

大学生园地

利用电磁左手材料调控电磁波的偏振反转

查 扬, 汪人甫, 俞 熹

(复旦大学 物理系, 上海 200433)

摘要:通过各向异性的电磁介质板的反射, 电磁波的偏振状态可以被任意地调节, 在特定的条件下甚至可以完全反转. 本文在微波测量系统的基础上设计了一个测量偏振反转的实验, 在特定的频率观测到了偏振反转的极大值. 另外还提出了一个提高偏振反转率的方案并通过实验验证了其有效性. 通过转移矩阵方法计算得到了偏振反转的理论结果并与实验结果进行了对比.

关键词:电磁左手材料; 各向异性; 偏振反转

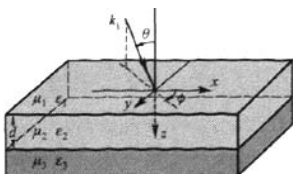
中图分类号: O 441.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0712(2009)06-0043-04

偏振是电磁波的一个很重要的性质, 人们总希望可以完全调控电磁波的偏振状态. 近年来出现的电磁左手材料, 是一种人工制备的具有负介电常量^[1]和磁导率的新材料, 具有许多奇异的电磁特性, 如任意相位反射、反多普勒效应、完全光子带隙等^[2]. 最新的研究已经证明^[3], 经过一块具有各向异性参数的左手材料板的反射, 电磁波偏振状态可以被任意地调节, 在一定条件下转到与原先完全垂直的方向, 称为偏振反转. 本文在微波测量实验系统的基础上, 自行设计并搭建了一个测量电磁波偏振转变的实验装置, 利用已有的各向异性左手介质板样品测量了微波波段电磁波的偏振反转率; 然后又针对具体的实验条件, 提出了一个对波源进行偏振化的改进方案, 提高了电

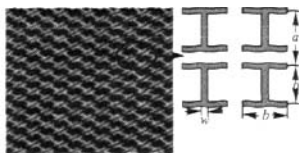
磁波在非远场的偏振反转率.

1 偏振反转的理论模型

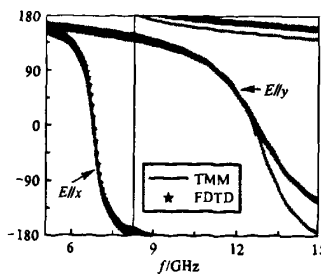
偏振反转的物理原因我们可以通过一个简单的模型来理解^[4]. 本实验中采用的各向异性的介质板可以看作一块有等效对角磁导率张量 μ 的介质, 其 $\mu_{xx} = 1 + 70 / (12.71^2 - f^2)$, $\mu_{yy} = 1 + 22 / (6.8^2 - f^2)$ (共振频率分别为 12.71 GHz、6.8 GHz), $\mu_{zz} = 1, \epsilon = 1$. 设一束线偏振的电磁波入射到各向异性介质板表面, 如图 1(a), 图 1(b) 是该介质板的表面结构示意图. 入射电磁波的电场分解为沿 x, y 轴的两个分量, $E_i = E_x e_x + E_y e_y$, 由于 μ 的各向异性, x, y 方向的反射相位不同, 当满足一定条件时 $|\Delta\phi_x - \Delta\phi_y| = \pi$, 反射波为 $E_r = E_x e_x - E_y e_y$, 特别地, 当 $E_x =$



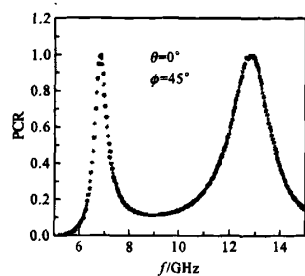
(a) 左手介质板和入射波的几何模型



(b) 反射板的表面结构



(c) 电磁波在x和y方向上的反射相位



(d) 利用TMM计算的偏振反转率和频率的关系

图 1

投稿日期: 2008-07-04; 修回日期: 2008-12-20

基金项目: 国家基础科学人才培养基金项目资助 (J0730310).

作者简介: 查扬 (1987-), 男, 复旦大学物理系在读本科生.

$E_y = E_0$ 时, 反射波的偏振方向就与入射波完全垂直, 电磁波的偏振被完全反转. 我们利用 FDTD 模拟 (FDTD 计算是利用英国的 Vector Field 公司的 Concerto 4.0 完成的) 和转移矩阵方法 (TMM) 计算得出了 x, y 两个方向上的反射相位与频率的关系, 并计算了相应的偏振反转率 (polarization conversion ratio, PCR). 由图 1(c)、(d) 可以看到, 在对应共振频率处, $|\Delta\phi_x - \Delta\phi_y| = \pi$, 相应的 PCR 达到了最大值.

