

谐振环左手材料设计参数对太赫兹传输的影响

姚建铨^{1,2}, 杨鹏飞^{1,2}, 邢丕彬^{1,2}, 邱志刚^{1,2}

(1. 天津大学激光与光电子研究所, 天津大学精仪学院, 天津 300072; 2. 光电信息技术教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要:左手材料(LHM)的出现,为新型材料的探究和应用开辟了一个全新的领域。电磁波在左手材料中的传播特性已经被许多研究工作者广泛探索并得到了许多新结果,与此同时,太赫兹由于其独特性质也成为近年来研究的热点。归类总结了太赫兹波在典型LHM材料中的传输,并通过比较太赫兹波在不同设计的LHM中的传输,得出在LHM设计中,周期、分形、基板材料等参数对太赫兹传输的影响,这些传输特性在太赫兹波器件的制备方面有很大的应用前景。

关键词:太赫兹;左手材料;谐振环;传输

中图分类号: O441 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.08.001

Impact of different parameters on the transmission of THz waves in LHM

YAO Jian-quan^{1,2}, YANG Peng-fei^{1,2}, BING Pi-bin^{1,2}, DI Zhi-gang^{1,2}

(1. The Institute of Laser & Optoelectronics, The College of Precision Instruments and Opto-Electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract: Left-handed materials (LHM) explore a new field for research and application of new materials. Electromagnetic wave propagation in left-handed material have been extensively studied by many researchers and there have been many new results. As the research technology develops and application requirement increases, THz wave transmission property of the LHM attracts more and more attention. This article summarizes the THz transmission characteristics in typical transmission LHM materials. By comparing different designs, we get the influence of different structure parameters, such as periodic, fractal, substrate material. Explanations are given.

Key words: THz; left-hand-material; resonance ring; transmission

1 引言

自然界存在的材料的电磁响应范围只占理论上可能的范围的一小部分。这个有限的范围可以通过人造材料的使用而得以扩展。这种材料就是左手材料,也叫超材料。这种材料是在常规材料中人为的引进周期排列的金属线以及金属谐振环,使之具有了常规材料所不具有的特殊的电磁特性。左手材料为1968年由俄国物理学家 v. G. Veselago 首次预言,当一种材料的 μ 与 ε 同时为负数时,电磁波将逆于

波矢方向传播,并可表现出一些奇异的电磁特性^[1]。电磁波在这种材料中传播时,其电场、磁场、传播方向遵循左手法则,因而也称左手材料(left handed material, LHM)。虽然这种材料的构想很有趣,但由于自然界中难以找到介电常数和磁导率同

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(No. 2007CB310403);“973”计划项目资助。

作者简介: 姚建铨(1939-),男,中科院院士,教授,主要从事激光与非线性光学频率变换技术的研究。

收稿日期: 2011-04-13

时为负数的材料,所以他的工作在很长一段时间里并没有引起人们的重视。1996年,英国物理学家 B. Pendry 等人提出用周期性排列的金属丝和金属谐振器可以在微波波段产生负等效介电常数和负等效磁导率以来^[2-3],关于材料的负等效介电常数、负等效磁导率及由此产生的负折射率问题的研究及证实重新引起人们极大的关注,特别是 2001 年美国 (Science) 杂志发表了实验证实负折射率材料存在的文章后^[4],国际学术界关于此问题的理论和实验研究十分活跃。目前,电磁波在左手材料中的传播特性已经被许多研究工作者广泛探索并得到了许多新结果,在新型材料的探究和应用上开辟了一个全新的领域。

太赫兹 (terahertz, THz) 辐射通常是指频率在 0.1 ~ 10 THz (波长 30 μm ~ 3 mm) 之间的电磁波,其波段位于微波和红外光之间,属于远红外波段。早在 20 世纪初,科学家就对该波段产生了浓厚的兴趣。1974 年,“Terahertz”一词首次由弗莱明 (Fleming) 提出,用以描述迈克尔逊干涉仪的光谱线频率范围。但在过去相当长的时间里,由于缺乏有效的产生和检测方法,人们对于该波段电磁辐射性质的了解非常有限,以至于该波段被称为电磁波谱上最后一块未开发的前沿,即所谓“太赫兹空白 (THz Gap)”。近年来,固态振荡器、量子级联激光器、自由电子激光器和超快激光技术的迅速发展为太赫兹脉冲的产生提供了稳定、可靠的激发光源。利用超快激光技术发展出来的太赫兹时域光谱系统为太赫兹波研究提供了有效手段,因此 20 世纪末太赫兹波段的研究取得了很大进展。尽管目前太赫兹波科学技术还尚未成熟,但其重要的理论研究价值和广泛的应用前景已经引起学术界的广泛关注和极大兴趣。太赫兹波段是电磁波谱中唯一尚未完全开发的频段,对于该波段的研究已成为 21 世纪科学研究最前沿的领域之一。

