

## 基于二维声子晶体板共振声场的微粒操控\*

王燕萍<sup>1)2)</sup> 蔡飞燕<sup>2)†</sup> 李飞<sup>2)</sup> 张汝钧<sup>2)</sup>  
李永川<sup>2)</sup> 王金萍<sup>2)</sup> 张欣<sup>1)‡</sup> 郑海荣<sup>2)</sup>

1) (广东工业大学物理与光电工程学院, 广州 510006)

2) (中国科学院深圳先进技术研究院, 劳特伯生物医学成像研究中心, 深圳 518055)

(2023 年 1 月 22 日收到; 2023 年 4 月 17 日收到修改稿)

声波可以非接触、无损伤地操控微粒, 其在细胞操纵、材料组装等领域具有广阔的应用前景. 然而, 如何高通量、灵活且快速操控微粒仍然面临挑战. 在本工作中, 利用二维声子晶体板的周期局域梯度场实现了大规模微粒的并行操控. 其主要机制是由于黄铜平板刻蚀周期分布的正方体凸起构成的二维声子晶体板可激发板子固有的 Lamb 波零阶反对称模式; 其周期局域梯度场在平行于声子晶体板表面为驻波声场、在垂直于声子晶体板表面为局域梯度声场; 该周期分布的局域声场可以对微粒产生平行于表面的声停驻力、垂直于表面的声吸引力. 我们进一步构建了操控实验装置, 利用压电陶瓷片激励二维声子晶体板, 在实验中观察到了玻璃微球的捕获和排列现象, 实现了大规模微粒的二维排列操控. 该工作为高通量、快速、灵活操控微粒和细胞等提供了物理基础和技术支持.

**关键词:** 声子晶体, 声辐射力, 微粒操控**PACS:** 43.25.Qp, 43.20.+g, 43.40.+s**DOI:** 10.7498/aps.72.20230099

## 1 引言

声波操控微粒技术是利用声场与物体交换动量时发生的力学效应——声辐射力操控物体的运动, 具有非接触、无损伤、无需对微粒进行化学标记、器件制备成本低以及易于与其他微流控装置集成等优点<sup>[1]</sup>, 在细胞搬运、定点给药、材料组装等领域具有广阔的应用前景.

声场形态是决定操控能力的主要因素之一. 传统声操控微粒技术一般是利用单一换能器直接产生的聚焦声场操控单个微粒<sup>[2–6]</sup>, 或者利用多个换能器形成的面阵声场操控多个微粒<sup>[7,8]</sup>. 其中单一换能器产生的声场形态固定, 难以实现对大规模微

粒的同时操控; 面阵换能器虽然可以操控大规模微粒, 但面阵换能器制备繁琐且驱动电路系统复杂, 导致器件成本高昂且难以微型化. 近年来, 科研工作者提出了声子晶体和声超常材料等人工结构, 可以通过结构的共振、干涉、散射等原理产生特殊形态的声场: 如自弯曲声束、螺旋声束和聚焦声束等<sup>[9–13]</sup>, 这些特殊声场有望应用于微粒操控领域实现微粒的灵活操控, 引起了人们的极大兴趣. 如: Melde 等<sup>[14]</sup>利用全息板产生的复杂声场实现了微粒复杂不对称的二维排列, 并且首次在实验上将声阻抗小于水的微粒排列成和平鸽的复杂图案; Huang 等<sup>[15]</sup>利用传统平面超声换能器和声学透镜生成的声表面声波, 实现了粒子的定向输运; Memoli 等<sup>[16]</sup>利用卷曲空间超表面调控相位, 构建声学势阱并在空气

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12004409, 11974372, 12004408, 12274095) 和深圳市科技计划 (批准号: RCJC20221008092808013, JCYJ20200109105823170, JCYJ20200109110006136) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fy.cai@siat.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: phxzhang@gdut.edu.cn