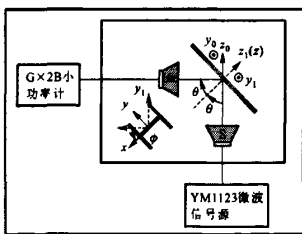
2 实验装置的设计和搭建

2.1 微波测量仪器

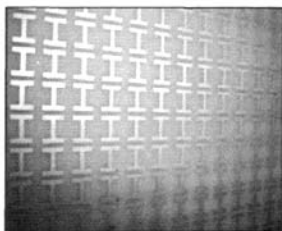
本实验主要利用实验室已有的微波信号源和测量装置^[5] 激发和测量电磁波的功率, 在这个基础上观测偏振反转. 用到的主要仪器有 YM1123 微波信号源、GX2B 小功率计、YM3892 选频放大器以及喇叭形天线. 另外辅助测量的器材有 3 cm 标准矩形波导、波导架、铁架台、扭波导等.

2.2 搭建测量偏振反转率的装置

本实验是基于波导测量系统的. 所以实验的第一步就是把波导中激发的微波耦合到自由空间中, 得到线偏振的平面波. 我们利用金属的喇叭型天线, 接在 YM1123 微波源的激发端, 将波导模式转换为定向平面波模式, 经过各向异性板的反射后, 在接收端用另一个一样的天线将接收到的电磁波导入 GX2B 小功率计进行测量. 实验示意图如图 2(a), 其中 θ 和 ϕ 由固定在水平实验台上和反射板背面的极坐标纸测得. 图 2(b) 是介质板的表面结构图.



(a) 实验装置示意图



(b) 各向异性左手介质板表面的金属“H”型结构

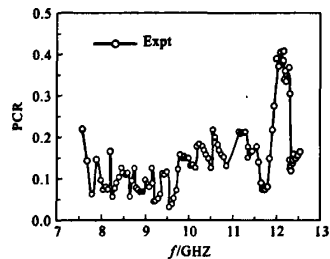
第二步是测量反射波中的偏振反转部分. 利用喇叭型天线的偏振性质 (这种天线只能接收电场与喇叭短边平行的近似线偏振波), 我们将接收端的喇叭旋转 90° , 使其探测的本征模式与源发出的模式处在正交的状态下. 实验上可以看到, 对于普通的金属板反射, 两个喇叭平行和垂直放置, 接收到的信号功率之比在 3 个量级以上, 说明喇叭具有良好的线偏振性, 可以用来测量偏振反转的波的功率.

第三步是通过测到的反射波功率得到偏振反转率 PCR. 在本实验中用的 YM1123 信号源发射功率随频率有很大的变化, 在几个频带中还出现断点 (输出功率突然降到很小的数值), 这给实验带来了很大的困难. 考虑到这种输出的不稳定, 我们首先测量在金属板上反射波的功率与频率的关系, 作为 p_{ref} , 然后在不改变两个天线与板的距离和入射角度的情况下, 将接收端天线转 90° 以接收被反转的波, 再测一次反射信号与频率的关系记为 p_{sp} , 最后由理论公式 $\text{PCR} = p_{\text{sp}}/p_{\text{ref}}$ 得出结果.

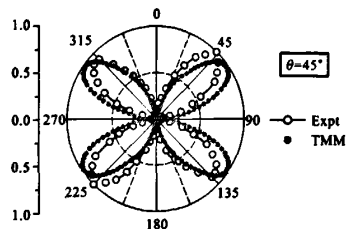
3 实验结果和讨论

3.1 偏振反转率 (PCR) 与频率的关系

由于实验上不可能将源和接收端两个天线重合实现正入射, 我们取对称性比较高的参数 $\theta = \phi = 45^\circ$, 两个喇叭距离板 10 cm, 如图 2(a). 固定喇叭的位置, 改变频率分别测未反转的输出功率和反转信号功率, 频率范围 (7.4 ~ 12.5 GHz) 计算得到 PCR 如图 3(a).



