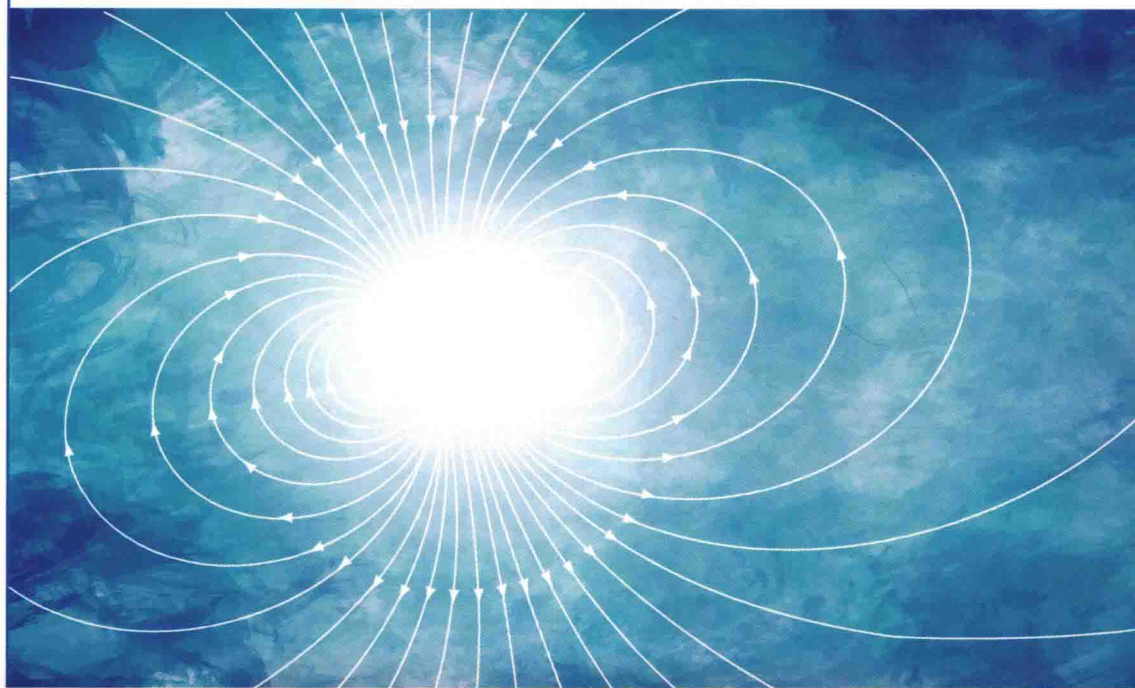


电磁异向介质特性 及微带天线应用



高军 曹祥玉 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

电磁异向介质特性 及微带天线应用

高 军 曹祥玉 周禹龙 刘 涛 马嘉俊 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是作者及其研究团队过去几年在电磁异向介质领域研究成果的全面总结。书中详细介绍了异向介质概念、奇异电磁特性及这些电磁特性在微带天线设计中的应用,内容包括电磁异向介质的概念、电磁特性及设计理论、异向介质单元结构设计、局域谐振特性、传输线实现以及在微带天线小型化和高增益方面的应用。

本书可作为电磁异向介质初学者、工程研发人员的参考书籍,也可作为本科大三学生学习电磁场与电磁波及天线、研究生学习高等电磁场理论和高等天线理论等相关课程的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电磁异向介质特性及微带天线应用/高军等著. —北京:国防工业出版社, 2018.12

ISBN 978-7-118-11790-5

I. ①电… II. ①高… III. ①各向异性介质—应用—微波天线—研究 IV. ①TN822

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 278754 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京虎彩文化传播有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 12¼ 字数 236 千字

2018 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—800 册 定价 158.00 元



(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

前 言

电磁异向介质作为超材料 (Metamaterial——MTM) 的典型代表, 它的特性及应用研究是近几年电磁研究领域的前沿课题, 本书较为全面地介绍了异向介质概念及其奇异电磁特性。以等效介电常数和磁导率张量全部或部分分量为负值的均匀或非均匀、各向同性或各向异性的异向介质为研究对象, 以时域有限差分法为主要数值分析方法, 采用解析分析与数值计算相结合, 理论研究与实验验证相结合的方式对异向介质的电磁特性、结构设计以及在微带天线中的应用等进行了深入研究。

