



“十三五”科学技术专著丛书

太赫兹电磁超材料 功能器件的设计与实现

亓丽梅 编著

Design and Realization of
Terahertz Metamaterial Functional Devices



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



“十三五”科学技术专著丛书

太赫兹电磁超材料功能器件的 设计与实现

亓丽梅 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

作者在指导研究生的过程中发现,在对超材料功能器件进行建模仿真的过程中,学生很容易出错,主要原因之一是缺乏一本完整且通俗易懂的专业书籍来引导他们。本书的主要目的是引导初学者完成超材料器件的设计流程,解决高等院校的老师指导超材料方向研究生的困扰。本书共分为两部分。第一部分介绍了4类太赫兹电磁超材料功能器件的设计、加工和测试过程,4类太赫兹功能器件依次为滤波器、吸波器、电磁诱导透明结构和非对称传输器件。第二部分主要介绍了采用高频电磁仿真软件 CST 对4类功能器件进行建模、仿真和数据处理的详细步骤;此外,还介绍了如何采用 CST 完成超材料 S 参数的提取,并给出了相应的 Matlab 程序;最后,针对一维和二维周期结构色散曲线的求解给出了详细的 CST 和 HFSS 仿真步骤。

图书在版编目(CIP)数据

太赫兹电磁超材料功能器件的设计与实现 / 亓丽梅编著. -- 北京:北京邮电大学出版社, 2019.9
ISBN 978-7-5635-5880-3

I. ①太… II. ①亓… III. ①磁性材料—电子器件—研究 IV. ①TM27②TN6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 195582 号

书 名: 太赫兹电磁超材料功能器件的设计与实现
作 者: 亓丽梅
责任编辑: 孙宏颖
出版发行: 北京邮电大学出版社
社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)
发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578
E-mail: publish@bupt.edu.cn
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京九州迅驰传媒文化有限公司
开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张: 12
字 数: 294 千字
版 次: 2019 年 9 月第 1 版 2019 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-5880-3

定 价: 49.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

太赫兹 (THz) 波是一种频率在 $0.3 \sim 10$ THz 之间的电磁波。太赫兹波独特的波长特性使得其在生物医学、材料学、信息科学以及光谱与成像技术等领域都有广阔的应用前景。但是,对于太赫兹功能器件,由于其结构尺寸和材料损耗等方面的限制,一些用于低频段的传统器件结构已不再适用。近年来,随着微纳加工技术的迅速发展,超材料 (metamaterial) 的出现为太赫兹技术的发展和應用提供了可行性。

超材料是指电磁参数 (介电常数和磁导率) 可人为设计控制的一类人工复合周期电磁结构,可以实现天然材料不具备的奇特物理性质 (例如负折射率、超透镜、完美吸收等),它的出现弥补了太赫兹频段电磁材料的匮乏,使我们可以有效地控制太赫兹波的振幅、相位、偏振以及传输特性,为太赫兹频段功能器件的实现提供了有效途径,有望从根本上突破太赫兹技术的发展瓶颈。

目前,已有众多图书能够满足本科生或研究生对太赫兹波或电磁超材料的学习和了解,但是还没有图书专门介绍太赫兹频段超材料功能器件的设计和应用。此外,最重要的是,虽然学生对相关的文献能够理解,但是在具体的建模仿真上仍容易出错,出现的错误也很难在书上或网上找到明确的答案,从而很难顺利地完 成从理论、设计、仿真、加工到实测的完整过程,难以快速并独立地完成科研项目。作者经过多年的科研和指导研究生的工作积累发现,导致这些问题的主要原因之一是缺乏一本完整且通俗易懂的专业书籍来引导学生。本书的内容不仅可以积极引导初学者完成完整的设计流程,还能解决高等院校的老师指导超材料方向研究生的困扰。

本书共分为两部分。第一部分介绍了 4 类太赫兹电磁超材料功能器件的设计、加工和测试过程,4 类太赫兹功能器件依次为滤波器、吸波器、电磁诱导透明结构和非对称传输器件。第二部分主要介绍了采用高频电磁仿真软件 CST 对 4 类功能器件进行建模、仿真和数据处理 的详细步骤;此外,还介绍了如何采用 CST 完成超材料 S 参数的提取,并给出了相应的 Matlab 程序;最后,针对一维和二维周期结构色散曲线的求解给出了详细的 CST 和 HFSS 仿真步骤。

