

基于开口椭圆环的高效超宽带极化旋转超表面

余积宝 马华 王甲富 冯明德 李勇峰 屈绍波

High-efficiency ultra-wideband polarization conversion metasurfaces based on split elliptical ring resonators

Yu Ji-Bao Ma Hua Wang Jia-Fu Feng Ming-De Li Yong-Feng Qu Shao-Bo

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 178101 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.178101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.178101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I17>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于编码超表面的太赫兹宽频段雷达散射截面缩减的研究

[A coding metasurfaces used for wideband radar cross section reduction in terahertz frequencies](#)

物理学报.2015, 64(15): 158101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.158101>

基于超材料的偏振不敏感太赫兹宽带吸波体设计

[Design of a polarization-insensitive and broadband terahertz absorber using metamaterials](#)

物理学报.2014, 63(17): 178103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.178103>

基于科赫分形的新型超材料双频吸收器

[Study on a novel dual-band metamaterial absorber by using fractal Koch curves](#)

物理学报.2014, 63(11): 118102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.118102>

宽带透射吸收极化无关超材料吸波体

[A broadband transmission absorption polarization-independent metamaterial absorber](#)

物理学报.2014, 63(2): 028103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.028103>

极薄宽角度平面超材料吸波体仿真与实验验证

[Simulation and experiment demonstration of an ultra-thin wide-angle planar metamaterial absorber](#)

物理学报.2013, 62(20): 208103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.208103>

基于开口椭圆环的高效超宽带极化旋转超表面*

余积宝¹⁾ 马华^{1)†} 王甲富¹⁾ 冯明德¹⁾²⁾ 李勇峰¹⁾ 屈绍波^{1)‡}

1)(空军工程大学理学院, 西安 710051)

2)(制造系统工程教育部重点实验室, 西安交通大学, 西安 710049)

(2015年1月29日收到; 2015年5月12日收到修改稿)

电磁波的极化态在信号传输和灵敏度测量中有非常重要的应用价值. 本文设计、仿真并实验验证了微波频段基于开口椭圆环谐振器的极化旋转超表面. 理论上, 将多阶表面等离子谐振和高阻抗表面相结合, 解释了多谐振点、高效率极化旋转的物理机理. 数值上, 通过对结构参数的仿真分析, 给出了运用开口椭圆环结构设计多频段、超宽带高效极化旋转超表面的方法. 所设计和制作的超表面能够在相对带宽 104.5% 的频率范围内实现大于 85% 的极化旋转效率. 这些工作将为极化操控超表面的设计和应用提供重要帮助.

关键词: 极化旋转, 超表面, 开口椭圆环, 超宽带

PACS: 81.05.Xj, 41.20.Jb

DOI: 10.7498/aps.64.178101

1 引言

极化态作为电磁波的主要性质之一, 在信息通信和测量领域发挥着重要作用. 传统的极化态变换控制主要通过二向色性材料和双折射晶体来实现, 容易出现强度差、易老化、体积大等问题, 给实际应用带来诸多不便. 超材料能够实现诸多自然材料所不能实现的现象和功能^[1-3], 自它被提出便引起了科学界的极大关注. 人们迫切希望通过超材料来操控电磁波的传播性质, 并逐步实现了电磁波异常折/反射、超级透镜、耦合表面波、波形转换、完美吸波等重要应用^[4-10]. 2007年, 复旦大学周磊课题组首次提出利用各向异性的超材料对电磁波极化态进行调控^[11]. 之后, 通过超材料来操控电磁波的极化态成为新的研究热点. 超材料凭借其亚波长尺度金属结构单元, 能够从微波到红外甚至到可见光波段实现极化态的任意调控^[12-18], 并且能够克服传统极化调控材料的一些缺点. 但是目前极化转换的带宽和转换效率问题^[19-23] 仍然是其实际应用

的桎梏. 虽然多层结构^[24,25] 能够扩展带宽、提高转换效率, 但是这又会导致体积变大. 因此通过二维平板超材料, 即超表面来实现高效的超宽带极化旋转成为极化态操控研究的重点内容之一.

本文采用开口椭圆环单元结构, 实现了兼顾高效率 and 超宽带的极化旋转. 通过对极化旋转发生机理的理论分析, 并结合对开口椭圆环结构参数的数值分析, 给出了设计多频、宽带高效极化旋转超表面的方法. 实验、仿真及理论分析具有良好的一致性.

