

An Introduction to Acoustic Micro/Nano Manipulations

Junhui Hu

State Key Lab of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu
Email: ejhhu@nuaa.edu.cn

Received: May 7th, 2016; accepted: May 22nd, 2016; published: May 30th, 2016

Copyright © 2016 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Acoustic micro/nano manipulation method has been proposed and developed to meet the new requirements for actuation of micro/nanoscale objects. It utilizes the physical effects of sound to handle micro/nanoscale solids, droplets, bubbles, and soft materials in a controlled way. This paper gives its background and status quo, summarizes and comments its major physical principles, demonstrates several examples of its latest progress, and suggests its potential applications and the important challenges which need to be met for the further development of the method.

Keywords

Acoustic, Transducer, Physical Effects, Micro/Nano Manipulation

声学微纳操控方法简介

胡俊辉

南京航空航天大学, 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京
Email: ejhhu@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2016年5月7日; 录用日期: 2016年5月22日; 发布日期: 2016年5月30日

摘要

声学微纳操控是为满足对微纳作动功能的最新需求而出现的一种作动新方法。它利用声波的各种物理效

应对微纳尺度的固体、液滴、气饱与软物质进行受控操纵。本论文在给出声学微纳操控方法的出现背景与研究现状后,对其主要工作原理进行总结与点评,在给出最新研究进展的几个实例后,指出该方法的应用前景及其在发展过程中尚需解决的重要问题。

关键词

声, 换能器, 物理效应, 微纳操控

1. 引言

随着生物医学、微纳米制造、纳米科技、材料工程、新能源和环保等领域的发展,对微纳尺度物体进行操纵的要求越来越多,这些操纵包括捕捉、定向、转移、释放、分类、旋转、清除、聚集与组装等等。这些操纵功能大部分都不能用传统作动技术来实现或高效完成,这是因为传统作动技术在驱动形式与工作原理上的选择性比较小,其器件的结构形式一般是面向宏观物体的作动。

为了实现微纳操控功能,不同领域的研究者提出并研究了各种不同的方法。这些方法依据它们物理原理的不同,可以分为光学、磁、电、机械、原子力显微镜、微流体和声学等方式[1]-[3]。声学微纳操控方法利用声波的物理效应来操纵微纳尺度固体颗粒、液滴、气泡和软物质。它具有对操控样品的材料特性无选择性、几乎没有温升损害(纳米操控中)、操控功能多样、装置结构相对紧凑以及操控基板无需设有微沟道等优点。微纳操控中使用的声波频率可在超声范围(>20 kHz),也可在音频或者次声范围。

在声学微操控方面比较成熟的方法是利用驻波声场对微物体的捕捉,该方法最早出现于上世纪70年代。欧盟的研究团队已将相关器件用于细胞红外光谱分析仪的细胞聚集定位单元、流体中微颗粒的过滤与分离如红细胞分离以及燃煤废气的过滤等方面[4][5]。另一项较为成熟的声学微操控方法是由我国西北工业大学的团队提出的利用聚焦声场对微小物体进行悬浮与捕捉的方法[6],该方法已成功应用于材料的非接触式加工中。传统的声学微操控方法利用声辐射力对微物体进行作动。但近几年国内外的研究工作表明:除了声辐射力以外,其它的超声物理效应如固体振动板节点周围的局部行波、Chladni效应以及声致液体分子间平均引力的减少等也可以用于微物体的操控[2]。

声学纳操控是在最近几年才出现的一种新的微纳操控方法,目前它主要利用声学微涡流获得操控力[2]。本文作者的研究团队在2012年提出了利用声学微涡流对溶液中的纳米线进行受控捕捉、定位、定向与移动的方法[7],并在随后的几年中利用声学微涡流,实现了纳米线的受控旋转驱动、各种纳米物体的受控聚集等纳操控功能[8]-[11]。在受控声学纳操控方面,美国同行曾在2014年提出利用声学涡流对液体中纳米线进行高速驱动的方法[12]。

2. 工作原理及点评

声学微纳操控方法所利用的声波物理效应包括声辐射力、声学流、基于行波振动的摩擦驱动、Chladni效应、声空化、Bjerknes力以及声致分子间引力减弱等[2]。目前,声辐射力和声学流是声学微纳操控中使用最广泛的两种物理效应。

声辐射力主要用来操控微尺度物体,可由驻波[13],聚焦声束[6]和近场行波[2]产生。驻波可由辐射面-反射结构或者SAW(声表面波)装置产生。由驻波产生的声辐射力可以将声场中的微米物体推至声压节点(或反节点)处并使其聚集。利用驻波聚集多个微米物体的方法效果显著,然而驻波方法不适合于操控单个微小物体,也不适于实现相对复杂的操控功能比如微小部件组装。聚焦声束方法利用聚焦超声波的焦点来捕捉单个或多个微米物体。可通过移动发出超声波的换能器,实现被捕捉微米物体的位置转移。

