

基于传输线的特异材料*

冯团辉 李宏强 张冶文 陈鸿†

(同济大学波耳固体物理研究所 上海 200092)

摘要 特异材料(metamaterials)是指自然界中不存在的具有奇异电磁特性的人工结构,通常指的是介电常数和磁导率同时为负值的左手材料(left-handed materials). 自从 2002 年利用传输线制备左手材料的思想被提出后,人们对基于传输线的特异材料进行了大量的研究. 文章着重概述了近年来人们所提出的几种典型的传输线特异材料的结构、制备方法、实现左手性的原理以及各自的特点.

关键词 特异材料,左手材料,传输线,微带线,共面波导

Metamaterials based on transmission lines

FENG Tuan-Hui LI Hong-Qiang ZHANG Ye-Wen CHEN Hong†

(Pohl Institute of Solid State Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract Metamaterials are artificial structures exhibiting novel electromagnetic properties but not commonly found in nature, and they are generally known as left-handed materials with simultaneously negative permittivity and permeability. Much progress has been made during the past few years on the development of metamaterials based on the transmission-line mechanism since it was first proposed in 2002. The structure, preparation, principle of operation and properties of several typical transmission-line metamaterials are discussed.

Keywords metamaterials, left-handed materials, transmission lines, microstrip lines, coplanar waveguide

1 引言

特异材料(metamaterials)是指在自然界中不存在的具有奇异电磁特性的人工结构,通常是指介电常数和磁导率同时为负值的左手材料(left-handed materials). 根据其性质,该种材料有时也被称为双负材料(double negative materials)、负折射率材料(negative refractive index materials)、后向波材料(backward wave materials)等. 对特异材料的研究始于 1968 年,前苏联物理学家 Veselago 首次从理论上探讨了介电常数 ϵ 和磁导率 μ 同时为负值的物质的电磁性质,发现当电磁波在这种同时具有 $-\epsilon$ 和 $-\mu$ 的物质中传播时,电场强度 E 、磁场强度 H 与波矢量 k 三者遵守左手螺旋定则,并预言它们将在 Doppler 频移、Cerenkov 辐射、辐射压、Snell 折射等方面具有种种奇特的性质^[1]. 但由于在自然界中不存

在这种介电常数和磁导率同时为负值的物质,特异材料当时并未广泛引起人们的关注. 在该方面的研究工作停滞了近三十年之后,1996 年和 1999 年,英国皇家学院 Pendry 等人相继提出,周期性排列的金属直导线阵列和开口谐振环阵列在微波波段分别能够产生呈现负值的有效介电常数和有效磁导率^[2,3],并在 2000 年指出,利用负折射率材料可以制造出能够实现近场成像,而且能够突破衍射极限限制的超级透镜^[4]. 此后,对特异材料的研究才引起科学界人士浓厚的兴趣. 在 2000 年,美国加州大学圣迭戈分校物理系的 Smith 把金属直导线阵列和开口谐振环阵列结合在一起,制作出了世界上第一

* 国家重点基础研究发展计划(批准号 2001CB6104)、国家自然科学基金(批准号 :10474072, 50277026, 10574099)、上海市科委重点基础研究资助项目

2005-12-06 收到初稿, 2006-03-01 修回

† 通讯联系人. Email : honchenk@online.sh.cn

块介电常数和磁导率同时为负值的人工介电材料^[5]. 随后,又在2001年首次在实验中观察到了负折射现象^[6]. 到2002年, Itoh 和 Eleftheriads 等人又提出了利用传输线模型制作特异材料的思想^[7,8]. 与金属直导线阵列和开口谐振环阵列方法比较,基于传输线的特异材料制作方法与现有的平面工艺兼容,材料参数易于调节. 由于这类特异材料将在微波通讯领域有着潜在的广阔的应用前景,人们近几年在该方面进行了大量的研究. 本文着重概述了近年来人们所提出的几种典型的传输线特异材料的结构、制备方法、实现左手性的原理以及各自的特点.

