

微纳人工结构与声超表面器件

陈卓 彭玉桂 祝雪丰[†]

(华中科技大学物理学院 武汉 430074)

2024-05-07 收到

[†] email: xfzhu@hust.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20241202

CSTR: 32040.14.wl20241202

Micro-nanoacoustic artificial structures and acoustic ultrasurface devices

CHEN Zhuo PENG Yu-Gui ZHU Xue-Feng[†]

(School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

摘 要 基于人工结构和超表面实现精准、多维度、反常规的声场调控是目前物理学和材料科学领域的研究热点。与传统天然材料相比，声超材料和超表面具有功能可定制、复杂声场调控、尺寸集成和可兼容其他技术等显著优势。随着三维打印、光刻、激光切割等先进微纳加工技术的不断发展，人们可以精准灵活地控制人工结构单元的形貌尺寸，为实现高精度、功能定制的声场调控提供了更多自由度。文章介绍了几种高通量、亚波长厚度及结构平整的微纳人工结构和功能器件，包括基于微纳栅结构的声镊器件和基于超疏水微纳结构的超轻薄声学功能器件，它们以独特的声波操纵能力，未来有望在超声成像与治疗、微粒操控等领域获得重要的应用。最后讨论并展望了微纳人工结构与声超表面器件的研究趋势和发展前景。

关键词 人工结构，声场调控，声超表面，微纳加工技术，集成化功能器件

Abstract Realizing precise modulation of acoustic fields based on artificial structures and metasurfaces is currently a hot spot in the fields of physics and materials science. Compared to traditional natural materials, artificial structures offer significant advantages, including complex modulation, dimensional flexibility, and compact integration. With the ongoing advances in micro- and nano-fabrication technologies, such as 3-dimension printing, photolithography, laser cutting, and etching, it is now possible to achieve more precise and flexible control over the morphology and geometry of structural unit-cells. This provides many more means to achieve efficient and accurate modulation of acoustic fields. This article introduces several highly efficient, compact micro-nano artificial structures and devices, including the meta-grating-based acoustic tweezers, and super-hydrophobic ultra-thin lightweight acoustic devices. These innovations are anticipated to have diverse applications in the fields of ultrasonic imaging and therapy, as well as particle manipulation, due to their unique acoustic wave manipulation capabilities. Finally, we discuss the future trends and prospects of these structures for metamaterials and metasurface-based acoustic devices.

Keywords artificial structure, acoustic field manipulation, acoustic metasurface, micro- and nano-manufacturing techniques, compact integrated device

1 引言

声学是一门研究声波产生、传播和探测的学科,既关注声波的物理特性,也探究声波在不同介质中的传播规律以及声波与物体的相互作用机制。它不仅与我们的日常生活息息相关,而且在现代工程技术(通信技术,机械工程,航空航天等)、医学领域甚至国防军事等方面也有极为广泛的应用。首先,声学在日常生活中扮演着重要角色,如语音通讯、音乐欣赏、环境声调节等。人们通过声音进行沟通交流,感知周围环境变化,享受生活中声音带来的乐趣。另外,声学在工程领域也有着广泛的应用,如声材料可用于噪声控制、声波隔离、吸声等方面,以改善工程环境的舒适性和安全性。声学技术也被广泛应用于工程结构的监测和评估,如声探伤技术、声成像技术等。

实现多功能、精准、高通量的声场调控是声学应用领域的一个关键问题。传统天然材料由于其自身属性的限制,通常需要声结构或器件的尺寸与声波波长相当来调控声场,因此不利于声学器件的微型化、轻型化和集成化。低频声波的波长较长,功能分辨率较低且往往需要较大的结构尺寸才能实现有效声场调控。高频超声则依靠其

非侵入、高分辨率、无有害辐射等优势,在生物医学工程、工业无损检测、海洋科学和环境监测等方面获得了广泛应用(图1)。

2 人工结构和声超表面器件

在过去的二十多年中,基于声超材料和超表面实现复杂、精准、多功能的声波操纵已成为物理学和材料学一个活跃的研究领域。声超材料可以在亚波长尺度内通过人为设计的周期/非周期排列的声学结构单元来调控特定频率范围内的声波传播行为,从而实现对声波的精准控制^[1-3]。声超表面是一种“二维”声学人工结构,具有尺寸轻薄、结构紧凑等特点^[4, 5]。相比于传统的天然材料,声超材料和超表面具有以下几个显著的优点。(1)宽频性:声超材料和超表面可在较宽的频率范围内实现对声场的精确控制,传统的天然材料受到材料固有属性的影响,只能在特定频率范围内表现出声场调控功能;(2)复杂调控:基于人工结构的声学功能器件可产生各种重要的功能声场,比如聚焦声、涡旋声、弯曲声和全息声等;(3)结构灵活:声学超构材料和超表面通常可实现从微米尺度到宏观尺度的声场调控,具有更大的灵活性和适用性,有助于声学结构功能器件的小型化和集成化。

人工结构和声超表面近些年来发展迅猛,轻薄结构加上巧妙设计,使得各种奇特的声波操控成为可能。通过精心设计空间蜷曲结构或耦合谐振腔,可产生各种类型的结构声场,例如衍射抑制的自弯曲加速声束^[6]、无旁瓣或亚波长尺度的聚焦声束等^[7, 8]。此外,薄膜声学人工结构可用于完美吸声、超振荡声聚焦以及高效非互易声模态转换等^[9-11]。人工结构和声超表面的物理机制在于通过调控局域共振或声学阻抗失配来有效改变边界条件,声波与人工结构的强相互作用导致亚波长尺度内声波的相位和振幅可被强烈调制,从而生成所需的声场分布。另外,构建高频声场调控的微纳人工结构和超表面需要复杂精准的制造技术,随着三维(3D)打印、光刻、激光切割和刻蚀等微纳加工技术的不断发展,人们可

