

特约专栏

关于声学超构材料名词术语的探讨

黄唯纯¹, 颜士玲¹, 李鑫¹, 卢明辉¹, 李勇², 王兆宏³,
张燕妮^{4,5}, 吴生提⁶, 郭宇春⁷, 范强⁸, 钱斯文⁹, 张和伟¹⁰,
孙亚轩¹¹, 卢成绪¹², 陈延峰¹

- (1. 南京大学 固体微结构物理国家重点实验室 现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210093)
(2. 同济大学 上海市特殊人工微结构材料与技术重点实验室, 上海 200092)
(3. 西安交通大学电子科学与工程学院 电子物理与器件教育部重点实验室 多功能材料与结构教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)(4. 西北工业大学航海学院, 陕西 西安 710072)
(5. 南京理工大学 发射动力学研究所, 江苏 南京 210094)(6. 株洲国创轨道科技有限公司, 湖南 株洲 412000)
(7. 北京绿创声学工程股份有限公司, 北京 102200)(8. 青岛海尔智能技术研发有限公司, 山东 青岛 266101)
(9. 南京大学 声学超构材料研究院, 江苏 南京 210093)(10. 上海普信科技有限公司, 上海 200335)
(11. 比亚迪汽车工业有限公司, 广东 深圳 518118)(12. 中国科技产业化促进会, 北京 100043)

摘要:近30年来, 声学超构材料领域的理论与技术不断成熟与完善。以增材制造技术、飞秒激光加工等为代表的各种先进制造技术的发展, 为复杂的声学超构材料的数字化设计制造奠定了基础, 极大地推动了这类材料的实用化进程。这些发展吸引了学术界和产业界对声学超构材料的极大关注, 因此, 研讨声学超构材料领域的一些基本术语和概念, 以方便学术界、研究机构和企业界之间的交流、沟通和讨论是十分必要的。从基础研究的科学概念出发, 探讨了声学超构材料的定义、分类及其标准、研究手段与应用方向等有关声学超构材料的名词与术语, 希望能够为建立声学超构材料有关技术标准提供一些有益的建议, 供有兴趣的专家参考。

关键词:声学超构材料; 定义; 分类标准; 研究手段; 方法论; 应用方向

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2021)01-0001-06

Discussion on the Terminology of Acoustic Metamaterials

HUANG Weichun¹, YAN Shiling¹, LI Xin¹, LU Minghui¹, LI Yong²,
WANG Zhaohong³, ZHANG Yanni^{4,5}, WU Shengti⁶, GUO Yuchun⁷,
FAN Qiang⁸, QIAN Siwen⁹, ZHANG Hewei¹⁰, SUN Yaxuan¹¹,
LU Chengxu¹², CHEN Yanfeng¹

- (1. National Laboratory of Solid State Microstructures and College of Engineering and Applied Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)
(2. Shanghai Key Laboratory of Special Artificial Microstructure Materials and Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China)
(3. Key Laboratory of Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Key Laboratory of Multifunctional Materials and Structures of the Ministry of Education, School of Electronic Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)
(4. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)
(5. Institute of Launch Dynamics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)
(6. ZHUZHOU National Innovation Railway Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China)
(7. Beijing Greentec Acoustics Engineering Holdings Co., Ltd., Beijing 102200, China)

收稿日期: 2020-08-02 修回日期: 2020-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51721001); 国家杰出青年基金资助项目(11625418)

第一作者: 黄唯纯, 男, 1990年生, 助理研究员,
Email: weichunhuang@nju.edu.cn

通讯作者: 陈延峰, 男, 1963年生, 教授, 博士生导师,
Email: yfchen@nju.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202008001

- (8. Qingdao Haier Intelligent Technology Research and Development Co., Ltd., Qingdao 266101, China)
(9. Nanjing Meta-Technology Center Co., Ltd., Nanjing 210093, China)
(10. Prosynx Technology Inc., Shanghai 200335, China)
(11. BYD Auto Industry Company Limited, Shenzhen 518118, China)
(12. China Society for the Promotion of Science and Technology Commercialization, Beijing 100043, China)