本文归类总结了太赫兹波在典型 LHM 材料中的传输,并通过比较太赫兹波在不同设计的 LHM 中的传输,得出在 LHM 设计中,周期、分形、基板材料等参数对太赫兹传输的影响。相信,随着技术的发展以及潜在应用的需求,太赫兹与 LHM 两门新兴学科的综合研究与应用也将日益得到关注。

2 实验设备装置介绍

太赫兹时域光谱技术 (THz-TDS) 是 20 世纪 80 年代由 AT & T, Bell 实验室和 IBM 公司的 T. J. Watson 研究中心发展起来的^[5-6],它是基于利用飞秒激

光技术获得的宽波段太赫兹脉冲。这种脉冲是单周期的电磁辐射脉冲,周期小于 1 ps,频谱范围从 0.1 GHz ~ 5 THz。典型的太赫兹时域光谱实验系统主要有超快脉冲激光器、太赫兹发射元件、太赫兹探测元件和时间延迟控制系统组成,如图 1 所示。太赫兹时域光谱系统根据探测样品方式的不同可分为:透射系统和反射系统,但是这两种系统的工作原理完全相同,即飞秒激光脉冲由分束器分为两束光,一束作为抽运光,用于激发太赫兹发射元件产生超短太赫兹脉冲,另一束作为探测光,用于探测太赫兹脉冲的瞬时电场振幅,通过扫描探测激光和太赫兹脉冲相对时间延迟得到太赫兹脉冲电场强度随时间变化波形。太赫兹时域电场波形包含有太赫兹脉冲的强度、相位和时间等完整信息,通过傅里叶变换可同时得到被测样品的吸收和色散光谱。这种技术探测到的太赫兹脉冲峰值功率很高,脉宽在皮秒量级,能方便地进行时间分辨研究,同时,通过对测量频谱的分析和处理,还可以获得物质的折射率、介电常数、吸收系数和载流子浓度等参数。

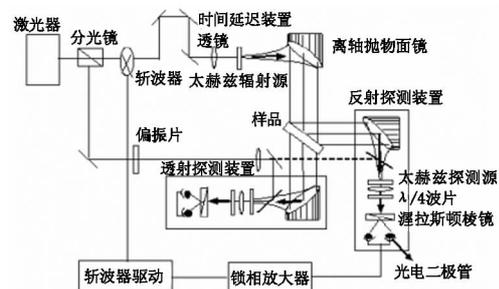


图 1 典型的太赫兹时域光谱示意图

虽然太赫兹时域光谱技术还不成熟,但是它具有相干探测方法、较高的时间分辨率和灵敏度,为人们展现了一个全新的光谱学研究视角,也给光谱学研究者提供了新的机遇。太赫兹时域光谱技术将在化学基础研究、材料科学、生物学、医学疾病诊断以及军事等许多领域展现出巨大的应用潜力,并且随着研究的不断深入,该技术与多种学科之间的交叉将会更深入更广泛。

3 不同参数影响

3.1 环型以及周期密度的影响^[7]

实验选用方形和圆形 2 种环结构设计来确定 SRR 形状以及排列周期对太赫兹传输的影响。SRRs 环材料为铝,厚度为 200 nm,使用光刻工艺将其制作在厚度为 0.64 mm,电阻率为 20 Ω/cm 的 p 型参杂硅片上。

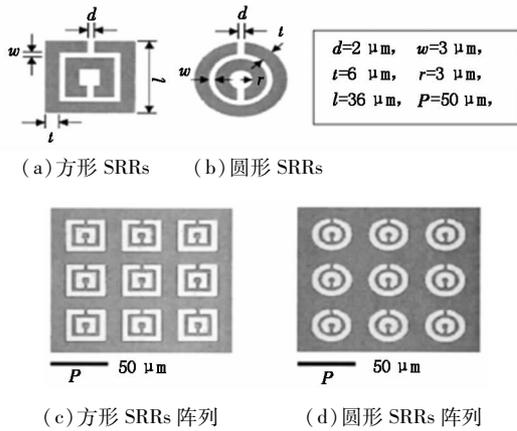


图2 两种常用的左手材料及其单元结构

试验过程分为2个步骤:①取相同的分布周期 P (P 为相邻2谐振环中心间距)的两种环结构样品,分别测量其太赫兹传输曲线,通过比较两种环结构的太赫兹传输曲线,得出环形状对太赫兹传输的影响;②对于每一种环结构形状,改变不同环排列周期,比较太赫兹传输曲线,得出谐振环分布周期对太赫兹传输的影响,如图3所示。

