

特约专栏

# 基于轻薄硬质超表面的空气声波反射场操控

赵玉萍, 梁彬, 程建春

(南京大学物理学院 近代声学教育部重点实验室 人工微结构科学与技术协同创新中心, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 对反射声波的复杂操控是声学研究的基础问题之一, 并广泛应用于房间声学设计及噪声能量消除等重要场合。近年来出现的声学超表面为声学功能器件的小型化提供了新的启示, 因此如何进一步缩减其尺寸和重量具有重要的物理意义与应用价值。展示了一种轻薄超表面结构对低频空气声波所产生反射声场的高效、精准操控。通过理论计算证明了利用简单的扁平中空结构, 可在不显著牺牲能量反射率及结构强度的前提下, 通过调控单个结构参数产生  $0 \sim 2\pi$  范围内的反射相位, 同时避免了制备难度高和增加器件重量的复杂内部结构, 因此具有尺寸超薄 ( $\lambda_0/20$ )、重量轻盈、反射率高及制备简单等优势。通过实现任意角度的异常反射、基于超薄平面透镜的可调声聚焦、构建平面棱锥镜产生类贝塞尔声束 3 个典型例子展示了该器件对反射声波的丰富操控性能。实现基于轻薄超表面对反射声场的操控, 有助于新型平面声学器件的研究与应用, 并有望在建筑声学、噪声控制、扬声器设计等领域中产生重要价值。

**关键词:** 声学; 超表面; 声波操控; 异常折射; 超薄平面聚焦透镜; 超薄平面棱锥镜

**中图分类号:** O42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2021)01-0022-07

## Manipulation of Reflected Airborne Sound by Using Ultra-Thin and Lightweight Metasurface with Mechanical Rigidity

ZHAO Yuping, LIANG Bin, CHENG Jianchun

(Key Laboratory of Modern Acoustics of Ministry of Education, Collaborative Innovation Center of Advanced Microstructures, Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** Complicated manipulation of reflected acoustic waves is of fundamental significance in acoustics, with wide applications in various important situations, such as the improvement of acoustic quality in rooms and elimination of undesired noise. In recent years, the acoustic metasurface has provided new inspiration for the miniaturization of acoustic functional devices, therefore it would be physically and practically important to further reduce the size and weight of acoustic metasurfaces. In this paper, a lightweight and ultrathin acoustic metasurface for high-efficiency and precise manipulation of low-frequency reflected airborne sound is introduced. Based on theoretical calculation, it is proven that the metasurface unit cell with a simple planar hollow structure enables free control of reflected phase over the full  $0 \sim 2\pi$  range via adjustment of one sole structural parameter, with no need of sacrifice of energy reflectivity and mechanical rigidity or sophisticated inner structures that would increase the fabrication difficulty and device weight. Hence the resulting device has advantages of ultrathin thickness (of  $\lambda_0/20$ ), light weight, high reflection efficiency and simple and low-cost design. The performance of the designed metasurface is demonstrated via three distinctive examples of anomalous reflection with arbitrary angle, ultrathin acoustic planar lens for focusing acoustic energy and production of Bessel-like beam based on ultrathin flat acoustic axicon. The realization of flexible manipulation of reflected sound by using lightweight and ultrathin metasurface helps to promote the novel acoustic planar devices and their applications, and may have important implication in many diverse scenarios ranging from architectural acoustics to noise control to loudspeaker design.

**Key words:** acoustics; metasurface; acoustic manipulation; anomalous reflection; ultrathin planar focusing lens; ultrathin flat acoustic axicon

收稿日期: 2020-05-19 修回日期: 2020-06-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0303700); 国家自然科学基金项目(11634006, 11374157, 81127901)

第一作者: 赵玉萍, 女, 1993年生, 硕士研究生

通讯作者: 梁彬, 男, 1980年生, 教授, 博士生导师,

Email: liangbin@nju.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202005026

### 1 前言

如何精准高效地操控反射波能量在空间中的分布形态、形成特定的声场分布是声学研究的重要主题之一,

也代表了房间声学品质设计、低频噪声能量隔离与吸收、振动能量的收集等诸多典型声学应用问题背后的关键需求。传统声操控方法通常依赖并受制于天然材料自身的声学性质，存在器件厚度大、重量大及依赖特殊几何外形等制约。利用人工的方法可以突破这种限制，使声学器件的功能显著提升。特别是 21 世纪初提出的声学超构材料概念，可产生超越天然材料极限的新奇声学性能，提供了更为丰富的声波操控方式，成为备受关注的声学研究热点<sup>[1-6]</sup>。而近年来出现的声学超构表面因其亚波长的结构厚度及平整的几何外形，不仅展示出不同于三维超构材料的物理内涵及特殊声操控特性，对于声学功能器件的轻薄化亦具有关键意义，因而也得到了迅猛发展<sup>[7-18]</sup>。例如，香港科技大学的沈平教授等基于薄膜结构<sup>[14]</sup>、华中科技大学的祝雪丰教授等基于静电纺丝结构<sup>[15]</sup>发展了各种超薄软质超表面结构的设计理论，极大地缩减了声学超表面单元的结构厚度。但考虑到许多应用场合对器件尺寸及力学强度两方面的需求，仍有必要研究如何使用具有轻薄硬质结构的超表面器件实现反射声场操控，这对于声学功能器件的小型化与集成化亦具有重要意义。

