78.20.Ci **DOI:** 10.7498/aps.65.044201

1 引 言

极化状态在通信、导航和雷达探测等方面具有重要的应用, 所以实现对电磁波极化状态的控制是十分重要的[1,2]. 超材料通常是指一种人工周期结构, 它具有天然材料所不具备的物理特性[3]. 近年来, 超材料以其奇异的电磁特性引起了学者们的广泛关注[4−11]. 同时, 超材料在电磁波极化状态控制方面也有重要的应用前景. Gansel 等[12] 提出一种由立体金属螺旋结构构成的超材料, 可以实现圆极化波的选择透射. 但其采用立体金属结构, 不易加工与应用. 之后, 学者们对基于平面金属结构的超材料极化变换器进行了广泛研究, 主要包括线极化-线极化变换器[13−20]、线极化-圆极化变换器[21,22]、圆极化-圆极化变换器[23]. 这些极化变换器具有结构简单、易加工、转化效率高等优点, 但它们的工作带宽很窄, 不利于实际应用. 文献 [24] 中利用石墨烯超材料在中红外波段仿真实现工作频带可调的反射线极化旋转, 但其制作工艺相对复杂, 控制装置不易实现. 文献 [25] 中利用各向异性超材料实现了三频带透射型极化旋转, 由于采用旋转对称结构, 其极化转化特性与入射波极化角无关. 文献 [26] 中利用各向异性超材料实现宽带反射型极化旋转, 其在 2—3.5 GHz 频带范围内极化转化率大于 56%. 为实现宽带、高极化转化率的极化变换器, 学者们提出了很多新型结构[27−30], 这些结构可以使电磁波在两个正交方向产生不同的相移和幅度, 并且其幅度和相位差在很宽的频带内保持一致, 从而实现宽带、高极化转化率的极化变换器. 文献 [31] 中利用短线金属结构实现宽带反射型极化旋转, 并且在此基础上, 将超材料结构进行简单修改实现了宽带透射型极化旋转, 这为透射型极化旋转器的设计提供了一种新的方法. 目前, 对超材料极化变换器的研究正向着超宽带、多功能、小型化和入射极化角不敏感等方向发展.

本文提出一种基于超材料的宽带、反射型极化旋转体, 该极化旋转体由两层介质板、金属双开口谐振环和金属底板周期排列构成. 它能够在工作频带内将特定角度入射的线极化波极化方向旋转

* 国家自然科学基金 (批准号: 61271100, 61471389, 61501494) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xiangyucaokdy@163.com

© 2016 中国物理学会 Chinese Physical Society

90°, 使其与入射波正交. 根据各向异性理论解释了极化旋转体的工作原理. 经仿真和实验验证, 其极化转化率大于90%的工作带宽为5.5—14.5 GHz, 相对带宽为90%. 该设计具有结构简单、易加工、转化效率高、宽频带等优点.

2 结构设计与原理

极化旋转体单元结构如图1所示, 由两层结构构成, 顶层介质板为保护层, 下层介质板上表面刻蚀有金属双开口谐振环, 下表面为完整的金属层. 单元结构具体尺寸如下: $a = 3.1$ mm, $b = 3.5$ mm, $w = 0.5$ mm, $p = 9$ mm, $h_1 = 2$ mm, $h_2 = 2.5$ mm. 两层介质板材料皆是介电常数为4.2, 电损耗角正切为0.02的环氧玻璃布板(Modified_epoxy). 金属材料为铜, 其电导率为5.8×10^7 S/m, 厚度为0.036 mm.

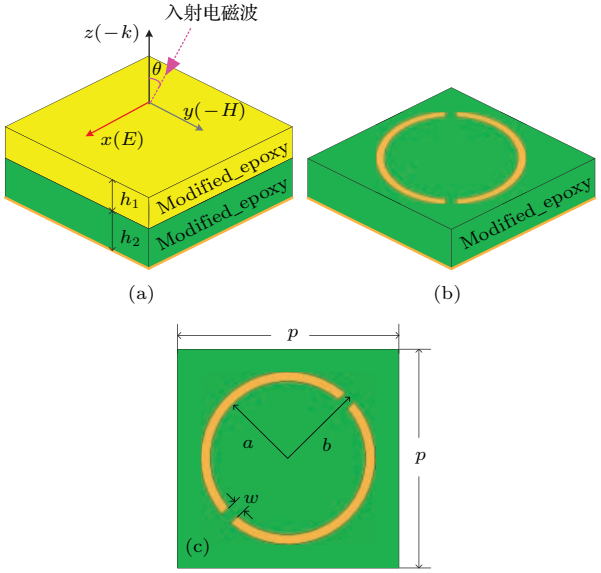

图1 (网刊彩色) 极化旋转体单元结构示意图 (a) 单元结构; (b) 下层介质板结构; (c) 刻蚀在下层介质板上的双开口谐振环

Fig. 1. (color online) Schematic of the proposed polarization rotator: (a) The unit; (b) the bottom substrate; (c) the double-split-ring resonator printed on the bottom substrate.