中实现了单一微粒的悬浮操控; Wang 等<sup>[17]</sup>利用声子晶体孔板结构中的局域强场实现了粒子在孔附近的周期排列; Korozlu 等<sup>[18]</sup>利用二维声子晶体线性缺陷波导对空气中的毫米级固体颗粒进行了基于尺寸的分选; Wang 等<sup>[19]</sup>利用准周期声子晶体板构建多个突破衍射极限的声场实现了聚苯乙烯微球的移动和环形捕获. 此外, 本课题组在研究基于结构声场的声操控技术和应用上也做了很多工作. 如利用一维声栅共振场实现了空气中大规模微粒的一维并行排列<sup>[20,21]</sup>. 还利用一维声子晶体板共振激发板子的零阶 Lamb 波模式产生的局域声场实现了微粒的一维捕获与排列<sup>[22,23]</sup>以及大规模细胞的可控声致穿孔<sup>[24]</sup>. 由于该操控装置是由单阵元换能器与声子晶体板结构结合, 装置简单易集成, 展现了优越的实用性. 因此, 在本工作中, 进一步研究二维声子晶体板的共振声场特征, 将该系统拓展到了二维微粒操控.

本文首先研究二维声子晶体板的能带特征和透射增强谱, 发现在透射增强频率处, 二维声子晶体板也可以激发 Lamb 波的零阶反对称模式; 然后, 研究微粒在共振声场表面受到的声辐射力, 发现该周期分布的局域声场可以对微粒产生平行于表面的声停滞力、垂直于表面的声吸引力, 从而有望实现微粒的二维周期停驻; 进一步, 研制了二维声子晶体板结构, 并构建了微粒操控系统, 在实验上实现了微粒的二维周期排列. 该工作为微粒、细胞等二维周期排列提供了简易的实验方案.

## 2 理论模拟

用于调制声场的二维声子晶体板是由黄铜板(板厚  $h = 0.196$  mm)底面刻蚀周期分布的正方体凸起构成(凸起边长  $w = 1$  mm 和高度  $t = 0.184$  mm, 周期  $p = 2.25$  mm), 如图 1(a) 所示. 样品首先用 Auto CAD 绘制模型, 然后通过标准化学蚀刻方法在黄铜板的表面上刻蚀以形成设计的周期结构, 实验样品如图 1(b) 所示. 材料的声学参数如下: 黄铜纵波速度  $c_l = 4400$  m/s, 横波速度  $c_t = 2100$  m/s, 密度  $\rho = 8600$  kg/m<sup>3</sup>; 水纵波速度  $c_l = 1490$  m/s, 密度  $\rho = 1000$  kg/m<sup>3</sup>; 玻璃纵波速度  $c_l = 5660$  m/s, 横波速度  $c_t = 3300$  m/s, 密度  $\rho = 2490$  kg/m<sup>3</sup>.

采用有限元软件 COMSOL MULTIPHYSICS 模拟了二维声子晶体板的色散曲线、透射谱以及声

场分布. 在计算色散曲线和本征场时采用的是“压力声学(特征频率)”模块, 计算透射谱和激发声场采用“压力声学(频域)”模块. 由于二维声子晶体板在平行于板面方向( $x$ - $y$  面)是周期的, 因此只需计算一个单胞的声场, 单胞上下采用平面波辐射边界条件, 单胞四周采用 Bloch 边界条件计算色散曲线、采用周期边界条件计算正入射的透射谱、声场以及声辐射力的空间分布<sup>[25]</sup>.

为研究二维声子晶体板的共振声场特征, 理论分析并实验测量了平面波正入射至二维声子晶体板的透射谱, 为了对比, 也展示了平面波入射至厚度为  $h = 0.38$  mm 的均匀黄铜板透射谱, 如图 1(c) 所示. 由图 1(c) 可以看到, 对于均匀黄铜板, 在 0.1—0.4 MHz 范围内, 透射率比较低. 然而, 对于二维声子晶体板, 理论(0.24 MHz 附近)和实验(0.26 MHz 附近)均展示了透射峰, 理论和实验透射峰频率的偏差是由于样品加工不精准导致.

