

山西大同大学著作出版基金资助

单负特异材料

Single-negative Metamaterials

董丽娟 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

0734

山西大同大学著作出版基金资助

单负特异材料

董丽娟 著

Single-negative Metamaterials



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书从单负特异材料入手,介绍了电磁波通过单负特异材料及相关复合结构的光子传播行为。全书分为两部分,第一部分为基础部分,系统讲述了特异材料和光子晶体的基础知识、研究方法和应用前景;第二部分为专题部分,分别介绍了与单负特异材料相关的五个研究课题。

本书还有一个特点是理论与实验相结合,其中涉及的一些特殊性质除了理论的研究结果,还有相应的实验验证过程。本书可作为人工微结构材料专业研究生的参考书,也可供有关科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

单负特异材料/董丽娟著. —上海:同济大学出版社,2015.12
ISBN 978-7-5608-6207-1

I. ①单… II. ①董… III. ①光子晶体—研究 IV. ①O734

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 028966 号

单负特异材料

董丽娟 著

责任编辑 张 莉 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店
印 刷 虎彩印艺股份有限公司
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 10.5
字 数 210 000
版 次 2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-6207-1

定 价 36.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前 言

人们对新型材料的探索是永无止境的。自从 20 世纪 50 年代发现了半导体具有可以操纵电子流动的能力以来,引发了一场微电子革命,带来了电子工业和信息产业的飞速发展,从某种意义上来说进入了半导体时代。近年来,人们又发现了可以控制光子运动的新型材料——光子晶体(photonic crystals)和特异材料(meta-materials),这个发现将会带着我们进入下一个时代——光子时代。光子晶体和特异材料的出现,引起了人们极大的研究兴趣,其中光子晶体曾在 1998 和 1999 年两次被美国 *Science* 杂志评为当年自然科学领域中十项重大突破之一,而特异材料也曾在 2003 年和 2006 年两次被该杂志评为当年世界十大重大科技进步之一。

特异材料在物理学、材料科学以及微波工程领域引起了人们愈来愈多的关注,它有着不同于普通材料的奇异电磁特性,这些特性为特异材料呈现了广阔的应用前景。特异材料一般有双负特异材料(负折射率材料、左手材料)、单负特异材料、零折射率材料等,单负特异材料是其中的一类。目前,我们看到的与特异材料相关的书籍大多阐述与双负特异材料相关的理论及实验研究成果,单独对单负特异材料的系统讲解较少。本书从单负特异材料入手,重点介绍电磁波通过单负特异材料及相关复合结构的光子传播行为。本书内容分为两部分,一部分是基础部分,系统阐述特异材料和光子晶体的基础知识、研究方法和应用前景,包括第 1 章特异材料和光子晶体、第 2 章转移矩阵方法的内容。第二部分是专题部分,挑选并详细阐述了与单负特异材料密切相关的五方面研究课题,从单负特异材料自身的物理性质入手,逐渐地扩展到与其他结构复合后的物理性质,介绍的主线重点围绕单负特异材料及其复合结构的透射性质。第二部分的内容包括第 3—7 章的内容,分别是第 3 章损耗型单负特异材料透射性质的理论与实验、第 4 章含单负特异材料光子

晶体的零有效相位能隙、第5章含单负特异材料光子晶体的若干物理现象、第6章磁光单负特异材料复合结构的法拉第效应、第7章一维掺杂光子晶体嵌入两种单负特异材料中的透射性质。

本书的研究内容一部分来源于作者的科研工作,另一部分来源于课题组其他科研人员的研究成果,具体在参考文献中都有详细注解,这里对他们表示诚挚的谢意。

由于本人水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请大家批评指正。

董丽娟

2015年11月于山西大同大学

目 录

前言

第 1 章 光子晶体和特异材料	1
1.1 光子晶体	1
1.2 磁光光子晶体(Magnetophotonic crystals)	4
1.3 特异材料(Metamaterials)	6
1.3.1 特异材料概述	6
1.3.2 双负特异材料	7
1.3.3 单负特异材料	9
1.3.4 零折射率材料	13
1.3.5 特异材料的制备	14
1.3.6 各向异性的特异材料	17
1.4 光子晶体与特异材料	19
1.5 含特异材料的光子晶体	19
1.6 微波仿真软件简介	20
本章参考文献	22
第 2 章 转移矩阵方法	34
2.1 基本微分方程(TE 波)	34
2.2 特征矩阵(TE 波)	38
2.3 一维多层膜的转移矩阵	41

