

21 世纪最具潜力的新型带隙材料——声子晶体

塔金星

半导体发展中遇到的极大障碍,使许多研究人员开始研究光子晶体。然而,声子晶体比光子晶体具有更丰富的物理内涵,它是一种新型声学功能带隙材料。研究声子晶体的重要意义在于其广阔的应用前景,而且在研究过程中,还可能发现新现象和新规律,进而促进物理学的发展。

一、什么是声子晶体

声子晶体的概念诞生于 20 世纪 90 年代,是仿照光子晶体的概念而命名的。我们都知道,具有光子禁带的周期性电介质结构功能材料称为光子晶体,光子能量落在光子禁带中的光波将被禁止,不能在光子晶体中传播。通过对光子晶体周期结构及其缺陷进行设计,可以人为地调控光子的流动。与之类似,具有声子禁带的周期性弹性介质结构的功能材料,称为声子晶体。

在声子晶体内部,材料组分(或称为组元)的弹性常数、质量密度等参数呈周期性变化。随着材料组分填充比、周期结构形式及尺寸的不同,声子晶体的弹性波禁带特性也不同。禁带的产生主要取决于各个单散射体本身的结构与弹性波的相互作用。一般说来,非网络型晶格结构形式比网络型晶格结构形式更易于产生禁带。复合结构中组分的弹性常数差异越大,越易于产生禁带。在特定频率弹性波的激励下,单个散射体产生共振,并与入射波相互作用,使其不能继续传播。

声子晶体具有理想的周期性结构,对这种理想周期性结构的破坏一般称之为缺陷。缺陷按其维数可分为点缺陷、线缺陷和面缺陷。当声子晶体中存在某种缺陷时,在其带隙范围内会产生所谓的缺陷态,缺陷态对声子晶体的禁带特性有着重大影响,因此对声子晶体缺陷态特性的研究具有重大意义。利用点缺陷,可以把声波俘获在某一特定位置,使其无法向外传播,这相当于微腔。在声子晶体中引入某种线缺陷(如 L 型线缺陷),可以使处于禁带频率范围内的声波沿该通道进行传播,即所谓声波导。当弹性波频率落在声子禁带范围内时,弹性波将被禁止传播。通过对声子晶体周期结构及其缺陷的人工设计,可以人为调控弹性波的流动(如图 1)。

二、声子晶体的分类与结构

根据声子晶体结构在笛卡尔坐标系中 3 个正交方向上的周期性,可以将声子晶体分为一维声子晶体、二维声子晶体和三维声子晶体,目前已研究了一些特定结构的声子晶体。一维声子晶体一般针对两种或多种材料组成的周期性复合层状结构(如图 2)。二维声子晶体一般针对柱体材料中心轴线均平行于空间某一方向,并将其埋入另一基体材料中形成的周期性点阵结构(如图 3),柱体材料可以是中空或实心的,柱体的横截面通常是圆形,也可以是正方形;柱体的排列形式可以是正方形排列、三角形排列、六边形排列等。三维声子晶体一般针对球形散射体埋入某一基体材料中所形成的周期性点阵结构,其结构形式可以是体心立方结构、面心立方结构、六角密排结构等(如图 4)。

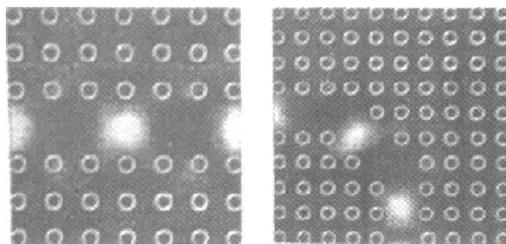


图 1 声子晶体结构示意图

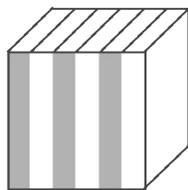


图 2 一维声子晶体

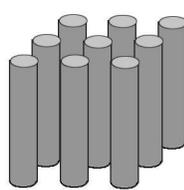


图 3 二维声子晶体

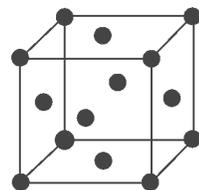


图 4 三维声子晶体

三、声子晶体的潜在应用领域

声子晶体是多门学科交叉、渗透和结合产生的新兴技术,广受世界各国科研机构的关注,具有极其广阔的应用前景。

减振 利用声子晶体的禁带特性,可以为高精精密机械加工系统和某些精密仪器设备提供一定频率范围内的无振动工作环境,从而保证高精度机械的加工精度,提高精密仪器设备的工作参数精度和可靠性、延长使用寿命。如用于旋转设备笨重底座的减振、角接触轴承的轴承套、声学成像系列背平面、