本文展示了利用一种轻薄硬质超表面结构来高效、精准地操控低频空气声波在其表面上产生的反射声场的机制。单个超表面单元具有简单的扁平中空结构，允许通过单个结构参数的调控在接近  $0 \sim 2\pi$  的范围内对反射相位进行自由操控，并且由于避免了可能引入额外能量损耗及增加器件重量的复杂狭窄结构，因而具有较高的能量反射率及较低的面密度。此外，该设计在保证尺寸超薄及结构坚固的同时，单个单元的横向尺度也控制在远小于波长的范围，能够满足不同的声场操控需求。为展示该器件对反射声波的丰富操控性能，选取了任意角度的异常反射、基于超薄平面透镜的可调声聚焦、基于平面棱锥镜的类贝塞尔声束生成 3 个典型例子，基于广义 Snell 定律设计了 3 类具有不同表面相位分布的超表面结构，通过数值模拟验证了该结构能够有效实现对反射声场的各种特殊操控。

## 2 模型与方法

图 1 展示了利用轻薄声学超表面操控反射声场的基本原理与本工作中所采用的轻薄结构的具体设计及其声学响应。通过将轻薄超表面单元在  $X$ - $Y$  平面内平铺并对每个单元的结构参数进行合理设计，即可操控空气声波入射到其表面后在三维空间中产生的反射声场。本文中为简化研究过程，不失一般性，仅考虑单元沿  $X$  轴方向平铺的二维情形，并分析反射声波在  $X$ - $Z$  平面内的传播行为，如图 1a 所示。通常情况下，当声波入射到不同介

质的分界面时，反射波的行为由经典 Snell 定律描述，满足  $\theta_r = \theta_i$  ( $\theta_r$  与  $\theta_i$  分别为声波的反射角与入射角)。然而，当声波入射到人工构建的声学超表面时，由于受到分界面处突变相位  $\Phi(x)$  的调制，其反射特性将遵循广义 Snell 定律<sup>[19]</sup>，反射角和入射角满足式(1)：

$$\sin \theta_r - \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi(x)}{dx} \quad (1)$$

其中， $\lambda_0$  为声波的波长。因此通过设计突变相位在界面处的分布函数  $\Phi(x)$ ，即可实现对反射声场形态的各种操控效果。这种基于广义 Snell 定律来调控反射波的基本原理是各类声学超表面设计的基础，可用不同类型的超薄平面单元结构来实现，例如空间折叠结构<sup>[3, 7, 8, 12, 16, 17, 20]</sup>或薄膜单元结构<sup>[14, 21-23]</sup>，但是本文中所采用的超表面单元采用了简单的中空结构，包含一个具有深亚波长厚度 ( $\lambda_0/20$ ) 的中空方形扁平腔体及扁腔正上方的方形开口，如图 1a 虚线框内单元结构示意图所示。这种没有任何内部结构的简易构造规避了空间折叠结构中狭缝可能带来的能量损耗过大的问题，较之柔性超表面设计也具有更高的力学强度。此外，与专门基于二次余数序列理论来产生和操控扩散声场的超薄超表面结构相比<sup>[24]</sup>，此类结构具有相对更小的横向尺度 ( $\lambda_0/4$ )，因而有助于显著提升表面相位的空间分辨率，可以更好地满足各种空间反射声场的特殊操控要求，例如通过使用更精细的相位分布提升所生成的扩散声场的质量<sup>[25]</sup>。尽管该单元结构与经典的亥姆霍兹共鸣器有类似之处，但其特殊的超薄几何外形使之无法进行集总参数等效，因此其声学响应的分析十分复杂<sup>[24]</sup>。当入射声波在腔体内发生共振时，反射声波的相位将在深亚波长尺度内发生突变，且其改变量可通过对某一独立结构参数的调整进行调控。为保证所有单元具有相同的几何外形，本设计中选取单元的开口宽度  $w$  作为该独立变量。对该单元的相位响应与反射特性随结构参数  $w$  的变化规律进行了数值模拟，结果如图 1b 所示。模拟使用基于有限元计算方法的 COMSOL 软件，将“压力声学频域”与“热粘性声学频域”两个模块相耦合来分析单元的损耗特性。空气中的声速和密度分别为 343 m/s 和 1.21 kg/m<sup>3</sup>，固体中的声速和密度分别为 2700 m/s 和 1180 kg/m<sup>3</sup>，由于固体与空气之间存在很大的阻抗差，因此结构腔壁可以看成是足够硬的边界，计算声波的工作波长为 0.05 m。由图 1b 曲线可以看出，通过调节腔口的宽度  $w$ ，可在不改变器件平整几何外形及超薄厚度的前提下，在接近 360° 的范围内实现对反射相位的精准调控，同时使其能量反射率及力学结构强度均维持在较高水平。该设计具备尺寸超薄、轻盈、表面平整、制备简单等重要特性，对声学超表面器件设计与实际应用具有重要价值。

