



超材料设计 及其在隐身技术中的应用

Metamaterial Design and Applications
in Stealth Technology

屈绍波 王甲富 马华 徐卓 张介秋 著



科学出版社

超材料设计 及其在隐身技术中的应用

Metamaterial Design and Applications
in Stealth Technology

屈绍波 王甲富 马 华 徐 卓 张介秋 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍超材料的设计原理及其在隐身技术中的应用,全书分为10章。第1章为总论,概述超材料的发展历程和研究现状,并对超材料的发展趋势进行了展望;第2~7章详细介绍基于金属和电介质结构的电超材料、磁超材料以及左手材料的设计原理、加工制备和实验测试,涵盖了超材料设计的多种物理机制和实现手段,为超材料的设计与实现提供了理论基础和技术手段。第8~10章是超材料隐身技术应用部分,详细介绍超材料完美隐身技术、超材料吸波体和超材料频率选择表面的应用设计及实验。

本书可供从事超材料理论与应用研究的科技工作者、研究生以及高年级本科生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

超材料设计及其在隐身技术中的应用/屈绍波等著. —北京:科学出版社, 2013

ISBN 978-7-03-032634-8

I. ①超… II. ①屈… III. ①复合材料-设计②复合材料-应用-隐身技术
IV. ①TB33

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第220534号

责任编辑:王 钰 / 责任校对:耿 耘
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年3月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2013年3月第一次印刷 印张: 17 1/4

字数: 331 000

定价: 70.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

序

我一贯力求思想不受束缚

——达尔文

“否定之否定”螺旋上升是科学技术发展的重要模式，始于思想的萌发，发展于量的积累，成长于质的飞跃。

在电磁学、光学、材料学和微波工程技术等领域，人们习惯用介电常数和磁导率来描述材料的电磁本构性质，并且认为这两个材料参数的相对值（相对介电常数、相对磁导率）通常是大于或等于1。因此，当苏联科学家 V. G. Veselago 在 1968 年撰文研究介电常数和磁导率同时为负值材料的奇异特性时，人们并未给予重视。20 世纪 90 年代末，英国的 J. B. Pendry 教授发现可采用金属线和金属谐振结构单元在微波频段分别实现负介电常数和负磁导率。2000 年，美国的 D. R. Simth 教授等在微波频段首次实现了介电常数和磁导率同时为负的材料，并由此引发了思想上的变革。人们首次明确地意识到，由人工构建的基本“粒子”构成的“材料”可超越自然材料本构参数的限制，实现自然材料所不具有的物理特性和功能。这些人工材料被统称为“超材料”（metamaterial）。

自然材料构成的基本粒子为原子、分子和离子，一般其尺度在纳米以下。不可否认，人工构建亚纳米尺度的超材料“粒子”是非常困难的，但这并没有阻碍超材料快速向前发展的脚步，因为理论与实验发现只要工作波长远大于超材料基本组成“粒子”的尺寸，即可用等效介电常数和等效磁导率来描述其电磁本构特征。由于微波频段的波长相对较长，相应的超材料基本组成“粒子”的可实现性强，微波超材料成为超材料发展的先锋，也由此微波超材料由最初的理论研究不断发展至今日的应用研究热潮。随着研究的持续深入，微波超材料快速向微纳尺度结构单元构成的太赫兹、红外和可见光超材料发展。

当然，超材料既不是凌驾于传统材料之上的“超级材料”，也不仅限于“科学家们的奇思妙想”，而是给从事科研工作的人们提供了一种

理念：在遵循客观规律的前提下改造自然、创造新事物，这也正是超材料英文“metamaterial”的本意。“meta-”意为“……之后，超越……”，“material”即“材料”，因此，metamaterial本身具有“对自然材料进行改造后，具有自然材料所不具有物理性质或功能的人工材料”的含义。简言之，超材料不仅是一种新的材料形态，更是一种材料设计的新理念，给人们在思维方式带来了革命性的转变。超材料给人们的理念是“一切皆有可能”，人们的思维不再受限于自然材料参数和功能的限制。解放思想，这是超材料给我们最大的财富。