本章参考文献	43
第 3 章 损耗型单负特异材料透射性质的理论与实验	45
3.1 非单调透射性质的物理机制	46
3.2 损耗型单负特异材料单层结构的非单调透射性质	47
3.2.1 菲涅尔公式解析分析方法	47
3.2.2 定向分析反射率和透射率的变化趋势	50
3.2.3 非单调变化的透射性质	53
3.3 损耗型单负特异材料双层结构的非单调透射性质	54
3.3.1 随着耗散系数变化的非单调透射性质	54
3.3.2 随着厚度变化的非单调透射性质	55
3.4 实验验证	56
3.4.1 单负特异材料的制备	56
3.4.2 仿真和实验结果	60
本章参考文献	67
第 4 章 含单负特异材料光子晶体的零有效相位能隙	71
4.1 零有效相位能隙	72
4.2 传输线模型	78
4.3 宽频带的全向能隙	82
4.4 零有效相位能隙和零平均折射率能隙的异同	86
4.5 实验验证	87
本章参考文献	90
第 5 章 含单负特异材料光子晶体的若干物理现象	92
5.1 光子量子阱结构	92

5.2	高品质因子的紧凑型滤波器	93
5.2.1	缺陷模频率的本征方程	94
5.2.2	有限周期结构的缺陷模	98
5.3	自准直现象	101
5.3.1	自准直机制	101
5.3.2	亚波长自准直	105
5.4	异质结中电磁波的隧穿现象	106
5.4.1	异质结中电磁波隧穿现象的实验验证	108
5.4.2	光子晶体周期性的破坏对隧穿现象的影响	115
	本章参考文献	116
第 6 章	磁光单负特异材料复合结构的法拉第旋转效应	119
6.1	4×4 转移矩阵方法	120
6.1.1	折射率的形式	121
6.1.2	转移矩阵的推导	122
6.1.3	反射率、透射率及法拉第旋转角的推导	124
6.2	光子晶体带隙等效单负特异材料	126
6.3	异质结构的法拉第旋转效应	128
6.3.1	无损耗时的光隧穿与法拉第旋转效应	128
6.3.2	强损耗时的光隧穿与法拉第旋转效应	133
6.3.3	实际参数	137
6.4	三明治结构的法拉第旋转效应	140
6.4.1	双透射峰情况	140
6.4.2	单透射峰情况	142
6.4.3	增益情况	144
	本章参考文献	145

第 7 章 一维掺杂光子晶体嵌入两种单负特异材料中的透射性质	149
7.1 理论模型	149
7.2 高品质因子的单缺陷模透射	150
7.3 弱吸收对单缺陷模透射的影响	154
本章参考文献	156

光子晶体和特异材料

1.1 光子晶体

半导体的出现带来了从日常生活到高科技革命性的影响:大规模集成电路、计算机、信息高速公路等。几乎所有的半导体器件都是围绕着如何利用和控制电子的运动而展开的,电子在其中起着决定性的作用。但是由于电子之间存在相互作用和静止质量等特性,使得在不久的将来会出现电子器件集成的极限。光子有着电子所没有的优势:速度更快,光子之间没有相互作用,所以光子的传输特性是电子所无法比拟的,半导体的速度和集成极限使得光子晶体的诞生成为必然。光子晶体是 20 世纪 80 年代末提出的新概念和新材料。这种材料有一个显著的特点,可以如人所愿地控制光子的流动,是光电集成、光子集成、光通讯、微波通讯、空间光电技术以及国防科技等现代高新技术的一种新概念材料,也是为相关学科发展和高新技术突破带来新机遇的关键性基础材料。由于其独特的性质,光子晶体可以制作全新的或以前不能制作的高性能光学器件,这在光通讯上也有重要的用途,如用光子晶体器件来替代传统的电子器件,信息通讯的速度将快得无法想象。激光的产生,量子电子学和量子电动力学的充分发展以及光子学的产生为光子晶体的产生准备了充分条件,光子晶体就此产生了。