为研究声子晶体板透射峰的产生机制, 计算了均匀板和二维声子晶体板的色散曲线(如图 1(d)), 以及离它们表面约 0.05 mm 处的本征声场图(如图 1(e) 和图 1(f)). 为了便于比较, 均匀板的色散曲线被折叠在第一布里渊区, 蓝色实线为 Lamb 波零阶反对称模式( $A_0$ ), 红色实线为 Lamb 波零阶对称模式( $S_0$ ). 从图 1(d) 可以看出, 在低频极限范围内, 二维声子晶体板的色散曲线与均匀板子的色散曲线重合, 在  $\Gamma(k_x = k_y = 0)$  点处, 均匀板子的  $A_0$  模式折叠在频率约 0.21 MHz 处, 而声子晶体板子由于结构共振导致在该频率附近解耦为 4 个模式, 前两个模式频率向低频偏移, 后两个模式频率向高频偏移. 图 1(e) 展示了均匀板子表面的 4 阶简并模式的本征声场, 图 1(f) 展示了二维声子晶体板表面的 4 个解耦模式的本征声场, 它们的声场形态基本类似.

进一步理论模拟了在共振频率 0.24 MHz 处平面波入射至二维声子晶体板产生的共振声场, 如图 2(a) 所示, 该声场形态与图 1(f) 的声子晶体板第三个本征声场基本一致. 这表明二维声子晶体板在共振频率 0.24 MHz 处的透射峰是 Lamb 波  $A_0$  模式共振激发产生的<sup>[26]</sup>. 此外, 我们用激光多普勒测振仪(Polytec OFV 5000 laser Doppler vibrometer, LDV)测量了二维声子晶体板表面的位移场分布, 如图 2(b) 所示. 因此, 理论和实验结果均表明平行于声子晶体板表面( $x$ - $y$  面)的声场是周