本书共分 9 章。第 1 章绪论, 全面介绍了电磁各向异性介质基本概念, 国内外研究现状以及本书的内容安排。第 2 章均匀异向介质特性分析, 从媒质的分类开始, 介绍了各向同性异向介质的一些奇异电磁特性, 包括左手螺旋特性、逆 Snell 定律、逆多普勒 (Doppler) 效应、逆 Goos-Hanchen 效应、逆切伦科夫 (Cherenkov) 辐射以及完美透镜 (Perfect Lens) 效应。分析了各向异性介质电磁波传播特性, 给出了时域有限差分法模型及分析计算程序。通过应用实例分析, 形象、直观地展示了各向异性介质电磁波传播效应。第 3 章非均匀异向介质特性及设计理论, 通过多个应用实例, 介绍了时域有限差分法、并行计算方法以及电磁仿真软件在分析、设计规则、非规则异向介质中的应用。第 4 章异向介质单元的结构设计, 全面总结异向介质结构单元设计理论, 以此为基础, 介绍了双负媒质、“耶路撒冷十字”等新型双负异向介质设计实例, 并通过实验测试, 验证其特性。第 5 章, 详细介绍了电磁快速计算方法中的参数估计技术 (MBPE), 利用该技术, 分析了异向介质单元的局域谐振特性。第 6 章介绍了均匀异向介质的传输线等效电路分析方法, 采用传输线理论分析、设计了多种均匀异向介质单元结构, 并对其特性进行了仿真和实验验证。第 7 章介绍了各向异性介质在微带天线小型化中的应用。第 8、第 9 章介绍了各向异性人工电磁媒质在提高微带天线增益方面的应用价值。

本书很多案例都是作者编程实现并验证了的, 书后附录给出了部分程序设计说明并附源程序代码, 使得阅读、学习、理解更为容易。本书是作者在该领域多年研

究成果的反映,希望能够激起那些即将进入超材料和天线研究领域年轻学者的兴趣,使他们有志于投身到这一新的电磁研究领域。如果读者需要完整源程序代码可以联系译者或出版社,译者邮箱: xiangyucaokdy@163.com。

本书的出版得到国家自然科学基金(No.61471389, No.61671464)的支持,国防工业出版社为本书的出版付出了大量辛勤的劳动,在此表示衷心感谢!

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

编者

2018.10

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 研究现状及进展	2
1.3 本书主要工作及内容安排	8
第 2 章 均匀异向介质的特性分析	10
2.1 引言	10
2.2 媒质的分类	10
2.2.1 各向同性媒质	11
2.2.2 各向异性媒质	11
2.2.3 双各向异性媒质	11
2.3 各向同性异向介质的奇特电磁特性	12
2.3.1 左手螺旋关系	12
2.3.2 频率色散特性	12
2.3.3 逆 Snell 定律	13
2.3.4 逆多普勒效应	14
2.3.5 逆 Goos-Hänchen 效应	15
2.3.6 逆切伦科夫 (Cherenkov) 辐射	15
2.3.7 完美透镜 (Perfect Lens) 效应	16
2.4 各向异性异向介质电磁波传输特性	17
2.4.1 各向异性异向介质的色散方程	17
2.4.2 各向异性异向介质的分类	19
2.4.3 各向异性异向介质中电磁波传输特性	20
2.5 色散时域有限差分法	22
2.5.1 负材料参数的三种等效模型	22
2.5.2 异向介质材料的 FDTD 差分方程	23
2.5.3 异向介质的 FDTD 仿真验证	25
2.6 均匀异向介质的应用	30
2.6.1 LHM/PEC 局域谐振模型	31
2.6.2 LHM/PEC 局域谐振模型的改进	32

2.6.3	开放式局域谐振模型	33
2.7	小结	34
第3章	非均匀异向介质特性及设计理论	35
3.1	引言	35
3.2	基于 MPI 技术的并行 FDTD 算法	35
3.2.1	并行 FDTD 算法区域划分	35
3.2.2	并行算法的软硬件平台及 MPI 函数	37
3.2.3	算例验证	37
3.3	非均匀异向介质分析	40
3.3.1	圆环电磁 cloak 的基本模型	40
3.3.2	圆环电磁 cloak 的 FDTD 差分方程	40
3.3.3	算例验证	43
3.3.4	COMSOL Multiphysics 软件仿真	44
3.4	规则形状非均匀异向介质解析设计方法	48
3.4.1	直角坐标系变换公式	48
3.4.2	曲线坐标系变换公式	50
3.4.3	曲线坐标系下媒质参数张量变换关系	51
3.4.4	算例验证	58
3.5	不规则形状非均匀异向介质数值设计方法	65
3.5.1	线性变换方程求解法	66
3.5.2	拉普拉斯方程求解法	66
3.5.3	泊松方程求解法	67
3.5.4	泊松方程求解法的算例验证	67
3.6	小结	71
第4章	异向介质单元的结构设计	72
4.1	引言	72
4.2	负介电常数材料的设计理论	72
4.2.1	负介电常数的产生机理	72
4.2.2	ROD 单元的色散特性	74
4.3	负磁导率材料的设计理论	75
4.3.1	负磁导率的产生机理	76
4.3.2	不同结构参数对磁导率的影响	78
4.3.3	SRR 单元的色散特性	80
4.4	双负材料设计理论	82
4.4.1	不同的组合方式	82

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

在经典电动力学中,介质的电磁性质用介电常数和磁导率两个宏观参数来描述。介电常数主要反映介质在电场中发生的极化对原电场产生的影响,磁导率则反映介质在磁场中发生的磁化对原磁场的影响。介电常数和磁导率都是微观粒子在电场和磁场作用下运动效果的宏观反映。在已知的物质世界中,所有电磁介质的相对介电常数和磁导率都是大于1的正值,根据麦克斯韦(Maxwell)方程组,电场强度 E 、磁场强度 H 和波矢量 k 构成右手螺旋关系,这样的规则一直被认为是物质世界的常规。