光子晶体,其概念最初是在 1987 年由美国 Bell 实验室的 E. Yablonovitch 和 Princeton 大学的 S. John,分别在研究如何抑制光的自发辐射和电介质中光子局域时,共同借鉴固体物理中固体的晶格周期性及其能带特性,开创性地各自独立地

提出的。由固体物理学中的能带理论可知,电子受到晶格周期势场的散射时,散射波相互干涉而形成了能带结构,各通带之间会有带隙。如果电子态的能量在通带内,则电子以布洛赫波的形式存在,可以在固体中传播。如果电子态的能量正好落在了带隙内,则不能在固体中传播。类比固体中的周期势场,可以人为地在结构上构造一种周期“光子势场”,它可以用来调控光子的运动状态。例如,可以在空间上周期变化两种不同介电常数的材料,形成对光子的周期散射,从而产生类似于电子能带的光子能带。这种空间周期性变化的结构就被称为光子晶体。一般来讲,光子晶体具有光子带隙(photonic band gap)和光子局域两个基本的特性。

光子带隙是光子晶体最基本的特性之一。在介电常数不同的两种材料周期性排列的结构中,由于周期性光子势场的存在,形成了光子能带。则在能带中,某频率的电磁波如果处于通带内就可以透射过去,否则,频率处于带隙内的电磁波就不能透过。这里的带隙就是我们所说的光子带隙,具有“光子带隙”的材料也称作“电磁带隙材料”(electromagnetic band gap)。

光子局域是光子晶体的另一个基本特性,它与光子禁带中的缺陷能级紧密相连。在周期性排列的光子晶体结构中引入缺陷后,将在光子带隙中出现相应的缺陷能级,此频率处的电磁波原本处于被禁止传播的状态,此时由于缺陷的引入使得电磁波会以与缺陷能级频率相对应的特定频率在结构中传播,这个性质被称为光子局域性。

按照光子晶体中不同介电材料的空间结构周期性排列方式,可以把光子晶体分成三种类型,即一维光子晶体、二维光子晶体和三维光子晶体,如图 1.1 所示,因而光子晶体的出现大大拓展了人们构造新型人工材料的思路。由于光子晶体和半导体晶体的某些特性相似,固体物理中的许多概念都可以用于光子晶体,如倒格子、布里渊区、布洛赫波等,很多用于研究半导体晶体的方法也可以用于光子晶体。

光子晶体虽然是个新概念,但自然界中早就已经存在这种结构的物质。图 1.2(a)和 1.2(b)中给出天然宝石——猫眼石(Opals),其之所以绚丽夺目,来源于有序排列的纳米矿物颗粒(二氧化硅)对光的干涉和衍射。在生物界中,也不乏有光子晶体的踪影,以花间飞舞的蝴蝶为例,其翅膀上的斑斓色彩,其实是鳞粉上