在超材料发展初期，国内研究者就对超材料给予了充分的关注，国内众多知名大学都活跃在这一舞台，并且对超材料的发展做出了引人瞩目的贡献。本书著者所在的课题组是国内最早开展超材料研究的团队之一，在超材料的理论、设计及应用方面已取得了一系列创新性研究成果。本书是该课题组对其多年从事超材料研究工作的总结与凝练，内容主要包括超材料的仿真设计、实验验证、性能调控及其在隐身技术中的应用。本书以目前超材料研究的核心问题——超材料的设计与实现——为主线，对金属结构超材料、全介质超材料以及二者结合的陶瓷基超材料做了论述，并针对军事应用，对超材料在完美隐身技术、吸波隐身技术以及频率选择表面技术的应用进行了论述。

本书内容由浅入深，章节脉络清晰，是超材料初学者的一本入门书，也是一本优秀的参考书，特此作序推荐。



2011年8月

前 言

超材料是近年来国际学术界的一个研究热点，它的发展历史仅有10年；超材料也是一个快速发展中的研究领域，新思想、新成果、应用新领域不断涌现，令人目不暇接。超材料是一种由亚波长单元结构组成的人工复合材料，它具有常规材料所不具备的奇异物理性质，能够突破常规材料的限制，实现常规材料所不能完成的一些独特功能。超材料不单是一种材料形态，也代表一种新的材料设计理念，给人们在世界观和方法论上带来革命性的改变。作者所在的课题组是国内较早开展超材料研究的单位之一，课题组对超材料的物理机制、设计方法、制备工艺、性能测试、应用技术等方面进行了研究，本书主要介绍课题组近些年来的研究成果，我们遴选研究工作中最成熟、最重要的内容进行了提炼和总结，以供超材料领域研究者参考。

本书分为10章。第1章为总论，概述了超材料的发展历程和研究现状，并对超材料的发展趋势进行了展望。第2~4章分别介绍了金属结构的磁超材料、电超材料以及左手材料的设计原理和方法。第5章、第6章分别介绍了基于介质谐振器的全介质超材料以及由介质谐振器和金属混合构成的左手材料的物理原理、设计与性能调控方法。第7章是多频带、三维各向同性和可调超材料的设计和性能研究，以满足在实际应用中的特殊性能要求。第8~10章重点介绍了超材料在隐身技术中的应用，包括超材料完美隐身技术、超材料吸波体以及超材料频率选择表面等方面的内容。

本书除署名作者外，课题组已毕业及在读研究生杨一鸣、顾超、周航、王新华、吴翔、陈春晖等同学也参与了本书的部分研究工作，袁航盈、王军、鲁磊等同学进行了书稿的校正，借此机会，作者一并向他们表示衷心的感谢。

在本书成稿过程中，受到了空军工程大学杨晓铁教授、张多林教授、张军教授、张立副教授的鼓励和支持，在此向他们表达诚挚的谢

意。感谢西安电子科技大学唐家明教授、西安交通大学宋晓平教授的指教与帮助。感谢与西安交通大学魏晓勇教授、张安学副教授、夏颂博士的有益讨论。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目（项目编号：10474077、50632030、60871027、61071058）的资助，在此表示由衷的感谢。

由于作者水平有限，最后成书的时间也很仓促，书中难免有欠妥之处，恳请读者和有关专家提出宝贵意见，以便今后修改和提高。

作者

2011年7月

目 录

序

前言

第 1 章 超材料的概念、研究现状及发展趋势	1
1.1 超材料的概念及基本特征	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 基本特征	1
1.1.3 几种典型的超材料	2
1.2 超材料的研究现状	3
1.3 超材料的发展趋势	6
1.4 超材料的应用研究	7
1.4.1 超材料应用于传统微波器件、天线和天线罩性能的提升	8
1.4.2 新型功能器件与传感器	8
1.4.3 新型光回路与光学器件	8
1.4.4 隐身新技术	8
1.4.5 声波超材料成像与声波隐身技术	9
参考文献	9
第 2 章 基于金属结构的磁超材料设计	18
2.1 磁超材料的概念及基本特征	18
2.1.1 磁超材料的概念	18
2.1.2 磁超材料的基本属性	18
2.2 开口谐振环磁超材料及其理论模型	19
2.3 磁超材料的单回路镜像对称设计原理	20
2.3.1 磁谐振器金属结构单元设计原理	20
2.3.2 磁谐振器设计原理的仿真和实验验证	21
2.4 垂直入射磁超材料设计	24
2.4.1 垂直入射磁超材料的设计原理	24
2.4.2 对称连通开口谐振环	27
参考文献	29
第 3 章 基于金属结构的电超材料设计	31
3.1 电超材料的概念及基本特征	31