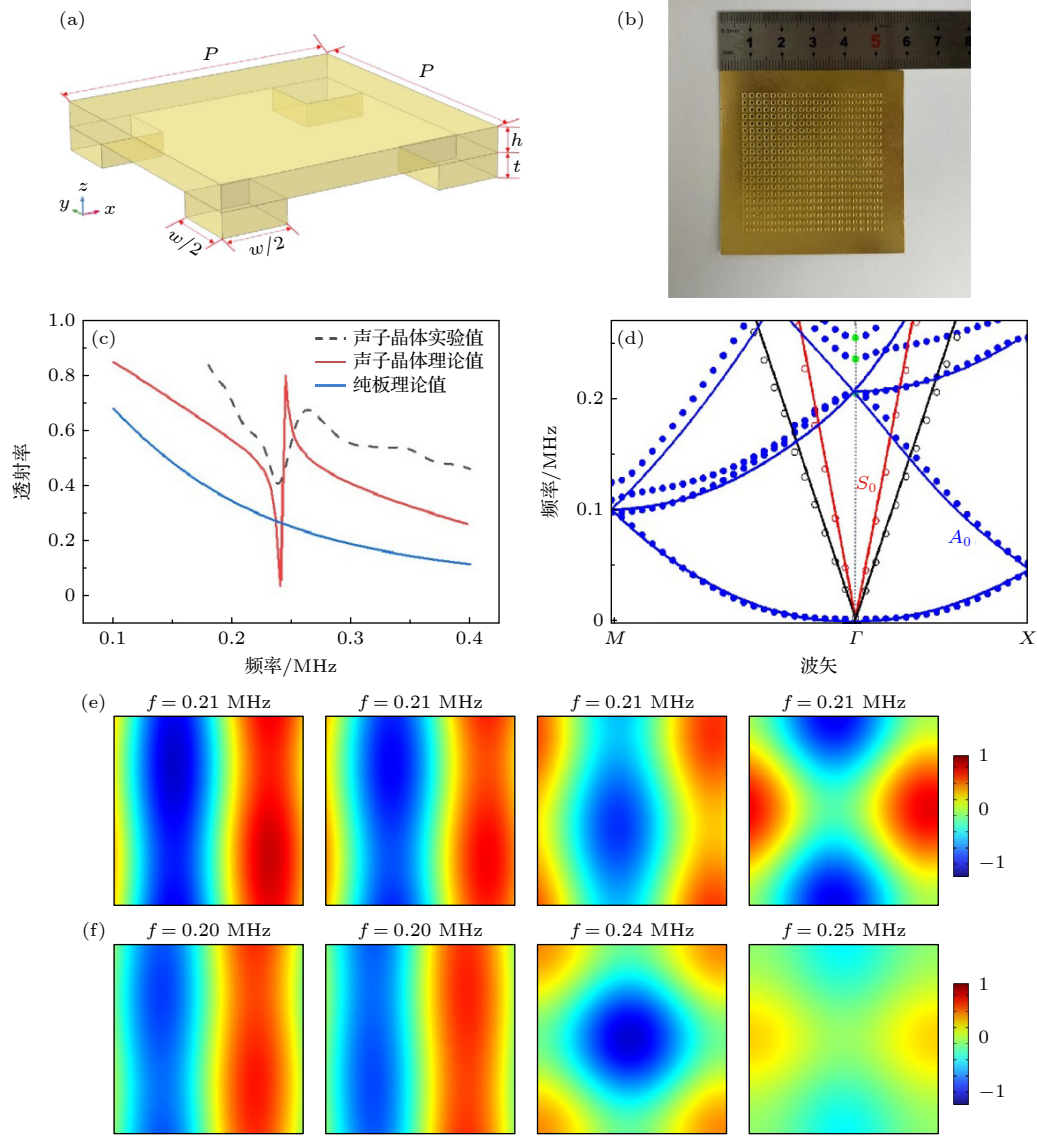


图 1 二维声子晶体板声学特性 (a) 二维声子晶体板单胞示意图; (b) 二维声子晶体板实验样品图; (c) 正入射时, 二维声子晶体板和厚度为 0.38 mm 的均匀黄铜板透射曲线; (d) 二维声子晶体板色散曲线 (红色和蓝色圆圈), 被折叠在第一布里渊区的均匀板色散曲线 (红色和蓝色实线) 及水的色散曲线 (黑色圆圈); (e) 在  $\Gamma$  点且频率为 0.21 MHz 处, 离均匀板表面距离为 0.05 mm, 4 阶简并模式的声场分布; (f) 在  $\Gamma$  点且频率为 0.24 MHz 附近, 离声子晶体板表面距离为 0.05 mm, 4 个模式的声场分布

Fig. 1. Acoustic characteristics of two-dimensional phononic crystal plate (TDPCP): (a) Schematic diagram of two-dimensional phononic crystal plate cell; (b) photograph of the TDPCP sample; (c) transmission spectrum at normal incidence versus frequency for the TDPCP and uniform brass plate with the height of 0.38 mm; (d) dispersion curves (red circles and blue circles) for the TDPCP immersed in water, accompanied with the water line (dark circles). For comparison, the simply folded dispersion curves for the uniform plate are plotted as lines with the same color; (e) the eigen pressure fields of four-order degenerate mode above the uniform brass plate with distance 0.05 mm at  $\Gamma$  with frequency of 0.21 MHz; (f) the eigen pressure field above the TDPCP with distance 0.05 mm at  $\Gamma$  with frequency around 0.24 MHz.

期分布, 垂直于声子晶体板表面 ( $z$  方向) 的声场是局域梯度分布。

为研究微球的受力特征, 理论计算了微粒在二维声子晶体板表面所受到的声辐射力分布。由于操控的玻璃微球半径  $r$  约为 0.2 mm, 工作频率约为 0.24 MHz, 因此  $kr \approx 0.21$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ , 可以忽略微

粒在声场中的散射<sup>[27,28]</sup>, 采用 Gor'kov 公式来研究微粒在声子晶体板表面受到的声辐射力, 其表达式如下所示:

$$F = -\nabla U, \quad (1a)$$

$$U = 2\pi r^3 \rho_0 \left( \frac{\langle p_{in}^2 \rangle}{3\rho_0^2 c_0^2} f_1 - \frac{\langle v_{in}^2 \rangle}{2} f_2 \right), \quad (1b)$$