希望本书能够帮助学习超材料的初学者进一步理解和掌握一些重要的结论和分析方法,使其能够根据现有的文献很快地进行仿真模拟,为以后科研或工程的完成奠定扎实的基础;最终也盼望读者能够通过本书不再对超材料领域产生畏惧,不再对电磁场与电磁波、电磁器件等理论感到害怕,不再为不知如何进行仿真和仿真中遇到的错误而感到迷茫,并能通过实践对该领域产生兴趣。希望更多的有志青年在本书的引导下成为工业界或学术界超材料领域的佼佼者。

本书得到了国家自然科学基金面上基金 (No. 61875017)、国家自然科学基金青年基金 (No. 61107030) 和毫米波国家重点实验室开放课题 (No. K201703) 的资助。本书的完稿要

特别感谢我的博士生导师杨梓强教授、博士后合作导师方广有研究员和李超研究员,他们引领我走上了太赫兹超材料这条富有挑战和有意义的科研之路。毫不夸张地讲,没有导师之前对我多年学术工作细致而富有建设性的指导,没有我的研究生(陶翔、刘畅、王小彬、张雅雯、刘紫玉)提供的原始素材,我也就没有机会和勇气来公布建模的细节,期待未来超材料全行业共赢的局面。

在本书的撰写过程中,作者参考或引用了包含 CST、HFSS 和 Origin 在内的多家商业软件的相关技术资料,在此向这些技术资料的原著者及相应的软件公司表示由衷的感谢。

由于作者编写水平的限制和完稿时间的紧迫,书中难免有疏漏和不当之处,敬请广大读者批评指正,并提出宝贵的意见和建议(读者建议反馈邮箱 qilimei1204@163.com)。

编著者
于北京邮电大学

目 录

绪论	1
0.1 太赫兹波概述	1
0.1.1 太赫兹波的特性	1
0.1.2 太赫兹技术的应用	2
0.2 超材料概述	3
0.2.1 超材料的特性	4
0.2.2 超材料的应用	6
0.2.3 超材料的技术难点	6
0.2.4 超材料常用的仿真软件	7
0.3 本书安排	8
本章参考文献	8

第 1 部分 太赫兹电磁超材料功能器件的研究

第 1 章 太赫兹超材料带通滤波器	13
1.1 前言	13
1.2 基于石英-金属结构的多波段带通滤波器的研究	14
1.2.1 结构模型	14
1.2.2 结果分析	15
1.3 金属打矩形孔结构的双波段带通滤波器	18
1.3.1 结构模型	18
1.3.2 结果分析	19
1.4 金属打十字孔结构的双波段带通滤波器	22
1.4.1 结构模型	22
1.4.2 结果分析	23
1.5 太赫兹多波段滤波器的实验系统	25
1.5.1 太赫兹矢量网络测试系统	25
1.5.2 太赫兹时域光谱测试系统	26
1.6 本章小结	27
本章参考文献	28

第 2 章 太赫兹超材料吸波器	30
2.1 前言	30
2.2 单频段宽带吸波器	31
2.2.1 结构描述	31
2.2.2 仿真结果与分析	32
2.3 双频段宽带吸波器	37
2.3.1 结构描述	37
2.3.2 仿真结果与分析	38
2.4 太赫兹双十字形吸波器的仿真与测试	44
2.4.1 结构描述	44
2.4.2 仿真结果与分析	45
2.4.3 加工与测试结果	47
2.5 太赫兹矢量网络测试系统	49
2.5.1 测试系统简介	49
2.5.2 测试步骤	51
2.6 本章小结	51
本章参考文献	52
第 3 章 太赫兹超材料电磁诱导透明结构	55
3.1 前言	55
3.2 基于石墨烯的邻边开口 EIT 结构	56
3.2.1 结构模型	56
3.2.2 结果分析	56
3.3 基于石英基底的邻边开口 EIT 结构	58
3.3.1 结构模型和结果分析	58
3.3.2 实验测试	59
3.4 基于石英基底的双环和十字环的 EIT 结构	60
3.4.1 模型结构	60
3.4.2 结果分析	61
3.4.3 实验测试	63
3.5 本章小结	64
本章参考文献	65
第 4 章 太赫兹超材料非对称传输器件	67
4.1 前言	67
4.2 非对称传输的实现条件	68
4.2.1 线极化波非对称传输的实现条件	68
4.2.2 圆极化波非对称传输的实现条件	68