为解释该极化旋转体的工作原理, 将x, y坐标系顺时针旋转45°得到如图2所示的u, v坐标系. 入射波为x极化、向$-z$轴方向传播的线极化波, 其电场表示式为$\boldsymbol{E}_{\rm i} = E_{\rm i}\,{\rm e}^{{\rm j}kz}\boldsymbol{x}$. 将电场分解为两个沿$u$轴和$v$轴的分量:

$$\boldsymbol{E}_{\rm i} = \frac{\sqrt{2}}{2}E_{\rm i}\,{\rm e}^{{\rm j}kz}\boldsymbol{u} + \frac{\sqrt{2}}{2}E_{\rm i}\,{\rm e}^{{\rm j}kz}\boldsymbol{v}. \tag{1}$$

入射波经极化旋转体反射后反射波电场为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{E}_{\rm r} &= \frac{\sqrt{2}}{2}\left[r_{uu}E_{\rm i}\,{\rm e}^{{\rm j}(-kz+\varphi_{uu})} + r_{uv}E_{\rm i}\,{\rm e}^{{\rm j}(-kz+\varphi_{uv})}\right]\boldsymbol{u}\\ &+ \frac{\sqrt{2}}{2}\left[r_{vv}E_{\rm i}\,{\rm e}^{{\rm j}(-kz+\varphi_{vv})} + r_{vu}E_{\rm i}\,{\rm e}^{{\rm j}(-kz+\varphi_{vu})}\right]\boldsymbol{v},\end{aligned} \tag{2}$$

其中r_{uu}, r_{vu}, r_{uv}, r_{vv}分别表示u极化到u极化, u极化到v极化, v极化到u极化, v极化到v极化的反射系数; φ_{uu}, φ_{vu}, φ_{uv}, φ_{vv}为对应的反射相位. 设$r_{vu} = r_{uv} = 0$, 当满足

$$r_{uu} = r_{vv} = r, \tag{3}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_{uu} - \varphi_{vv} = \pi + 2k\pi, \quad (k\text{为整数}), \tag{4}$$

则$\boldsymbol{E}_{\rm r} = rE_{\rm i}\,{\rm e}^{{\rm j}(-kz+\varphi_{vv})}\boldsymbol{y}$, x极化入射波转化为y极化反射波. 该极化旋转体结构参数的选择是为了满足(3)和(4)式的极化转化条件.

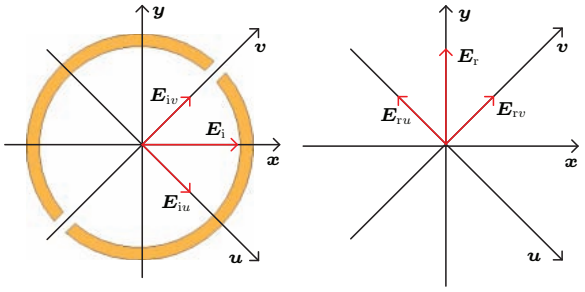

图2 (网刊彩色) 波的u, v轴分量示意图 (a) 入射波示意图; (b) 反射波示意图

Fig. 2. (color online) Schematic of components along u- and v-axis: (a) Incident waves; (b) reflected waves.

3 仿真与分析

定义$r_{xx} = \left|\boldsymbol{E}_{\rm xr}/\boldsymbol{E}_{\rm xi}\right|$, $r_{yx} = \left|\boldsymbol{E}_{\rm yr}/\boldsymbol{E}_{\rm xi}\right|$, $r_{xy} = \left|\boldsymbol{E}_{\rm xr}/\boldsymbol{E}_{\rm yi}\right|$, $r_{yy} = \left|\boldsymbol{E}_{\rm yr}/\boldsymbol{E}_{\rm yi}\right|$来分别表示$x$极化到$x$ 极化, x极化到y极化, y极化到x极化, y极化到y 极化的反射系数. 其中下标i, r分别表示入射波和反射波, 下标x, y表示波的极化方向. 定义极化转化率$PCR = r_{yx}^2/(r_{xx}^2 + r_{yx}^2)$[32].

