

一种宽带可重构反射型极化旋转表面

于惠存 曹祥玉 高军 杨欢欢 韩江枫 朱学文 李桐

Broadband reconfigurable reflective polarization convertor

Yu Hui-Cun Cao Xiang-Yu Gao Jun Yang Huan-Huan Han Jiang-Feng Zhu Xue-Wen Li Tong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 224101 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181041

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181041>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I22>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于人工表面等离激元的双通带频率选择结构设计](#)

Design of dual-band-pass frequency selective structure based on spoof surface plasmon polariton

物理学报.2018, 67(20): 204101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180696>

[基于可调石墨烯超表面的宽角度动态波束控制](#)

Dynamic beam-steering in wide angle range based on tunable graphene metasurface

物理学报.2018, 67(18): 184101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180592>

[高温等离子体中太赫兹波的传输特性](#)

Transmission characteristics of terahertz wave in high temperature plasma

物理学报.2018, 67(17): 174101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180647>

[高对比度目标的电磁逆散射超分辨率成像](#)

Super-resolution imaging of high-contrast target in electromagnetic inverse scattering

物理学报.2018, 67(14): 144101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180266>

[基于宽带立体超透镜的远场超分辨率成像](#)

Far-field super-resolution imaging based on wideband stereo-metalens

物理学报.2018, 67(9): 094101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172608>

一种宽带可重构反射型极化旋转表面*

于惠存¹⁾ 曹祥玉^{2)†} 高军^{2)‡} 杨欢欢²⁾ 韩江枫¹⁾ 朱学文¹⁾ 李桐²⁾

1) (空军工程大学研究生院, 西安 710077)

2) (空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2018年5月28日收到; 2018年9月12日收到修改稿)

将超材料设计思想与微电机系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 技术相结合, 提出了一种宽带可重构反射型极化旋转表面. 该结构由上层方形金属贴片、中介质层、金属底板以及连接贴片与底板的金属通孔构成, 通过在电流短路点处加载 MEMS 开关, 使其具有电可调特性. 仿真结果表明, 当 MEMS 开关导通时, 该结构能在 7.78 GHz—14.10 GHz 频带内将入射的线极化波转化为正交极化波并反射; 当 MEMS 开关断开时, 入射波则以同极化全反射. 加工了实际的样品并进行了测试, 结果与仿真符合较好. 该结构具有结构简单易加工、器件个数少、工作频带宽、损耗低等优点, 在电磁波动态调控中具有潜在应用价值.

关键词: 极化旋转, 超材料, 可重构, 宽频带

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Ja, 85.85.+j, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.67.20181041

1 引言

随着雷达、通信等技术的高速发展, 复杂气候条件及通信的保密性要求电磁波在传播过程中要实时可控. 极化是电磁波的重要特性, 在增加通信容量、提高保密性等方面具有重要作用. 通常, 控制电磁波的极化主要有两种实现方法, 一是直接调控天线的极化^[1-4], 二是通过设计极化旋转表面^[5-18]并置于天线辐射口面前方或直接作为天线辐射面. 其中, 前者具有天线结构尺寸小、频带宽、损耗低等优点, 但由于直接调控天线辐射, 射频偏置电路设计复杂; 相对而言, 后者则只需设计可重构极化旋转表面 (reconfigurable polarization rotation surfaces, RPRS)^[9-18]便可以间接控制天线辐射性能, 特别适合阵列应用.

现有的可重构极化旋转表面按实现方式大致可以分为: 改变介质材料^[9-11]以及利用电子器件改变有效金属结构^[12-18]. 前者通常利用石墨烯^[9]、液晶^[10]、金属微流体^[11]等材料来代替传统的金属和介质材料, 具有工作频段高, 设计加工难

度大的特点; 相比而言, 后者利用 PIN 二极管、微电机系统 (MEMS) 开关等器件, 具有易仿真加工、电可控性能好、结构灵活多样等特点, 研究成果相对较多. 如文献^[14, 15]在单元中加载四个 PIN 二极管, 结合手性材料及圆的二分性理论, 通过控制二极管的通断状态, 实现了入射线极化波转化为左、右旋圆极化波. 其中, 文献^[14]为透射型极化旋转表面, 工作频带为 9.70—9.93 GHz, 剖面厚度为 1.63 mm. 文献^[15]为反射型极化旋转表面, 工作频带为 3.4—8.8 GHz (相对带宽 88.5%), 其剖面厚度为 12 mm. 文献^[16]新颖地给出了一种上表面为金属线结构的极化旋转表面, 下表面为 PIN 二极管连接金属片的结构, 通过控制二极管的通断, 分别实现了线极化波的同极化反射和交叉极化透射. 文献^[17]实现了在太赫兹频段内利用 MEMS 开关对交叉极化波透射率和极化旋转角度的动态调控. 文献^[18]则利用每个单元加载两个 PIN 二极管设计了一种宽带可重构极化旋转表面, 当二极管导通时该结构相当于金属板, 当二极管截止时该结构在 6.4—10.3 GHz 频带内 (相对带宽 46.7%) 具有线-线极化转化功能, 此外, 文中还将设计的单元棋盘布