飞机发动机底座电子设备底盘等。

降噪 噪声污染和大气污染、废弃物污染、水污染,是世界公认的四大环境污染。抑制噪声对人类环境的负面影响、改善人类的生存环境,是一个颇具吸引力和挑战性的问题,而声子晶体有望在这方面取得重大突破。与传统的隔声材料相比,声子晶体具有频率可设计、针对性强、尺寸小、效果好等优点。利用声子晶体的禁带特性,有可能设计和制造出全新的降噪材料。这种材料既可在噪声的传播途中对其隔离,又可在噪声源处对其加以控制。声子晶体的禁带可通过改变微共振单元的大小和结构实现完全调控,如果在这种晶体中引入多种共振单元,还可扩大全反射频带,甚至覆盖人类可感知的整个声频段。用固态自由成型(SFF)制备技术,可制备内部结构复杂的声子晶体器件。这种方法通过激光净成型(LENS)形成散射中心,散射单元将按照分层构造格式和几何结构呈现固有的周期性。利用激光净成型固态自由成型方法,已经研制出钛基体复合材料。这种方法可获得尺寸从毫米级到几十个厘米级结构单元的精确空间分布,在促进人类从听觉到超声波频率范围振动频率高于20赫兹多方向声学 and 振动的隔离方面,具有广阔的应用前景。如果成熟产品面世,机场、公路、娱乐场所等“噪音污染重灾区”附近的居民将最先受益,随之而来的就是环保、建筑等行业的革命性变革。

鉴于声子能带理论的重要性,我们应加快对声子晶体性质的研究,设计合适的频率禁带,从而制造出相应的功能产品。根据局域共振机理,如果突破声子晶体低频禁带的设计方法,声子晶体将有望在潜艇的消声瓦、声纳方面广泛应用。

声学器件 当声子晶体存在某种缺陷时,在周期性结构的禁带范围内会产生所谓的缺陷态。根据声子晶体中存在缺陷时声波的局域特性,可以设计出新型的高效率、低能耗声学滤波器,在一定频率范围内禁止声波的传播、在通带频率范围内增强声波的输出;可以设计出具有高聚焦特性、低能耗的声学透镜等新型产品。这里将着重介绍声子晶体制成的滤波器件。声子晶体滤波器件如用于时下流行的Mp3、Mp4、手机等数码产品,将得到音质极佳的音乐和铃音。

我们先介绍一下Mp3的工作原理。Mp3的全称是MPEG Layer 3,按照压缩质量(每比特的声音

效果)和编码方案的复杂程度分别有Layer1、Layer2、Layer3这三层基本结构相同的编码。它们在采用传统频谱分析和编码技术的基础上应用了子带分析和心理噪声感知模型理论,也就是通过研究人耳和大脑听觉神经对音频失真的敏感度,在编码时先分析声音文件的波形,再利用过滤器找出噪音电平(noise level),然后滤去人耳不敏感的信号,通过矩阵量化的方式将余下数据的每一位打散排列,最后编码形成MPEG文件。Mp3的工作原理可以简化概括如下:将Mp3歌曲文件从内存中取出并读取存储器上的信号→解码芯片对信号进行解码→通过数模转换器将解出的数字信号转换成模拟信号→把转换后的模拟音频放大→滤波后到耳机输出口,最后输出的就是我们听到的音乐了。

因为声子晶体具有频率可设计、针对性强、尺寸小、效果好等优点,为了得到最佳音质,可以将声子晶体作为滤波器。利用声子晶体的特性,音质可提升到从低到高的全景3D效果,干扰、散乱的音波被收集后按照正常途径重放出来,能够接近艺术家的原声效果。将低频进行实用化的调和,还能够把很深的低频提升到八度音的水平并全方位展示出来。通过延伸的悦耳音波可创造更高、更宽的音域,而且能对输入的杂散信号进行衰减,通过扩展特定扩音器的低音响应,能够精确调整需要的低频极限,提供比标准低音更深、更密、更精确的低音频率,而不影响中低频段声音(否则中低频段会产生混浊并改变角色的噪音),并有效恢复声音的细腻差别。信噪比(音源产生最大不失真声音信号强度与同时发生噪音强度之间的比率,是评价Mp3优劣的重要指标之一)也将相应地得到极大改善。而且还可以按个人喜好,将声音中各频率的组成泛音等级加以修改,专为某一类音乐进行优化。均衡(equalization)也不仅仅是现在常见的正常、摇滚、流行、舞曲、古典、柔和、爵士、金属、重低音等几种,可以达到几十种甚至更多,以满足个人不同的爱好。

相信用不了多久,你我手中的数码产品Mp3、Mp4(甚至是Mp5、Mp6)、手机、室内音响设备等,都将应用声子晶体这一新兴技术,使我们得到音质极佳的艺术享受。

(黑龙江省哈尔滨师范大学理学院物理系 150025)