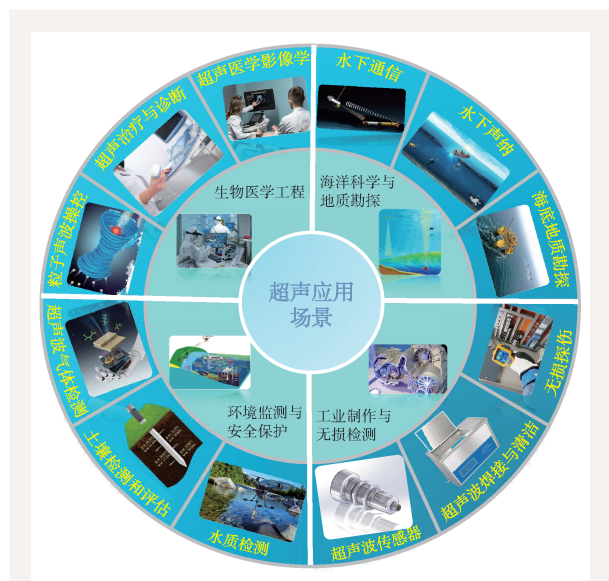


图1 超声的一些应用场景

以更精确地控制人工结构的形貌和尺寸,为构建具有优异声学性能的人工结构和器件提供了新的机遇。本文将介绍几种具有高通量、轻薄且平整(紧凑)的声学人工结构和功能器件。它们以独特、高效的声波操纵能力在声学辐射力粒子操控、超声成像与治疗诊断以及声学通信领域具有广泛的应用前景。

3 基于栅结构的声镊

基于声镊的非接触式操纵可以实现对微小物体的精准操纵和控制,因此在生物医学工程中具有重要的意义。由于声波是一种带动量的机械波,当入射声波作用于微粒(散射体)时,微粒和声波会发生能量和动量的交换,从而产生声学辐射力效应。辐射力是入射波和散射波共同作用的结果^[12]。基于声学辐射力效应,可进一步产生各种类型的声镊。

3.1 基于回波反射栅的声镊

根据 Gor'kov 理论,声学辐射力大小和声压梯度及速度梯度成正比关系。因此,声驻波场可提供稳定、强大的声辐射力。通常情况下,在利用声学驻波悬浮粒子相关研究中,声波垂直入射到声学反射面上,并利用声学反射和入射声波的干涉产生驻波。这种情况下,换能器会严重遮挡观察视野,不便以俯视角度观察颗粒横向移动情况,于是我们提出了倾斜式回波反射声镊^[13]。声波以一个倾斜角度入射到人工结构声栅上,声栅抑制非所需阶数的衍射波,再以同样角度沿着倾斜路径反射声波。基于倾斜回波反射栅的声镊效应如图 2(a)所示,其关键在于利用设计的人工结构来抑制超声波在不同角度上的散射,仅保留反向路径回波反射。在倾斜入射和反向反射的超声波之间发生干涉从而形成倾斜驻波,在倾斜方

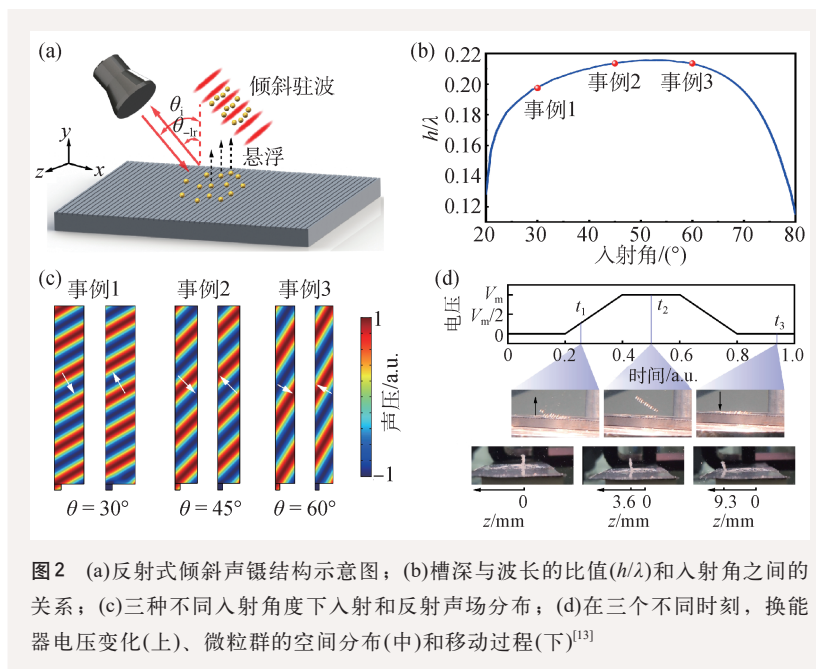


图2 (a)反射式倾斜声镊结构示意图;(b)槽深与波长的比值(h/λ)和入射角之间的关系;(c)三种不同入射角度下入射和反射声场分布;(d)在三个不同时刻,换能器电压变化(上)、微粒群的空间分布(中)和移动过程(下)^[13]

