

RENGONG CHAOCAILIAO FUHE JIEGOUZHONG DE
GUANG DE CHUANSHU YU TIAOKONG

人工超材料复合结构中的 光的传输与调控

康永强 著

非外借

中国原子能出版社

人工超材料复合结构中的 光的传输与调控

康永强 著

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

人工超材料复合结构中的光的传输与调控 / 康永强

著. -- 北京 : 中国原子能出版社, 2019. 6

ISBN 978-7-5022-9868-5

I. ①人… II. ①康… III. ①复合材料—光传输技术

IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 134622 号

内 容 简 介

本书主要探讨了人工超材料复合结构中的光的传输与调控。书中的人工超材料复合结构包括光子晶体,单负材料,双负材料(左手材料),石墨烯,石墨烯基双曲超材料,氮化硼等。本书逻辑清晰,内容丰富新颖,是一本值得学习研究的著作,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。

人工超材料复合结构中的光的传输与调控

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 张 琳

责任校对 冯莲凤

印 刷 三河市铭浩彩色印装有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 13.25

字 数 237 千字

版 次 2019 年 9 月第 1 版 2019 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-9868-5 定 价 63.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

前 言

在人类社会发展的历史上,每一次运用新的材料代替传统的材料都会推动人类社会高速的发展,甚至可以导致一场科技革命。例如,青铜器的发明,使得人们用青铜器代替了石器,使人类的原始社会进入了社会文明;铁器的发明和制造,使得人们用铁器代替了铜器,推动了人类从原始社会进入了更加发达的封建社会;而钢铁的广泛使用,导致了 17 世纪的工业革命,推动了人类社会进入高速发展的资本主义社会。然而,人们对新型材料的探索是无止境的,20 世纪 50 年代半导体材料的出现,实现了人们对电子运动的控制,引起了建立在半导体材料基础上的微电子技术的高速发展和广泛应用,导致了一场信息产业革命。然而,半导体材料中低速运动的电子限制了电子设备速度的提升,如果我们用光子代替电子,由于光子是玻色子,不带电荷,不像电子那样具有相互作用,这样就有助于极大地降低能量损耗。这就需要一种特殊的晶体来代替传统半导体材料控制光子的运动,这种特殊的晶体被称为光子晶体。光子晶体是一种光学尺度上介电常数周期排列的人工晶体材料,与半导体晶体有很多类似点,可以看作是半导体晶体在光学领域的对应物。光子晶体的出现,使得人们制造光电子器件和集成光路的梦想得以实现。近年来,人们又成功构造出超材料(metamaterials),超材料指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,与传统意义上的材料的区别在于用宏观尺寸单元代替了原来微观尺寸的原子或分子,人们可以通过人为地设计单元结构来控制材料属性,构成自然界不存在的特殊结构材料,从而实现全新的线性和非线性光学特性和独特的功能,达到控制光和电磁波的目的。超材料于 2003 年和 2006 年两度被 *Science* 杂志列为世界十大科技进展之一。

目前,超材料在科学界的各个领域都受到了极大的关注,包括物理学、光学、材料学、电子学以及化学等,它是多个学科相互交叉和和谐发展的产物。国内外也有众多学者从事人工超常材料及其复合结构的研究,不但其应用领域的研究非常活跃,而且在基础理论方面的研究成果也颇丰硕。本书主要介绍了电磁波通过超材料及其复合结构对光子的传输和调控。研究内容主要来源于作者多年的科研工作,少部分内容参考新近出版的文献资料,具体在参考文献中都有详细注解。

