

# 前 言

光子/声子晶体的发展历史尚不足 20 年，是一种新概念人工结构功能材料，通过设计可以人为调控经典波的传输。

本书的内容主要介绍了作者领导的课题组五年来的研究进展，在理论和应用的系统性方面也兼顾他人的观点和结论，选择其中较为成熟和最重要的成果，以作为科研领域参考之用，算是作者对同行的一点贡献。

本书共分 5 章。第 1 章介绍光子/声子晶体概念的产生，并描述作者对光子/声子晶体概念的基本理解和对当前领域研究动态的基本把握。第 2 章采用固体物理、晶格动力学、弹性动力学和群论的基本观点和方法，从晶体对称性的角度，对光子/声子晶体的结构、波方程进行讨论，对光子/声子晶体的晶格结构、能带结构、禁带机理、缺陷模式、物理效应（负折射、超色散、超准直现象等）展开统一论述，作为后续章节的理论先导。围绕声子晶体弹性波禁带的机理和谐振机理的详细论述在第 3 章中进行，包括晶格声场特征描述、缺陷态分析、表面波禁带及其仿真分析方法等。第 4 章将针对光波光子晶体材料与器件的基本原理、效应、分析方法、相应的周期微结构的物理刻蚀制备和化学模板制备工艺做详细的介绍，内容包括：光子晶体介质全反镜、光子晶体光纤、基于缺陷结构的光学器件以及平板二维光子晶体等。最后，第 5 章将围绕微波光子晶体传输系统、微带结构微波光子晶体、高阻表面型微波光子晶体、光子晶体天线展开论述，包括微波光子晶体材料与器件的结构、物理原理、仿真与测试等基础内容。

在本书的编写过程中，课题组的曾淳、袁乃昌、谢凯、袁晓东教授，叶卫民、刘耀宗和付云起三位副教授及部分在读和已毕业的研究生也参与了书稿的讨论，在此向他们致谢。

热忱希望读者对本书的缺点和错误进行批评指正。

国家“973”“光子/声子晶体基础研究”项目技术首席

温熙森

2005 年 11 月 5 日



# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 光子/声子晶体概论</b> .....	1
1.1 光子/声子晶体的基本概念 .....	1
1.1.1 光子晶体 .....	1
1.1.2 声子晶体 .....	2
1.1.3 光子/声子晶体概念 .....	3
1.2 光子/声子晶体研究动态 .....	4
1.2.1 红外及可见光波段光子晶体研究动态 .....	5
1.2.2 微波波段光子晶体研究动态 .....	6
1.2.3 声子晶体研究动态 .....	8
参考文献 .....	9
<b>第 2 章 光子/声子晶体带隙理论</b> .....	12
2.1 光子/声子晶体的结构 .....	12
2.1.1 晶格 .....	12
2.1.2 散射单元 .....	16
2.2 光子/声子晶体的能带理论 .....	17
2.2.1 能带的对称性 .....	17
2.2.2 光子/声子晶体中波方程及其对称性 .....	24
2.2.3 光子/声子晶体的能带结构 .....	33
参考文献 .....	36
<b>第 3 章 声子晶体</b> .....	38
3.1 声子晶体禁带特性的研究方法 .....	38
3.1.1 弹性波波方程 .....	38
3.1.2 理想声子晶体的理论模型 .....	39
3.1.3 理想声子晶体的能带结构计算 .....	41
3.2 布拉格散射型声子晶体的禁带特性 .....	46
3.2.1 填充率的影响 .....	46
3.2.2 点阵形式对禁带的影响 .....	47
3.2.3 材料参数的影响 .....	47
3.3 局域共振型声子晶体的禁带特性 .....	50
3.3.1 局域共振型声子晶体禁带特性的基本特征 .....	50

3.3.2	材料参数对局域共振型声子晶体禁带特性的影响	55
3.3.3	第一禁带的简化模型和起止频率估计式	62
3.4	基于禁带原理的减振/隔振原理探索	68
3.4.1	周期弹簧振子结构振动带隙及其隔振特性	69
3.4.2	周期结构细直梁弯曲振动带隙特性	75
3.4.3	二维周期结构矩形薄板弯曲振动带隙特性	79
3.5	声子晶体的缺陷态特性	83
3.5.1	缺陷态概述	83
3.5.2	点缺陷	84
3.5.3	线缺陷	90
3.6	声子晶体表面波特特性	96
3.6.1	声表面波概述	96
3.6.2	声子晶体表面波带隙特性	97
	参考文献	104
<b>第4章</b>	<b>光波光子晶体</b>	<b>108</b>
4.1	一维光子晶体	108
4.1.1	介质全(方向)反射镜	109
4.1.2	一维光子晶体光纤	113
4.2	理想二维光子晶体	114
4.2.1	理想二维光子晶体的横电(TE)和横磁(TM)模	114
4.2.2	理想二维光子晶体原理性器件	122
4.2.3	二维光子晶体光纤	131
4.3	平板二维光子晶体	133
4.3.1	平板二维光子晶体的本征模式和带结构	134
4.3.2	平板光子晶体无源光器件	139
4.3.3	平板光子晶体有源光器件	141
4.4	光子晶体物理制备	143
4.5	化学法制备光子晶体	146
4.5.1	“胶体晶体”模板法制备三维光子晶体	146
4.5.2	制备三维光子晶体的其他方法	156
4.5.3	核壳结构胶体微球的三维光子晶体	157
4.5.4	三维光子晶体中缺陷的制备	157
4.5.5	前景展望	157
	参考文献	158
<b>第5章</b>	<b>微波光子晶体</b>	<b>160</b>
5.1	微波光子晶体传输系统	160