采用CST MICROWAVE STUDIO 2014对该极化旋转体进行仿真. 电磁波沿负z轴方向入射, x, y方向设置unit边界来模拟无限大周期阵列. r_{xx}和r_{yx}的仿真结果如图3所示. r_{xx}有4个极小值点, 分别在5.78, 7.75, 11.53, 14.13 GHz处. 在这些频点处, r_{xx}接近于0, r_{yx}达到峰值, x极

化入射波几乎完全转化为y极化反射波. 图4为PCR的仿真曲线. 在5.5—14.5 GHz的频带范围内, $PCR > 0.9$, 这时, x极化波经极化旋转体反射, 大部分变为y极化波. 而在工作频带范围外, x极化波经极化旋转体反射, 仍为x极化波. 图5为能量反射率$ERR = r_{xx}^2 + r_{yx}^2$随频率的变化. $ERR < 1$, 入射波能量没有被极化旋转体完全反射. 这是因为该极化旋转体采用有耗介质, 有部分入射波被介质板吸收. 由于该结构关于单元对角线对称, y极化波入射与x极化波入射结果相同, 所以只需要考虑x极化波入射的情况.

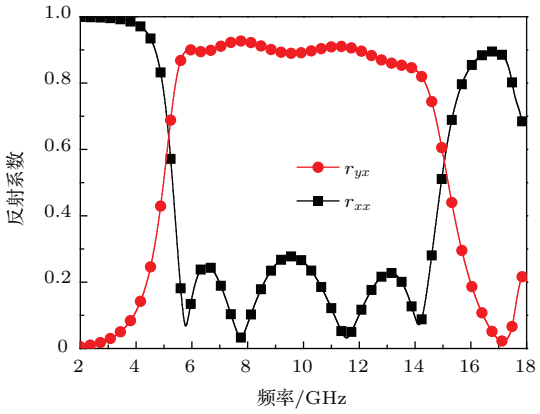

图3 (网刊彩色) 极化旋转体对x极化入射波反射系数

Fig. 3. (color online) Reflection coefficients of the polarization rotator at normal incidence.

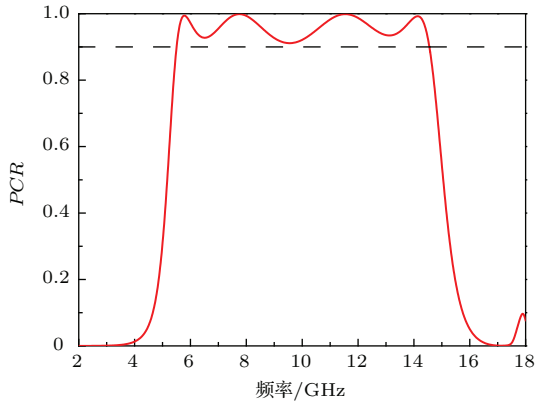

图4 极化旋转体的极化转化率

Fig. 4. Polarization conversion ratio (PCR) of the polarization rotator.

本文设计的极化旋转体在沿u轴和v轴方向结构不对称, 这种非对称性造成该结构对u极化和v极化的入射波反射系数和反射相位不完全相同. 图6为r_{uu}, r_{vu}, r_{uv}, r_{vv}及相位差$\Delta\varphi$随频率变化的仿真结果. 可以看出, 在工作频带内, $r_{vu} = r_{uv} = 0$, $r_{uu} \approx r_{vv}$, 相位差$\Delta\varphi$在149°到215°之间, 基本满足x极化到y极化的转化条件. 所以大部分x极化入射波转化为y极化反射波. 在5.78, 7.75, 11.53, 14.13 GHz处, $\Delta\varphi = 180°$, 所以在这些频点处, 极化转化率达到峰值.

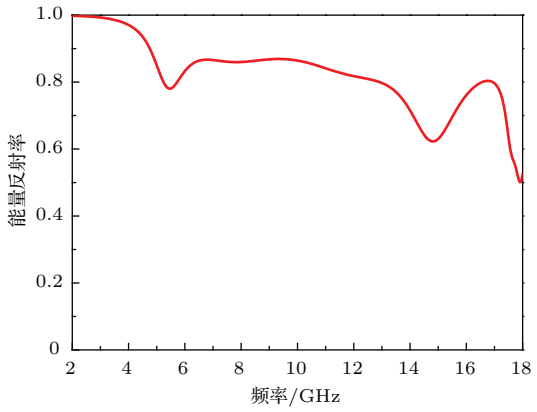

图5 能量反射率曲线

Fig. 5. Curve of energy reflection ratio.