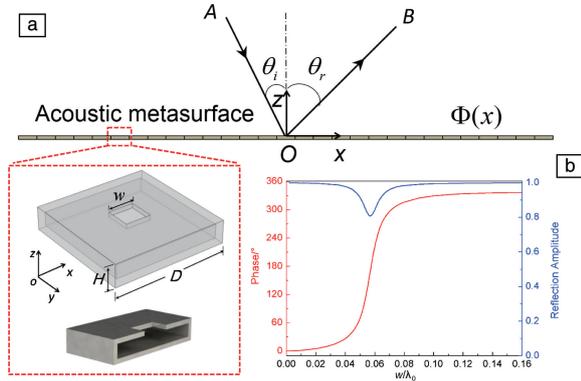


图 1 轻薄硬质超表面基于广义 Snell 定律操控反射声波的工作原理(a), 虚线框内为单元结构透视图和剖视图(单元厚度  $H=\lambda_0/20$ , 宽度  $D=\lambda_0/4$ , 开口宽度  $w$  为唯一可调节参数), 界面  $z=0$  处有一个由超表面产生的突变相位分布  $\Phi(x)$ ; 数值计算得到的超表面单元反射相位以及反射声压幅值随结构参数  $w$  的变化规律(b)

Fig. 1 Schematic of the reflection manipulation by ultrathin lightweight acoustic metasurface with mechanical rigidity based on the generalized Snell's law (a), the images in the red dotted frame are a perspective view and a cross section of the unit, the thickness and width of the units are  $H=\lambda_0/20$  and  $D=\lambda_0/4$ , respectively,  $w$  is the only tunable parameter, a phase profile  $\Phi(x)$  is provided at  $z=0$ ; The simulated phase and amplitude response of each unit cell as functions of  $w$  (b)

### 3 异常反射

由于传统的声学理论要求声波入射时产生的反射角

必须与入射角相同, 因而需要依赖对界面外形的改变来调控反射角度。利用超表面结构可在不改变平面器件表面形貌的情况下, 通过调整局部结构参数实现空间反射角的自由调控, 这对于声辐射研究及房间声学设计等问题具有重要的应用价值。由式(1)可知, 当表面相位  $\Phi(x)$  不随位置改变时, 有  $\theta_r=\theta_i$ , 即反射角和入射角服从经典 Snell 定律。当表面相位  $\Phi(x)$  随位置变化时, 不同的表面相位分布规律会产生不同的反射波效果。一种最简单的情形是结构表面的相位分布  $\Phi(x)$  随位置  $x$  线性变化(假设  $\Phi(x)=\beta x$ ), 此时方程(1)可简化为:

$$\sin \theta_r - \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi}\beta \quad (2)$$

此时反射波的反射角  $\theta_r$  是一个与位置无关的固定值。图 2a 所示为声波垂直入射时, 以特定反射角  $\theta_r$  出射的超表面设计示意图。该实现异常反射的超表面结构由 29 个厚度为  $\lambda_0/20$  的功能单元沿  $x$  方向排列构成, 因此超表面结构整体长度为  $7.25\lambda_0$ 。当声波以特定反射角  $\theta_r$  出射时, 图中红色线段表示的不同位置处的声程差所引起的相位差应由人工表面的相位突变产生。因此, 当声波垂直入射, 即  $\theta_i=0$  时, 超表面沿  $x$  方向的相位分布  $\Phi(x)$  应满足式(3):

$$\Phi(x) = -\frac{2\pi}{\lambda_0}\sin \theta_r \cdot x \quad (3)$$

设计了 3 个不同的超表面结构, 分别用以实现声波垂直入射时反射角为  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  及  $60^\circ$  的异常反射。如图 2b~2d 所示, 下方曲线图为实现相应特定反射角时表面突变相