2 设计与仿真

超表面的基本单元结构, 如图 1 所示, 由开口椭圆环、金属背板和中间的介质基板组成. 开口椭圆环的主轴与 y 轴夹角 45° , 其长半轴 $r_m = 2.45$ mm, 线宽 $w = 0.21$ mm, 厚度 $t = 0.036$ mm, 开口对椭圆中心张角为 θ , 轴比 A_r . 介质基板长宽 $a = 5.43$ mm, 厚度 $d = 2.5$ mm, 材料介电常数 $\epsilon_r = 2.65$, 损耗正切角 $\tan\delta = 0.001$. 为了解释分

* 国家自然科学基金(批准号: 61331005, 11204378)、博士后科学基金(批准号: 2014M552451)、全国优秀博士学位论文作者专项基金(批准号: 201242)和陕西省创新团队资助(批准号: 2014KCT-05)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mahuar@163.com

‡ 通信作者. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn

析的方便, 定义了沿椭圆长轴和短轴的坐标轴 v 和 u , v 轴和 u 轴与 y 轴夹角为 45° .

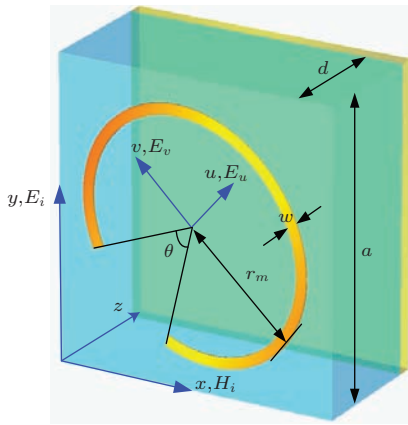


图1 基本单元结构示意图

Fig. 1. Schematic of the unit cell.

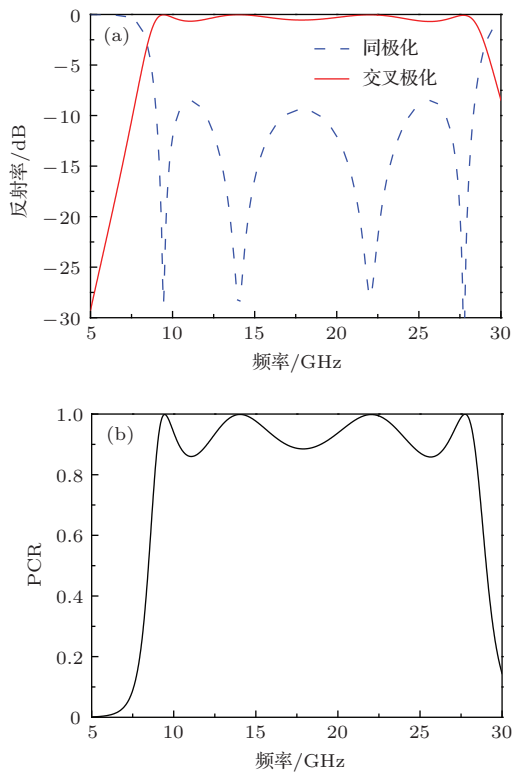


图2 (a) 交叉极化和同极化反射率; (b) 极化旋转效率

Fig. 2. (a) Reflectivities of cross-polarization and co-polarization; (b) polarization conversion ratio (PCR).

当选取 $A_r = 0.92$, $\theta = 121.2^\circ$ 时, 利用 CST Microwave Studio 2011 对其进行全波仿真, 入射电磁波垂直入射, 电场沿 y 轴正向, 仿真得到反射率及其转化效率, 如图 2 所示. 图 2(a) 中实线表示交叉极化反射, 其反射率在约 20 GHz 带宽内大于 -1 dB, 虚线表示同极化反射, 其反射率很小, 且在四个频点附近几乎为零. 图 2(b) 表示极化旋转

效率 PCR, 定义为 $PCR = s_{\perp}^2 / (s_{\perp}^2 + s_{\parallel}^2)$, 其中 s_{\perp} 表示交叉极化反射系数, s_{\parallel} 表示同极化反射系数. 从 8.92 GHz 至 28.43 GHz 共 19.51 GHz 的带宽范围内转化率超过 85%, 对应的相对带宽达 104.5%. 在 9.45 GHz, 14.04 GHz, 22.06 GHz 和 27.75 GHz 附近实现几乎 100% 的极化旋转效率.