向上产生强声辐射力,在辐射力的夹持作用下微粒得以悬浮。

倾斜回波反射声栅是一种周期性人工结构,每个周期内包含一个或多个不同尺寸的凹槽。对于单角度回波反射声栅,每个周期内只包含一个凹槽。根据声栅衍射方程,若要实现声波逆反射,声栅的周期和入射角要满足 $a = \lambda/2 \sin \theta_i$, 其中 λ 为入射波波长。在该条件下,除了逆反射波,仍存在其他阶数的衍射波。理论研究表明,为了抑制除负一阶衍射波外其他各阶衍射波,我们可通过调整凹槽的宽度和深度来调节各阶衍射波的分布。

根据边界条件,即在栅结构表面的声压和法向体积速度连续时,结合遗传算法设置目标函数,可以得到在中心频率为 1 MHz、20°—80°入射角度下实现逆反射所需的栅结构参数,如图 2(b)所示。利用有限元软件数值模拟了入射角分别为 30°、45°和 60°的情况,栅结构上方的声压分布如图 2(c)所示。通过观察声场的分布可以发现,入射声波和反射声波的传播方向相反且平行,证实了所设计的栅结构可以实现声波逆反射且抑制其余各阶衍射波分量。

声场中微粒和声波会发生能量和动量的交换,从而产生声辐射力。在声辐射力作用下,随机散落在声栅表面的微粒将会被举起,如图 2(d)所示。

逐渐增加换能器工作电压,随机散落的微粒会排列成多条平行直链,完美凸现出驻波场分布。被夹紧的悬浮微粒群阵列会随着换能器的移动而移动。在粒子操控实验中,换能器沿 z 方向移动了一定距离,微粒群也随之移动相同的位移。无接触操控在细胞转运、药物输送等方面具有重要应用。在粒子操控实验中,可清晰地观察到悬浮微粒群与垂直方向有一个明显的倾角。与以往垂直式驻波声镊相比,该方案更加灵活,在声镊效应上提供了更多自由度。倾斜声镊有利于监测式精准物体操纵,在无接触移动生物体或药物颗粒输运等方面具有重要应用。

3.2 基于超振荡平面透镜的声镊

突破衍射极限一直是光学、声学等领域长期追求的热点方向。在声学材料中,介质损耗导致物体携带超分辨率信息的倏逝波无法传播到远场,为此提出利用超振荡聚焦来打破远场超声波的衍射极限^[10]。通过优化设计多个环形缝来调控不同空间频率衍射波分量的配比,从而可以在远场形

成打破衍射极限的超振荡聚焦,如图3(a)所示。

对于单带菲涅耳型声人工透镜,聚焦平面上声场强度分布为 $I_n = C_n |J_0(kr \sin \alpha_n)|^2$,其中第一级小值点位于 $r = 0.38\lambda / \sin \alpha_n$ 。由于 $\sin \alpha_n \leq 1$,我们可认为 0.38λ 为焦斑衍射极限。利用多带菲涅耳型声人工透镜,目标平面上超振荡声压力场可表示为 $p(r) = \sum_{n=1}^N C_n A_n(r)$,其中 $A_n(r) = p_n(r)/C_n$ 为归一化压力振幅且 $C_n = p_n(0)$,空间频率为 $\eta_n = \sin \alpha_n / \lambda$ 。如图3(b)所示,彩色曲线代表不同的空间频率分量,黑色曲线为不同空间频率叠加生成的超振荡波包。通过模拟和实验证明,产生的超振荡焦斑半径可达到 0.3λ ,低于超振荡阈值,从而在远场目标区域内产生了超振荡聚焦声场。

如图3(c)所示,超振荡声聚焦波包具有相对较弱的幅度。然而,其快速变化的声压力场将产生明显的压力梯度,从而生成较大的声辐射力。在图3(c)中,红色箭头表示计算的辐射力场,箭头方向和长度分别对应辐射力方向和大小。图3(d)展示了位于远场 $z = 5.2\lambda$ 处,模拟和实测的声辐射力分布,可以发现在 $x \geq 0$ 的区域存在三个辐射力为