然而1968年,苏联物理学家 Veselago 提出了一种相对介电常数和磁导率同时为负值的假想介质^[1],打破了人们的这种常规认识。Veselago 认为这种物质同样支持电磁波的传播,并且电场强度 E 、磁场强度 H 和波矢量 k 三者构成左手螺旋关系,由此得到波矢量 k 与坡印廷矢量 S 方向相反。波矢量 k 的方向与相速方向相同,而坡印廷矢量 S 代表着能流密度的传播方向,它与群速方向相同。因此在这种介质中,相速度和群速度方向相反。这就导致这种介质具有不同于普通电磁介质的一些新颖特性,如负折射特性、逆多普勒(Doppler)效应,反切伦科夫(Cerenkov)效应等。由于其相对介电常数和磁导率同时为负,因而称为双负媒质(DNG);又由于电场强度 E 、磁场强度 H 和波矢量 k 三者构成左手螺旋关系,又称为左手材料(LHM)。Veselago 进一步证明,当光束从真空或其他普通电介质入射到双负媒质中,会发生负折射现象,即入射光线与折射光线位于法线的同一侧,因此这种物质也称为负折射介质。然而,双负媒质概念在 Veselago 提出后的近三十年时间里并没有引起学者的重视,一直处于无人理睬的尴尬境地。直到英国科学家 Pendry 教授1996年和1999年相继提出利用周期性的金属柱(ROD)阵列可以实现负的介电常数和利用周期性的开口双谐振环(SRR)阵列能够实现负磁导率^[2,3,4],Veselago 的开拓性工作才再次引起各国科学界的关注。2000年,美国科学家 Smith 教授根据 Pendry 的研究成果,利用以铜为主的复合材料首次制造出在微波波段同时具有负介电常数和负磁导率的物质^[5],并通过实验证实微波波束入射到这样的人工介质上,波束以负角度偏转,从而证明了负折射率材料的存在。从此关于左手材料的研究才成为国际电磁学界一个引人注目的前沿课题,并引发了强烈的讨论,提出了大量的可能应用方案。基于此,左手材料的实现被美国《Science》杂志评为2003年十大科学进展。

3 年后的 2006 年年底，英国的 Pendry 教授受到左手材料研究的启发，利用麦克斯韦方程在不同坐标系下具有相同形式的协变特性，首次在 Science 杂志上发表文章提出“隐身斗篷”（invisible cloak）的概念^[6]，并于同年采用与左手材料设计相类似的梯度参量分布方法实现了“隐身斗篷”材料^[7]。Pendry 教授的这一成果将左手材料的概念扩展到等效介电常数和等效磁导率可以取任意符号、任意值，且为非均匀分布的各向异性媒质，这里的 ϵ, μ 是张量，属于各向异性媒质，他可以调控电磁波传播方向，绕过 cloak，使 cloak 内部物体隐身。《Science》杂志又一次将这种人工材料列为当年的“十大科学进展之一”。学术界将这种自然界不存在的，人工合成的，通过在一种介质中嵌入周期或非周期性金属，介质结构使其呈现出奇异电磁特性的物质称为超材料（Metamaterial——MTM）。若用坐标系来表示，根据媒质 ϵ, μ 取值不同，媒质参数可以分布在 4 个象限，如图 1.1 所示。

电磁波在媒质中的传播特性取决于媒质的电磁参数——介电常数 ϵ 和磁导率 μ 。 ϵ, μ 位于第一象限，是自然界存在的电磁材料，电磁波可在其中传输，如自然界中的水、晶体、半导体、磁吸波材料、铁氧体等； ϵ, μ 位于第三象限，自然界不存在这种材料，但是通过人工设计可以使其等效， ϵ, μ 均为负值，电磁波也可在其中传输，这就是双负媒质或左手材料； ϵ, μ 位于第二、四象限，传输凋落波。例如左手材料可看作等效介电常数和等效磁导率均为负值的一种均匀、各向同性的人工材料，

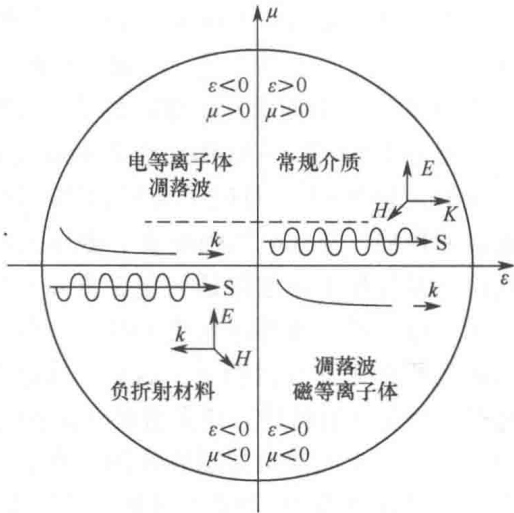


图 1.1 媒质参数分布

而基于场变换方法设计的电磁材料则可视作等效介电常数和等效磁导率为负值的一种非均匀、各向异性人工材料。因此本书就以这种等效介电常数和等效磁导率张量全部或部分分量取负值的均匀、非均匀、各向同性、各向异性的人工材料以及 ϵ, μ 可以推广取任意值的均匀异向介质作为研究对象，采用孔金瓯教授所建议的异向介质对其进行命名，对异向介质的基础电磁理论、材料特性、设计方法、仿真计算、实验测量及其在微带天线中的工程应用等问题进行深入研究，以期对异向介质及其应用的发展起到一定的推动作用。

