

# 基于一维声栅共振场的大规模微粒并行排列的实验研究\*

齐绍富<sup>1)3)</sup> 蔡飞燕<sup>3)†</sup> 田振<sup>2)3)</sup> 黄先玉<sup>2)3)5)</sup> 周娟<sup>3)</sup>  
王金萍<sup>3)</sup> 李文成<sup>4)</sup> 郑海荣<sup>3)</sup> 邓科<sup>2)‡</sup>

1) (吉首大学信息科学与工程学院, 吉首 416000)

2) (吉首大学物理与机电工程学院, 吉首 416000)

3) (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)

4) (湖南医药学院医学院, 怀化 418000)

5) (绥宁县第一中学, 邵阳 422699)

(2022 年 9 月 14 日收到; 2022 年 10 月 16 日收到修改稿)

声操控微粒技术可以非接触无损伤地控制声场中的物体运动, 其在精密制造、材料工程、体外诊断等领域具有广阔的应用前景. 传统声操控微粒技术一般采用自由声场, 如利用单个换能器或阵列换能器产生的聚焦声场、行波场或驻波场等. 然而, 一般单个换能器产生的声场仅能操控单个微粒; 而阵列换能器的驱动系统复杂, 导致操控器件成本高昂且难以微型化; 因此, 亟需研究新的声场形态实现多样性微粒操控. 本工作中, 采用单个换能器产生的平面波激发一维声栅的共振声场, 实验实现了大规模泡沫微球的周期排列操控. 其操控机制是由于声栅狭缝中法布里-珀罗谐振声场与声栅表面周期衍射场共振耦合, 在声栅表面形成周期分布的局域梯度声场, 导致微粒在平行于声栅表面受到声捕获力, 在垂直于声栅表面受到指向表面的声吸引力, 实现了微粒周期排列在声栅表面上. 该工作为利用超声在空气中大规模排列微粒提供了理论基础和技术支持.

**关键词:** 声镊, 声辐射力, 声栅, 微粒排列

**PACS:** 43.20.+g, 43.38.-p, 43.25.-x

**DOI:** 10.7498/aps.72.20221793

## 1 引言

声操控微粒是利用声辐射力捕获、操纵和移动微小颗粒的一项技术. 其中声辐射力是由于处于声场中的微粒对声波的散射、吸收等导致声场携带的动量在声场与微粒之间交换产生<sup>[1,2]</sup>. 声操控微粒技术具有非接触、无损伤、可穿透非透明介质等优点, 在精密制造、材料工程、体外诊断等领域具有广阔应用前景<sup>[3–8]</sup>.

传统声操控微粒技术一般是基于单个换能器

或者换能器阵列产生的自由声场进行微粒操控. 其中单个换能器与全反射面形成的驻波可以实现微粒的停驻, 但难以个性化操控微粒; 面阵换能器可以实现微粒的任意运动, 但其驱动电路系统复杂, 导致操控器件成本高昂且难以微型化. 近期, 声人工结构可以构建特定的调制声场实现微粒的个性化操控, 引起了人们的极大兴趣, 如: Li 等<sup>[9,10]</sup>利用声子晶体板的周期结构共振激励板子零阶非对称 Lamb 波模式, 获得周期梯度局域强场, 实现水中大规模微粒的捕获、筛选和移动; Melde 等<sup>[11]</sup>设计全息板结构实现水表面轻软微粒的任意形态

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11974372, 11964011, 12004409) 和深圳基础研究项目 (批准号: JCYJ20200109110006136) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fy.cai@siat.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: dengke@jsu.edu.cn

排列; Memoli 等<sup>[12]</sup>利用超材料阵列调控相位空间分布获得瓶形声场分布并实现空气中微粒的捕获. 由于调制声场可以通过单阵元换能器与人工结构结合产生, 该装置简单易集成, 展现了优越的实用性. 因此, 需要研究更多可用于微粒操控的人工声场, 实现微粒的个性化操控.

在本工作中, 基于前期理论研究微粒在一维声栅表面的受力特征<sup>[13]</sup>, 构建了空气中的一维声栅系统, 并实验观察到泡沫微粒在声栅表面周期排列. 首先探讨了声栅表面的共振声场特征; 接着, 研究了微粒在共振声场中受到的声辐射力特征, 发现微粒在平行于声栅表面受到捕获力, 在垂直于声栅表面受到指向表面的吸引力; 进一步, 制备声栅样品并搭建实验平台, 实现了泡沫微粒在声栅表面的周期排列操控. 该工作为空气中大规模并行操控微粒提供了实验基础.