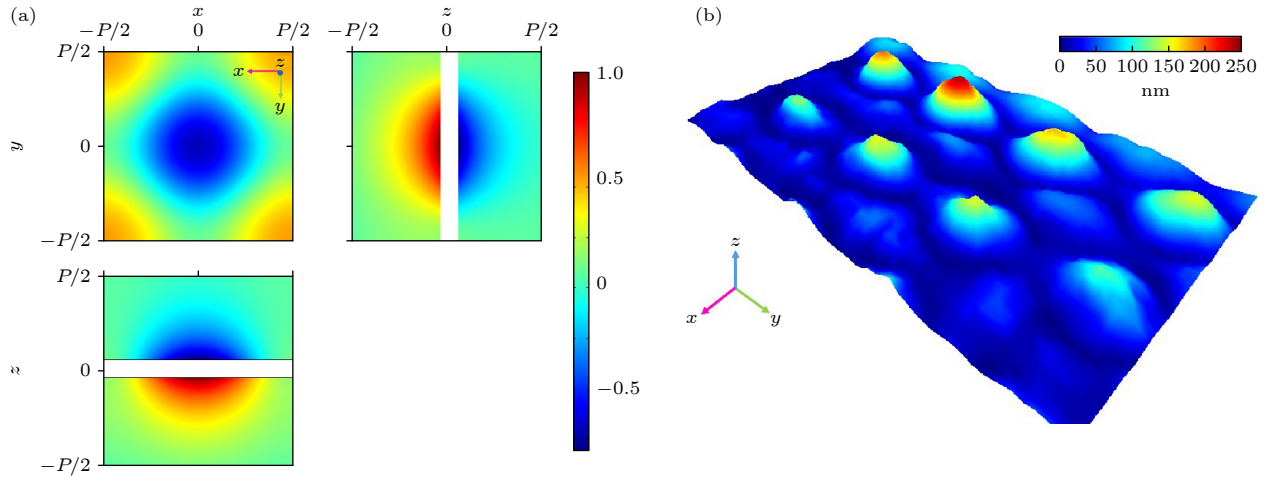


图2 数值计算声压场与实验测量位移场 (a) 在共振频率 0.24 MHz 处声子晶体板单胞周围的声场分布 (数值模拟); (b) 在共振频率处声子晶体板面的位移场分布 (LDV 实验测量)

Fig. 2. Calculated pressure field and measured displacement field at resonant frequency: (a) Calculated pressure field of unit cell around the TDPCP at resonant frequency; (b) measured displacement field at the surface of the TDPCP at resonant frequency by LDV.

$$f_1 = 1 - \frac{\rho_0 c_0^2}{\rho c^2}, \quad f_2 = 2 \frac{\rho - \rho_0}{2\rho + \rho_0}, \quad (1c)$$

其中  $U$  表示 Gor'kov 势;  $p_{\text{in}}$  和  $v_{\text{in}}$  分别表示入射声压场和速度场;  $r$  表示微粒的半径;  $\rho_0$  和  $c_0$  分别表示溶液的密度和纵波声速;  $\rho$  和  $c$  则分别表示微球的密度和纵波声速;  $f_1$  和  $f_2$  分别表示微球单极和偶极模态相关的强度参数;  $\langle \rangle$  表示对时间的平均。

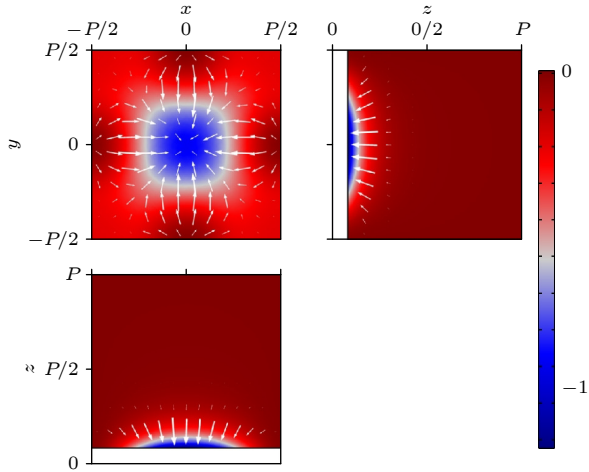


图3 共振频率处玻璃微球在二维声子晶体板表面受到的 Gor'kov 势 (归一化) 和声辐射力分布, 其中背景颜色表示 Gor'kov 势大小, 箭头长度和方向分别表示声辐射力的大小和方向

Fig. 3. Distribution of normalized Gor'kov potential and acoustic radiation force exerted on glass microspheres at the surface of TDPCP at resonance frequency, the color represents the magnitude of Gor'kov potential, the length and direction of the arrow represent the magnitude and direction of the acoustic radiation force, respectively.