3 分析与讨论

为了分析该超表面极化旋转发生机理, 对 v 极化电场和 u 极化电场入射的情况分别进行仿真.

电场沿 v 轴极化, 垂直入射到超表面上, 仿真得到同极化反射率. 如图 3(a) 实线所示, 在 9.45 GHz 和 22.06 GHz 附近有两个谐振峰. 两谐振点附近对应的开口椭圆环和金属背板的表面电流分布, 如图 3(b) 和 (c) 所示. 在 9.45 GHz 附近, 开口椭圆环上电子发生偶极共振, 其感应电流与金属背板生的感应电流始终反相, 构成一个等效磁谐振器, 如图 3(b). 在 22.06 GHz 附近, 开口椭圆环上电子也发生偶极共振, 但是其感应电流与金属背板的感应电流始终同相, 构成一个等效电谐振器, 如图 3(c).

电磁波沿 u 轴极化, 垂直入射到超表面上, 仿真得到同极化反射率, 如图 3(a) 虚线所示. 可以看到, 在 14.04 GHz 和 27.75 GHz 附近有两个谐振峰, 两谐振点附近对应的开口椭圆环和金属背板的表面电流分布, 如图 3(e) 和 (f) 所示. 在 14.04 GHz 附近, 开口椭圆环两臂上产生两个同相的偶极共振, 其感应电流与金属背板生的感应电流始终反相, 构成一个等效磁谐振器, 如图 3(e). 在 27.75 GHz 附近, 开口椭圆环两臂上电子也产生两个同相的偶极共振, 但是其感应电流与金属背板的感应电流始终同相, 构成一个等效电谐振器, 如图 3(f).

电谐振和磁谐振会直接导致谐振方向等效介电常数和磁导率变得很大, 而与其垂直方向的介电常数和磁导率却不变. 那么, 在谐振方向上, 该超表面就相当于高阻抗表面 [26,27]. 进一步反演计算得到 v 和 u 极化电场入射时的等效输入阻抗, 如图 4 所示. 对于 v 极化入射电场, 在 9.45 GHz, 22.06 GHz 附近, 等效输入阻抗非常大, 而其他频率等效阻抗接近零, 如图 4(a); 对于 u 极化入射电场, 在 14.04 GHz, 27.75 GHz 附近, 等效输入阻抗也非常大, 而其他频率等效阻抗接近零, 如图 4(b).

