

紧凑型异向介质

——机理、设计与应用

JINCouxING YIXIANG JIEZHI
JILI SHEJI YU YINGYONG

王光明 许河秀 梁建刚 蔡通 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

紧凑型异向介质—机理、 设计与应用

Compact Metamaterials: Mechanisms, Design and Applications

王光明 许河秀 梁建刚 蔡通 著

国防工业出版社

·北京·

1384363

内 容 简 介

本书是空军工程大学新材料天线和射频技术课题组多年从事紧凑型异向介质研究工作的凝练和总结,该课题组率先将分形思想融入异向介质单元设计,探索了独具特色的紧凑型异向介质设计的新思路、新方法,取得了一系列创新性研究成果。全书共分9章,以紧凑型异向介质单元设计理论和应用为主线,由一维复合左右手传输线扩展到二维人工电磁超表面,再拓展到三维异向介质,由浅入深,自然拓展,力图从最广泛的意义上建立紧凑型异向介质单元的设计理论和设计方法,探索基于异向介质微波器件设计的新机理和新方法,加速其在微波工程中的应用步伐。

图书在版编目(CIP)数据

紧凑型异向介质:机理、设计与应用/王光明等著. —北京:国防工业出版社,2015.6
ISBN 978-7-118-10034-1

I. ①紧... II. ①王... III. ①电磁场—介质—结构设计 IV. ①O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 126735 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17¼ 字数 391 千字

2015 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 89.00 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

序

科学是永无止境的,它是一个永恒之谜。

——爱因斯坦

科学的发展是一个循环往复、盘旋上升的过程,它萌芽于突发奇想,形成于实践检验,成熟于工程应用。

Metamaterial(异向介质)是指自然界本身并不存在,人们依据电磁理论设计出来的具有某种电响应或磁响应的“特异”人造材料。作为物理学和电磁学的重要分支,Metamaterial 已发展成为固体物理学、材料学、力学、应用电磁学和光子学等多个交叉学科的研究热点和前沿。

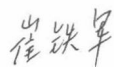
Metamaterial 的发展历程不是一帆风顺的,每一个阶段都经历了争议。**科学假想:**苏联物理学家 V. G. Veselago 最早提出了左手媒质的概念,并从理论上预测了非常规的电磁特性,从此颠覆了常规的“右手”材料世界,对传统理论和物理机制形成了冲击。但由于缺乏实验验证,左手媒质在其提出之后的 30 年时间里一直处于沉睡阶段。**实验验证:**20 世纪 90 年代,J. B. Pendry 等人利用周期金属线和开口谐振环分别实现了人工的负介电常数和负磁导率,为左手媒质的设计打开了大门。随后,D. R. Smith 团队制作出第一块左手媒质,并通过棱镜实验首次观察到了负折射现象,左手媒质逐步成为国际电磁学界引人瞩目的前沿领域,同时对负折射的实验研究极大地丰富了传统的实验方法和测试手段。**蓬勃发展:**等效媒质理论和变换光学理论的提出,“完美透镜”和“隐身斗篷”的设计与实验,使人们对 Metamaterial 的认识上升到前所未有的高度,极大地激发了人们对 Metamaterial 新功能的探索热情,研究范畴得到了空前拓展,如单负媒质、渐变折射率和零折射率媒质、手征媒质、可调控 Metamaterial、量子 Metamaterial、人工表面等离子激元等,工作频段也由最初的微波段拓展至直流、声波段、太赫兹、红外及可见光波段。**推向应用:**随着研究的不断推进,Metamaterial 的部分研究成果开始落地成熟并进入应用领域,例如基于左右手混合传输线的小型化器件在微波集成电路中的应用、渐变折射率媒质在新型透镜中的应用等。目前,以超表面为代表的平面型 Metamaterial 正在推动新一轮的技术革新,孕育着新的理论、实验和应用突破,彰显出巨大的理论意义和工程价值。

国内对 Metamaterial 研究起步稍晚,但发展非常迅速。2004 年国家科技部正式启动了国家重点基础研究(973)项目《新型人工电磁介质的理论与应用研究》,2010 年启动了国家自然科学基金重大项目《新型人工电磁媒质的基础理论与关键技术》,很多著名大学和研究机构都成立了 Metamaterial 课题组,分别从不同角度致力于 Metamaterial 的研究,几乎涉及了所有研究领域,形成了“百花齐放、百家争鸣”的良好氛围,对 Metamaterial 的发展做出了不可磨灭的贡献。一直以来,Metamaterial 的设计理念在不断拓展和更新。起

初,对 Metamaterial 的研究更倾向于形态设计,主要通过单元结构或排列方式操控材料参数。随着研究领域的不断延伸,对 Metamaterial 的研究更倾向于材料新特性、新机制和新功能的实现,更突出对电磁波的精确和超常控制,以完美隐身衣、电磁黑洞等为代表的新功能器件应运而生。全新的 Metamaterial 设计理念深刻地影响了人们的世界观和方法论,极大地推动了科学技术的快速发展。