4.3 双开口矩形环非对称传输结构	68
4.3.1 结构模型	68
4.3.2 结果分析	70
4.4 双 F 形非对称传输结构	74
4.4.1 结构模型	74
4.4.2 结果分析	75
4.5 本章小结	79
本章参考文献	80
 第 2 部分 太赫兹超材料器件的仿真建模和数据处理 	
第 5 章 双频段带通滤波器的建模与分析	83
5.1 运行并新建工程	83
5.1.1 新建工程	83
5.1.2 设置单位	84
5.2 建立仿真模型	84
5.3 设置运行条件	89
5.3.1 设置边界条件	89
5.3.2 设置频率范围	89
5.3.3 设置监听器	90
5.4 查看并处理仿真结果	91
 第 6 章 太赫兹吸波器的建模和仿真分析	 95
6.1 运行并新建工程	95
6.1.1 新建工程	95
6.1.2 设置单位	96
6.2 建立仿真模型	97
6.2.1 创建金属板	97
6.2.2 创建介质板	98
6.2.3 创建大小十字金属贴片	100
6.3 模型的仿真分析	102
6.3.1 求解器的设置	102
6.3.2 频率范围的设置	102
6.3.3 边界条件的设置	103
6.3.4 端口模式数量的设置	103
6.3.5 激励源的设置	104
6.3.6 仿真结果的查看	104
6.3.7 参数扫描结果的查看	105

6.3.8	吸收曲线的设置和查看	107
6.4	使用 Origin 软件对数据进行处理	108
6.4.1	获得 S 参数的 txt 文件	108
6.4.2	将 txt 文件导入 Origin 软件进行画图	108
6.4.3	通过计算获得所需的吸收数据	108
6.4.4	绘制图形	110
6.4.5	绘制彩图	112
第 7 章	基于石墨烯的邻边开口方环电磁诱导透明结构的 CST 仿真	115
7.1	运行并新建工程	115
7.1.1	新建工程	115
7.1.2	设置单位	116
7.2	模型的建立	116
7.3	仿真过程	124
第 8 章	双开口矩形环非对称传输结构的仿真和实现	128
8.1	运行并新建工程	128
8.1.1	新建工程	128
8.1.2	设置单位	129
8.2	建立模型	129
8.3	仿真过程	135
8.3.1	设置频率范围	135
8.3.2	设置边界条件	135
8.3.3	开始仿真	135
8.3.4	参数扫描	136
第 9 章	采用 S 参数反演法提取超材料结构的等效参数	138
9.1	超材料结构的模型参数	138
9.2	运行并新建工程	139
9.2.1	新建工程	139
9.2.2	设置单位	140
9.3	模型的建立	141
9.4	模型的仿真分析	149
9.4.1	设置频率范围	149
9.4.2	设置边界条件	150
9.4.3	设置求解器	150
9.5	S 参数反演法	153
	本章参考文献	155

第 10 章 一维周期结构色散曲线的仿真流程	156
10.1 模型结构	156
10.2 边界条件和背景材料的设置	156
10.3 本征模的设置	158
10.4 仿真计算	158
第 11 章 二维周期结构色散曲线的仿真流程	162
11.1 仿真模型及说明	162
11.2 采用 CST 仿真色散曲线	163
11.3 采用 HFSS 仿真色散曲线	169
11.4 使用 HFSS 计算二维结构的传输与反射参数	175

绪 论

0.1 太赫兹波概述

太赫兹(Terahertz, THz)波通常是指频率范围在 0.3~10 THz 之间,波长范围在 0.01~3 mm 之间的电磁波^[1]。太赫兹波位于电磁波谱上的一个特殊区域,如图 0-1 所示,其长波段与毫米波相重合,而短波段则与红外线有所交叠,这使得太赫兹波兼具微波和光波的一些特性^[2],但又不能完全适用于低频微波理论和高频光学理论^[3]。由于研究初期缺少有效的太赫兹产生源和灵敏探测器,故相关领域的研究成果较少,所以这一频段也被称为“太赫兹空隙”^[4]。进入 21 世纪以来,随着半导体工艺和激光技术的日益成熟,稳定、可靠的太赫兹激发光源被成功地设计出来了,太赫兹技术也得到了迅速发展,成为备受瞩目的研究热点之一^[5]。

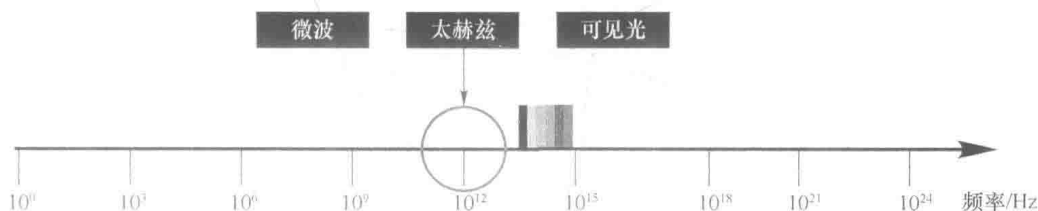


图 0-1 太赫兹波在电磁波谱中的位置

0.1.1 太赫兹波的特性

太赫兹波不仅兼具微波的穿透性和光波的良好操控性,还具备许多不同于传统光源的独特性质。

(1) 瞬态性^[6]