1.2 研究现状及进展

科学史上任何一项突破性的进展都必然经历一番不同寻常的争论，更何况这种

颠覆了物理学常规定律的介质，其反常的特性预示着材料世界革命的到来。尽管 Smith 等在 2000 年设计的复合结构在射频频段的等效介电常数和等效磁导率同时为负值，其块状材料样品如图 1.2 所示^[5]，并进行了棱镜实验^[8]，向人们展示了这种结构所具有的负折射特性，但这种简单的组合方式并没有考虑周期性金属柱（ROD）和金属开口环谐振器（SRR）之间的耦合作用对系统属性所带来的影响，并且由于负折射本身与人们长期传统概念和认识相背，同时 Smith 小组的实验中吸收损耗较大，实验本身存在缺陷，因此一开始科学界有相当一部分学者仍然持怀疑态度^[9-11]。Valanju 声称该实验观测到的负折射现象只是近场的衍射效应^[9]，而 Garcia 等认为，如果考虑损耗，棱镜实验测得的现象将很难区分是由负折射引起还是由高损耗引起，因为电磁波在经过棱镜时经历的损耗并不均匀^[11]。针对这些质疑的声音，美国麻省理工学院孔金瓯教授领导的研究小组指出 Valanju 错误地把波的干涉形成的干涉波前进方向当成是能量传播方向，并且他们通过推导得出坡印廷矢量的方向确实是向负方向折射，并在理论上证明了左手材料的存在并不违背已知的物理学定律^[12]。Pendry 等也从群速的原始定义出发，得到群速是沿负方向传播的结论^[13]。经过近三年的辩论，Pendry 等终于从理论和实验两个角度证明了他们观点的正确性，科学界也终于接受了这种新型介质的存在。

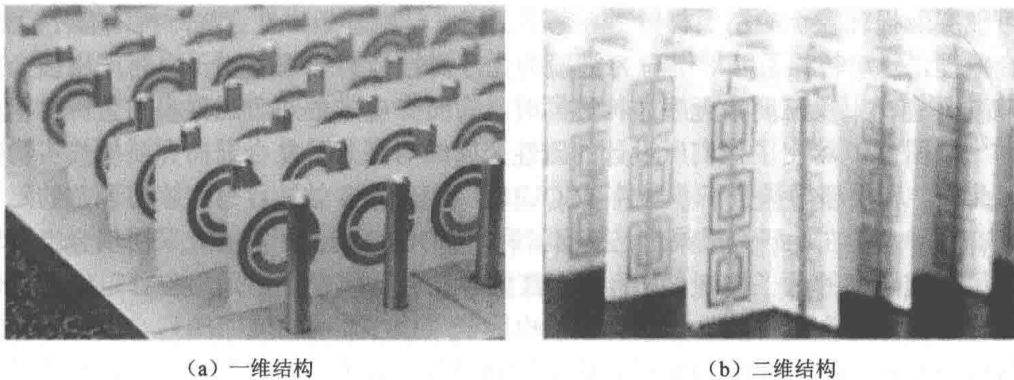
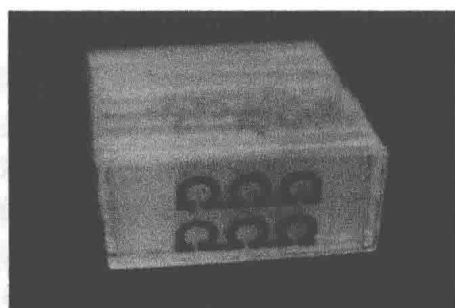
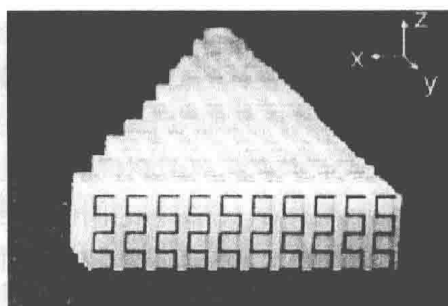


图 1.2 Smith 等人研制的双负材料

理论上的成功必然引导异向介质实现研究的飞跃。由于 Smith 最初实现的异向介质具有带宽窄、色散强烈、损耗高、单元之间耦合大等问题，严重制约其实际应用，因此各国学者都致力于寻求更好的工程实现方式。Pendry 通过改变 SRR 的形状提出了可工作于红外波段的 SRR 结构^[14]，浙江大学 Chen、Ran 等人利用热压技术制成了 Ω 形、S 形、“弓”形、“工”形等都不需外加金属导线而同时实现负介电常数和负磁导率特性的结构^[15-18]，如图 1.3 所示。并且通过能量传输、棱镜折射、光束位移等实验证明了他们所设计结构的负折射特性。