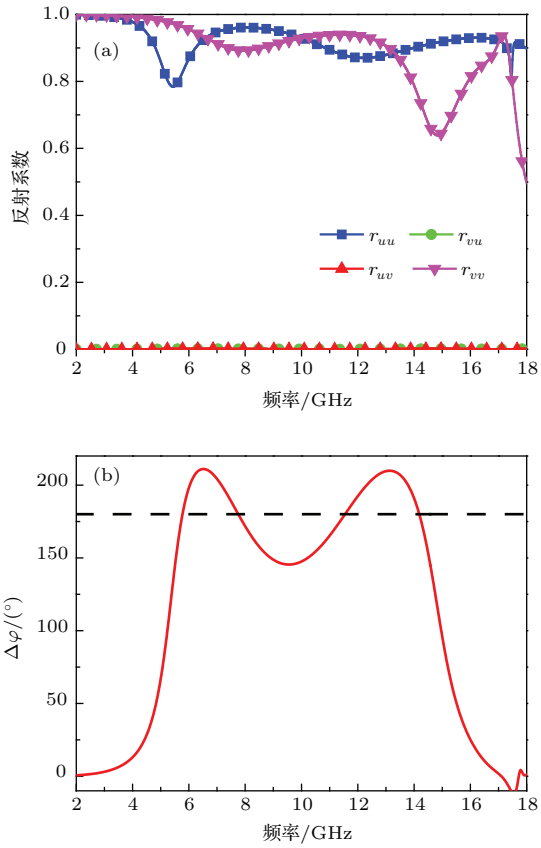

图6 (网刊彩色) (a) 反射系数曲线; (b) 反射相位差曲线

Fig. 6. (color online) Curves of (a) the reflection coefficients and (b) the difference of phase.

此外, 左旋圆极化波入射到该极化旋转体时, 设入射波电场为 $\boldsymbol{E}_{\rm i} = E_{\rm i}\,{\rm e}^{{\rm j}kz+{\rm j}\pi/2}\boldsymbol{u} + E_{\rm i}\,{\rm e}^{{\rm j}kz}\boldsymbol{v}$, 则反射波电场为 $\boldsymbol{E}_{\rm r} = rE_{\rm i}\,{\rm e}^{{\rm j}(-kz+\varphi_{vv}-\pi/2)}\boldsymbol{u} + rE_{\rm i}\,{\rm e}^{{\rm j}(-kz+\varphi_{vv})}\boldsymbol{v}$. 反射波依然是左旋圆极化波, 同理, 右旋圆极化波经反射极化状态不变. 图7为左旋圆极化波入射时, 反射波轴比的仿真结果(与右旋圆极化波入射时结果相同). 从图7可以看出, 在工作频带内轴比均小于3 dB. 圆极化波入射到金属时, 反射波旋向与入射波相反, 可以通过该极化旋转体和金属板的选择, 控制圆极化反射波的极化状态.

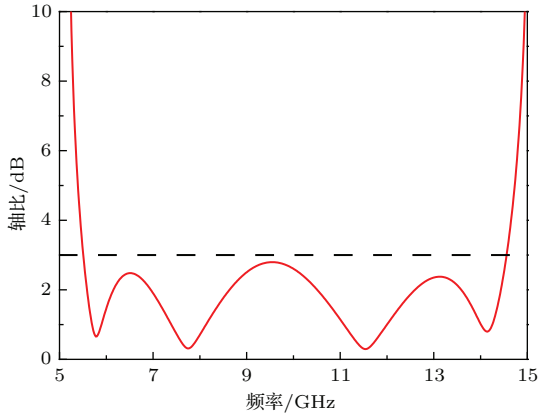

图7 圆极化波入射时, 反射波轴比的仿真结果

Fig. 7. Axis ratio of reflected wave for incident circularly polarized waves.

图8为u极化和v极化电磁波入射到该极化旋转体时, 转化率峰值频点处的表面电流分布. v极化电磁波入射时, 双开口谐振环可以看成电偶极子谐振器. u极化电磁波入射时, 双开口谐振环可以看成如图9所示的LC谐振电路, 其中L_1, L_2, L_3, L_4分别为双开口谐振环各段的等效电感; C_1, C_2分别为两开口处的等效电容. 所以, 该极化旋转体对于u极化和v极化的入射波反射相位不同. 定义极化旋转体对u极化和v极化波入射时附加相位 $\Delta\varphi_u = \varphi_{uu} - \varphi'_{uu}$, $\Delta\varphi_v = \varphi_{vv} - \varphi'_{vv}$, 其中, φ_{uu}, φ_{vv}为极化旋转体对u极化波和v极化波的反射相位; φ'_{uu}, φ'_{vv}为与极化旋转体相同厚度的介质板和金属底板(极化旋转体除去双开口谐振环)对u极化波和v极化波的反射相位. 图10为$|\Delta\varphi_u|$和$|\Delta\varphi_v|$随频率的变化. 在5.78 GHz处, 该结构对v极化的入射波耦合强烈, 对u极化波几乎不耦合, 这使其对v极化波入射的情况有较大的附加相位, 而对u极化波入射的情况几乎无附加相位; 在7.75和11.53 GHz处, 该结构对v极化波耦合强度大于对u极化波耦合强度, 其对v极化波的附加相位大于对u极化波的附加相位; 在14.13 GHz处, 该结构对u极化波耦合强度大于对v极化波耦合强度, 其对u极化波的附加相位大于对v极化波的附加相位.