空军工程大学新材料天线和射频技术课题组率先将分形思想与 Metamaterial 设计结合起来,探索了独具特色的紧凑型 Metamaterial 设计新思路、新方法,取得了一系列创新性研究成果。本书是该课题组多年从事紧凑型 Metamaterial 研究工作的凝练和总结,以紧凑型 Metamaterial 单元设计和应用为主线,由一维左右手混合传输线扩展到二维人工电磁超表面,再拓展至三维 Metamaterial,由浅入深,自然拓展,力图从最广泛的意义上建立紧凑型 Metamaterial 单元的设计理论和设计方法,探索基于 Metamaterial 微波器件设计的新机理和新方法,加速其在微波工程中的应用步伐。

本书内容丰富,层次清晰,前后联系紧密,是 Metamaterial 系列专著的一个补充,可作为从事 Metamaterial 研究的科技工作者、研究生及高年级本科生的参考书。特此作序推荐。



2014 年于南京

前 言

从双负特性预言到第一个负折射率验证,异向介质经历了一个从假设预想到真实存在的发展。从“完美透镜”到波束偏折器,异向介质的研究范畴得到了空前拓展,材料参数经历了由窄带双负到宽频渐变。从等效媒质理论到变换光学理论,异向介质经历了一个从参数调控到功能设计的大跨越,同时两大理论的建立使得异向介质设计得以形成一个闭合回路。而变换光学理论与非均匀各向异性异向介质的完美结合开创了人类操控电磁波的新纪元,使人类控制电磁波的能力达到了空前的高度,一批新功能器件,如完美隐身衣、电磁黑洞、电磁波控制器、场旋转器、波束偏折器、场集中器等如雨后春笋般破土而出。如今,以二维异向介质为代表的突变相位超表面的实现和广义折射定律的发现,开辟了人们控制电磁波和光的全新途径和领域,正在推动该领域产生一场深层次的技术革新。

历经十余年的发展,异向介质从最初的双负左手媒质逐渐发展成为一个具有多分支且概念完备的丰富体系,是近年来固体物理、材料科学、力学、应用电磁学和光电子学等多个交叉学科的研究热点和前沿。异向介质由最初的电磁结构设计发展到全新的材料理念设计,其应用也由简单的器件性能改良到复杂的新功能设计,给人们的世界观和方法论带来了巨大变革,同时推动了传统研究方法和测试技术的大发展。作者所在的空军工程大学新材料天线与射频技术课题组是最早将分形几何思想融入异向介质设计的单位之一,课题组自成立起就紧跟学科前沿,以等效媒质理论为依据,以最基础的异向介质单元设计着手,系统研究了分形几何在 CRLH 等异向介质单元的小型化机理和电磁扰动,以分形异向介质设计为代表提炼了紧凑型异向介质单元设计理论与一般设计方法并对其在小型化新功能微波器件中的应用展开了系统研究,而本书精选了课题组近年来在该领域的研究成果,其中分形几何与异向介质的结合是本书内容的特色之处。

本书以许河秀博士攻博期间的研究工作为基础,蔡通博士的研究工作为补充,全书共分 9 章,以紧凑型异向介质单元设计理论和应用为主线,由一维 CRLH TL(第 2、3、4 章)扩展到二维人工电磁超表面(第 5、6、7 章),再扩展到三维异向介质(第 8、9 章),由浅入深,自然拓展。第 1 章为绪论,介绍异向介质的基本概念、历史沿革、异向介质研究进展以及紧凑型异向介质的研究意义等。第 2 章介绍紧凑型集总 CRLH TL 的设计方法及其在新宽频、双频理论中的应用。第 3 章介绍紧凑型分布 CRLH 单元设计机理与应用。第 4 章介绍一类具有双并联支路的 CRLH TL 理论、奇异电路特性、实现方法与实验验证。第 5 章介绍新型二维 CRLH TL 理论、实验以及在具有奇异辐射特性的多频谐振天线中的应用,包括多频线极化天线,多频极化多样性天线,全向辐射天线和多频高极化纯度天线。第 6 章介绍空间电磁超表面设计及多频电磁波操控应用研究,包括多频传输、多频反射操控以及多频极化操控。第 7 章介绍波导电磁超表面设计及其在微带天线中的应用。第 8 章介绍三维异向介质设计及高定向性透镜天线应用研究,包括高定向性喇叭透镜天线、三

维半鱼眼透镜天线以及三维平板透镜天线。第9章介绍基于三维异向介质的新功能器件设计与实验,包括基于光学变换理论的超散射幻觉隐身器件以及具有高分辨率成像的聚焦透镜。

本书中的部分研究工作是许河秀博士在东南大学毫米波国家重点实验室访问期间完成,期间崔铁军教授给予了悉心指导,实验室 Meta 小组的全体老师和学生给予了很大鼓励和帮助,在此,对他们表示由衷地感谢。

本书除署名作者外,课题组已毕业的安建博士、曾会勇博士也参与了本书的部分研究工作,在读研究生李海鹏、侯海生、郭文龙、李唐景等对书稿进行了认真校对,在此一并对他们表示感谢。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目的资助(项目编号:60971118, 61372034);另外,还得到了空军工程大学优秀博士论文扶持基金以及博士论文创新基金的资助(项目编号:KGD080913001, DY12101),在此表示诚挚的感谢。