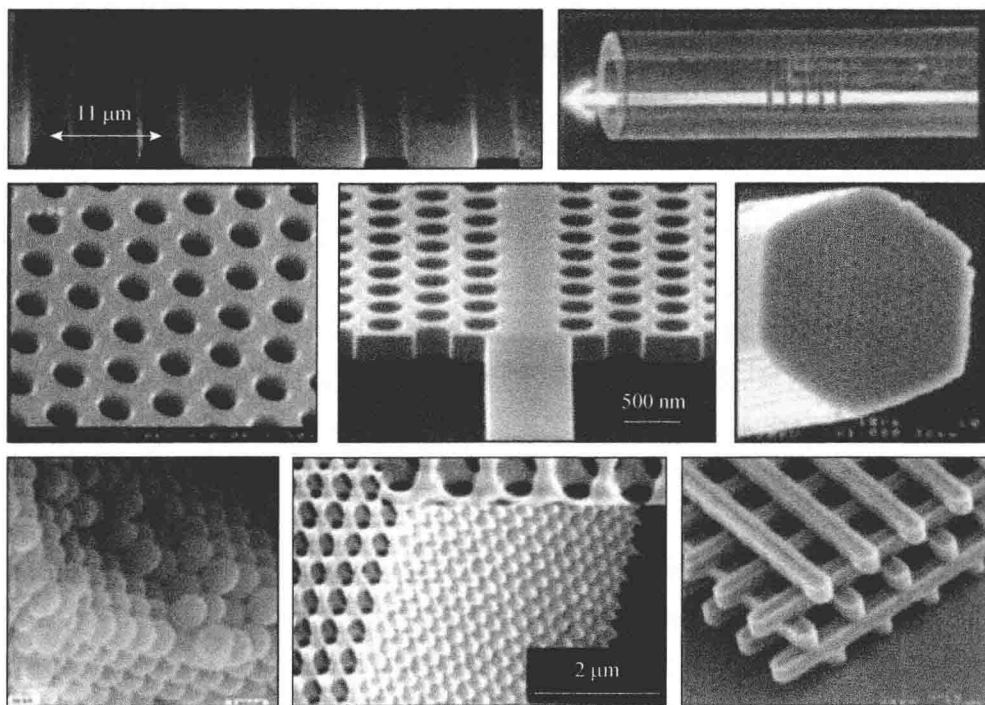


图 1.1 一维、二维及三维光子晶体的结构示意图

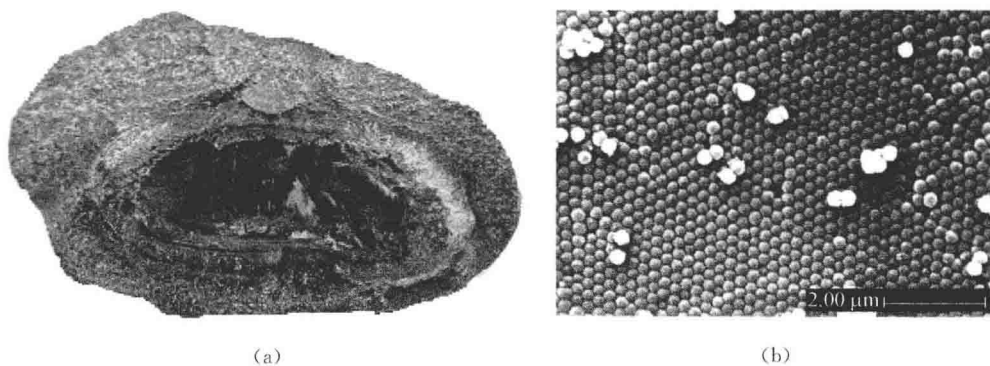


图 1.2 天然宝石——猫眼石由二氧化硅纳米球组成(SEM 成像图)

排列整齐的次微米结构选择性反射日光的结果。其他还有如天堂鞭尾鱼鳞片、孔雀羽毛、鲍鱼壳、海老鼠刚毛、象鼻虫的颜色也是由于结构的周期性引起的。

1.2 磁光光子晶体(Magnetophotonic crystals)

近十年内,随着光子晶体研究的迅速发展,光子晶体被广泛应用于许多领域,包括被应用到磁光效应方面。我们知道,置于外磁场中的介质,在光与外磁场作用下,其光学特性(如吸光特性、折射率等)发生变化的现象称为磁光效应。磁光效应包括塞曼效应、磁光法拉第旋转效应、科顿-穆顿效应和磁光克尔效应等,这些效应均起源于物质的磁化,反映了光与物质磁性间的联系。磁光介质是指拥有磁光效应(magneto-optical effect)的介质。这里重点介绍磁光法拉第旋转效应的原理。