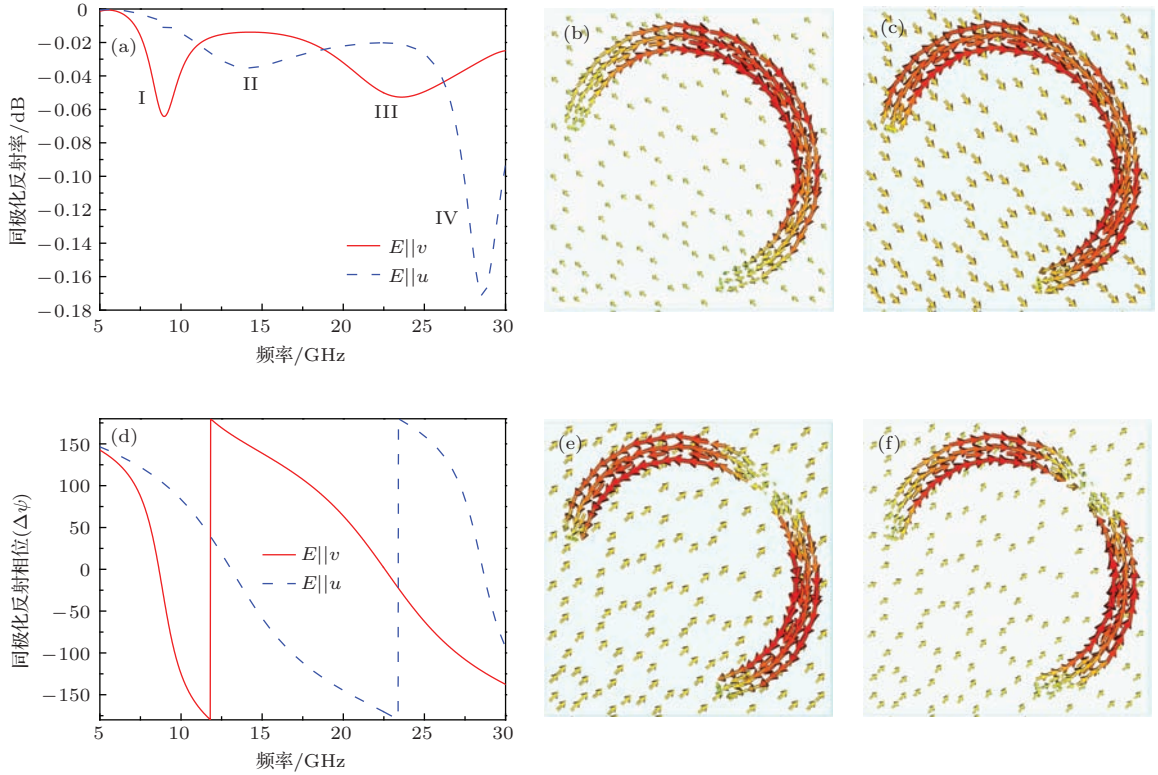


图3 (网刊彩色) (a), (d) 分别为 v 极化和 u 极化电场入射时的同极化反射率和相位; (b), (c), (e) 和 (f) 分别为 I, III, II 和 IV 谐振点附近表面电流分布
 Fig. 3. (color online) (a) Co-polarization reflectivities and (d) phases for v - and u -polarized incident electric field, respectively; Surface current distributions of resonances (b) I, (c) III, (e) II and (f) IV, respectively.

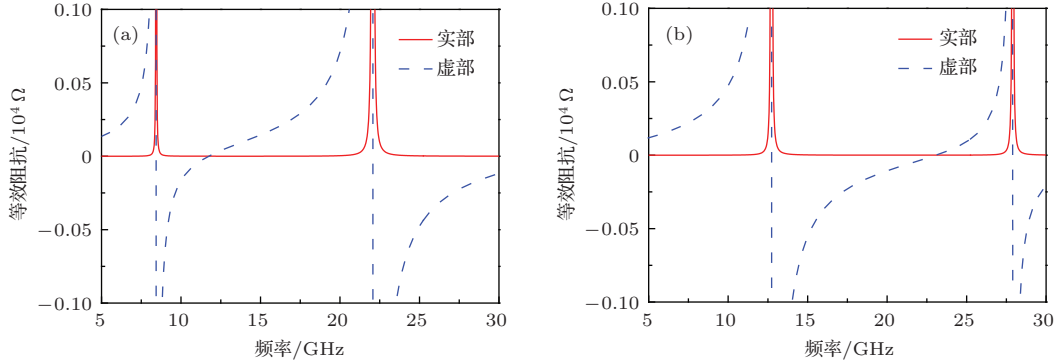


图4 (a) v 极化和 (b) u 极化电场入射时的表面等效阻抗
 Fig. 4. Effective surface impedances for (a) v -polarized and (b) u -polarized incident electric field, respectively.

通过以上分析, 可以知道该超表面对于 v 极化入射电场在 9.45 GHz, 22.06 GHz 附近等效于高阻抗表面, 反射相位 $\Delta\psi_v = 0^\circ$; 对于 u 极化电场在 14.04 GHz, 27.75 GHz 附近亦等效于高阻抗表面, 反射相位 $\Delta\psi_u = 0^\circ$. 这与图 3 (d) 中仿真的反射相位一致.

假设入射电磁波电场沿 y 轴极化, 垂直入射到超表面上, 入射电场可表示为 $\mathbf{E}_i = (E_v \hat{v} + E_u \hat{u}) e^{-jkz}$. 经过超表面反射后, 反射电场可

表示为 $\mathbf{E}_r = (r_v E_v \hat{v} + r_u E_u \hat{u}) e^{-jkz}$. 其中 r_v, r_u 分别为电磁波沿 v 轴和 u 轴方向的反射系数, 定义为 $r_{v(u)} = e^{i\Delta\psi_{v(u)}}$. 在谐振点 I 和 III 附近, $\Delta\psi_v \approx 0^\circ, \Delta\psi_u \approx \pm 180^\circ$; 在谐振点 II 和 IV 附近, $\Delta\psi_v \approx \pm 180^\circ, \Delta\psi_u \approx 0^\circ$. 那么在每一个谐振点附近都存在 $\Delta\psi_v - \Delta\psi_u \approx \pm 180^\circ$, 可以得到 $r_v/r_u \approx -1$. 又由于 y 轴与 u 轴、 v 轴夹角为 45° , 所以 $E_v = E_u$. 最终, 反射场的极化方向可以表示为 $-\hat{v} + \hat{u}$, 这与入射电场极化方向 $\hat{v} + \hat{u}$ 垂直. 这就