5.1.1	光子晶体波导 .....	160
5.1.2	光子晶体微带传输线 .....	165
5.2	微带结构微波光子晶体 .....	176
5.2.1	介质型微波光子晶体 .....	176
5.2.2	金属-电介质型微波光子晶体 .....	180
5.3	高阻表面型微波光子晶体 .....	190
5.3.1	Mushroom 光子晶体结构 .....	191
5.3.2	周期矩量法计算带隙特性 .....	191
5.3.3	等效介质模型 .....	194
5.3.4	反射相位的 FDTD 计算 .....	199
5.3.5	新型高阻表面光子晶体结构 .....	201
5.4	光子晶体天线 .....	210
5.4.1	光子晶体微带天线 .....	210
5.4.2	光子晶体口径耦合微带天线 .....	217
5.4.3	光子晶体卫星导航接收天线 .....	222
5.4.4	光子晶体口径天线 .....	226
5.4.5	光子晶体抑制天线互耦 .....	229
5.4.6	光子晶体相控阵天线 .....	232
	参考文献 .....	238



# 第 1 章 光子/声子晶体概论

材料、能源、信息是当今世界文明的三大支柱。

光子/声子晶体是一种新型的人工结构功能材料,通过设计可以人为调控经典波的传输。借用固体物理中晶体的结构思想,将固体能带理论推广到介观尺度和宏观尺度用于考察经典波(如电磁波和声波)辐射与人工晶格的耦合作用,力图实现对经典波传输的控制,这是关于光子/声子晶体在物理学领域的基础问题。从大约 17 年前光子晶体的概念提出以来,光子/声子晶体的研究在光学物理、凝聚态物理、电磁波、信息技术、声学等领域引起了广泛关注。光子晶体的概念从硅晶体的概念类比得来,硅晶体的开发利用在 20 世纪引起了一场技术革命<sup>[1,2]</sup>,有人大胆预言光子晶体的研究有可能在 21 世纪推动信息技术产生新的突破。

## 1.1 光子/声子晶体的基本概念

辐射场与材料耦合作用是自然界动力学过程的最基本形式,它的物理学基础被划分为经典电磁波和量子电动力学两大领域。对辐射场与材料耦合作用的研究似乎是纯基础的和一般性的。当代人工材料光学性能的研究发现这种相互耦合作用是可控的。正是这一发现成了近 30 年来光学物理研究的强大动力。光子/声子晶体就是既能够控制其内部辐射模式,又对外部激励场具有特殊响应的人工晶体材料。

### 1.1.1 光子晶体

1987 年,美国 Bell 实验室的 E. Yablonovitch 和 Princeton 大学的 S. John 分别在讨论如何抑制自发辐射和无序电介质材料中的光子局域时,各自独立地提出了“光子晶体”(photonic crystal)这一新概念<sup>[3,4]</sup>。1990 年美国 Iowa 州立大学 Ames 实验室的研究人员 K. M. Ho 等通过计算验证金刚石存在光子禁带。

根据 Ames 研究小组的理论设计思路,1991 年 Yablonovitch 自己制作出第一个具有全方位光子带隙的结构<sup>[5]</sup>,光子带隙为 10G~13GHz,理论计算和实验测量的结果吻合得非常好,进而首先在微波波段用试验验证了光子禁带的存在。众所周知,在半导体材料中由于周期势场作用,电子会形成能带结构,带与带之间可能有能隙<sup>[1]</sup>。光子晶体的情况也非常相似。如果将具有不同折射系数的介质在空间按一定的周期排列,当空间周期与光波长相当时,由于周期性所带来的布拉格散射,它能够在一定频率范围内产生“光子禁带”(photonic band gap, PBG)。如果光