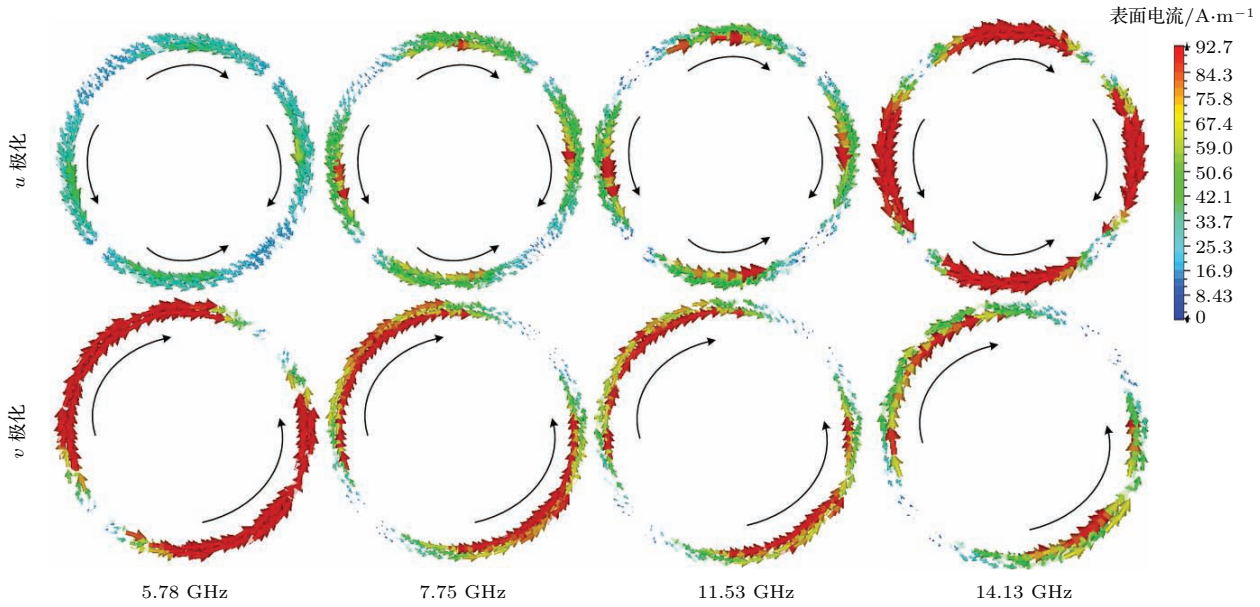

图8 (网刊彩色) 转化率峰值频点处, 开口谐振环表面电流分布图

Fig. 8. (color online) Surface current distributions on the double-split-ring resonator for incident x-polarized waves at the frequencies of four peaks.

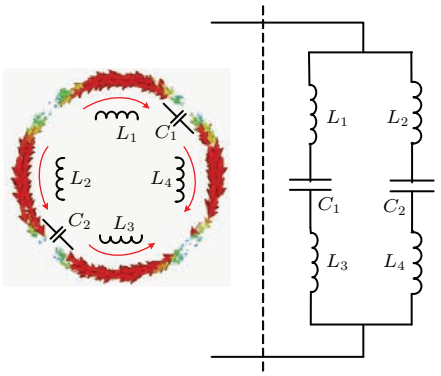

图 9 (网刊彩色) u 极化波入射时等效 LC 谐振电路模型

Fig. 9. (color online) Equivalent circuit model of the double-split-ring resonator for incident u-polarized waves.

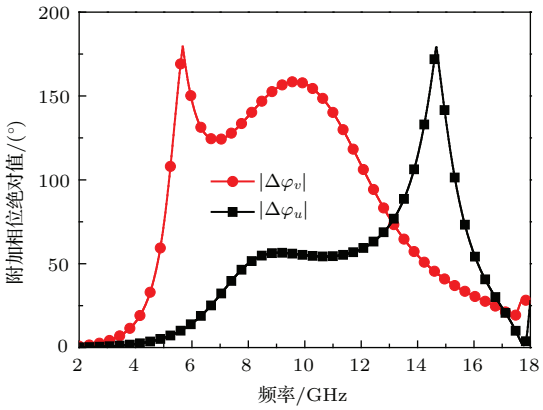

图 10 (网刊彩色) 附加相位绝对值

Fig. 10. (color online) The absolute value of additive phase.