(a) Ω 形单元结构异向介质



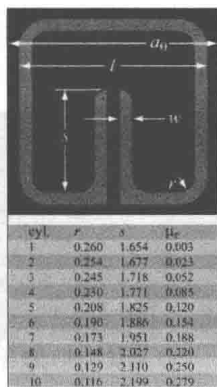
(b) 弓形单元结构异向介质

图 1.3 相关双负材料

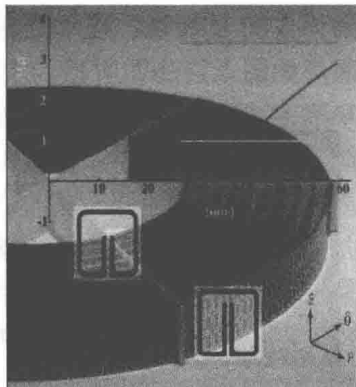
异向介质的另一个研究方向是把材料的工作频段向红外甚至光频推进。Linden 等在 100THz 实现了基于 SRR 结构的左手材料^[19]。利用光刻技术，Wei Wu 等在近红外波段实现了光频左手材料^[20]。2006 年 Alu 等人基于纳米技术设计出在可见光波段具有纳米尺寸的负磁导率单元和负介电常数单元^[21]，将左手介质的工作频段从微波波段提高到了可见光波段。

上述文献都是基于金属基元的电磁响应实现左手材料，不可避免地具有带宽窄、损耗大的缺点，因此人们希望找到其他的实现途径。理论研究发现，将磁性金属的纳米颗粒注入到一定的绝缘体中，通过控制其中磁性金属颗粒的磁化方向和空间比，就可能实现损耗较小的左手材料^[22]。空军工程大学则基于磁性金属纤维的有序/无序复合原理，分别制备了可工作于 X 波段的无序磁性金属纤维/高分子、有序磁性金属条/高分子基体、反三明治无序结构等同时具有负介电常数和负磁导率的负折射率材料^[23-25]，图 1.4 给出了他们所设计的磁性金属线与高分子复合异向介质板的实物照片。此外，利用超导量子干涉器件 (SQUID) 代替 SRR 结构，也能够实现负的磁导率^[26]。清华大学在此研究成果上，提出了利用 SQUID 的量子特性，采用耦合电磁场实现了对磁导率的量子控制^[27,28]。而浙江大学则独辟蹊径提出采用位移电流代替传导电流，通过高介电常数的钛酸锶钡铁电陶瓷 (BST) 柱的周期排列实现全介质左手材料的方法，利用 BST 材料的介电常数随外加电场而变化的特性，他们制作了可调性能在 10% 以上的电控全介质异向材料^[29,30]。

相比于这种均匀各向同性异向介质 (即左手材料) 发展历程的一波三折，非均匀各向异性异向介质的出现则要顺利得多。2006 年 Pendry 教授在《Science》杂志上发表题为 Controlling Electromagnetic Fields 的文章^[6]，提出通过坐标变换的方法可以将球体中的电磁波压缩到球壳内，实现完美电磁隐身。这种采用坐标变换方法设计的介质一般呈现出非均匀、各向异性特性，并且存在大量等效相对介电常数和等效磁导率小于 1 的区域，这为其物理实现带来了一定困难。尽管如此，基于大量 ROD 和 SRR 呈现负介电常数和磁导率的研究成果，其后不久 Pendry 领导的研究小组就宣布制作出了首个工作于微波波段的“隐身衣” (隐身 cloak)^[7]，其实物照片如图 1.5 所示。



(a)



(b)

图 1.4 磁性金属线与高分子复合异向介质 图 1.5 电磁隐身斗篷 (cloak) 的单元结构及实物照片

Pendry 教授的隐身 cloak 一经提出, 立刻引起了世界范围内的广泛关注, 随后便出现了大量关于电磁隐身材料的研究报道^[31-41]。分别出现采用有限元法 (FEM)^[31,32], 时域有限差分法 (FDTD)^[33], 传输线法 (TLM)^[34] 等对隐身 cloak 进行全波数值仿真的文献报道。Z.Ruan 采用高阶 Bessel 函数分析了影响圆环 cloak 的散射因素^[35], W.Cai 则提出了一种简化的 cloak 模型^[36], 随后 M.Yan 等证明了这种简化参数 cloak 具有散射电磁波的必然性^[37]。2008 年 Pendry 教授又将这种 cloak 材料扩展到任意形状的电磁波导向材料^[38], 随后东南大学崔铁军教授领导的小组对这一方法进行了拓展, 提出采用解析方法设计任意形状异向介质的思想^[39,40]。北京科技大学的胡劲则采用求解拉普拉斯 (Laplace) 方程的方法将该设计方法拓展为数值求解^[41], 进一步增加了异向介质设计方法的灵活性和多样性。