## 2 理论模拟

### 2.1 声栅共振声场特征分析

我们研究的声栅是由钢板刻蚀周期分布的狭缝构成, 该声栅结构放置在空气中. 为了便于观察, 选取了声栅三个周期结构作为计算单元, 如图 1(a) 所示, 其中钢板的厚度  $t = 6.25$  mm, 狭缝宽度  $c =$

1 mm, 狭缝周期为  $d = 8.34$  mm. 被操控的泡沫球微粒放置在声栅表面, 其半径约为  $r = 0.5$  mm. 材料的声学参数<sup>[14]</sup>如表 1 所列.

采用 COMSOL Multiphysics® 软件<sup>[15]</sup>模拟声栅的声场特征. 计算模型采用压力声学和固体力学模块, 研究类型采用频域模块; 左右边界采用周期性边界条件, 用于模拟模型周期结构; 上下边界采用平面波辐射边界条件, 用于模拟开放空间; 下边界设置为平面波入射声场, 入射方向是从底面向上激发; 泡沫球位于声栅上表面, 其位置坐标如图 1(a) 所示. 图 1(b) 展示了声栅系统的声透射谱, 可以看到在 38—41 kHz 之间, 有一个透射增强峰, 该频率约为 39.6 kHz; 图 1(c) 展示了系统在该共振频率点的声场分布, 为了对比声场特征; 图 1(d) 展示了系统在非共振频率 38 kHz 时的声场分布, 其中红色和蓝色分别代表声压的极大值和极小值, 声场强度用最大值归一化. 对比共振频率和非共振频率的声场特征, 可以看到在共振频率处, 声栅表面声场得到了极大增强; 而且在共振频率处, 声场除了局域在狭缝里, 在栅格表面也存在有梯度分布; 在一个周期栅格表面有两个零值声压<sup>[16]</sup>. 该共振声场是由于声栅表面激发的衍射波与狭缝内部的法布里-珀罗谐振腔共振后两者发生耦合产生<sup>[13,17]</sup>.

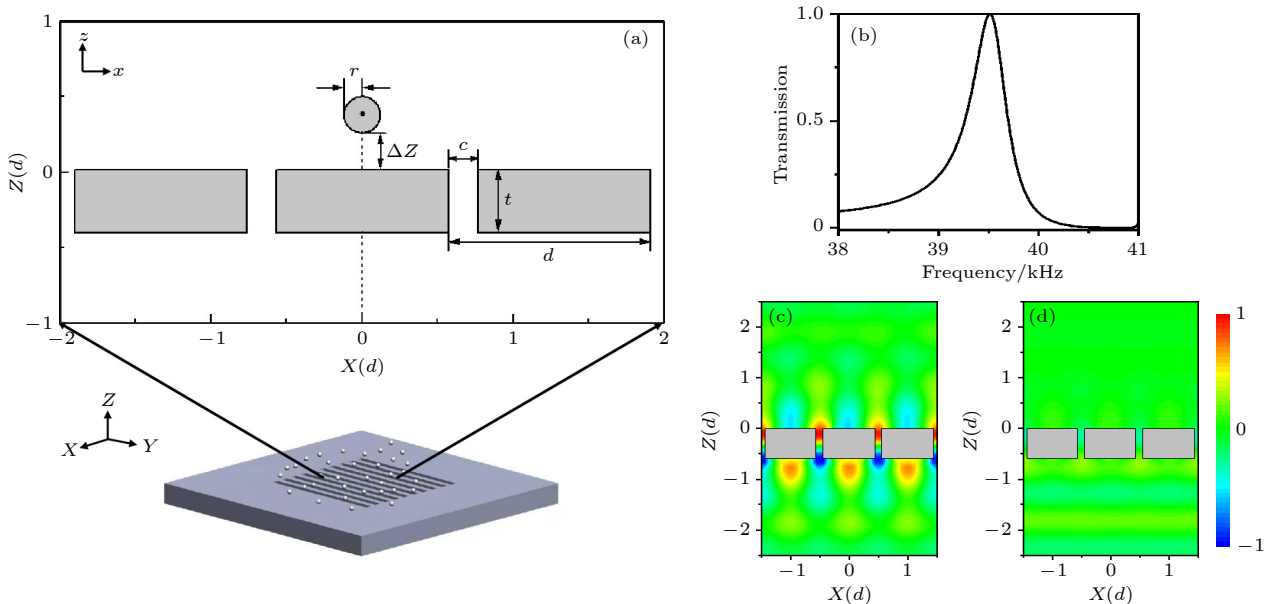


图 1 声栅样品示意图与归一化透射谱, 以及一维声栅归一化声压分布图 (a) 声栅样品示意图; (b) 平面波透过声栅样品的透射谱; (c) 共振频率为 39.6 kHz 时声场分布图; (d) 非共振频率为 38 kHz 时声场分布图