改变入射波与 z 轴的夹角 θ, 图 11 为不同角度入射情况下的反射系数和极化转化率曲线. 从图 11 可以看出, 随着入射角的增大, 极化旋转体带宽变窄, 但仍能在一定的带宽内保持较高的极化转化率. 这主要是因为随着入射角的增大, 入射波极化方向发生了变化, 不再是单纯的 x 极化波和 y 极化波, 不完全满足转化条件, 所以极化旋转体的转化能力下降.

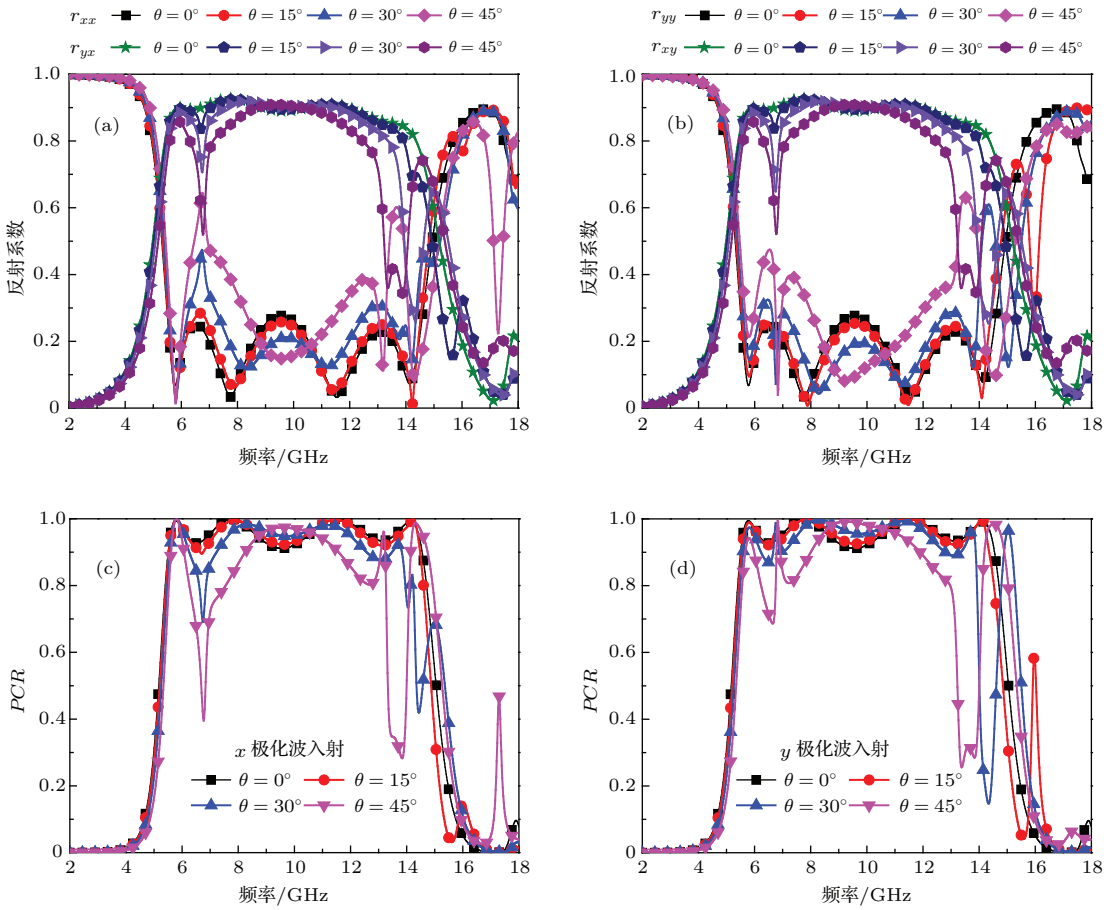

图 11 (网刊彩色) 不同入射角情况下反射系数和极化转化率 (a) x 极化波入射情况下反射系数; (b) y 极化波入射情况下反射系数; (c) x 极化波入射情况下极化转化率; (d) y 极化波入射情况下极化转化率

Fig. 11. (color online) Cures of reflection coefficients and PCR at incident different angles: (a) The refkection coefficients for incident x-polarized waves; (b) the reflection coefficients for incident y-polarized waves; (c) PCR for incident x-polarized wave; (d) PCR for incident y-polarized wave.

