

人工异向介质调控电磁波极化特性的 实验与仿真研究*

陈龙天 程用志 聂彦† 龚荣洲

(华中科技大学电子科学与技术系, 武汉 430074)

(2011年8月30日收到; 2011年9月23日收到修改稿)

电磁波的极化特性在通信、导航和雷达等方面已逐渐得到应用. 为了有效控制电磁波的极化状态, 本文设计了一种基于开口环结构的人工异向介质. 该人工异向介质由开口环结构, 电介质基底和金属背板组成, 可以将入射的线性极化波完整地转换为圆极化波, 椭圆极化波以及和入射波极化方向垂直的线极化波. 本文通过实验和仿真验证了本文的设计, 实验结果和仿真结果符合较好.

关键词: 人工异向介质, 极化, 开口环

PACS: 42.25.Bs, 42.25.Ja, 78.20.Bh, 78.20.Ci

1 引言

极化状态是电磁波的一个非常重要的特征, 应用电磁波的极化性能可对探测目标进行识别、编码和抽样; 电磁波的极化转换又可在通信、宇航和电子战等高科技领域中获得广泛的应用^[1]. 通过人工方法来控制电磁波的极化状态一直是人们想要实现的目标. 传统的调控电磁波的方法包括光栅调控, 二色晶体调控, 以及通过双折射效应等调控^[2,3]. 人工异向介质或超材料 (metamaterial)^[4-6] 近些年来引起了学术界的广泛关注, 它有着许多天然材料不具备的特殊性质, 诸如负群速度、负折射率^[7,8]、完美成像、逆多普勒效应, 完美吸收^[9]等. 人工异向介质所展现出的新奇的电磁特性主要源自它的亚波长结构, 而不是材料的本征属性, 人们可以通过改变其微结构的形状、尺寸和排列方式来调控它对电磁波的响应强度和频谱范围. 基于此, 人们可以通过特定结构的人工异向介质的设计来完成对电磁波极化状态的调控^[10,11].

近年来, 各向异性介质的有关研究正成为一个热点, 电磁波在各向异性介质中的传输特性的研究已经有了不少有趣的结果, 如后向波传输、超光速等^[12,13], 但用于电磁波极化状态改变的异向介质的设计研究却不多见. Hao等^[10]首先提出了能有效改变入射电磁波极化状态的由“工”字形金属膜结构, 电介质基底和金属背板构成“三明治”结构各向异性介质. 以 45° 角入射的线性极化电磁波入射到该异向介质后, 能够将其改变为圆极化波, 椭圆极化波和与原来方向垂直的线极化波. Ye等^[14]提出的双层手性结构可以实现电磁波的 90° 线极化偏转; Li等^[15]提出的方形开口环结构能使椭圆极化电磁波透射后变成与之主轴方向垂直的椭圆极化电磁波.

本文提出的由开口环结构, 电介质基底和金属背板组成超薄“三明治”复合结构异向介质, 通过一定的排布方式, 可以实现电磁波极化状态改变的功能. 另外, 由于人工异向介质的结构参数易于调控, 因此对电磁波极化状态的控制也非常灵活简单.

* 高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20090142110004) 资助的课题.

† E-mail: nieyan@mail.hust.edu.cn

该结构的优良的电磁波极化状态可控性及结构参数的易调节性, 将使其在目标隐身或电磁干扰等领域具有潜在的应用价值.

2 结构设计

本文设计出的人工异向介质是一种开口环的结构单元和电介质以及金属背板构成的

一个三层的复合结构, 其具体参数如下: 外环半径 $R = 2.8 \text{ mm}$, 内环半径 $r = 1.2 \text{ mm}$, 开口 $g = 0.8 \text{ mm}$, 金属背板边长 $a = 13.6 \text{ mm}$. 开口环结构和金属背板按照如图 1(a) 所示的方式分别排列在边长 $A = 13.6 \text{ mm}$, 厚度 $D = 0.6 \text{ mm}$ 的电介质基板正面和背面. 开口环和金属背板均是厚度 $d = 0.02 \text{ mm}$ 的金属铝材料, 其电导率 $\sigma = 3.72 \times 10^7 \text{ S/m}$.