Fig. 1. Schematic diagram of the grating sample with normalized transmission spectrum, and normalized sound pressure distribution of the 1D grating: (a) Schematic diagram of the grating sample; (b) transmission spectrum of the plane wave through the grating sample; (c) the pressure field at resonant frequency of 39.6 kHz; (d) the pressure field at off resonant frequency of 38 kHz.

表 1 材料声学参数

Table 1. Material acoustic parameters.

|     | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 纵波波速/(m·s <sup>-1</sup> ) | 横波波速/(m·s <sup>-1</sup> ) |
|-----|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 空气  | 1.29                     | 340                       | —                         |
| 泡沫球 | 100                      | 820                       | 550                       |
| 钢   | 7760                     | 6010                      | 3320                      |

## 2.2 微球在声栅表面所受声辐射力特征分析

声栅结构的共振耦合导致其表面产生了周期分布局域声场, 该局域声场可以用于操控微粒的运动. 在本实验中, 拟操控泡沫微球半径约  $r = 0.5 \text{ mm}$ , 工作频率位于约  $39.6 \text{ kHz}$ , 可以计算得出  $kr \approx 0.37$ . 虽然  $kr \approx 0.37$  接近引起 Mie 散射的频率范围, 但由于微球的声阻抗远大于空气的声阻抗, 在该频率处没有引起微球共振导致的反常声辐射力产生. 因此, 可以用 Gor'kov 理论近似模拟颗粒在声场中受到的声辐射力 [18,19]. 该声辐射力的表达式如下:

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

其中  $U$  为空间声场能量势, 可以表示为

$$U = \frac{4\pi r^3}{3} \left\{ f_1 \frac{1}{2\rho_0 c_0^2} \langle p_{\text{in}}^2 \rangle - f_2 \frac{3\rho_0}{4} \langle v_{\text{in}}^2 \rangle \right\},$$

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

其中  $\langle p_{\text{in}}^2 \rangle$  和  $\langle v_{\text{in}}^2 \rangle$  表示微粒位置处的入射声场的平均势能和动能;  $r$  表示被操控微粒半径;  $f_1$  和  $f_2$  为常数代表微球在流体中的单极子和偶极子振动模式;  $\rho_0$ ,  $c_0$ ,  $\rho_p$  和  $c_p$  分别代表流体的密度和声速以及微粒的密度和声速.

为了进一步了解泡沫球在共振频率下声栅表面所受的声辐射力特征, 展示了计算获得的声栅表面泡沫球在共振频率  $39.6 \text{ kHz}$  时所受归一化声辐射力空间分布, 如图 2 所示; 其中图 2(a) 颜色表示声辐射力大小, 箭头表示声辐射力方向; 图 2(b) 是泡沫球离声栅  $Z$  方向  $0.24d$  处,  $X$  方向和  $Z$  方向的声辐射力  $F_x$ ,  $F_z$  与  $\Delta X$  的关系, 其中  $\Delta X$  的变化范围是  $-0.5d$  到  $0.5d$ . 从图 2(a) 可以看出, 泡沫球在声栅表面受到的声辐射力呈周期变化, 当泡沫球逐渐靠近声栅表面, 所受声辐射力逐渐增大. 从图 2(b) 可以看出, 在声栅表面处, 微粒在水平  $X$  方向一个周期内有三个零值点, 坐标分别为  $-0.25d$ ,  $0$ ,  $0.25d$ , 在三个零值点中,  $-0.25d$  和  $0.25d$  两点微

粒受到的是捕获力, 微粒可以稳定停驻,  $0$  点是非稳态停驻点 [20]. 从图 2 可以进一步得出, 在  $-0.25d$  和  $0.25d$  两点处, 微粒受到垂直  $Z$  方向的力是负的 [13,21]; 即与波传播方向相反, 指向板面方向. 因此, 从理论分析结果可以看出, 微粒能够在一个栅格周期内稳定吸附在  $-0.25d$  和  $0.25d$  两个位置处.