是高效极化旋转效果发生的物理机理. 宽带的极化旋转效果源于该超表面的四阶电磁谐振. 通过调节谐振峰的相对位置和品质因数, 可以改变极化旋转的带宽. 同时, 从图 3(d) 中可以看出, 反射电场沿 v 轴和 u 轴的两个分量的相位差从 8.92 GHz 至 28.43 GHz 范围内近似等于 $\pm 180^\circ$, 满足极化旋转 90° 的条件, 保证了宽带极化旋转效果. 对于 x 极化电磁波垂直入射情况, 进行类似分析可以得出同样的结论.

进一步, 研究了单元结构尺寸对极化旋转效果的影响. 图 5(a) 表示极化旋转效率随开口椭圆环轴比变化的分布, 图中虚线标记了谐振点的变化.

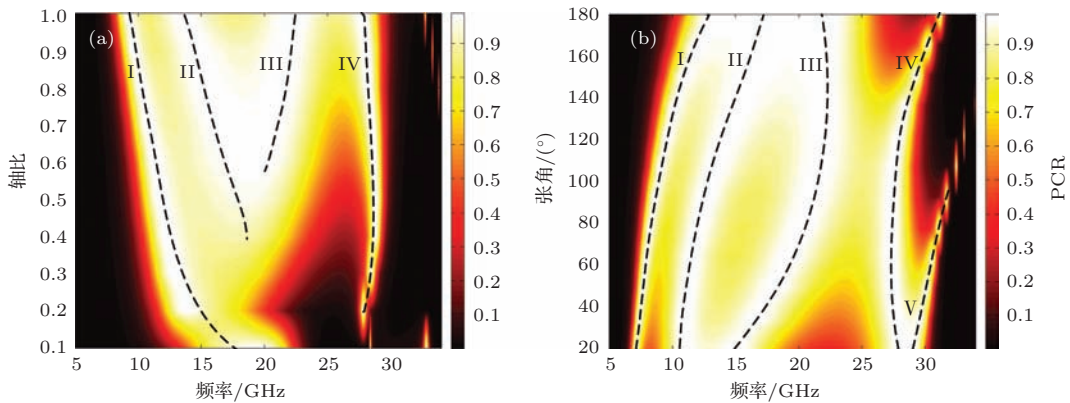


图 5 (网刊彩色) 极化旋转效率随开口椭圆环 (a) 轴比和 (b) 张角变化的分布

Fig. 5. (color online) Distributions of polarization conversion ratio varying with (a) axial ratio and (b) flare angle.

图 5(b) 表示极化旋转效率随开口张角变化的分布. 单元其他结构参数保持不变, 开口张角从 15° 到 180° 变化. 从图中可以发现, 随着椭圆环开口张角的增加, I 和 II 谐振点发生明显蓝移; III 谐振点先向高频移动, 之后又向低频偏移; IV 谐振点则先向低频移动, 后向高频移动. 在开口张角较小时产生 V 谐振点, 进一步拓宽了交叉极化反射的带宽. 同时还发现, 随着开口张角的增大, 平均极化旋转效率提高, 但是带宽变窄. 根据以上分析, 可以发现开口张角存在一个最优值, 在该最优值附近极化旋转效率和带宽同时达到最大, 这个最优值就在 120° 附近.

通过对开口椭圆环轴比和张角的分析, 发现仅仅通过调节轴比、开口张角两个参数, 就能够获得多频带、宽带甚至超宽带的高效极化旋转超表面. 设计与仿真所选取的参数 $A_r = 0.92$, $\theta = 121.2^\circ$, 是兼顾超宽带和高效率的一种折衷选择. 实际应用中, 可以根据需求灵活调节带宽和效率.