全书分9章,第1章为基础部分,讲述了光子晶体和超材料及其复合结构的基础知识、研究方法和应用前景;第2章由两种单负材料组成光子晶体的相位特性和滤波特性;第3章类比电子的 Bloch 振荡理论,研究了含各向异性左手材料和右手材料组成一维光子晶体微腔的 Wannier-Stark 态;第4章单负双层的反射率和偏振度及三层匹配结构的共振隧穿特性;第5章含石墨烯基双曲超材料光子晶体的宽带吸收;第6章含氮化硼异质结构的吸收特性;第7章掺杂光子晶体组成异质结构的耦合增强吸收;第8章一维 Thue-Morse 准周期结构的吸收特性;第9章介绍了古斯-汉欣位移的常用研究方法,以及对几种结构的古斯汉兴位移及调控进行研究。本书写成,承蒙山西省自然科学基金项目(201801D121071)、大同市基金研究项目(2017131)的经费支持,山西大同大学基金资助,这里表示诚挚的谢意。

由于作者水平及能力有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请各位读者批评指正。

作者

2019年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 光子晶体简介	3
1.2 超材料(Metamaterials)概述	8
1.3 含超材料的光子晶体	14
1.4 单双负材料的制备与负折射现象的实验验证	15
1.5 石墨烯超材料及氮化硼	19
参考文献	21
第 2 章 单负超材料组成一维光子晶体的滤波特性	36
2.1 一维层状结构的传输矩阵	36
2.2 单负超材料组成的一维光子晶体的相位特性	38
2.3 两种单负材料组成的光子双量子阱结构	52
2.4 两种单负材料组成的光子多量子阱结构	57
2.5 本章小结	60
参考文献	61
第 3 章 各向异性左手材料和右手材料组成一维光子晶体微腔的 Wannier-Stark 态	65
3.1 电子的 Bloch 振荡理论	66
3.2 各向异性左手材料	66
3.3 各向异性左手材料和右手材料组成的一维光子晶体	67
3.4 有效介质理论	69
3.5 零均值折射率带隙	71
3.6 各向异性左手材料和右手材料组成光子晶体耦合微腔	75
3.7 本章小结	80
参考文献	80
第 4 章 含色散单负材料三层简单结构的共振隧穿	86
4.1 损耗型单负材料双层结构的反射率及偏振度	87

4.2	由单负材料构成的三明治结构 ENG/MNG/ENG	93
4.3	等效介质近似	94
4.4	ENG/MNG/ENG 完全隧穿的条件	95
4.5	本章小结	102
	参考文献	103
第 5 章	含石墨烯基双曲超材料光子晶体的宽带吸收	106
5.1	石墨烯的电导特性	106
5.2	石墨烯基双曲超材料等效介电常数	107
5.3	含石墨烯基双曲超材料光子晶体的宽带吸收	107
5.4	本章小结	111
	参考文献	111
第 6 章	含氮化硼异质结构的吸收特性	115
6.1	理论模型	115
6.2	含六方 hBN 晶体异质结构的吸收特性	117
6.3	含六方氮化硼异质结构的磁场分布	118
6.4	介质材料厚度对吸收的影响	119
6.5	本章小结	120
	参考文献	120
第 7 章	掺杂光子晶体组成异质结构增强吸收	124
7.1	掺杂光子晶体的吸收特性	124
7.2	金属和掺杂光子晶体的耦合增强吸收	126
7.3	石墨烯和掺杂光子晶体增强吸收	129
7.4	本章小结	133
	参考文献	133
第 8 章	一维 Thue-Morse 准周期结构	137
8.1	理论模型	137
8.2	Thue-Morse 结构中全方向反射带隙	138
8.3	Thue-Morse 结构的材料特性对反射谱的影响	141
8.4	含缺陷时 Thue-Morse 结构的透射谱	145
8.5	含石墨烯基双曲超材料 Thue-Morse 准周期结构的吸收特性	147

8.6 本章小结	151
参考文献	152
第 9 章 几种结构中的 Goos-Hänchen 位移研究	157
9.1 Goos-Hänchen 位移简介	157
9.2 古斯-汉兴位移的主要理论研究方法	157
9.3 Goos-Hänchen 位移研究进展	169
9.4 Goos-Hänchen 位移效应的应用	172
9.5 棱镜耦合结构中的 Goos-Hänchen 位移	173
9.6 石墨烯基双曲超材料的古斯-汉欣位移	179
9.7 基于金属-绝缘体-半导体结构的古斯-汉兴位移	186
9.8 本章小结	193
参考文献	194