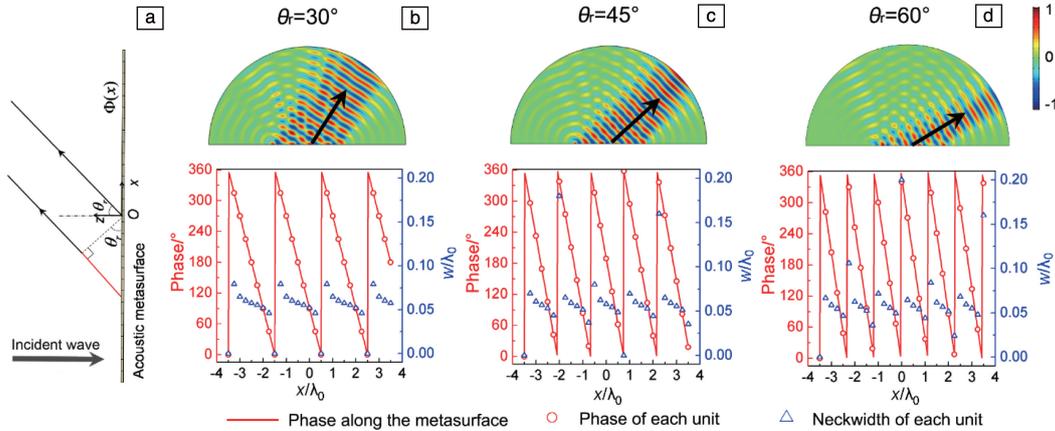


图 2 异常反射超表面相位设计原理示意图(a), 红色线段表示超表面需要提供的相位差; 异常反射超表面产生  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  和  $60^\circ$  反射角的相位分布函数及归一化反射声压场图(b~d), 红色曲线表示沿超表面分布的理想连续相位分布函数, 红色圆圈表示各单元实际产生的离散相位分布, 蓝色三角形表示各位置处对应单元的开口大小

Fig. 2 Schematic of the design of metasurface for producing extraordinary reflection, with the length of red line referring to the phase difference the metasurface needs to provide (a); The phase profiles of the metasurfaces and the spatial distributions of normalized acoustic pressure of  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $60^\circ$  extraordinary reflection (b~d), in which the red curve refers to the desired continuous phase profile along the metasurface, the red circles represent the discrete phases provided by the designed unit cells, and the blue triangles represent the neck width of each unit

位  $\Phi(x)$  随位置  $x$  变化的理想连续分布函数以及各对应位置处的共振单元实际产生的离散相位取值, 此外, 图中还给出了对应位置超表面单元开口的大小。从图中可以看出, 共振单元实际产生的离散相位与期望的连续相位分布曲线高度吻合, 这使得设计的结构能够对反射波束实现更加精准地操控。图 2b~2d 中上方为  $X$ - $Z$  平面内的归一化二维声压场图, 由图中可以看出, 反射波束能量均集中于设定的反射方向出射。

#### 4 超薄平面聚焦声透镜

声波能量在空间的高效聚集在声学研究及应用中具有重要的意义, 例如超声治疗中需要将高强度超声有效汇聚至病变区域, 在扬声器设计中往往也需要在目标区域产生较强的声能聚集。与通常需通过调整几何外形实现声能汇聚的传统机制相比, 利用人工结构构建的声学透镜可规避其外形不平整及结构厚重等问题。尽管利用在空间上变化的声学超材料结构单元可构建出等效折射率呈梯度变化的声学人工透镜, 突破对曲面外形的依赖,

但仍然受限于等效折射率的上限, 其整体厚度仍然难以缩减至小于波长的尺度。因此, 利用深亚波长厚度的超薄平面透镜实现声能量在空间的高效聚集, 将具有重要的应用前景。显然, 声能量的聚焦需要使反射角  $\theta_r$  与坐标位置  $x$  有关, 因而超表面结构表面的相位分布  $\Phi(x)$  应随位置  $x$  呈现非线性变化关系。此处我们利用轻薄超表面单元设计可将垂直入射的声波能量聚焦的超表面结构。

如图 3a 所示, 用于实现聚焦的结构由 29 个超表面单元组成, 沿  $x$  方向的横向长度为  $7.25\lambda_0$ , 设计焦距为  $f=2\lambda_0$ 。红色线段所代表的声程差所对应的相位差应由超表面提供, 因此, 由广义 Snell 定律可知, 相位分布  $\Phi(x)$  随位置  $x$  的变化关系应满足式(4):

$$\Phi(x) = \frac{2\pi}{\lambda_0} [\sqrt{(x^2 + f^2)} - f] \quad (4)$$

图 3b 即为实现目标聚焦效果的相位  $\Phi(x)$  随位置  $x$  的理想连续分布函数以及对应位置各共振单元所产生的实际离散相位, 可以看出单元产生的实际相位与理想相位能够高度吻合。由图 3c 所示的  $X$ - $Z$  平面内的二维归一