有感于学海无涯,作者所做的工作只涉及异向介质很小的一部分,另外由于作者水平有限,仓促之余成稿,难免欠妥之处,恳请读者和有关专家批评指正,以便今后修改和提高。

作者
2014年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 异向介质的概念、发展历史及存在的问题	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 发展历史	2
1.1.3 存在的问题	5
1.2 异向介质研究进展	7
1.2.1 左手异向介质	7
1.2.2 单负异向介质	11
1.2.3 渐变折射率与光学变换异向介质	13
1.2.4 零折射率异向介质	16
1.2.5 高折射率异向介质	19
1.3 本书主要内容	19
第 2 章 紧凑型集总 CRLH TL 设计与应用	23
2.1 任意分形集总 CRLH TL 的精确设计方法	23
2.2 CRLH TL 双工原理与应用	25
2.2.1 原理与设计	25
2.2.2 加工与实验	27
2.3 CRLH TL 双频理论与环形电桥应用	29
2.3.1 双频理论与电桥设计	30
2.3.2 电桥实验	31
2.4 单 CRLH TL 宽频理论与移相器应用	34
2.4.1 宽频理论	34
2.4.2 单级开关移相器设计	35
2.4.3 四位数字移相器的设计与实验	38
2.5 双 CRLH TL 宽频理论与巴伦应用	42
2.5.1 宽频理论与验证	42
2.5.2 巴伦设计与实验	44
第 3 章 紧凑型分布 CRLH 单元设计机理与应用	46
3.1 基于 CSRR 的分布 CRLH 单元小型化机理与设计	46
3.1.1 CRLH 单元电路参数提取与设计方法	46
3.1.2 串联支路降频方法与漏波天线设计	50
3.1.3 CSRR 的小型化机理与验证	56

3.1.4	小型化 CSRR 的多频阻带特性与超宽带应用	62
3.2	基于 CSRRP 的新型分布 CRLH 单元分析、设计与零相移验证	66
3.2.1	CRLH 单元、等效电路与分析	66
3.2.2	电小平衡 CRLH 单元设计与零相移特性	69
3.2.3	零相移特性验证	71
3.3	基于 GC/SSI 的分布 CRLH 单元设计与高隔离双工器	72
3.3.1	CRLH 单元等效电路与色散曲线	72
3.3.2	高隔离双工器	75
3.4	基于 WDC/MSSI 的分布 CRLH 单元设计与小型化 Bulter 矩阵	76
3.4.1	CRLH 单元、等效电路与分析	76
3.4.2	电路参数提取方法	79
3.4.3	小型化 Bulter 矩阵	81
第 4 章	双并联支路 CRLH TL 理论与验证	84
4.1	双并联支路 CRLH TL 理论与分析	84
4.2	基于 CCSRR 的 CRLH 单元实现与验证	88
4.2.1	CRLH 单元与电磁特性分析	89
4.2.2	平衡情形下双并联支路验证	91
4.2.3	非平衡情形下双并联支路验证	94
4.3	基于分形 CSRRP 的 CRLH 单元实现与验证	97
4.3.1	CRLH 单元与电磁特性分析	97
4.3.2	双工器设计与双并联支路验证	99
4.3.3	双频零阶谐振理论与验证	101
第 5 章	新型二维 CRLH TL 理论、实验与多频谐振天线设计	105
5.1	基于 CSRR 的二维 CRLH TL 理论与成像聚焦实验	105
5.1.1	二维 CRLH TL 结构、等效电路与理论分析	105
5.1.2	负折射率成像聚焦实验	109
5.2	基于 CSRR 的二维 CRLH 多频谐振天线	114
5.2.1	多频原理与分析	114
5.2.2	多频线极化天线	116
5.2.3	多频极化多样性天线	118
5.3	基于 CSRR 的二维 CRLH 全向辐射天线	124
5.4	基于 CSR 的蘑菇二维 CRLH 双频双模天线	128
5.4.1	单元、等效电路与工作机理	128
5.4.2	双频双模天线设计与实验	130
5.5	分形蘑菇二维 CRLH TL 的高阶模式抑制机理与高极化纯度天线	133
5.5.1	CRLH 单元与模式分析	134
5.5.2	天线设计与实验	136
第 6 章	空间电磁超表面设计及多频电磁波操控应用研究	141
6.1	紧凑型异向介质单元的多频机制与设计方法	141

