

利用电磁左手材料调控电磁波的极化反转

查扬

(复旦大学物理系 上海 200433)

摘要 (Abstract):

通过各向异性的电磁介质板的反射,电磁波的极化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。本文中,我们在微波测量系统的基础上设计了一个测量极化反转的实验,在特定的频率观测到了极化反转的极大值。另外我们还提出了一个提高极化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(TMM)和FDTD模拟计算得到了极化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 极化反转

(一) 引言(Introduction)

极化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极化状态。传统的调控极化的方法有:光栅(偏振片)、双折射晶体,以及布儒斯特效应等^{1,2}。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数和磁导率的新型材料,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³。最新的研究已经证明⁴,经过一块具有各向异性参数的左手材料板的反射,电磁波极化状态可以被任意地调节,在一定条件转到与原先完全垂直的方向,称为极化反转。本文首先从理论上解释发生这种极化反转的物理原因,然后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极化转变的实验装置,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极化反转率,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极化反转率。

(二) 极化反转的理论模型(Theoretical Part)

极化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 $\vec{\mu}$ 的介质, $\mu_{xx}=1+70/(12.71^2-f^2)$ $\mu_{yy}=1+22/(6.8^2-f^2)$ 。共振频率分别为12.71GHz,6.8GHz。 $\mu_{zz}=1$, $\epsilon=1$ 。设一束线极化的电磁波入射到各向异性介质板表面,如图Fig1(a),其电场分解为沿x,y轴的两个分量, $\vec{E}_m=E_x\vec{e}_x+E_y\vec{e}_y$,由于 $\vec{\mu}$ 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 $\vec{E}_r=E_x\vec{e}_x-E_y\vec{e}_y$,特别地,当 $E_x=E_y=E_0$

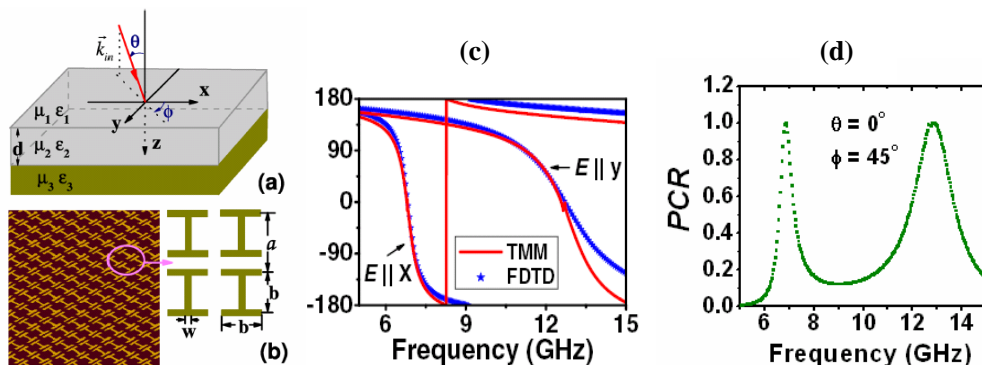


Fig1(a)左手介质板和入射波的几何模型(b)反射板的表面结构,黄色为金属,棕色为介质。

(c)电磁波在x和y方向上的反射相位。(d)利用TMM计算的极化反转率和频率的关系

时，反射波的极化方向就与入射波完全垂直，电磁波的极化被完全反转。我们利用 FDTD 模拟⁵和转移矩阵方法（TMM）计算⁶得出了 x 、 y 两个方向上的反射相位与频率的关系，并计算了相应的极化反转率（polarization conversion ratio, PCR），如图 Fig1(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。

(三) 实验装置的设计和搭建(Experimental Realization)

1. 微波测量仪器

本实验主要是利用实验室已有的微波信号源和测量装置⁷激发以及测量电磁波的功率，在这个基础上观测极化反转。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 3cm 标准矩形波导、波导架、铁架台、扭波导等。

2. 搭建测量极化反转率的装置

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来，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，将波导模式转换成为定向平面波模式，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 Fig2(a)

