

电磁超介质 及其应用

(第2版)

Electromagnetic Metamaterials and Applications
(Second Edition)

■ 崔万照 王瑞 张洪太 李军 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

电磁超介质及其应用

(第2版)

Electromagnetic Metamaterials and Applications

(Second Edition)

崔万照 王 瑞 张洪太 编著
李 军 胡天存 刘 莹

国防工业出版社
· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

电磁超介质及其应用/崔万照等编著. — 2 版.
— 北京: 国防工业出版社, 2014. 12
ISBN 978-7-118-09785-6

I. ①电… II. ①崔… III. ①电磁场—介质
IV. ①O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 310770 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 32½ 字数 583 千字

2014 年 12 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价: 128.00 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 (第 2 版)

电磁超介质概念诞生至今已经近 50 年了,它是具有自然界中材料所不具备特性的人工材料。电磁超介质的研究是跨学科交叉的,涉及电磁学、固体物理、光电子学、材料学、半导体技术等领域。新材料的创新,以及在此基础上诱发的新技术、新产品的创造是未来 10 年对社会发展、经济振兴、国力增强最有影响力的研究领域,而电磁超介质将是起重要作用的关键材料之一,在航空航天、军事、民用领域其特异性能都有着广泛的应用潜力,在提高产品性能、拓展新功能等方面具有极为重要的意义。

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,更何况电磁超介质是科学界谓之的一种颠倒了物理学常规定律的人工材料,其反常的特性预示着材料世界革命的到来。尽管 D. R. Smith 等在 2001 年就对电磁超介质的负折射现象进行了实验验证,但科学界有相当一部分学者对这种新型介质仍然持怀疑态度,所以国际顶级刊物上也经常会看到观点迥异的论文。这些智慧的碰撞促使了电磁超介质理论及其应用的飞速发展,为这个新兴领域增加了新的活力。在研究电磁超介质的过程中,肯定会有一些争吵和辩论,甚至可能会走弯路,但相信经过科学家的努力探索,电磁超介质这个新生事物一定会茁壮成长。正如 J. B. Pendry 所说的:“进入一个新的科学领域就像走进一间漆黑的房间,一开始什么都看不见,不是碰倒家具就是与别人碰撞和争吵;但随着时间的推移,光线总会慢慢地从窗子照进这个房间,眼睛看到的会越来越清楚,而碰撞和争吵会越来越少。我正聆听着这光明到来的脚步声。”

本书重点关注了左手材料、复合左右手传输线和光子晶体三种电磁超介质,系统阐明了电磁超介质的基本理论。在内容安排上,既全面论述了电磁超介质的物理特性,深入分析了电磁超介质的应用新技术,还介绍了几种电磁超介质的设计与实现方法。本书立足于电磁超介质领域的前沿,尽可能地包罗该领域的研究热点和最新的应用实例,注重现象的描述和物理分析,力求做到概念清晰,逻辑性强,希望能够给读者带来启迪。

本书第 1 版的成功推出是令人振奋的,对于第 2 版,根据从许多读者那里

获取的反馈信息,并结合电磁超介质的最新发展,增减并修改了部分内容。如在第 2 章中斯涅尔定律内容进一步讨论了费马原理,以及常规介质与左手材料的菲涅耳系数。将原来的第 3 章和第 4 章合并,精简了全固态 Ω 结构左手材料、多通带左手材料和超宽带左手材料内容。由于很多读者比较关注电磁隐形研究,我们特别用一章的篇幅描述了变换光学,讨论了一系列由于变换光学和微波技术相联系产生的电磁超介质方面富有创意的研究。对复合左/右手传输线部分章节进行了重写,调整了部分结构,更有利于物理分析,增加了二维对偶型和三维各项同性复合左/右手传输线等新内容。在电磁超介质的仿真和设计部分增加了复合左/右手传输线零阶耦合谐振器的设计方法和实例。第 2 版全书共 9 章,具体分工为:张洪太编写第 3 章,王瑞编写第 4 章,李军编写第 8 章,刘莹编写 9.1、9.2 和 9.4 节,胡天存编写 9.3 节,崔万照编写了其余章节并对全书进行了统稿。