目前,人们利用传输线所制作的特异材料种类很多,根据所使用的传输线种类的不同,本文把它们分为两大类:基于微带线的特异材料和基于共面波导的特异材料. 下面分别对这两类传输线特异材料进行详细介绍.

2 基于微带线的特异材料

根据其结构特点,以微带线为载体制备的特异材料可以分为如下几种情况.

2.1 通过加载集总电容和集总电感制备的特异材料

在微带线上加载集总电容和集总电感形成的一维特异材料的基本单元的等效电路如图 1(a)所示. 当基本单元的长度 d 远小于微波的波长时,由基本单元串联构成的一维周期性网络的色散关系为^[7]

$$\beta \approx \pm \omega \sqrt{\left(L_0 - \frac{1}{\omega^2 C d} \right) \left(C_0 - \frac{1}{\omega^2 L d} \right)}, \quad (1)$$

因此,这种周期性结构的有效介电常数和有效磁导率为

$$\epsilon_{\text{eff}} \approx C_0 - \frac{1}{\omega^2 L d}, \quad \mu_{\text{eff}} \approx L_0 - \frac{1}{\omega^2 C d}. \quad (2)$$

在频率较低的情况下,主要由加载的电容电感决定这种周期性结构的有效介电常数和有效磁导率,传输线本身的分布电容 C_0 和分布电感 L_0 作用很小,可以忽略. 因此有

$$\epsilon_{\text{eff}} \approx -\frac{1}{\omega^2 L d}, \quad \mu_{\text{eff}} \approx -\frac{1}{\omega^2 C d}. \quad (3)$$

此时的相移常数以及相速度、群速度分别为

$$\beta \approx -\frac{1}{\omega \sqrt{L C d}}, \quad v_p \approx -\omega^2 \sqrt{L C d}, \quad v_g \approx \omega^2 \sqrt{L C d}. \quad (4)$$

可见,图 1(a)所示结构可以在一定的频率范围内实

现同时为负值的介电常数和磁导率,获得相速度和群速度相反的左手性通带. 图 1(b)是我们实验室制备的一维特异材料的纵切面结构示意图^[9]. 它是将贴片电容焊接在各段传输线之间,并在各段传输线中央打孔,把贴片电感嵌入到通孔当中,上侧与传输线相连,下侧与接地板相接. 图 2(a)是我们实验室制作的具有不同周期数的特异材料的传输系数 S_{21} 的幅值随频率的变化曲线,其中 $C = 2.0 \text{ pF}$, $L = 2.2 \text{ nH}$, 每个单元长 7 mm , 周期数分别是 8、12、16、20. 图 2(b)是根据 S_{21} 的相位得到的该结构(周期数为 20)的相速度和群速度随频率的变化曲线. 由图 2 可知,图 1 所示结构的确存在一个相速度和群速度相反的左手性通带.

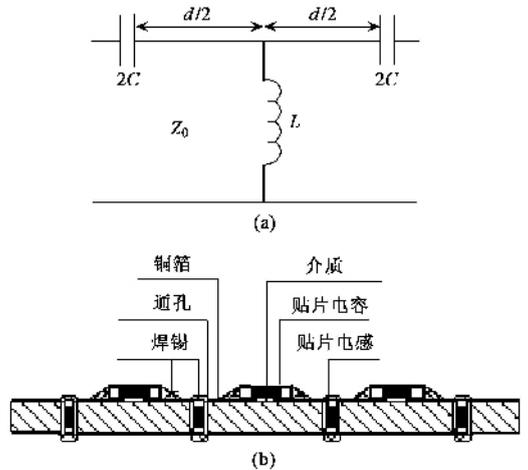


图 1 微带线上加载集总电容和电感制备的特异材料的基本单元等效电路图(a)和纵切面结构示意图(b)

