

基于含缺陷声子晶体孔板共振模式的 可调局域声场设计

王 辰 李 飞 孟 龙 蔡飞燕 郑海荣

(中国科学院深圳先进技术研究院 生物医学与健康工程研究所
保罗·C·劳特伯生物医学成像研究中心 深圳 518055)

摘 要 可调的局域声场在开发新型滤波器、传感器和声操控微器件等方面具有潜在应用前景。文章数值模拟研究了一种二维正方排列含缺陷孔声子晶体孔板表面的局域声场。计算结果表明,选择不同的共振频率可以调控含缺陷声子晶体孔板表面的声场形态。这是因为缺陷孔与周期孔的 Fabry-Perot 共振频率不一致,导致含缺陷声子晶体孔板表面的耦合场有多种形态。该工作所设计的缺陷态声子晶体孔板,可为声场与微粒的精细相互作用研究提供声学载台。

关键词 缺陷态声子晶体板; 可调局域声场

中图分类号 O 424 **文献标志码** A

Tunable Localized Acoustic Fields on a Defect Phononic Crystal Plate Based on Resonant Modes

WANG Chen LI Fei MENG Long CAI Feiyan ZHENG Hairong

(Paul C. Lauterbur Research Center for Biomedical Imaging, Institute of Biomedical and Health Engineering,
Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract Tunable localized acoustic fields have potential applications in the development of novel acoustic devices such as new filters, sensors and acoustic manipulation micro-devices. In this paper, tunable localized acoustic fields on a defect phononic crystal plate (PCP) have been numerically investigated. The results showed localized acoustic fields on a defect PCP can be tuned by changing the resonance frequency. It is attributed to the inconsistency of the resonance frequency for the defect hole and the periodic holes in the defect PCP, which induce various coupled fields on the surface of the defect PCP. This designed defect PCP can be used as acoustic holder for the investigation of the interaction between the acoustic field and microparticles.

Keywords defect phononic crystal plate; tunable localized acoustic fields

收稿日期: 2016-02-03 修回日期: 2016-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(11274008); 深圳基础 Research 计划(JCYJ20150521094519482、JCYJ20120617120202953)

作者简介: 王辰, 博士研究生, 研究方向为声操控; 李飞, 助理研究员, 研究方向为超声微流控; 孟龙, 副研究员, 研究方向为声表面波操控微粒; 蔡飞燕(通讯作者), 副研究员, 研究方向为声操控和超声微流控, E-mail: fy.cai@siat.ac.cn; 郑海荣, 研究员, 研究方向为生物医学超声。

1 引言

声人工结构(声子晶体、声超常材料等)是人工设计的复合结构材料,由于周期结构中的布拉格散射、单体结构中的局域共振等效应,可以实现对声波、弹性波的灵活调控,是近 20 多年来物理学、材料学领域备受关注的研究热点。声人工结构的相关物理性质可以“人工裁剪”,为新型功能器件的研制提供了坚实的物理基础^[1,2]。局域声场能够增强声波与物质的相互作用,可以有效地改善声场与物质的作用强度、范围和方式,可为新型滤波器、传感器、声操控微器件的设计提供新物理支持^[3-5]。已有研究表明,在二维周期排列的钢柱中引入单个或线缺陷钢柱,可以实现点局域声场或线局域声场分布^[6]。在二维二组元声子晶体柱中引入第三组元材料作为缺陷,也可以在缺陷中产生局域强场^[7]。然而,在这些二维无限长圆柱、方柱等单体周围局域场的研究中,多数侧重机制的探讨,而在实际应用中则需要考虑应用需求和加工工艺等因素,这就需要对三维有限结构进行再设计与优化。

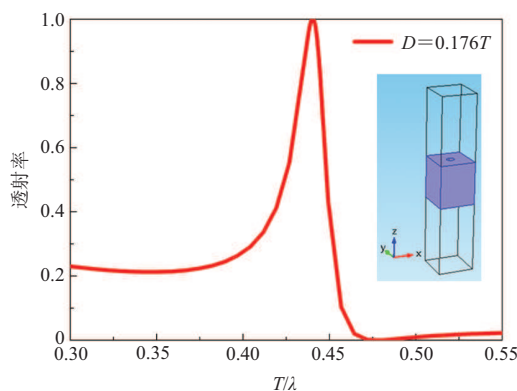
本文将理论研究一种二维正方排列的含缺陷声子晶体孔板的局域声场分布与特征。首先,研究平板上含有周期分布孔的声学特性及声场特

