

上海大学出版社

2005年上海大学博士学位论文 25



电磁波在光子晶体和手征媒质中的传输特性

- 作者：肖中银
- 专业：电磁场与微波技术
- 导师：王子华



上海大学出版社
2005年上海大学博士学位



电磁波在光子晶体和手征媒质中的传输特性

- 作者：肖中银
- 专业：电磁场与微波技术
- 导师：王子华



2005 年上海大学博士学位论文 25

电磁波在光子晶体和手征 媒质中的传输特性

作 者：肖中银
专 业：电磁场与微波技术
导 师：王子华

上海大学出版社

· 上 海 ·

Shanghai University Doctoral Dissertation (2005)

The Propagation Property of Electromagnetic Waves in Photonic Crystals and Chiral Media

Candidate: Xiao Zhongyin

Major: Electromagnetic Fields and Microwave Techniques

Supervisor: Prof. Wang Zihua

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查,确认符合上海大学博士学位论文质量要求.

答辩委员会名单:

主任:	陈建平	教授,上海交大电子工程系	200030
委员:	朱守正	教授,华东师范大学电子科学系	200030
	方祖捷	研究员,上海光机所	200072
	徐得名	教授,上海大学通信工程系	200072
	钟顺时	教授,上海大学通信工程系	200072
导师:	王子华	教授,上海大学	200072

评阅人名单:

陈建平	教授, 上海交大电子工程系	200030
朱守正	教授, 华东师范大学电子科学系	200030
赖宗声	教授, 华东师大电子科学系	200062

评议人名单:

毛军发	教授, 上海交大电子工程系	200030
刘锦高	教授, 华东师范大学电子科学系	200030
黄肇明	教授, 上海大学通信工程系	200030
林如俭	教授, 上海大学通信工程系	200030

答辩委员会对论文的评语

光子晶体是一个倍受科技界关注、极具应用前景的研究领域,也是微波理论和技术深入探讨的新方向.肖中银同学的博士论文结合国防科工委项目和上海市重点学科项目,对电磁波在光子晶体和手征媒质中的传输特性进行了研究,选题正确,具有新意,有较大的学术意义和应用价值.

该博士论文取得了如下的创新结果:

(1) 提出了一种新的光子晶体结构,即在分形康托结构的中间引入缺陷.和普通的分形康托结构比较,这种新的结构具有良好的超窄带滤波性能.这种超窄带滤波器可应用于光通信领域密集波分复用以及精密光测量.

(2) 用不对称传输线模型分析了平面电磁波垂直入射于多层双各向同性媒质的传输问题,导出了形式上较简单的计算多层双各向同性媒质界面反射和透射系数公式.此公式可以看成是传统媒质计算公式的推广,在计算复杂分层媒质电波传输特性时,非常方便、有效.

(3) 用不同的本构关系研究了金属衬底手征涂层的吸波特性,揭示了本构关系的等效性.同时表明了,在基质中掺入手征体改变了基质的介电常数和磁导率,从而对反射系数产生影响.

(4) 提出手征光子晶体结构.结果表明,和传统光子晶体相比,手征光子晶体更容易形成光子带隙,小的折射率比,少的层数可以获得更大频率范围的禁带.这种光子晶体可应

用于宽带反射器和滤波器的设计。

本论文文献综述深入,表达清楚,逻辑性强。肖中银同学在国内外期刊发表论文 11 篇,其中国外核心期刊第一作者论文 5 篇,达到博士学位论文的标准。论文表明肖中银同学很好地掌握了坚实宽广的基础理论和系统深入的专门知识,具备了相当强的科研能力。答辩过程中,肖中银同学讲述条理清楚,思路清晰,回答问题准确。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过肖中银同学的博士学位论文答辩,建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席: **陈建平**

2005 年 1 月 11 日

摘 要

近年来,电磁学研究的一个重要领域是关于新材料的研究.手征媒质和光子晶体就是典型的新型人工材料.手征媒质是在普通媒质中掺入手征体而形成,具有旋光特性.光子晶体是由不同折射率的介质周期性排列而形成的人工结构,具有能够抑制自发辐射和控制光传输等特性.它们在基础研究和实际应用中都有着巨大的潜力,自从20世纪80年代以来,已经受到世界许多领域的重大关注.论文研究了电磁波在光子晶体和手征媒质中的传输特性;将手征媒质和光子晶体结合起来,研究了手征光子晶体的带隙结构;提出几种新颖的光子晶体结构.论文主要包括以下内容:

首先,呈现一种新的光子晶体结构,即在分形康托结构的中间引入缺陷.光传输矩阵被用来计算反射系数和透射系数.和普通的分形康托结构比较,作者发现这种新的结构有更宽的阻带,而且在宽阻带中间出现一个超窄带,这能被用作超窄带滤波器.作者研究了这种滤波器的特性,发现在红外1530 nm附近,获得的通带小于0.6 nm.在中心波长处,光传输超过99%,这意味着有很低的插损.它比其它滤波器更优越,这种超窄带滤波器可应用于光通信领域密集波分复用以及精密光测量.