通过加载集总电容和集总电感还可以制作二维网格状的特异材料^[10,11],文献[11]利用这种二维结构制作出了左手平面透镜. 图 3(a)是他们所制作的平面透镜的照片. 中间是加载电容和电感的左手性媒质,对称分布在两侧的是没有加载电容和电感的右手性媒质. 作者通过实验验证了该平面传输线透镜能够突破 Rayleigh 衍射极限的限制,证实了左手材料具有增加倏逝波的特性. 实验中用与同轴电缆的中心导体相连的垂直放置的单电极在右手媒质的某一点激发一个源(同轴电缆的外部导体与接地板相连). 用与矢量网络测试仪相连的探针在该结构表面上方 0.8 mm 处测试表面各点的电场强度. 图 3(b)是源所在的列(平行于左手性媒质和右手性媒质的交界线)和像所在的列各点的归一化电场强度曲线. 其中虚线表示源所在列各点的归一化电场强度,实线表示像所在列各点的归一化电场强度,加点

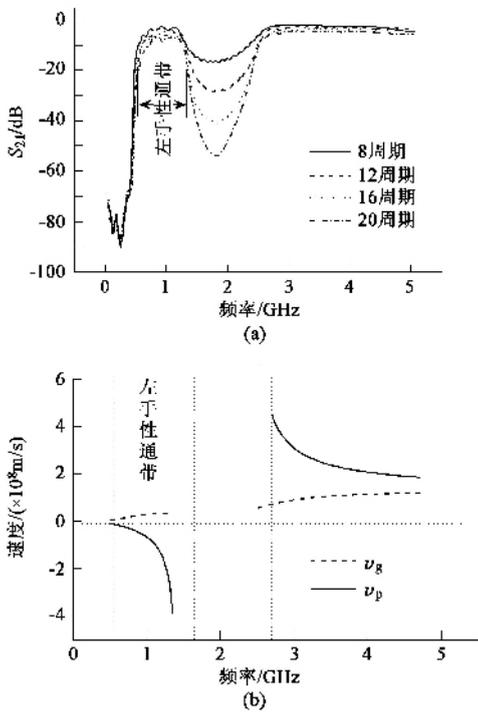


图2 图1所示特异材料的传输特性 (a) 传输系数 S_{21} 的幅值随频率的变化 (b) 相速度和群速度随频率的变化曲线

虚线表示场在连续性媒质中传播考虑衍射极限时计算出的像所在列各点的归一化场强,加三角形的曲线表示场在右手性传输线网格中传播考虑衍射极限时计算出的像所在列各点的归一化场强.由图3(b)可知,利用左手平面传输线透镜成像时,突破了衍射极限限制.另外,由于利用传输线很难形成三维的网络,因此,目前利用传输线制备三维特异材料还面临着很大的挑战.

2.2 通过加载分布结构的电容和电感制备的特异材料

在微带线上除了加载集总电容和集总电感以外,还可以通过加载呈分布结构的电容和电感来制备特异材料.其中最具代表性的是 Itoh 课题组利用叉指性电容和短脚电感制备的特异材料^[12].由于这种结构不需要额外的集总电容和电感,因此制作该种特异材料时只需要用双面敷铜的电路板通过光刻腐蚀工艺即可.另外,与加载集总的电感和电容的结构相比,这种呈分布结构的电感和电容有利于左手通带的中心频率向高频方向移动.利用该结构可以制备很多具有特异功能的微波元件,如耦合器、天线等^[13,14].