图3 显示了共振频率处玻璃微球在声子晶体板表面受到的 Gor'kov 势和声辐射力分布. 从图3 中可以看出, 玻璃微球在二维声子晶体板单胞中心位置处的 Gor'kov 势值最小. 在垂直于声子晶体板表面方向, 玻璃微球受到的声辐射力指向二维声子晶体板表面, 与波的传播方向相反; 因此, 微球可以受到声吸引力被吸附在板表面. 在平行于声子晶体板表面, 玻璃微球受到的声辐射力指向二维声子晶体单胞中心 (此处受力为 0); 因此, 微球可以受到停驻力按周期排列在板表面。

### 3 实验观察

搭建的微粒操控实验系统示意图如图4(a)所示. 压电换能器 (piezoelectric transducer, PZT) 通过环氧树脂胶水粘附在石英衬底的下表面, 用于产生超声波激励二维声子晶体板; 石英衬底的上表面是用耦合剂粘附的聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 腔; 二维声子晶体板沉浸在盛满水的 PDMS 腔中; 半径约为 0.2 mm 的玻璃微球用于操控实验。

附加材料影像记录了整个实验过程. 开始时, 玻璃微球随机分布在二维声子晶体板的表面, 如图4(b)所示; 随后, 信号发生器发射频率为 0.26 MHz、幅度为 200 mV 的连续正弦波, 经过功率放大器放大后, 驱动 PZT 产生超声波; 二维声子晶体板表面的玻璃微球开始运动, 数秒钟后, 玻璃微球捕获在

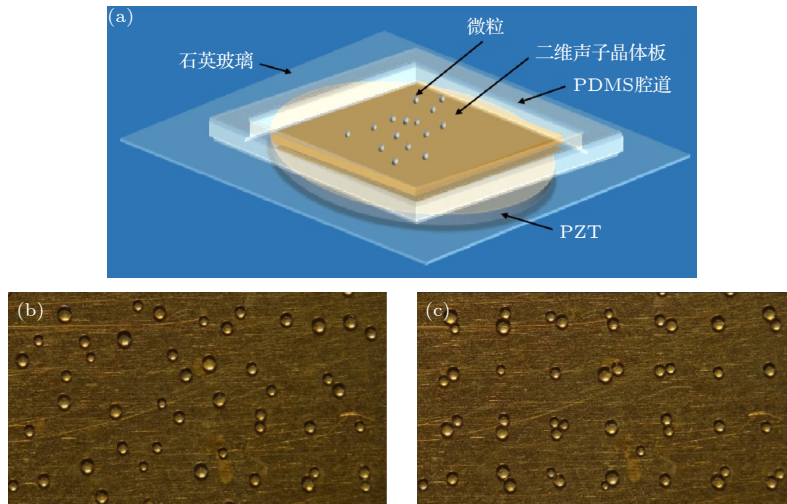


图4 微粒操控实验系统示意图及实验效果图 (a) 微粒操控实验系统示意图; (b) 超声开启前, 玻璃微球随机分布在声子晶体板表面; (c) 超声开启后, 玻璃微球二维周期捕获在声子晶体板表面

Fig. 4. Schematic diagram of the experimental system and experimental effect of particles manipulation: (a) Schematic diagram of the experimental system; (b) initially, glass spheres are randomly distributed on the surface of the TDPCP; (c) when ultrasonic wave is on, glass spheres are trapped and periodically arranged on the surface of the TDPCP.

声子晶体板表面且以约 2.25 mm 的间距二维排列, 如图 4(c) 所示. 我们还可以观察到, 有些微球团聚在一起, 主要原因可能是微球间的声吸引力或表面黏附力. 玻璃微球的排列间距与理论计算预测一致.

## 4 结 论

本文提出了一种基于二维声子晶体板周期共振局域声场的水中大规模、并行操控微粒技术. 通过透射谱、色散关系和声压场分布发现该二维声子晶体板可以激发 Lamb 波的  $A_0$  模式, 该模式声场具有周期分布且梯度特征. 玻璃微球在该共振声场中受到平行于声子晶体板表面的声停滞力、垂直于声子晶体板表面的声吸引力, 实现二维周期性排列在声子晶体板表面的目的. 展望未来, 可以通过进一步灵活设计声子晶体结构单元, 产生更灵活丰富的声场形态, 为高通量、快速、灵活的微粒和细胞等操控提供物理基础和技术支持.