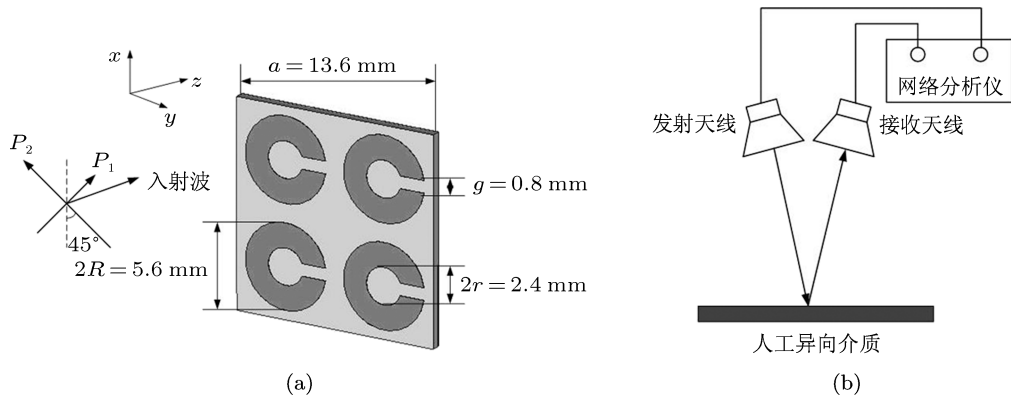


图 1 (a) 人工异向介质单元示意图; (b) 实验装置示意图

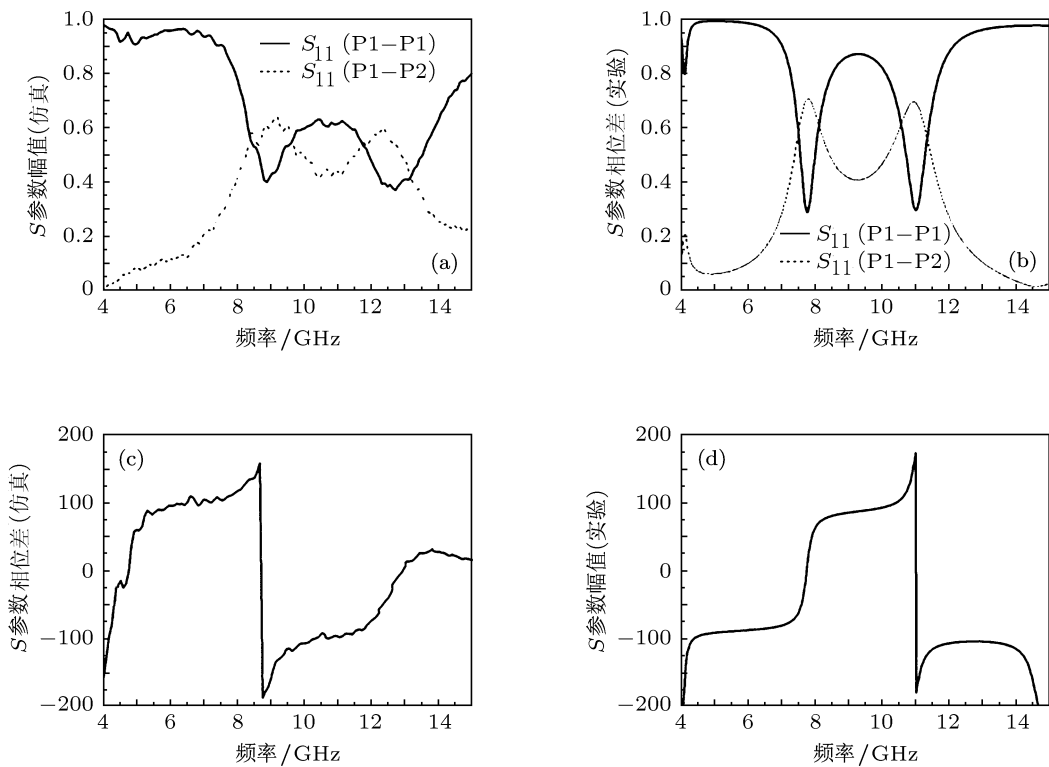


图 2 (a) S 参数幅值的实验结果; (b) S 参数幅值的仿真结果; (c) 相位差的实验结果; (d) 相位差的仿真结果

3 实验测试与仿真

根据图 1(a) 的尺寸制作测试样品, 然后按照图 1(b) 的摆放方式进行实验. 采用激光刻蚀工艺制备测试样品, 即在 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 覆盖铝膜的介质基板 (PET, 其介电常数为 3, 正切损耗角为 0.0367) 上刻蚀图 1(a) 所示的结构模型. 因为要使入射电磁波的极化方向 P1 与 X 轴成 45° 角, 如图 1(a) 所示, 所以在制作样品的时候, 激光刻蚀的图案与 X 轴成 45° 角. 测试在微波暗室内进行, 实验样品载台平行于地面且距离天线 2.5 m, 发射天线和接收天线中垂线的交点在样品的中心处, 两个天线之间的夹角 5° 左右, 如图 1(b) 所示. 利用网络分析仪 (Agilent N5244A PNA-X) 控制信号的发射与接收. 利用标准铝板作为参考面进行反射系数校准, 然后再测试样品在不同极化方向 (P1 和 P2) 的反射系数, 得出的实验结果如图 2(a), (c) 所示.

在图 2 中, (a) 是 S 参数幅值测试结果, 其中 S_{11} (P1—P1) (实线) 表示发射 P1 极化的线性极化波, 接收 P1 极化的线性极化波分量; S_{11} (P1—P2) (虚线) 表示发射 P1 极化的线性极化波, 接收 P2 极化的线性极化波分量. 从图 2 中可以很清晰地看到在 8.8 GHz 和 12.75 GHz 附近, 在 P1 极化方向的电磁波反射系数最小, 而 P2 极化方向的电磁波反射系数最大, 说明在这两个频率点处, 极化方向为 P1 方向的线性入射波通过设计的结构模型反射后极化方向变成了 P2 方向; 同时在 8.1 GHz, 9.6 GHz, 和 11.7 GHz 附近, P1 和 P2 方向反射系数的幅值几乎相等, 这说明在这三个频点附近, 极化方向为 P1 的线性入射波经反射后变成了圆极化波; 而在其余频率点经反射则产生椭圆极化波.