(a) 根据实验数据计算得到的 PCR 与频率的关系



(b) 12.25 GHz 时归一化的 PCR 和 ϕ 的关系

图 3

从实验结果看,虽然实验曲线与理论值有一定的差距,但是可以看到,在 12 ~ 12.5 GHz 频段,出现了明显的偏振反转的峰值,这和理论预言的 12.71 GHz 较为符合. 实验测得的反转峰比理论计算的尖锐很多,有明显的起伏,这个现象可能的原因是:在 11.5 GHz 附近和 YM1123 的频率上限 12.5 GHz 附近输出功率非常小($p_{in} \leq 50 \mu W$),所以 PCR 有一个剧烈的下降,信号质量不好,加之非常小的信号受杂信号干扰很大,影响了实验结果.

3.2 偏振反转率与入射波偏振方向和 x 轴的相对角度 ϕ 的关系

为了更深入地了解导致偏振反转的物理原因,我们又在 12.25 GHz 处固定频率和入射角 θ , 旋转介质板,改变 ϕ (ϕ 的意义如图 1(a)), 测量了 PCR 与 ϕ 的关系,结果如图 3(b). 可以看到,经过归一化(取最大值为 1)后,PCR 随 ϕ 的变化和理论值符合得比较好,两条图线的峰值有一定的漂移,原因是受源输出频率的限制,这时的频率与共振频率 12.7 GHz 有一定距离,不是完全的偏振反转,因而与实验产生偏差.

另外影响实验结果的因素还有以下几个方面:

1) 由电磁理论可知,天线辐射的波在远场下可以近似看作是平面线偏振波,而本实验中使用的是金属喇叭天线而不是线偏振性好的电介质喇叭作为激发源. 另外由于波源功率的限制,源和探测器不能距离很远,所以入射到反射板上的波不是好的线偏振平面波,而是波导模式和平面波的叠加,所以有一部分即使在共振频率附近也不能够被偏振反转,导致了 PCR 的降低.

2) 波源存在频率漂移:在实验中发现从低到高和从高到低两个不同方向调至某一频率时,测到的反射功率不同,而某一特定频率的反射信号也会随着时间变化,这说明在源内部存在着输出信号的频率漂移,所以显示的频率不一定是实际的频率.

3) 受实验器材的限制,源和天线的角度、位置和 θ, ϕ 以及板的平面都不能严格校准,误差较大,同样也会引起信号的损失和漂移.

4 一个提高偏振反转率的改进方案

4.1 影响 PCR 的重要因素

前面提到,由于远场近似不成立,本实验中喇叭发出的波在反射板上反射时不是好的平面偏振波,这直接影响了测得的 PCR,因为这部分“不好”的波经过介质板反射其偏振没有被反转,对 p_p 没有贡

献,但是它们被金属反射后仍然可以被平行方向的喇叭所接收,也就是说,对 p_{in} 有贡献,所以由 p_p/p_{in} 算出的 PCR 值偏小.

4.2 改进方案

在可见光波段,我们可以利用偏振片来得到线偏振光,偏振片由一条条定向排列的大分子链所构成,其间距比波长小. 当一束光入射时,电场平行于分子链的分量就会引起分子中电子的运动. 由于电子可以在该方向比较自由地移动,并与晶格碰撞消耗能量,其运动产生的辐射会抵消这个方向上的电场,于是产生电场垂直于分子链方向的线偏振光. 我们把这种现象类比到微波波段,发现用一些平行排列的金属丝就可以实现偏振片中分子链的功能,起到对微波偏振化的作用. 于是我们用数根直径 1.5 ~ 2 mm 的铜丝,定向等间距地固定在支架上,形成如图 4 的栅格结构,把它放在喇叭天线的出口处,就制成了一个简易的偏振器. 我们令铜丝平行于喇叭短边方向,可以看到功率计上的示数大幅减小,说明这个喇叭发出的波电场主要平行于短边,这是其本征模式. 当铜丝平行于长边时,看到功率略有减少,证明的确存在一部分其他偏振方向的波,当加上偏振器后这部分波被滤掉.