在完成此书的过程中,很多人给予了帮助,特别感谢四川大学刘长军教授在百忙之中审阅了全稿并提出了许多宝贵的意见。还要感谢空间微波技术重点实验室的同事们,尤其是张娜、王新波、王琪、董亚洲、王晓海、梁栋,感谢他们参与部分书稿的校对。本书能够出版,得到了空间微波技术国家重点实验室基金(9140C5306010604, 9140C5303020704, 9140C5306010708)的资助,感谢中国空间技术研究院神舟学院西安分院、中国电子学会空间电子学分会和中国宇航学会空间电子学专业委员会的大力支持。本书参考了大量文献并引用了相关图表,在此向各位作者的卓越工作表示致敬和感谢。

科技发展日新月异,每个人对同一事物会产生不同的理解,书中难免有不妥之处,欢迎广大读者批评指正。

作者

2014 年 8 月

前言 (第 1 版)

“Metamaterials”是 21 世纪科技界出现的一个新学术词汇, 拉丁语 “meta-”, 可以表达 “在 …… 后、超出 ……” 等含义。对于 “Metamaterials” 一词, 目前国际上尚未有一个严格的、权威的定义, 国内也没有一个统一的翻译, 本书建议将 “Metamaterials” 命名为电磁超介质, 但通常认为电磁超介质 (Metamaterials) 是一种 “具有天然媒质所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合媒质”, 主要研究内容包括左手材料、复合左/右手传输线、光子晶体和超磁性材料等。电磁超介质是国内外物理学和电磁学研究的一个重要方向和热点, 如光子晶体被美国《科学》杂志评为 1999 年的九大科技突破之一, 左手材料的发现被美国《科学》杂志评为 2003 年的十大科技突破之一, 2006 年基于左手材料的思想设计的梯度超介质实现电磁波隐形又被美国《科学》杂志评为年度十大科技突破之一, 光子晶体还被美国《科学》杂志预测为 2007 年六大研究热点之一, 2007 年世界著名期刊出版公司 Elsevier 发行了新期刊《Metamaterials》。电磁超介质是电磁学理论发展史上的重要事件, 为经典电磁理论开辟了崭新的研究空间, 其重大的科学意义及巨大的应用前景对未来通信、雷达、国防、微电子和医学成像等科技和社会发展将产生极为重要的影响。

电磁超介质作为一类新型的人工电磁材料具有独特的性能, 经过十几年国内外众多科研工作者的努力, 已经取得了很多人振奋的研究成果, 并广泛用于微波电路、天线的设计中。但对于建立一套完整的理论体系来说还是远远不够的, 况且电磁超介质的研究日新月异, 其应用方兴未艾, 并涉及了物理、电路、材料、加工等领域。因此, 本书面临的形势是复杂而困难的, 这是作者所清醒看到的, 但是作者还是鼓足勇气将其出版。作为国内最早出版的比较系统的介绍电磁超介质的著作, 应包含较为全面的基本内容, 同时也应反映这一新的研究领域的研究现状和前沿课题以及一些有潜力的新思想、新方法、新技术, 这是本书撰写的基本思想和出发点。限于篇幅, 本书仅着重介绍左手材料、复合左/右手传输线、光子晶体的基本理论、主要特性及其典型应用。

本书第 1 章为绪论, 其余章节以其侧重点不同分为四部分来详细介绍这一领域。第 2 章到第 5 章为第一部分, 主要讨论左手材料的特性、构造、实验和典型应用: 第 2 章系统的介绍了左手材料的基本理论和主要特性; 第 3 章介绍左手材料的结构构造; 第 4 章讨论了几个典型的左手材料验证实验; 第 5 章讨论了左手材料的典型应用。第 6 章到第 8 章为第二部分, 主要介绍了复合左/右手传输线的基本理论和应用: 第 6 章详细介绍了复合左/右手传输线的基础理论; 第 7 章介绍了二维复合左/右手传输线理论; 第 8 章详细讨论了复合左/右手传输线的典型应用。第三部分为第 9 章, 简要介绍了光子晶体的基本特性、制备方法及应用。第四部分为第 10 章, 通过几个实例介绍了电磁超介质的仿真设计。根据本书的编排特色, 读者可以不按顺序阅读。读者在研究和应用中首先对哪一方面感兴趣, 就可以先阅读与哪一方面有关的章节。书末附有 700 多篇有关电磁超介质的参考文献, 这对于那些希望从事该领域研究的科技工作者无疑是有益的。