进而分析图 2(c) S 参数的相位差, 根据电磁波的极化理论, 当以水平方向和垂直方向线极化作为极化基时, 当两个方向的相位差为 0 或 π 时, 表明合成的是线极化波; 幅值相等, 相位差为 $\pi/2$ 时, 合成的是圆极化波; 其余情况则是椭圆极化波. 如图 2(c) 所示为 P2 和 P1 方向反射波的相位差, 可以很清楚地看到, 在 8.8 GHz 和 12.75 GHz 的相位差分别为 179° 和 -1.5° , 进一步说明这两个频率点产生的是线极化波; 而在 8.1 GHz, 9.6 GHz 和 11.7 GHz, 两个方向的相位差分别为 100° , -101°

和 -88.6° , 这说明这三个频率点产生的是近似圆极化波. 而在其余频率范围, 相位差不为 0 或 $\pi/2$, 幅值也不相等, 说明产生的是椭圆极化波.

通过以上实验测试表明, 极化方向为 P1 的线极化入射波通过设计的异向介质结构测试样品反射后在不同的频率范围分别产生了极化方向为 P2 的线极化波, 近似圆极化波和椭圆极化波. 为了对比测试结果, 采用基于时域有限差分法 (FDTD) 的电磁计算软件 CST 对图 1(a) 所示单元结构模型进行数值模拟 (单元尺寸及基板介电常数与测试样品一致). 仿真中在 z 方向上采用开放性边界条件, 在 x-y 方向采用周期性边界条件, 仿真得出的结果如图 2(b), (d) 所示. 对比图 2 中的实验和仿真结果, 发现实验测试曲线和仿真曲线符合得比较好, 极化方向为 P1 的线极化入射波通过结构模型后分别在 7.9 GHz 和 11.1 GHz 产生了 90° 的线极化偏转 (两个方向的相位差分别为 0° 和 180°); 在 7.5 GHz, 8.3 GHz 和 10.7 GHz 产生了圆极化波 (两个方向的相位差分别为 -90° , 90° 和 93°), 其余频率范围则是椭圆极化波. 因此, 从数值理论上进一步证明了设计的结构模型能起到调控电磁波极化特性的作用.