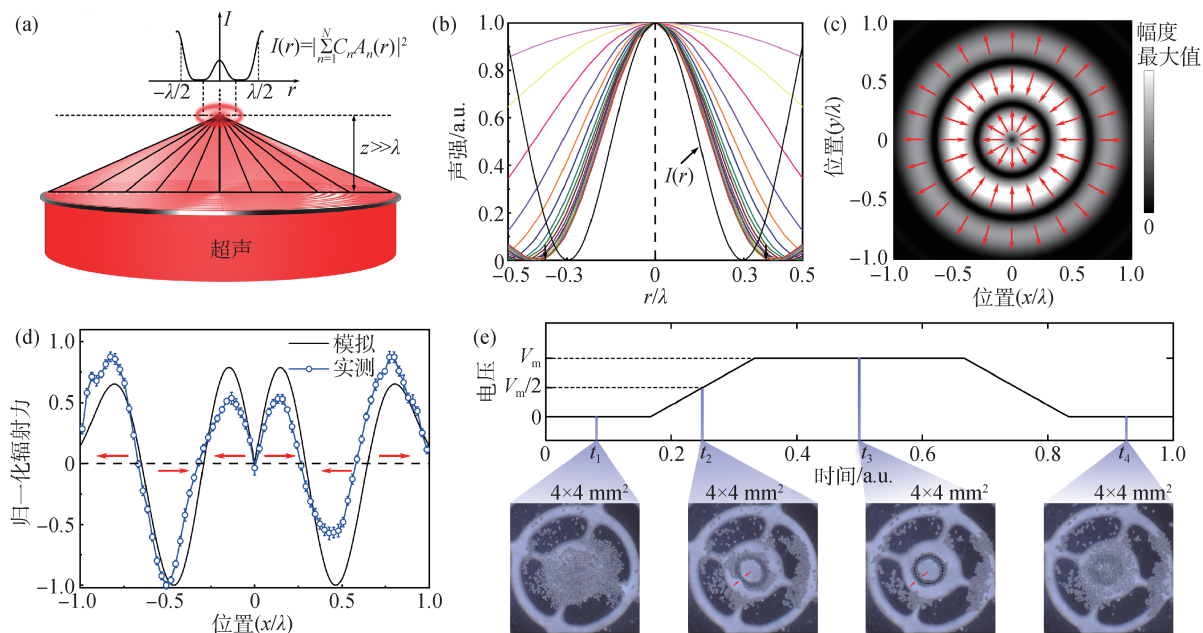


图3 基于超振荡平面透镜的声镊 (a)超振荡平面透镜的远场超分辨率聚焦效果;(b)聚焦平面上归一化声场强度分布;(c)超振荡聚焦声辐射力分布;(d)位于远场 $z = 5.2\lambda$ 处,模拟和实测的声辐射力分布;(e)不同时刻换能器上施加的电压变化及微粒群分布图^[10]

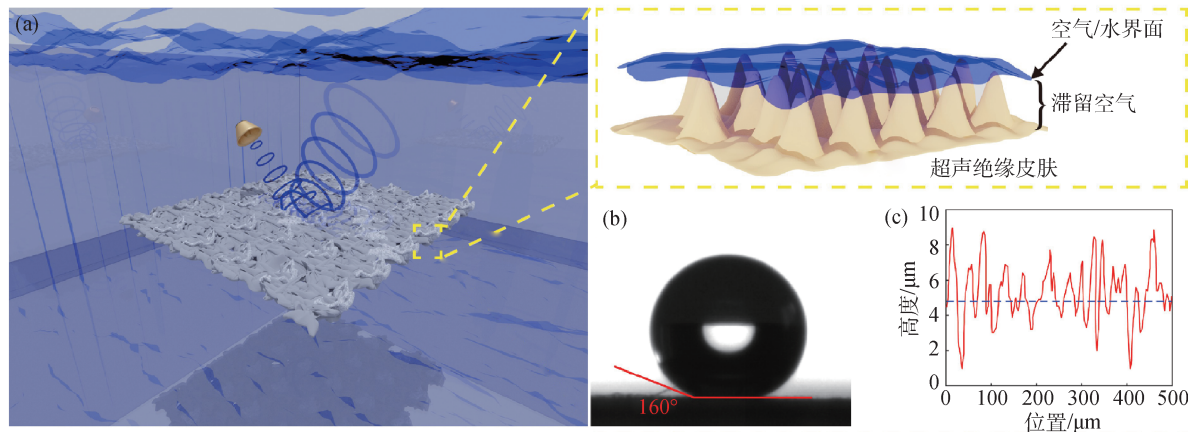


图4 超声绝缘皮肤^[14] (a)超声绝缘皮肤在水下环境功能示意图：超疏水材料表面形貌和下水材料的表面空气层形成机制；(b)超声绝缘皮肤表面疏水角大于160°；(c)超声绝缘皮肤表面形貌表征结果

零的平衡点。其中位于 $x = 0.3\lambda$ 处的第二个零点是通过超振荡产生的稳定平衡点。在超振荡声场中，辐射力的作用类似于声镊，导致微粒群被稳定地困在环形势阱中。位于 $x = 0$ 和 $x = 0.63\lambda$ 处的第一个和第三个平衡点处于非稳定状态，在微扰力作用下微粒会倾向于被稳定地困在第二个或第四个零点。

利用超振荡声镊完成的微粒捕获实验如图3(c)所示。在 t_1 时刻，所有微粒随机分布，不施加辐射力。在 t_2 和 t_3 时刻，换能器施加电压后，声辐射力作用于微粒上，微粒逐渐向位于 $x = 0.3\lambda$ 处的第二个零点移动。从 t_3 时刻的微粒群分布状态可发现，微小颗粒被超振荡声镊挤压成环形，形成半径为 0.3λ 的亚波长尺寸环结构。如果将电压撤去，聚集的颗粒环瞬间散开，颗粒又随机分布在视场中。我们设计的这种基于多带菲涅耳型人工结构透镜既可以在远场产生超振荡聚焦，打破衍射极限，同时还具备较强的声辐射力效应，可在远场亚波长尺度范围内灵活地调控颗粒群分布，有望给超声辅助化学合成、精准超声治疗和超分辨成像领域带来革命性变化。

4 基于超疏水微纳结构的声功能器件

对于固体材料，即便是钢铁，在水下也不具备声学刚性，阻抗对比度数值仅为30左右，因此

传统水下声材料器件在设计时通常需考虑固液耦合效应。薄金属板几乎可认为是声波透明的，即声波可大部分透射过去。该情况对于设计高品质因子(Q)局部共振腔体非常不利，因为金属壁的漏声效应导致无法形成一个完美的声腔。声波在腔中经过多次反射、透射后，能量将几乎全部泄漏出去，导致声波在经过基于亥姆霍兹共鸣器的超材料或超表面传播时，振幅(或相位)很难发生剧烈变化，极大地限制了声学超材料在水下环境中的应用。