* 国家自然科学基金 (批准号: 61471389, 61671464, 61701523, 61801508)、博士后创新人才支持计划 (批准号: BX20180375) 和陕西省自然科学基金 (批准号: 2018JM6040) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xiangyucaokdy@163.com‡ 通信作者. E-mail: gjgj9694@163.com

阵实现了雷达散射截面的有效减缩. 尽管上述研究已成功实现了极化旋转表面 (PRS) 的性能可重构, 但如何进一步减少器件、增大带宽、降低剖面仍是研究人员不断追求的目标.

本文利用 MEMS 开关, 相比于 PIN 二极管开关, 其具有插入损耗小、功耗低、尺寸小等优点, 结合传统极化旋转表面, 设计了一种宽带可重构的反射型极化旋转表面. 该结构具有频带宽、器件个数少、结构简单、损耗低等优点. 经仿真和实验验证, 当 MEMS 开关导通时, 该结构能在 7.78—14.10 GHz 频带内将入射的线极化波转化为极化转化率大于 80% 的交叉极化反射波, 相对带宽为 57.77%; 当 MEMS 开关断开时, 入射波以同极化全反射. 该结构在目标雷达散射截面动态减缩、天线极化动态调制等方面具有潜在的应用价值.

2 单元结构与仿真结果

本文提出的宽带可控极化旋转表面单元结构示意图见图 1. 该结构由上表面方形金属贴片、介质层和金属底板组成, 贴片一角和中部分别经 R_1 , R_2 两个金属通孔连接至金属底板, 所用介质板材为聚四氟乙烯玻璃布板, 介电常数为 2.65, 电损耗角正切为 0.001, 介质板厚度 $h = 2 \text{ mm}$ (0.073λ , λ 为 10.94 GHz 对应的自由空间波长). 单元的结构参数为: $p = 7.9 \text{ mm}$, $l = 5.9 \text{ mm}$, $w = 0.6 \text{ mm}$, $d = 0.4 \text{ mm}$, $r_1 = 0.6 \text{ mm}$, $r_2 = r_3 = 0.3 \text{ mm}$. 本文选用 Radant 公司型号为 RMSW200 HP 的单刀单掷射频 MEMS 开关, 其在 7—15 GHz 范围内, 插入损耗小于 0.5 dB, 回波损耗小于 0.3 dB, 端口隔离度大于 17 dB. 因此, 为了便于仿真分析将其简化为方形金属贴片, 若 MEMS 开关导通, 单元处于如图 1 (b) 所示的通路状态; 若断开, 单元处于如

图 1 (c) 所示的断路状态.

定义 R_{yx} , R_{xx} 分别表示 x 极化到 y 极化、 x 极化到 x 极化的反射系数; φ_{yx} , φ_{xx} 分别表示 x 极化到 y 极化、 x 极化到 x 极化的反射相位; 反射波相位差 $\Delta\varphi = \varphi_{xx} - \varphi_{yx}$. 利用 Ansoft HFSS 全波电磁仿真软件对该结构进行仿真, 设置主从边界条件, 得到 x 极化波垂直入射时反射系数与反射相位曲线, 如图 2 所示.

当 MEMS 开关导通时, 反射系数曲线如图 2 (a) 所示, 在较宽的频带内 R_{yx} 远大于 R_{xx} , 并且在 8.05, 10.4, 13.35 GHz 处 R_{yx} 接近 1, 此时反射波较入射波产生了如图 3 (a) 所示的极化旋转现象; 当 MEMS 开关断开时, 反射系数曲线如图 2 (b) 所示, R_{xx} 远大于 R_{yx} , 说明入射的 x 极化波经过反射后仍保持 x 极化特性, 如图 3 (b) 所示, 该结构处于断路模式时将不改变电磁波极化状态. 反射相位及相位差曲线如图 2 (c), (d) 所示, 当 MEMS 开关导通或断开时, x 极化与 y 极化反射波相位差 $\Delta\varphi = \pm 90^\circ$ 在仿真的 7—15 GHz 频段内保持不变, 结合开关导通时, 7.62 和 12.56 GHz 处 x 极化波与 y 极化波反射系数曲线出现重合的情况 (如图 2 (a)) 可知, 在 7.62 和 12.56 GHz 频点处, x 极化入射波分别转化为右旋、左旋圆极化反射波.