子的能量落入光子禁带频率范围内,则不能在介质中传播。这种具有光子禁带的周期性电介质结构即光子晶体,如图 1.1.1 所示。

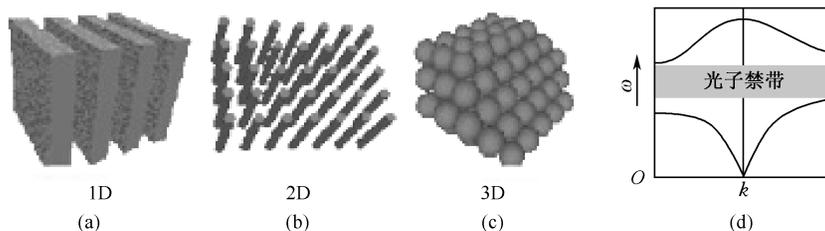


图 1.1.1 光子晶体及其禁带结构

如果光子晶体的折射率在周期结构中出现了点缺陷,如突然缺了一个应该出现的低折射率介质区域;或者在正常的周期中突然多了一个高折射率介质区域,就会导致光子晶体缺陷态的出现。这时点缺陷中产生的光子就会被局域在这个点缺陷附近,其行为就像一个微谐振腔。如果形成的是线缺陷,其行为类似于光波导。直线缺陷波导的导光并不奇怪。实验发现,当线缺陷  $90^\circ$  转折时理论上可以接近 100% 导光。如果形成的是面缺陷,则可得到理想的反射面,理论上可反射所有入射方向的光,反射率接近 100%。这些性质都具有十分重要的应用价值。光子晶体微腔可做成微腔激光器,将来可用于光计算和光存储;光子晶体波导可用于光集成和光互联<sup>[2~4]</sup>。

在微波波段,光子晶体由不同介电常数的周期性电介质材料组成,同样可以设计各种低损耗的波导、微腔、微带传输线、高阻表面(人工磁导体)、微带天线等,可用于制造各种高品质的微波集成器件和高效天线。

最初人们认为光子晶体只能是人工结构,后来发现自然界中也存在光子晶体,如蛋白石<sup>[6]</sup>、蝴蝶翅膀<sup>[7]</sup>、孔雀羽毛<sup>[8]</sup>、海老鼠毛<sup>[9]</sup>等。蛋白石在不同的观察角表现出不同的色彩图案、蝴蝶翅膀和孔雀羽毛所具有的斑斓的色彩、海老鼠毛在岸上和水上呈现出不同的色彩等都是由其特殊的内在的周期性三维微结构决定的。

### 1.1.2 声子晶体

进一步研究发现,在声波频段也有类似的具有禁带效应的周期性结构“晶体”,即声子晶体(acoustic crystal, sonic crystal, phononic crystal),由弹性性质不同的周期性材料组成,可用于声波和振动的控制<sup>[10~18]</sup>。

对弹性波在层状介质中传播的研究已有近百年的历史,但声子晶体概念的提出及对声子晶体相关理论的研究却只有十余年的历史。1992年, M. M. Sigalas 和 E. N. Economou 第一次在理论上证明球形材料埋入某一基体材料中形成三维周期性点阵结构具有弹性波禁带特征<sup>[10]</sup>。1993年, M. S. Kushwaha 等类比光子晶体

第一次明确提出了声子晶体概念<sup>[11]</sup>,并对镍柱在铝合金基体中形成的复合介质采用平面波方法计算获得了在剪切极化方向的弹性波禁带。1995年,R. Martinez-Sala等在对西班牙马德里的一座200多年前制作的雕塑“流动旋律”进行声学特性研究时,第一次从实验角度证实了弹性波禁带的存在<sup>[16]</sup>。

声子晶体同光子晶体有着相似的基本特征:当弹性波频率落在禁带范围内时,弹性波被禁止传播;当存在点缺陷或线缺陷时,弹性波会被局域在点缺陷处,或只能沿线缺陷传播。同样,通过对声子晶体周期结构及其缺陷的设计,可以人为地调控弹性波的流动。

### 1.1.3 光子/声子晶体概念

从前面的介绍可以看出,光子晶体、声子晶体均是由电子晶体类比外推得来的概念。

1993年,M. S. Kushwaha等第一次提出声子晶体概念时就对(电子)晶体、光子晶体及声子晶体的有关特性进行了比较<sup>[11]</sup>,如表1.1.1所示。从表中可以看出三者具有惊人的、广泛的、深刻的相似性。