征,得到该系统具有共振特征峰及局域声场分布;然后,将在该周期孔中引入孔径不一的缺陷孔,计算含缺陷声子晶体孔板的透射率,同时还探讨了缺陷态声子晶体板的板厚对共振频率及局域声场的影响;最后,文章对数值模拟计算结果进行了讨论。由于局域声场在声子晶体板表面,因此该声子晶体板可以作为微器件元件,为微粒提供样品载台的同时还可以研究声场与微粒的精细相互作用。

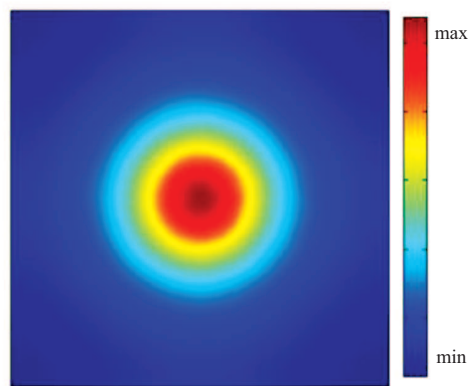
2 数值计算及结果

2.1 材料与计算方法

理论计算模型如图 1(a)中插入图片的带单孔长方体所示,研究系统为二维正方排列的均匀孔硅板,整个系统浸没在水中。其中,板厚为 T ,晶格周期为 $P=0.84T$,孔直径为 $D=0.176T$ 。数值计算采用有限元软件 COMSOL 5.1 计算声透射率及声场分布,将计算系统的上下面设置为平面波辐射,平面波从下往上入射;其余边界设置为周期性边界条件,模拟在 xy 平面上的无限周期分布。材料参数分别为:水的密度 $1\ 000\ \text{kg/m}^3$,纵波速度 $1\ 490\ \text{m/s}$;硅的密度 $2\ 329\ \text{kg/m}^3$,纵波速度 $9\ 659.9\ \text{m/s}$,横波速度 $5\ 339.7\ \text{m/s}$ 。



(a) 正方排列均匀孔的声子晶体板声透射率曲线



(b) 在归一化共振频率 0.4409 时孔附近 xy 方向截面的声压力场分布图

图 1 均匀孔声子晶体板的声学特性

Fig. 1 The acoustic characteristics of a square array of circular holes in a phononic crystal plate

2.2 正方排列均匀孔的声子晶体板透射率与声压力场分布

图 1(a) 是计算获得的声透射率曲线, 图中 λ 表示波长, T/λ 为归一化频率。可以看到, 在归一化频率为 0.4 409 时有一个明显的共振峰, 这是由于周期孔一阶法布里-珀罗 (Fabry-Perot, FP) 效应与表面散射消逝波的共振耦合产生的^[8-10]。图 1(b) 是在共振频率处, 距孔板表面 $4 \mu\text{m}$ 处, xy 截面上的声压力场分布图。结果显示, 声压力场在孔出口位置具有很强的局域声场分布, 而在孔周边声场强度迅速衰减。

为更好地理解均匀孔板厚 (T)、周期 (P) 与共振频率 (f) 之间的关系。我们分别计算了无限大平板的单孔一阶 FP 效应 ($\lambda=2T$, λ 为共振频率时对应孔中介质的波长, T 为板厚) 和周期性均匀孔板厚、周期与归一化共振频率 ($f \times P/C$) 之间的关系 (如图 2 所示), 此时孔径为 $0.13T$, C 为声在水中的速度。从图 2 可以看出, 在 $P=0.1T$ 到 $P=1.5T$ 的范围内, 单孔的 FP 共振 (黑色点线)

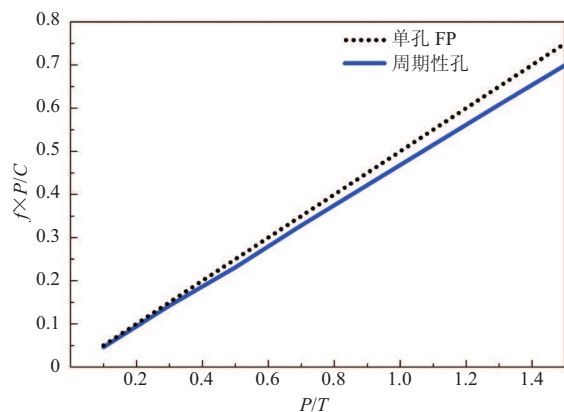


图 2 单孔板厚与一阶 FP 共振频率关系 (点虚线) 及均匀孔板厚、周期与共振频率之间的关系 (蓝实线)