6.2	宽角度极化不敏感三频吸波器设计与验证	143
6.2.1	基于传输线理论的多频吸波分析方法	143
6.2.2	多频吸波器设计与实验	146
6.3	多频圆极化器与非对称传输频谱滤波器设计与验证	151
6.3.1	极化转换与非对称传输理论与分析	152
6.3.2	基于 H-SRR 手征单元的多频圆极化器	153
6.3.3	基于螺旋手征单元的双频圆极化器与频谱滤波器	159
第 7 章	波导电磁超表面设计及其在微带天线中的应用	165
7.1	波导磁负超表面设计与 MIMO 天线解耦	165
7.1.1	解耦原理	166
7.1.2	紧凑型波导磁负单元等效电路与分析	166
7.1.3	基于波导磁负超表面的 MIMO 天线设计	169
7.2	基于 CSR 的波导电负超表面设计与 MIMO 天线解耦	172
7.2.1	紧凑型波导电负单元与分析	172
7.2.2	基于波导电负超表面的 MIMO 天线设计	173
7.3	基于 CAPSL 的波导电负超表面设计与 MIMO 天线解耦	176
7.3.1	单元、工作机制与分析	176
7.3.2	基于电小波导电负超表面的 MIMO 天线设计	178
7.4	基于波导电抗超表面的新型圆极化天线设计	181
7.4.1	波导电抗单元分析	182
7.4.2	紧凑型各向异性谐振器分析	183
7.4.3	圆极化天线设计与实验	186
7.5	基于波导磁电超表面的微带天线频带展宽原理与设计	191
7.5.1	MED-WG-MS 单元和频带展宽原理	192
7.5.2	电小微带天线频带展宽方案验证	194
第 8 章	三维异向介质设计及高定向性透镜天线应用研究	199
8.1	复合三维 AZIM 单元设计与喇叭透镜天线	199
8.1.1	复合三维 AZIM 透镜的阻抗匹配与定向辐射机理	200
8.1.2	复合三维 AZIM 单元小型化机理与设计	201
8.1.3	高定向性透镜天线实验	206
8.2	分形 GRIN 单元设计与三维宽带半鱼眼透镜天线	210
8.2.1	分形 GRIN 单元小型化机理与设计	211
8.2.2	宽带半鱼眼透镜天线系统设计与实验	213
8.3	基于分形 GRIN 单元的三维宽带波束可调平板透镜天线	220
8.3.1	平板透镜天线宽带匹配原理	221
8.3.2	透镜天线系统实现与可调多波束形成	222
8.3.3	实验与讨论	225
第 9 章	基于三维异向介质的新功能器件设计与实验	231
9.1	超散射幻觉隐身器件	231

9.1.1	光学变换理论设计	232
9.1.2	异向介质设计与超散射幻觉器件样品制备	235
9.1.3	幻觉器件实验	239
9.2	宽带高分辨率成像器件.....	243
9.2.1	基于三维传输线单元的等效电磁参数调控理论	243
9.2.2	成像器件设计与制作	246
9.2.3	成像实验	248
参考文献.....		252

第 1 章 绪 论

1.1 异向介质的概念、发展历史及存在的问题

1.1.1 基本概念

异向介质 (Metamaterial) 单元是指自然界中本身并不存在,人们依据电磁学理论设计出来的具有某种电响应或磁响应的“特异”人造亚波长结构单元。其中“特异”体现为两个方面:一是非常规电磁特性;二是特异的本构材料参数。而 Metamaterial^[1-3],中文名也称异向介质^[4,5]、人工电磁材料(媒质)^[6-8]、超材料^[9]、特异媒质以及复合材料和超级媒质等,是指在左手异向介质^[10]的基础上发展起来,通常由异向介质单元按周期或某种有规律的非周期延拓组成。这里作者采用浙江大学孔金瓯教授和东南大学崔铁军教授将其命名为异向介质和人工电磁材料的建议。异向介质介电常数和磁导率与普通介质有明显区别,具有天然介质所不具备的超常物理性质,是近年来国际固体物理、材料科学、力学、应用电磁学和光电子学等多个交叉学科的研究热点和前沿。

异向介质单元充当了自然界原子、分子,其结构和排列决定复合媒质的电磁、物理和光学特性,鉴于此,人们有时也将异向介质单元称为宏观粒子“meta - atom”或“meta - molecule”。尽管如此,异向介质单元具有自然界原子、分子所不具有的独特优势:①自然界原子种类有限,仅包括元素周期表中的一百多种,而异向介质单元根据不同结构可以有无穷多种;②自然界原子排列方式有限,而异向介质单元排列方式多样,可以是周期、随机、或者介于周期和随机之间的某种有规律的非周期,因而异向介质能打破传统材料的限制,实现对介电常数、磁导率甚至电磁特性的任意操控;③操控人工异向介质单元更容易,不需要像原子和分子一样在纳米级水平进行操控,只需在毫米、微米量级即可,因此采用传统的印制电路板技术 (PCB) 和光刻技术即可实现;④自然界材料大都具有各向同性,而异向介质可以各向异性,在调控电磁波方面具有更高的自由度。