第 1 章 绪 论

人们对新型材料的探索是无止境的,20 世纪 50 年代人们发现了半导体材料可以实现对电子运动的控制,引发了一场微电子革命。有了半导体材料,科学家们可以控制电子的运动,运用半导体材料可以制成许多电子器件^[1-10]。例如,半导体二极管^[6-8]、晶体三极管^[9-12]、场效应管^[13-18],激光二极管^[19-32]、发光二极管(LED)^[33-40]等。

时至今日,随着半导体材料制作技术和制造工艺的飞速发展,半导体器件已经发展到高度集成化,超大规模的集成电路的特征线宽已经发展到 90 nm,有科学家预测,如果集成电路的特征尺寸缩小到 50 nm,即电子的自由程,将会达到物理技术上的极限,集成电路的集成度将无法再提高,电子工业的发展将会受到极大的限制,这就是人们说的“电子瓶颈”。同时,半导体产业带给我们一个“信息爆炸”的现代网络通讯时代,“信息爆炸”对高速、大容量信息传输、信息处理和信息存储设备有更高的需求。然而,半导体材料中低速运动的电子限制了电子设备速度的提升,因此科学家们需要探索新的高速信息处理和大容量的信息存储设备。

科学家经过分析研究发现,集成电路的集成度受到电子设备速度限制的根本原因在于:我们所用的信息载体是电子,电子带有电荷存在库仑力的相互作用,容易产生热效应,这样使得集成电路的集成度受到限制。如果我们用光子代替电子,由于光子是玻色子,不带电荷,不像电子那样具有相互作用,这样就有助于极大地降低能量损耗。此外,光子运行速度快、频段宽、信息容量大,更加适合下一代通信技术。然而,要控制光子的运动,就需要一种特殊的晶体来代替传统半导体材料,这种特殊的晶体被称为光子晶体(photonic crystal)^[41-50]。光子晶体的概念是在 19 世纪 80 年代第一次被提出来的,是一种光学尺度上介电常数周期排列的人工晶体材料,与半导体晶体有很多类似点,可以看作是半导体晶体在光学领域的对应物。光子晶体的出现,使得人们制造光电子器件和集成光路的梦想得以实现。光子晶体由于具有光子禁带和光子局域两种特性,在现代通讯、激光、光电子和集成光学领域具有重要的应用^[51-67]。通过光子晶体可以制造出各种光电子器件和集成光路,例如光子晶体滤波器^[68,69]、低阈值得激光器^[70]、光子晶体反射镜^[71,72]等。目前已经有大量的光子晶体器件开发成功并投入使用,所

以光子晶体迅速成为国际学术界的研究热点^[68-70,72]。有人称 21 世纪是光的世纪,对光子新材料的研究是走向新世纪的入场券。然而光学中由于衍射极限的限制,传统光子晶体器件材料的尺寸是微米量级,这大大限制了光学集成领域的发展。近年来,人们又成功构造出超材料(metamaterials),超材料指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,它是一种将具有特定几何形状的亚波长宏观基本单元周期性或非周期性地排列所构成的人工材料^[73-93]。人们可以通过人为地设计单元结构来控制材料属性,构成自然界不存在的特殊结构材料,从而实现全新的线性和非线性光学特性和独特的功能,达到控制光和电磁波的目的。超常材料的兴起起源于负折射超常材料(negative-index metamaterial)的研究^[74],使得超常材料在过去的十多年中引起科学界各个领域的极大的关注,包括物理学、光学、材料学、电子学、计算机以及化学等,它是多个学科相互交叉、和谐发展的产物。