Abstract: Over the past three decades, the theoretical framework and technologies in the field of acoustic metamaterials have been gradually matured and completed. The development of various advanced manufacturing technologies such as additive manufacturing and femtosecond laser machining has laid a foundation for the digital design and manufacturing of complex acoustic metamaterials and subsequently greatly promotes the application of such materials. Great attention has been given to acoustic metamaterial both by academics and industry recently. Therefore establishing genetic terms including terminology and basic conception in this field is both necessary and beneficial to communication and discussion between academics, research communities and related industry. Based on the scientific concepts according to the fundamental research, this article discussed terminology related to definition, classification and classification criteria, research methods and application areas for acoustic metamaterials. We tentatively hope to provide some valuable suggestions for the establishment of technical standards related to acoustic metamaterials to be referenced by interested experts.

Key words: acoustic metamaterials; definition; classification criteria; research methods; methodology; applications

1 前言

工业、国防技术和生活水平的不断进步和发展对材料性能提出了越来越高的要求,而传统材料已经无法满足这些需求,这就迫使人们不断探索具有特殊性能的各种人工结构的复合材料。超构材料通过人工设计制备尺寸介于原子、分子的微观结构尺度与宏观尺度之间的具有一定物理性能的功能基元,按照所设计结构对称性在空间的分布,来构建具有特殊性能的微结构材料。这类材料具有超越其功能基元、前所未有的各种物理效应,例如负折射率、负磁导率、负弹性模量等。超构材料的出现为电磁学、光学、声学、力学和电子学等领域中新材料和新器件的发展提供了崭新的研究思路,是近年来材料科学领域的重大进展。

作为超构材料领域的重要分支,声学超构材料由功能基元和人工序构两个要素组成,其功能基元是已有的常规弹性材料,而人工序构是按性能目标设计的周期、准周期和其他人工有序结构。声学超构材料定义为以功能基元按照特征物理尺度上的人工序构而构造和制备出的性能超越基元本身的声学、力学性能的微结构材料。这一领域的突破为控制弹性波的传播、激发和耦合提供了全新的方法^[1]。

声学超构材料有以下几个发展源头,一是 20 世纪 90 年代提出的声子晶体^[2],它来自于周期结构中声波传播导致的能带结构,类比于半导体和光子晶体的概念,其功能基元是弹性体;二是起源于具有周期畴结构的铁电超晶格中压电振动干涉增强的声学超晶格^[3],以及考虑到电磁波与超晶格压电振动耦合的离子型声子晶体^[4],其功能基元为两个相邻的自发极化相反的铁电畴;三是 2000 年提出的局域共振声子晶体^[5],其功能基元为软橡

胶包裹的高密度芯体构成的局域共振单元,周期性地分布在硬的基体中。这些新的概念和材料展示出一系列前所未有的新效应和新现象,为人们按需设计和调控弹性波开辟了新的道路。

在声学超构材料中发现了一系列丰富的、超越均匀材料的新效应和新现象,如能带结构、负折射、反常透射、声隐身、声波局域化、亚波长、局域共振、声拓扑绝缘体/外尔半金属等。这些研究逐步发展成为一种研究方法或者说是范式:声学超构材料是以功能基元为单元,通过空间的有序结构而构成的微结构材料;其设计理论包括多重散射理论、平面波展开、时域有限差分理论,以及有效介质等理论和方法;它具有超越功能基元本身的宏观物理性能和效应。随着基础研究的深入,关于声学超构材料的功能基元、有序结构的设计与制备的新想法和思路不断涌现,如有机弹性局域共振单元结构和不同共振腔等。而随着声学超构材料功能的不断发现、材料设计方法的不断完善以及制造技术的不断进步,使得产业界同行越来越相信,声学超构材料在工程领域中有巨大的应用潜力和发展空间。研究人员开始将目光聚焦到声学超构材料的应用探索上,如实现声波与振动控制、减振降噪、声隐身等。

随着面向应用的声学超构材料研究的不断推进,亟需在基础科研人员与工程技术人员之间形成关于声学超构材料定义、功能、表征等方面的共同概念、词汇、术语等,并逐步建立相关的技术标准。这一现实体现出建立声学超构材料名词与术语相关标准和规范的必要性与紧迫性。