另外, 比较图 2 中实验和仿真结果图 (a) 和 (b), (c) 和 (d), 虽然数据曲线比较符合, 但是仿真和测试曲线的频率点和幅值差别比较大, 这主要是由样品制备和测试两个方面的原因引起的. 首先, 样品制备方面, 由于样品镀膜厚度的不均匀性、样品搭建的不均匀性、空间结构的不均匀性等, 均会造成测试样品和仿真模型的不一致, 从而引起误差; 其次, 测试方面, 由于测试的空间有限, 散射及边缘绕射的影响, 还有摆放角度不够精确等, 都会使得测试条件和仿真的理想条件存在差距, 从而导致误差.

4 仿真分析

为了更进一步细致地分析设计的结构模型具有调控反射波极化状态的特性, 在其他的参数不变的情况下, 采用无损耗介质基板 (介电常数 $\epsilon = 4.9$) 对图 1(a) 所示的结构模型在 7—15 GHz 的频段进行模拟仿真. S 参数结果如图 3(a) 所示, 因为设计的人工异向介质是有金属背板的, 所以透

射参数 S_{21} 为零, 而用来模拟仿真的介质采用的是无损的 FR4 基板, 所以损耗也基本可以忽略不计, 因此, 几乎 100% 的能量都反射回来, 故只需要关注反射参数 S_{11} 即可. 值得注意的是, 发射的电磁波是 P1 极化方向的线极化波, 而反射回来的电磁波则同时具备 P1 极化方向的分量和 P2 极化方向的分量. 由图 3(a) 中可以看出, 在 12.09 GHz 处, S_{11} (P1—P2) 的幅值最大, 几乎达到 1.0, 而与此同时 S_{11} (P1—P1) 的幅值最小, 几乎为 0, 可以认为在 12.09 GHz 这个频点处, 反射波几乎完全变成了与入射波极化方向垂直的线极化波. 为了进一步阐述反射极化偏转特性, 定义极化转换率 PCR^[12] (polarization conversion ratio) = S_{11}^2 (P1—P2) / [S_{11}^2 (P1—P1) + S_{11}^2 (P1—P2)], 因为透射和吸收均为零, 所以能量基本是完全反射, 所以有 S_{11}^2 (P1—P1) + S_{11}^2 (P1—P2) = 1, 所以 PCR = S_{11}^2 (P1—P2). PCR 的计算结果如图 3(d) 所示, 它是在 $\theta = 0^\circ$ (电磁波垂直入射), $\varphi = 45^\circ$ (电磁波极化方向与 X 轴成 45° 角) 的情况下得出的. 在 12.09 GHz 的时候, PCR 达到峰值 0.96, 即说明在这个频点, 入射线极化波经过人工异向介质的反射后, 几乎完全转化为了与之极化方向垂直的线极化波.

为了更好的说明反射波是线极化波, 进一步分析反射波在 P1 和 P2 方向上分量的相位差. 相位差如图 3(c) 所示. 由图可以看出, 在频率为 12.09 GHz 的时候, P1 极化分量与 P2 极化分量的相位差 $\Delta\varphi = 0^\circ$, 由电磁波理论可知在 12.09 GHz 处的反射波是一个线性极化波, 且线极化方向几乎与 P2 的方向一致 (前面已计算 PCR = 0.96, 若 PCR = 1, 则反射波线极化方向就是 P2 方向), 所以这充分证明了极化方向为 P1 的线性极化波经过设计的人工异向介质反射后得到的是极化方向几乎为 P2 的线性极化波 (略有 2° 左右的偏差). 可以详细计算一下这个偏差角度的具体值, 因为 $\arctan(0.96/0.04) = 87.6^\circ$, 所以具体的偏差值为 2.4° .