超常材料的出现和发展具有双重意义^[94-97]:首先,超常材料是一种新型人工电磁媒质,它的出现和发展为人们提供了自然界不存在的新型人工材料,填补了介电常数和磁导率象限中的两大空白区域,使科学家获得了一些常规材料所不能获得物理现象和器件;其次,超常材料是一种结构材料,其设计方法和思想为设计新型特定器件提供了一种全新的思维方法,即根据特定的需要,基于基本物理原理,设计超常材料,以实现具有新奇特性的光电子器件,这种思维方法对各个领域的科学家来说都是非常宝贵的。因此,超常材料的出现为新型功能材料的设计提供了一个广阔的空间,昭示人们可以在不违背物理学基本规律的前提下,获得与自然界中的物质具有完全不同物理性质的超常物理性质的新型人工电磁媒质。自 2000 年以来,超常材料经过了跨越式的发展,2003 年和 2006 年两度被 *Science* 杂志列为世界十大科技进展之一。近年来,在 *Science* 和 *Nature* 等国际顶尖刊物上发表了大量的文章。同时也受到了包括美国和欧盟以及日本、新加坡、中国等国家政府的大力资助,投入了大量的人力和物力来支持超材料的基础研究和技术开发^[97-110]。

由于超材料有着不同于普通材料的奇异特性,因此超材料又称为特异性材料,最近人们已经利用超材料制成完美透镜(perfect lens)、隐身斗篷(invisibility cloak)、天线等^[111-135]。对超材料及相关器件的特性研究,有利于对其传输电磁波的传播方向、传播速度、传播能量等方面的有效调控。同时,有人将超材料引入光子晶体,发现了新型的带隙,这种带隙与 Bragg 带隙有着不同的性质,并有着潜在的应用^[136-155]。从理论上研究清楚超常材料的磁共振对光和电磁波的传输特性的影响,并揭示出新的现象和特性,获

得主动调控光和电磁波的新方法和新手段,无疑对推进传统光学和微结构超常材料学科的发展具有重要意义,并为开发新型的光电子器件或提高已有器件的功能奠定理论基础^[93-95]。

1.1 光子晶体简介

1.1.1 光子晶体的基本概念

光子晶体,其概念最初是 1987 年由美国 Bell 实验室的 E. Yablono-vitch 和 Princeton 大学的 John 分别在研究光的自发辐射和无序介质中光子局域时,借鉴固体物理中的固体晶体及其能带特性,各自独立提出的^[41-45]。固体物理中研究表明,晶体内部的原子是周期性排列形成周期势,电子在周期势场中运动会受到 Bragg 散射的作用,形成能带结构。如果我们用两种不同介电常数材料在空间上周期变化,制作成光子晶体,可以形成对光子运动的控制,光子的能量如果落在禁带中,光子的传播被禁止。光子晶体根据其组成介质空间排列方式的不同,可分为一维光子晶体、二维光子晶体和三维光子晶体,如图 1-1 所示为不同维度的光子晶体结构示意图。

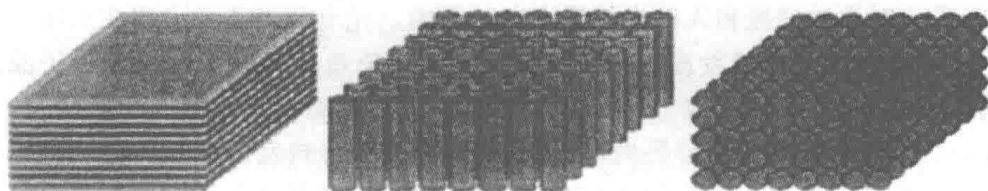


图 1-1 光子晶体结构维度分类示意图

由两种不同介电常数组成的材料只在一个方向上周期性地交替排列可以形成一维光子晶体。一维光子晶体在平行于介质层面上电介质常数不发生变化,只是在垂直于层面上介电常数是空间周期的函数。由于这种一维结构制作工艺比较简单,目前,一维光子晶体在半导体激光器和一维光子晶体布拉格光纤中已经得到应用。

在二维方向上不同介电常数材料呈周期性交替分布,就形成了二维光子晶体。常见的光子晶体二维结构是由许多介质柱或介质球排列构成的。这种结构介电常数在平行于介质柱方向不发生变化,只是在两个垂直于介质柱方向介电常数呈周期性排列分布。制作长波长光子晶体时,可以采用