首先,给出磁光法拉第旋转效应的简单解释。线偏振光可分解为左旋和右旋两个圆偏振光。无外磁场时,介质对这两种圆偏振光具有相同的折射率和传播速度

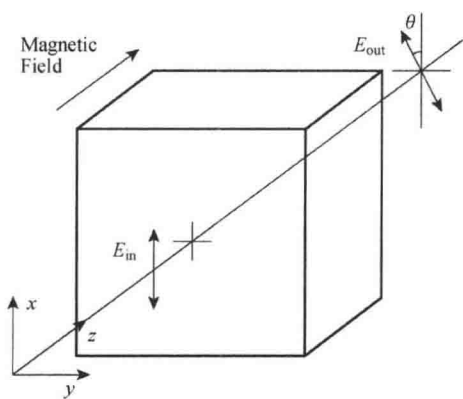


图 1.3 磁光法拉第旋转效应的结构示意图

度,通过 l 距离的介质后,对每种圆偏振光引起了相同的相位移,因此透过介质叠加后的振动面不发生偏转;当有外磁场存在时,由于磁场与物质的相互作用,改变了物质的光特性,这时介质对右旋和左旋圆偏振光表现出不同的折射率和传播速度,二者在介质中通过同样的距离后引起了不同的相位移,叠加后的振动面相对于入射光的振动面发生了旋转,如图 1.3 所示。

其次,给出法拉第旋转效应产生的微观物理解释。当光波进入已施加稳恒磁场的磁光介质中,介质里的束缚电子受到电场和外磁场的共同作用而运动。当单色圆偏振光进入介质中,在旋转电场作用下,电子作稳定的圆周运动。外加一个恒定磁场,其方向垂直于电子作圆周运动的轨道平面,则电子受到洛伦兹力的作用

$f = e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 。依据磁场和电场的方向不同,作用在电子上的力,可以是向心力,也可以是离心力,这就使得电子有两种不同的运动轨道半径,电子的左旋和右旋角速度将有微小的变化 $\omega_L = \omega + \Delta\omega$, $\omega_R = \omega - \Delta\omega$, 相应有不同的极化强度、折射率等,从而出现了两种不同的传播模式。

对于每一种给定的磁光介质,法拉第旋转方向与光的传播方向无关(不管传播方向与磁场方向同向或反向),仅由磁场的方向决定,这是法拉第效应的非互易特性。固有旋光效应的旋光方向与光的传播方向有关,顺着光线和迎着光线方向观察,线偏振的振动面的旋转方向是相反的,而法拉第效应则不然,在磁场方向不变的情况下,光往返穿过磁光介质时,法拉第旋转角将倍增。利用法拉第旋转方向与光传播方向无关这一特性,可令光线在介质中往返数次,从而使法拉第效应加强(偏振面的旋转角度增大),即偏振面转过的角度与光在磁光介质中的总光程成正比。利用法拉第磁光效应的非互易特性,可以制作光隔离器、磁光开关、回转器以及环形器等磁光器件。

然而,利用单层的磁光介质不利于制作小型化的磁光器件。原因在于法拉第效应的大小与介质的长度有关(不改变外界磁场和温度),需要的法拉第效应越大则需要介质的长度越长。如果想要设计小体积的光隔离器,则需要的法拉第效应较强且长度不能太大,这一点利用磁光介质本身是很难实现的。随着光子晶体的发展,人们发现利用光子晶体可以在增强法拉第效应的同时减小光隔离器的体积。包含磁光介质的光子晶体称为磁光光子晶体,其中磁光介质作为杂质掺入光子晶体中为一种磁光光子晶体,如图 1.4

所示。在这种磁光光子晶体中,光子带隙中形成了局域的缺陷模,电磁场在磁光介质上的强局域增强了光与磁光介质的相互作用(即相对于增大了有效的光程长度),从而导致了透射率和法拉第效应的同时增强,如图 1.5 所示,其中 Bi:YIG 是钇铁石榴石,一种常见的磁光介质。