全书共 10 章, 具体分工为: 邱乐德编写第 3 章, 张洪太编写第 4 章, 马伟编写第 5 章, 刘莹编写第 10 章, 崔万照编写了其余章节并对全书进行了统稿。在本书的编写过程中, 自始至终得到了浙江大学教授、博士生导师冉立新博士的大力支持和悉心指导, 并详细地审阅了全书。空间微波技术国家重点实验室的尚社博士、董士伟博士、王颖、胡天存、陈燕、李萱、朱忠博, 西安空间无线电技术研究所的吴须大研究员、刘少东博士、马海虹博士、于晓乐, 西安电子科技大学的刘淑芳博士, 西安交通大学的贺永宁博士对本书提出了许多宝贵的意见, 在此一并表示衷心的感谢。感谢 Ansoft 中国区首席代表邱春雷、西北区经理张鳌、技术经理丁海强的大力支持和帮助。此外, 本书的出版还得到了空间微波技术国家重点实验室基金 (9140C5306010604, 9140C5303020704, 9140C5306010708) 的资助。作者在繁忙的工作之余, 能够潜心总结、写成本书, 这要特别感谢西安空间无线电技术研究所空间微波技术国家级重点实验室所营造的环境。作为回报, 我们衷心地希望本书能对从事研究电磁超介质的研究人员有所帮助, 本书的出版能促进我国电磁超介质的发展, 加速其在实际中的应用。同时也希望本书对营造一个更加催人奋进的环境有所推动。

在编著本书的过程中, 参考了大量国内外有关著作和论文, 并引用其相关的图表, 在此对作者表示衷心的感谢。虽然我们竭力而为, 但囿于理解水平和能力所限, 书中难免有不妥之处, 欢迎读者批评指正。

编者

2008 年 1 月

主要缩写列表

BZ	Brillouin Zone	布里渊区域
BR	Bragg Region	布拉格区域
NRI	Negative Refractive Index	负折射率
LHM	Left-Handed Metamaterials	左手材料
MTM	Metamaterials	超介质
LH	Left-Handed	左手特性
RH	Right-Handed	右手特性
CRLH	Composite Right/Left-Handed	复合左/右手
TL	Transmission Line	传输线
LW	Leaky Wave	漏波
BC	Boundary Condition	边界条件
PBC	Periodic Boundary Condition	周期性边界条件
SRR	Split-Ring Resonator	开路环谐振器
CSRR	Complementary Resonator	互补谐振器
TMM	Transmission Matrix Method	传输矩阵法
TLM	Transmission Line Matrix	传输线矩阵
PML	Perfect Matching Layer	完美匹配吸收层
FSS	Frequency Selective Surface	频率选择性表面

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 电磁超介质的研究进展	4
1.2.1 起步阶段	4
1.2.2 争议阶段	5
1.2.3 深入研究阶段	7
1.2.4 实际应用阶段	11
1.3 电磁超介质的发展展望	13
1.4 本书的组织	20

第一部分 左手材料

第 2 章 基本理论	23
2.1 引言	23
2.2 服从麦克斯韦理论	24
2.3 边界条件	29
2.4 色散介质的熵	31
2.5 逆斯涅尔定律	34
2.6 费马原理	39
2.7 菲涅耳系数	40
2.8 完美透镜	40
2.9 逆聚焦/逆发散现象	42
2.10 亚波长衍射	43
2.11 逆切伦科夫辐射效应	47
2.12 逆多普勒效应	49