太赫兹波的脉冲宽度通常集中在皮秒量级,故利用太赫兹波能够轻松地对多种材料进行时间分辨的研究。同时,利用频率过滤技术,可以有效地降低辐射噪声对结果的影响,相比于傅里叶变换红外光谱技术,其信噪比更高,拥有更好的稳定性。

(2) 宽带性^[7]

太赫兹脉冲源在一般情况下只包含几个周期的电磁谐振,其中单个脉冲的频带能够从吉赫兹一直覆盖到几十太赫兹,可以大范围地分析物质的光谱信息。

(3) 相干性^[8]

太赫兹波的产生方法主要有两种,一种是通过相干电流驱动的偶极子振荡生成,另一种则是通过相干的激光脉冲的非线性效应混合产生,使得太赫兹波具有极强的相干性。使用

太赫兹相干测量技术能够快速准确地获取电场的幅度、相位等信息,进而计算出被探测物体的折射率、吸收率等物理性质,大大地简化了传统测量方法的运算过程。

(4) 低能量性^[9]

太赫兹波的光子能量很低,在穿透物质时不会因为电离而伤害生物组织,从而在医学成像、无损检测等多个领域都具有潜在的应用价值。

(5) 强穿透性^[10]

太赫兹波对许多非极性材料(例如塑料瓶、纸盒等)都具有极强的穿透性,借助该特性,太赫兹波能普遍地应用于黑盒物品、危险品的安全检查工作。

0.1.2 太赫兹技术的应用

太赫兹波所具有的超凡特性,使其在成像、通信、雷达、频谱学等多个领域都具有重要的研究价值和广阔的应用前景。

(1) 太赫兹成像

对于塑料、纸、陶瓷等非极性材料,可见光无法穿透,使用 X 射线成像技术则存在图像对比度不高的缺陷,而太赫兹波对这些材料具有非常强的穿透力,可以有效地填补现有技术的空白。太赫兹成像系统最早由 B. B. Hu 和 M. C. Nuss 于 1995 年提出^[11],经过数十年的发展,相关技术已经在生活中的各个领域得到了广泛应用。比如:在安全检测领域,太赫兹波能够穿过表面覆盖物,对内部藏匿的危险品、爆炸物、毒品进行有效的鉴别;在建筑领域,太赫兹波可以对混凝土结构内部钢筋的腐蚀程度进行检测。此外,由于太赫兹波的低能量性,其穿透物质时不会损害人体或者生物组织,所以太赫兹成像技术也适用于生物医学领域的相关研究^[12-13]。

(2) 太赫兹通信

随着无线通信技术的不断发展,人们对空闲频谱资源的需求日益提升,发展太赫兹波段的通信技术成为必然趋势。与当今发展较为成熟的微波通信和光通信相比,太赫兹通信拥有更多的优异特性^[14-15]:①太赫兹波频率高,通信容量大,更适用于宽带无线通信领域;②太赫兹波的波束较窄,具有良好的方向性,因此其抗干扰能力更强,安全性更高;③太赫兹波穿透性更强,可以大幅降低恶劣天气对通信系统的影响,实现全天候的工作效果;④太赫兹波波长短,天线尺寸相对较小,结构也不复杂,有利于节约成本。太赫兹通信的这些优异特性能够有效地解决现有通信技术中带宽和安全性的问题,在近距离战术通信、空间通信等特殊场景中具有重要的研究和应用价值。

(3) 太赫兹雷达

现代化战争主要围绕信息展开,而雷达技术在信息化战争中具有十分重要的地位,只有准确、迅速地对敌方单位进行侦查与预警,保持对信息的控制权,才能在瞬息万变的战争中获得先机。与常规雷达相比,太赫兹雷达具有工作带宽大、波长短、波束窄的特点,拥有极高的“空、时、频”分辨力;在空间上成像分辨率高,能够对目标的细节进行精密刻画;在时间上成像帧率高,能够对目标进行实时成像和准确制导;在频谱上多普勒敏感,有利于微动探测和高精度速度估计^[16-17]。最近,国防科技大学^[18]设计了一种 0.22 THz 的车载 SAR 成像系统,利用太赫兹雷达成功地获取了自行车目标的清晰图像,如图 0-2 所示。除此之外,现有