定义 $PCR = R_{yx}^2 / (R_{xx}^2 + R_{yx}^2)$ 为极化转化率, 当 MEMS 开关导通时该结构在不同入射角下的反射系数曲线和极化转化率曲线如图 4 (a) 和图 4 (b) 所示. 当垂直入射时, 在 8.05, 10.4, 13.35 GHz 处有三个近似为 1 的极大值, 并且在 7.78—14.10 GHz 频带范围内极化转化率大于 0.8, 相对带宽为 57.77%. 当电磁波斜入射时, 随着入射角 θ 增大, 反射系数三个极大值点略向高频偏移, 并且极化转化率略有下降的趋势, 但当入射角从 0° 增大到 30° 时, 极化转化率曲线变化不大.

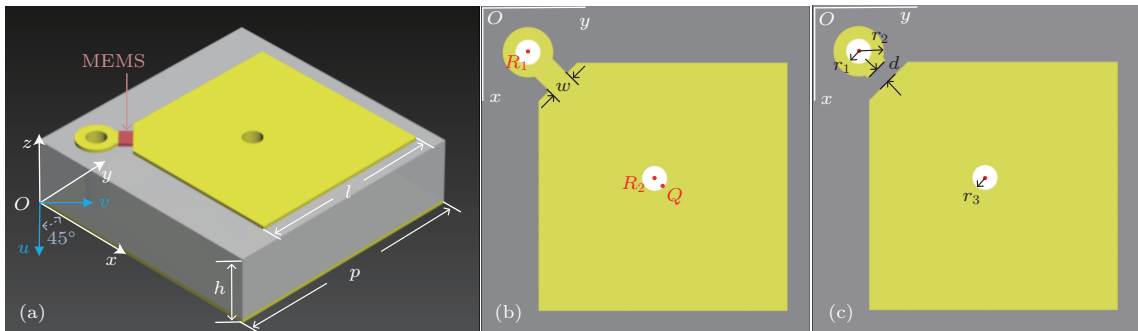


图 1 可重构极化旋转表面单元结构示意图 (a) 单元结构; (b) MEMS 导通; (c) MEMS 断开

Fig. 1. Schematic of the proposed reconfigurable polarization converter: (a) The unit; (b) when MEMS is on; (c) when MEMS is off.

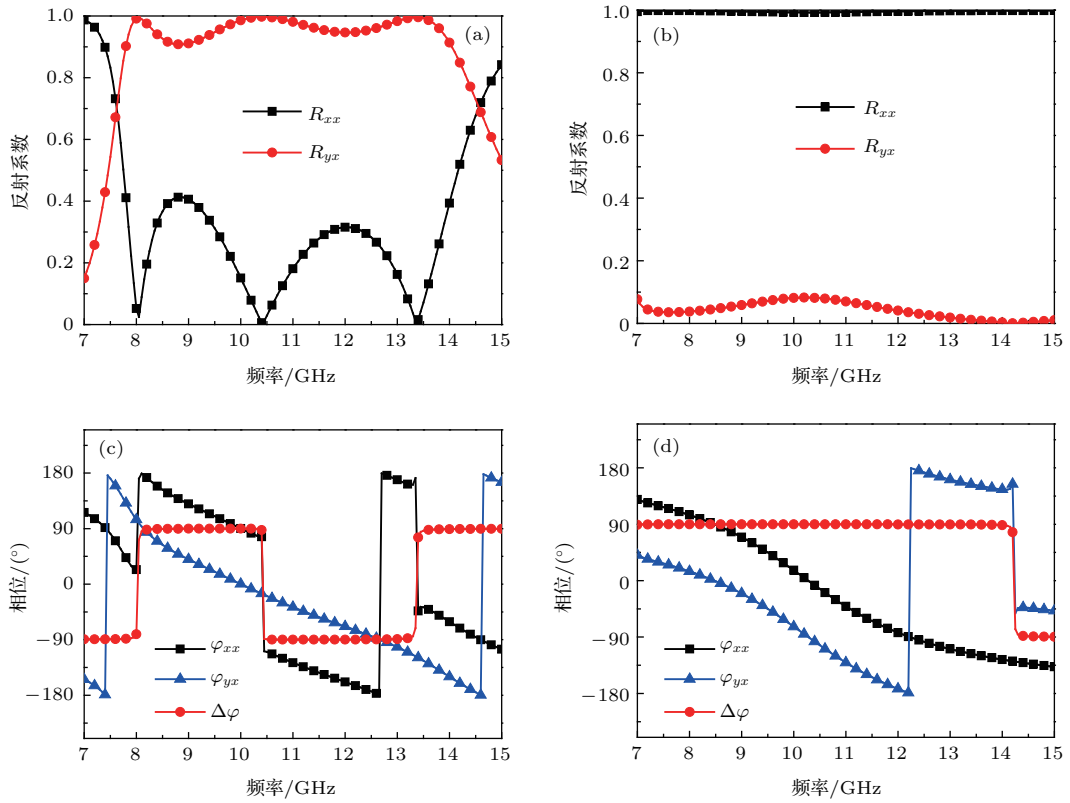


图2 MEMS 导通或断开时反射系数和相位曲线 (a) 导通时的反射系数; (b) 断开时的反射系数; (c) 导通时的反射相位及相位差; (d) 断开时的反射相位及相位差

Fig. 2. (a) Reflection coefficients when MEMS is on; (b) reflection coefficients when MEMS is off; (c) phase and phase difference when MEMS is on; (d) phase and phase difference when MEMS is off.