然而由于非接触式工作原理，被捕捉微物体的稳定性低，且在焦点处的强超声波会导致温度升高并损害生物样本或其他温度敏感试样。近场行波方法利用面内振动辐射面附近的声场空间梯度，产生声辐射力以吸引微物体到辐射面处。这种方法能捕捉单个或多个微米物体，并且被捕捉试样的稳定性也更高。但用这种方法捕捉的湿软试样可能会粘在微操控探针上，而从探针上受控释放这些试样仍然是个难题。近场行波方法中的另一项挑战是如何降低操控部的升温。

声学纳操控所需的操控力由声学流产生，现阶段几乎所有声学纳操控都依赖声学流[2] [14] [15]。声学流可以由声场中雷诺应力的空间梯度、声场的二阶声压、声学气泡的坍塌或者微操纵探针的椭圆运动所产生。已实现的声学纳操纵功能包括对去离子水中单根纳米线的捕捉、定向、定位、转移和旋转，以及去离子水中纳米线与纳米颗粒的聚集。在声学纳操控中，操控区的温度升高通常很低，可以低于 0.1°C 。这个特性使得声学纳操控技术在处理生物样品以及温度敏感样品时具有竞争力。在声学纳捕捉中，被捕捉的纳尺度物体与微操纵探针可以是接触式或非接触式。声学纳聚集可以在超声振动台上的水滴中实现，或者由悬于静止基板上方声学针所激振的水膜中实现。为了提高装置的操控性能，需要对装置中的声学流场分布进行定量分析并把握其变化规律，探索微操控探针和基板的振动控制方法。

在基于行波振动的摩擦驱动方法中，利用固体表面质点椭圆运动来驱动基板表面上的微物体。该方法可应用在微颗粒的输送与分离以及微小机械部件的旋转驱动中[2]。在 Chladni 效应下，振动弹性体表面与颗粒之间的撞击被用来驱动颗粒运动到振动表面上的振动节点处。Chladni 效应在基于围绕振动节点的周向行波的旋转驱动中，能提供定位力。声空化是超声波的一种广为人知的物理效应，可以在液体声场中产生微小气泡。它在微纳操控方面已有的应用包括增大细胞孔隙和在溶液中分散微纳米颗粒等。Bjerknes 力是一种作用在振动气泡上的特殊的声辐射力，这种力可以应用在聚集液体中的微米颗粒。无论是否有声空化发生，液体中的声学振动可以导致分子间引力(例如液体分子间 Van der Waals 力)的减弱。这个效应已经应用在驱动微流体和微液滴融合等方面[2]。相对于声辐射力与声学流，这些物理效应仍然没有被深入与全面地探究，但它们在微纳操控中确有着巨大的潜力。

3. 声学微纳操控方面最新研究工作的实例

长期以来，稳定捕捉空气中高密度微尺度物体是声学操控中的一个难题，主要原因是无法解决如何在微尺度物体上产生足够大的声辐射力这一问题。作者的研究团队最近提出了一种可以稳定捕捉空气中微米金属线的声学钳，并利用该声学钳稳定地捕捉了空气中直径 $40\ \mu\text{m}$ 、长 $1\sim 14\ \text{mm}$ 的单根微米铜线。该声学钳由一根端部扁平而且弯曲的超声针和一个励振用夹心式换能器构成(如图 1(a)所示)，工作在 $45.8\ \text{kHz}$ ，利用超声针端部扭弯振动产生的行波近场，捕捉端部附近的微米铜线(如图 1(b)所示)。该声学钳目前存在着捕捉部的温升较高以及励振换能器体积较大等问题，需进一步研究解决。

纳尺度物体的聚集在纳米材料自组装和高感度传感等方面有着巨大的应用前景。作者的研究团队最近提出了一种利用超声台聚集水溶液中纳尺度物质的方法，该方法通过控制超声台的振型并利用超声台上液滴中的声学微涡流，把纳米线或纳米颗粒聚集到超声台的中央并形成圆形的聚集斑点(图 2)。图 2 的实验中，超声台由铜基板和粘结于基板背面的压电圆环构成，工作频率为 $31\ \text{kHz}$ ，做中心对称的弯曲振动，液滴由直径 $400\ \text{nm}$ 的 SiC 纳米颗粒和去离子水构成，聚集斑点的直径可通过改变溶液浓度和声处理时间进行控制，目前可达数毫米。需要使用振动基板限制了该方法的实际应用范围，因此目前正在研究基于非振动基板与声学针组合的纳米聚集方法。