的军事隐形技术主要针对微波雷达系统,使用太赫兹雷达能够对隐形的目标进行侦测,起到反制的目的^[19]。

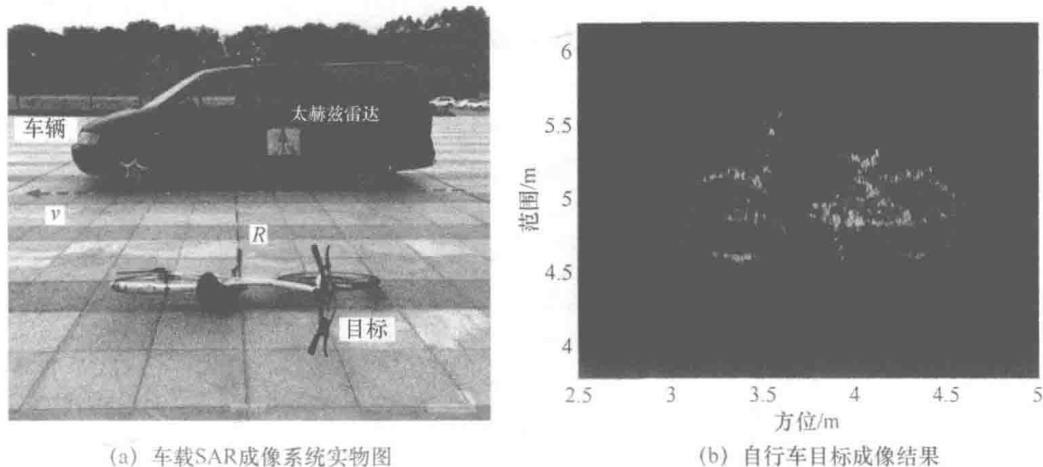


图 0-2 车载 SAR 成像与结果

(4) 太赫兹频谱学

太赫兹波丰富的频谱特征和宽带性使其在频谱学领域具有非常广阔的应用前景。一个典型的太赫兹脉冲能够覆盖非常宽的频率范围,其中就包含了许多轻分子的转动频率和大分子的振动频率^[20]。同时众多半导体材料的等离子体频率也处于该频段内,所以太赫兹波可以用来表征半导体的载流子密度及迁移率^[21]。此外,药品、爆炸物等极性材料在该频段内都具有非常丰富的频谱特征,通过对比待测样品与已知物质的频谱可方便地对样品材质进行鉴别。目前,太赫兹时域光谱技术已经在有机物、毒品、爆炸物的鉴别上取得了不错的成果^[22]。

0.2 超材料概述

超材料(metamaterial)是一种人工设计的新型电磁材料,其一般由亚波长尺寸的周期阵列单元构成,其拥有许多不同于自然界中常规材料的超常物理特性^[23-24]。超材料并不是一种新的材料形态,而是对自然界中的常规材料进行人工的组合设计,以实现其独特的物理性质。这是一种全新的设计理念,给人们对于材料的传统思维方式带来了很大的转变。对于超材料的研究最先是围绕左手材料开展的。1968年,俄罗斯物理学家 V. G. Veselago 预测了一种介电常数 ϵ 和磁导率 μ 同时为负值($\epsilon < 0, \mu < 0$)的材料,并将其命名为左手材料(left-handed material)^[25]。电磁波在左手材料中传播时,电场 E 、磁场 H 和波矢 k 满足左手螺旋关系,正好与电磁波在常规材料中的传播特性相反。Veselago 在理论上详细地分析了左手材料的超常物理性质,但在之后很长一段时间里没有人能够制备出具有这种特性的材料。直到 1999 年, J. B. Pendry 等人提出了能够单独实现负介电常数或者负磁导率的原理模型,并在此基础上设计了一种具有磁响应的开口谐振环(Split Ring Resonator, SRR)结构^[26]。之后, R. A. Shelby 等人首次在实验中验证了左手材料的存在^[27],如图 0-3 所示。2001 年,美国加利福尼亚大学在实验室中制造出了世界上第一个负折射率超材料,并通过

实验证明了负折射现象与负折射率。2002年,麻省理工学院从理论上证明了“左手材料”存在的合理性,预言了这种人工材料在高指向天线、微波波束聚焦、电磁波隐身等方面的应用前景。2006年杜克大学制造了能在光波下隐形的“隐身外衣”。2007年,著名出版社Elsevier发行了新期刊 *Metamaterials*,这标志着超材料学科的诞生。2009年宽频段的隐身衣出现了。2010年电磁黑洞被发现了。