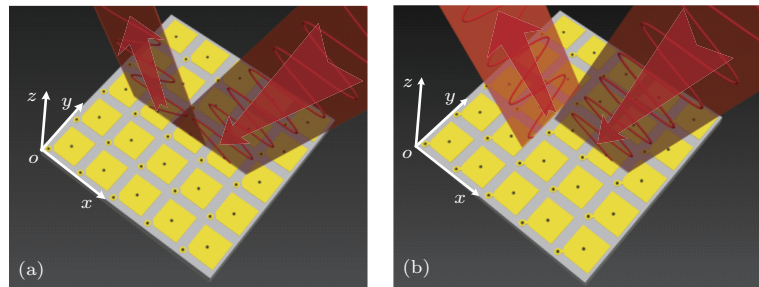


图3 可重构极化旋转现象示意图 (a) MEMS 导通; (b) MEMS 断开

Fig. 3. Schematic of the reconfigurable polarization rotation phenomenon: (a) When MEMS is on; (b) when MEMS is off.

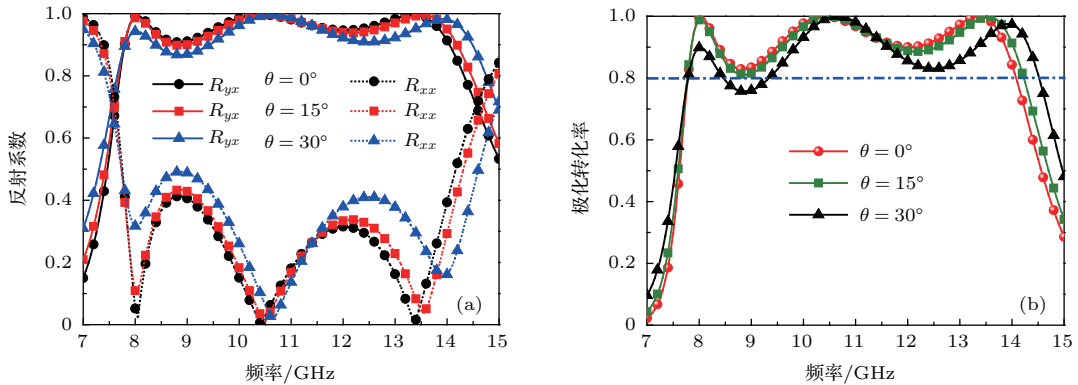


图4 不同入射角的 (a) 反射系数曲线, (b) 极化转化率曲线

Fig. 4. (a) Reflection coefficients and (b) polarization conversion ratio in different incident angle.

3 原理分析

为了分析结构的工作机理, 将 $x-y$ 坐标系顺时针旋转 45° 得到 $u-v$ 坐标系, 如图 1(a). 那么 x 极化波可以分解成 u, v 方向上等幅同相的线极化波. 设 $R_{uu}, R_{vu}, R_{uv}, R_{vv}$ 分别为 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. 在 MEMS 开关导通和断开模式下分别进行仿真, 得到的反射系数曲线见图 5(a) 和图 5(b). 可以看出 $R_{uu} = R_{vv} \approx 1, R_{uv} = R_{vu} \approx 0$, 说明无论开关导通还是断开, 当电磁波以 u, v 极化入射时, 反射波全部为同极化波. 并且同极化反射系数近似为 1, 表明电磁波在极化转化过程中几乎没有能量损耗.

定义 $\varphi_{uu}, \varphi_{vv}$ 分别表示 u 极化到 u 极化, v 极化到 v 极化的反射相位, 反射波相位差 $\Delta\varphi' = \varphi_{uu} - \varphi_{vv}$. MEMS 开关导通时反射相位及相位差曲线如图 6(a) 所示, 在 8.05, 10.4, 13.35 GHz 处相位差等于 180° , 此时 u 极化与 v 极化反射波合成场必然沿 y 极化, 这与 $x-y$ 坐标系下的结果完全符合; MEMS 开关断开时反射相位及相位差曲线如图 6(b) 所示, u 极化与 v 极化波的反射相位几乎重合相位差近似为 0, 因此合成场反射波为同极化波. 比较图 6(a) 与图 6(b) 中的曲线, 两条 φ_{uu} 曲线几乎重合, 而 φ_{vv} 曲线则相差约 180° . 这说明 MEMS 开关的通断并不影响 u 方向上电磁波的反射相位, 但可以对 v 方向的反射相位进行 180° 调控.