本文将从声学超构材料定义、分类、研究方法、应用器件等方面探讨一系列有关声学超构材料的名词术语的背景。最后,就建立声学超构材料名词术语标准进行

了建议,以供同行讨论和参考。

2 声学超构材料的定义及分类

2.1 声学超构材料、声学超材料与声子晶体

声学超构材料是声学超材料的进一步拓展。超材料的提法始于人工电磁超材料(metamaterials)^[6],它是以双开口环和金属带为单元,在空间中周期排列,从而构成了一种同时具有负磁导率和负介电常数的有效介质材料。刘正猷和沈平等于2000年发表了基于局域共振声子晶体的工作,发现了有效密度为负的材料^[5]。此后,类比于材料的电磁响应超材料,经常有学者将弹性模量或(和)有效质量为负的人工声学材料称为声学超材料^[1]。而陆延青和闵乃本等于1999年发表的离子型声子晶体也具有负的有效介电常数^[4]。这几类材料有以下3个共同的特点:①具有人工设计的结构;②具有亚波长特征;③是具有反常物理性能的有效介质。

声子晶体^[2,7]是20世纪90年代初类比于光子晶体^[8]概念提出的。它是指弹性常数和密度呈现周期性分布并存在弹性波能带结构和弹性波带隙的周期性复合结构。声子晶体的主要特征是具有周期性和声子带隙。当弹性波的频率位于带隙范围内时,弹性波被禁止传播。

现阶段,有不少学者将声子晶体与声学超材料区分开来。但从两者原始工作的出处来看,声子晶体发展得更早(20世纪90年代),而声学超材料是构造单元具有特殊局域共振的声子晶体(2000年)。因此,也可以说声学超材料是声子晶体的发展。声学超构材料试图不再细分声子晶体、声学超材料、离子型声子晶体等概念,强调这一大类材料所具有的两大特征:人工结构和超越原始材料的物理性能。

声学超构材料是从声学材料设计和制造新范式的角度,概括上述或其他类型的声学材料。声学超构材料是指这样一大类新材料:基于功能基元作为单元,通过人工设计制备具有空间序构的排列来构筑新材料。这类材料具有能够调控弹性模量、质量密度为正值、负值及0的超常声学特性,并能进一步实现波在特定范围的完美吸收、负折射等超越基元材料本身的奇异物理特性。作者认为,依据功能基元和人工有序结构这些共同特征将这几类材料统称为声学超构材料,这对于促进整个领域的相互交流、快速发展,特别是对这类材料的工程实践是有利的。

2.2 声学超构材料的分类及其标准

分类是进行系统研究的必要前提条件,可以依据声学超构材料不同的介质属性、作用频段、作用机理、材料特性、结构特性等对其进行分类。

按照介质属性,即声波传播介质的不同,声学超构材料大体可分为3类:空气声超构材料^[9,10],指用于空气中声波调控的声学超构材料;固体弹性波超构材料,指用于固体中声波调控的声学超构材料;水声超构材料^[11-13],指用于水中声波调控的声学超构材料。

同样地,按照其作用频段即工作频率可以将其分为3类:次声声学超构材料^[14],即工作频率在20 Hz以下的声学超构材料;超声声学超构材料^[15,16],即工作频率在20 kHz以上的声学超构材料;可听声声学超构材料,即工作频率在0.02~20 kHz范围的声学超构材料。

在作用机理层面,依据声波与材料之间相互作用的线性和非线性特性可以将其分为2类,即线性声学超构材料^[17]和非线性声学超构材料^[18,19]。其中非线性声学超构材料较为特殊,由于其结构中存在大量非线性元素,描述非线性声学超构材料弹性变形的应力 σ 与应变 ε 的关系都可近似为:

$$\sigma = E_1 \varepsilon + E_2 \varepsilon^2 + E_3 \varepsilon^3 + o(\varepsilon^n), n > 1 \quad (1)$$

其中 E_i 为 i 阶模量,当 E_i 非常大或结构产生大变形时,强非线性动力学效应会使非线性声学超材料的等效参数呈现出复杂的分岔,从而带来声波传播特性的本质变化。Li等^[20]对具有双负特性的超材料在强声下的非线性效应进行了研究,发现非线性使得负模量形成的禁带的低频部分变成了通带。