表 1.1.1 三类晶体的比较

性质	(电子)晶体	光子晶体	声子晶体
结构	结晶体(自然的或生长的)	由两种(或以上)介电材料构成的周期性结构	由两种(或以上)弹性材料构成的周期性结构
调控对象	电子的输运行为 费米子	电磁波的传播 玻色子	机械波的传播 玻色子
参量	普适常数 原子数	各组元的介电常数	各组元的质量密度 $\rho$ 、声波波速 $c_t, c_l$
晶格常数	$1 \sim 5 \text{ \AA}$ (微观)	$1 \mu\text{m} \sim 1 \text{cm}$	$1 \text{mm} \sim 1 \text{m}$
尺度	原子尺度	电磁波波长	声波波长
波	德布罗意波(电子)	电磁波(光子) $\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$	机械波(声波)
偏振	自旋 $\uparrow, \downarrow$	横波 ( $\nabla \cdot \mathbf{E} \neq 0$ )	横波与纵波耦合 ( $\nabla \cdot \mathbf{U} \neq 0; \nabla \times \mathbf{U} \neq 0$ )
波动方程	薛定谔方程 $-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$	麦克斯韦方程组 $\nabla^2 \mathbf{E} - \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) = \frac{\mu_r \epsilon_r}{c_0^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$	弹性波波动方程 $(\lambda + 2\mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) - \mu \nabla \times \nabla \times \mathbf{u} + \rho \omega^2 \mathbf{u} = 0$
特征	电子禁带,缺陷态,表面态	光子禁带,局域模式,表面态	声子禁带,局域模式,表面态

续表

性质	(电子)晶体	光子晶体	声子晶体
带隙	随着晶体势函数的增加而增大,没有电子态	随介电常数差 $ \epsilon_a - \epsilon_b $ 的增大而增大,无光子、光波存在	随质量密度差增大而增大,无振动无声波存在
频率范围	无线电波、微波、光波和 X 射线	电磁波	声波

光子/声子晶体的基本概念可以概括为:光子/声子晶体是具有电磁波/弹性波禁带的周期性结构功能材料。

光子/声子晶体材料内部具有周期性结构,其组分介电常数/弹性常数周期性变化,具有电磁波/弹性波禁带,使其能操控电磁波/弹性波流动。禁带内的电磁波/弹性波只能沿光子/声子晶体缺陷传播。通过缺陷的设计可以人为调控电磁波/弹性波的传输。

光子/声子晶体的基本行为特征可以概括为:

- (1) 具有周期性结构;
- (2) 具有低损耗高反射性能;
- (3) 具有相空间压缩性能;
- (4) 具有禁带特性,落在禁带中的电磁波/弹性波被禁止传播;
- (5) 当周期性结构中存在点缺陷和线缺陷时,电磁波/弹性波会被局域在点缺陷处,或只能沿线缺陷方向传播。

近年来有专家提出光子/声子晶体的概念可进一步推广到更宽的范围,如地震波,并将具有禁带特性和对应尺度的周期性结构称为波晶体。另外,无序结构也受到相当的关注,M. M. Sigalas 等人的研究工作表明,在一定的填充条件下,无序结构也可以产生光子/声子禁带<sup>[17]</sup>。

## 1.2 光子/声子晶体研究动态

光子/声子晶体概念的明确提出不过十余年。由于与传统的光、电磁和声学材料相比有截然不同的功能特点和优势,在通信、探测、微机电、环保等领域有着广阔的应用前景,20 世纪 90 年代后期以来引起了学界的高度重视。光子/声子晶体材料已成为当今物理学、光电子学、电磁场理论、材料科学、纳米技术、微机电等领域共同关注的研究热点。

目前其主要处于基础研究工作阶段,包括周期性微结构及其缺陷的制备工艺技术,光子/声子晶体及其缺陷控制电磁波/声波(或振动)产生、传播的物理机理,以及光子/声子晶体材料与器件的测试与表征及其应用原理的探索。能否得到具

有禁带的光子/声子晶体与其周期性结构、介质的连通性、介质常数反差和填充比等有关,条件是比较苛刻的。制作具有完全禁带的光子/声子晶体,无论在理论、技术和检测表征上都是一项挑战。

从光子晶体这一新概念的提出到得到试验验证这个简短的历史过程,已经暗示了光子晶体后续发展所具有的基础和即将面临的挑战:周期结构中的电磁波理论以及性能仿真手段是相对成熟的,而光波波段由于波长的介观微纳米尺度,导致光波光晶体的加工制备及其测试表征都正面临着挑战,而微波波段正是由于波长的宏观尺度,微波光子晶体的加工制备及其测试表征都相对成熟,这也是微波光子晶体能够迅速用于开展应用原理开发的根本原因。声子晶体中声波辐射场研究的特殊性则在于连续固体介质中纵波与横波的耦合以及非均匀介质界面纵波与横波的相互激励导致声子晶体禁带机理研究成为重点和难点。此外,声子晶体通常的固体界面对入射空气声的耦合系数过小,使得声子晶体禁带性能测试技术成为另一个难点。