经过 10 余年发展,异向介质已经成为一个具有多分支且概念非常完备的丰富体系。研究内容已经涵盖电负异向介质^[11-19]、磁负异向介质^[20-31]、块状双负左手异向介质^[32-54]、复合左右手传输线 (CRLH TL)^[55-81]、渐变折射率异向介质 (Gradient refractive - index metamaterial, GRIN)^[82] 和零折射率异向介质 (Zero - index metamaterial, ZIM)^[83]、手征媒质或双各向异性介质^[84,85]、可调异向介质^[86]、量子异向介质^[87]、非线性异向介质^[88]、电磁带隙结构 (Electromagnetic Band Gap Structure, EBG)^[89]、光子晶体^[90] 以及通过异向介质实现的等离子激元^[91,92] 等,与图 1.1(a) 中异向介质树描绘的研究内容和发展历程基本吻合^[93]。需要说明的是,通常意义上的 EBG 和光子晶体由于单元尺寸与波长可以相比拟,其电磁特性不能采用等效媒质参数来表征,且只能视为一种结构而非均匀介质,但由于其不同于传统介质的特异电磁特性这里也将它们归为异向介质范

畴。当然,根据材料参数为标量还是张量还可以将异向介质分为各向同性媒质和各向异性媒质。

图 1.1(b) 直观地表征了各类介质在 $\varepsilon - \mu$ 象限的分布,其中 $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0$ 和 $\mu_r = \mu/\mu_0$ 分别为介质的相对介电常数和相对磁导率, ε_0 和 μ_0 分别为空气的介电常数和磁导率。可以看出,自然界绝大多数材料离散地分布于第 I 象限中 $\varepsilon_r > 1$ 和 $\mu_r = 1$ 的直线上,只有极少数特殊媒质如电等离子体和工作于等离子频率附近的金属分布在第 II 象限($\varepsilon_r < 0$, $\mu_r > 0$)以及工作于铁磁谐振频率附近的铁氧体分布在第 IV 象限($\varepsilon_r > 0$, $\mu_r < 0$)。因此自然介质的材料属性非常有限,而且不能根据人们的意愿进行任意操控,即便是第 I 象限的绝大多数材料属性也需要异向介质来实现。随着异向介质的不断发展,其可以实现的材料属性分布范围将不断扩大直至完全覆盖 4 个象限,包括位于第 I 象限的高折射率异向介质,第 II 象限($\varepsilon_r < 0$, $\mu_r > 0$)的电负异向介质,第 III 象限($\varepsilon_r < 0$, $\mu_r < 0$)的块状左手异向介质和 CRLH TL,第 IV 象限($\varepsilon_r > 0$, $\mu_r < 0$)的磁负异向介质以及位于 x 轴和 y 轴上的零折射率异向介质。

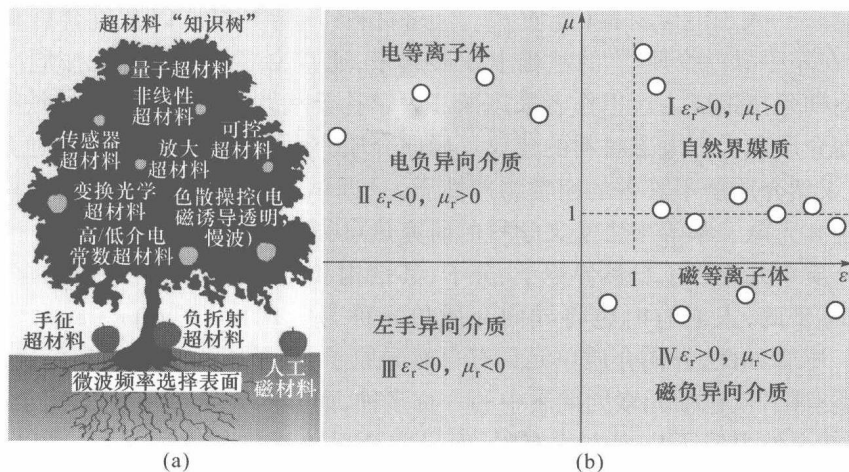


图 1.1 异向介质数及 $\varepsilon - \mu$ 象限分布

(a) 文献[93]描绘的异向介质树;(b) 各类介质的 $\varepsilon - \mu$ 象限分布。

1.1.2 发展历史

1968 年,苏联物理学家 V. G. Veselago 提出了左手媒质的概念并从理论上对这类材料的电磁特性进行了系统研究^[10]。但因为缺少实验验证,左手异向介质的概念提出之后并没有引起人们的重视。1996 年和 1999 年, J. B. Pendry 教授利用周期排布的金属线 (Rods) 和开口环谐振器 (Split Ring Resonators, SRR) 在微波段分别实现了负介电常数^[11]和负磁导率^[20]。2000 年, Smith 等将金属线媒质和 SRR 结构合理排布,首次制备出微波段同时具有负介电常数和负磁导率的左手异向介质^[32],同年 Pendry 理论证明了介电常数和磁导率同时为 -1 的左手异向介质可以放大凋落波,突破衍射极限并实现“完美成像”^[94],这个颠覆性的结论使人们研究左手异向介质的热情空前高涨。2001 年, D. R. Smith 等通过棱镜实验首次观察到了左手异向介质的负折射率现象^[33],如图 1.2 所示,这项突破性的成果发表在 *Science* 上,为左手异向介质的研究热潮奠定了历史性基础。