按照材料特性的不同,可以把声学超构材料分为各向同性声学超构材料和各向异性声学超构材料两类。如声学斗篷就是通过引入各向异性较大的和参数极端的超构材料,从而使得声波绕过斗篷中隐藏的物体,实现声隐身^[21]。

声学超构材料的概念还在不断发展和扩展,按照结构特性分类仍然存在可能的重复和交叉,以下只是列举出现存的各种不同结构分类,期待与读者共同讨论更为细致合理的分类标准。

(1)复合声学超构材料,指将具有不同声学特性的材料混合构建形成的声学超构材料,如结合传统声学多孔材料的杂化声学超构材料^[22,23]。

(2)可重构声学超构材料,指宏观或者微观结构能够方便重构的声学超构材料。例如,Bogdan-Ioan等^[24]利用电控制的三端压电薄膜作为基元构建可重构声学超构材料,该结构可以根据应用需要改变入射电流信号实现不同的声学响应特性而不用改变其空间几何结构。

(3)可编程声学超构材料,指利用逻辑基元对声场进行程序化调控的声学超构材料。例如,Tian等^[25]利用1个直通道和5个分流的亥姆霍兹共振器做成一个可调亚波长功能基元来实现可编程的声学超表面。

(4) 微纳声学超构材料^[26], 指功能基元结构尺度在微米或纳米级的声学超构材料。

(5) 多物理场耦合型声学超构材料, 指利用其声学特性调控其他物理场的声学超构材料。

从吸声、隔声、减振、抗冲击等实际应用功能出发, 也可以对声学超构材料进行分类, 此处列举比较常见的两类:

(1) 吸声超构材料, 指能够有效控制噪声, 且尺寸小巧的声学超构材料, 如基于局域共振原理的共鸣腔阵列型声学超构材料^[27];

(2) 隔声超构材料, 指能够突破质量定律, 有效地隔绝、隔断、分离空气中传播的噪声的声学超构材料。例如, Lu 等^[28]将偏心质量与薄膜型声学超构材料结合起来, 通过优化偏心质量的分布(如厚度、质量、形状、分裂数等)来提高结构的声学性能, 实现宽带隔声。

作者认为, 在依据不同分类标准建立的不同声学超构材料类型之间, 如非线性声学超构材料与吸声超构材料, 没有必要做排他性的设定。声学超构材料具备多重属性, 同一种材料可以归类为不同分类中的不同品种, 这也正是这一领域的魅力与潜力所在。

3 声学超构材料的研究方法

3.1 理论研究方法

对声学超构材料的特殊物理特性的探索和研究分析依赖于有效的分析方法, 包括: 平面波展开法、多重散射法、有限元法、边界元法、时域有限差分法和有效介质理论等。

(1) 平面波展开法^[29-31]: 是研究连续周期结构中弹性波传播常用的算法之一, 利用结构的周期性, 将弹性常数、密度等参数按照傅里叶级数展开, 并与 Bloch 定理结合, 求解特定波矢对应的本征频率, 得到能带。

(2) 多重散射法^[32]: 指将入射到某个散射体上的入射波看成由外来入射波和被其他散射体所散射的散射波组成, 通过推导单散射体的 Mie 散射矩阵求解特征频率方程的方法。它的提出解决了平面波展开法在处理固体/流体系统中不收敛的问题。

(3) 有限元法^[33]: 将连续的超构材料介质离散为有限个单元, 并在给定的材料或功能基元边界条件下, 利用有限单元的近似解逼近真实物理现象的数值分析方法。

(4) 边界元法^[34]: 与有限元法在连续的介质体域内划分单元不同, 它只在定义域的边界上划分有限个单元, 将边界上的边界积分方程定义为控制方程, 通过对边界分元插值离散, 化为求解代数方程组的数值分析方法。

(5) 时域有限差分法^[35]: 是电磁波场模拟和弹性波

场模拟中常用的算法之一, 通过将偏微分方程转化为有限个差分方程, 在给定激励、初始条件和特定边界条件下, 利用差分方程推导出系统的时域响应, 从而研究声波在其中的传播特性。