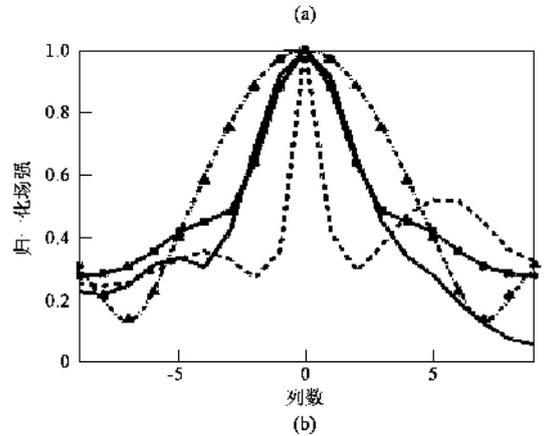
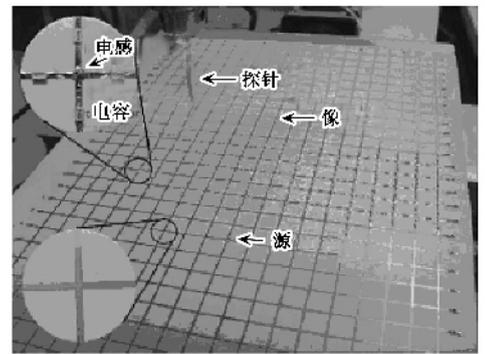


图3 (a) 左手平面传输线透镜照片;(b) 源和像所在列各点的归一化场强

2.3 借助于开口谐振环或互补开口谐振环制备的特异材料

如图4所示,是一种借助于开口谐振环(split ring resonators, SRRs)制作的微带线型特异材料^[15].图中黑色和阴影部分分别代表介质1和介质2顶部的导体.从图可以看出,两层介质中间加了一层金属开口谐振环,上下两层谐振环同心且开口方向相反,并对称地分布在传输线两侧.传输线中央打有通孔,孔内嵌有连接导带和接地板的细金属线.当电磁波在微带线中传播时,电场垂直于地板,磁场环绕传输线.由Pendry的工作可知^[2,3],嵌入通孔中的金属线可以产生负的介电常数,而SRRs能够产生负的磁导率,这样,该结构将会在一定的频率范围内呈现左手性.

图5是一种基于互补开口谐振环(complementary split ring resonators, CSRRs)的微带线型特异材料^[16].它是在微带线的金属地板的中央周期性的刻蚀出一排CSRRs,并在微带线的导带上刻蚀一系列狭缝电容,保证狭缝的位置与CSRRs的中心相一致.有关电磁场对偶特性的巴比涅(Babinet)原理告诉我们,若SRRs给出负值的磁导率,则CSRRs可以

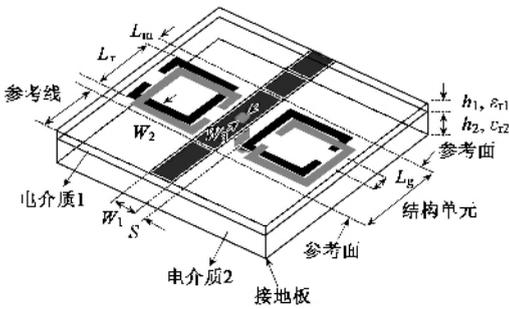


图4 基于SRRs的微带线型特异材料的结构示意图



图5 基于CSRRs的微带线型特异材料的结构示意图

得到负值的介电常数. 而通过微带线上刻蚀的狭缝电容又可获得呈现负值的磁导率. 因此该结构在一定的频率范围内也能够支持后向波传播. 需要指出的是, 上述两种结构由于受SRRs或CSRRs共振频率的限制, 左手通带的宽度都比较窄; 然而, 两种结构都比较紧凑, 有利于微波集成电路的小型化.