为克服传统水下声材料器件存在的这些缺点，我们提出了一种基于超疏水效应的声超材料。超疏水效应在材料表面提供了一种稳定的空气层软边界。由于空气和水之间存在巨大的声阻抗失配(三到四个数量级)，声波在传播到超疏水材料边界处会发生完全声反射。该完全声反射为全角度超宽频率效应，无需考虑固液耦合效应，有潜力成为下一代水下声超材料，增强声学器件对水下声波的调控能力和效率。

4.1 超声绝缘皮肤

我们首先展示一种由多孔聚偏氟乙烯(PVDF)构成的声超表面，即超声绝缘皮肤“meta-skin”，如图4(a)所示。该超表面的厚度仅为100 μm且具有很强的超疏水、疏油特性。由于超疏水材料表

面会形成一种稳定的空气/水界面，即“Cassie—Baxter”态，会导致表面形成巨大的声阻抗失配，从而使水下声波发生超宽频全角度反射。该meta-skin具备超薄厚度，也可承受较大变形，因此可以设计一种水下声纤，实现高效轨道角动量复用和二进制编码声通信^[14]。

具有多孔微纳结构的粗糙表面形貌是形成超疏水效应的基础^[15]。通过实验测量，我们发现PVDF构成的meta-skin与水滴的接触角约为 160° ，如图4(b)所示，具有优异的超疏水性能。更为重要的是，超疏水接触角30天后的变化可忽略不计，说明其超疏水性能极为稳定，这对未来工程技术应用具有重要意义。实验测量表明，超疏水型meta-skin的声阻抗与水相差约四个数量级，在超宽频范围内具有巨大阻抗失配。为了揭示稳定超疏水特性的来源，我们用台阶式轮廓仪测量了meta-skin的粗糙度，如图4(c)所示。红色线表示测量轮廓线，蓝色线表示平均偏差。可见超疏水膜表面非常粗糙，膜上方形成了稳定的水/空气界面层，即“Cassie—Baxter”态。空气可被稳定密封在“微囊”中，如图4(a)右上图片所示。

这种稳定的水/空气界面层是实现巨大声阻抗失配的基础。

利用超声绝缘皮肤的大声阻抗失配、柔性超薄等特点，我们进一步将其卷曲成空心声波导纤维，即声纤。声波在声纤中的传播示意图如图5(a)所示，声纤外面的包层由聚二甲基硅氧烷树脂制成。柔性声纤的直径和形状可进行调整，以满足特定应用需求，例如声信号复用。为了证明声纤具有完美的声波导特性，我们测量了距离源不同位置处的声场强。声波中心频率为3.5 MHz，在声纤中沿 z 方向传播。图5(b)展示了有/无声纤情况下沿 z 轴声场强度的变化情况。结果表明，如果不使用声纤，由于波衍射，声场强度会迅速衰减。当使用声纤时，声信号强度传播至200 mm处并没有明显衰减。这种声纤还具有很强的屏蔽外部扰动能力，对于水下声通信至关重要。水下环境充满了各种声干扰源，如水流、海洋生物等，容易导致声信号的衰减和失真。良好的抗干扰性能使得声纤能保障声通信安全并且能在复杂水下环境中提供远距离和高速率的通信服务，提升水下通信系统的整体性能和效率。

超声绝缘皮肤在水环境中的声学应用前景广阔，如水下通信、超声治疗和成像等。这里我们介绍使用超声绝缘皮肤声纤进行高性能水下通信的原理性验证。传统声波水下通信在有限带宽和/或较低频率下进行。近年来，声波轨道角动量的相关研究为人们提供了一个新的自由度来提高水下通信效率，如图5(c)所示。轨道角动量波束包含一个螺旋相位项 $\exp(-i\ell\theta)$ ，其中 θ

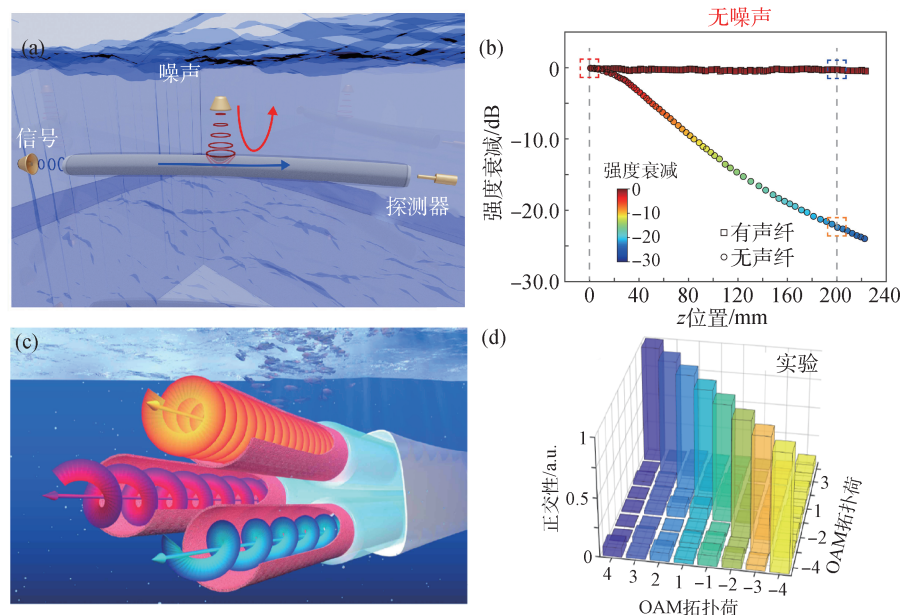


图5 基于超声绝缘皮肤的水下声波导纤维^[14] (a)水下声波信号在声纤中的传播示意图；(b)在3.5 MHz下，距声源240 mm范围内，使用声纤和自由空间时的声波强度变化图；(c)水下基于声纤的声轨道角动量(OAM)通讯示意图；(d)声轨道角动量通讯的实验效果图