(6) 有效介质理论^[36]: 是为了研究复杂介质的性质, 而假设一种性质与多相介质在宏观上平均等效的单相介质。这种假设的单相介质称为该多相介质的“有效介质”, 该理论称为有效介质理论。

3.2 设计思路

在声学超构材料的结构设计中, 研究者可以通过结构优化^[37], 利用折叠^[10]、层叠^[38]、分布、耦合等不同设计思路, 来设计功能基元, 实现周期性、准周期性、无序等不同排布形式, 以及利用人工智能或机器学习方法设计声学超构材料。

对于声学超构材料应用的不同物理场景, 研究者经常采用亚波长设计、耦合设计^[39]、阻抗匹配设计^[40]来实现不同要求的声学超构材料的设计与制备。

3.3 表征参数

声学超构材料往往具有亚波长结构, 工作频段的声波在其中传播时, 声波的波长远大于其宏观厚度。此时相邻多个周期的声波运动趋于同步, 结构的力学特性、声学特性在宏观上类似于均匀介质, 因此可以将其等效为均匀介质。利用等效质量密度^[5]、等效体弹性模量^[15]、等效折射率和等效阻抗来描述。

4 声学超构材料的应用

从物理本质上来讲, 声学超构材料通过功能基元作为基本单元, 再通过空间序设计而成。在材料方面有更多的选择, 加上单元共振结构和材料的非线性等, 突破了传统声学材料的束缚, 更结合了空间的有序结构, 这些设计自由度极大地拓展了探索声学材料的范围。它所具有的多种特殊物理效应, 使得人们对弹性波的控制得到了显著的提高, 在声学、机械工程等领域具有巨大的应用潜力和发展空间。下面简要介绍声学超构材料一些常见的应用方向及相关器件。

4.1 减振降噪

减振降噪是声学超构材料的主要应用方向之一。声学超构材料的亚波长特性使其有利于用小尺寸材料来实现对低频声波的控制。如利用声学超构材料构建消声室, 通过声学超构材料设计使得所有界面几乎能有效地吸收全部入射的声能, 使得其中产生自由声场的空间大为减小; 超构消声器^[41]通过在气流管道中加入声学超构材料构成的衬里, 有效地降低了气流中的噪声; 超构阻尼器则是通过引入声学超构材料引起能量损耗来减小振动幅

值的装置,即减振器;超构声衬^[42, 43],指利用声学超构材料设计的具备在高速流体作用下吸声功能的声学器件;超构声学黑洞^[44-46]是基于黑洞原理构造的,具备强吸声性能的声学超构材料空间吸声体。

4.2 波阵面调控

利用声学超构材料,可以实现对亚波长分辨率的弹性波波阵面的调控。其主要应用有:超构声学隐身^[47, 48],利用声学超构材料人为地构造一个弯曲空间,使得声波按照弹性参数形成的弯曲空间传播,绕开隐身区域,进而实现声隐身;超构声透镜^[49, 50],指利用声学超构材料构成的能够对经过的声波产生会聚或者发散作用的声学元件;超构声学滤波器,是利用基于声学超构材料的特定结构实现对特定频段进行声波过滤的声学器件;超构波导,指利用声学超构材料设计来实现任意调节波传播方向的声学器件;超构声二极管^[51, 52],指利用声学超构材料构成的类似电子二极管的可以对声波实现整流效应的声学器件。

4.3 声学超构表面

声学超构表面^[53, 54]是结合相控阵波场控制原理与亚波长结构提出的新概念。通过将亚波长微结构按照特定的空间分布排列构成一维或者二维的表面结构,形成特定的反射或透射波相位梯度,实现对波的任意折射、聚焦成像、高效表面波耦合等控制。

5 关于建立声学超构材料相关标准的展望

从以上简述的一些声学超构材料的定义、分类、研究手段、应用方向等内容来看,声学超构材料这一领域已经逐步形成了一套相关科学概念与技术体系^[55]。建立声学超构材料的规范化名词术语、统一的技术标准的条件已经具备。

从国际范围看,目前并没有明确的声学超构材料标准,欧盟和美国等发达国家都在初步开始针对声学超构材料标准的制定进行调研工作。但是声学超构材料应用仍然处于尖端程度较高、应用范围不广的早期阶段,相关标准的制定工作进展缓慢。