## 参考文献

- [1] Meng L, Cai F, Li F, Zhou W, Niu L, Zheng H 2019 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **52** 273001
- [2] Olson R J, Shalapyonok A, Kalb D J, Graves S W, Sosik H M 2017 *Limnol. Oceanogr. Methods* **15** 867
- [3] Meng L, Cai F, Jiang P, Deng Z, Li F, Niu L, Chen Y, Wu J, Zheng H 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 073701
- [4] Meng L, Cai F, Chen J, Niu L, Li Y, Wu J, Zheng H 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 173701
- [5] Ding X, Lin S C S, Kiraly B, Yue H, Li S, Chiang I K, Shi J, Benkovic S J, Huang T J 2012 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **109** 11105
- [6] Meng L, Cai F, Zhang Z, Niu L, Jin Q, Yan F, Wu J, Wang Z, Zheng H 2011 *Biomicrofluidics* **5** 044104
- [7] Marzo A, Drinkwater B W 2019 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **116** 84
- [8] Tian Z, Yang S, Huang P H, Wang Z, Zhang P, Gu Y, Bachman H, Chen C, Wu M, Xie Y 2019 *Sci. Adv.* **5** 6062
- [9] Jiang X, Li Y, Liang B, Cheng J C, Zhang L 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 034301
- [10] Xia X, Cai F, Li F, Meng L, Ma T, Zhou H, Ke M, Qiu C, Liu Z, Zheng H 2018 *Adv. Mater.* **4** 1800542
- [11] Li Y, Assouar M B 2015 *Sci. Rep.* **5** 17612
- [12] Li Y, Shen C, Xie Y, Li J, Wang W, Cummer S A, Jing Y 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 035501
- [13] Xia X, Li Y, Cai F, Zhou H, Ma T, Zheng H 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 021904
- [14] Melde K, Mark A G, Qiu T, Fischer P 2016 *Nature* **537** 518
- [15] Huang J, Ren X, Zhou Q, Zhou J, Xu Z 2023 *Ultrasonics* **128** 106865
- [16] Memoli G, Caleap M, Asakawa M, Sahoo D R, Drinkwater B W, Subramanian S 2017 *Nat. Commun.* **8** 14608
- [17] Wang T, Ke M, Xu S, Feng J, Qiu C, Liu Z 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 163504
- [18] Korozlu N, Bicer A, Sayarcan D, Adem Kaya O, Cicek A 2022 *Ultrasonics* **124** 106777
- [19] Wang Y, Luo L, Ke M, Liu Z 2022 *Phys. Rev. Appl.* **17** 014026
- [20] Huang X Y, Cai F Y, Li W C, Zheng H R, He Z J, Deng K, Zhao H P 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 044301 (in Chinese) [黄先玉, 蔡飞燕, 李文成, 郑海荣, 何兆剑, 邓科, 赵鹤平 2017 *物理学报* **66** 044301]
- [21] Qi S F, Cai F Y, Tian Z, Huang X Y, Zhou J, Wang J P, Li W C, Zheng H R, Deng K 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 024301 (in Chinese) [齐绍富, 蔡飞燕, 田振, 黄先玉, 周娟, 王金萍, 李文成, 郑海荣, 邓科 2023 *物理学报* **72** 024301]
- [22] Li F, Cai F, Liu Z, Meng L, Qian M, Wang C, Cheng Q, Qian M, Liu X, Wu J, Li J, Zheng H 2014 *Phys. Rev. Appl.* **1**

051001

- [23] Li F, Cai F, Zhang L, Liu Z, Li F, Meng L, Wu J, Li J, Zhang X, Zheng H 2020 *Phys. Rev. Appl.* **13** 044077  
 [24] Li F, Yan F, Chen Z, Lei J, Yu J, Chen M, Zhou W, Meng L, Niu L, Wu J, Li J, Cai F, Zheng H 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 083701

- [25] Sweden S. <https://cn.comsol.com/> [2023-1-18]  
 [26] He Z, Jia H, Qiu C, Peng S, Mei X, Cai F, Peng P, Ke M, Liu Z 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 074301  
 [27] Sarvazyan A P, Rudenko O V, Nyborg W L 2010 *Ultrasound Med. Biol.* **36** 1379  
 [28] King L V 1934 *Proc. R. Soc. London, Ser. A* **147** 212