2002 年, Eoch 等提出了近零折射率媒质的概念并利用它来改善天线的方向性^[83], Engheta 提出了超薄谐振腔的概念, 发现当右手介质尺寸 d_1 , 折射率 n_1 与左手介质尺寸 d_2 , 折射率 n_2 满足 $d_1/d_2 = n_2/n_1$ 时, 谐振腔的物理尺寸与工作波长无关, 左手介质可以对右手介质进行共轭相位补偿, 突破了传统谐振腔半波长的限制^[95], Eleftheriades^[96]、Itoh^[97] 和 Oliner^[98] 等几乎同时提出了 CRLH TL 的概念, Smith 等初步建立了对左手异向介质电磁参数进行定量描述的等效媒质理论^[99]。基于科学家们的多项发现, “负折射率左手异向介质”被 *Science* 评为 2003 年度十大科技进展之一。

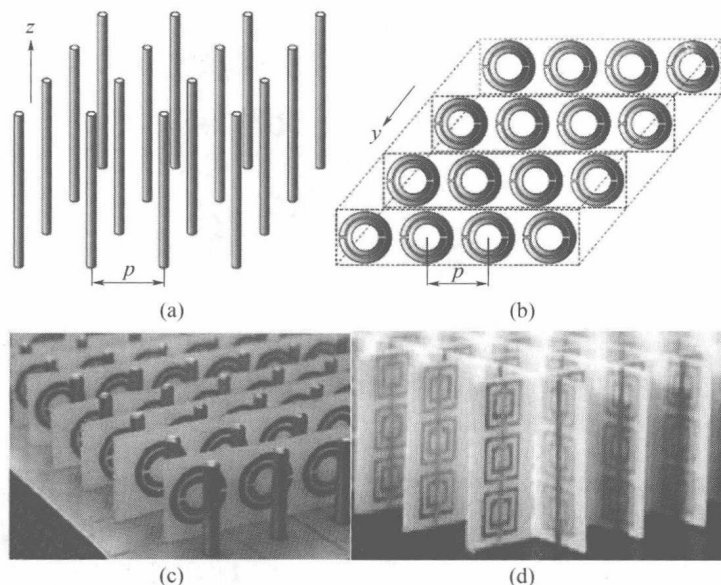


图 1.2 D. R. Smith 等的实验结果

- (a) 微波段实现等效负介电常数的连续金属线阵列^[11];
 (b) 微波段实现等效负磁导率的 SRR 阵列^[20]; (c)、(d) 基于金属线与 SRR 的负折射率材料^[33]。

2004 年, Pendry 发现各向同性手征媒质可以实现负折射^[84]。2005 年, Fang 等采用负介电常数银膜在光波段实现了近场超分辨率成像^[100], 如图 1.3 所示, 同年 Smith 等提出了渐变折射率媒质的概念, 并基于 GRIN 实现了电磁波的弯曲传播^[82]。2006 年, Pendry 等提出了光学变换理论和“完美”隐身衣的概念, 实现了对电磁波传播途径的精确控制, 使得电磁波可以没有干扰地绕过被隐身物体后回到原先的传播方向上^[101]。5 个月后, Smith 等首次通过“隐身斗篷”^[102] 实验验证了“完美隐身”的概念, 如图 1.4 所示, 该成果被 *Science* 评为 2006 年度十大科技进展之一。2007 年, 异向介质又被 *Materials Today* 评选为材料科学领域在过去 50 年间的十大进展之一。“隐身斗篷”的实现极大地激发了人们对异向介质新功能、新特性的探索热情, 而渐变折射率异向介质和光学变换理论的提出作为异向介质的一次革命和飞跃, 使得人们对异向介质的认识上升到前所未有的高度, 异向介质的研究范畴不再局限于左手异向介质的双负特性而更多地体现于对电磁波的精确和超常控制。异向介质的工作频段由最初的微波段逐渐向低频声波段^[103] 和高频毫米波、太赫兹、红外甚至可见光波段^[21, 104-106] 拓展。

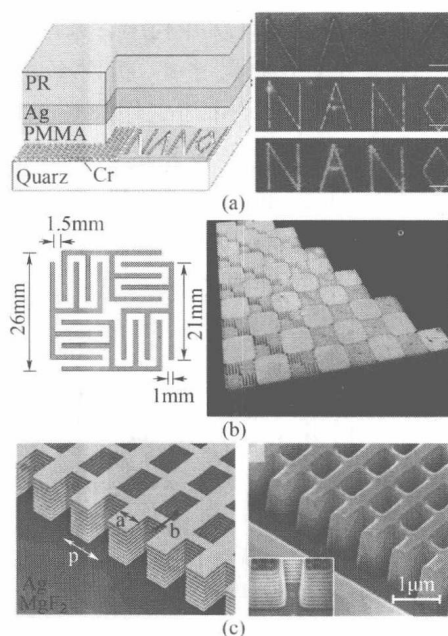


图 1.3 Fang 等的实验结果

- (a) 基于负介电常数银膜的光波段近场超分辨率成像^[100];
 (b) 声波宽带迷宫负折射异向介质^[103]; (c) 三维光学负折射率异向介质^[105]。