2.13 逆 Goos-Hänchen 位移效应	50
2.14 零折射率左手材料的特性	52
第 3 章 左手材料的构造和实验验证	57
3.1 左手材料构造基础	57
3.1.1 等效负介电常数的产生方法	58
3.1.2 等效负磁导率的产生方法	62
3.1.3 Smith 结构左手材料	67
3.2 典型结构左手材料	69
3.2.1 对称环结构左手材料	69
3.2.2 Ω 结构左手材料	71
3.2.3 全固态 Ω 结构左手材料	73
3.2.4 S 结构左手材料	75
3.2.5 多通带左手材料	78
3.2.6 超宽带左手材料	80
3.2.7 随机结构左手材料	82
3.2.8 有源左手材料	85
3.3 左手材料的实验验证	87
3.3.1 棱镜折射实验	87
3.3.2 其他实验验证方法	90
第 4 章 变换光学	96
4.1 费马原理的坐标变换	97
4.2 任意形式的坐标变换	101
4.2.1 坐标变换	101
4.2.2 度量张量	103
4.2.3 向量和基	105
4.2.4 一阶形式和一般张量	106
4.2.5 坐标和非坐标基	107
4.2.6 向量积和莱维 - 齐维塔张量	107
4.2.7 向量的协变导数	109
4.2.8 张量和度量的协变导数	113
4.2.9 散度和旋度	115

4.2.10	拉普拉斯算子	115
4.2.11	测地线和曲率	116
4.3	任意坐标系下的麦克斯韦方程组	120
4.3.1	几何学和媒质	120
4.3.2	变换媒质理论	122
4.3.3	波动方程和费马原理	124
4.3.4	时空几何	126
4.4	变换媒质的实现	129
4.4.1	空间变换媒质	129
4.4.2	电磁隐形	132
4.4.3	完美透镜	140
4.4.4	移动媒质	145
4.4.5	光学阿哈罗诺夫-玻姆效应	147
4.4.6	视界的类比	150

第二部分 复合左/右手传输线

第 5 章	一维复合左/右手传输线	157
5.1	理想左手传输线	157
5.1.1	非对偶型左手传输线	157
5.1.2	对偶型左手传输线	160
5.2	理想复合左/右手传输线	161
5.2.1	电报方程	161
5.2.2	行进的电压和电流	163
5.2.3	等效本构参数	167
5.2.4	平衡与非平衡特性分析	168
5.2.5	有耗特性分析	172
5.3	LC 网络形式的复合左/右手传输线	175
5.3.1	LC 网络	176
5.3.2	传输矩阵	179
5.3.3	输入阻抗	193
5.3.4	截止频率	195
5.3.5	色散特性	197
5.3.6	布洛赫阻抗	203

5.4	复合左/右手传输线的构造机理	204
5.4.1	负介电常数产生的物理机理	205
5.4.2	负磁导率产生的物理机理	208
5.4.3	负磁导率和负介电常数产生的物理机理	211
5.5	一维复合左/右手传输线的设计与实现	212
5.5.1	一维复合左/右手传输线结构的设计流程	212
5.5.2	一维复合左/右手传输线结构 LC 参数分析	214
5.5.3	一维复合左/右手传输线结构的实验验证	217
5.6	谐振型复合左/右手传输线	220
5.6.1	谐振环结构复合左/右手传输线	220
5.6.2	互补谐振环结构复合左/右手传输线	222
第 6 章	多维复合左/右手传输线	225
6.1	二维周期性电气网络理论	225
6.2	二维复合左/右手传输线网络的本征值问题	229
6.2.1	本征值的通用矩阵	229
6.2.2	二维复合左/右手传输线的特征值	231
6.2.3	二维复合左/右手传输线的色散关系	232
6.3	传输矩阵法	236
6.3.1	散射参数	237
6.3.2	电压和电流的分布	241
6.4	传输线矩阵模型法	245
6.4.1	无负载传输线网络的 TLM 模型	246
6.4.2	有负载 CRLH 传输线网络的 TLM 模型	249
6.4.3	介质特性与 TLM 参数的关系	250
6.5	二维分布式复合左/右手传输线	252
6.5.1	二维分布式复合左/右手传输线结构	252
6.5.2	传播特性和色散关系	255
6.5.3	LC 参数	258
6.5.4	二维 CRLH 传输线结构的实现	263
6.6	二维对偶型复合左/右手传输线	269
6.6.1	周期性传播特性分析	269
6.6.2	等效媒质理论	273