3 基于共面波导的特异材料

以共面波导为载体的特异材料目前典型的主要有两种: 一种如图6所示, 通过直接加载金属线电感和狭缝电容制备^[17]; 另外一种如图7所示, 借助于SRRs制备^[18]. 由于在共面波导结构中接地板在中心导体的两侧, 和中心导体在同一平面上, 这样加载的电感和电容就特别容易被组合在一起. 在图7中, 中心导体间的缝隙可用来充当电容, 连接中心导体和两侧接地板的细导线可充当电感, 其实现左手性的原理和在微带线上加载电容和电感实现左手性的原理完全相同. 在图7中, 是在介质衬底的背面对称均匀地刻蚀出两排SRRs, 用细金属线把中心导带和两侧的接地板连接起来, 并保证金属线的位置和开口谐振环的圆心相一致. 此时, 由于谐振环的环面与共面波导面平行, 使得电磁波的电场方向平行于环面, 而磁场方向与环的轴线方向相一致, 当电磁波的频率处于谐振环的共振频率附近并高于共振频率时, 就会产生呈现负值的有效磁导率. 当连接中心导

带和接地板的金属线的宽度以及金属线与金属线之间的距离合适的情况下, 介电常数也会为负值. 这样电磁波在其中传播时就会呈现左手性. 上述两种结构的优点是制作工艺相对简单, 只需要标准的光刻腐蚀工艺即可. 缺点是不适合制作二维织构结构, 第二种结构由于受谐振环共振频率的限制, 左手通带的宽度较窄.

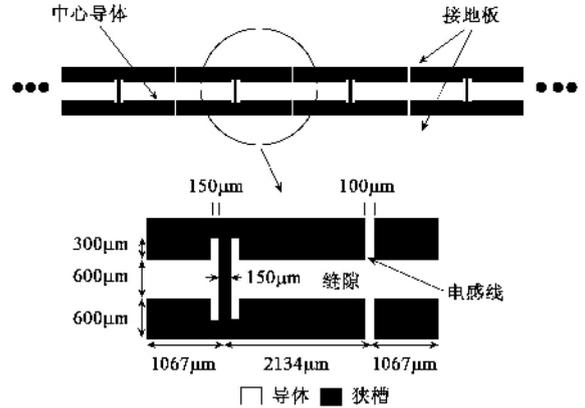


图6 利用共面波导结构制备的特异材料的结构示意图

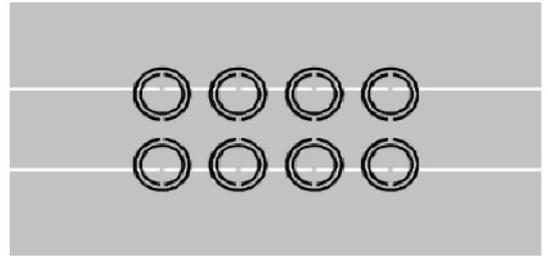


图7 基于SRRs的共面波导型特异材料的结构示意图

4 结束语

到目前为止, 人们利用微带线和共面波导制备出了各种各样的传输线特异材料. 除了介电常数和磁导率同时为负值的双负性特异材料外, 利用传输线还可以制备介电常数为正值而磁导率为负值(或介电常数为负值而磁导率为正值)的单负性特异材料^[19]. 目前, 利用开口谐振环已经制备出了可见光频段的特异材料^[20], 而利用传输线制备的特异材料主要工作在微波频段, 这是传输线特异材料相对于前者的不足之处. 文献[21]提出通过纳米金属及介质结构可以形成纳电感及纳电容, 从而实现红外与可见光频段的传输线特异材料, 这也许是一种解决传输线特异材料工作在可见光频段这一难题的有效

途径. 由于传输线特异材料的制备方法与现有的微波电路工艺兼容, 可以利用这类特异材料制作多种具有特异功能的微波器件, 如宽频带滤波器、宽频带任意耦合度的耦合器、高方向性天线以及平面传输线透镜等. 我们实验室利用传输线制备了可用外场调节的特异材料^[22]、定向耦合器、微波功分器^[9]. 与其他实验室合作, 研制了亚波长谐振腔、平面高方向性天线、紧凑型高 Q 滤波器^[23-25]. 由于特异材料在微波通讯等领域有着潜在的广泛的应用, 相信今后将会有更多新型结构的传输线特异材料出现, 也将会有更多利用传输线特异材料制备的具有奇异特性的器件问世.