3.2	电超材料的基本属性	31
3.3	Drude 型金属线电超材料及其理论模型	32
3.4	Lorentz 型电超材料的双回路镜像对称设计原理	33
3.4.1	电谐振器金属结构单元设计原理	33
3.4.2	电谐振器设计原理的仿真和实验验证	34
	参考文献	37
第4章	基于金属结构的左手材料设计	39
4.1	左手材料研究进展及现状分析	39
4.1.1	左手材料研究的主要内容	39
4.1.2	左手材料研究的核心问题	40
4.1.3	左手材料的理论和应用研究	42
4.2	左手材料研究的发展趋势	43
4.2.1	左手材料的理论模型研究	43
4.2.2	三维各向同性左手材料研究	44
4.2.3	可调左手材料研究	44
4.2.4	手性超材料和各向异性超材料研究	45
4.3	左手材料的研究方法	46
4.3.1	传输频谱	46
4.3.2	等效介质理论及等效参数	46
4.3.3	多层相移差	47
4.3.4	劈尖样品仿真和实验	48
4.3.5	平板样品仿真和实验	48
4.4	基于电谐振器和磁谐振器的左手材料	48
4.4.1	设计原理	49
4.4.2	电谐振器和磁谐振器交叉组阵构成的左手材料	50
4.4.3	电谐振器和磁谐振器平行组阵构成的左手材料	53
4.4.4	电谐振器和磁谐振器交替平行组阵构成的左手材料	55
4.4.5	电谐振器和磁谐振器交替交错组阵构成的左手材料	57
4.4.6	基于共面电谐振器和磁谐振器的左手材料	60
4.5	基于结构单元间共面耦合的左手材料	62
4.5.1	基于结构单元共面耦合的左手材料设计原理	62
4.5.2	基于类“H”形结构单元共面耦合的左手材料实验验证	67
4.6	基于结构单元层间耦合的垂直入射左手材料	69
4.6.1	基于单环开口谐振环对的垂直入射左手材料	69
4.6.2	基于对称连通开口谐振环(SC-SRR)的垂直入射左手材料	74
	参考文献	79

第 5 章 基于介质谐振器的全介质超材料设计	90
5.1 Mie 散射理论	90
5.2 基于介质谐振器原理的理论分析	91
5.2.1 介质谐振器原理	91
5.2.2 介质谐振器的谐振模式与场分布	93
5.2.3 电超材料和磁超材料的实现	95
5.3 相同尺寸的不同介质构成的左手材料	97
5.3.1 理论分析与数值模拟	97
5.3.2 实验验证	101
5.4 不同尺寸的同一种介质构成的左手材料	105
5.4.1 理论分析与数值模拟	105
5.4.2 电磁波斜入射与极化方向改变时的特性	108
5.4.3 实验验证	110
5.5 多通带全介质左手材料	114
5.5.1 理论分析与数值模拟	114
5.5.2 实验验证	118
参考文献	121
第 6 章 介质谐振器和金属结构结合的左手材料设计	122
6.1 金属中感生电流和介质中位移电流的关系	122
6.2 负等效参数的产生和“双负”的实现	124
6.3 介质谐振器和金属柱的结合	125
6.3.1 负介电常数的实现	125
6.3.2 负磁导率的实现	127
6.3.3 介质谐振器和金属柱的组合	129
6.3.4 实验验证	130
6.4 介质谐振器和磁谐振器的结合	132
6.4.1 负介电常数的实现	132
6.4.2 负磁导率的实现	133
6.4.3 介质谐振器和磁谐振器组合	134
6.4.4 实验验证	136
参考文献	138
第 7 章 多频带、三维各向同性和可调超材料设计	140
7.1 多频带左手材料	140
7.2 三维磁超材料设计	144
7.2.1 电场方向垂直于基板型三维磁超材料	144