从图 3(a) 中, 还发现在 11.65 GHz 和 12.67 GHz 处, S_{11} (P1—P1) 和 S_{11} (P1—P2) 曲线相交, 因此可以认为在这两个频点, 反射波变成了圆极化. 因为 S 参数的平方是能量的表征, 为说明方便, 进一步将反射参数 S_{11} 的曲线图进行平方处理, 结果如图 3(b) 所示. 从图 3(b) 看出, 曲线同样在 11.65 GHz 和 12.67 GHz 处有两个交点, 观察交点处的纵坐标值可以发现 S_{11}^2 (P1—P1) = S_{11}^2 (P1—P2) = 0.5, 这

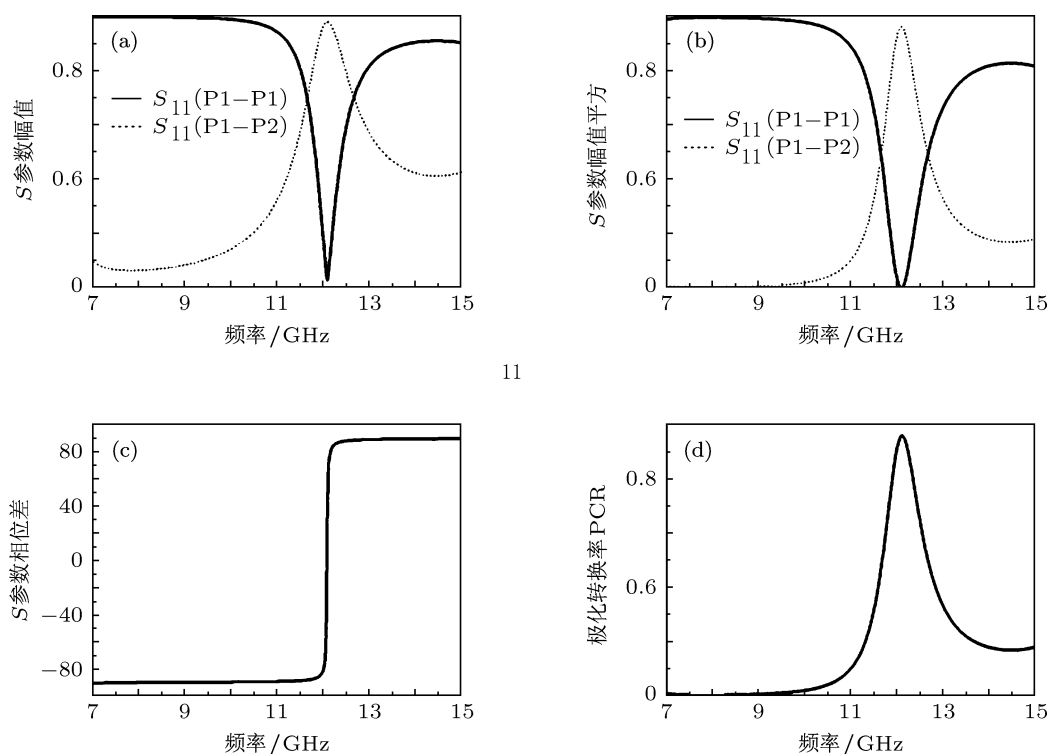


图 3 (a) S 参数幅值; (b) S 参数幅值平方; (c) S 参数相位差; (d) 极化转换率 PCR

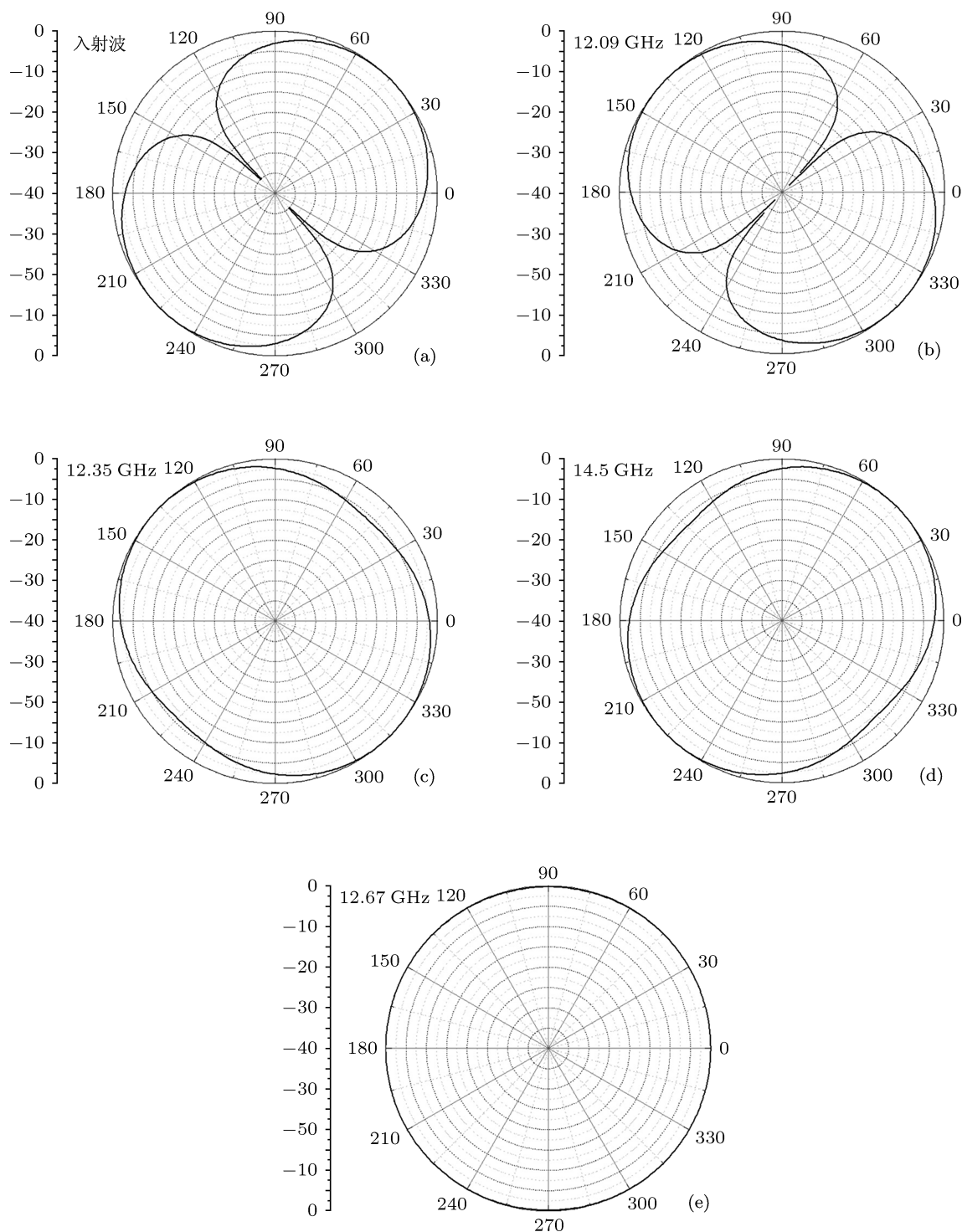


图4 入射波及各代表性频点反射波极化模式图 (a) 入射波; (b) 反射波 (12.09 GHz); (c) 反射波 (12.35 GHz); (d) 反射波 (14.5 GHz); (e) 反射波 (12.67 GHz)

说明反射波在 P1 方向和 P2 方向有相同的能量, 也即说明反射波在 P1 和 P2 方向的电场 E 有相同的幅值. 然后再看图 3(c) 中的相位关系, 在 11.65 GHz 和 12.67 GHz 处, 反射波 P1 分量与 P2 分量的相位差分别为 -90° 和 90° , 由电磁场理论可知, 电场的

两个正交分量幅值相等, 且相位差为 90° (-90°) 的电磁波是圆极化电磁波, 而 -90° 和 90° 的区别在于两种圆极化波的旋向不同, 一个是左旋圆极化波, 一个是右旋圆极化波.

在 11.65 GHz (圆极化转换频点) 到 12.67 GHz

(圆极化转换频点) 之间 (除去线极化转换频点 12.09 GHz), 反射波都是椭圆极化, 因为 $S_{11}^2(\text{P1—P1}) < S_{11}^2(\text{P1—P2})$, 所以椭圆的长轴方向是靠近 P2 方向的, 而在频率低于 11.65 GHz 和频率高于 12.67 GHz 的反射波, 由于 $S_{11}^2(\text{P1—P1}) > S_{11}^2(\text{P1—P2})$ 的, 故椭圆的长轴方向是靠近 P1 方向的.