其次,用不对称传输线模型分析了平面电磁波垂直入射于多层双各向同性媒质的反射和透射问题,导出了形式上较简单

的计算多层双各向同性媒质界面反射和透射系数公式. 此公式可以看成是传统媒质计算公式的推广, 在计算复杂分层媒质电波传输特性时, 非常方便、有效.

第三, 用不同的本构关系研究了金属衬底手征涂层的吸波特性和进行了比较. 结果表明, 只要手征媒质的宏观电磁参数统一后, 使用不同的本构关系得到相同的结果, 从而揭示了本构关系的等效性. 研究结果还表明, 在基质中掺入手征体改变了基质的介电常数和磁导率, 从而对反射系数产生影响. 这些结论对不同观点的统一有一定的意义.

最后, 作者将手征媒质和光子晶体结合起来, 提出新的手征光子晶体结构. 结果表明, 和传统光子晶体相比, 手征光子晶体更容易形成光子带隙, 小的折射率比, 少的层数可以获得更大频率范围的禁带. 这种光子晶体可应用于宽带反射器和滤波器的设计.

关键词 光子晶体, 分形康托结构, 传输矩阵法, 滤波器, 不对称传输线, 本构关系, 手征媒质, 反射和透射系数

Abstract

In recent years, an important field on the study of electromagnetics is one about new material. Chiral media and Photonic Crystal are typically novel artificial materials. Chiral media is made of one handedness mixed into a matrix. One of the aspects characterizing chiral media is the phenomenon of optical activity. Photonic Crystal is composed of one kind of material in which another kind of material is periodically distributed and it has peculiar ability of inhibiting spontaneous radiation of atoms and controlling light propagation. They may bring about important potential in several scientific and technical areas. Therefore, Chiral media and Photonic Crystal have been paid great attention by many fields in the world since 1980s. In the dissertation, the propagation property of electromegenetic waves in Photonic Crystals and Chiral media is studied. Integrating Chiral media with Photonic Crystals, the author study the property of chiral photonic band gap and several novel structures of Photonic Crystals are presented. The dissertation is classified into four parts stated as follows.

Firstly, the author present a new photonic crystal structure, which is composed of fractal Cantor multilayer with a defect embedded in its middle. Optical transmission matrix method is used to calculating the transmittance and

reflectance. Compared with general Cantor multilayer, the author find the new structure has wider stopband and shows a super narrow band in the middle of wider stopband. It can be served as a super narrow bandpass filter. The pass band obtained can be less than 0.5 nm near the infrared 1530 nm. The optical transmission in the center wavelength is higher than 99%. This means a very low insert loss. It is more superior to other kind narrow band filters. This kind of photonic crystal super narrow band optical filter may find applications in super dense wavelength division multiplexing for optical communications and precise optical measurement.

Secondly, the formula of reflection coefficient of multi-layer chiral media is derived by non-symmetric transmission-line method. Then, it is applied to 1-D chiral photonic crystal structure, which is composed of thin chiral layers sandwiched by air. The results show that it is difficult to obtain photonic band gap for general dielectric when the contrast of two media refractive indices is not large, and the reflection coefficient is small. However, for chiral photonic crystal, although the refractive index of chiral layer is small, the wave spectrum contains forbidden zones and the reflection coefficient from such a structure is found to be almost equal to 1, *i. e.*, the wave is almost totally reflected through adjusting chiral parameter. Therefore it is easier to obtain an ideal photonic band gap.

Thirdly, It has been arguing whether the chiral parameter of chiral media affects on the microwave absorbing

characteristics. The different constitutive relations are used to analyze the reflection problem of metal-backed chiral layer. Some numerical results are presented. It can be seen that the reflection coefficients are identical with different constitutive relations when the macroscopic parameters are unified. The numerical results show that the permittivity and the permeability of host are modified when chirality is introduced, which affects on the reflection. The conclusion has significance to unifying differential views.

Lastly, integrating Chiral media with Photonic Crystals, the author study the property of chiral photonic band gap. This novel structure is composed of thin chiral layers sandwiched by air. The results show that it is difficult to obtain photonic band gap for general dielectric when the contrast of two media refractive indices isn't large, and the reflection coefficient is small. However, for chiral photonic crystal, although the refractive index of chiral layer is small, the wave spectrum contains forbidden zones and the reflection coefficient from such a structure is found to be almost equal to 1, *i. e.*, the wave is almost totally reflected through adjusting chiral parameter. Therefore it is easier to obtain an ideal photonic band gap.