单元其他结构参数保持不变, 轴比从 0.1 增加到 1. 可以发现, 随着轴比的增大, 谐振点个数增多. 当轴比为 0.1 和 0.3 的时候谐振点个数为 2, 当轴比为 0.4 至 0.6 时谐振点个数为 3, 当轴比为 0.7 至 1 时谐振点个数增加到 4 个. 随着轴比的增加, I 谐振点向低频移动, 有明显的红移现象; IV 谐振点移动变化较弱; 中间的谐振点由一个逐渐分开为两个, 间距增大. 同时随着轴比的增加, 平均谐振强度逐渐增加, 极化旋转效率提高. 通过分析, 可以发现开口椭圆环的轴比存在一个最优值, 使得带宽和极化旋转效率同时达到最优, 这个最优值就在 0.8 和 0.9 两个值附近.

4 实验验证

为了进一步验证分析和仿真结果的正确性, 采用印制电路板 PCB 工艺制造了一块尺寸为 $324 \text{ mm} \times 324 \text{ mm}$ 的超表面样品, 样品由 60×60 个基本结构单元组成, 如图 6(a) 所示. 椭圆结构参数选取仍为 $A_r = 0.92$, $\theta = 121.2^\circ$. 采用自由空间法, 在微波暗室中分别对 7—12 GHz, 12—18 GHz, 18—26 GHz 和 26—30 GHz 四个频段进行测量, 如图 6(b) 所示.

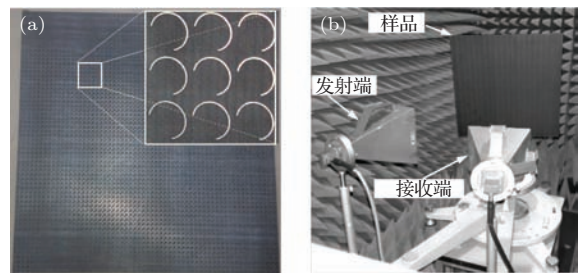


图 6 (a) 实验样品; (b) 测试系统

Fig. 6. (a) Experimental sample and (b) measurement system.

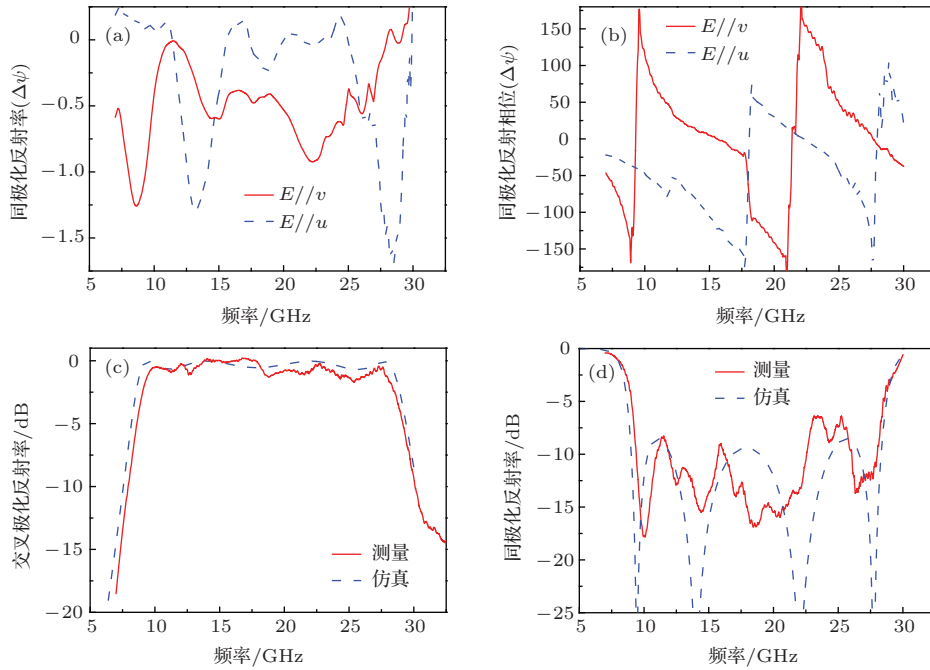


图7 (网刊彩色) (a) 和 (b) 分别为入射电磁波电场沿 v 轴和 u 轴极化时的同极化反射率和反射相位; (c) 和 (d) 分别为入射电磁波电场沿 y 轴极化时的同极化反射率和交叉极化反射率

Fig. 7. (color online) (a) Co-polarization reflectivities and (b) phases for v - and u -polarized incident electric field, respectively; (c) Cross-polarization reflectivities and (d) co-polarization reflectivities for y -polarized incident electric field, respectively.