参 考 文 献

[1] Veselago V. Sov. Phys. Uspekhi, 1968, 10(4) 509
 [2] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J *et al.* Phys. Rev. Lett., 1996, 76(25) #773
 [3] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J *et al.* IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 1999, 47(11) 2075
 [4] Pendry J B. Phys. Rev. Lett., 2000, 85(18) 3966
 [5] Smith D R, Padilla W J, Vier D C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 84(18) #184
 [6] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Science, 2001, 292 (5514) 77
 [7] Eleftheriades G B, Iyer A K, Kremer P C. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2002, 50(12) 2702
 [8] Liu L, Caloz C, Itoh T. J. Appl. Phys., 2002, 92(9) 5560
 [9] Zhang D K, Liu F Q, Zhang Y W *et al.* Microw. J., 2005, 48(11) 114
 [10] Grbic A, Eleftheriades G V. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2003, 51(12) 2297

[11] Grbic A, Eleftheriades G V. Phys. Rev. Lett., 2004, 92 (11) 117403
 [12] Caloz C, Itoh T. IEEE Trans. Antennas Propag., 2004, 52 (5) 1159
 [13] Caloz C, Itoh T. IEEE Microw. Wireless Comp. Lett., 2004, 14(1) 31
 [14] Lim S, Caloz C, Itoh T. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2005, 53(1) 161
 [15] Mao S G, Chen S L, Chen W H. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2005, 53(4) 1515
 [16] Falcone F, Lopetegi T, Laso M A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2004, 93(19) 197401
 [17] Grbic A, Eleftheriades G V. J. Appl. Phys., 2002, 92(10) : 5930
 [18] Martin F, Bonache J, Falcone F *et al.* Appl. Phys. Lett., 2003, 83(22) #652
 [19] Fujishige T, Caloz C, Itoh T. Microw. Opt. Tech. Lett., 2005, 46(5) #76
 [20] Enkrich C, Wegener M, Linden S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 95(20) 203901
 [21] Engheta N, Salandrino A, Alu A. Phys. Rev. Lett., 2005, 95(9) 095504
 [22] Zhang Y W, Li H Q, Chen H. Tunable metamaterial for microwave and its applications. In : Proceedings of 10th International Symposium on Microwave and Optical Technology. Fukuoka, 2005. 35
 [23] Zhou L, Li H Q, Qin Y Q *et al.* Appl. Phys. Lett., 2005, 86 (10) 101101
 [24] Li H Q, Hang Z H, Wei Z Y *et al.* Appl. Phys. Lett., 2005, 86(12) 121108
 [25] Jiang H T, Chen H, Li H Q *et al.* J. Appl. Phys., 2005, 98 (1) 013101

· 仪器和设备 ·

结构紧凑、性能卓越的经济型准分子激光器



Coherent(相干)公司生产的最新推出一款结构紧凑、性能卓越并具有超长使用寿命的经济型 Excistar XS 准分子激光器. 特别是空气冷却的 Excistar XS 激光器, 外形尺寸仅为 649 × 300 × 400 mm, 却能在重复频率高达 500Hz, 波长为 193nm 时, 输出脉冲能量高达 10mJ, 能量稳定性小于 2% (1 σ). Almeta XS 全金属结构, corona 预电离, 全固体脉冲发生器以及静电尘去除技术的使用, 确保了激光腔的寿命高达 500 百万个脉冲数, 腔镜的寿命高达 100 百万个脉冲数.

Excistar XS 的输出波长包括 157 nm (F₂), 193 nm (ArF), 248 nm (KrF) 和 351 nm (XeF). 它的紧凑结构以及低成本, 使得 Excistar XS 激光器成为实验室研究人员, 特别是打标应用的首选. 另外, Excistar XS 也适于 RoHS.