### 1.2.1 红外及可见光波段光子晶体研究动态

光子晶体的研究已取得令人瞩目的成果。1996年以来先后研制成功了光子晶体直角波导、光子晶体光纤、光子晶体超棱镜、光子晶体反射镜、二维光子晶体微腔激光器、光子晶体天线和光子晶体滤波器等。1998年和1999年《科学》杂志都将光子晶体研究成果列入当年的十大研究进展<sup>[19~21]</sup>。

红外及可见光波段的光子晶体研究主要涉及光通信、光信息处理、光传感和控制领域。1998年美国 Sandia 国家实验室采用多层沉积/刻蚀方法,制作出 PBG 为  $10\sim 14.5\mu\text{m}$  的用于红外探测器的多晶硅材料三维光子晶体,最终制作成  $1\text{cm}\times 1\text{cm}$  的光子晶体探测头,可以大大提高探测的灵敏度,同时缩小设备体积。在此基础上,该实验室研制出周期尺寸更小( $180\text{nm}$ )的可见光波段光子晶体,这是现有尺寸最小的三维光子晶体。

1999年,美国 MIT 研制出光子晶体反射镜,在特定波长范围具有全反射功能;美国 MIT 和英国 Bath 大学制备的光子晶体光纤光缆,传输的能量或信息成倍增加,理论上能够无损耗远距离传输,并且能够传输高功率激光。

英国的 St. Andrews 大学后来居上,光子晶体研究在短短的两年时间内迅速发展,其光子晶体的制备与测试表征水平一跃进入世界前列。2002年,St. Andrews 大学制备的离子刻蚀半导体基光子晶体,利用光子晶体超色散效应研制的光子晶体波分复用器件具有非常高的品质。

南京大学对具有特殊光学效应和禁带的离子型声子晶体与光子晶体激光器开展了卓有成效的工作。

近年来英国 Glasgow 大学合成出人工蛋白石等尺度球,并用这种蛋白石球排列成面心立方晶体,理论和实验发现这种晶体的带隙宽到足以覆盖整个可见光波

段(400~600nm)。2002年国防科学技术大学制备的SiO<sub>2</sub>微球直径覆盖了560nm、470nm、217nm、130nm、65nm,尺寸散度小于3%,制备的SiO<sub>2</sub>人工蛋白石结构光子晶体表面呈浅粉色,如图1.2.1所示。

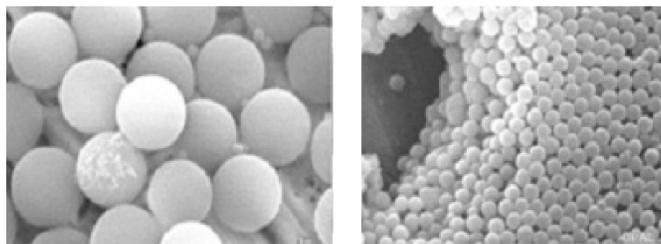


图 1.2.1 国防科学技术大学研究的 SiO<sub>2</sub> 微球及其模板

从2004年3月日本京都召开的光子晶体国际例会 PECS-V (International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V)<sup>[22]</sup>来看,目前光波频段光子晶体的研究呈现如下趋势:

(1)追求材料与器件的低损耗:日本 NTT 公司和 IBM 瑞士公司等利用高精度微加工技术研制出平面异构结构和平面渐变结构光子晶体,使光子晶体波导的损耗水平从2002年的6dB/mm降到(0.6~0.7)dB/mm。

(2)追求光子晶体激光器的高 Q 值:加州工学院(Caltech)和韩国先进科学与技术研究院(KAIST),大多采用量子点材料,其实验测得 Q 值达到 $2 \times 10^4$ ,而调制速度达100GHz,理论上设计出 Q 值高达 $10^6$ 的激光器;另外,MIT研究的2D与3D opal相结合构成的空气波导可能是获得更高 Q 值的一个方向。

(3)从单元器件向集成光路的研制迈进:会议报告提出了基于光偏振效应的光信息处理、光子晶体集成光隔离器、光子晶体生物分子传感器、设计速度达40GHz的光子晶体全光开关等。FESTA公司计划研制的全光集成电路;NEC公司的HI-SMZ(Hybrid Integrated Symmetric Mach-Zehnder)外形为3cm,设想采用光子晶体将其缩小为10~100 $\mu$ m,最后集成的全光电路外形约为1cm。

(4)世界著名的光电子公司对光子晶体的研究十分重视:IBM, NEC, NTT, Konica, Fujitsu, Toyota, TDK, ROHM, Hitachi, ALPS, Sumitomo, Alcatel, Matsushita, Mitsubishi, Agilent, Nippon, Photonic Lattice Inc等17家公司提供报告55份,超过大会报告总数的20%。