7.2.2	由连通的开口谐振环构成的三维磁超材料	149
7.3	三维左手材料	154
7.3.1	基于共面电磁谐振结构单元的三维左手材料	154
7.3.2	基于耶路撒冷十字结构单元的三维各向同性左手材料	156
7.4	可调超材料	161
7.4.1	基于旋转内环 SRR 的可调磁超材料	161
7.4.2	基于宽边耦合 SRR 的可调磁超材料及左手材料	167
	参考文献	172
第 8 章	超材料完美隐身技术	174
8.1	坐标变换理论	174
8.1.1	光学空间的正交变换	174
8.1.2	光学空间的一般变换	176
8.2	规则形状隐身套设计	178
8.2.1	圆柱和球形隐身套	178
8.2.2	椭圆柱隐身套	179
8.2.3	旋转椭球隐身套	180
8.2.4	隐身套参数方程在柱坐标系中的简化	182
8.3	任意形状隐身套设计	185
8.3.1	任意形状隐身套设计的近似方法	185
8.3.2	任意形状隐身套设计的数值方法	188
8.4	开口隐身套设计	192
8.4.1	单开口隐身套	192
8.4.2	多开口隐身套	195
8.4.3	误差估计	196
8.5	电磁参数奇异性的消除	196
8.5.1	二维圆柱隐身套参数奇异性的消除	197
8.5.2	二维椭圆柱隐身套参数奇异性的消除	200
8.5.3	三维球状隐身套参数奇异性的消除	205
	参考文献	208
第 9 章	超材料吸波体	210
9.1	材料吸波的基本原理	211
9.1.1	材料的吸收率	211
9.1.2	材料的阻抗匹配特性	211
9.2	基于电磁谐振的超材料吸波体	212
9.2.1	极化不敏感和宽入射角的超材料吸波体	212

9.2.2	双面吸波的超材料吸波体	216
9.2.3	多频带的超材料吸波体	219
9.2.4	较宽频带的超材料吸波体	222
9.3	基于电路谐振的超材料吸波体	226
9.3.1	基于磁谐振器加载集总元件的超材料吸波体	226
9.3.2	基于电谐振器加载集总元件的超材料吸波体	228
9.3.3	基于电阻膜结构的超材料吸波体	232
	参考文献	235
第 10 章	超材料频率选择表面	237
10.1	超材料频率选择表面设计原理	237
10.2	单通带频率选择表面设计	243
10.3	双通带频率选择表面设计	248
10.3.1	长金属线与耶路撒冷十字结构组合的双通带 FSS 的设计	248
10.3.2	双面双通带 FSS 的设计	250
10.3.3	长金属线阵列与电谐振子重合双通带 FSS 的设计	252
10.4	具有极化选择特性的频率选择表面设计	256
10.4.1	双面极化选择表面的设计	257
10.4.2	单面极化选择表面	260
	参考文献	261

第 1 章 超材料的概念、研究现状及发展趋势

1.1 超材料的概念及基本特征

1.1.1 基本概念

超材料 (metamaterials) 是指一些具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合材料^[1~5], 是近年来国际学术界的研究热点之一。超材料不单是一种材料形态, 也代表一种新的材料设计理念, 即通过人工微结构单元构成的复合结构或复合材料实现自然材料所不能实现的特性或功能, 给人们在世界观和方法论上带来革命性的改变。

1.1.2 基本特征

严格意义上, 超材料是一种单元尺度远远小于工作波长的人工周期结构, 在长波长条件下 (波长远大于结构单元尺寸), 具有等效介电常数和等效磁导率, 这些电磁参数主要依赖于其基本组成单元的谐振特性, 从而区别于通常意义上的光子晶体或者人工电磁带隙材料。在光子晶体或者人工电磁带隙材料中, 带隙起源于基本单元散射体的多重布拉格散射效应^[6~9], 其周期结构尺度和工作波长在同一数量级, 因此, 只能看成是一种结构而非一种均质材料, 不能使用等效介电常数和等效磁导率来表征其基本电磁特性。超材料通常由基本谐振单元 (如电谐振器、磁谐振器) 构成, 通过对单元谐振特性的设计可以在特定频段对超材料的等效电磁参数进行有效控制, 如可以使其等效介电常数和等效磁导率接近于零, 甚至为负, 这些特性使超材料具有广阔的应用前景, 在设计和实现上也具有很大的灵活性。概括起来, 超材料的基本特征包括:

(1) “奇异物理性质”。超材料具有负折射率、负磁导率、负介电常数等超越常规材料的奇异物理性质, 这些超常性质主要取决于构成超材料的亚波长结构单元。

(2) “亚波长结构”特征。超材料属于亚波长结构, 其单元结构尺寸远小于工作波长, 单元结构尺寸越小, 其结构特性越趋近于均质材料。事实上, 对于微纳单元尺寸的超材料来说, 其结构特性与均质材料几乎趋同。

(3) “等效介质”特征。具有亚波长单元结构的超材料, 其物理性质和材料参数可使用等效介质理论描述。例如, 可以提取超材料的等效介电常数和等效磁

导率,是超材料设计及应用超材料对电磁波进行调控最重要的材料参数。

1.1.3 几种典型的超材料

目前广泛研究的超材料主要包括左手材料(left-handed metamaterial, LHM)、复合左/右手传输线(composite right left-handed transmission line, CRLHTL)以及等效材料参数(相对介电常数或相对磁导率)在(0, 1)的其他非常规材料等。

(1) 左手材料。左手材料是一种最典型的超材料,也是研究最为广泛的超材料。事实上,超材料研究源于左手材料研究,在超材料研究初期,人们将研究焦点集中在介电常数和磁导率同时为负的左手材料的奇特性质及其实现上。由于左手材料具有等效负介电常数和负磁导率,表现出负相移、负折射效应、逆多普勒效应、完美透镜、逆Cerenkov辐射等新物理效应^[10~15]。一般通过将等效介电常数和磁导率为负的结构单元组合实现左手材料,所以具有负介电常数或负磁导率的超材料研究成为左手材料的研究基础。随着研究的不断深入,人们发现具有单负特性(等效介电常数和磁导率其中之一为负)的超材料具有更为广泛的应用前景,并由此将最初的左手材料研究拓展至包括单负超材料^[16~18]、各向异性超材料^[19~22]和手性超材料^[21~26]等更广泛的研究领域。

(2) 电超材料和磁超材料。随着左手材料研究的深入以及基于超材料的透波隐身技术(cloaks)的发展,迫切需求相对介电常数介于0~1的材料,金属线阵列不便于实现0~1的相对介电常数,由此出现了无需结构单元之间电连接即可实现小于1的介电常数的电谐振器(electric resonator)概念^[16]。由电谐振器单元构成的超材料被称为电超材料,相应地,由磁谐振器结构单元构成的超材料被称为磁超材料(magnetic resonator)。基于此,进而提出了基于电谐振器与磁谐振器的左手材料设计思想^[27,28]。自此,电超材料和磁超材料的研究得到了快速发展。电超材料和磁超材料是分别通过电谐振子或磁谐振子单元的谐振实现的超材料,其等效相对介电常数、相对磁导率通常介于0~1,也可以为负值。

(3) 各向异性超材料。各向异性超材料是指具有抛物线型、双曲线型等各向异性介电常数或磁导率的超材料。基于介电常数或磁导率的各向异性可在等效折射率为正的情况下实现负折射^[19,22]。

在各向同性的左手材料和常规材料中,电磁波的相速度和群速度总是在一条直线上,或方向相反,或方向相同。在具有双曲线型色散关系的各向异性超材料中,相速度和群速度不在一条直线上。由于群速度的方向垂直于双曲线并且远离界面,导致群速度发生负折射,而相速度仍为正折射。典型的双曲线型各向异性超材料为金属线阵列,仿真和实验都已证实了这种超材料可以实现负折射和平板

成像^[19,23]。

(4) 手性超材料。手性超材料是指基于亚波长手性结构单元的手性参数实现的超材料,具有更大的设计灵活度,不仅可实现同时为负的介电常数和磁导率,也可在介电常数和磁导率同时为正的情况下通过手性参数实现负折射率^[23~25]。