自实验证实左手材料存在之日起, 异向介质的应用研究就受到人们广泛关注, 大量文献讨论了其在完美透镜、新型微波器件、天线、隐身材料等领域的应用前景。早在 2000 年, Pendry 就分析证明, 由于对凋落波的放大作用, 负折射物质可以突破衍射极限的限制, 实现所谓的完美透镜^[42]。但 Zhen 指出, 尽管这种完美透镜会对凋落波起放大作用, 但由于它具有不能忽略的损耗和色散因素, 因此并不能理想成像, 甚至对提高成像质量也于事无补^[43]。直到 2004 年, 完美透镜这一设想终于在一定条件下变成现实。Lagarkov 等研制成功一种具有超级分辨率的镜片, 但条件是被观察物体需要几乎接触镜片^[44]。Grbic 等采用传输线平板实现了异向介质镜片^[45], 如图 1.6 所示, 但仅在二维电路平板内实现, 距离实际应用尚有一定距离。

利用均匀左手性异向介质的低折射率特性将其作为天线覆层, 可达到压缩天线主瓣宽度, 降低旁瓣, 提高增益的目的。这一做法已得到证实并引起相关研究人员的广泛重视^[46-50]。例如 Huang^[49]等报道的采用金属细线阵列作为微带天线覆层的设计方法, 可在两个频段内提高天线增益达 8dB, 其实物照片如图 1.7 (a) 所示。以及 Xiao^[50]等设计的采用金属栅格阵列作为天线覆层, 利用其在 12GHz 附近折射率

约为 0.08 的特性，在 11.8~12.8GHz 频段内提高波导口径天线增益约 4dB，其实物照片如图 1.7 (b) 所示。

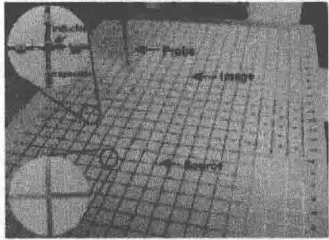
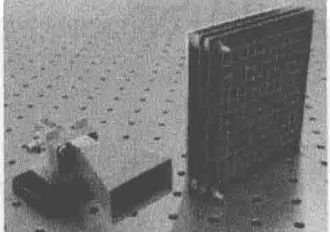
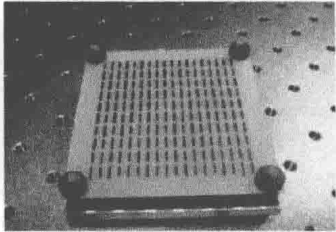


图 1.6 传输线平板异向介质
超级透镜



(a) 金属线阵列覆层微带天线 (b) 金属栅格阵列覆层波导口径天线

图 1.7 相关实物照片

异向介质另一研究方向是采用传输线结构的实现方式，通过选择合适的电容电感等集总元件，组成一个高通的传输线网络，能够实现异向介质的反向波传播特性及负折射特性，并且传输线网络结构具有更小的损耗，能够实现更宽的带宽，因此也成为异向介质应用的另一个重要方向^[52-58]。2002 年，Caloz 等首先利用左右手复合传输线制成了前向耦合器，利用左手性异向介质的回波特性，使得传输线路间耦合强度增大，体积减小^[52-53]。2003 年，Antoniades 等利用左右手传输线结构制作了一种紧凑型移相器，具有更小的尺寸，更为平滑的相移特性，更宽的带宽以及更小的群延迟等优点^[54]。Carcia 等通过向 C 波段微带耦合带通滤波器中加入 SRR 结构^[55]，有效抑制了该滤波器的乱真通带，由于 SRR 很小，所以这种技术不会导致元件占用更大的面积。此外还有大量运用左右手传输线结构设计紧凑型振荡器，定向耦合器以及漏波天线等方面的报道^[56-65]。

在非均匀异向介质的应用研究方面也涌现出了大量的文献报道，但是由于这种介质加工制作的复杂性，因此多数研究报道仍是基于理论层面的分析，其中包括将异向介质用于定向天线^[66,67]，小型化波导^[68]，平面波相位旋转器^[69]以及超级透镜^[70,71]等方面的研究内容。在非均匀异向介质的工程实现方面，较引人注目的成果是刘若鹏等 2009 年在《Science》杂志报道的“隐身地毯”^[72]，可在 13~16GHz 的宽频段范围内使地面目标隐身，其实物照片如图 1.8 所示。该隐身地毯由 10000 多个工字形单元组成，并且有 6000 多个单元的尺寸各不相同。如此复杂的设计过程，采用人工设计的工作量将是难以想象。正如刘若鹏在该文章的 Support material 中指出的，这篇文章的主要价值是他们完成了一整套超材料的计算机 CAD 设计程序，这些设计工作可由程序自动完成，因此才有可能制作出如此复杂的异向介质材料。

非均匀异向介质应用的另一项重要研究成果是东南大学崔铁军教授 2009 年在《arXiv》上发表的关于人工电磁黑洞的研究报道^[73]。黑洞一般被认为是引力场达到临界状态的某个区域，可吸收碰到它的一切物体。这种基于引力场的黑洞很难在实