6.7 三维各向同性复合左/右手传输线	277
6.7.1 离散电动力学理论简介	277
6.7.2 三维各向同性复合左/右手传输线特性分析	279
6.7.3 三维各向同性复合左/右手传输线的构造	284
6.7.4 三维各向同性复合左/右手传输线的实现	288
第 7 章 复合左/右手传输线的应用	294
7.1 双频器件	294
7.1.1 复合左/右手传输线的双频特性	295
7.1.2 $\lambda/4$ 阻抗变换器	298
7.1.3 双频器件实例	302
7.2 带宽增强型微波器件	314
7.2.1 带宽增强原理	314
7.2.2 带宽增强型环形耦合器	318
7.3 耦合器	322
7.3.1 耦合线耦合器的基本理论	322
7.3.2 对称型阻抗耦合器	329
7.3.3 非对称型相位耦合器	340
7.4 负数阶、零阶谐振器	344
7.4.1 负数阶、零阶谐振器原理	345
7.4.2 负数阶、零阶谐振器特性	347
7.4.3 负数阶、零阶谐振器仿真与验证	350
7.4.4 零阶耦合谐振器设计与实现	353
7.5 “立体”式复合左/右手传输线结构器件	356
7.5.1 “立体”式复合左/右手传输线结构原理	356
7.5.2 “立体”式复合左/右手传输线结构特性	358
7.5.3 “立体”式复合左/右手传输线结构混频器	361
7.6 滤波器	363
7.6.1 窄带滤波器	363
7.6.2 CSRR 结构带通滤波器	365
7.6.3 超宽带和高通滤波器	366

7.7	漏波天线	368
7.7.1	漏波辐射原理	368
7.7.2	背射 — 端射漏波天线	373
7.7.3	电扫描漏波天线	377
7.8	微带富兰克林天线	384
7.8.1	新型微带富兰克林天线原理	385
7.8.2	微带富兰克林天线设计	390
7.8.3	微带富兰克林天线验证	394

第三部分 光子晶体

第 8 章	光子晶体简介	401
8.1	引 言	401
8.1.1	光子晶体的概念	401
8.1.2	光子晶体与超介质	405
8.2	光子晶体的主要特性	407
8.2.1	光子带隙特性	407
8.2.2	光子局域特性	407
8.2.3	光学特性	409
8.3	光子晶体的理论研究	410
8.4	光子晶体的制备	412
8.4.1	物理方法	412
8.4.2	化学方法	414
8.5	光子晶体的应用	416
8.5.1	光子晶体在微波领域的应用	417
8.5.2	光子晶体在天线领域的应用	419
8.5.3	光子晶体在光学方面的应用	420
8.5.4	光子晶体在传感器中的应用	425
8.5.5	光子晶体的应用展望	426

第四部分 电磁超介质的仿真和设计

第 9 章	电磁超介质的仿真和设计	429
9.1	电磁超介质的仿真设计概述	429

9.2	频率选择性表面	430
9.2.1	频率选择性表面的工程设计	431
9.2.2	基于 Floquet 模式法的有限元分析	433
9.2.3	频率选择性表面的仿真	434
9.3	复合左/右手传输线零阶耦合谐振器	437
9.3.1	初始参数的计算	437
9.3.2	建模与仿真	437
9.3.3	优化设计	440
9.4	复合左/右手传输线漏波天线	441
9.4.1	初始参数的计算	442
9.4.2	色散特性	443
9.4.3	单元的设计优化	444
9.4.4	布洛赫阻抗	447
9.4.5	馈电网络	448
9.4.6	仿真结果	449
参考文献		451

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

“人工材料”最早可追溯到 1898 年 J. C. Chunder 进行的螺旋结构 (手征材料) 微波实验^[1]。K. F. Lindman 在 1914 年通过在媒质中嵌入随机方向的小螺旋线成功构造出人工手性媒质^[2,3], W. E. Kock 则在 1948 年通过周期性排列球状、圆盘状、带状的人造媒质, 加工成质量轻的微波透镜^[4]。从此, 复杂人工媒质的研究引起了世界科研工作者的广泛关注^[5,6]。近年来, 新的合成原理和微米、纳米制造技术的发展使得构造自然界不存在的超常物理特性媒质的结构或复合人工媒质成为可能, R. M. Walser 将这种新型的材料命名为“Metamaterials”^[7], 拉丁语“meta-”, 可以表达“超出……”, 含义。目前, 国内外对于“Metamaterials”术语尚未有一个严格的、权威的定义。但国际上普遍认为“Metamaterials”是指一类人工电磁材料, 其英文定义是“A composite or structured material that exhibits properties not found in naturally occurring materials or compounds”, 即“一种具有天然媒质所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合媒质”。换句话说, 电磁超介质是通过在传统的媒质材料中嵌入某种几何结构的单元, 构造出自然媒质不具有的新型电磁特性的人工材料, 如图 1.1 所示。国内对于“Metamaterials”也尚未有一个公认的中文名称, 本书建议 Electromagnetic Metamaterials 命名为电磁超介质^[8]。