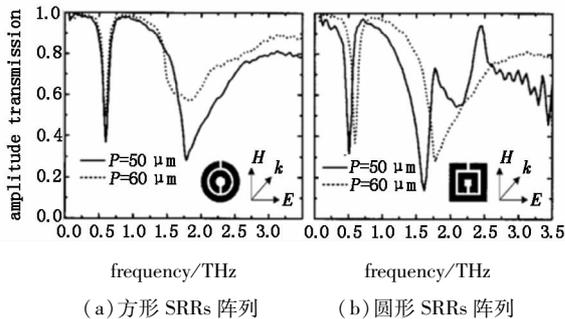


图3 不同周期参数下圆形 SRR 与方形 SRR 传输曲线

对比2种环型的传输谱线,可以得出:

(1)两种结构都在0.5 THz,1.6 THz分别出现了1个共振频率。

(2)圆形 SRRs 的共振频率位置较方形高,主要是由于同排列周期的圆形 SRR 比方形的 SRR 所占的面积更小,共振频率的位置与 SRR 所占面积的开方成反比, $\omega_m \propto 1/\sqrt{A}$ 。

(3)SRR 排列周期影响着 LHM 对太赫兹波的吸收系数,排列越紧密,LHM 对太赫兹波的吸收越大。

(4)与参考文献[8]所作的预想一样,处于0.58 THz 的共振频率位置没有随着 P 的变发生太大改变,说明此共振频率的位置仅与结构自身的参数有关,不受传播模式的影响。

(5)在方形环中,周期的变化对共振频率位置的影响较明显:共振频率的位置随着 SRR 排列密度

的减小(即 P 的增大)而向高频方向移动,说明此位置不仅与传播模式有关,同时也受结构自身周期参数的影响。由此,在1.5 THz 附近,通过改变不同 SRRs 周期将分别得到对应不同频率的共振。基于此性质,就可以使用不同周期 P 的形环结构 LHM 实现对某一特定频率的太赫兹波滤波。

4 分形的影响^[9]

科赫曲线又称为雪花曲线,是一种外形像雪花的几何曲线。科赫曲线是 de Rham 曲线的特例,这种曲线的作法是,从一个正三角形开始,把每条边分成三等份,然后以各边的中间长度为底边。分别向外作正三角形,把“底边”线段抹掉,这样就得到一个六角形,它共有12条边。再把每条边三等份,以各中间部分的长度为底边,向外作正三角形后,抹掉底边线段。反复进行这一过程,就会得到一个“雪花”样子的曲线。每进行一次分形,图形的线性长度都会变为分形前一阶段的4/3倍。按照分形趋向,可以将具有此类结构的谐振环结构分为内分形 SRR (ISRR) 以及外分形 SRR (OSRR)。

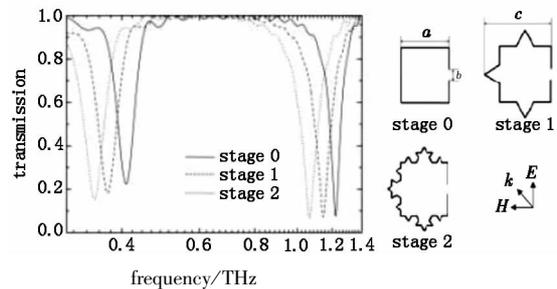


图4 不同阶段的外分形及其传输曲线

图4为 OSRRs 在入射波垂直入射时的模拟波形曲线,比较不同的分形阶段可以发现,每一阶段的分形都同时存在2个共振频率,共振频率源自于 OSRRs 的 LC 振荡^[10],较高频率段的共振频率主要是由于电子振荡产生,即由偶极共振所产生。同时,随着分形的增多,共振频率的位置向较低频率方向发生移动,主要是由于随着分形数的增多,金属环材料所占面积增加而引起,这与本文讨论(1)中所得结果相符合。可以预测,如果再增加分形的数量,共振频率位置将会向更低的频率移动。

同样的,选择了3个不同阶段的内分形 SRR (ISRR),传输曲线如图5所示,与 OSRR 类似,同样出现了高低2个频率位置的共振频率,并且随着分形的增加,共振频率的位置发生红移。不同的是,在共振频率红移的过程中,OSRR 低频段吸收系数逐渐增大,高频段共振频率只是做了位置的移动,吸收系数并没有变化,ISRR 则相反,红移过程中低频段