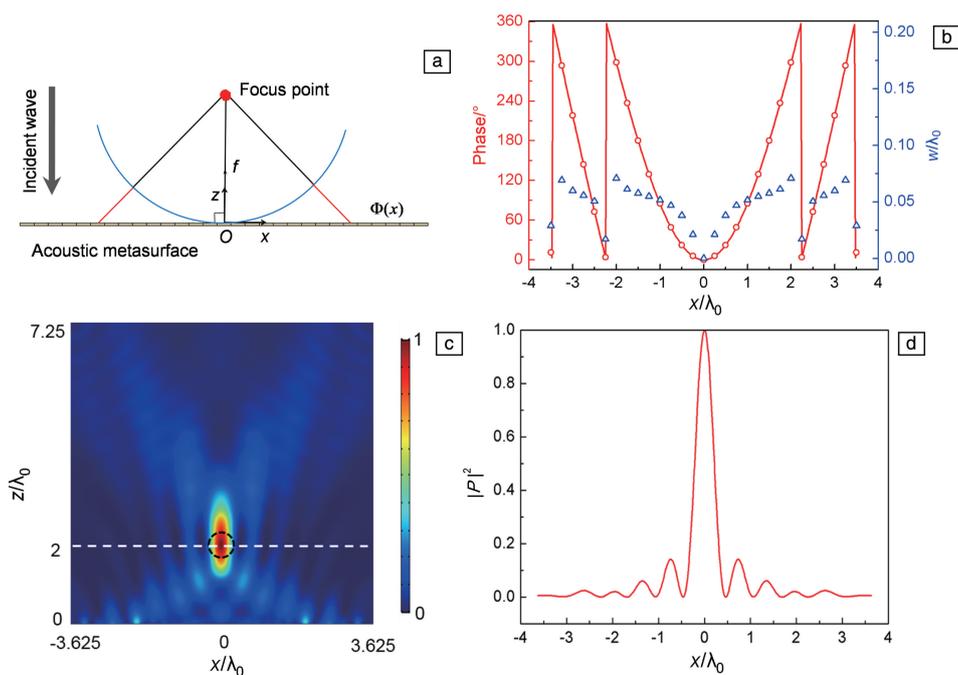


图 3 超薄平面聚焦声透镜的相位设计原理图(a),  $f$  为焦距, 红色线段表示为形成蓝色曲线标记的等相位面, 超表面需提供的相位差; 超表面的相位分布(b), 红色曲线和红色圆圈分别表示超表面沿  $x$  方向分布的理想连续相位和各单元实际产生的离散相位, 蓝色三角形表示各单元的开口大小; 垂直入射时平面透镜的归一化散射声强场图(c); 在通过焦点且平行于超表面的轴线上 ( $z=2\lambda_0$ ) 的归一化声强分布(d)

Fig. 3 Schematic for the ultrathin planar acoustic lens with focus length  $f$  (a), in which the length of the red line refers to the phase difference the metasurface needs to provide for producing the desired equiphase surface marked by the blue line; The phase profile on the metasurface (b), the red curve and red circles refer to the desired continuous phase shift and the discrete phase shift provided by the metasurface along the  $x$  direction respectively, and the blue triangles represent the neck width of each unit; Normalized spatial distribution of acoustic intensity field for the designed lens with normal incidence (c); Transverse cross-section of the normalized intensity profile along the line which crosses the focal point and is parallel to the metasurface ( $z=2\lambda_0$ ) (d)

化声强场图可以看出,当声波垂直入射到材料表面后,反射声波能量准确聚集在预设的焦点处,证明了所设计的超薄平面透镜的良好聚焦能力。为了更好地定量表征该反射透镜的聚焦特性,作者还计算了通过透镜焦点且平行于透镜表面的轴线上的声强分布,其结果如图 3d 所示,焦点附近的声强明显高于其他区域,实现了良好的聚集效果。

此类轻薄超表面单元产生的反射相位可通过单个结构参数  $w$  的改变实现在  $0 \sim 2\pi$  范围内自由调控,这为实现焦点位置可控的可重构超薄透镜提供了基础。为演示相位分布  $\Phi(x)$  随位置  $x$  非线性变化时声波操控的多样性,还设计了可实现偏心聚焦效果的超表面,如图 4a 所示,该结构同样由 29 个超表面单元组成,焦点离表面的

垂直距离  $f=2\lambda_0$ , 距离结构中心的横向偏移距离  $m=2\lambda_0$ 。红色线段表示的距离所对应的相位差同样应由超表面提供,因此,由广义 Snell 定律可知,此时相位  $\Phi(x)$  随位置  $x$  应满足式(5)的关系:

$$\Phi(x) = \frac{2\pi}{\lambda_0} [\sqrt{(x-m)^2 + f^2} - f] \quad (5)$$

由图 4b 同样可以看出,单元产生的实际相位与超表面理想相位分布函数高度吻合。图 4c 中的散射声强场图显示出了清晰且能量集中的偏心焦点,图 4d 中展示的通过焦点且平行于超表面的轴线上的声强分布,也展现出了明显的能量聚焦效果。这表明我们可以利用超表面单元来设计可实现多样化声波操控的不同超表面结构。