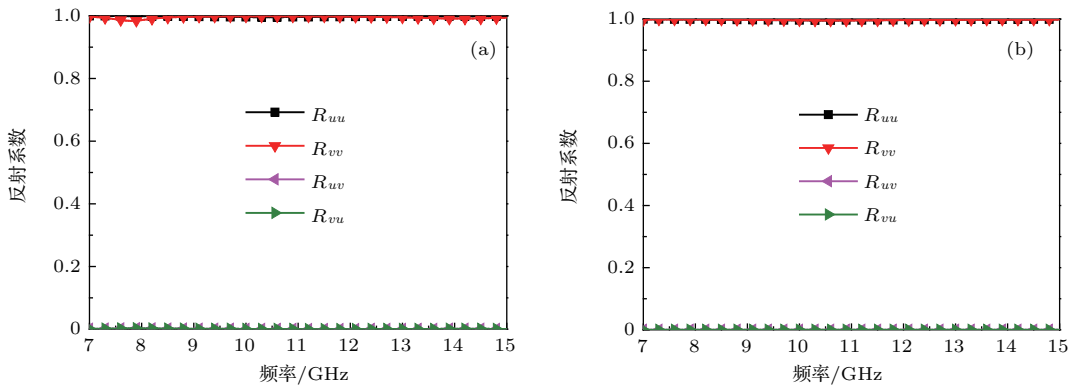


图 5 $u-v$ 坐标系下反射系数曲线 (a) MEMS 导通; (b) MEMS 断开

Fig. 5. Reflection coefficients in $u-v$ coordinate system: (a) When MEMS is on; (b) when MEMS is off.

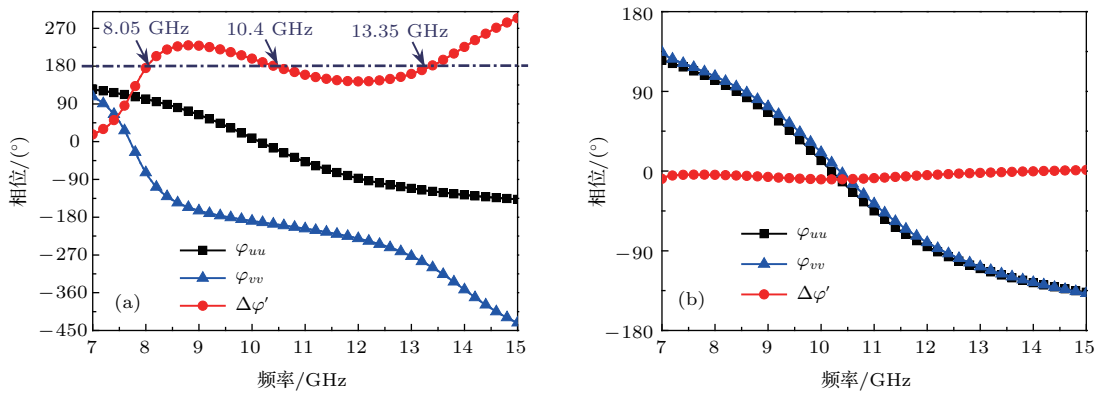


图 6 $u-v$ 坐标系下反射相位和相位差曲线 (a) MEMS 导通; (b) MEMS 断开

Fig. 6. Phase and phase difference in the $u-v$ coordinate system: (a) When MEMS is on; (b) when MEMS is off.

由于 u 极化波对该结构两种状态的反射相位影响几乎一致, 因此仅需分析开关通断对 v 极化波的影响即可. 因此, 在 v 极化波入射时, 分别绘制了 MEMS 开关导通和断开时三个谐振点处的俯视与侧视电流分布图(侧视图中箭头代表电流流向)

如图 7 和图 8 所示. 首先分析其上下表面电流流向. 无论开关导通还是断开, 该结构上下表面电流在三个谐振点处均反向, 属于磁谐振^[19]. 但 MEMS 开关导通时(见图 7)的电流强度明显高于断开时的电流强度, 说明前者磁谐振效果明显并且具备同相

反射特性^[20], 而后的谐振效果十分微弱且不具备同相反射特性. 因此, 二者在三个谐振点处会产生明显的 180° 相位差. 其次分析两个金属化过孔中通过的电流. 当开关导通时, 两个金属化过孔中产生强烈的感应电流, 且在其两侧电流流向相同, 说明两个金属化过孔对整个结构的表面电流分布起到了重要作用; 当开关断开时, 两个金属化过孔中产生较弱的感应电流, 且在其两侧电流流向相反, 说明金属化过孔中电流相互抵消, 将不起作用.