由于手性超材料一般结构简单,易于加工和应用,所以通过手性超材料实现负折射率成为左手材料研究的又一热点。另外,手性超材料还具有很强的旋光性和二向色性,在光学领域具有广阔的应用前景。

(5) 声波超材料。声波超材料是具有等效负质量密度和负模量的超材料,主要包括声波左手材料和负模量超材料^[29~32]。由于声波与物质的相互作用与电磁波具有一定类比性,也可通过人工手段设计和制作声波超材料。对于体积模量为 κ ,质量密度为 ρ 的均匀流体,波矢 k 和玻印亭矢量 S 分别为

$$k = \sqrt{\frac{\rho}{\kappa}} k_0$$
$$S = \frac{|p^2| k}{2\omega\rho}$$

式中: p 为压强。当体积模量和质量密度同时为负时,声波在物质中的相速度和群速度反向,体现出声波左手特性。

1.2 超材料的研究现状

超材料研究初期主要集中在左手材料设计及与左手材料相关的负折射效应。左手材料是一种特殊的超材料,其主要特征是介电常数和磁导率同时为负,具有负折射效应、逆多普勒效应等奇异特性。1996~2001年,人们首次用金属亚波长谐振结构单元实现了负介电常数和负磁导率并对负折射效应进行了实验验证^[2~5],在国际学术界引起了极大的轰动。人们首次意识到,通过亚波长结构单元构成的人工结构或复合材料,可以根据设计者的意图实现对波的操控。此后至2005年,人们的研究焦点主要集中在如何实现负折射效应,通过各种不同的亚波长结构单元实现的左手材料以及通过左右手复合传输线实现的负折射、后向波效应等被陆续报道^[33~36],并将部分研究成果应用到完美透镜、小型化微波器件、高方向性天线等^[37~40]。

随着研究在深度和广度的不断深入,人们发现用于实现左手材料的谐振结构单元具有更为广泛的应用前景。通过调整这些亚波长结构单元的几何参数,可以进行磁导率或介电常数的任意调控,实现远大于1、小于1甚至接近于0、小于0的介电常数或磁导率,而由这些亚波长结构单元构成的人工结构或复合材料被统

称为超材料。由于其可调控的介电常数和磁导率，超材料为各种新型功能器件的设计提供了更为广泛的材料基础和设计灵活度。2006~2010年，基于介电常数/磁导率渐变的超材料，隐身斗篷、波束聚集器、波形变换器、场旋转器等新型功能器件被陆续提出^[41~54]。更为引人注目的是，这个阶段对超材料在隐身技术、小型化微波器件、天线、天线罩、频率选择表面等方面的应用研究得到了突飞猛进的发展^[55~60]，主要体现在以下5个方面：

(1) 在超材料完美隐身斗篷作为一个重要的科学问题被持续深入研究的同时，基于超材料的各种新概念隐身技术被陆续提出，并且更加面向实用化，例如，基于超材料的表面等离子激元隐身技术^[61~63]、超材料吸波隐身技术^[64~70]等。

目前，厚度大和带宽窄是制约超材料完美隐身斗篷实际应用的瓶颈问题。由于超材料完美隐身斗篷对材料参数分布具有严格的要求，其实现一般采用多层超材料套层实现材料参数的渐变，即便这样，在理论上也只是实现单频点的完美隐身，并且套层厚度一般与被隐身物体的半径相当，这极大阻碍了其实际应用。但是，作为一个全新的理念，超材料隐身斗篷的透波隐身思想给人们很大启发，开拓了人们的思维。在持续攻克厚度和带宽两个瓶颈问题的同时，人们也提出了其他基于超材料的透波隐身思想^[61~63]以及超材料吸波隐身思想^[64~70]。表面等离子激元隐身技术是本课题组于2009年自主提出的新概念隐身思想，目前已通过这种思想解决了透波隐身套厚度大的问题，实现了超薄准完美隐身套。

(2) 基于超材料的小型化微波器件、高方向性天线、频扫天线等迅速发展并且相对成熟，部分已经得到实际应用^[55,58]。传统微波器件的尺寸一般受限于其工作波长，例如天线和谐振腔的尺寸一般是介质基板或介质填充物中波长的1/2。将左手材料应用于这些器件，利用左手材料的相位补偿，可有效地减小器件的尺寸，实现小型化微波器件，这方面研究已经比较成熟并且部分已得到实际应用。利用单负超材料的高发射、同相反射等特性，既可实现高方向性天性，又可减小天线的剖面尺寸。基于复合左右手传输线，可实现宽扫描角度的频扫天线等。