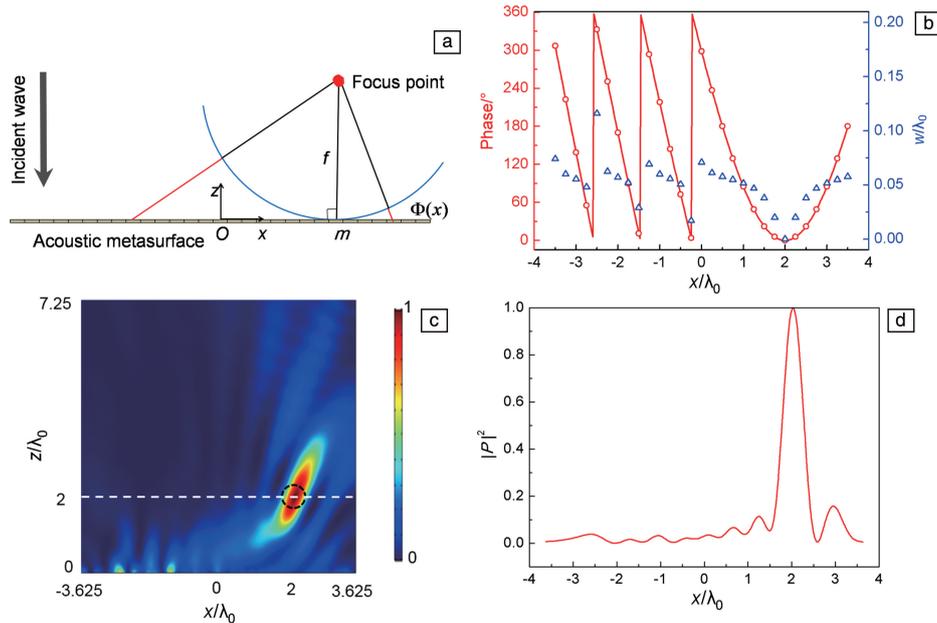


图 4 超薄偏心聚焦声透镜的相位设计原理图(a),  $f$  为焦距,  $m$  为偏移距离, 红色线段表示为形成蓝色曲线标记的等相位面, 超表面需提供的相位差; 超表面的相位分布(b), 红色曲线和红色圆圈分别表示超表面沿  $x$  方向分布的理想连续相位和各单元实际产生的离散相位, 蓝色三角形表示各单元的开口大小; 垂直入射时偏心透镜的归一化散射声强场图(c); 通过焦点且平行于超表面的轴线上( $z=2\lambda_0$ )的归一化声强分布(d)

Fig. 4 Schematic of the ultrathin planar decentered acoustic lens with focus length  $f$ , and decentered distance  $m$  (a), in which the length of the red line refers to the phase difference the metasurface needs to provide for producing the desired equiphase surface marked by the blue line; The phase profile on the metasurface(b), the red curve and red circles refer to the desired continuous phase shift and the discrete phase shift provided by the metasurface along the  $x$  direction respectively, and the blue triangles represent the neck width of each unit; Normalized spatial distribution of acoustic intensity field for the designed decentered lens with normal incidence (c); Transverse cross-section of the normalized intensity profile along the line which crosses the focal point and is parallel to the metasurface ( $z=2\lambda_0$ ) (d)

## 5 超薄平面声学校锥镜

贝塞尔光束因其特有的无衍射和自修复等重要特性,在光学领域中得到广泛应用,例如空间光通信<sup>[26, 27]</sup>、光镊<sup>[28]</sup>、激光加工<sup>[29, 30]</sup>等,亦在超声成像、无损检测及粒子操控等重要声学问题中发挥重要作用。在目前主要的

生成机制中<sup>[31, 32]</sup>,利用轴棱锥产生贝塞尔光束的方法相对简捷,且具有很高的转换效率。但是在光学中,高质量棱锥镜加工难度大,误差也不易控制。此外,其厚重的结构及锥状几何外形亦不利于器件的小型化及与其他组成元件的耦合。作者研究了利用轻薄超表面单元来构建超薄平面声学校锥镜并产生类贝塞尔声束。

图 5a 所示为超薄平面棱锥镜的设计原理，用于获得类贝塞尔声束的结构由 29 个超表面单元组成，即棱锥镜沿  $x$  方向的横向长度为  $7.25\lambda_0$ ，底角为  $\beta = \pi/20$ 。红色线段部分的声程差对应的相位差由超表面产生，因此由广