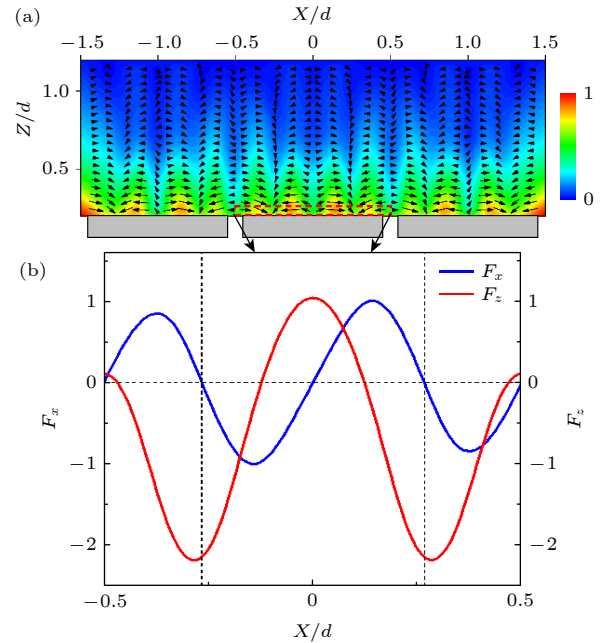


图 2 泡沫球位置变化在  $X$  方向上从  $-1.5d$  到  $1.5d$ , 在  $Z$  方向上从  $0.24d$  到  $1.2d$ , 半径约为  $r = 0.5 \text{ mm}$  的泡沫球在一维声栅上所受的归一化声辐射力空间分布图 (a) 黑色三角形箭头表示声辐射力所指方向, 颜色深浅表示声辐射力的大小, 灰色矩形表示一维声栅; (b)  $X$  方向上泡沫球位置变化从  $-0.5d$  到  $0.5d$  的归一化声辐射力  $F_x$  (蓝色实线) 与  $F_z$  (红色实线) 曲线图

Fig. 2. Spatial distribution of the normalized acoustic radiation force on a one-dimensional sound grid for a foam sphere with a radius of about  $r = 0.5 \text{ mm}$  varying from  $-1.5d$  to  $1.5d$  in the  $X$ -direction and from  $0.24d$  to  $1.2d$  in the  $Z$ -direction: (a) The black triangle arrow indicates the direction of the acoustic radiation force, the color shade indicates the size of the acoustic radiation force, and the gray rectangle indicates the one-dimensional acoustic grid; (b) plot of normalized acoustic radiation force  $F_x$  (blue solid line) versus  $F_z$  (red solid line) for the change in position of the foam sphere from  $-0.5d$  to  $0.5d$  in the  $X$ -direction.

## 3 实验观察

我们搭建的声操控微粒实验平台如图 3 所示. 中心频率为  $40 \text{ kHz}$  的空气声换能器连接功率放大器和信号发生器; 不锈钢声栅结构通过模具加工制备, 放置在换能器上方; 泡沫微球任意排布在声栅表面; 摄像机放置在声栅顶面用于观察实验现象.

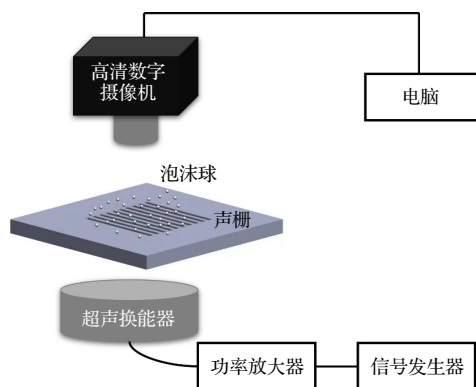


图3 声辐射力操控实验平台示意图

Fig. 3. Schematic diagram of acoustic radiation force manipulation experimental platform.

图4展示了超声换能器关闭和开启时的排列实验效果图. 实验录制的视频在附件中, 其中截图的瞬时图片如图4所示. 从图4(a)可以看到, 未开启超声时, 声栅结构表面泡沫球微粒都是随机放置; 图4(b)可以看到开启超声后, 且声场频率为39.6 kHz时, 泡沫球在每个声栅表面整齐地排成两列, 其排列的位置是位于离狭缝 $-0.25d$ 和 $0.25d$ 处, 获得了与理论分析一致的结果.