## Acoustic manipulation of microparticles using a two-dimensional phononic crystal plate\*

Wang Yan-Ping<sup>1)2)</sup> Cai Fei-Yan<sup>2)†</sup> Li Fei<sup>2)</sup> Zhang Ru-Jun<sup>2)</sup>  
 Li Yong-Chuan<sup>2)</sup> Wang Jin-Ping<sup>2)</sup> Zhang Xin<sup>1)‡</sup> Zheng Hai-Rong<sup>2)</sup>

1) (*Department of Physics and Optoelectric Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China*)

2) (*Paul C. Lauterbur Research Center for Biomedical Imaging, Shenzhen Institutes of*

*Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China*)

( Received 22 January 2023; revised manuscript received 17 April 2023 )

### Abstract

Acoustic waves can manipulate particles without contact or damage, and has received increasing attention due to their potential applications in various fields, such as cell sorting, organoid construction, and material assembly. In general, high-throughput manipulation of microparticles relies on a large number of active transducers and phase-shifting circuits to create standing wave patterns, thus significantly inducing system complexity. Recently, we realized the parallel manipulation of microparticles by using an acoustic field modulated by a one-dimensional phononic crystal plate. The concept is based on the fact that phononic crystal plate can resonantly excite the zero-order asymmetric ( $A_0$ ) Lamb wave, inducing highly localized periodic radiation force on the particles. In this paper, we further show that by using a two-dimensional phononic crystal plate (TDPCP), parallel manipulation of massive particles can be achieved only with a single transducer. The  $A_0$  Lamb wave can be excited by a TDPCP, forming a two-dimensional periodic localized field, and then particles can suffer negative vertical force and stable zero horizontal force, inducing two-dimensional periodic trapping on the surface of the plate. Combining a PZT source with a TDPCP consisting of a brass plate patterned with periodical brass stubs, we observe the capture and arrangement of glass microspheres, achieving two-dimensional arrangement manipulation of particles on the TDPCP. This system represents a significant advancement in developing high-throughput, rapid, and flexible devices for particles and cell manipulation.

**Keywords:** phononic crystal, acoustic radiation force, particle manipulation

**PACS:** 43.25.Qp, 43.20.+g, 43.40.+s

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230099

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12004409, 11974372, 12004408, 12274095) and the Shenzhen Science and Technology Program, China (Grant Nos. RCJC20221008092808013, JCYJ20200109105823170, JCYJ20200109110006136).

† Corresponding author. E-mail: [fy.cai@siat.ac.cn](mailto:fy.cai@siat.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [phxzhang@gdut.edu.cn](mailto:phxzhang@gdut.edu.cn)

## 基于二维声子晶体板共振声场的微粒操控

王燕萍 蔡飞燕 李飞 张汝钧 李永川 王金萍 张欣 郑海荣

## Acoustic manipulation of microparticles using a two-dimensional phononic crystal plate

Wang Yan-Ping Cai Fei-Yan Li Fei Zhang Ru-Jun Li Yong-Chuan Wang Jin-Ping Zhang Xin  
Zheng Hai-Rong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 144207 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230099

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230099>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于相位变换声镊的单个微粒平面移动操控

In-plane manipulation of single particle based on phase-modulating acoustic tweezer

物理学报. 2021, 70(21): 214302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210981>

#### 零阶Bessel驻波场中任意粒子声辐射力和力矩的Born近似

Born approximation of acoustic radiation force and torque for an arbitrary particle in a zero-order standing Bessel beam

物理学报. 2022, 71(10): 104302 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212251>

#### 基于二维声子晶体的大尺寸夹心式换能器的优化设计

Optimal design of large-sized sandwich transducer based on two-dimensional phononic crystal

物理学报. 2019, 68(2): 024303 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181955>

#### 新型二维三组元压电声子晶体板的缺陷态及振动能量回收

Defect states and vibration energy recovery of novel two-dimensional piezoelectric phononic crystal plate

物理学报. 2019, 68(23): 234206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190260>

#### 二维声子晶体中Zak相位诱导的界面态

Zak phase induced interface states in two-dimensional phononic crystals

物理学报. 2022, 71(4): 044301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211642>

#### 新型Helmholtz型声子晶体的低频带隙及隔声特性

Low-frequency bandgaps and sound isolation characteristics of a novel Helmholtz-type phononic crystal

物理学报. 2022, 71(11): 114301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211932>