(3) 基于金属结构单元超材料的频率选择表面、天线罩已通过理论和实验验证^[59,60]。频率选择表面一般是由周期性金属结构单元或孔隙构成二维表面，其设计需要进行大量复杂的计算和仿真。相比之下，根据超材料理论，通过合理设计和调节单元结构可以得到具有特定电磁参数的人工材料，可以快速高效地完成频率选择表面的设计。将超材料设计原理应用于隐身罩和带通频率选择表面的设计，可设计各种频率选择表面单元结构，例如双通带频率选择表面、极化选择频率选择表面等。

(4) 超材料研究进一步向纵深发展，太赫兹[兹]、红外、可见光超材料的实现及其在传感器、调制器、吸波体、隐身等方面的应用研究方兴未艾^[61~70]。

在超材料研究初期,由于加工手段的限制,大部分理论和实验研究工作集中在微波频段。随着加工工艺的不断进步和发展,微纳尺度加工不断成熟,太赫兹[兹]、光频等高频材料迅速发展。

(5) 超材料概念在广度上得到了拓展,从最初的电磁波超材料拓展到声波、弹性波,甚至物质波超材料,并且声波超材料及其应用研究已处于起步阶段。由于自然界各种波与电磁波都具有一定的类比性,将电磁波超材料的理论加以推广,可实现声波超材料、弹性波超材料等。

目前,超材料研究重点从基础理论发展至基础理论与应用开发并重,基于超材料的应用专利数量大幅度增长,涉及天线、隐身、微波器件、传感器等多个领域。超材料研究正处于多学科交叉融合阶段,所涉及学科包括电磁学、光学、材料学、力学、物理化学、粒子物理、量子力学等,主要体现在以下4个方面:

(1) 从实现原理上,由最初的等效谐振电路和等效介质理论^[71~75]发展至电磁散射、等离激元振荡、谐振模式杂化效应、量子效应等^[76~80]。

(2) 从物理效应上,由最初的负折射效应发展至量子效应、非线性效应、开关效应等^[81~83]。

(3) 在实现方式上,由最初毫米尺度的金属结构单元和左右手传输线发展至全介质、微米结构、纳米结构等^[84~86]。

(4) 在加工手段上,由最初的平版印刷技术发展至激光直写、电子束曝光、离子束曝光、紫外曝光等微纳加工技术^[87~89]。

国内研究者从2001年就对超材料研究给予了持续密切的关注,在超材料的基础理论、物理效应等及微波超材料应用研究方面基本与国际同步。清华大学周济教授基于Mie理论研究了全介质超材料^[90~92],并提出了基于液晶的可调超材料^[93];同济大学张冶文教授和李宏强教授课题组开展了基于传输线的超材料^[94]、手性超材料^[95]和宽带负折射超材料^[96]研究;复旦大学周磊教授课题组主要研究了基于超材料的极化旋转^[97]、定向辐射^[98]、亚波长成像^[99]、反常传输^[100]等新效应,开展了表面等离激元超材料研究。西北工业大学赵晓鹏教授课题组主要开展了谐振环结构^[101]和分形结构^[102]超材料以及基于电流变液的可调超材料^[103]设计和制备;浙江大学冉立新教授课题组设计了基于S形、砖块形等金属结构的超材料^[104~106]和由介质谐振器构成的左手材料^[107],并从理论上详细研究了超材料隐身罩的设计和优化^[108~110];东南大学崔铁军课题组的研究主要集中在基于超材料的新型微波器件上,设计了地毯套^[111]、天线平板透镜^[112]、全向电磁吸波体^[113]等新型微波器件。南京大学伍瑞新课题组开展了铁磁材料中的负折射现象研究^[114],陈延峰课题组提出了周期结构的基于压电和压磁特性的左手材料^[115],冯一军课题组主要进行了超材料吸波体^[116]和可调超材料^[117,118]研究,祝世宁课