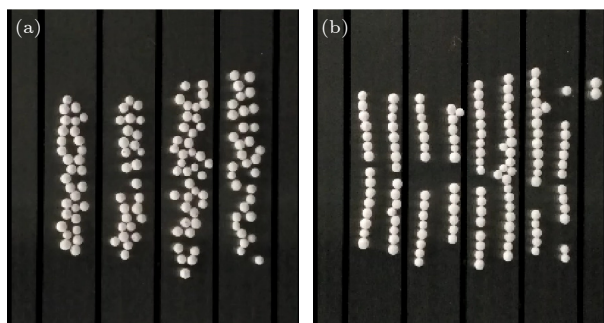


图4 泡沫球操控实验效果图 (a) 超声开启前泡沫球分布图; (b) 超声开启后泡沫球排列图

Fig. 4. Experimental effect of foam ball manipulation: (a) Distribution of foam balls before ultrasonic opening; (b) arrangement of foam balls after ultrasonic opening.

## 4 结 论

本文在实验上实现了基于一维声栅共振场的大规模微粒周期排列操控. 其主要的物理机制是由于平面声场激励声栅产生共振, 导致声栅狭缝内部

的法布里-珀罗谐振声场与表面的衍射声场共振耦合, 在声栅表面产生周期分布的局域梯度声场, 使得声栅表面微粒受到平行于声栅表面的捕获力和垂直于声栅表面的吸引力, 从而获得周期排列操控. 我们的实验结果与有限元理论模拟结果一致. 由于声栅结构简单易加工, 无需复杂大规模电路装置就可以实现周期分布的局域梯度声场, 该工作为大规模操控微粒提供了一种简单易行的方法.

## 参考文献

- [1] Borgnis F E 1953 *Rev. Mod. Phys.* **25** 653
- [2] Takahi H, Yasutaka H, Akio A, Hideki N, Masahiko K, Naoki I 1993 *J. Acoust. Soc. Am.* **93** 154
- [3] Tatsuki F, Asier M, Bruce W, Thomas L H 2019 *Appl. Phys. Lett.* **115** 064101
- [4] Hirayama R, Martinez P D, Masuda N, Subramanian S 2019 *Nature* **575** 320
- [5] Smalley D E, Nygaard E, Squire K, Van W J, Rasmussen J, Gneiting S, Qaderi K, Goodsell J, Roger W, Lindsey M 2018 *Nature* **553** 486
- [6] Wiklund M, Radel S, Hawkes J J 2013 *Lab Chip* **13** 25
- [7] Gao Y, Harder R, Southworth S H, Guest J R, Huang X J, Yan Z J, Ocola L E, Yifat Y, Sule N, Ho P J 2019 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **116** 4018
- [8] Ozcelik A, Rufo J, Guo F, Gu Y Y, Li P, Lata J, Huang T J 2018 *Nat. Methods* **15** 1021
- [9] Li F, Cai F Y, Zhang L K, Liu Z Y, Li F, Meng L, Wu J R, Li J Y, Zhang X F, Zheng H R 2020 *Phys. Rev. A* **13** 044077
- [10] Li F, Cai F Y, Liu Z Y, Meng L, Qian M, Wang C, Cheng Q, Qian M L, Liu X, Wu J R, Li J Y, Zheng H R 2014 *Phys. Rev. A* **1** 051001
- [11] Melde K, Mark A G, Qiu T, Fischer P 2016 *Nature* **537** 518
- [12] Memoli G, Caleap M, Asakawa M, Sahoo D R, Drinkwater B W, Subramanian S 2017 *Nat. Commun.* **8** 14608
- [13] 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]
- [14] Feng R, Yao J Z, Guan L X 1999 *Ultrasonics Handbook* (Nanjing: Nanjin University Press) 128 (in Chinese) [冯若, 姚锦钟, 关立勋 1999 *超声手册* (南京: 南京大学出版社) 128]
- [15] Sweden S <https://cn.comsol.com/> [2022-9-1]
- [16] Lu M H, Liu X K, Feng L, Li J, Huang C P, Chen Y F, Zhu Y Y, Zhu S, Ming N 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 174301
- [17] Zhu X F, Liang B, Kan W W, Peng Y G, Cheng J C 2016 *Phys. Rev. A* **5** 054015
- [18] Gor'kov L P 1962 *Sov. Phys. Dokl.* **6** 773
- [19] Bruus H 2012 *Lab Chip* **12** 1014
- [20] Xu D, Cai F Y, Chen M, Li F, Wang C, Meng L, Xu D H, Wang W, Wu J R, Zheng H R 2019 *Ultrasonics* **93** 18
- [21] He Z J, Jia H, Qiu C Y, Ye Y T, Hao R, Ke M Z, Liu Z Y 2011 *Phys. Rev. B* **83** 132101