### 1.2.2 微波波段光子晶体研究动态

1991年Yablonovitch等制作出的第一块光子晶体,其禁带就位于微波波段。此后微波光子晶体的研究在应用原理探索方面迅速取得了突破<sup>[5]</sup>。

1993年美国研制出反射率接近100%的光子晶体偶极子天线,使得天线效率

大大提高,并于 1995 年申请了专利。

1996~1999 年, Qian 和 Coccioli、Kesler 等相继研制出光子晶体微带贴片天线,抑制了谐振模式,有效地消除了表面波的影响,提高了天线效率;同时研究发现由光子晶体支撑的微带天线阵,天线之间的隔离度可提高 10dB,而且具有比较小的后向辐射<sup>[23~27]</sup>。

1999 年 Conexant 国际公司利用光子晶体对禁带内电磁波的强反射性能研制出光子晶体人体防护天线,证实其对电磁辐射有真正的防护作用。

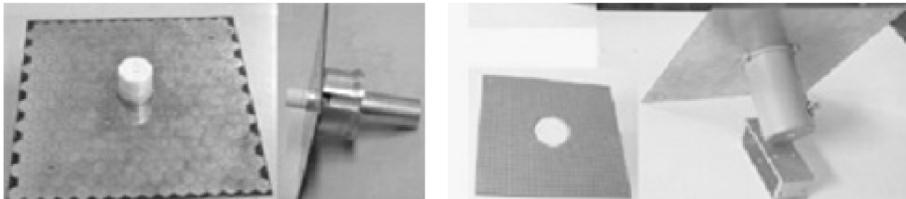
1999 年 Raytheon 公司研制出能与飞行器表面共形的圆柱形微波光子晶体天线阵列,实验室测量结果显示出很好的应用前景。美国加州大学还报道了高阻表面光子晶体的研究成果,并且已经在振子天线、微带天线等方面得到了应用。

英国 Glasgow 大学利用微机械、刻蚀等工艺制成木堆结构的三维光子晶体并集成到一个芯片上,最后制成与设备结构表面集成共形的天线,其禁带中心频率在 500GHz(Tera-Hertz 范围内)。

在微波电路方面,20 世纪 90 年代末期以来取得了很多成果。Qian 等在 1996、1997、1998、1999 年相继报道了二维光子晶体微带传输线,验证了微波信号在传输过程中存在频率禁带<sup>[23~27]</sup>。1998 年 Vesna 等制作出光子晶体宽带放大器,在增益、带宽上都获得了改善。另外 Rumsey 利用光子晶体结构在微带电路中实现了宽频带的滤波功能<sup>[28,29]</sup>。接下来的几年中,研究人员提出了各种适合于微带电路的光子晶体结构,经实验验证都取得了预期的效果。1999 年 Itoh 等又报道了单面紧凑型光子晶体结构<sup>[25]</sup>,并且得到了 TEM 波导、高性能微波天线等,大大降低了加工制作的难度。

此外,光子晶体先进集成天线系统的研究为微波天线开辟了一个全新的、发展迅速的工程技术领域,在环境监测、可视化气象等领域具有广泛的应用前景。

近两年,国防科学技术大学<sup>[30~35]</sup>在光子晶体微波天线研究方面取得了阶段性进展。国防科学技术大学研制的具有分形特征的光子晶体微带传输线能抑制天线的伪辐射、提高系统的电磁兼容性;光子晶体微带天线二次谐波小;光子晶体宽带滤波器(多周期串联光子晶体结构)可实现 4~12GHz 宽带滤波;光子晶体微波高阻表面能实现 3.3~5.6GHz 范围内的表面波抑制;高阻接地面圆波导介质天线,



(a) 高阻接地面圆波导介质天线

(b) 高阻接地面圆波导开口天线

图 1.2.2 国防科学技术大学研制的高阻接地面圆波导介质天线和开口天线

背瓣降低了 8~10dB, 3dB 波束宽度压缩了 25°左右, 方向系数增大, 天线的增益提高了 2~3dB; 高阻接地面圆波导开口天线, 背瓣降低了 10dB 左右, 天线的增益提高了 1.5~2dB, 如图 1.2.2 所示。

### 1.2.3 声子晶体研究动态

类比光子晶体的概念和禁带机理, 声子晶体的基本概念和原理似乎是十分清楚的, 但是十余年来声子晶体的研究进展十分缓慢, 关于测试技术的争议仍未停止, 针对可能的工程应用的原理探索并未取得实质性突破。20 世纪 90 年代初期概念产生以来, 声子晶体的研究工作主要集中在布拉格和谐振两个禁带机理方面。