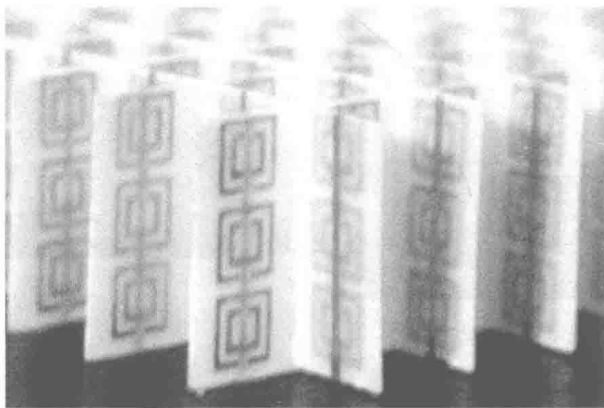


图 0-3 Shelby 等人设计的超材料样品图^[27]

0.2.1 超材料的特性

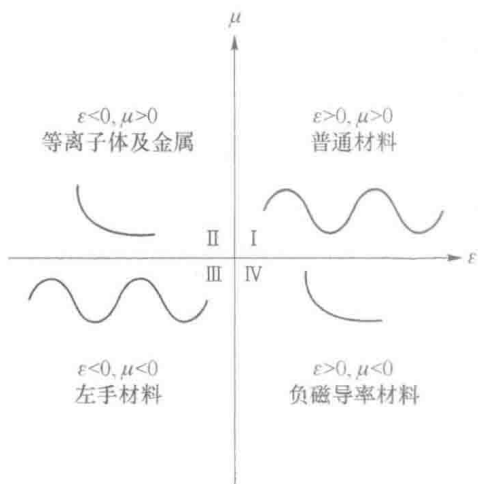


图 0-4 不同媒质中的电磁波特性

根据当代电磁理论,电磁波在媒质中的传播特点主要取决于磁导率 μ 和介电常数 ϵ 等参数,所以当对某种媒质材料进行电磁参量分析时,最先考虑的便是磁导率 μ 和介电常数 ϵ 。通常媒质可划分成 4 个象限,如图 0-4 所示。在第一象限中, $\epsilon > 0, \mu > 0$,自然界中的绝大部分材料均处于这一象限。有少部分材料在某些状态下会处于第二象限($\epsilon < 0, \mu > 0$),如等离子体及位于特定频段的部分金属。当 $\epsilon < 0, \mu > 0$ 时,折射率 n 为虚数,这意味着在这种材料中电磁波只能是消逝波 (evanescent waves)。因此,电磁波只能在折射率为实数的材料中传播。处于第四象限中的材料,其 $\epsilon > 0, \mu < 0$,因而折射率为虚数。电磁波入射到处于第四象限中的材料的行为与入射到处于第二

象限中的材料的行为相似。在第三象限中, $\epsilon < 0, \mu < 0$,折射率 n 为实数。此时,Maxwell 方程仍然允许电磁波在材料中传播,但材料的折射率 n 必须取负值,与第一象限中材料的电磁波传播性质完全不同。在第三象限的材料中,电磁波的波矢和能流方向是反平行的,也就是说电磁波的群速和相速是反平行的。

通常电磁波只能在折射率为实数的材料中传播。若 ϵ 和 μ 中只有一个为负值,则折射率为虚数,电磁波在材料中将由于只存在消逝波而不能传播。若材料的 ϵ 和 μ 均小于零,电

磁波在材料中是可以传播的,但材料的折射率必须取负值,并且电磁波的群速和相速反平行。

超材料有许多奇特的物理特性,比如负折射效应、逆多普勒效应、完美透镜效应等。

(1) 负折射效应

如图 0-5 所示,由 Snell 定律可知: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 。①当 $n_1 > 0, n_2 > 0$ 时, $\theta_2 > 0$, 即入射光线与折射光线位于分界面法线的两侧,如图 0-5(a)所示。②当 $n_1 > 0, n_2 < 0$ 时, $\theta_2 < 0$, 那么入射光线与折射光线位于法线的同侧,如图 0-5(b)所示。第②种情况相当于折射角为负,故称为“负折射”^[28]。