最后分析该结构整体电流流向. 当开关断开时, 该结构内部存在两个电流回路, 类似于传统的电磁带隙结构, 此时相当于在传统蘑菇形电磁带隙单元一侧添加一个与之分离的金属柱结构, 因此无法产生 180° 的相位差; 当开关导通时, 该结构中出现了如图7虚线所示的位移电流, 使其内部出现了3个电流回路, 此时相当于上述电磁带隙单元一侧添加一个与之相连的金属柱结构, 调节了 v 方向的反射相位, 故可以产生 180° 相位差.

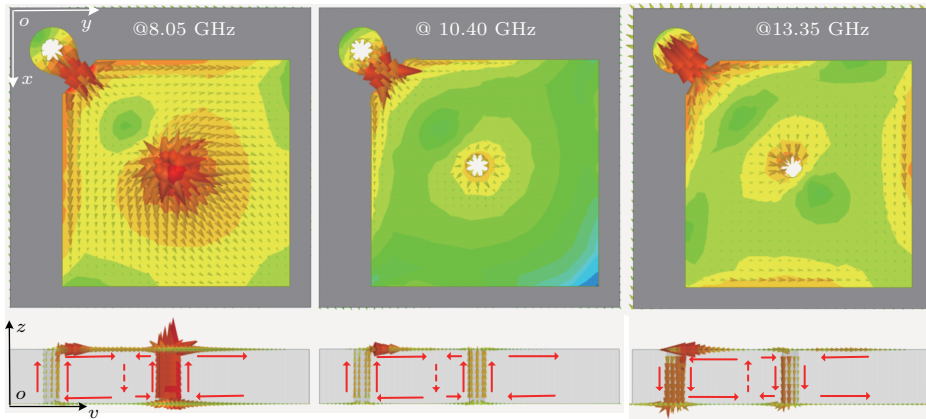


图7 MEMS 开关导通时三个谐振点处电流分布图

Fig. 7. Schematic of current distributions at 8.05 GHz, 10.40 GHz and 13.35 GHz when MEMS is on.

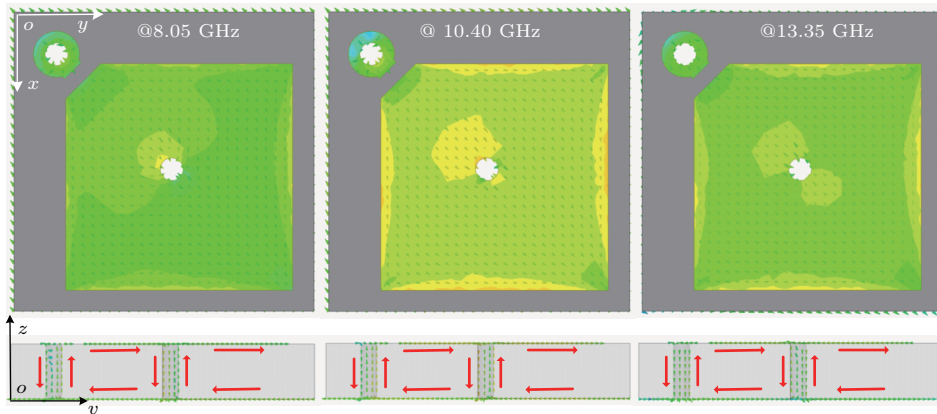


图8 MEMS 开关断开时三个谐振点处电流分布图

Fig. 8. Schematic of current distributions at 8.05 GHz, 10.40 GHz and 13.35 GHz when MEMS is off.

4 样品加工及测试

采用印刷电路板技术对极化旋转表面进行了加工. 如图9(a)所示, 加工样品由 $1225(35 \times 35)$ 个单元组成, 整体结构尺寸为 $273 \text{ mm} \times 273 \text{ mm}$. 采用空间波法^[21] 在微波暗室对该样品进行了测试.

如图9(b)所示, 首先将两个喇叭天线按水平极化放置, 分别测得开关导通和断开时反射系数曲线; 其次, 将其中一个喇叭天线按垂直极化放置另一个喇叭天线保持不变, 分别测得MEMS开关导通和断开时的反射系数曲线. 此外, 样品测试前首先对等大的金属板进行了测试, 并用测得的结果作为校准数据.

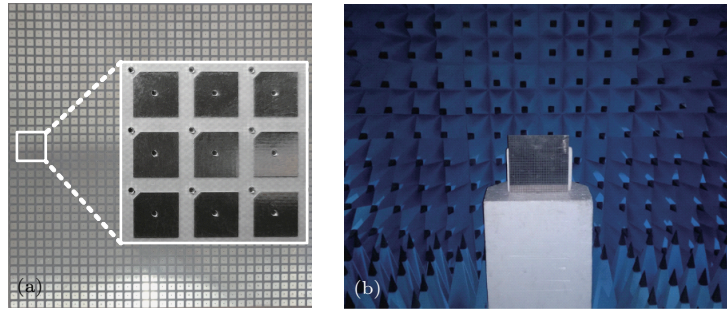


图9 (a) 加工样品示意图; (b) 实测环境示意图

Fig. 9. (a) Schematic of fabricated sample; (b) measured environment.