共振频率只做了位置的移动,高频段共振频率处的吸收系数在峰值红移的过程中越来越小。

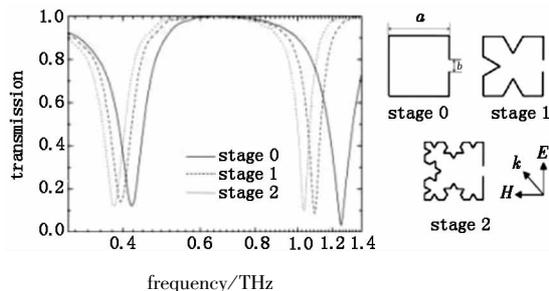
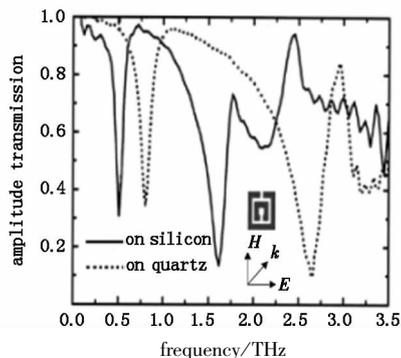


图5 不同阶段的内形及其对应传输曲线

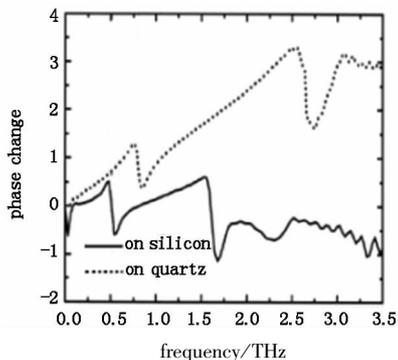
5 基片材料的影响

为了研究基板材料对太赫兹传输存在的影响,实验选择了分别以硅、石英两种常用材料为基板的样品, SRRs 环为正方形,参数同图 2(a) 所示。

图 6 为太赫兹波分别穿过硅以及石英 2 种不同基底的 LHM 后的传输曲线(如图 6(a) 所示)及相应的相位变化图(如图 6(b) 所示)。从两种样品的太赫兹传输曲线比对可以看出,2 种基底的样品具有着相类似的太赫兹传输曲线,同时具有高低 2 个不同频率的共振频率,不同的是石英基底的 2 个共振频率位置频率明显的高于硅基板样品。这种现象的出现主要源自两种材料不同的介电常数,遵守 $\omega_m \propto 1/\sqrt{\epsilon_b}$ [11-13]。



(a) 硅及石英的太赫兹传输曲线



(b) 相位变化

图6 不同基底材料对太赫兹传输的影响

通过对透射光做傅里叶变换,可得出太赫兹通过样本后的相位变化,如图 6(b) 所示。很明显,石英基板的样品所引起的相位变化要高于硅基板样品所引起的相位变化,并且,随着太赫兹频率的升高,两种材料所引起的相位变化差异越来越大。这一性质在未来的太赫兹通信系统的相位调制中将有着潜在的应用。

6 偏振及开闭环影响

这一部分主要探索开闭环对太赫兹在 SRRs 中的传输的影响特性,实验使用了方形带有裂振口的 SRRs(OR),以及方形封闭 SRRs(CR)。SRRs 环的参数如图 1 所示,周期 $P = 60 \mu\text{m}$ 。太赫兹入射波偏振方向如图 7 所示。

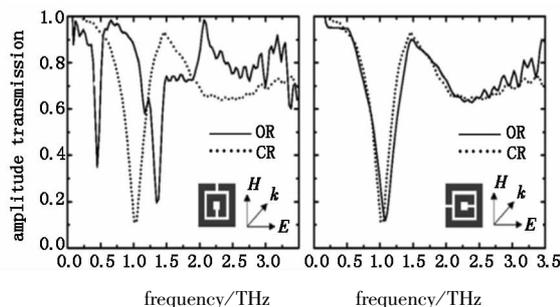


图7 太赫兹波在开/闭环中的传播曲线

可以看出,入射太赫兹波的偏振对其在 CR 样品中传输性质没有影响,这一点可以根据器件几何对称来解释理解。而对于开口环,金属共振环结构具有各向异性特性。狭缝的放置方向决定了太赫兹波在样品内的传播特性:当入射太赫兹偏振与谐振环狭缝垂直时,由于环结构在入射太赫兹偏振方向上的不对称性,出现了 2 个共振频率值;而当太赫兹偏振与狭缝平行时,再一次达到了对称性,因而只出现了一个共振频率,且这一共振频率明显强于非对称情况。这一性质在使用 LHM 判断太赫兹波的偏振方向有着潜在的应用价值。