从国内来看,我国超构材料的发展与国际水平保持一致,在人工微结构科学、电磁超构材料、声学超构材料的某些领域具有相当的优势。其中声学超构材料作为超构材料领域内结构尺度较大、加工难度较低的一个门类,已经在汽车工业、航空航天以及家电制造领域得到了初步验证与小范围应用。而从从事声学超构材料基础研究和转化的单位和人员数量、高水平论文发表的数量等方面看,我国都处于国际领先水平。多方面的优越条件从客观上促使着相关技术标准的制定与规范。此

外,我国在2016年制定并发布了全球首个超材料标准GB/T32005-2016《电磁超材料术语》,对电磁超材料推广应用起到了积极作用,也给其他门类超构材料的标准制定提供了宝贵经验。

凭借我国在声学超构材料领域的科研和技术优势,作者认为加速声学超构材料行业和国家技术标准的制定,有利于促进声学超构材料的产业化和应用,有利于推动与声学有关的各种行业的产业升级,有利于我国在这一领域具有更大的话语权,有利于保持既有的学术、技术和产业领域的优势。

参考文献 References

- [1] LU M H, FENG L, CHEN Y F. *Materials Today*[J], 2009, 12(12): 34-42.
- [2] KUSHWAHA M S, HALEVI P, DOBRZYNSKI L, *et al.* *Physical Review Letters*[J], 1993, 71: 2022-2025.
- [3] ZHU Y Y, MING N B, JIANG W H, *et al.* *Applied Physics Letters* [J], 1988, 53(15): 1381-1383.
- [4] LU Y Q, ZHU Y Y, CHEN Y F, *et al.* *Science* [J], 1999, 284 (5421): 1822.
- [5] LIU Z Y, ZHANG X, MAO Y, *et al.* *Science*[J], 2000, 289(5485): 1734-1736.
- [6] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. *Science* [J], 2001, 292 (5514): 77-79.
- [7] HUSSEIN M I, LEAMY M J, RUZZENE M. *Applied Mechanics Reviews*[J], 2014, 66(4): 040802.
- [8] YABLONOVITCH E. *Physical Review Letters* [J], 1987, 58 (20): 2059.
- [9] MEI J, MA G C, YANG M, *et al.* *Nature Communications*[J], 2012, 3: 765.
- [10] LIANG Z, LI J. *Physical Review Letters*[J], 2012, 108(11): 114301.
- [11] CHEN J, RAO J, LISEVYCH D, *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2019, 114(10): 104101.
- [12] ZHANG S, YIN L, FANG N. *Physical Review Letters*[J], 2009, 102 (19): 194301.
- [13] MARTIN T P, NICHOLAS M, ORRIS G J, *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2010, 97(11): 113503.
- [14] BRÛLÉ S, JAVELAUD E H, ENOCH S, *et al.* *Physical Review Letters*[J], 2014, 112: 133901.
- [15] FANG N, XI D, XU J, *et al.* *Nature Materials*[J], 2006, 5: 452-456.
- [16] THOMAS B, AURORE M, BENOIT M. *Nature Materials*[J], 2014, 14: 384-388.
- [17] LI J, CHAN C T. *Physical Review E*[J], 2004, 70: 055602.
- [18] RENOU Y, AUREGAN Y. *Journal of the Acoustical Society of America*[J], 2011, 130(1): 52-60.
- [19] DAI X, AUREGAN Y. *Journal of Fluid Mechanics*[J], 2018, 852: 126-145.