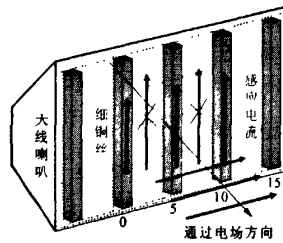
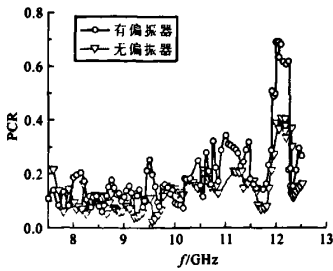


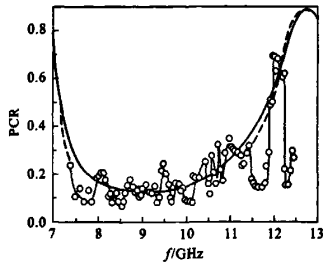
图 4 偏振器原理图. 铜丝长度约 15 cm, 间距 1 cm

4.3 结果及讨论

我们把偏振器以平行于喇叭长边放置,按前面的方法再测一次 PCR,得到图 5(a),图中黑实线是加上简易偏振器之后的 PCR,可以看到,偏振化之后的微波偏振反转率有很大的提高,特别是在峰值附近,最大值达到了 0.7 左右,与理论计算的数值相近,证明偏振器起到了相应的作用. 图 5(b) 给出了改进后的 PCR 与理论值的对比,可以看到虽然实验数据的震荡很大,但平均值和趋势与理论相符. 值得注意的是,原先峰值旁边的两个低谷仍然存在,与理论偏差很大,说明产生低谷不是来自电磁波的偏振性不好,而是由输出功率有断点等其他原因引起的,有待进一步改进.



(a) 经偏振化改进后的 PCR 与原先的对比



(b) 改进后的 PCR 和理论值的对比. 图中虚线为预测的曲线

图 5

5 总结

本文中,我们自行设计并搭建了一个测量电磁波

在各向异性左手材料上偏振反转的实验.我们首先从理论上介绍了这种偏振反转发生的物理原因,然后基于微波测量系统搭建了测量偏振转变的实验装置,利用左手介质板样品测量了微波波段电磁波的偏振反转率.另外我们提出一个用“简易偏振器”对波源进行偏振化的方案,利用这个方案提高了电磁波在非远场的偏振反转率,得到了与理论相符的结果.

致谢:本文工作获得了国家基础科学人才培养基金(J0730310)的资助,特此感谢.

参考文献:

- [1] Eugene H. Optics [M]. New York: Addison Wesley, 2002.
- [2] Jackson J D. Classical Electrodynamics [M]. New York: Wiley 1999:306—309.
- [3] Smith D R, et al. A composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. Phys Rev Lett, 2000, 84:4 184.
- [4] Hao Jiaming, et al. Manipulating Electromagnetic Wave Polarizations by Anisotropic Metamaterials [J]. Phys Rev Lett, 2007, 99:063 908.
- [5] Hao Jiaming, Lei Zhou. Electromagnetic wave scatterings by anisotropic metamaterials: Generalized 4×4 transfer-matrix methods [J]. Phys Rev B, 2008, 77:094 201.

Manipulating and measuring polarizations conversion of electromagnetic wave by anisotropic metamaterials


ZHA Yang , WANG Ren-fu, YU Xi

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Reflected from anisotropic metamaterial slab, polarization states of electromagnetic wave can be manipulated with great freedom, and may have complete polarization conversion under certain conditions. In this paper we present our designing and performing of an experiment aimed at measuring the polarization conversion of electromagnetic wave, based on the laboratory's microwave system. We show the result of our experiment as we found considerable polarization conversion at certain frequencies. We also propose a new approach to enhance the polarization conversion ratio (PCR) and have testified it through experiment. Numerical simulations are employed to compare with the experimental result.

Key words: metamaterial; anisotropy; polarization conversion

利用电磁左手材料调控电磁波的偏振反转

作者: [查扬](#), [汪人甫](#), [俞熹](#), [ZHA Yang](#), [WANG Ren-fu](#), [YU Xi](#)
作者单位: [复旦大学物理系, 上海, 200433](#)
刊名: [大学物理](#) 
英文刊名: [COLLEGE PHYSICS](#)
年, 卷(期): 2009, 28(6)
引用次数: 0次

参考文献(5条)

1. [Eugene H Optics](#) 2002
2. [Jaekson J D Classical Electrodynamics](#) 1999
3. [Smith D R A composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity](#) 2000
4. [Hao Jiaming Manipulating Electromagnetic Wave Polarizations by Anisotropic Metamaterials](#) 2007
5. [Has Jiaming. Lei Zhou Electromagnetic wave scatterings by anisotropic metamaterials: Generalized 4 * 4 transfermatrix methods](#) 2008

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_dxwl200906015.aspx

下载时间: 2009年12月9日