1992 年 Sigalas 等采用传递矩阵方法研究了弹性波在两种不同材料组成的周期性多层结构中的传播特点, 分析了纵波与横波的耦合效应, 同时还对周期性结构中引入缺陷形成声波通道后的声滤波机理进行了研究<sup>[16,36,37]</sup>。1999 年 Kafesaki 等研究了弹性波与具有三维周期性结构的材料相互作用形成带隙的机理, 认为材料的密度和声速显著地影响着带隙的形成和带宽<sup>[38,39]</sup>。Kee 等研究了组成材料的阻抗对声波带隙形成的影响, 认为各组分阻抗差别越大, 声带隙越宽。

声子晶体声带隙的测试和实验验证也获得一定进展。1998 年 Sanchez-Perez 等将直径为 1~4cm 的钢棒按三角形周期阵列排列在空气中, 形成二维周期性结构, 测试出频率为 1~3kHz 的声波带隙<sup>[40]</sup>。1994 年 Vasseur 等则研究了碳纤维或细碳棒与环氧树脂、铝与树脂、钨与铝组成的材料体系, 也获得了较宽的声带隙<sup>[15]</sup>。1995 年 Sigalas 等对由不同金属, 如钨、铁、铅等, 与树脂基体形成的材料体系的声传播特性进行了研究, 结果表明通过合适的材料选择和结构设计, 可以获得声波带隙<sup>[17]</sup>。1997 年 Kushwaha 等<sup>[41~43]</sup>对多种周期性材料体系进行了实验研究, 如按立方排列于空气中的金属或液体柱等都被证实具有完全的声带隙; 同时采用带隙频率不同的周期性材料串联起来还可以形成超宽频带的声子晶体, 对于隔声、降噪等工程实践具有很大意义。

2000 年香港科技大学刘正猷教授<sup>[44,45]</sup>研制出局域共振型三维三组元周期结构的声子晶体, 其晶格尺寸比禁带内声波波长小 1~2 个数量级, 成功地实现了小尺寸材料控制大波长声波传播的目标, 在隔声、降噪、环保等方面具有广泛的应用前景。

2002 年欧洲科学家 F. Cervera 用金属棒设计出了二维声子晶体声波透镜<sup>[46]</sup>, 具有通常的棱镜的外形, 能够将 1~3kHz 范围内的声波进行聚焦。当然, 这种设计仅仅是一种初步的设计, 真正的声子晶体透镜利用通带超色散效应不需要传统棱镜的外形, 可以根据需要设计形状, 并能实现大角度声波扫描、聚焦等功能。

2004 年国防科学技术大学的研究结果表明二维二组元声子晶体也具有局域谐振特性<sup>[47]</sup>。

总的来说, 目前光子/声子晶体研究已涉及: 量子光学、电磁学、固体能带论、半

导体器件物理、纳米结构、固体物理、分子生物、微机电工程和材料科学等领域。世界各著名高校、通信和光电子公司均积极介入光子/声子晶体的研究利用。

英国五所著名大学和七家公司组建超快光子学研究联合体(UPC),由英国工程与物理科学研究委员会(EPSC)出资 1 250 万英镑,计划六年时间开发未来数据通信器件,光子晶体为五大关键技术(有机发光、量子点阵、飞秒激光、光开关、光子晶体)之一。

欧洲信息社会技术(IST)研究委员会 2000 年 3 月启动了为期三年的光子晶体光子集成“电路”计划(photonic integrated circuits using photonic crystal optics, PICCO),其主要研究内容为:材料与制备、设计与模拟、测试与表征。

ASI (Advanced Study Institute),自 1992 年起定期组织光子晶体学术研讨会。光子晶体国际例会 PECS 自 2004 年起改每两年一次为每年一次。

日本在 CREST 的资助下制定了至 2010 年以后的中长期技术开发规划(technology roadmap for photonic crystals),以 Kyoto University, RIKEN, NTT Basic Research Labs., AIST, FESTA 为代表的日本研究机构,拥有当今世界光子晶体微结构制备的最高技术水平。

在国内,1999 年国家自然科学基金在光子晶体研究方面资助两项课题;2000 年资助 6 项课题;2001 年的指南中已列为重点研究项目,所资助的领域涉及光子晶体的理论研究、制备表征和应用等多个方向;2004 年国家自然科学基金在重大基础研究项目中对光电信息功能材料(光子晶体)进行了重点资助(1 000 万人民币)。