4. 应用前景与未来的研究

声学微纳操控是超声学的一个新兴领域，它为微纳尺度物体的作动提供了一个新方法。虽然该方法

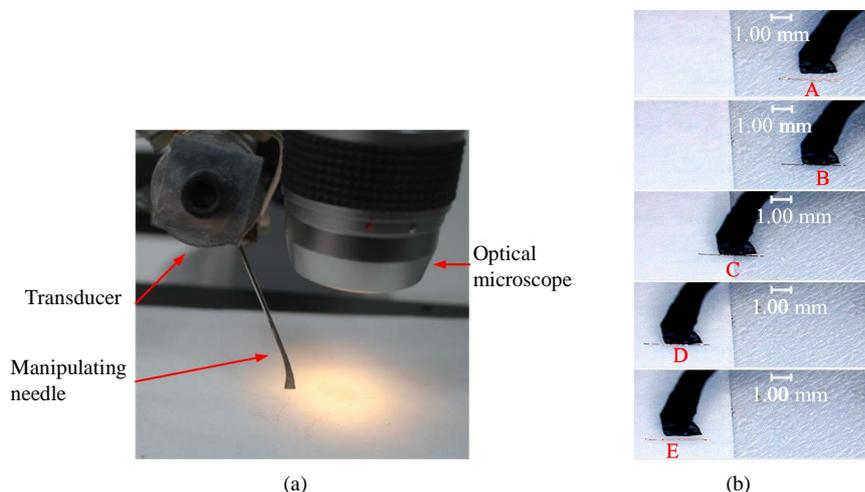


Figure 1. Ultrasonic trapping of a single micro copper wire in air. (a) Experimental setup; (b) Trapping, transfer and releasing process
图 1. 空气中单根微米铜线的超声捕捉。(a) 实验装置；(b) 捕捉、移动与释放过程

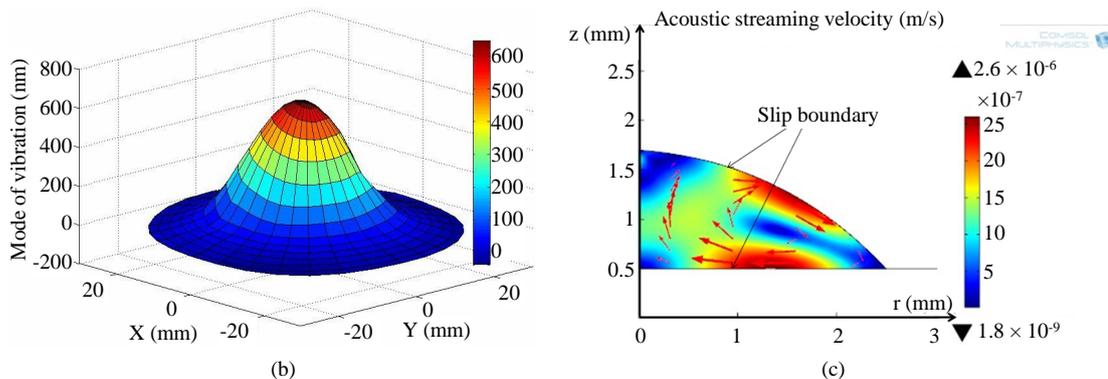
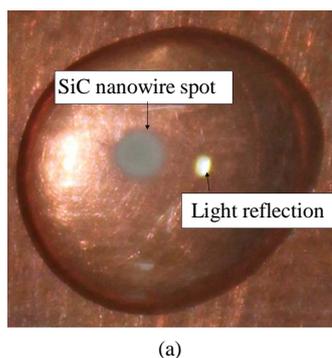


Figure 2. Controlled nano concentration based on an ultrasonic stage. (a) A concentration spot at the center of the stage; (b) Vibration distribution of the stage; (c) Acoustic streaming eddies in the droplet
图 2. 基于超声台的受控纳米聚集。(a) 超声台上的聚集斑点；(b) 超声台的振动分布；(c) 超声台上液滴中的声学涡流

在生物医药、微纳制造、纳米科技、材料工程、新能源和环保等领域中有着非常巨大的潜在应用，但目前在工作新原理、操控功能多样化以及相关换能器高性能化等方面，仍有大量的科学与技术问题需解决。这些问题的解决主要涉及到下列几方面：声场及其声学非线性效应的控制；超声换能器的振动控制；新的超声物理效应的探索。