4 样品加工及测试

采用印刷电路板技术加工而成的极化旋转体样品如图12所示, 样品介质板均采用FR4环氧玻璃布板, 在工作频带内, 介电常数为4.2—4.4, 损耗角正切为0.02. 其中图12 (a) 为刻蚀有双开口谐振环的底层介质板, 厚度为2.5 mm; 图12 (b) 为顶层介质板, 厚度为2 mm. 样品由24 × 24个单元构成, 总大小为216 mm × 216 mm × 4.5 mm. 采用Agilent N5230C矢量网络分析仪和两个2—18 GHz标准增益线极化天线, 在微波暗室中对样品进行测量, 测试结果如图13所示. 从图13可以看出, 实测和仿真结果基本相符. 误差可能是由四方面的原因造成的: 一是加工误差; 二是测试样品与入射波之间的夹角可能存在误差; 三是仿真时为无限大平面, 而测试样品为有限大; 四是FR4环氧玻璃布板和仿真模型的电参数存在差异.

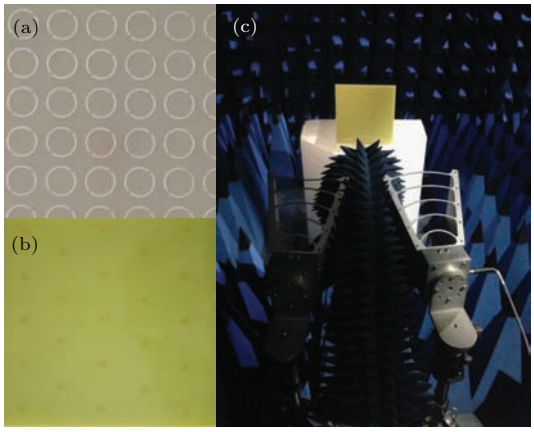

图12 (网刊彩色) 极化旋转体样品 (a) 蚀有双开口谐振环的底层介质板; (b) 顶层介质板; (c) 暗室中进行样品测试

Fig. 12. (color online) Fabricated structure of the rotator: (a) The double-split-ring resonator printed on the bottom substrate; (b) the top substrate; (c) prototype measured in a microwave anechoic chamber.

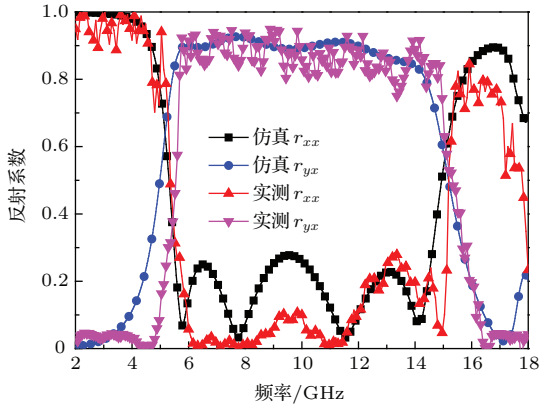

图13 (网刊彩色) x 极化波入射时, 反射系数的仿真和实测结果

Fig. 13. (color online) Simulated and measured results from 2 to 18 GHz at normal incidence.

5 结 论

本文设计了一种宽带、反射型超材料极化旋转体. 该极化旋转体具有各向异性的特点, 沿单元两对角线方向反射系数相同, 反射相位相差180°. 如果入射波为与该极化旋转体单元对角线方向成45°的线极化波, 反射波将与入射波正交; 如果入射波为圆极化波, 则反射波极化状态不变. 随着入射角的增大, 该极化旋转体的工作带宽变窄, 但仍能在一定带宽内保持较高的极化转化率. 经仿真和实验验证, 以 $PCR > 0.9$ 为标准, 工作频率范围为5.5—14.5 GHz, 相对带宽为90%. 由于超材料的工作频率可以通过改变单元金属周期结构的尺寸大小进行调节, 因而通过调整参数, 该极化旋转体还可工作于其他频段. 该极化旋转体在新型天线设计和隐身技术等方面具有广阔的应用前景.

参考文献

[1] Li S J, Gao J, Cao X Y, Zhang Z, Zhang D 2014 *IEEE Antennas Wireless Propaga. Lett.* **13** 1413
[2] Li S J, Cao X Y, Gao J, Zheng Q R, Yang H H 2014 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **56** 27
[3] Liu Y, Zhang X 2011 *Chem. Soc. Rev.* **40** 2494
[4] Wang G D, Liu M H, Hu X W, Kong L H, Cheng L L, Chen Z Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 017802
[5] Fan Y N, Cheng Y Z, Nie Y, Wang X, Gong R Z 2013 *Chin. Phys. B* **22** 067801
[6] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
[7] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
[8] Yang H H, Cao X Y, Gao J, Liu T, Li W Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064103 (in Chinese) [杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 刘涛, 李文强 2013 物理学报 **62** 064103]
[9] Li S J, Gao J, Cao X Y, Zhang Z, Zheng Y J, Zhang C 2015 *Opt. Express* **23** 3523
[10] Singh R, Plum E, Zhang W, Zheludev N I 2010 *Opt. Express* **18** 13425
[11] Slovick B, Yu Z G, Berding M, Krishnamurthy S 2013 *Phys. Rev. B* **88** 165116
[12] Gansel J K, Thiel M, Rill MS, Decker M, Bade K, Saile V, Freymann G V, Linden S, Wegener M 2009 *Science* **325** 18
[13] Ye Y Q, He S L 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 203501
[14] Chiang Y J, Yen T J 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 011129