## 参 考 文 献

- 1 黄昆著,韩汝琦改编. 固体物理学. 北京:高等教育出版社,1988
- 2 Joannopoulos J D, Meade R D, Winn J N. Photonic crystals. Princeton Univ. Press, 1995
- 3 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. Physical Review Letters. 1987, 58(20): 2059~2062
- 4 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. Physical Review Letters. 1987, 58(20): 2486~2489
- 5 Yablonovitch E, Gmitter T J, Leung K M. Photonic band structure: the face-centered cubic case employing nonspherical atoms. Physical Review Letters, 1991, 67:2295~2298
- 6 Rick C Schroden, Nagalingam Balakrishnan. Inverse Opal Photonic Crystals—A Laboratory Guide. The University of Minnesota Materials Research Science and Engineering Center, 2001
- 7 Biró L P et al. Role of photonic-crystal-type structures in the thermal regulation of a lycaenid butterfly sister species pair; Phys. Rev. E, 2003, 67:021907
- 8 Jian Zi, Xindi Yu et al. Coloration strategies in peacock feathers. The National Academy of Sciences of the USA, 2003, 100(22):12576~12578
- 9 McPhedran R C, Nicorovici N A, Botten L C. Learning Optics in Nature's School, Aust. Opt. Soc. NEWS, 2001, 15(2/3): 7~9

- 10 Sigalas M M, Economou E N. Elastic and acoustic wave band structure. *Journal of Sound and Vibration*, 1992,158(2): 377~382
- 11 Kushwaha M S, Halevi P, Dobrzynski L. Acoustic band structure of periodic elastic composites. *Physical Review Letters*, 1993,71(13):2022~2025
- 12 Economou E N, Sigalas M M. Classical wave propagation in periodic structures; Cermet versus network topology. *Physical Review B*, 1993, 48(18): 13434~13438
- 13 Kushwaha M S et al. Theory of acoustic band structure of periodic elastic composites. *Physical Review B*, 1994, 49(4): 2313~2322
- 14 Munjal M L. Response of a multi-layered infinite plate to an oblique plane wave by means of transfer matrices. *Journal of Sound and Vibration*, 1993,162(2): 333~343
- 15 Vasseur J O et al. Complete acoustic band gaps in periodic fiber reinforced composite materials; the carbon/epoxy composite and some metallic systems. *Journal of Physics; Condensed Matter*, 1994, 6: 8759~8770
- 16 Martinez-Sala R, Sancho J, Sanchez J V et al. Sound attenuation by sculpture. *Nature*, 1995, 378: 241
- 17 Sigalas M M, Soukoulis C M. Elastic-wave propagation through disordered and/or absorptive layered systems. *Physical Review B*, 1995, 51(5): 2780~2789
- 18 Kafesaki M, Economou E N. Interpretation of the band-structure results for elastic and acoustic waves by analogy with the LACO approach. *Physical Review B*, 1995, 52(18): 13317~13331
- 19 Fink Y, Winn J N, Fan S et al. *Science*, 1998, 282:1979
- 20 Cregan R F, Mangan B J, Knight J C et al. *Science*, 1999, 285:1537
- 21 Painter O et al. *Science*, 1999, 284:1819
- 22 Technical Digest of PECS-V (International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V), March 7~11, 2004, Kyoto, Japan,2004
- 23 Radisic V et al. Novel 2-D photonic bandgap structure for microstrip lines. *IEEE Microwave Guided Wave Letters*, 1998, 18(2):69~71
- 24 Roberto Coccioli et al. Aperture coupled patch antenna on UC-PBG substrate, *IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47:2123~2130
- 25 Qian Y, Itoh et al. A microstrip patch antenna using novel photonic band-gap structures, *Microwave J.*, 1999, 42(1):66~76
- 26 Kesler M P, Maloney J G, Shirley B L. Antenna design with the use of photonic bandgap materials as all dielectric planar reflectors. *Microwave Opt Tech Lett*, 1996, 11(3): 169~174
- 27 Radisic V, Qian Y, Itoh T. Broadband power amplifier using dielectric photonic bandgap structure. *IEEE Microwave Guided Wave Lett*, 1998, 8(1):13~14
- 28 Ian Rumsey, Melinda Picket-May, P Keith Kelly. Photonic bandgap structure used as filters in microstrip circuits. *IEEE Microwave Guided Wave Lett*, 1998, 8 (10): 336~339
- 29 Keith Kelly P et al. Investigation of scan blindness mitigation using photonic bandgap structure in phased arrays. *SPIE*, 1998, 3436:239~247
- 30 Yunqi Fu, Guohua Zhang, Naichang Yuan. A novel PBG coplanar waveguide. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2001, 11:447~449
- 31 Guo-hua Zhang et al. A novel PBG structure for microstrip lines. *The 3rd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, 2002
- 32 Yun-Qi Fu, Nai-Chang Yuan, Guo-Hua Zhang. A novel fractal PBG microstrip structures. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2002,32(2):136~138