Fig. 2 The first order FP resonance frequencies plot as a function of thickness of the single hole plate (dark dot line) and the relationship is about thickness, the period and the resonance frequencies for a square array of circular holes in a phononic crystal plate (solid blue line)

与周期性孔共振 (蓝色实线) 有一定的偏差。这是由于周期性孔效应对 FP 共振峰有扰动所导致^[8]。并且还可以看出, 周期孔板系统的共振频率对应水中波长接近板厚度的 2 倍。因此, 在孔径与厚度 T 一定的情况下, 周期 P 越小, 周期孔的共振频率越靠近单孔 FP 效应的共振频率。

2.3 含缺陷结构声子晶体孔板的透射率及声压力场分布

我们在声子晶体板结构中引入缺陷孔, 其几何结构如图 3 所示。在一个 3×3 超包中, 晶格周期为 P , 中间为缺陷孔, 孔径为 $0.15P$, 其余孔径为 $0.21P$, 板厚 $T=1.19P$ 。计算仍采用有限元软件 COMSOL5.1, 超包上下为辐射边界, 四周为周期边界。图 3 中蓝色点虚线代表板厚为 $1.19P$ 、周期性均匀孔径 $0.21P$ 时的声透射率曲线; 红色实线代表含缺陷态声子晶体声透射率曲线。对比两条声透射率曲线可以发现, 引入缺陷态孔以后, 周期性均匀孔的声透射率曲线共振峰发生了分裂, 产生了两个共振峰和一个共振谷。

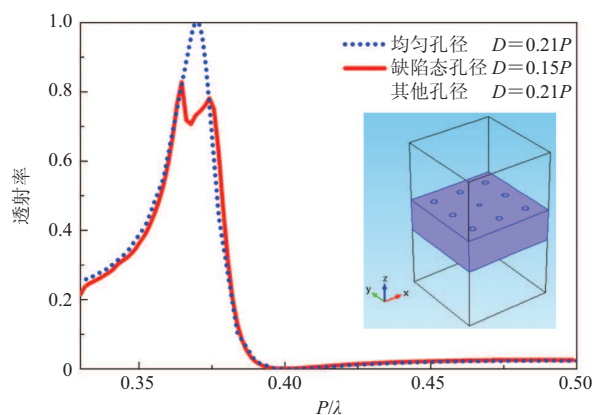
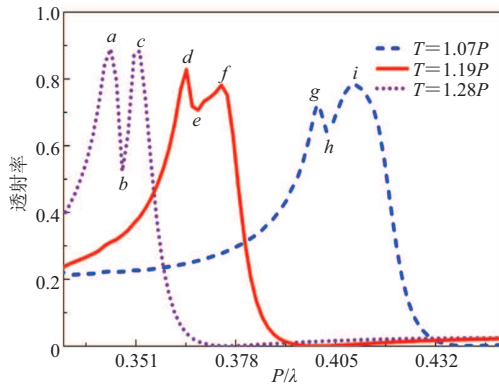


图 3 含缺陷态声子晶体及声透射率曲线

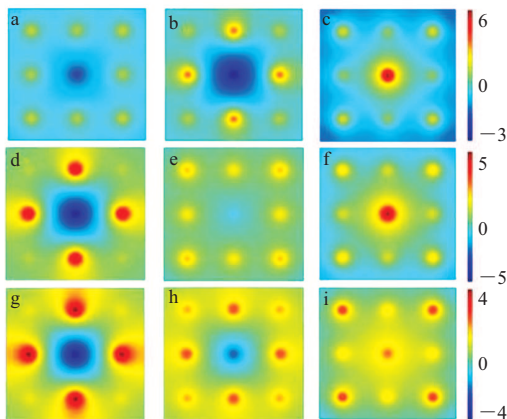
Fig. 3 The defect phononic crystal plate and the acoustic transmission spectra

为了进一步研究声子晶体板厚度对透射谱的影响, 我们分别计算了厚度 T 为 $1.07P$ 、 $1.19P$ 和 $1.28P$ (其他条件不变情况) 时, 含缺陷结构声子晶体孔板的透射谱, 结果如图 4(a) 所示。可以发

现, 板子越厚, 共振频率越低。并且由于有缺陷孔的存在, 每个声透射曲线的形状也略有不同。三组不同厚度声子晶体板表面的声场分布如图 4(b) 所示, 其中图 4(a) 中的字母标号分别对应着图 4(b) 中的声场分布图。可以发现, 不同的共振频率有不同形态的局域场分布。这是由于缺陷孔与周期孔的 FP 共振频率不一致, 导致含缺陷声子晶体孔板表面的耦合声场有多种形态。当板厚 $T=1.28P$ 时, c 点对应的缺陷态孔处局域场比均匀孔的局域场强; 当 $T=1.19P$ 时, d 点对应的缺陷点与相应四周点的声场相当且幅度相反; 而当 $T=1.07P$ 时, i 点对应的缺陷态孔处的局域场与周围声场强度相当。