# Experimental investigation of multiple-particle pattern based on one-dimensional grating resonance field<sup>\*</sup>

Qi Shao-Fu<sup>1)3)</sup> Cai Fei-Yan<sup>3)†</sup> Tian Zhen<sup>2)3)</sup> Huang Xian-Yu<sup>2)3)5)</sup>  
 Zhou Juan<sup>3)</sup> Wang Jin-Ping<sup>3)</sup> Li Wen-Cheng<sup>4)</sup>  
 Zheng Hai-Rong<sup>3)</sup> Deng Ke<sup>2)‡</sup>

1) (*College of Information Science and Engineering, Jishou University, Jishou 416000, China*)

2) (*College of Physics and Mechanical and Electrical Engineering, Jishou University, Jishou 416000, China*)

3) (*Paul C. Lauterbur Research Center for Biomedical Imaging, Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China*)

4) (*College of Medical, Hunan University of Medicine, Huaihua 418000, China*)

5) (*Suining County First Middle School, Shaoyang 422699, China*)

( Received 14 September 2022; revised manuscript received 16 October 2022 )

## Abstract

Manipulation of particles by ultrasonic waves is a primary technique in the fields of precision manufacturing, materials engineering, and in vitro diagnosis, since it can control the motion of objects in the sound field in a contactless and noninvasive manner. In general, the free sound field, such as the focused field and the plane wave generated by a single transducer can only manipulate a single particle. While the complex field generated by a transducer array should be actuated by a complex electric control system, which makes the manipulation device expensive and cumbersome. Thus, modulated acoustic field for particle manipulation is still needed. Here, we experimental realize a one-dimensional acoustic grating to tune sound fields for the parallel pattern of multiple particles. The physical mechanism is that due to the resonance coupling between the periodic diffraction wave on the surface of the acoustic grating and the Fabry-Perot resonant sound field in the acoustic grating slit, a periodical gradient sound field on the surface of the acoustic grating is induced. Then, particles in the periodical gradient sound field can be trapped in two stable positions in one period of the grating. These concepts and realizations of particle patterns in the acoustic grating pave the way for implementing the parallel manipulation of particles in acoustic manipulation technologies.

**Keywords:** acoustic tweezers, acoustic radiation force, sound grating, particle pattern

**PACS:** 43.20.+g, 43.38.-p, 43.25.-x

**DOI:** 10.7498/aps.72.20221793

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11974372, 11964011, 12004409) and the Shenzhen Basic Research Program, China (Grant No. JCYJ20200109110006136).

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

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [dengke@jsu.edu.cn](mailto:dengke@jsu.edu.cn)

## 基于一维声栅共振场的大规模微粒并行排列 的实验研究

齐绍富 蔡飞燕 田振 黄先玉 周娟 王金萍 李文成 郑海荣 邓科

## Experimental investigation of multiple-particle pattern based on one-dimensional grating resonance field

Qi Shao-Fu Cai Fei-Yan Tian Zhen Huang Xian-Yu Zhou Juan Wang Jin-Ping Li Wen-Cheng  
Zheng Hai-Rong Deng Ke

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 024301 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221793

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221793>

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>

#### Gauss声束对离轴椭圆柱的声辐射力矩

Acoustic radiation torque on an off-axis elliptical cylinder in Gauss beams

物理学报. 2021, 70(8): 084301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201635>

#### 三维浅海下弹性结构声辐射预报的有限元-抛物方程法

Acoustic radiation from a cylinder in shallow water by finite element-parabolic equation method

物理学报. 2019, 68(2): 024301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181452>

#### 基于联合波叠加法的浅海信道下圆柱壳声辐射研究

Sound radiation of cylinder in shallow water investigated by combined wave superposition method

物理学报. 2018, 67(8): 084301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171963>

#### 手性声子晶体中拓扑声传输

Topological acoustic transports in chiral sonic crystals

物理学报. 2019, 68(22): 227802 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191007>