最近 20 多年来, 电磁超介质的研究迅速成为国际上一个研究热点^[9,10-15], 虽然电磁超介质这一新的观念尚未被学术界 (特别是材料学界) 完全接受, 但作为一种材料设计理念, 已开始为越来越多的学者所关注。更为重要的是, 它的出现给人们在世界观层面上带来巨大的冲击, 昭示人们可以在不违背基本物理学规律的前提下, 人工获得与自然媒质迥然不同的超常物理性质的“新媒质”。目前广泛研究的电磁超介质包括左手材料、复合左/右手传输线、光子晶体、超磁性材料等^[16], 大多与电、磁、光性质相关联, 为信息元件的新突破提供了一个新契机。限于篇幅, 本书将主要介绍左手材料、复合左/右手传输线和光子晶体。

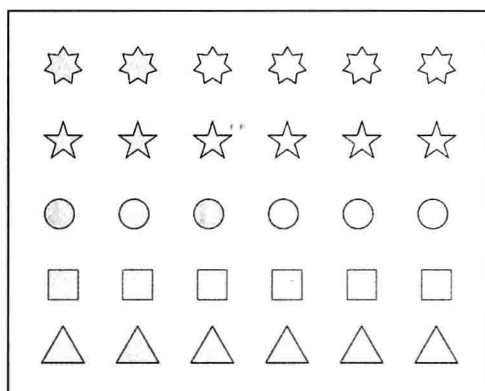


图 1.1 电磁超介质的通用轮廓

电磁超介质的基本设计思路是以某种具有特殊功能的人工结构为基础。媒质所呈现的一些物理性质往往和媒质结构中的关键物理尺度有关, 一个最直观的例子是 (电子) 晶体。晶体是自然界中物质有序结构的一个重要形式, 它的有序主要存在于原子层次, 正是由于在该尺度上的有序性调制, 使晶体形成了一些无定型态所不具备的物理特征。由此类比, 在其他层次上的某种排列则有可能获得某种程度上自然媒质所不具备的物理性质。因此, 人们可以通过各种层次的某种结构实现对各种物理量的调制, 从而获得自然媒质所不具备的物理性质。迄今为止, 人们所使用的各类功能材料都是建立在自然媒质物理性质的改进和提高上。随着媒质制备技术水平的不断改进与提高, 对自然媒质各种性质和功能的进一步发掘与利用的潜力空间逐渐缩小并趋于极限, 因此电磁超介质思想的提出无疑会对新媒质的设计与开发带来新的机会。从某种意义上讲, 电磁超介质的出现使人类继利用半导体自由调控电子传输之后, 首次具备了自由调控电磁波的能力。电磁超介质是电磁学理论发展史上的重要事件, 为经典电磁理论开辟了崭新的研究空间, 其重大的科学意义及巨大的应用前景对未来新一代通信、探测^[17]、光电子/微电子、超声波成像^[18]、医学成像等将产生极为重要的影响。

电磁超介质术语的出现与一类被称为左手材料的媒质息息相关, 狭义的 Metamaterial 往往指的就是这类材料^[19,20]。左手材料是一类在一定的频段下同时具有负磁导率和负介电常数的材料 (对电磁波的传播形成负的折射率)。左手材料的主要思想是苏联科学家 V. G. Veselago 在 1968 年系统提出的, V. G. Veselago 预测了在同时具有负介电常数和负磁导率材料中传播的电磁波相位的传播方向与能量的传播方向相反, 这一结果源于麦克斯韦方程的卷积形式。这一方