为方位角, l 为拓扑荷数。当波束绕传播轴传播一个周期后, 声波相位发生了 $l \times 2\pi$ 的变化。如图 5(d) 所示, 两个不同拓扑荷数的轨道角动量声波相互正交^[16], 因此可使用不同拓扑荷数的涡旋声束来编码传递的信号。由于携带不同拓扑荷的涡旋声场正交, 我们可利用总的复用编码场与不同阶数涡旋场进行内积, 完成解码处理。相比于光纤或电缆通信, 声波可以从自由空间简单有效地耦合到声纤中, 在技术上对长距离和抗干扰声通信具有潜在意义。该工作亦可启发其他基于高效声波导的应用, 如体内超声治疗和成像。

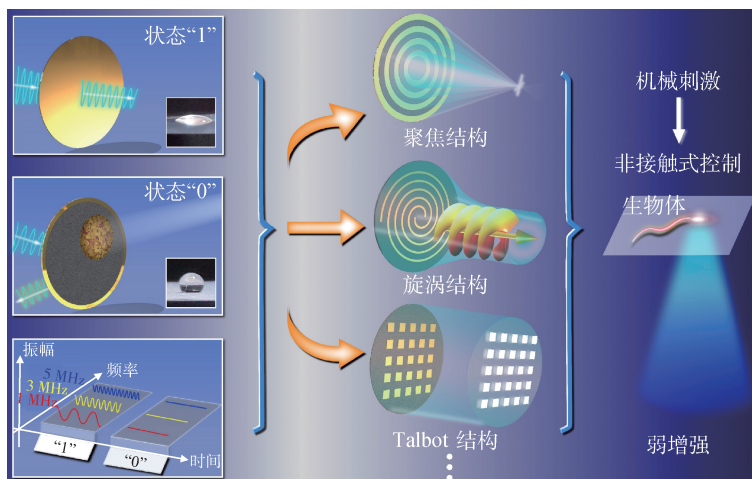


图6 纳米颗粒图案化沉积超声绝缘皮肤。在左侧图中, 没有涂抹超表面的状态“1”和涂有超表面的状态“0”可以分别看作是强透射和全反射状态, 且这种全反射效应是宽频的; 中间图表示超表面可以进一步加工成不同结构模式的声场; 右侧图表示不同结构模式的声场增强均可以通过机械刺激实现对生物体的低阈值、非接触控制, 并且具有可擦除重构性^[17]

4.2 可重构图案化沉积纳米结构声超表面

基于超疏水特性的超声绝缘皮肤也可由其他材料进行制备。我们提出了一种基于掩模图案化纳米颗粒沉积的声超表面, 其中的超疏水结构由约 100 nm 的二氧化硅颗粒自组装沉积而成, 超疏水结构可重构且控制灵活。该可重构图案化 meta-skin 厚度仅为 70 μm , 且在宽频和广角入射下, 超声透射率低于 0.0001^[17]。利用这种自组装可擦除重构的微纳声超表面, 我们可根据不同需求, 基于 Rayleigh—Sommerfeld 衍射理论, 设计同心环、多螺旋臂和方孔阵列等, 分别实现聚焦、涡旋和 Talbot 声场(图 6), 具有局域声场增强、携带轨道角动量和自成像等特点。

随后我们研究了这种由 meta-skin 平面透镜实现的声场增强是否可通过机械刺激实现对生物体进行低阈值、非接触行为的控制。声学换能器发出的低强度脉冲超声波经由 meta-skin 平面透镜调制后, 在特定区域实现了声场增强。我们用显微镜观察并记录了秀丽隐杆线虫对局部增强声场的行为反应。图 7 展示了秀丽隐杆线虫在局部增强声场中, 由于声机械刺激引发的逃逸行为。例如, 在一个刺激周期的 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 时刻, 用虫体上标记的圆点表示虫的头部, 箭头表示此刻的爬行方

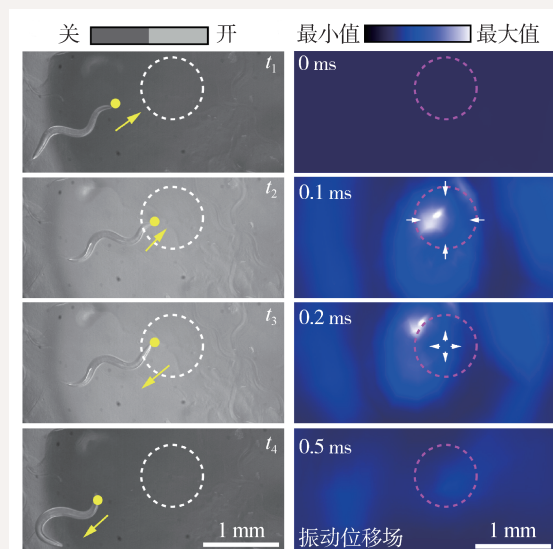


图7 生物体对由 meta-skin 平面透镜产生的聚焦声场的应激反应^[17]。左侧是秀丽隐杆线虫对局部增强声场的行为反应, 右侧是声场的分布图

向。当在 t_2 和 t_3 时刻开启聚焦超声后, 可以看到, t_4 时刻线虫会迅速后退, 从而避开超声波刺激。

通过掩膜—自组装沉积方式设计的可擦除重构 meta-skin 平面透镜, 为超声声场多功能调控提供了一种便利的方式。基于时间反演技术和优化设计, 还可利用图案化 meta-skin 生成更为复杂的任意形状全息声场。该方式拓宽了声场调控的自由度, 实现了全空间三维声场的全息调控。这种