(a) 3 种不同厚度缺陷态孔板的声透射率曲线



(b) 3 种不同厚度、不同共振频率的缺陷态孔板共振场图

图 4 3 种不同厚度含缺陷态声子晶体板的声学特性

Fig. 4 The acoustic characteristics of three thickness of the hole defect phononic crystal plates

3 结果分析与讨论

通过分析图 3 的声透射率曲线可以发现, 含缺陷态声子晶体孔板透射共振峰是在周期性均匀孔板透射共振峰基础上分裂所导致, 并且不同的共振峰频率可以产生不同的声场分布形态。然而, 之前研究缺陷态声子晶体结构多是侧重改变几何结构或者改变缺陷材料参数, 进而改变局域声场分布。如 Khelif 教授在二维柱状排列的声子晶体中改变双点缺陷的排布位置可产生不同形态的局域强场分布^[11]。赵寰宇等^[6]在 9×9 二维超胞正方晶格声子晶体中引入不同数量的点缺陷可改变局域声场形态。李晓春等^[7]在三组元声子晶体的缺陷态声子晶体研究中, 引入第三组元材料的缺陷态能够改变其能带结构和局域声场分布。与上述产生不同形态的局域场方法相比, 本文工作的优势在于引入缺陷态后, 不需要改变几何结构和缺陷态材料参数, 仅通过调控入射共振频率就可获得多种形态的局域声场分布, 使用起来更加灵活与方便。

4 结 论

本文通过采用有限元数值计算的方法, 着重研究了一种二维正方排列含缺陷态声子晶体孔板的声学特性及缺陷态孔板表面的声场特征分布。引入缺陷态后声透射率曲线会产生多个共振峰。并且每个共振峰对应一种局域共振声场分布形态。通过调控不同的入射共振频率, 可以获得不同的声场分布形态, 使用起来更加方便, 具有高度的可调性。在后续的工作中, 我们将制作实验样品, 获得局域声场, 研究不同形态声场与微粒的精细相互作用。

参 考 文 献

- [1] Cummer SA, Christensen J, Alù A. Controlling

- sound with acoustic metamaterials [J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, 1(3): 16001(1)-16001(13).
- [2] Lu MH, Feng L, Chen YF. Phononic crystals and acoustic metamaterials [J]. *Materials Today*, 2009, 12(12): 34-42.
- [3] Pennec Y, Djafari-Rouhani B, Vasseur JO, et al. Tunable filtering and demultiplexing in phononic crystals with hollow cylinders [J]. *Physical Review E Statistical Nonlinear Soft Physical*, 2004, 69(2): 266-289.
- [4] Ke M, Zubtsov M, Lucklum R. Sub-wavelength phononic crystal liquid sensor [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(2): 026101(1)-026101(3).
- [5] Reboud J, Bourquin Y, Wilson R, et al. Shaping acoustic fields as a toolset for microfluidic manipulations in diagnostic technologies [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the States of America*, 2012, 109(38): 15162-15167.
- [6] Zhao HY, He CF, Wu B, et al. Experimental investigation of two-dimensional multi-point defect phononic crystals with square lattice [J]. *Acta Physica Sinica-Chinese Edition*, 2013, 62(13): 134301(1)-134301(9).
- [7] Li XC, Yi XY, Xiao QW, et al. Defect states in three-component phononic crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(5): 2300-2305.
- [8] Hou B, Mei J, Ke MZ, et al. Tuning Fabry-Perot resonances via diffraction evanescent waves [J]. *Physical Review B Condensed Matter*, 2007, 76(5): 293-300.
- [9] Wang T, Ke MZ, Xu SJ, et al. Dexterous acoustic trapping and patterning of particles assisted by phononic crystal plate [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(16): 163504(1)-163504(4).
- [10] Hou B, Mei J, Ke MZ, et al. Experimental determination for resonance-induced transmission of acoustic waves through subwavelength hole arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(1): 014909(1)-014909(5).
- [11] KhelifA, Choujaa A, Djafari-Rouhani B, et al. Trapping and guiding of acoustic waves by defect modes in a full-band-gap ultrasonic crystal [J]. *Physical Review B*, 2003, 68(21): 214301(1)-214301(4).