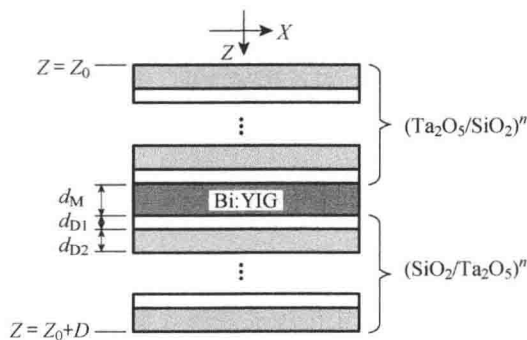


图 1.4 Bi:YIG 掺杂于一维光子晶体结构示意图

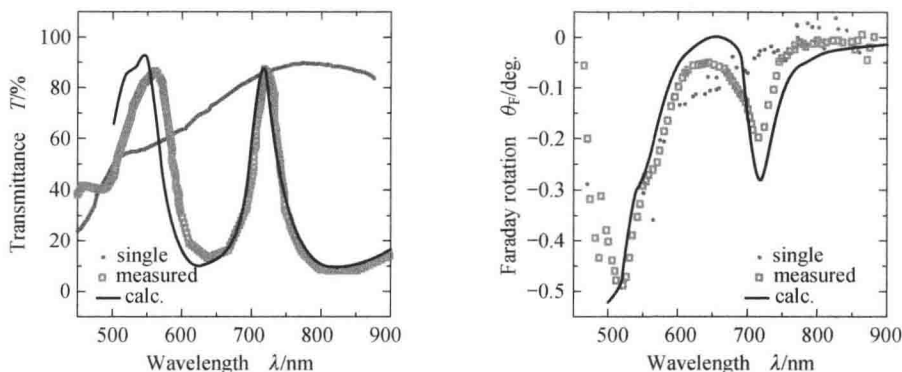


图 1.5 Bi: YIG 掺杂于一维光子晶体中的透射率和法拉第旋转角度的变化

利用磁光光子晶体实现的光隔离器,相对于单层磁光介质来说,具有透射高、法拉第旋转效应强、体积小的优点。

1.3 特异材料(Metamaterials)

近年来,一类新型人工特异材料(超常材料、超颖材料、奇异材料)在物理学、材料科学以及微波工程领域引起了人们愈来愈多的关注。特异材料有着不同于普通材料的奇异电磁特性,这些特性为特异材料展开了广阔的应用前景。最近,人们使用特异材料制成完美透镜(perfect lens)、微波器件、天线、隐身斗篷(invisibility cloak)等。对于特异材料及其相关器件的奇异电磁特性的研究有利于发掘电磁波在其中传输时,对其传播方向、传播速度、能量分布以及色散特性等方面的调控作用,从而进行有效的操控。因此,对特异材料的研究具有深远的意义。

1.3.1 特异材料概述

介电常数 ϵ 和磁导率 μ 是描述材料对电磁场响应的两个基本物理量,决定着电磁波在物质中的传播特性。根据材料的介电常数和磁导率符号的不同,可以将材料分成五种类型,如图 1.6 所示。