带孔的薄片把介质棒固定,而对短波长光子晶体结构,由于介质柱的直径必须制作的非常小,所以一般采用半导体基片上打孔的方法来制作。二维光子晶体结构典型的应用就是二维光子晶体光纤。

三维光子晶体结构是指在由一系列球状介电常数不同的材料在三维空间周期性交替排列而成,光子带隙出现在各个方向。三维光子晶体与一维光子晶体和二维光子晶体相比,实际制作过程相对比较复杂,尤其是在毫米波长量级以下制作,但三维光子晶体可以实现全方向光子禁带。需要注意的是,光子禁带的维度不一定是光子晶体的维度,在各向异性材料形成的一维或二维光子晶体中,也出现了三维光子禁带^[46-60]。

1.1.2 光子晶体的基本特性

1. 光子禁带

光子禁带是指在某一频率范围,入射光的频率位于禁带中时,入射光在某一方向可能会全部反射而不能传播通过。不同介质构成的光子晶体,介电常数相差越大,越容易形成宽的光子禁带^[61-70]。如果是由同种介质构成的光子晶体,形状差异越大越容易出现宽的光子禁带。光子禁带又可以分为完全禁带(Omnidirection Gap)和非完全禁带^[71-81]。完全禁带是指光子禁带不受入射光的偏振和入射光传播方向的影响。非完全禁带是指光子禁带受入射光的偏振和入射光传播方向的影响。完全禁带通常出现在三维光子晶体中,但是最近发现由一维左右手材料或单负材料构成的一维光子晶体中也会出现全向带隙(又称为零均值折射率带隙)^[82-94]。

1905年爱因斯坦曾提出,处于高能级的粒子会自发地跃迁到低能级发出光子,曾认为自发辐射是不可抑制的,它将不可避免地与受激辐射和受激吸收共存。直到1946年Purcell提出自发辐射可以人为控制,而后1987年光子晶体的出现证实了这一观点的正确性。由费米黄金定律可知:自发辐射的概率 $w = \frac{2\pi}{\hbar} |\mathbf{v}|^2 \rho(\omega)$,其中 $\rho(\omega)$ 为光场的态密度。如果光波的态密度为0,则自发辐射的几率为0。由于光子禁带中光子的态密度为0,如果入射电磁波的频率位于光子禁带中时,那么光子晶体中原子的自发辐射就被完全抑制。反之,如果增加该光子频率的态密度,光子晶体的自发辐射就会增强^[52-56]。

2. 光子局域^[60-65]

光子晶体的另一个基本特征是对光子的局域化作用。1987年Johun

曾提出一种精心设置的无序介电常数组成的超晶格中存在 Anderson 局域。光子局域态形成的特性与电子晶体中掺杂改变半导体材料电学、光学性质类似,主要由缺陷的性质决定。如果缺陷是引入高介电常数材料所产生,其特性类似于半导体掺杂中的施主原子;如果缺陷是移除部分高介电常数材料所产生,其特性类似半导体中掺杂受主原子。所以缺陷的属性可以直接影响到光子禁带中缺陷态的位置。

1.1.3 光子晶体的制备

自然界中存在着许多天然的光子晶体,如色彩斑斓的蛋白石、蝴蝶的翅膀等,在显微镜下可以发现,它们都是由一些周期性的微结构组成。但是要获得人们要求的光子晶体,大多数需要采取人工制作的方法。目前,光子晶体制作主要方法大概包括如下几种。

1. 薄膜技术^[68-70]

薄膜技术是采用交替生长两种不同介电常数的材料来制作光子晶体,其厚度精度可以控制到纳米量级,主要用于制备一维光子晶体。利用薄膜技术制作的一维光子晶体可以实现光滤波器、反射相位调节器,宽带反射镜等器件。

2. 精密机械加工法^[80-81]

其基本思想是用机械钻孔的方法在均匀介质中形成周期排列空气孔。该方法优点是制作简便,所得光子晶体禁带较宽,缺点是较难得到近红外及可见光波段具有完全带隙的光子晶体。1991年,E. Yablonovith 等人通过在三氧化二铝钻出球形孔,第一个制成具有三维面心立方的三维光子晶体,孔的半径是毫米量级,这种光子晶体工作在微波波段。