为了更直观的反应所设计的异向介质结构模型对入射线极化波的调控特性, 模拟计算了入射波和各种反射波的极化模式图. 对以下几个有代表性的频点进行模拟仿真: 12.09 GHz (线变线), 12.35 GHz (线变椭圆), 14.5 GHz (线变椭圆), 12.67 GHz (线变圆). 极化模式图如图 4 所示.

分析图 4, 入射波是极化方向为 45° 的线极化波, 反射波在 12.09 GHz 处转变为了极化方向为 135° 的线极化波; 在 12.35 GHz 和 14.5 GHz 处, 反射波都变成了椭圆极化波, 不同的是前者长轴朝向是 135° , 而后者是 45° ; 在 12.67 GHz 处, 反射波变成了圆极化波. 由于数值计算出的极化模式图结

果和之前的通过 S 参数计算分析出的结果完全一致, 从而进一步证实了本文设计的人工异向介质确实有改变反射电磁波极化状态的作用.

5 结论

本文设计了一种能够控制入射电磁波极化状态的基于开口谐振环结构的人工异向介质. 实验测试结果表明, 在不同的频率范围, 该异向介质可以将入射的线极化波变成与之极化方向垂直的线极化波, 圆极化波, 以及椭圆极化波, 这与数值模拟的结果比较符合. 进一步的数值分析结果表明, 基板无损情况下的该异向介质在不同的频段分别可以 100% 地将入射线极化波转变为与之垂直的线极化波和圆极化波. 因此, 本文设计的异向介质具有结构简单, 厚度薄, 工艺制备起来比较容易等特点, 将在雷达隐身方面具有潜在的应用前景.

- [1] Wang B D 1999 *Chinese Journal of Radio Science* **14** 0347 (in Chinese) [王被德 1999 电波科学学报 **14** 0347]
- [2] Born Max, Wolf Emil 1999 *Principles of Optics* (Cambridge: Cambridge University Press) p53
- [3] Eugene Hecht 2002 *Optics* (New York: Addison Wesley) p78
- [4] Pendry J B, Schurig D, Smith D R 2006 *Science* **312** 1780
- [5] Smith D R, Padilla W J, Vier C C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [6] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K 2004 *Science* **305** 788
- [7] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [8] Tang S W, Zhu W R, Zhao X P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3320 (in Chinese) [汤世伟, 朱卫仁, 赵晓鹏 2009 物理学报 **58** 3320]
- [9] Cheng Y Z, Xiao T, Yang H L, Xiao B X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 0536 (in Chinese) [程用志, 肖婷, 杨河林, 肖柏勋 2010 物理学报 **59** 0536]
- [10] Hao J M, Yuan Y, Ran L X, Jiang T, Kong J A, Chan C T, Zhou L 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 063908
- [11] Chin J Y, Lu M Z, Cui T J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 251903
- [12] Anthony G, George V E 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 5930
- [13] Ziolkowski R W 2001 *Phys. Rev. E* **63** 046604
- [14] Ye Y Q, He S L 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 203501
- [15] Li T Q, Liu H, Li T, Wang S M, Wang F M, Wu R X, Chen P, Zhu S N, Zhang X 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 131111

Study on measurement and simulation of manipulating electromagnetic wave polarization by metamaterials*

Chen Long-Tian Cheng Yong-Zhi Nie Yan[†] Gong Rong-Zhou

(*Department of Electronic Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

(Received 30 August 2011; revised manuscript received 23 September 2011)

Abstract

The polarization properties of electromagnetic wave have been gradually applied to the fields of communications, navigation and radar. In order to effectively control the polarization state of electromagnetic waves, a kind of metamaterial based on split-ring resonators(SRRs) is designed in this paper. The metamaterial is composed of SRRs, dielectric substrate and metal backplane, and it can completely convert incident linear-polarized waves into circular-polarized waves, elliptic-polarized waves and linear-polarized waves whose polarization is perpendicular to the incident wave. Our design is demonstrated by microwave experiments and simulations, and the experimental result and the simulation result are in good agreement with each other.

Keywords: metamaterial, polarization, split-ring resonator

PACS: 42.25.Bs, 42.25.Ja, 78.20.Bh, 78.20.Ci

* Project supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20090142110004).

[†] E-mail: nieyan@mail.hust.edu.cn