(b) ,(c)，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。

第二个问题是怎样测量反射波中的极化反转部分，利用喇叭型天线的偏振性质——即这种天线只能接收电场与喇叭短边平行的近似线极化波，我们将接收端的喇叭旋转 90 度，

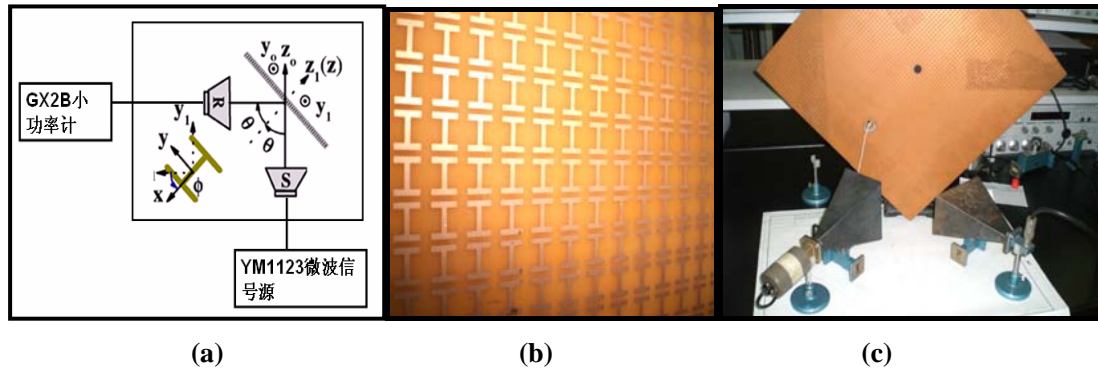


Fig2: (a)实验装置示意图，S 和 R 分别是两个喇叭形天线，作为源和探测器。入射角为 θ ，天线发出的波极化方向在 xy 面内，与 x 轴夹角为 ϕ 。(b)各向异性左手介质板表面的金属“H”型结构(c) 实验装置实物照片

片，板可旋转地固定在铁架台上，板面与桌面垂直。

使其探测的本征模式与源发出的模式处在正交的状态上。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极化性，可以用来测量极化反转的波的功率。

第三个问题是通过测到的反射波功率得到极化反转率 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了断点（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。我们考虑到这种输出的不稳定，首先测量在金属板上反射波的功率与频率的关系，作为 P_{tot} ，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 度以接收被反转的波，再测一次反射信号与频率的关系记为

P_{sp} ，则由理论公式可知 $PCR = P_{sp} / P_{tot}$ ，即可得出结果。

(四) 实验结果和讨论 (Experimental Result and Discussion)

1. 极化反转率 (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 10cm，如图 Fig2c，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 -12.5GHz) 计算得到 PCR 如图 Fig3a:

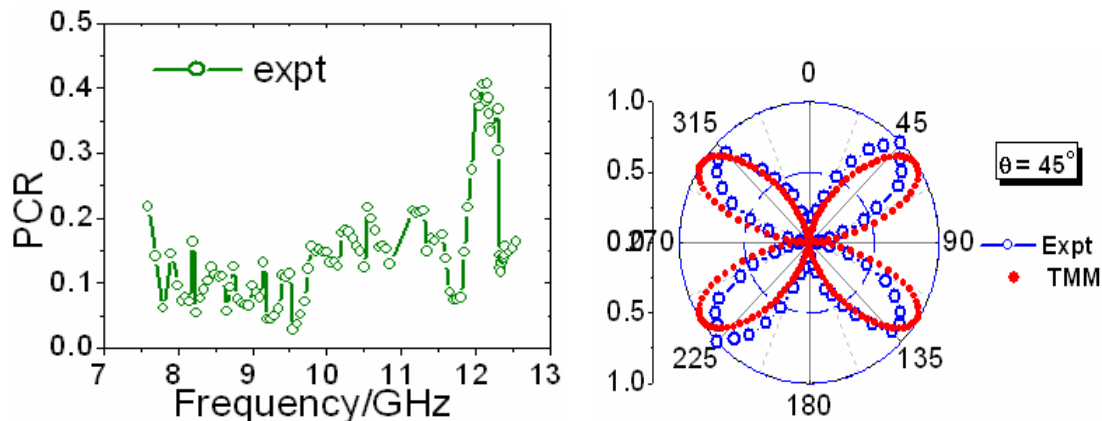


Fig3: (a)根据实验数据计算得到的 PCR 与频率的关系 (b)12.25GHz 时归一化的 PCR 和 ϕ 的关系

从实验结果看，虽然实验曲线与理论值有一定的差距，但是我们可以看到，在 12-12.5GHz 频段，测到了明显的极化反转的峰值，这和理论预言的 12.71GHz 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，对于这个现象我认为原因是：在 11.5GHz 附近和 YM1123 的频率上限 12.5GHz 附近输出功率非常小 ($P_{tot} \leq 50\mu w$)，所以 PCR 有一个剧烈的下降，信号质量可能不好，加之非常小的信号受杂信号干扰很大，影响了实验结果。

2. PCR 与入射波极化方向和 x 轴的相对角度 ϕ 的关系

为了更深入地了解导致极化反转的物理原因，我们又在 12.25GHz 处固定频率和入射角 θ ，旋转介质板，改变 ϕ (ϕ 的意义如 Fig1a)，测量了 PCR 与 ϕ 的关系。结果如 Fig3b。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的比较好，两条图线的峰值有一定的漂移，我认为这里的原因是：转移矩阵理论计算是基于有效介质模型的，当频率较高时，结构单元相对波长不是一个小量，这样反射板就不能作为均匀介质来处理，以至于与实验产生偏差。

另外我认为影响实验结果的因素还有这么几方面：

(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，因为没有吸收墙的作用，远场微弱的信号很容易被杂信号所淹没。在本实验中，两个喇叭距离反射板只有 10cm，而这个波段的波长为 2.5-4.5cm，远场条

件不能成立，所以我认为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极化反转，导致了 PCR 的降低。

(2) 波源存在频率漂移：在实验中我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，同样也会因起信号的损失和漂移。

(五) 一个提高极化反转率的改进方案 (An Approach to enhance PCR)

1. 影响 PCR 的重要因素

前面提到，由于远场近似不成立，本实验中天线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极化没有被反转，对 p_{sp} 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_{tot} 有贡献，所以由 $PCR = p_{sp} / p_{tot}$ 可知，这部分能量直接导致了 PCR 的降低。

2. 改进方案

在可见光波段，我们可以利用偏振片来得到线极化的光，偏振片是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极化光，原理如图 Fig 4 (a)。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 1.5-2mm 的铜丝，定向等间距地固定在支架上，形成如图 Fig4(b)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。我们另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，当我们另铜丝平行于长边时，看到功率略有减少，证明的确存在一部分其他极化方向的波，当加上偏振器后这部分波被滤掉。

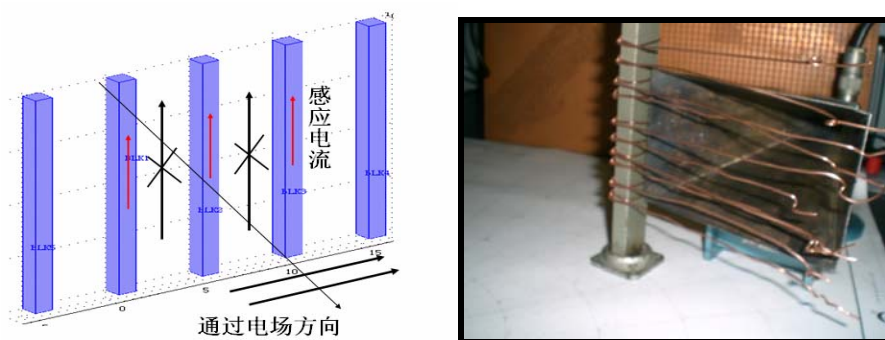


Fig 4 (a)偏振器原理图(b) 简易偏振器照片，图中铜丝长度约 15cm，间距 1cm

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 Fig5(a)，图中绿线是加上简易偏振器之后的 PCR，可以看到，偏振化之后的微波极化反转率有很大的