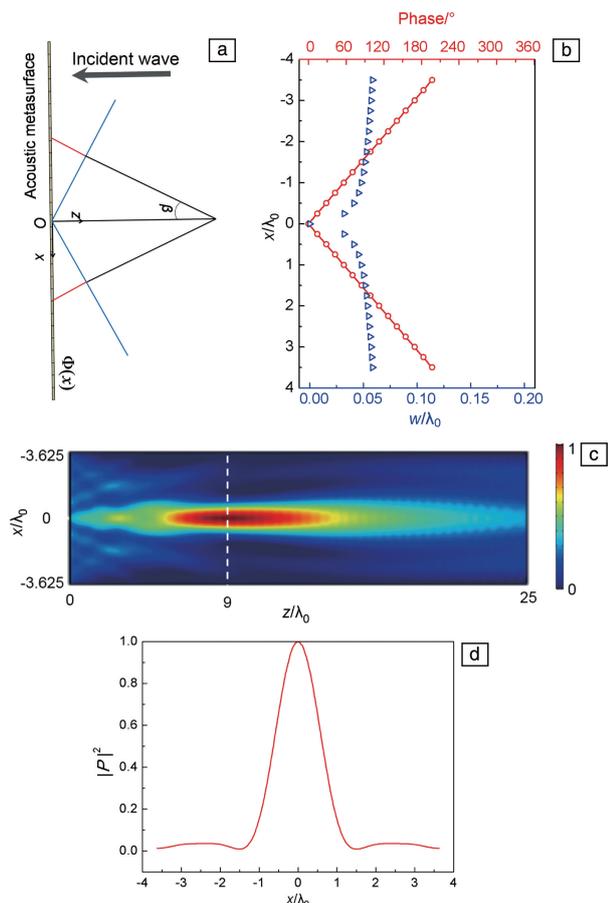


图 5 超薄平面声学校锥镜的相位设计原理示意图 (a)，棱锥镜长度为  $7.25\lambda_0$ ， $\beta = \pi/20$ ，红色线段表示为形成蓝色直线标记的等相位面，超表面需提供的相位差；超表面的相位分布 (b)，红色曲线和红色圆圈分别表示超表面沿  $x$  方向分布的理想连续相位和各单元实际产生的离散相位，蓝色三角形表示各单元的开口大小；垂直入射时棱锥镜的归一化散射声场图 (c)； $z = 9\lambda_0$  轴线上的归一化声强分布曲线 (d)

Fig. 5 Schematic for ultrathin planar acoustic axicon with length and base angle of  $7.25\lambda_0$  and  $\pi/20$ , respectively (a), in which the length of the red line refers to the phase difference the metasurface needs to provide for producing the desired equiphase surface marked by the blue line; The phase profile on the metasurface (b), the red curve and red circles refer to the desired continuous phase shift and the discrete phase shift provided by the metasurface along the  $x$  direction respectively, and the blue triangles represent the neck width of each unit; Normalized spatial distribution of acoustic intensity field for the designed axicon with normal incidence (c); Transverse cross-section of the normalized intensity profile at  $z = 9\lambda_0$  from the metasurface (d)

义 Snell 定律可知，相位分布  $\Phi(x)$  随位置  $x$  的变化关系应满足式 (6)：

$$\Phi(x) = \frac{2\pi}{\lambda_0} |x| \sin \beta \quad (6)$$

图 5b 为超薄平面声学校锥镜的理想连续相位分布以及各个单元产生的实际离散相位，对应位置处各超表面单元的开口大小也在图中标出。可以看出，超表面单元能够产生理论设计所需的线性相位分布。图 5c 给出的空间声场数值计算结果证明，基于超表面构建的具有超薄尺寸和平整外形的声学棱锥镜可将入射至其表面的平面声波转化为类贝塞尔声束，反射声波在离开发射面后不会因衍射效应迅速向外扩散，而是沿着预设发射方向进行低衍射传播，图 5d 展示了平行于超表面的轴线上 ( $z = 9\lambda_0$ ) 的声强分布图，可以看出，声波能量主要集中于宽度约  $\lambda_0$  的狭长区域内。这些结果都说明了在很长的传播距离内 (约  $25\lambda_0$ ) 均可观察到声能量的高效准直现象。此外，通过增加超薄平面棱锥镜的横向尺度，可以进一步提升类贝塞尔准直声束的传播长度。而通过将二维平面棱锥镜沿其对称中心旋转构造出三维平面结构，可在实际三维空间中精准生成完美的贝塞尔波束，具备无衍射及自修复特性，有望在声学成像及无损检测等重要场合产生关键应用。

## 6 结 论

反射波操控作为声学研究领域的基础问题之一，在诸如房间声学、噪音消除等实际场景中具有重要的应用。本文基于一种厚度仅为  $\lambda_0/20$  的轻薄硬质超表面单元，实现了对低频空气声波入射时所产生的反射声场的高效、精准操控。由于超表面单元为开口中空结构，允许通过调整单个参数——开口宽度来使其获得接近  $0 \sim 2\pi$  范围的相位反馈，避免了复杂的内部结构及额外能量损耗，从而在保证器件具有超薄平整外形的同时，确保了较高的能量反射率。此外，除了超薄的纵向厚度，该结构单元还具有比波长小得多的横向宽度 ( $\lambda_0/4$ )，保证了较高的空间相位分辨率，从而能够实现更加多样的操控。基于广义 Snell 定律设计了 3 类具有不同表面相位分布的超表面结构，期望用于实现任意角度的异常反射、基于超薄平面透镜的可调声聚焦以及利用超薄平面棱锥镜生成类贝塞尔声束，通过数值计算结果验证了所设计的声学人工结构能够满足各种特殊反射波操控效果的要求。实现基于轻薄硬质超表面对反射声场的操控，对新型平面声学器件的研究具有重要指导意义，有望在建筑声学、扬声器设计和噪声控制等领域发挥重要作用。