自组装纳米颗粒 meta-skin 功能器件未来有望在生物医学工程领域得到扩展和应用。

4.3 基于纳米颗粒修饰细菌纤维素声超表面

纤维素作为绿色植物的一种组分，广泛存在于细胞壁中，在制造生物相容性柔性电子器件等方面具有极大吸引力。由于纤维素具有强亲水性

和水致膨胀效应，其在水环境中的机械稳定性很差，结构也容易变形破坏。我们前期研究了一种二氧化硅纳米颗粒修饰的细菌纤维素 meta-skin，它在水中具有优异的机械稳定性和极佳的激光加工性能，具有超薄厚度以及神奇的细菌自修复能力^[18]。利用扫描电子显微镜，我们测量了纳米颗粒修饰细菌纤维素 meta-skin 的表面和侧面微观形貌，如图 8(a), (b)所示，膜表面为粗糙多孔结构

且膜厚度仅为 20 μm 。纤维素膜非常轻盈，薄如蝉翼，可立在蒲公英上，且具有明显的超疏水效应(接触角约为 170.2°)，如图 8(c)所示。这种细菌纤维素 meta-skin 非常适合裁剪，可通过激光切割技术对其进行精细加工，制作复杂镂空图案，如图 8(d)所示，其图案精度可达 10 μm 。这种超疏水纤维素膜具有神奇的细菌修复能力，如图 8(e)所示。我们先从完整 meta-skin 中切出一个方形孔，将该受损样品浸入培养基中，经过一段时间自我修复过程后，又可重新愈合形成一张新的“完整”膜，且愈合后的膜仍具有超疏水性。由于纤维素 meta-skin 本质是由细菌分泌而成，因此自我修复过程还需细菌作为“裁缝”来修复受损的表面。

我们利用这种细菌纤维素 meta-skin 设

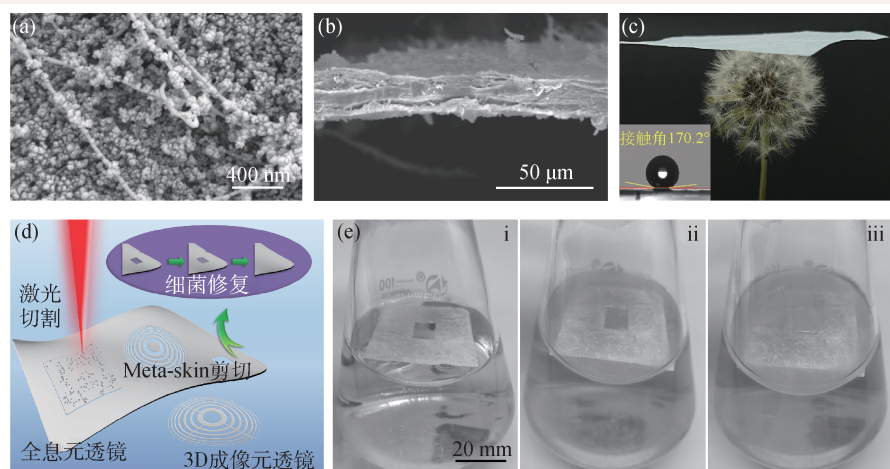


图8 纳米颗粒修饰细菌纤维素 meta-skin 的微观形貌和自我修复表征^[19] (a, b)纳米颗粒修饰细菌纤维素 meta-skin 的表面和截面的微观形貌表征；(c)蒲公英花瓣上可放置纤维素 meta-skin 样品；(d)纤维素 meta-skin 剪纸工艺和细菌自修复示意图；(e)破损的 meta-skin 自我修复过程