图 1.6 是按照介电常数和磁导率对材料空间进行划分的示意图,图中的 r 是

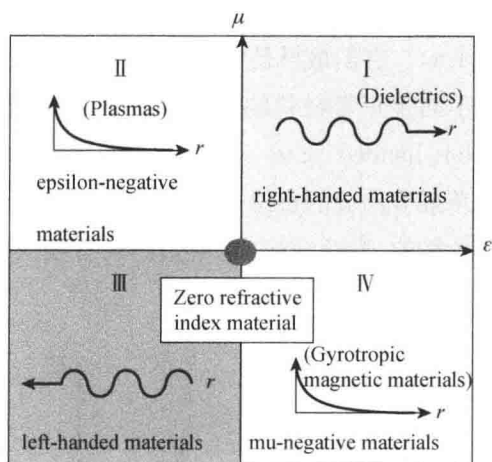


图 1.6 按照介电常数 ϵ 和磁导率 μ 对材料空间进行划分

指空间量。在图中可以看到,对于第 I 象限的材料,介电常数和磁导率都大于零(又称双正材料, double-positive materials),这种材料就是自然界中最常见的材料,电磁波在其中以传播场的形式向前传播。在这种材料中,电场 $\mathbf{E}$ 、磁场 $\mathbf{H}$ 和波矢量 $\mathbf{K}$ 三者构成右手螺旋关系,同时电场 $\mathbf{E}$ 、磁场 $\mathbf{H}$ 以及坡印廷矢量 $\mathbf{S}$ 也构成右手关系,因此又称其为右手材料(right-handed materials)。而对于第 II、III、IV 象限和原点处的材料则不然,第 II 象限为 ϵ 小于零而 μ 大于零的负介电常数材料;第 III 象限为 ϵ 和 μ 同时小于零的左手材料;第 IV 象限为 ϵ 大于零而 μ 小于零的负磁导率材料;坐标原点处为 ϵ 和 μ 都等于零的零折射率材料。由于它们的介电常数和磁导率的变化,电磁波在其中存在的形式也不一样,由它们组成的结构有着很新颖的物理性质和广泛的用途,所以人们把这四种材料称为特异材料。下面对其进行具体的叙述。

1.3.2 双负特异材料

1. 双负特异材料的性质

双负特异材料(Double-negative materials)对应图 1.6 中第 III 象限的材料,因为这种材料的介电常数和磁导率的符号都是负的,所以得此名称(也称双负材料)。

另外,这种材料的折射率($n = -\sqrt{\epsilon\mu}$)是负的,所以也被称为负折射率材料(negative-refractive index)。它们最早是由 Veselago 在 1968 年理论上提出的,波在其中仍然可以传播,不同于正常材料的是 $\mathbf{E}$, $\mathbf{H}$, $\mathbf{K}$ 三者构成了左手螺旋关系,故又被称作左手材料(left-handed materials),如图 1.7 所示,并且波矢量 $\mathbf{K}$ 和能量传播方向 $\mathbf{S}$ 反向,即沿传播方向波的相位是减少的。此外,根据能量守恒定律可以知道,左手材料必然是色散的,损耗(loss)也对负折射有很大的影响,理论证明,左手材料必然存在损耗。

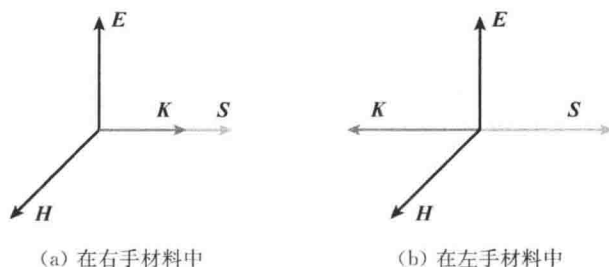


图 1.7 电场 $\mathbf{E}$ 、磁场 $\mathbf{H}$ 、波矢传播方向 $\mathbf{K}$ 、能量传播方向 $\mathbf{S}$ 之间的关系

2. 双负特异材料的研究进展和应用

Veselago 在最初提出左手材料的时候便预言了它所具有的奇异电磁特性,此后大量的实验也验证了左手材料的确存在着负折射效应、逆多普勒效应以及反常切伦科夫辐射效应等。除此之外,左手材料还有许许多多新奇的物理性质。近年来,随着人们对特异材料的制备、物理特性等研究的深入,左手材料在完美透镜、微波器件、天线、电磁波隐身乃至光存储方面都开始崭露头角。

完美成像由 Pendry 在 2000 年提出。这种成像是利用双负材料实现的。其原理是由于双负材料能够放大“倏逝波”,从而使光场的所有成分都无损失地参与了成像,Pendry 把这种可突破衍射极限的透镜称为“完美透镜”。但是,双负材料通常是由金属材料制备,而金属材料的损耗很大,所以在实验上会影响到成像的分辨率。然而,由于微带传输线通常具有损耗小的特性,因此有人利用左手材料传输线实现的超透镜在微波波段的实验上观察到了突破衍射极限的成像。

在微波器件方面,双负材料也发挥了很大的用处。例如,N. Engheta 提出用