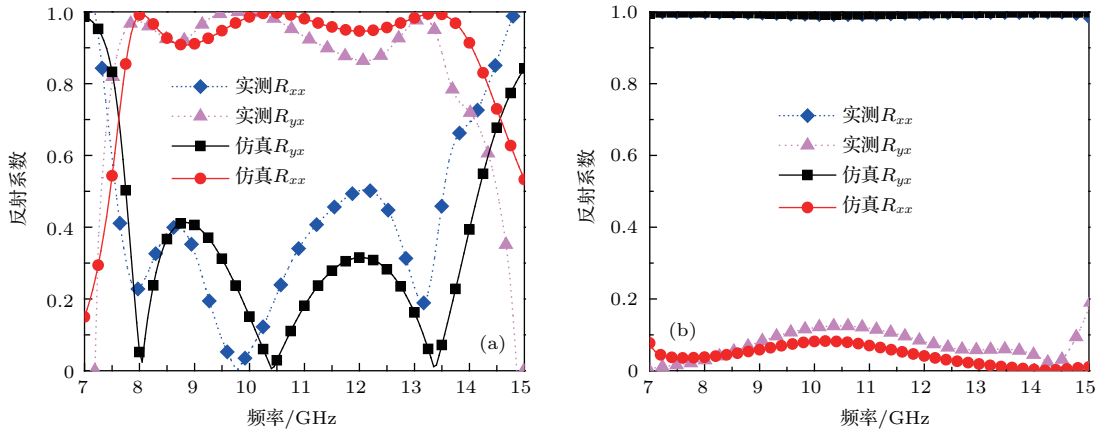


图10 仿真与实测反射系数曲线 (a) MEMS 开关导通; (b) MEMS 开关断开

Fig. 10. Simulated and measured reflection coefficients: (a) When MEMS is on; (b) when MEMS is off.

测试结果与仿真值对比如图10所示。当MEMS开关导通时, 实测出现了明显的极化旋转现象, 有三个谐振点, 曲线整体较仿真略向低频偏移; 当MEMS开关断开时, 此时电磁波的极化状态保持不变。分析认为: 实测与仿真的误差主要由于样品尺寸有限、样品摆放位置误差等造成的。总之, 实测反射系数曲线与仿真结果基本符合。

5 结 论

本文在超材料设计中利用MEMS开关技术设计了一种宽带极化可重构的反射型极化旋转表面。仿真表明, 在相同线极化波入射的条件下, 随着MEMS开关由断开到导通, 反射波实现了由同极化到正交极化的宽带可控转变。通过电磁波的分解到叠加, 阐明了其极化旋转原理以及低损耗特性, 并分析了表面电流分布, 进一步解释了其宽频带工作的机理。加工了实物并在微波暗室中进行了测试, 所得结果与仿真符合较好, 验证了设计的可行性。所设计的可重构极化旋转表面具有工作频带宽、结

构简单易加工、器件个数少、损耗低等优点, 通过改进结构, 增加介质层等方法可以进一步拓展其工作带宽^[22]。该极化旋转表面在天线辐射、雷达散射截面减缩等其他电磁波动态调控领域中具有潜在应用价值。

参考文献

- [1] Ji L Y, Qin P Y, Guo Y J, Ding C, Fu G, Gong S X 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 4534
- [2] Hu J, Luo G Q, Hao Z C 2018 *IEEE Access* **6** 6130
- [3] Cai L P, Cheng Y F, Cheng K K M 2017 *IEEE Asia Pacific Microwave Conference Kuala Lumpur, Malaysia, November 13–16, 2017* p112
- [4] Zhang M T, Gao S, Jiao Y C, Wan J X, Tian B N, Wu C B, Farrall A J 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 1634
- [5] Fartookzadeh M 2017 *Appl. Phys. B* **123** 115
- [6] Su P, Zhao Y, Jia S, Shi W, Wang H 2016 *Sci. Rep.* **6** 20387
- [7] Sui S, Ma H, Wang J, Feng M, Pang Y, Xia S, Xu Z, Qu S 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 063908