当入射电磁波电场沿 v 轴和 u 轴极化, 入射到超表面上, 测量得到同极化反射率和反射相位, 如图 7(a) 和 (b) 所示. 从测量结果可以看出四个谐振点的谐振频率与仿真结果基本一致. 反射电场沿 v 轴和 u 轴极化时的同极化反射相位与仿真结果不一致是由于测量时发射源与样品间存在一定距离, 但是两者的相位差从 8.92 GHz 至 28.43 GHz 范围内近似等于 $\pm 180^\circ$, 与仿真结果基本一致, 满足极化旋转 90° 的基本条件.

当入射电磁波电场沿 y 轴极化, 入射到超表面上, 测量得到样品同极化反射率和交叉极化反射率, 如图 7(c) 和 (d) 所示. 与先前的极化旋转超表面相比, 所设计和验证的超表面在带宽和极化旋转效率上都有明显提升 [28–31], 而且具有更大设计自由度. 通过与仿真结果对比, 可以发现, 实验结果和仿真结果基本相符. 实验谐振频率和幅度与仿真结果略有出入, 主要原因有三个: 1) 与仿真中无限大平板相比, 实验样品尺寸有限, 且样品的结构单元制造有误差. 2) 仿真中, 电磁波为正入射, 同一个端口收发; 而在测量时, 采用两个端口, 一个发射, 一个接收, 电磁波为斜入射. 3) 在实验测量中, 使用多个喇叭进行分段测量. 对每一个频段的测量, 无法完全保证测量条件的严格一致. 以上三个

原因导致了实验结果与仿真结果存在差异.

5 结 论

从理论、仿真到实验验证了微波频段基于开口椭圆环结构的超表面能实现高效、超宽带的极化旋转效果. 与先前的极化旋转超表面相比, 在保证极化旋转效率的条件下, 该超表面实现了极化旋转带宽的极大拓宽, 具有较强的实用性和应用前景. 本文还给出了基于开口椭圆环结构的多频和宽带的极化旋转超表面的设计方法, 将为极化旋转超表面的设计和应用提供了重要参考.

参考文献

- [1] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [2] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [3] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
- [4] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [5] Chen L T, Cheng Y Z, Nie Y, Gong R Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 094203 (in Chinese) [陈龙天, 程用志, 聂彦, 龚荣洲 2012 物理学报 **61** 094203]

- [6] Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [7] Aieta F, Genevet P, Yu N F, Kats M A, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 1702
- [8] 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
- [9] Sun S L, He Q, Xiao S Y, Xu Q, Li X, Zhou L 2012 *Nature Mater.* **11** 426
- [10] Wang W J, Wang J F, Yan M B, Lu L, Ma H, Qu S B, Chen H Y, Xu C L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 174101 (in Chinese) [王雯洁, 王甲富, 闫明宝, 鲁磊, 马华, 屈绍波, 陈红雅, 徐翠莲 2014 物理学报 **63** 174101]
- [11] Hao J M, Yuan Y, Ran L X, Jiang T, Kong J A, Chan C T, Zhou L 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 063908
- [12] Hao J M, Qiu M, Zhou L 2010 *Front. Phys. China* **5** 291
- [13] Chin J Y, Gollub J N, Mock J J, Liu R, Harrison C, Smith D R, Cui T J 2009 *Opt. Express* **17** 7640
- [14] Sun W J, He Q, Hao J M, Zhou L 2011 *Opt. Lett.* **36** 927
- [15] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, Zeng Y, Reiten M T, Azad A K, Taylor A J, Dalvit D A, Chen H T 2013 *Science* **340** 1304
- [16] Hao J M, Ren Q J, An Z H, Huang X Q, Chen Z H, Qiu M, Zhou L 2009 *Phys. Rev. A* **80** 023807
- [17] Wu S, Zhang Z, Zhang Y, Zhang K Y, Zhou L, Zhang X J, Zhu Y Y 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 207401
- [18] Lé esque Q, Makhsiyani M, Bouchon P, Pardo F, Jaeck J, Bardou N, Dupuis C, Haïdar R, Pelouard J L 2014 *Appl Phys Lett.* **104** 111105
- [19] Shi J H, Liu X C, Yu S W, Lv T T, Zhu Z, Ma H F, Cui T J 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 191905
- [20] Huang C, Feng Y J, Zhao J M, Wang Z B, Jiang T 2012 *Phys. Rev. B* **85** 195131
- [21] Mutlu M, Akosman A E, Serebryannikov A E, Ozbay E 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 213905
- [22] Shi H Y, Li J X, Zhang A X, Wang J F, Xu Z 2014 *Chin. Phys. B* **23** 118101
- [23] Cheng Y Z, Nie Y, Cheng Z Z, Gong R Z 2014 *Prog. Electromagn. Res.* **145** 263
- [24] Wei Z, Cao Y, Fan Y C, Yu X, Li H Q 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 221907
- [25] Han J, Li H Q, Fan Y C, Wei Z Y, Wu C, Cao Y, Yu X, Li F, Wang Z S 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 151908
- [26] Sievenpiper D, Zhang L, Broas R, Alexopolous N G, Yablonovitch E 1999 *IEEE Trans. Microw. Theory Technol.* **47** 2059
- [27] Mosallaei H, Sarabandi K 2004 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **52** 2403
- [28] Feng M D, Wang J F, Ma H, Mo W D, Ye H J, Qu S B 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 074508
- [29] Chen H Y, Wang J F, Ma H, Qu S B, Xu Z, Zhang A X, Yan M B, Li Y F 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 154540
- [30] Cheng Y Z, Withayachumnankul W, Upadhyay A, Headland D, Nie Y, Gong R Z, Bhaskaran M, Sriram S, Abbott D 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 181111
- [31] Huang X J, Xiao B X, Yang D, Yang H L 2015 *Opt. Commun.* **338** 416