实验室模拟验证，但可以通过类比方法采用电磁波形式来实现。图 1.9 给出了崔铁军教授课题组利用非均匀异向介质对电磁波的导向控制能力，制作的在微波频段模拟“电磁黑洞”的实物照片和测量结果。该“电磁黑洞”由 60 层非谐振“工”字形单元和谐振型电感应振子（ELC）单元构成。利用工字形单元构成的非均匀异向介质环形区域，用以控制电磁波的传播轨迹，类比物质在引力场下弯曲空间中的运动轨迹，从而引导电磁波流入电磁黑洞的中心区域。利用电磁黑洞中心区域 ELC 单元的高损耗特性吸收陷入其中的电磁能量，以此模拟黑洞对能量的吸收特性。实验结果表明，该电磁黑洞能够全向捕捉电磁波，在微波频段对电磁波的吸收率可达到 99% 以上。

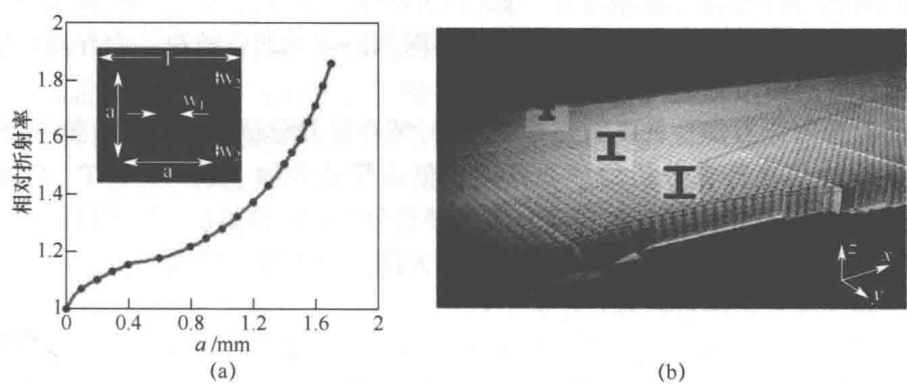


图 1.8 电磁隐身地毯单元结构及实物照片

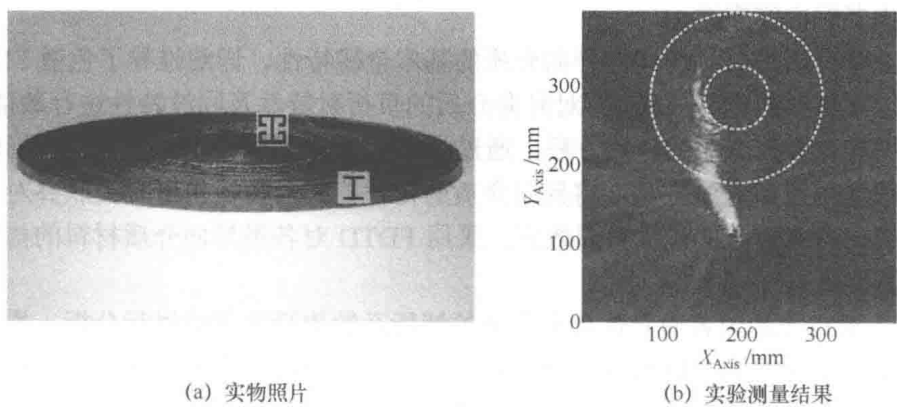


图 1.9 人工“电磁黑洞”

总之，异向介质是一种崭新的人工电磁材料，有着各种奇异的电磁特性，已有研究表明，这些奇异的电磁特性在改善和提高微波器件、天线特性以及隐身技术领域具有广阔的应用前景。目前关于异向介质的研究也正在世界范围内展开，研究内容从理论分析、机理研究，逐步向实物制作，实际应用等方向拓展，并取得了

一系列令人鼓舞的研究成果。但在总体上,人们对异向介质的性质和用途都还了解的不深入,甚至对很多基本的问题还存在着争议和困惑,这些都需要通过对异向介质的进一步深入研究来解决。

1.3 本书主要工作及内容安排

异向介质是 21 世纪后短短几年来方兴未艾的前沿课题,尽管每年这方面的论文都以惊人的速度增长,但是仍有一些基本问题没有得到解决。首先由于负介电常数和负磁导率的存在,异向介质的理论和数值计算方法必然不同于传统分析方法,其次异向介质的物理实现目前尚没有一套统一的理论,并且已知的各种实现方式均具有不同程度的弊端。这些问题仍需人们持续深入的研究加以解决,为异向介质在新型微波器件中的应用奠定良好基础。

本书以异向介质作为主要研究对象,以时域有限差分法作为主要数值分析方法,采用自主设计仿真计算分析程序与商用数值计算软件如 HFSS、CST、COMSOL Multiphysics 相结合的方法,对异向介质的理论分析,特性验证,结构设计,以及其特性在微带天线中的工程应用,实验测量等方面进行了深入研究。

全书共分 9 章,各章内容安排如下:

第 1 章概述研究背景及意义,明确本书的研究对象为具有等效负介电常数和负磁导率的均匀、非均匀、各向同性、各向异性的异向介质。通过回顾异向介质的发展历程,介绍了它们在微波电路、天线、完美透镜及电磁隐身方面的应用潜力,最后介绍本书的内容安排。