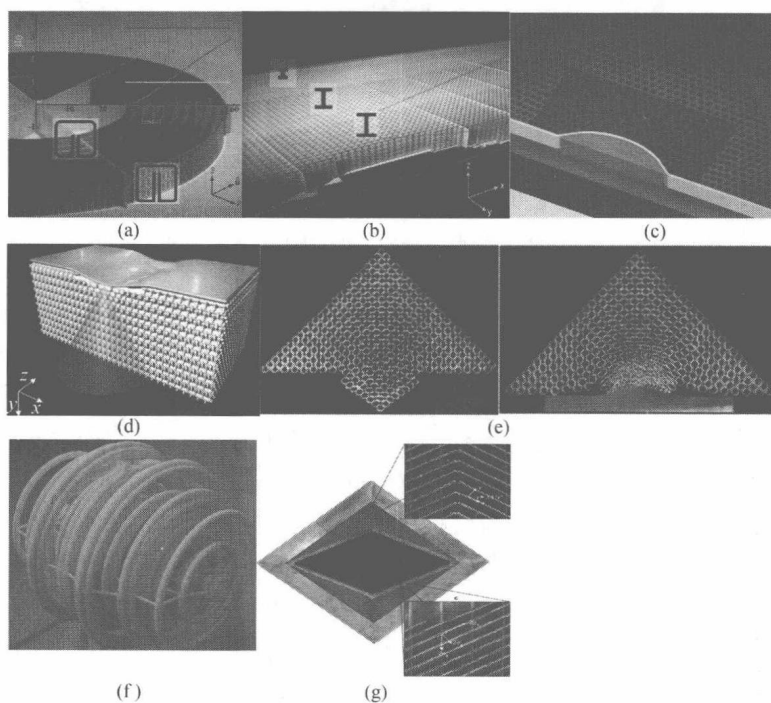


图 1.4 基于光学变换理论的完美隐身衣

- (a) 第一个异向介质隐身斗篷^[102]; (b) 宽带微波地毯隐身衣^[110]; (c) 二维光学地毯隐身衣^[111];
 (d) 三维光学地毯隐身衣^[112]; (e) 基于弹性形变的地毯隐身衣^[113]; (f) 声波隐身衣^[114]; (g) 一维全参数隐身衣^[116]。

2008年,Landy等提出了超薄完美吸波的概念,由于异向介质单元的谐振吸收,吸波器不需要金属反射屏就可以具有很高的吸收率^[107],Pendry等基于光学变换理论提出了地毯隐身衣的概念^[108]。2009年,Chan等基于光学变换理论提出了幻觉隐身的概念^[109],其思想在于两方面:一是采用“折叠变换”所需要的负折射异向介质来抵消物体散射场;二是加入“恢复介质”替换原来物体的散射场从而达到欺骗的目的。后来一大批实验工作被相继报道,如Liu等基于渐变工字型异向介质单元制作的首个二维宽带隐身地毯^[110],Cui等基于多层非均匀介质打孔制作的三维宽带地毯隐身衣^[7],Valentine制作的二维^[111]和Ergin设计的三维^[112]光波段隐身衣。2012年,Smith等基于弹性材料设计的隐身衣能根据形变程度获得隐身所需要的非均匀材料参数,具有很大的灵活性和潜在应用^[113],2013年,Sanchis等提出了基于散射抵消的三维非对称声波隐身衣^[114],Cui等基于变换静电学并采用负阻网络实现了DC外部隐身衣^[115],Smith等基于光学变换理论首次制作了全参数一维单向隐身衣,克服了以往简化参数隐身衣以牺牲隐身效果为代价的缺陷^[116]。同时,基于散射抵消^[117]和阻抗匹配传输线网格^[118]的隐身衣也被相继报道出来。

起初,对异向介质的研究主要体现在它的前沿科学价值,随着研究的不断深入,人们开始探讨异向介质的应用价值^[119,120]。异向介质的一些独特电磁特性在国防、通信、卫星、导航以及无线传输上均显示了巨大的潜在应用价值:一方面,异向介质的新颖电磁特性可以用来减小微波器件和天线的尺寸,改善其性能,拓展工作带宽,产生多个工作模式等,从而引发新一轮高性能电磁器件和天线的设计和应用研究,如宽带巴伦^[55,60,121-123]、功分器^[57,124-129]、分支线耦合器^[56,130-133]、直接耦合器^[56,134]、双工器^[56,126,135-137]、环形电桥^[56,138-140]、移相器^[126,141,142]、Butler矩阵^[143,144]、放大器^[145]、混频器^[146]、振荡器^[147]、延迟线^[121,148]、滤波器^[57,149-154]以及天线^[19,31,59,155-202]等。另一方面,对异向介质的深入研究促进了新概念的突破和新物理特性、超常规物理机制的发现,打破了传统电磁理论的限制,使得以往无法实现的超常规功能器件被不断设计出来,如高分辨率成像透镜^[55,203-210]、隐身衣^[7,9,110-118]、幻觉光学器件^[5,8,211,212]、超薄谐振腔^[213]、吸波器^[214-220]、场旋转器^[221]、电磁波控制器^[9,222-244]、波束偏折器^[245]、无线能量传输器^[246]、场集中器^[247,248]、极化器和极化控制器^[249-256]等。