5. 结束语

人类在宏观物体的作动方面(如各类电磁马达、气动装置和液压驱动装置等),已有 100 多年的研究与开发历史,相关的理论与方法相对成熟。但在微观物体的作动(如微纳尺度物体操控)方面,研究历史相对来说还很短,还有大量的科学与技术问题需要探索 and 解决。超声微纳操控提供了一种利用声波(机械波)的物理效应对微纳尺度物体进行操纵的新方法,对它的深入研究必将强化人类对微观世界的研究能力与利用能力,并有力推动物理声学的发展。

参考文献 (References)

- [1] Ashkin, A. (2006) *Optical Trapping & Manipulation of Neutral Particles Using Lasers*. World Scientific Publishing, Singapore. <http://dx.doi.org/10.1142/4208>
- [2] Hu, J. (2014) *Ultrasonic Micro/Nano Manipulations*. World Scientific Publishing, Singapore. <http://dx.doi.org/10.1142/8909>
- [3] Castillo, J., Dimaki, M. and Svendsen, W.E. (2009) Manipulation of Biological Samples Using Micro and Nano Techniques. *Integrative Biology*, **1**, 30-42. <http://dx.doi.org/10.1039/B814549K>
- [4] Koch, C., Brandstetter, M., Lendl, B. and Ladel, S. (2013) Ultrasonic Manipulation of Yeast Cells Suspension for Absorption Spectroscopy with an Immersible Mid-Infrared Fiberoptic Probe. *Ultrasound in Medicine and Biology*, **39**, 1094-1101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2013.01.003>
- [5] Riera, E., Cardoni, A., Gallego-Juarez, J.A., Acosta, V.M., Blanco, A., Rodriguez, G., Blasco, M. and Herranz, L.E. (2015) Recent Advances in the Development and Application of Power Plate Transducer in Dense Gas Extraction and Aerosol Agglomeration Processes. *Physics Procedia*, **63**, 67-72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2015.03.011>
- [6] Xie, W.J., Cao, C.D., Lu, Y.J. and Wei, B. (2002) Levitation of Iridium and Liquid Mercury by Ultrasound. *Physical Review Letters*, **89**, Article ID: 104304. <http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.89.104304>
- [7] Li, N., Hu, J., Li, H., Bhuyan, S. and Zhou, Y. (2010) Mobile Acoustic Streaming Based Trapping and 3-Dimensional Transfer of a Single Nanowire. *Applied Physics Letters*, **101**, Article ID: 093113.
- [8] Li, H. and Hu, J. (2014) Noncontact Manipulations of a Single Nanowire Using an Ultrasonic Micro-Beak. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, **13**, 469-474. <http://dx.doi.org/10.1109/TNANO.2013.2278703>
- [9] Li, H. and Hu, J. (2014) Sound Controlled Rotary Driving of a Single Nanowire. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, **13**, 437-441. <http://dx.doi.org/10.1109/TNANO.2013.2277731>
- [10] Zhou, Y., Hu, J. and Bhuyan, S. (2013) Manipulations of Silver Nanowires in a Droplet on Low-Frequency Ultrasonic Stage. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, **60**, 622-629. <http://dx.doi.org/10.1109/TUFFC.2013.2604>
- [11] Yang, B. and Hu, J. (2014) Linear Concentration of Microscale Samples under an Ultrasonically Vibrating Needle in Water on a Substrate Surface. *Sensors & Actuators, B*, **193**, 472-477. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2013.11.122>
- [12] Balk, A.L., Mair, L.O., Mathai, P.P., Patrone, P.N., Wang, W., Ahmed, S., Mallouk, T.E., Liddle, J.A. and Stavis, S.M. (2014) KiloHertz Rotation of Nanorods Propelled by Ultrasound, Traced by Microvortex Advection of Nanoparticles. *ACS Nano*, **8**, 8300-8309. <http://dx.doi.org/10.1021/nn502753x>
- [13] Cai, F., He, Z. Liu, Z., Meng, L., Cheng, X. and Zheng, H. (2011) Acoustic Trapping of Particle by a Periodically Structured Stiff Plate. *Applied Physics Letters*, **99**, Article ID: 253505. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3670267>
- [14] Lighthill, J. (1978) Acoustic Streaming. *Journal of Sound and Vibration*, **61**, 391-418. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-460X\(78\)90388-7](http://dx.doi.org/10.1016/0022-460X(78)90388-7)
- [15] Gu, H.H., Zhang, S.Y. and Cheng, L.P. (2009) Study on Non-Contact Linear Motors Driven by Surface Acoustic Waves. *Sensors and Actuators A-Physical*, **155**, 163-167. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2009.08.006>