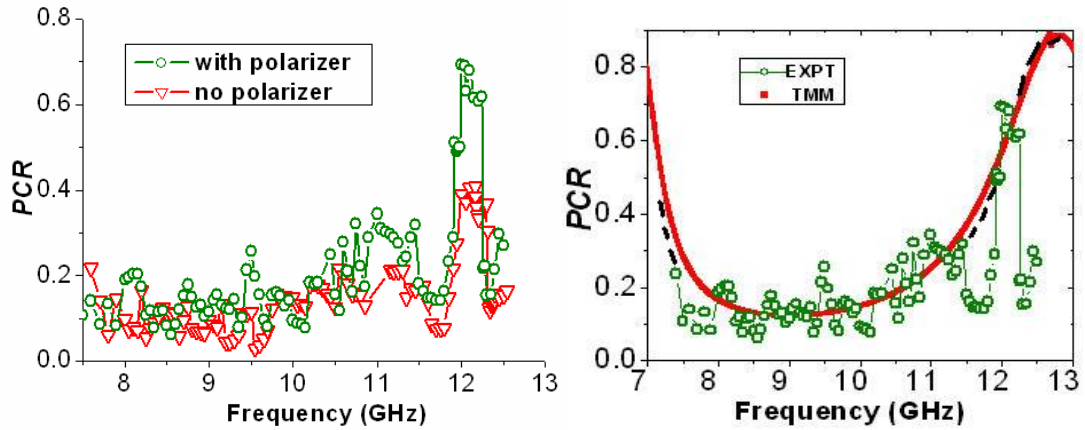


Fig5(a) 偏振化改进后的 PCR 与原先的对比.(b) 偏振化的 PCR 与理论的对比，黑线是估计值提高，特别是在峰值附近，最大值达到了 0.7 左右，与理论计算的数值相近，证明偏振器起到了相应的作用。图 Fig6(b)给出了改进后的 PCR 与理论值的对比，可以看到虽然实验数据的震荡很大，但平均值和趋势与理论相符。值得注意的是，原先峰值旁边的两个低谷仍然存在，与理论偏差很大，说明产生低谷的原因不是电磁波的极化性不好，而是另有原因，有待进一步发掘。

(六) 总结(Conclusion)

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极化反转的实验。我们首先从理论上介绍了这种极化反转发生的物理原因，然后基于微波测量系统搭建了测量极化转变的实验装置，利用左手介质板样品测量了微波波段电磁波的极化反转率，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极化反转率，得到了与理论相符的结果。

(七) 致谢 (Acknowledgement)

感谢复旦大学物理实验中心王煜老师、汪人甫老师和余熹老师对本文中实验提出的宝贵意见

参考文献 (Reference)

- [1] Eugene Hecht, *Optics* (Addison Wesley, New York, 2002).
- [2] J.D.Jackson, *Classical Electrodynamics* (Wiley, New York.1999).
- [3] D. R. Smith *et al.*, *Phys.Rev.Lett.*84.4184 (2000)
- [4] Jiaming Hao *et al* *Phys.Rev.Lett.*99.063908 (2007)
- [5] FDTD 计算是利用英国的 Vector Field 公司的 Concerto4.0 完成的
- [6] Jiaming Hao and Lei Zhou, *Phys. Rev. B* 77.094201 (2008)
- [7] 《近代物理实验补充材料》复旦大学物理实验教学中心.上海.2008

Manipulating and Measuring Polarizations Conversion of Electromagnetic wave by Anisotropic Metamaterials

Yang. Zha

(Department of physics, Fudan University, 200433 Shanghai)

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 proposed 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