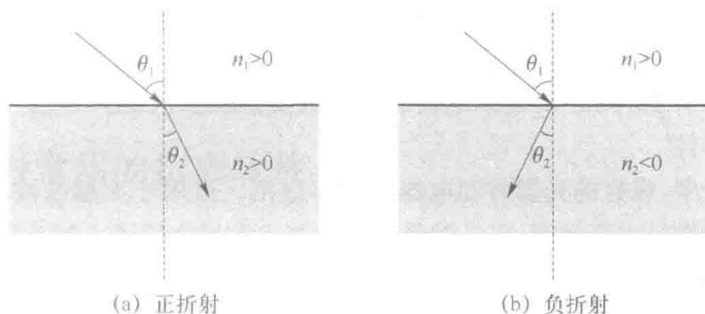


图 0-5 超材料的负折射现象

(2) 逆多普勒效应

若光源发出频率为 ω_0 的光,而侦测器以速度 v 接近光源,在一般介质之中,侦测器所接收到的电磁波频率将比 ω_0 高。而在左手材料中,因为能量传播的方向和相位传播的方向正好相反,所以如果两者相向而行,观察者接收到的频率会降低,则会收到比 ω_0 低的频率,反之则会升高,从而出现逆多普勒效应。

(3) 完美透镜效应

超材料透镜是一类典型的颠覆性技术。传统透镜受到衍射极限的约束,光学器件无法对尺度小于半个工作波长的物体成像,其深层物理原因是常规介质中消逝波的衰减。2000年, Pendry^[29]在理论上提出了负折射材料可以用于制作超透镜的想法,并证明了当介质的介电常数为负数时,电磁波中的消逝波成分会被放大,其中所携带的信息就可以在负折射率介质材料中传播。由负折射材料制备的平板具有成像的功能,物体 A 发射出的光线会经负折射率平板前后界面两次折射后重新汇聚在 B 处,进而实现无衍射极限的成像,其示意如图 0-6 所示。

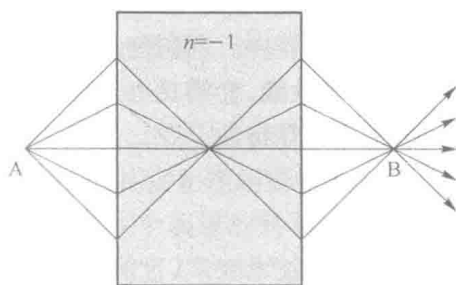


图 0-6 超材料的完美透镜效应

0.2.2 超材料的应用

通过调整超材料单元结构的几何参数,就可以调整超材料的磁导率、电导率、介电常数等物理特性,为各种新型功能器件的实现带来了曙光。同时,随着微细加工技术的飞速发展,超材料所能应用的频段范围得到进一步的扩充,这给超材料的应用提供了更多可能。超材料的应用涉及微波器件、太赫兹器件、电磁隐身、传感器和天线等多个领域。

(1) 微波器件

传统微波器件的大小和介质厚度与入射电磁波的波长直接相关,一般是 $1/2$ 或 $1/4$ 波长,而超材料对电磁波的吸收取决于该结构对电磁波的电响应和磁响应,这就导致吸收特定频段电磁波的超材料的尺寸可以比 $1/4$ 波长小很多。因此可以制作结构紧凑的器件,这大大地减小了器件的体积,同时改善了电路的频带宽度、增益等性能^[30-31]。

(2) 太赫兹器件

在太赫兹系统中,现有的光器件和电器件都不适用。适用于太赫兹波段的功能器件的缺乏是太赫兹技术面临的主要问题,也是阻碍太赫兹技术发展的瓶颈。对于超材料来说,通过改变其单元谐振结构、尺寸及组成成分就可以实现所需要的电磁参数,所以基于超材料、通过人工方法来制备太赫兹器件是解决太赫兹瓶颈的一个途径。如今,随着微结构制造工艺的不断发展,在太赫兹波段的超材料器件的制备方面已经取得了较大进展,现在已经出现了基于超材料的各种各样的太赫兹器件^[32-33],如太赫兹滤波器、太赫兹吸波器、太赫兹调制器等。

(3) 电磁隐身^[34-35]

超材料隐身技术可以分为两大类,一类是吸波隐身,另一类是透波隐身。超材料吸波隐身技术通过设计超材料使其对电磁波表现强烈的吸收特性,制备出具有强吸波效应的吸收剂,还可以与传统吸波材料复合制备出新型复合吸波材料,使材料满足微波隐身“薄、轻、宽、强”的要求,利用超材料吸波层与自由空间的阻抗匹配,大幅度减小反射波强度,进而达到隐身的效果。与传统隐身技术相比,超材料透波隐身的特点是靠引导电磁波,而不是靠吸收电磁波,因此,它没有目标影子,是国防军工领域的一项颠覆性技术,得到了各国军工界的广泛重视。