- [20] LI Y, LAN J, LI B, *et al.* Journal of Applied Physics[J], 2016, 120: 145105.
- [21] RICHARD V C, GUENNEAU S. Acoustic Metamaterials: Negative Refraction, Imaging, Lensing and Cloaking [M]. Netherlands: Springer Series in Materials Science, 2013.
- [22] BOULVERT J, CAVALIERI T, COSTA B J, *et al.* Journal of Applied Physics[J], 2019, 126(17): 175101.
- [23] SAM H L, CHOON M P, YONG M S, *et al.* Physical Review Letters [J], 2010, 104(10): 054301.
- [24] BOGDAN-IOAN P, DURVESH S, ADAM K, *et al.* Physical Review B[J], 2015, 91: 220303.
- [25] TIAN Z H, SHEN C, LI J F, *et al.* Advanced Functional Materials [J], 2019, 29: 1808489.
- [26] PIERRE D. Acoustic Metamaterials and Phononic Crystals[M]. Netherlands: Springer Series in Solid-State Sciences, 2013.
- [27] JIMENEZ N, ROMERO-GARCIA V, PAGNEUX V, *et al.* Scientific Reports[J], 2017, 7(1): 1–12.
- [28] LU Z B, YU X, SIU-KIT L, *et al.* Applied Acoustics[J], 2020, 157: 107003.
- [29] 吴福根, 刘正猷, 刘友延. 声学学报[J], 2001, 26(4): 319–323.
WU F G, LIU Z Y, LIU Y Y. Acta Acustica[J], 2001, 26(4): 319–323.
- [30] GOFFAUX C, VIGNERON J P. Physical Review B[J], 2001, 64(7): 075118.
- [31] CAO Y, HOU Z L, LIU Y Y. Physics Letters A [J], 2004, 327: 247–253.
- [32] MEI J, LIU Z Y, SHI J, *et al.* Physical Review B [J], 2003, 67: 245107.
- [33] PALMERI M L, SHARMA A C, BOUCHARD R R, *et al.* IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control[J], 2005, 52(10): 1699–1712.
- [34] MINGSLAN R B. Journal of the Acoustical Society of America[J], 1992, 92(1): 533–549.
- [35] YEE K S. IEEE Transactions on Antennas and Propagation[J], 1966, 14: 302–307.
- [36] ASPNES D E. American Journal of Physics[J], 1982, 50(8): 704.
- [37] LI W B, MENG F, CHEN Y F, *et al.* Advanced Theory and Simulations[J], 2019, 2(7): 1900017.
- [38] MAHESH N R, NAIR P. Low Frequency Narrow Bandwidth Acoustic Fitters Based on Acoustic Metamaterials[C]//National Conference on Advances in Naval Materials(ADNAM-2013). India: [s.n.], 2013.
- [39] YANG M, CHEN S, FU C, *et al.* Materials Horizons[J], 2017, 4(4): 673–680.
- [40] BAI L, DONG H Y, SONG G Y, *et al.* Advanced Materials Technologies[J], 2018, 3(11): 1800064.
- [41] SUI N, YAN X, HUANG T Y, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2015, 106(17): 171905.
- [42] XIONG L, NENNIG B, AUREGAN Y, *et al.* The Journal of the Acoustical Society of America[J], 2017, 142(4): 2288–2297.
- [43] AUREGAN Y, FAROOQUI M, GROBY J P. Journal of the Acoustical Society of America[J], 2016, 139(5): EL149–EL153.
- [44] MIRONOV M A. Soviet Physcial Acoustics[J], 1988, 34(3): 318–319.
- [45] LI X, DING Q. Journal of Sound and Vibration[J], 2019, 439(287): 99.
- [46] ZHU H F, SEMPERLOTTI F. Physical Review B [J], 2015, 91: 104304.
- [47] CHENG Y, LIU X J. Applied Physics Letters [J], 2008, 93(7): 071903.
- [48] ZHU X, LIANG B, KAN W, *et al.* Physics Review Letters[J], 2011, 106(7): 014301.
- [49] ZHANG S, PARK Y S, LI J, *et al.* Physical Review Letters[J], 2009, 102(2): 023901.
- [50] SHEN C, XIE Y B, SUI N, *et al.* Physical Review Letters[J], 2015, 115(25): 254301.
- [51] LI X F, NI X, FENG L, *et al.* Physical Review Letters[J], 2011, 106(8): 084301.
- [52] LI B, ALAMRI S, TAN K T. Scientific Reports [J], 2017, 7(1): 6626.
- [53] LI Y, LIANG B, GU Z M, *et al.* Scientific Reports[J], 2013, 3(1): 02546.
- [54] MA G C, YANG M, XIAO S W, *et al.* Nature Materials[J], 2014, 13: 873–878.
- [55] CHEN K, LI L. Advanced Materials[J], 2019, 31(32): 1901115.

(编辑 吴 锐)