3. 半导体制造^[91-93]

其是利用先进的半导体工艺或采用电子束蚀刻和激光蚀刻来制作光子晶体的技术。该方法的优点是可以稳定、精确地制作红外或可见光波段的光子晶体,且具有较宽的光子禁带,也容易在光子晶体中引入缺陷,在集成光电子技术方面有很大的潜力;缺点是需要先进的设备,并且需要的工艺比较复杂。

4. 胶体自组装法^[91-93]

其是利用重力、离心力、压力、毛细血管力、电场力、磁场力等外力作用实现胶体颗粒的定向排列,使其自发形成晶体结构。图 1-2(a)和(b)分别为用二氧化硅胶体小球制备的三维光子晶体显微镜照片和用模板法制作的硅材料光子晶体显微镜照片。

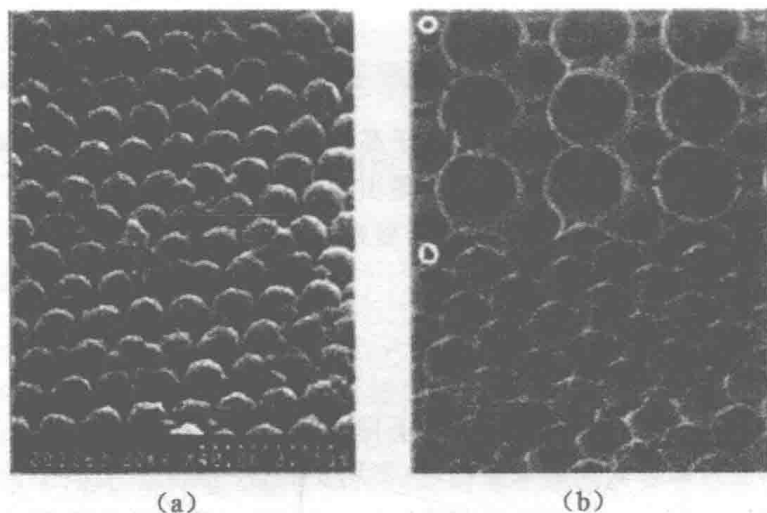


图 1-2 胶体自组装法制作光子晶体

5. 激光全息制造法^[106-108]

该方法主要是利用激光的空间相干性,两束或多束相干激光相互干涉,产生光强周期性变化的图案,再利用光与介质的相互作用,使得介质形成折射率发生周期性变化,形成光子晶体。最早采用全息法制备光子晶体的是日本 Osaka 大学的 Shoji. S。激光全息法的优点是操作快,精度高;缺点是无法在光子晶体结构中引入缺陷。

1.1.4 光子晶体的应用

光子晶体由于具有两个基本特性光子禁带和光子局域,这些特性决定了光子晶体在制作光子器件方面还有更为广泛而重要的应用^[101-103]。

1. 光子晶体滤波器^[68-70]

当在光子晶体中引入缺陷,且外来的电磁波与这个缺陷模频率吻合时,会产生共振,从而形成共振腔,因此可以用来制成光子晶体滤波器。

通过在光子晶体中增加缺陷的数目,则可以形成若干个相应频率光通过的多通道滤波。

2. 光子晶体低阈值激光器^[107-108]

激光器发光通常需要达到一定的阈值,如果在激光器中植入一含有缺陷的光子晶体,使缺陷态形成的波导方向与激光的出射方向角度一致,这样使得自发辐射的方向和激光发射角度一致,就可以达到降低激光器阈值的目的。

3. 光子晶体反射器件^[81,82]

由于光子晶体不允许光子频率处于禁带范围内的光子存在,当一束光子禁带频率的光入射到光子晶体上,将会被全部反射回去。利用光子晶体的这一特性可制作高效率的反射镜。

4. 光子晶体波导^[104-105]