(4) 传感器

超材料传感器作为一种新型的检测手段,能够突破传统传感器的分辨率极限,实行无标记检测^[36-37]。目前太赫兹波段生物传感器的研究已经引起了人们的广泛关注。超材料传感器有以下几个优点:样品用量少,灵敏度高;无须加入其他试剂,可无标记检测;响应快,测量简单。

(5) 天线

天线是超材料应用较为成功的一类器件。利用超材料超常的电磁性质和高度可设计的特点,人们成功地开发出了多种具有高性能、能满足各种特殊要求的天线,实现了天线的小型化、高效、高增益、共型化、高信号选择等特性^[38-39]。

0.2.3 超材料的技术难点

超材料的应用可能导致众多领域的技术变革,目前这些技术变革正处于酝酿阶段,值得密切关注和期待。超材料作为一大类全新的材料系统,从它的研发到产生的颠覆性技术需克服一系列技术障碍,主要体现在以下几点^[40]。

(1) 超材料的模拟设计技术

目前超材料的研究以原理性探索为主,模拟仿真技术基于简单模型和通用的模拟软件,而实际应用的器件设计需要考虑多种因素、多场耦合和海量计算,各种超材料的专用设计技术尚需进一步发展。

(2) 超材料的制备技术

超材料的制备需要精密的材料加工,特别是一些电磁超材料(如太赫兹以上频率的电磁超材料)的制备依赖于相关加工技术的进步。

(3) 大尺寸超材料的工程可行性和服役性能

超材料由大量的人工周期单元构成,这种单元阵列的可工程化及其服役性能(如机械性能、热性能等)是其应用的难点,例如,利用电磁斗篷实现军事目标的完美隐身需要在其外面包覆较厚的超材料“铠甲”,如何将其减薄是一个重要难题。

0.2.4 超材料常用的仿真软件

仿真软件在超材料研究领域中的一类不可缺少的科研工具。在超材料的仿真研究中经常用到的软件有电磁场仿真软件、多物理场建模与仿真类高级数值仿真软件等。

① CST(Computer Simulation Technology)软件是全球最大纯电磁场仿真软件公司CST出品的三维全波电磁场仿真软件^[41]。CST工作室套装是面向3D电磁场、微波电路和温度场设计工程师的一款最有效、最精确的专业仿真软件包,共包含7个工作室子软件,集成在同一平台上,可以为用户提供完整的系统级和部件级的数值仿真分析。该软件覆盖整个电磁频段,提供完备的时域和频域全波算法。其典型应用包含各类天线/RCS、EMC/EMI、场路协同、电磁温度协同和高低频协同仿真等。在超材料仿真中,通常采用CST MICROWAVE STUDIO(CST MWS,CST微波工作室)。它是CST软件的旗舰产品,广泛应用于通用高频无源器件仿真,可以进行雷击(Lightning)、强电磁脉冲(EMP)、静电放电(ESD)、EMC/EMI、信号完整性/电源完整性(SI/PI)、TDR和各类天线/RCS仿真。结合其他工作室,如导入CST PCB STUDIO和CST CABLE STUDIO空间三维频域幅相电流分布,可以完成系统级电磁兼容仿真。与CST DESIGN STUDIO实现CST特有的纯瞬态场路同步协同仿真。

② HFSS(High Frequency Structure Simulator)软件是由美国Ansoft公司研究开发,基于有限元法原理设计的一款三维电磁仿真软件^[42]。该软件能提供有效快捷的三维电磁场仿真求解方案。HFSS软件能对微波无源器件及天线的物理结构参数进行全参数化建模和参数自动化扫描下的全波三维电磁场仿真,并能利用参数自动化扫描达到所需结果设计性能的最优化,精确给出所设计器件的参数。例如:HFSS可以计算天线参量,比如增益、方向性、远场方向图剖面、远场3D图和3dB带宽;绘制极化特性,包括球形场分量、圆极化场分量、Ludwig第三定义场分量和轴比。

③ COMSOL Multiphysics软件在多物理场建模与高级数值仿真类软件领域有较高的市场占有率^[43]。该软件广泛应用于各个领域的科学研究以及工程计算,被称为“第一款真正的任意多物理场直接耦合分析软件”。COMSOL Multiphysics以有限元法为基础,通过求解偏微分方程(单场)或偏微分方程组(多场)来实现真实物理现象的仿真,COMSOL Multiphysics含有大量预定义的物理应用模式,范围涵盖从流体流动、热传导到结构力学、