## 参考文献 References

- [1] GAREIA-CHOCANO V, GRACIA-SALGADO R, TORRENT D,

- et al.* Physical Review B[J], 2012, 85(18): 184102.
- [2] JING X, MENG Y, SUN X. Scientific Reports[J] 2015, 5: 16110.
- [3] XIE Y, SHEN C, WANG W, *et al.* Scientific Reports[J], 2016, 6: 35437.
- [4] ZHU Y, ZOU X, LI R, *et al.* Scientific Reports [J], 2015, 5: 10966.
- [5] FAN X, ZHU Y, LIANG B, *et al.* Applied Physics Letters [J], 2016, 109(15): 153501.
- [6] FAN X, ZHU Y, LIANG B, *et al.* Applied Physics Letters [J], 2016, 109(24): 243501.
- [7] LI Y, LIANG B, GU Z, *et al.* Scientific Reports [J], 2013, 3: 2546.
- [8] LI Y, JIANG X, LI R, *et al.* Physical Review Applied[J], 2014, 2(6): 064002.
- [9] QI S, LI Y, ASSOUX B. Physical Review Applied[J], 2017, 7 (5): 054006.
- [10] LI Y, ASSOUAR M. Scientific Reports[J], 2015, 5: 17612.
- [11] JIANG X, LI Y, LIANG B, *et al.* Physical Review Letters [J], 2016, 117(3): 034301.
- [12] XIE Y, WANG W, CHEN H, *et al.* Nature Communications [J], 2014, 5: 5553.
- [13] MEI J, WU Y. New Journal of Physics[J], 2014, 16(12): 123007.
- [14] MA G, YANG M, XIAO S, *et al.* Nature Materials[J], 2014, 13 (9): 873–878.
- [15] TANG H, CHEN Z, TANG N, *et al.* Advanced Functional Materials [J], 2018, 28(36): 1801127.
- [16] LI Y, ASSOUAR B. Applied Physics Letters [J], 2016, 108 (6): 063502.
- [17] TANG K, QIU C, KE M, *et al.* Scientific Reports [J], 2014, 4: 6517.
- [18] SHEN C, XIE Y, LI J, *et al.* Applied Physics Letters [J], 2016, 108(22): 223502.
- [19] YU N, GENEVE P, KATS M, *et al.* Science [J], 2011, 334 (6054): 333–337.
- [20] ZHU X, LI K, ZHANG P, *et al.* Nature Communications [J], 2016, 7: 11731.
- [21] XIAO S, MA G, LI Y, *et al.* Applied Physics Letters [J], 2015, 106(9): 091904.
- [22] LAN J, ZHANG X, LIU X, *et al.* Scientific Reports [J], 2018, 8: 14171.
- [23] LANI S, SABRA K, DEGERTEKIN F. Journal of the Acoustical Society of America [J], 2015, 137(4): 2265.
- [24] ZHU Y, FAN X, LIANG B, *et al.* Physical Review X [J], 2017, 7 (2): 021034.
- [25] ZHAO Y, LIU J, LIANG B, *et al.* AIP Advances [J], 2020, 10 (8): 085122.
- [26] AHMED N, LAVERY M, HUANG H, *et al.* Experimental Demonstration of Obstruction-Tolerant Free-Space Transmission of Two 50-Gbaud QPSK Data Channels Using Bessel Beams Carrying Orbital Angular Momentum [C]// Proceedings of 2014 European Conference on Optical Communication. Cannes, France: IEEE, 2014.
- [27] DU J, WANG J. Optics Letters [J], 2015, 40(21): 4827–4830.
- [28] KIM J, JEONG Y, LEE S, *et al.* Optics Letters [J], 2012, 37(4): 623–625.
- [29] BHUYAN M, COURVOISIER F, PHING H, *et al.* European Physical Journal-Special Topics [J], 2011, 199: 101–110.
- [30] YANG L, JI S, XIE K, *et al.* Optics Express [J], 2017, 25(7): 8144–8157.
- [31] ISMAIL O, REMO G, LUC F, *et al.* Optics Express [J], 2016, 24 (11): 11495–11504.
- [32] WANG Y, QU W, JIAO L, *et al.* Applied Physics B [J], 2015, 119(2): 241–245.

(编辑 惠琼)