1.1.3 存在的问题

尽管理论上异向介质的奇异电磁特性和新物理机制为其应用研究描绘了美好蓝图,但实际设计和制作过程中迫切需要一些性能优良的异向介质单元来实现。即便物理现象再完美,高损耗的异向介质单元也会使实验大打折扣,甚至完全没有预期效果,因此异向介质单元的设计始终是异向介质研究的关键和核心问题。Pendry和Smith开拓性的工作^[33]以后,由于损耗大、带宽窄以及电磁特性不理想,人们开始探索和设计性能更加优异的单元。各种不同形状和性能的电结构和磁结构被相继报道出来,有的能减弱谐振特性以降低损耗,有的能实现小型化,有的便于不同情形下的加工,有的便于激励和耦合,有的便于不同频段的应用等。

尽管如此,异向介质的设计仍面临一些问题和重大挑战:一是如何实现异向介质单元的多频工作和模式操控。以往报道的绝大部分单元是单频窄带工作,而对于双频、多频、宽频工作的报道较少。部分多频异向介质单元基于不同频率的一种或多种单元进行简单

组合,这种实现方式简单、直观但单元尺寸往往很大。二是如何实现更加小的单元使其构成块状结构的宏观特性更适合采用等效媒质理论来描述,这是所有从事异向介质研究人员共同面临的一个科学问题。较大的单元尺寸使得基于等效媒质理论设计的单元电磁特性与最终异向介质电磁特性有较大偏差,同时增强了入射电磁波的衍射效应,使得出射电磁波波前不平整,信号起伏和不连续性较大,各向异性、空间色散效应以及单元互耦等问题极为突出。正是这些问题的存在使得基于异向介质单元设计的新型器件和天线性能亟待改善,例如器件和天线的尺寸较大、通带插损恶化、天线辐射方向图不对称、天线辐射效率、增益、极化纯度以及解耦效率不理想等。

紧凑型异向介质单元具有以下几大优点:①由单元周期排列的块状结构的群集电磁特性更适合采用宏观电磁参数来表征和等效,由于复杂的电磁功能可以准确通过调控单元的物理参数来实现,因此等效媒质理论更能精确指导设计,提高了一次设计成功率;②相同晶格常数情形下,单元间相互作用将减小;③基于其设计的电磁器件、平面电路和天线^[57]更容易实现小型化,顺应了现代无线通信系统中高集成电路需求;④寄生衍射效应的影响减弱,单元构成异向介质的过程更加类似于原子、分子构成自然物质的过程;⑤电磁参数收敛速度加快;⑥基于分形几何的紧凑型异向介质单元更容易实现多频工作和模式操控。

除了采用高介电常数和高磁导率的电介质基板外,目前单元的小型化技术主要有以下几种:①蜿蜒或螺旋技术^[24,38];②多环与多臂螺旋技术^[23,85];③分形技术^[27,76,85];④多层耦合技术^[60];⑤容性加载嵌入电路技术^[156];⑥集总元件加载技术^[207]等。虽然部分紧凑型异向介质单元被不断报道,但至今仍没有任何关于紧凑型异向介质单元设计的一般方法和准则,且应用研究还处于起步阶段。另外,紧凑型异向介质的工作机理和奇异电磁特性仍属于基础研究阶段。最后,上述小型化技术还存在众多缺点,高介电常数电介质板使得带宽急剧恶化,高磁导率介质能保持工作带宽,但自然界绝大多数材料都是非磁性的,难于制作或成本较大;容性加载嵌入电路由于其三维结构使得不易采用PCB进行加工,需要进行特殊组装,限制了其应用和推广;集总元件加载制作成本昂贵,大量焊接会造成寄生右手效应并给加工带来损耗和误差,且使加工变得复杂,同时由于自谐振集总元件只能低频工作,不能像分布结构一样响应空间电磁波,应用场合受限;多层耦合技术减小了某个维度的尺寸,但增加了厚度。

综上所述,紧凑型异向介质的发展与应用研究的现状是:思想十分活跃,理论面临挑战,研究零散不成系统,系统的设计方法尚未建立,新物理特性尚未充分挖掘,器件和天线应用要求非常迫切。因此,无论是从异向介质所面临的挑战还是从新概念超常规器件、天线的设计和性能提高上都亟待对紧凑型异向介质单元专门进行立项和研究。鉴于这一基本特征,课题组对紧凑型异向介质单元设计理论、方法和准则展开系统研究,深入挖掘紧凑型异向介质单元的奇异电磁特性并全面探讨其在天线、常规和超常规器件中的应用。对紧凑型异向介质单元的深入研究有望在新机理、新方法上取得突破,可望向均一化媒质迈进一步,提高一次设计成功率,为异向介质设计提供新思路和新方法,因此其研究成果将直接丰富等效媒质理论,有望加速异向介质的应用步伐和引发小型化高性能器件和天线的研制。