Key words photonic crystal, fractal Cantor constructure, transmission matrix method, filter, non-symmetric transmission-line, constitutive relations, chiral media, reflection and transmission coefficient

目 录

第一章 绪论	1
1.1 光子晶体研究简单回顾	1
1.2 光子晶体的特征及应用	5
1.3 光子晶体研究的理论方法	6
1.4 手征媒质的研究进展	7
1.5 研究内容和创新点	9
第二章 用分形结构设计超窄带通滤波器	12
2.1 引言	12
2.2 分形结构的基本特征	13
2.3 用分形康托结构设计超窄带通滤波器	18
第三章 双各向同性媒质中电磁波的传输特性	25
3.1 引言	25
3.2 双各向同性媒质界面电磁波的传输特性	26
3.3 多层双各向同性媒质中电磁波的传输特性	32
第四章 手征媒质的吸波特性研究	43
4.1 引言	43
4.2 不同本构关系下手征媒质的吸波特性	44
4.3 用混合媒质理论分析手征媒质的吸波特性	51
4.4 关于等效电磁参数的进一步研究	57

第五章 手征光子晶体带隙结构研究	64
5.1 引言	64
5.2 光子晶体的基础理论	65
5.3 研究周期性分层媒质的分析方法	67
5.4 手征光子晶体带隙结构	75
5.5 手征介电光子晶体的宽阻带特性	80
第六章 结论与展望	83
参考文献	85
致 谢	99

第一章 绪 论

近年来,电磁学研究的一个重要领域是关于新材料的研究.手征媒质和光子晶体就是典型的新型人工材料.手征媒质是在普通媒质中掺加手征体而形成,具有旋光特性.光子晶体是由不同折射率的介质周期性排列而形成的人工结构,具有能够抑制自发辐射和控制光传输等特性.它们在基础研究和实际应用中都有着巨大的潜力.自从20世纪80年代以来,已经受到世界许多领域的重大关注.下面,我们对光子晶体和手征媒质作一简单回顾.

1.1 光子晶体研究简单回顾

对新材料的探索一直是人类的奋斗目标和进步的手段,如上世纪的半导体使我们的生活发生了质的飞跃,进入到了今天的信息时代.由半导体材料制成的电子器件已广泛地应用于生活和工作的各个领域,尤其是促进了通信和计算机产业的发展.但近年来,电子器件进一步小型化以及在减小能耗下提高运行速度变得越来越困难.人们感到了电子产业发展的极限,转而把目光投向了光子,提出了用光子作为信息载体代替电子的设想.电子器件是基于电子在半导体中的运动,与此类似,光子器件则是基于光子在光子晶体(Photonic Crystal)中的运动.光子器件的主要特点是运行速度快、能量损耗小,因而工作效率高,在光波导器件、高效率发光二极管、光滤波器、光子开关等方面有巨大的应用潜力.广阔的应用前景使光子晶体的理论研究、相关实验和实际应用得到迅速发展,这一领域已成为当今世界范围内的研究的热点.1999年12月17日,美国《科学》杂志把光子晶体方面的研究立为十大科学进展之一.

光子晶体是 1987 年, Yablonovitch 和 John 分别在讨论周期性电介质结构对材料中传播行为的影响时, 各自独立地提出的^[1,2]. 这种材料有一个显著的特点是它可以如人所愿的控制光子的运动^[3,4]. 我们知道, 在半导体材料中由于周期势场作用, 电子会形成能带结构, 带和带之间有能隙. 电子波的能量如果落在带隙中, 传播是被禁止的. 光子的情况其实也非常相似. 如果将具有不同介电常数的介质材料在空间按一定的周期排列, 由于存在周期性, 在其中传播的光波的色散曲线将成带状结构, 带和带之间可能会出现类似半导体带隙的“光子带隙”(photonic band gap). 频率落在带隙中的光是被禁止传播的. 如果只在一个方向具有周期结构, 光子带隙只可能出现在这个方向上, 如果存在三维的周期结构, 就有可能出现全方位的光子带隙, 落在带隙中的光在任何方向都被禁止传播. 我们将具有光子带隙的周期性电介质结构称为光子晶体. 按照组成光子晶体的介质排列方式的不同, 可将其分为一维、二维和三维光子晶体. 如图 1-1 所示.

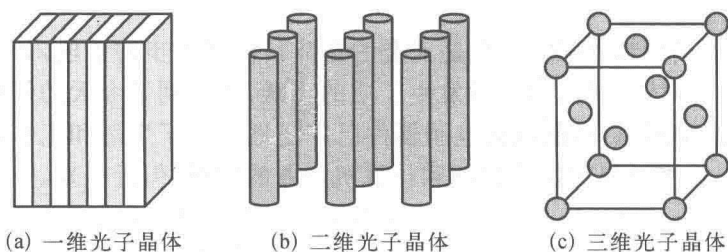


图 1-1 光子晶体空间结构示意图

所谓一维光子晶体指介质只在一个方向具有周期性结构, 而在另外两个方向上是均匀的(如图 1-1(a)). 将两种不同折射率的介质薄膜交替排列就可构成一维光子晶体, 传统的多层膜也可以看成是一维光子晶体的例子. 相对而言一维光子晶体在结构上最为简单, 易于制备. 最初人们提出, 由于只在一个方向上具有周期性结构, 一维光子晶体的光子带隙只可能出现在这个方向上. 然而后来 Joannopoulos 和他的同事从理论和实验上指出一维光子晶体也可能