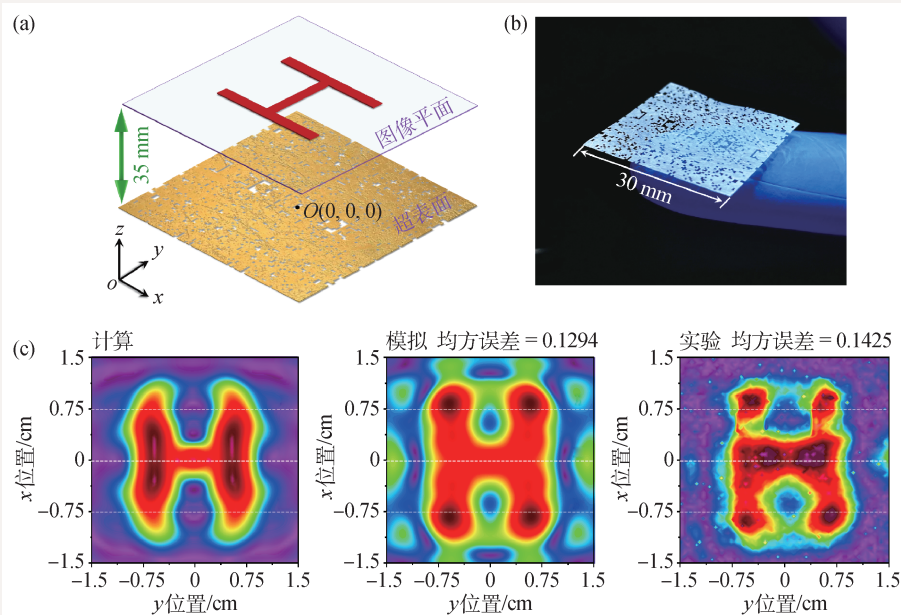


图9 基于细菌纤维素 meta-skin 的声全息超透镜^[18] (a, b)利用细菌纤维素 meta-skin 剪纸工艺制作的超轻薄声全息平面透镜示意图和样品图；(c)由计算、模拟和实验测量得到的声全息强度分布

计并加工制备了一种超薄(约 20 μm)和超轻(小于 20 μg)的芯片级超声功能器件,例如全息声超透镜和成像超透镜,实现了复杂声全息和远场高分辨率三维超声成像。图 9 展示了基于 meta-skin 的声全息样品图。激光切割制成的全息透镜的边长为 30 mm,厚度为 20 μm ,重量仅为 18.6 mg,中心频率为 500 kHz。平面声波幅度被多孔结构的纤维素 meta-skin 精细调制,可在全息透镜后方投射出全息“H”形声场。

这种纳米颗粒修饰的细菌纤维素声超表面可用来制作超轻薄的芯片级超声功能器件,且在水中环境中非常稳定,可在水中保持超疏水特性超过 200 天,同时还具备细菌自我修复等特性。该功能器件结合了声超表面和折纸/剪纸技术,对推动纳/微声超材料在生物学工程中的应用具有重要意义。该成果也标志着设计、制备基于微纳人工结构的高频超声功能器件成为可能。

5 结语与展望

近十年来,随着越来越多关于微纳声人工结构与功能器件研究成果的涌现,必然在声学领域掀起一股新的研究热潮。相较于传统声学器件,微纳人工结构具有宽频、小尺寸、超轻薄、能够

实现复杂结构声场调控等显著优势,因此也具有更大灵活性和多功能性,为超声成像与治疗、微粒声操控^[19]和声波通信等方面带来巨大的潜力和机遇。与此同时,深亚波长尺度人工结构器件更加有利于声学设备或器件的微型化和集成化。未来,我们将把微纳声人工结构与柔性电子器件相结合,或许可以实现器件拟人化功能和智能化控制,在生物医学、智能传感和可穿戴设备等领域产生革命性影响。柔性微纳声学电子器件的研发将更加贴近生物体内部复杂环境,具有更广泛的应用前景。将微纳声人工结构的设计与深度学习结合,可以进一步对器件结构参数、材料选择和性能进行智能化搜索和优化,从而实现更高效、更精确的设计,产生更多意想不到的结果。此外,先进微纳加工技术的不断进步和创新将进一步推动微纳声人工结构与器件的研究发展。新型微纳加工和材料工程技术将提供更高精度、更复杂结构和更多样化功能器件的制备手段,从而推动新材料科学在声学技术应用领域的创新和发展。

致谢 衷心感谢文章写作过程中曾龙生、李宗霖和杨杰给予的写作思路的有益讨论和热情帮助。

参考文献

- [1] Ma G C, Sheng P. *Science Advances*, 2016, 2: e1501595
- [2] Liao G X, Luan C C, Wang Z W *et al.* *Advanced Materials*, 2021, 6(5): 2000787
- [3] Dong E Q, Cao P Z, Zhang J H *et al.* *National Science Review*, 2023, 10(6): Jnwac246
- [4] Assouar B, Liang B, Wu Y *et al.* *Nature Reviews Materials*, 2018, 3: 460
- [5] Liang B, Cheng J C, Qiu C W. *Nanophotonics*, 2018, 7(6): 1191
- [6] Li P Q, Shen Y X, Geng Z G *et al.* *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53: 155502
- [7] Li Y, Jiang X, Liang B *et al.* *Phys. Rev. Appl.*, 2015, 4: 024003
- [8] Jiang X, Li Y, Liang B *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 117: 034301
- [9] Ma G, Yang M, Xiao S *et al.* *Nature Materials*, 2014, 13: 873
- [10] Shen Y X, Peng Y G, Cai F Y *et al.* *Nature Communications*, 2019, 10: 3411
- [11] Shen Y X, Peng Y G, Zhao D G *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2019, 122: 094501
- [12] Sapozhnikov O A, Michael R B. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 133(2): 661
- [13] Zeng L S, Shen Y X, Fang X S *et al.* *Ultrasonics*, 2021, 117: 106548
- [14] Tong L, Xiong Z, Shen Y X *et al.* *Advanced Materials*, 2020, 32(37): 2002251
- [15] Barthlott W, Schimmel T, Wiersch S *et al.* *Advanced Materials*, 2010, 22: 2325
- [16] Mair A, Vaziri A, Weihs G *et al.* *Nature*, 2001, 412: 313
- [17] Li P Q, Li Z L, Zhou W *et al.* *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(33): 2203109
- [18] Li Z L, Chen K, Li F *et al.* *Nature Communications*, 2023, 14: 5319
- [19] Cui W W, He M H, Yang Y *et al.* *Particle & Particle Systems Characterization*, 2018, 35: 1800068