如果光子晶体中含有线缺陷,这种缺陷态就可以看作是一种电磁波导。所以,我们可以根据实际需要,通过将不同的光子晶体组合,设计出各种符合要求的波导。1996年剑桥大学的 Attila Mekis 等人理论研究表明,光子晶体波导甚至在弯角 90° 的情况下,能获得 98% 的传输效率,而传统波导在弯角 90° 时最高效率 30%^[36]。1998 年实验上第一次实现这样的光子晶体波导。图 1-3(a)为二维光子晶体波导照片。

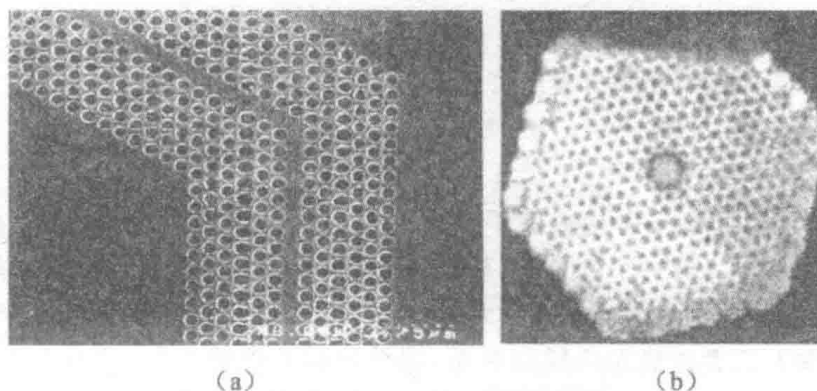


图 1-3 二维光子晶体波导和光纤

5. 二维光子晶体光纤^[108-110]

传统的光纤都是利用光的全反射原理,这使得光在传输过程中有一部

分能量损失。如果把含有线缺陷的光子晶体制作成光纤,这种光子晶体光纤可以降低能量的吸收而引起的损耗。一维光子晶体光纤,即布拉格光纤是在传统光纤的径向设置成介电常数周期变化的环状结构;如果把光纤径向横截面设置成二维光子晶体,就形成二维光子晶体光纤。二氧化硅棒和氧化硅毛细管 2 000 °C 下烧结在一起组成六角阵列,而制成二维光子晶体光纤,如图 1-3(b)所示。

1.2 超材料(Metamaterials)概述

超材料又称电磁特异介质,它通常在自然界中不存而是由人工设计。超材料主要包括双负材料(介电常数和磁导率都小于 0)、单负材料(介电常数和磁导率其中只有一个为负)以及一些金属纳米材料等。根据经典电动力学的电磁理论,材料对电磁场的响应由其介电常数 ϵ 和磁导率 μ 决定。由时谐的麦克斯韦方程可以得到电磁场波动方程(Helmholtz 方程)^[112-118]:

$$\begin{aligned}\nabla^2 E + k^2 E &= 0 \\ \nabla^2 B + k^2 B &= 0\end{aligned}\quad (1-1)$$

式中,传播常数 $k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon \mu$, ϵ, μ 为介质的介电常数和磁导率,自然界中物质的介电常数和磁导率一般都为正数,当 ϵ, μ 都为正数时,上式方程有解。电磁波能在其中传播。对于无色散、各向同性的均匀介质,对于平面单色波:

$$\begin{aligned}E &= E_0 e^{i(\omega t - k \cdot r + \varphi_0)} \\ H &= H_0 e^{i(\omega t - k \cdot r + \varphi_0)}\end{aligned}\quad (1-2)$$

式(1-2)应用麦克斯韦方程组可导出:

$$\begin{aligned}k \times E &= \omega \mu H \\ k \times H &= -\omega \epsilon E\end{aligned}\quad (1-3)$$

可知, E, H 和 k 三者构成右手螺旋关系。所以通常的介质称为“右手材料”。如果 ϵ, μ 有一个为负数, $k^2 < 0$, 方程(1-3)无波动解。电磁波是倏逝波,不能传播;但如果 ϵ, μ 同时为负数, k^2 仍然大于 0, 方程(1-3)有解,此时 E, H 和 k 三者构成左手螺旋关系,因此这种介质称为“左手材料”。如图 1-4 所示,图(a)为右手材料电场、磁场、波矢和能流密度方向之间的关系;图(b)为左手材料电场、磁场、波矢和能流密度方向之间的关系。