7 层数的影响

本项主要研究叠加层数对太赫兹传输的影响,太赫兹波以平行/垂直于谐振环狭缝的 2 个不同的偏振方向垂直入射。分别穿过 3 层、5 层、10 层实验板,不同层数的实验板由规格参数完全相同的实验板叠加而成,且不同层 SRRs 上下重合。

对比几组实验的太赫兹传输曲线^[14],可发现随着实验板层数的增加,吸收强度都有所加强,特别是对于入射偏振与开口狭缝垂直时,吸收强度随着层数的增加而急速增加;同时可以观察到,对于垂直的情况,共振频率谱的宽度也随着层数的增加而展宽,

而对于平行的状况,这种展宽效应表现的很不明显,利用一性质来检测太赫兹的偏振相信也是非常可行的。

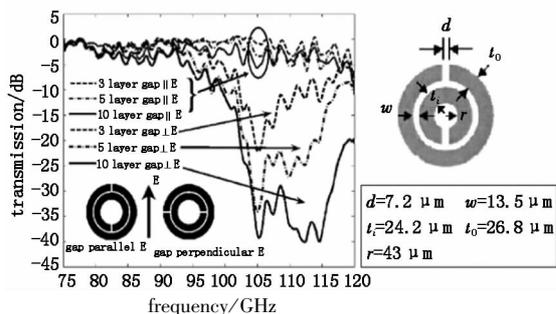


图8 太赫兹不同层数基板中的传输曲线

8 总结

LHM 与太赫兹技术这两门新兴的学科,其特有的性质在各自的领域中吸引着越来越多的关注,有着不可替代的地位与作用。本文归类总结了太赫兹波在典型 LHM 材料中的传输,并通过比较太赫兹波在不同设计的 LHM 中的传输,得出在 LHM 设计中,周期、分形、基板材料等参数对太赫兹传输的影响,这些传输规律在太赫兹波器件的制备方面有很大的应用前景。相信随着科技的进步发展以及应用的需求,这两门学科更进一步的结合将成为必然。

参考文献:

- [1] Veselago V Soy. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Phys. Usp., 1968, 10(4): 509 - 514.
- [2] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures[J]. Phys. Rev. Lett., 1996, 76(25): 4773 - 4776.
- [3] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1999, 47(11): 2075 - 2084.
- [4] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction science[J]. 2001, 292(5514): 77 - 79.
- [5] Auston D H, Smith P R. Generation and detection of millimeter waves by picosecond photoconductivity[J]. Appl. Phys. Lett., 1983, 43(7): 631 - 633.
- [6] Fattering C, Grischkowsky D. Terahertz beams[J]. Appl. Phys., Lett., 1989, 54(6): 490 - 492.
- [7] Abul K Azad, Jianming Dai, Weili Zhang. Transmission properties of terahertz pulses through subwavelength double split-ring resonators[J]. Optics Letters, 2006, 31(5): 634 - 636.
- [8] S Linden, C Enkrich, M Wegener, et al. Magnetic response of metamaterials at 100 Terahertz[J]. Science, 2004, 306(5770): 1351 - 1353.
- [9] S Kubotaa, F Miyamarua b, M W Takeda. The 34th international conference on infrared[C]. Millimeter, and Terahertz Wave, Korea, 2009: 1 - 2.
- [10] W J Padilla, A J Taylor, C Highstrete, et al. Dynamical electric and magnetic metamaterial response at terahertz frequencies[J]. PRL, 2006, 96(10): 107401(1 - 4).
- [11] M Kafesaki, T Koschny, R S Penciu, et al. Left-handed metamaterials; detailed numerical studies of the transmission properties[J]. J. Opt. A Pure Appl. Opt. 2005, 7(2): S12 - S22.
- [12] N Katsarakis, G Konstantnidis, A Kostopoulos, et al. Magnetic response of split-ring resonators in the far-infrared frequency regime[J]. Opt. Lett., 2005, 30(11): 1348 - 1350.
- [13] P Gay Balmaz, O J Martin. Electromagnetic resonances in individual and coupled split-ring resonators[J]. J. Appl. Phys, 2002, 92(5): 2929 - 2936.
- [14] M Gokkavas, K Guven, I Bulu, et al. Experimental demonstration of a left-handed metamaterial operating at 100 GHz[J]. Physical Review B, 2006, 73(19): 193103(1 - 4).