[15] Rajkumar R, Yogesh N, Subramanian V 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 224506

[16] Shi H Y, Zhang A X, Zheng S, Li J X, Jiang Y S 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 034102

[17] Zhu W R, Rukhlenko I D, Xiao F J, Premaratne M 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 143101

[18] Zhao J X, Xiao B X, Huang X J, Yang H L 2015 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **57** 978

[19] Euler M, Fusco V, Dickie R, Cahill R, Verheggen J 2011 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **59** 3103

[20] Zuo Y, Shen Z X, Feng Y J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 034101

[21] Shao J, Li J, Wang Y H, Li J Q, Chen Q, Dong Z G 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 243503

[22] Huang X J, Yang D, Yang H L 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 103505

[23] Wu L, Yang Z Y, Cheng Y Z, Gong R Z, Zhao M, Zheng Y, Duan J A, Yuan X H 2014 *Appl. Phys. A* **116** 643

[24] Cheng H, Chen S Q, Yu P, Li J X, Xie B Y, Li Z C, Tian J G 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 223102

[25] Shi H Y, Li J X, Zhang A X, Wang J F, Xu Z 2014 *Chin. Phys. B* **23** 118101

[26] Feng M D, Wang J F, Ma H, Mo W D, Ye H J 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 074508

[27] Wen X, Zheng J 2014 *Opt. Express* **22** 28292

[28] Ding J, Arigong B, Ren H, Zhou M, Shao J, Lin Y, Zhang H 2014 *Opt. Express* **22** 29143

[29] Shi H Y, Li J X, Zhang A X, Wang J F, Xu Z 2014 *Opt. Express* **22** 20973

[30] Cheng Y Z, Withayachumnankul W, Upadhyay A, Headland D, Nie Y, Gong R Z, Bhaskaran M, Sriram S, Abbottetc D 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 181111

[31] 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

[32] Hao J, Yuan Y, Ran L, Jiang T, Kong J A, Chan C, Zhou L 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 063908

Design of broadband reflective 90° polarization rotator based on metamaterial*

Han Jiang-Feng Cao Xiang-Yu† Gao Jun Li Si-Jia Zhang Chen

(*Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China*)

(Received 31 July 2015; revised manuscript received 3 November 2015)

Abstract

Polarization is one of the basic properties of electromagnetic waves and is valuable in communication, navigation and radar detecting. So it is important to control and manipulate polarization states of electromagnetic waves. In this paper, we design, fabricate and measure a broadband reflective metamaterial 90° polarization rotator which has a double-split-ring resonator (DSRR) structure, composed of two layers of dielectric and a metal plate ground. The explanation of the physical mechanism of the polarization rotator is presented according to the anisotropy media theory. Anisotropic metamaterials can cause a phase or amplitude difference between two crossed polarization waves, which can be used to manipulate the polarization states of the incident waves. The anisotropic polarization rotator behaves different for two orthogonal axes, and the surface current distributions of the DSRR are discussed to analyse the different characteristics of the structure along two orthogonal axes. The DSRR behaves as a dipole resonator that couples with the electric component along one axes and behaves as an LC resonance circuit that couples with the other electric component. Thus, almost an equal magnitude and a 180° phase difference can be generated between the two orthogonal electric components of the reflected waves. The polarization states of the reflected waves will be rotated by 90°, when incident waves are polarized by 45° with respect to the symmetric axis of the rotator, and it will be retained when the incident waves are circularly polarized. Simulation results show that this device can work with the relative bandwidth of 90% from 5.5 to 14.5 GHz, of which the polarization conversion ratio is larger than 90%. The polarization conversion ratio will decrease as the incident angle increases, but this high polarization conversion ratio can be obtained at several frequencies. A 576-cell (24×24) prototype of the polarization rotator has been fabricated using a printed circuit board method on the FR4 substrates and the experimental results agree well with that of the simulation. The polarization rotator has a simple geometry but more operating frequency bands, compared with the previous designs. It provides a route to broadband polarization rotation and has application values in polarization control, design of new antenna and stealth technology.

Keywords: polarization rotator, broadband, metamaterial, anisotropy

PACS: 42.25.Bs, 42.25.Ja, 78.20.Bh, 78.20.Ci **DOI:** 10.7498/aps.65.044201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61271100, 61471389, 61501494).

† Corresponding author. E-mail: xiangyucaokdy@163.com