J. B. Pendry 根据 $\pm \epsilon$ 和 $\pm \mu$ 的四种可能组合,将材料分成四类^[112-115],如图 1-5 所示。当 $\epsilon > 0, \mu > 0$ 时,材料的折射率 $n = \sqrt{\epsilon \mu}$ 为正数,这是自然界中最普通最常见的材料,称为正指数材料(Positive-Index Material),这

类材料由于电磁场电矢量 E 、磁矢量 H 和波矢 K 成右手正交关系,所以又称右手材料,位于图 1-5 中第一象限。当 $\epsilon < 0, \mu < 0$, 材料的折射率 $n = -\sqrt{\epsilon\mu}$ 为负数,称为负指数材料(Negative-index Material),又叫双负材料(Double-Negative Material),这类材料由于电磁场电矢量 E 、磁矢量 H 和波矢 k 成左手正交关系,所以又称左手材料,位于图 1-5 中第三象限。当 ϵ 和 μ 其中只有一个为负时,称为单负材料(Single-Negative Material)。其中,当 $\epsilon < 0, \mu > 0$ 时,称为 ENG(Epsilon-Negative)材料,位于图 1-5 中第二象限;当 $\epsilon > 0, \mu < 0$ 时,称为 MNG(Mu-Negative)材料,位于图 1-5 中第四象限。这四种类型材料中除了第一种右手材料外,其他三种都可以称为超材料。由于超材料能展现出的许多不同于普通材料的新奇特性,这些特性使超材料有更为广阔的应用前景。超性材料在 2003 年被美国 *Science* 杂志评为十大科学进展之一。

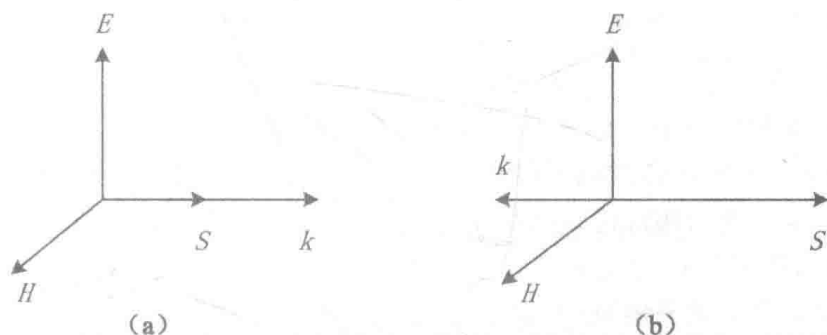


图 1-4 电场、磁场、波矢和能流密度方向之间的关系

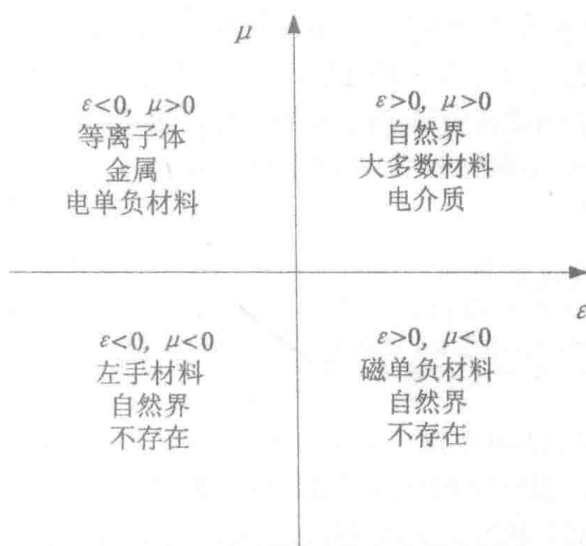


图 1-5 按照介电常数和磁导率对材料空间进行划分