- [8] Han J F, Cao X Y, Gao J, Li S J, Zhang C 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 044201 (in Chinese) [韩江枫, 曹祥玉, 高军, 李思佳, 张晨 2016 物理学报 **65** 044201]
- [9] Cheng H, Chen S Q, Yu P, Li J X, Deng L, Tian J G 2013 *Opt. Lett.* **38** 1567
- [10] Doumanis E, Goussetis G, Dickie R, Cahill R, Baine P, Bain M, Fusco V, Encinar J A, Toso G 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 2302
- [11] Wu P C, Yan L B, Song Q H, Zhu W M, Zhang W, Tsai D P, Capasso F, Liu A Q 2015 *Conference on Lasers and Electro-Optics* San Jose, California United States, May 10–15, 2015 STh1M.6
- [12] Li W T, Gao S, Cai Y M, Luo Q, Sobhy M, Wei G, Xu J D, Li J Z, Wu C Y, Cheng Z Q 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 4470
- [13] Yi G W, Huang C, Ma X L, Pan W B, Luo X G 2014 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **56** 1281
- [14] Ma X L, Pan W B, Huang C, Pu M B, Wang Y Q, Zhao B, Cui J H, Wang C T, Luo X G 2015 *Adv. Opt. Mater.* **2** 945
- [15] Cui J H, Huang C, Pan W B, Pu M B, Guo Y H, Luo X G 2016 *Sci. Rep.* **6** 30771
- [16] Tao Z, Wan X, Pan B C, Cui T J 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 121901
- [17] Zhang M, Zhang W, Liu A Q, Li F C, Lan C F 2017 *Sci. Rep.* **7** 12068
- [18] Wang F W, Guo L X, Gong S X 2018 *J. Xidian Univ.* **45** 80 (in Chinese) [王夫蔚, 郭立新, 龚书喜 2018 西安电子科技大学学报(自然科学版) **45** 80]
- [19] Sun H Y, Gu C Q, Chen X L, Li Z, Liu L L 2017 *Appl. Phys.* **121** 174902
- [20] Jiang H Y N, Lei W, Wang J, Akwuruoha C N, Cao W P 2017 *Opt. Express* **25** 27616
- [21] Yang H H, Cao X Y, Yang F, Gao J, Xu S H, Li M K, Chen X B, Zhao Y, Zheng Y J, Li S J 2016 *Sci. Rep.* **6** 35692
- [22] Jia Y T, Liu Y, Zhang W B, Gong S X 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 051901

Broadband reconfigurable reflective polarization convertor*

Yu Hui-Cun¹⁾ Cao Xiang-Yu^{2)†} Gao Jun^{2)‡} Yang Huan-Huan²⁾
Han Jiang-Feng¹⁾ Zhu Xue-Wen¹⁾ Li Tong²⁾

1) (Graduate College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

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

(Received 28 May 2018; revised manuscript received 12 September 2018)

Abstract

With the rapid evolution of radar technology and mobile communication systems, polarization conversion has received much attention from academia and industry in recent years, which has the advantages of improving system performance through eliminating multipath fading. In this paper, a novel broadband reconfigurable reflective polarization convertor is designed, which combines the idea of metamaterial and the technology of micro-electro-mechanical system (MEMS) switches. The proposed structure consists of three layers: an upper metallic patches layer, a middle dielectric layer with a thickness of 2 mm, and a bottom metal plate. There are through-holes of metal connecting the upper and bottom layers. According to the simulation using HFSS software, when the MEMS switch is on, the device works with a relative bandwidth of 57.77% from 7.78 GHz to 14.10 GHz, of which the polarization conversion ratio is larger than 80%. In addition, at 7.62 GHz and 12.56 GHz, the reflected wave is a right-hand circularly polarized wave and a left-hand circularly polarized wave, respectively. When the MEMS switch is off, the reflected wave is in the same polarization, which means the device does not convert the polarization of electromagnetic wave anymore. The electromagnetic wave are decomposed into the u - v coordinate system to further understand the wideband polarization rotation. The reflection phase and the surface current distributions of the convertor are analyzed. Then, the working principle of polarization rotation is explained by analyzing the current distributions and explaining the theory from three different viewpoints. Finally, a 1225-cell (35×35) prototype is fabricated to verify the simulation results. The measured curve has three resonant frequencies and shifts towards the lower frequency slightly. The discrepancy between simulations and measurements is mainly attributed to the restriction of fabrication and measurement condition. In general, experimental results are in agreement with the simulations: when linear polarized wave is incident, the reflected wave realizes the transition from co-polarization to cross-polarization as the switch is switched from off to on. The proposed reconfigurable polarization rotation surface has advantages of broadband, low loss and ease of fabrication, which has great potential applications in antenna radiation, reducing the radar cross section and other territories in controlling electromagnetic wave dynamically.

Keywords: polarization convention, metamaterial, reconfigurable, broadband

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Ja, 85.85.+j, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.67.20181041

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61471389, 61671464, 61701523, 61801508), the Postdoctoral Innovative Talents Support Program of China (Grant No. BX20180375), and the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 2018JM6040).

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

‡ Corresponding author. E-mail: gjg9694@163.com