第 2 章分析均匀各向同性异向介质的基本电磁特性,详细推导了色散 FDTD 法计算负媒质材料的计算公式,并对异向介质的负折射特性及回波特性和数值验证。推导各向异性异向介质的色散方程,通过将 k 矢量的坐标轴与物理空间坐标轴相重合引入传输角度参量的方法,将异向介质的传输模式与传输角度相关联并对其进行重新分类,具有较好的视觉直观效应。采用 FDTD 对各类异向介质材料的传播特性进行仿真验证。

第 3 章对非均匀各向异性异向介质的解析及数值设计理论进行分析。推导非均匀异向介质的并行 FDTD 算法计算公式,提出基于拉梅系数的广义曲线坐标系下规则形状异向介质的解析设计方法和基于 Possion 方程求解法的非规则形状异向介质的数值设计方法。以色散时域有限差分法作为主要工具,结合商用 COMSOL Multiphysics 软件,对非均匀异向介质的电磁波传播特性及其应用方式进行仿真分析,验证对本章提出的设计方法。

第 4 章对异向介质的典型单元 ROD 和 SRR 结构的色散特性、局域谐振特性及负媒质参数的产生机理进行深入研究,采用 Ampere 定理推导出 ROD 谐振频率,从

频率色散的角度分析了 ROD 和 SRR 的负媒质参数的工作频段, 并对 SRR 和 LHM 结构相对于 k 矢量不同方向下的电磁特性进行分析。对二维均匀异向介质板进行加工制作与实验测量, 证明其左手特性。

第 5 章作为第 4 章的姊妹篇, 从单元局域谐振的角度对异向介质单元的电磁特性进行分析。介绍基于模型参数估计技术 (MBPE) 构建电磁系统的广义系统函数 $H(s)$, 并从 $H(s)$ 的极点特性确定系统谐振频率的分析方法。随后对这一方法进行改进, 通过引入分段插值 MBPE 技术用于构建系统函数的方法, 解决传统 MBPE 技术计算量大, 矩阵容易发生奇异, 结果不可靠等缺点。采用分段插值 MBPE 方法对 ROD、SRR 和 MTM 三种结构的局域谐振特性进行分析, 确定其负媒质参数的工作频段。本章的分析方法与第 4 章分析方法起到相互补充, 相互证明的作用。

第 6~9 章分别对均匀异向介质在小型化微带电路、微带天线以及高增益微带天线中的应用进行研究。首先对各自的理论基础进行分析, 提出几种改进的异向介质电路实现结构, 具有结构紧凑, 制作工艺简单的优点, 并对改进的移相器、小型化微带天线以及高增益微带天线进行加工制作和实验测量。

第2章 均匀异向介质的特性分析

2.1 引言

近年来,异向介质在光学、电磁学、材料科学以及应用物理学领域受到越来越多的关注。异向介质是指材料的相对介电常数和磁导率张量的分量不全大于零的一类特殊材料。本章仅讨论均匀异性介质的电磁特性,即介质中各点的介电常数和磁导率张量处处相同,因此在后续叙述中将“均匀”二字略去。

自从 Smith 等人通过对金属柱 ROD 阵列与 SRR 谐振环阵列的合理布局,制造出首例人工复合左手材料^[5],关于异向介质的研究极大刺激着人们的热情,使得异向介质的研究进入实质性阶段。然而 Smith 等制作的异向介质由于其自身结构的原因,一般都表现出各向异性的特点,因此有必要对各向异性异向介质的传输模式及传输条件进行详细分析,可对其设计测量提供理论上的指导。事实上,早在 2003 年 Smith 教授就已经完成了二维异向介质传输模式的理论分析工作^[74],但 Smith 的分析是以波矢量 k 的某一分量为变量对异向介质的传输、截止模式进行分析归类,因而缺乏视觉直观效果。

本章介绍了媒质的分类。对各向同性异向介质的基本电磁特性进行简要回顾,推导了色散 FDTD 方法^[75-79]计算负媒质参数材料的迭代公式,并对各向同性异向介质的回波特性及负折射特性进行仿真验证。对各向异性异向介质的电磁波传播特性进行深入分析,提出将 k 矢量空间的坐标轴与坐标空间的坐标轴相重合从而引入传输角度参量的方法,将异向介质的传输模式与传输角度相关联,以传输角度为变量将异向介质划分为不同于文献^[74]的四种新类型,这样的划分方式由于和传输角度相关,因此具有更好的直观效果。采用色散时域有限差分法对这四种类型异向介质的传输模式进行仿真验证,数值结果与理论分析取得了良好的一致性。直观的数值图像有助于对异向介质奇特传输模式的理解与认识,为异向介质的设计制作提供理论上的指导。

2.2 媒质的分类

根据本构关系的不同,媒质可分为各向同性、各向异性、双各向异性等媒质^[88],而本构关系取决于媒质的宏观电磁特性。下面简要介绍这三种媒质的本构矩阵,说明几种媒质的区别。