High-efficiency ultra-wideband polarization conversion metasurfaces based on split elliptical ring resonators*

Yu Ji-Bao¹⁾ Ma Hua^{1)†} Wang Jia-Fu¹⁾ Feng Ming-De¹⁾²⁾ Li Yong-Feng¹⁾ Qu Shao-Bo^{1)‡}

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

2) (State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 29 January 2015; revised manuscript received 12 May 2015)

Abstract

Polarization state of electromagnetic waves plays a significant role in the fields of signal transmission and sensitive measurements. High-efficiently manipulating and controlling polarization state by two-dimensional flat metamaterials over a wider bandwidth has been turned into hot issues in recent years. A polarization conversion metasurface based on the split elliptical ring resonator is designed, simulated, and experimentally validated in the microwave regime. The proposed metasurface can convert a linear polarization state into its orthogonal one with a high efficiency for an ultra-wide band. Theoretically, the mechanism of polarization conversion is explained by the theoretical models of high-impedance surface and multi-plasmonic resonances. The metasurface has a strong anisotropy, which behaves as a high-impedance surface, and serves as a metal sheet in orthogonal orientation in the vicinity of the resonant frequencies. The reflection phase has a delay of π for one of the two electric field components and remains unchanged for the other. As a result, the polarization angle of the synthesized reflection electric field rotates by $\pi/2$. The fourth-order plasmonic resonances are generated by the electric and magnetic resonances, which contribute to the bandwidth expansion of cross-polarization reflection. Numerically, by means of simulation and analysis on the axial ratio and flare angle of the split elliptical ring resonators, the influences of these structure parameters on the bandwidth and efficiency of the polarization conversion are clarified. And then the design method of multi-peaks and wideband polarization conversion metasurfaces with split elliptic ring resonators is proposed for different kinds of applications. Experimentally, the geometry is implemented within the currently available printing circuit techniques, and a free space method is adopted to measure the scattering coefficients. A polarization conversion ratio of the fabricated sample is larger than 85% at a relative bandwidth of 104.5%, and approximately 100% of the polarization conversion ratio can be achieved around the resonant frequencies. Experimental results are in good consistency with the simulation results. Compared with the anterior polarization conversion metasurfaces, the proposed metasurface broadens the cross-polarization bandwidth greatly with little efficiency expenses. These works provide beneficial guidance for manipulating and controlling polarization states of electromagnetic waves, and have potential applications in modern radar and communication systems, signal detection systems, and sensitivity measurement systems, etc.

Keywords: polarization conversion, metasurfaces, split elliptical ring, ultra-wideband

PACS: 81.05.Xj, 41.20.Jb

DOI: 10.7498/aps.64.178101

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61331005, 11204378), the Postdoctoral Science Foundation of China (Grant No. 2014M552451), the Foundation of the Author of National Excellent Doctoral Dissertation of China (Grant No. 201242), and the Innovation Group Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2014KCT-05).

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

‡ Corresponding author. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn