

声单向操控研究进展

梁彬 袁樱 程建春

Recent advances in acoustic one-way manipulation

Liang Bin Yuan Ying Cheng Jian-Chun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 094305 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.094305

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094305>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I9>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

脉冲微波辐射场空间分布的热声成像研究

Pulsed microwave energy spatial distribution imaging by means of thermoacoustic tomography

物理学报.2015, 64(1): 014301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.014301>

纵向带状裂隙形貌的逆时偏移超声成像

Ultrasonic imaging for appearance of vertical slot by reverse time migration

物理学报.2014, 63(15): 154302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154302>

水下高斯界面背向散射超声散斑场的相位奇异

Phase singularities of an ultrasonic speckle field back-scattered from an underwater Gaussian interface

物理学报.2014, 63(5): 054301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.054301>

声波在含气泡液体中的线性传播

Linear wave propagation in the bubbly liquid

物理学报.2013, 62(6): 064304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.064304>

固-固无限周期声子晶体 $H$ 波全反射隧穿的谐振理论

Resonance theory of SH wave total reflection tunnel effect in 1D solid-solid infinite cycle phononic crystal

物理学报.2013, 62(4): 044301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.044301>

专题: 庆祝南京大学物理学科成立100周年

## 声单向操控研究进展\*

梁彬<sup>1)</sup> 袁樱<sup>2)</sup> 程建春<sup>1)†</sup>

1)(南京大学物理学院, 近代声学教育部重点实验室, 南京 210093)

2)(江苏理工学院数理学院, 常州 213001)

(2015年1月9日收到; 2015年1月28日收到修改稿)

电子二极管的发明标志着现代电子学的诞生, 在整个人类社会中引起了科技的深刻变革. 声波是一种具有非常悠久的历史的经典波, 却始终被认为仅具有对称的传播形式. 若能制造出可像电子二极管控制电流般实现声波单向导通的声学器件, 显然将对整个声学研究领域产生重大影响, 具有重要的科学意义及应用价值. 第一个基于非线性媒质与声子晶体的声二极管利用非线性突破声学互易原理的局限, 首次实现了将声能流限制在单一方向上的声整流效应. 针对非线性系统转换效率低下的固有缺陷, 在线性体系内围绕声单向传播这个重要科学问题开展了一系列理论和实验研究, 设计与制备了多种具有特殊结构和性能的线性声学单向结构, 在器件的效率、带宽及尺寸方面产生了突破. 在声二极管研究的基础上, 第一个可以像电子三极管操控电流般对声流进行操控与放大的声三极管理论模型也被提出. 本文介绍了声单向传播这一新兴且富有蓬勃生机的研究领域中的主要进展.

关键词: 声单向传播, 声二极管, 声子晶体, 声三极管

PACS: 43.35.+d, 43.25.+y

DOI: 10.7498/aps.64.094305

## 1 引言

众所周知, 电子二极管是第一个可产生整流作用的人造器件, 它的出现标志着现代电子学的诞生, 是科学发展史上的一个重要里程碑. 人类得以由工业社会逐渐进入丰富多彩的信息社会, 从根本上说是依赖于电子二极管的发明. 因此, 认为电子二极管是20世纪最伟大的创造之一是毫不为过的. 受电子二极管的启示, 对其他能量载体的单向操控研究开始得到广泛的关注. 对于电磁波, 人们利用磁光晶体的法拉第效应方便的设计出了可实现单向光传输的光隔离器. 在热学研究领域中, 可实现单向热传导的热二极管先后由新加坡国立大学的Li课题组<sup>[1]</sup>和美国加州州立大学伯克利分校的Chang等<sup>[2]</sup>及日本早稻田大学的Kobayashi等<sup>[3]</sup>分别在理论及实验上实现. 利用钢球组成的

非线性系统, 美国加州州立大学圣地亚哥分校的Nesterenko课题组也在实验上实现了对孤立波的整流作用<sup>[4]</sup>.

声与电是不同形式的能量载体, 但人类对声波进行研究和利用的历史要更为悠久, 声在自然界及日常生活中亦比电要常见得多. 因此, 若能够设计出一种声二极管器件来像电子二极管控制电流般产生声波的单向操控, 即当声波分别由这种器件两侧入射时有着类似电子二极管的单向传输特性, 显然将具有重要的科学意义及应用价值. 例如若将声单向传播机理应用于噪音或语音信号的处理, 将有可能实现类似单向可视玻璃的单向声屏障或吸声体. 此外, 声学学科具有极强的外延性, 一个典型的例子就是医学上应用超声进行诊断和治疗. 若能利用声学单向器件降低在医学超声成像过程或聚焦超声治疗中反射声波的不良影响, 将有望提

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2010CB327803, 2012CB921504)和国家自然科学基金(批准号: 11174138, 11174139, 11222442, 81127901, 11274168)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jcheng@nju.edu.cn

高成像的对比度及分辨率, 或降低对组织及声源的损害, 改善医学超声成像与治疗的质量与疗效, 甚至引发超声成像和治疗方式上的变革. 因此, 声波单向操控的实现将对于整个声学领域产生深远的影响.

然而, 声学理论中经典的互易原理决定了在任何线性声学系统中的传输特性都是互易的(如图1). 这与人们日常生活中直观感觉是一致的, 例如在某人能听到对方声音的同时, 对方也应能听到他/她的声音. 此外, 声波作为因媒质疏密变化而产生的机械波, 与电磁波具有迥然不同的本质属性, 并不具备类似电磁波的偏振特性或类似法拉第旋转的非互易效应, 使人们无法方便地利用这些效应来对其进行单向操控. 因此, 尽管声学是一门极为经典的学科, 但如何实现声波单向传播这样一个违反常规思维的现象始终是物理研究领域的难题之一.

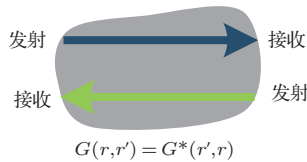


图1 线性声学系统中必须满足的互易原理示意图.  $G(r, r')$  为声源与测量点分别位于  $r$  与  $r'$  时的 Green 函数.  $G^*(r', r)$  为声源与测量点位置互换后的 Green 函数  
Fig. 1. Schematic illustration of the reciprocity principle in linear acoustic systems.  $G(r, r')$  ( $G^*(r', r)$ ) is the Green's function in the case when the source (receiver) and the receiver (source) are located at  $r$  and  $r'$  respectively.

## 2 非线性系统中的声整流效应

由声学互易原理可知, 线性声学系统显然不能满足实现非互易声传输的需要. 要实现声能流的整流作用, 必须引入非线性机理来打破整个系统的对称性. 2009年, 南京大学程建春课题组利用声子晶体与非线性声学媒质的巧妙组合, 创新性的提出了第一个简单却有效的声二极管理论模型, 首次实现了声能流的单向传输现象<sup>[5]</sup>. 声二极管的理论模型由一维声子晶体(亦称超晶格结构, 由厚度分别为  $d_I$  与  $d_{II}$  的媒质 I 与 II 交替层叠形成)与具有强声学非线性的媒质(厚度为  $d_{III}$  的媒质 III)组合构成, 如图2所示. 声学非线性机理的引入破坏了系统对称性, 使入射声能量可被部分转移到二次谐波. 另一方面, 声子晶体特有的禁带特性被用于产生滤波, 通过系统参数的合理调节, 使其对二次谐波呈带通

而对基波呈带阻. 该声二极管模型的正方向(负方向)可一般性的定义为声波由非线性媒质(声子晶体)一侧入射时的传播方向(如图1). 图3直观的表示了声二极管模型的基本工作原理. 当频率为  $\omega$  的声波沿正向传播时, 经声学非线性效应产生的二次谐波的频率变为  $2\omega$ , 处于声子晶体通带中, 因此可以通过整个系统. 此时整个声二极管系统部分导通, 且导通率随入射声强的提高不断增大, 而沿反方向入射的频率为  $\omega$  声波则基本被声子晶体完全反射, 表现出与电子二极管伏安关系极其类似的基本关系, 如图4所示. 图4中入射声波声压幅值  $p_0$  用大气压  $P_0 (= 1.01 \times 10^5 \text{ Pa})$  进行了归一化, 其取值符号表征了声波入射的方向: 取正(负)值代表声波沿正向(反向). 由图中可看出由声子晶体与非线性媒质构成的声二极管模型的一个重要特点, 即沿反方向入射时的声透射系数仅由声子晶体在禁带内的声衰减量决定, 其取值极小, 表明声二极管对反向入射的强声有极好的耐受性, 而电子二极管在反向电压过大时则容易被反向击穿, 这是声二极管较之电子二极管的一个显著优势, 对其高强度聚焦超声治疗等重要领域方面的应用具有重要意义.

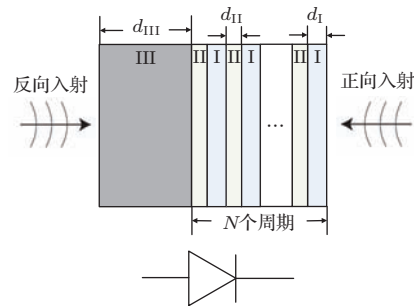


图2 一维声子晶体与非线性声学材料构成的声二极管理论模型剖面示意图(图中标出了声二极管的正方向和负方向)  
Fig. 2. Schematic cross section of an acoustic diode consisting of a one-dimensional phononic crystal and a nonlinear medium with the positive and negative directions marked.

Physical Review Focus 与 Nature News 等学术网站对声二极管的理论工作进行了专文评论与报道, 认为该工作开辟了一种全新的设计可能性, 但继续开展相关实验研究仍是非常必要的. 南京大学程建春课题组在2010年继续开展了相关实验研究并取得了突破, 制造了第一个有效的声二极管器件<sup>[6]</sup>. 声二极管器件的样品由一个声子晶体(由6片厚度均为1.4 mm的玻璃以1.1 mm的相同间距放在水中形成)与一块声学非线性材料(利用超声造影剂微泡溶液制作)组合而成, 实验测量则是通过在水槽中利用一对宽带声学换能器分别测量声

波沿样品两侧入射时的透射系数来完成, 如图 5 所示. 实验中选用超声造影剂微泡溶液的主要原因有两方面: 1) 超声造影剂微泡溶液已在理论上及实验上被证明具有很强的声学非线性效应, 十分有利于声二极管器件的设计制备; 2) 超声造影剂微泡已在医学超声等领域得到了广泛的临床应用, 这对于声二极管器件未来在相关领域的应用具有重要意义.

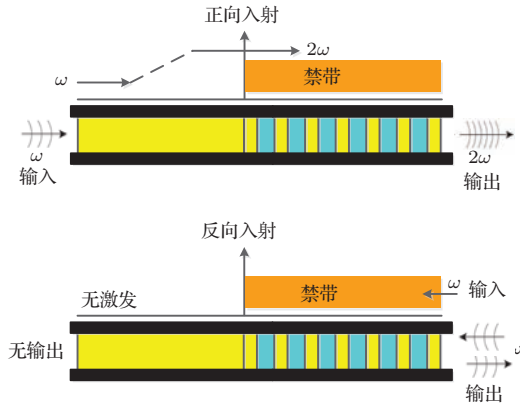


图 3 声二极管工作原理示意图

Fig. 3. Schematic illustration of the basic mechanism of an acoustic diode.

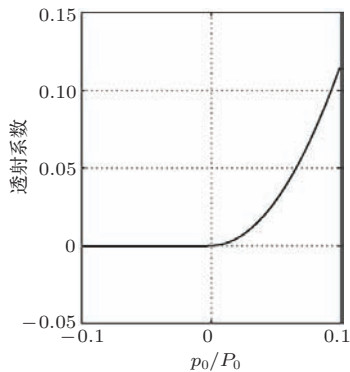


图 4 声二极管中声能量透射系数随入射声波幅度的变化关系

Fig. 4. The dependence of the total transmission on the amplitude of incident wave in an acoustic diode.

对由三个不同的非线性媒质样品构成的声二极管样品, 在 [0.5 MHz, 2.3 MHz] 频段内测量了可定量表征声二极管的整流特性的声整流比 (定义为  $T_+/T_-$ , 其中  $T_+$  与  $T_-$  分别为正方向与反方向上的能量透射系数), 结果如图 6 (a) 所示. 结果表明声二极管样品在理论预测的整流频带 (图中绿色区域) 内表现出了极高的整流效率, 实验中观测到的最大整流比接近  $10^4$ . 图 6 (b) 为实验测得的透射声能流随入射声压的变化曲线, 其基本关系与电子二极管的伏安关系极其类似. 在反方向声波的作用下系统始终保持截止状态, 而正向声能流可以高次谐

波的方式通过整个系统, 使系统呈现出部分导通的现象, 且导通率随入射声强的提高不断增大. 但过强的入射声将导致微气泡的破裂, 反而引起透射率降低. 此外, 由图可看出声二极管的工作效率受超声造影剂微泡浓度的影响, 存在一个相对的最优化值. 微泡浓度的增加可增强器件的透射效率, 但过高的微泡浓度却会造成气泡对声波的衰减效应过大. 因此, 声二极管器件的效率仍然较为低下, 有待进一步优化.

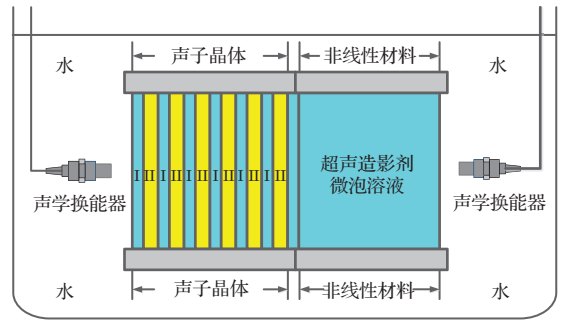


图 5 声二极管样品及部分测量装置的剖面示意图

Fig. 5. The schematic cross section of experimental set-up.

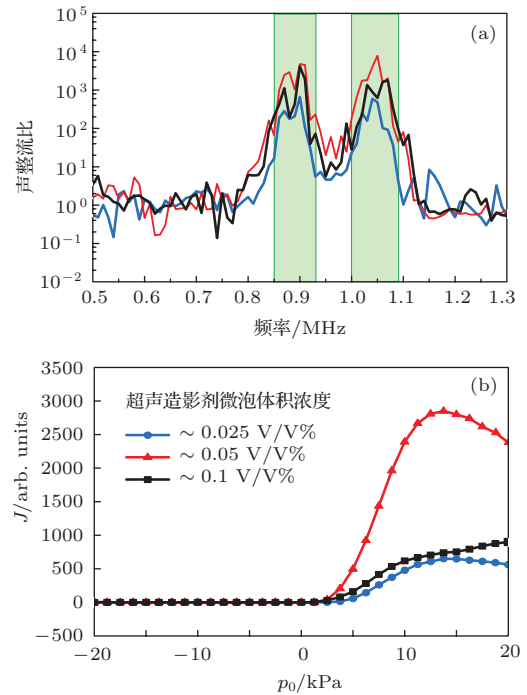


图 6 对三个不同的非线性媒质样品构成的声二极管模型测量得到的 (a) 声整流比曲线和 (b) 透射声能流的幅度依赖关系曲线 (三个非线性媒质样品的造影剂微泡体积浓度分别为  $\sim 0.025\%$  (蓝线),  $0.05\%$  (红线) 及  $0.1\%$  (黑线))

Fig. 6. The measured (a) rectifying-ratio and (b) amplitude-dependence of transmitted energy flux for three particular prototypes with different bubble concentrations:  $\sim 0.025\%$  (blue line),  $0.05\%$  (red line) and  $0.1\%$  (black line).

声二极管的实验研究工作迅速引起了物理学界与声学界的广泛关注, Nature News, Physics Today 及 American Institute of Physics 等重要学术网站相继对其进行专文介绍与报道, 认为声二极管的出现对于声学领域可能有着不亚于电子二极管对于电子学般的重要意义.

声二极管结构启发了一系列后续的理论实验工作. 例如 Boechler 等利用一维周期性链球结构实现了孤波的整流作用<sup>[7]</sup>. 该结构由一系列具有非线性相互作用的钢球构成(如图 7 所示), 允许低于某个截止频率  $\omega_C$  的孤立波通过. 当另一个不同的钢球作为缺陷引入时, 在缺陷附近会产生一个新的局域模式, 其频率  $\omega_D > \omega_C$ . 当角频率满足  $\omega_C < \omega < \omega_D$  的波沿反方向入射时, 由于周期性结构中禁带的存在, 将无法通过该链球结构. 然而, 当沿正方向入射时, 频率为  $\omega$  的小振幅孤波虽然无法通过, 但将激发作为缺陷引入的钢球附近的局域模式. 当入射波振幅增加时, 其能量将被转移到满足  $\omega < \omega_C$  的模式上去. 该频率处于禁带之外, 因此入射波将能够通过整个系统, 产生单向传输效果.

声二极管首次实现了声波的单向传播, 但是由于一般情况下非线性谐波转换效率极低, 极大的限制了此类器件产生实际应用的可能性. 针对该问题, 程建春课题组设计了一种由非线性 Fabry-Perot 型谐振腔和一维声子晶体构成的声二极管结构模型<sup>[8]</sup>, 其基本结构如图 8 所示, 图 8(a) 中  $W$  和

$G$  分别代表水层和玻璃层, NLM 代表非线性媒质 (nonlinear medium), 图 8(b)—(d) 中频率  $f$  用谐振腔的本征频率  $f_0$  进行了归一化. 利用高品质因数谐振腔中的共振效应, 该结构可以极大的增强入射声波与非线性材料层之间的相互作用, 高效地将声能量从基波转到二次谐波, 更有效的对声能流进行单向控制. 相比于原有的声整流结构, 该结构从根本上改变了透射声波与入射声波幅度之间的依赖关系, 透射率不再随入射声幅度的增加而单调增长, 使小振幅声波入射时的谐波转换效率得到了数量级上的提高(图 9), 显著降低了器件尺寸及其对非线性系数的要求, 并有望应用于声强相对更低的超声环境中.

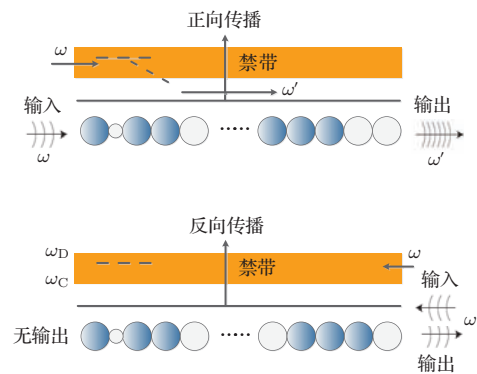


图 7 一维链球结构中的整流效应示意图

Fig. 7. Schematic of the rectification in one-dimensional granular crystal.

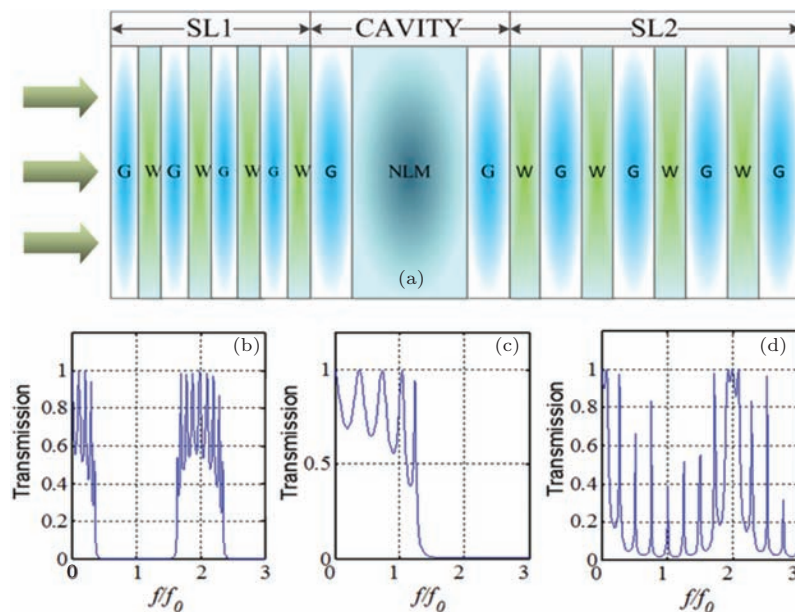


图 8 基于非线性 Fabry-Perot 型谐振腔的声整流结构示意图 (a) 和各部分结构透射特性: (b), (c) 和 (d) 分别为右侧、左侧声子晶体及中间非线性材料层的透射谱

Fig. 8. The schematic of acoustic diode based on nonlinear Fabry-Perot resonance cavity (a) and the transmission spectra of the superlattices on the right (b) and the left (c) and the nonlinear medium in between (d).

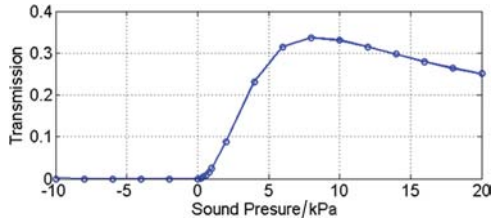


图9 基于非线性 Fabry-Perot 型谐振腔的声整流结构中能量透射率随入射声强的变化关系

Fig. 9. The dependence of the transmission on the acoustic pressure of the incident wave for acoustic diode based on nonlinear Fabry-Perot resonance cavity.

### 3 线性系统中的声单向传播

可使声波沿单行道传播的声二极管的实现, 不仅富含基础性的科学意义, 亦有望表现出广阔的应用前景. 然而, 由于声学非线性转换效率方面的固有缺陷, 导致了基于非线性效应的声学单向结构的导通率相对较低, 上述利用共振结构提升效率的做法亦是以牺牲带宽为代价, 远无法满足实际应用的需求. 此外, 从现代电子学的发展历程及趋势可知, 基本元件的出现必然伴随着对其小型化、集成化等特性的强烈需求. 显然, 声二极管表现出的样品尺寸大、材料鲁棒性差等缺点, 无法直接应用于相关的声学集成化器件的开发.

与非线性声学系统相比, 线性声学系统在声能量的传输效率与带宽方面均具有天然的优势. 若能用线性系统实现声波的单向控制, 将显著提高声学单向结构的能量导通率及工作带宽等方面性质, 有利于进一步提高可真正产生实际应用的声单向器件的可能性. 因此, 人们也开展了一系列对线性系统中声单向传播的理论及实验研究, 以期取得声单向器件性能方面的突破<sup>[9-18]</sup>. 这里需要强调的是, 利用线性声学系统来实现声学单向传输, 并非是对经典的互易原理的违背. 此类单向传输现象仅能对特定方向入射的、特定模式的声波实现, 不属于声学非互易传输的范畴. 然而, 与非线性声二极管结构相比, 基于线性系统的声学单向器件在效率与带宽等方面的特性确实得到了极大的改善.

程建春课题组提出了一种由对称结构与反对称结构构成的板状结构(如图 10(a)), 利用此类结构中存在的不对称模式转换效应实现了 Lamb 波的单向导通<sup>[9]</sup>. 该单向结构的基本原理如图 10(b)所示, 正向入射的情况下, 反对称(对称)模式的 Lamb 波先被反对称结构转换为两种模式共存的杂化模式, 再由对称结构选择其中的对称(反对称)模式通

过, 而反向入射的反对称及对称模式的 Lamb 波均直接被对称结构反射. 数值计算表明该线性结构能在所设计的频带内有效产生 Lamb 波的单向传输现象, 典型结果如图 11 所示. 图中红线和蓝线分别表示正向与反向传播 Lamb 波的透射系数, 黑线为用于对比的无结构均匀薄板的相应结果. 由图可看出, 与非线性声整流结构相比, 该线性系统中声单向传播的导通效率得到了显著提高. 此外, 声波在通过这种线性声学单向结构时并不改变频率, 其制备亦较之非线性单向结构要简单得多.

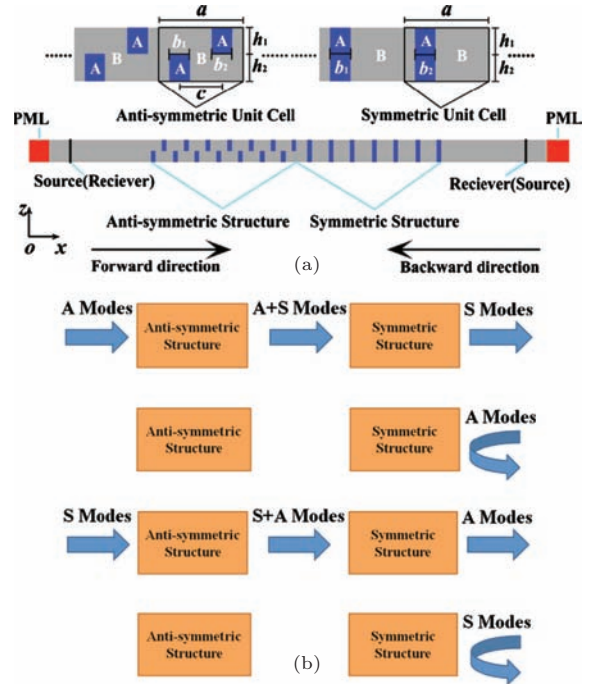


图 10 (a) 基于不对称模式转换的线性单向声学结构; (b) 相关工作原理示意图

Fig. 10. (a) The schematic illustration and (b) the basic mechanism of the linear one-way plate based on asymmetric mode conversion.

2011年, 南京大学陈延峰课题组也提出了利用线性声学结构来实现声单向传播的理论方法并制备了原理性器件<sup>[10]</sup>. 该单向结构的基本结构及工作原理如图 12 所示, 其关键特性在于一侧的外表面是光滑的, 而对侧则是粗糙的. 当频率范围处于声子晶体禁带内( $\sim 10$  kHz)的平面声波垂直入射到光滑表面时(该方向可定义为负方向), 入射声能量基本被声子晶体全部反射. 但当声波沿粗糙一侧垂直入射时(可定义为正方向), 声能量能够被允许部分透过整个系统. 由于沿正方向入射的声波在出射时的方向并不与原来的入射方向平行, 声能量实际上是通过高阶衍射效应转换为了其他模式, 因而能够不受声子晶体禁带的限制作用.

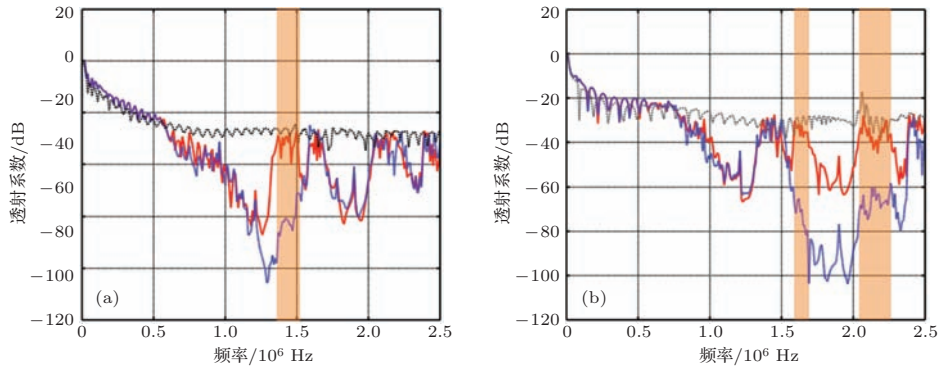


图 11 反对称模式与对称模式的 Lamb 波入射下, 单向导通板的能量透射谱 (a) 反对称模式; (b) 对称模式

Fig. 11. The transmissions in the one-way plate for (a) A mode and (b) S mode of Lamb waves.

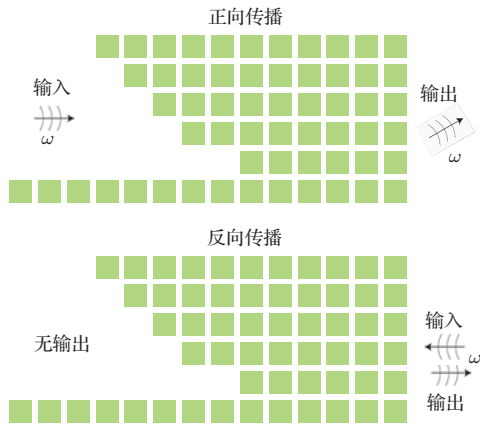


图 12 二维声子晶体 (由半径 4 mm 的方形钢柱构成, 晶格常数为 7 mm) 与衍射结构构成的线性声二极管模型及其工作原理示意图

Fig. 12. A linear acoustic diode comprising a two-dimensional phononic crystal, made of steel rods with diameter of 4 mm in a square lattice with lattice constant of 7 mm, and a diffraction structure.

上述工作中仅考虑了无限大/半无限大系统中的声单向传输现象, 尚未考虑有限系统中的单向声传播问题. 然而, 实际的声学系统显然都不可避免的具有有限的尺寸, 且各种声学器件中的声信号通常通过波导结构进行传播. 因此对波导这一典型声学环境中的声单向传播的研究显得尤为重要. 2012 年程建春课题组利用声子晶体的部分禁带的特性, 设计了一种线性的单向声学波导结构并制备了原理性器件<sup>[19]</sup>. 其基本结构如图 13 (a) 所示, 通过在一个具有拐角的声学波导结构中放置一个二维声子晶体结构构成 (图中  $a$  表示声子晶体的晶格常数). 图 13 (a) 中分别用带“+”号和“-”号的箭头标出了该单向结构的正方向和负方向. 该结构中声子晶体的参数可根据波导结构的具体结构设计, 使其表现出部分禁带特性, 如图 13 (b) 中的能带结构所示 (其中  $\Gamma$ ,  $M$  及  $X$  点所围区域为第一

布里渊区). 当平面声波沿正向入射时, 相当于沿声子晶体的  $\Gamma M$  方向入射, 此时入射波矢的方向使其不受声子晶体部分禁带的作用, 入射声波能够通过整个波导系统. 而反向入射的平面声波则相当于沿声子晶体的  $\Gamma X$  方向入射, 受部分禁带作用而无法传播, 从而在较宽的频率范围内实现了高效率的单向声传播, 如图 14 所示. 本文中用  $c_0$  表示背景媒质中声速大小, 此处背景媒质选为空气, 因而有  $c_0 = 340$  m/s).

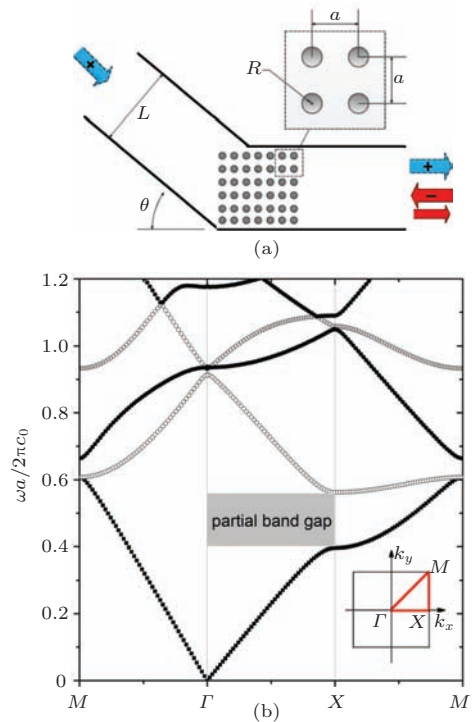


图 13 (a) 单向声波导结构示意图; (b) 所含的声子晶体的色散关系曲线

Fig. 13. (a) Schematic illustration of directional waveguide and (b) the dispersion curve of the phononic crystal.

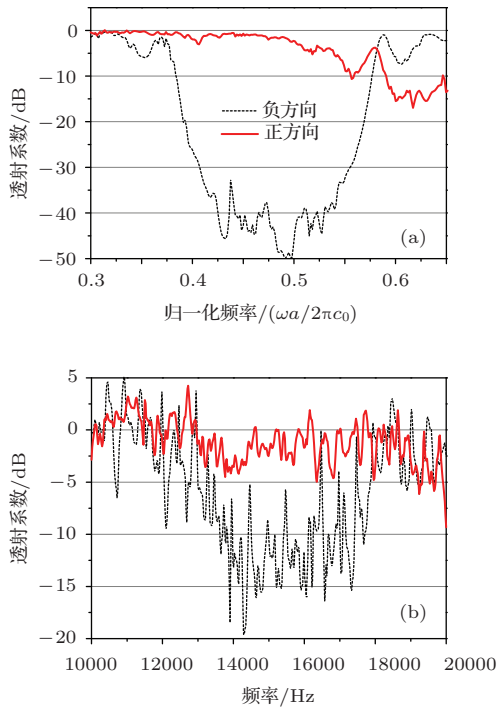


图 14 理论计算 (a) 与实验测量 (b) 得到的声波由波导两个开口入射时的透射曲线

Fig. 14. The numerical (a) and experimental (b) results of the transmissions for acoustic waves incident from the two openings of the waveguide.

但是, 声子晶体的晶格尺寸与声波波长密切相关, 因此基于声子晶体的声单向结构的尺寸都相对较大, 特别是在低频段. 这给此类结构的实际应用带来了很大困难. 2012年程建春课题组设计并制备了一种薄层结构的声波单向器件<sup>[11]</sup>. 提出的声学单向结构如图 15 所示, 由一块均匀金属板(厚度  $t_2$ ) 和一个声栅(厚度  $t_1$ , 栅格宽度  $w$ , 单个周期宽度  $p$ ) 结构组合而成(间距  $s$ ). 其基本工作原理如图 16 所示, 其中给出了单个元胞在不同情况下的声能量分布对比. 由图可看出, 当平面声波垂直入射到栅格上, 栅格和金属板之间存在的腔体会使原本均匀的声能量被重新周期分布, 这种周期激励能强迫金属板发生弯曲振动, 然后通过板和周围介质的耦合使得声波辐射出去. 相反, 当平面声波从反向入射到金属板上时, 由于金属与水的声阻抗严重失配, 根据声学中经典的质量隔声定理可知声波基本不能够透过金属板. 该薄层单向声学结构尽管整体厚度仅与工作波长相当, 却能以很高的效率实现声波的单向传播, 这对于声二极管器件的小型化与集成化是很有意义的.

上述声学单向器件的基本结构均由两部分构

成, 即一个能够改变入射波频率或波矢的转换器, 以及一个能够对入射波和转换后声波产生不同透射特性的滤波器. 因此, 这些模型可以使相反方向入射的声波具有不对称的透射性质. 然而, 这种工作机理显然会导致一些共有的缺陷. 一方面, 这种转换及滤波机理通常利用衍射或能带效应产生, 仅对特定波长的入射波有效, 因此不对称声传播现象只能在较窄频带内存在. 另一方面, 声波发生衍射或非线性转换的过程不仅降低了能量的传输效率, 更造成出射波形十分混乱. 这些缺陷对于声单向器件在超声成像及治疗等实际场合中的应用非常不利.

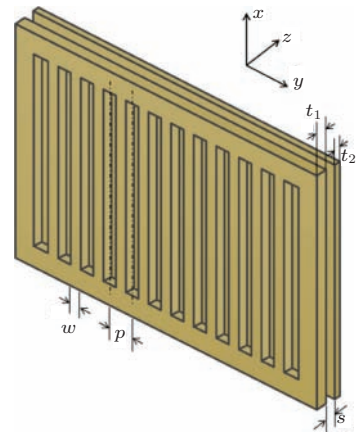


图 15 薄层声单向结构的三维示意图

Fig. 15. Three-dimensional illustration of the one-way structure with thin thickness.

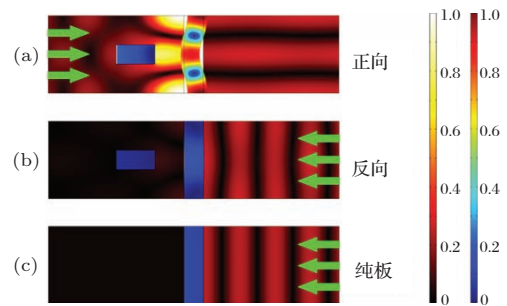


图 16 (a) 正向入射, (b) 反向入射以及 (c) 金属板的声能量分布图. 绿色箭头表示声波的入射方向.

Fig. 16. The spatial distribution of acoustic intensity for the case of (a) positive incidence, (b) negative incidence and (c) pure metal plate. The incidence directions are indicated by the green arrows.

针对单向声传播仅能在较窄频带内实现的难题, 程建春课题组于 2012 年提出了一种不同的设计思想, 即利用声学梯度材料使两个相反方向入射的声波具有不同的传播路径, 从而在极宽的频率范围内实现了不对称声传输<sup>[13]</sup>. 该结构的基本模型



如图7(a)所示, 图中渐变的颜色表明声速的空间分布. 主要由三部分构成. 第一部分(梯形ABCD)由所设计的声学梯度结构填充, 其折射率沿 $x$ 方向从 $n_0$ 以线性方式渐变至某一特定值 $n_1$ (其中 $n_0$ 为背景媒质的折射率, 并假定 $n_1 < n_0$ ), 上边界设置为吸收边界. 第二部分(三角形DEC)是声速等于 $c_1$ 的均匀结构, 第三部分(矩形EFGC)是声速由 $c_1$ 渐变至 $c_0$ 的梯度结构. 第一部分主要用于产生不对称声传播效应, 而第二及第三部分主要用于在边界上消除声阻抗的不匹配. 其基本工作机理如图17(b)和(c)所示, 图中箭头标识了声波入射方向. 当平面波由左侧入射时, 由于声速在 $x$ 增大的方向上始终减小, 声波相当于由高折射率媒质进入低折射率媒质, 因此会不断向法线方向偏转, 大部分声能量能够透过整个模型. 因此该方向可定义为正方向. 而当声波沿右侧入射时, 由于始终相当于进入高折射率媒质, 传播方向会不断向模型的上边界偏转, 而最终被吸收. 因此该方向可定义为负方向. 图18的数值计算结果表明该结构可以在极宽的频率范围内产生声波的不对称的传播现象, 与利用声线理论所得解析结果进行的预测能够很好符合.

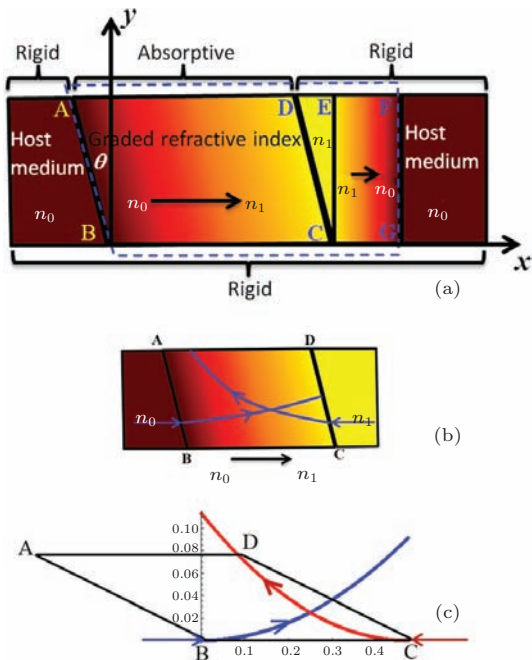


图17 宽带非对称声学结构模型(a)及非对称声轨迹(b)示意图; (c)利用声线理论严格计算得到的非对称声轨迹  
Fig. 17. The theoretical model (a) and the asymmetric trajectory (b) in the broadband asymmetric structure. (c) The asymmetric trajectory strictly derived by geometric acoustic theory.

为解决前述的声单向器件中出射波通常波形混乱且效率较低的问题, 程建春课题组于2013年提出了一种由近零折射率材料构成的二维声棱镜结构(如图19所示), 并通过这个结构实现了高效的声单向传输效应<sup>[14]</sup>. 由于近零折射率材料固有的隧穿效应, 其等效相速度趋向于无穷大. 因此, 可以很方便的由图19(b)所示的慢度图推算出, 只有沿近零折射率材料表面法向入射时, 其切向波矢方可与空气匹配(图中 $k_n$ 和 $k_t$ 分别为空气中的法向与切向波矢,  $k'_n$ 和 $k'_t$ 分别为近零折射率材料中的法向与切向波矢). 换言之, 此类材料的临界角 $\theta_{cr}$ 接近零度. 因此, 当平面声波沿棱镜结构左侧入射时, 相当于斜入射至左侧的界面1, 因入射角远大于临界角而无法进入棱镜结构; 而沿右侧入射的声波则因垂直入射到界面2上能被允许进入棱镜结构, 并在穿过整个系统后沿界面1的法向出射, 如图19(a)所示. 因此, 该结构可以对两侧垂直入射

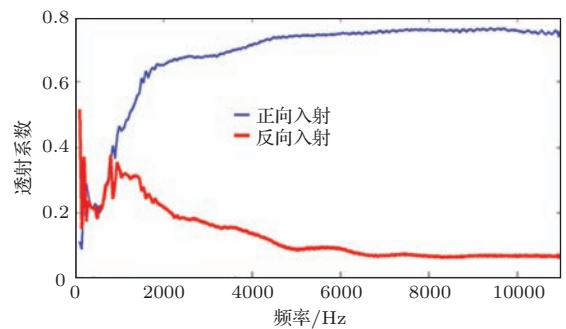


图18 声波沿结构两侧入射时的透射系数频率响应曲线  
Fig. 18. Transmission spectra of acoustic waves incident from two opposite sides.

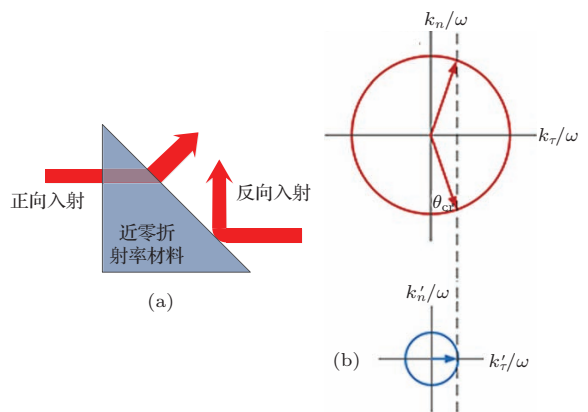


图19 (a) 零折射率材料构成的单向棱镜结构; (b) 从空气和零折射率材料的慢度图可以推出临界角  
Fig. 19. (a) The schematic illustration of the one-way prism made of near-zero index medium. (b) The critical angle can be derived from the slowness surface of air and the near-zero index medium.

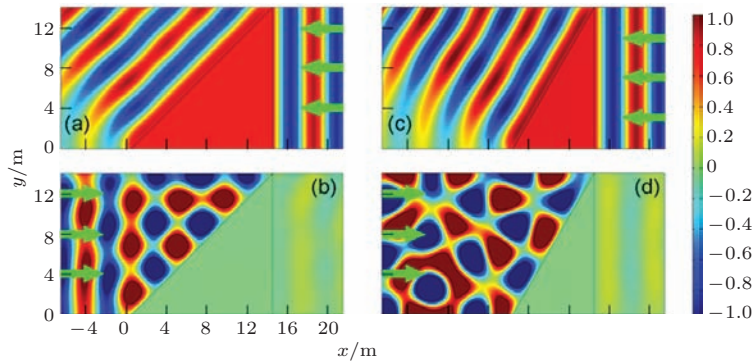


图20 倾角为45°的声棱镜系统在 (a) 正向和 (b) 反向入射下的声压分布图. 倾角为60°的声棱镜系统在 (c) 正向和 (d) 反向入射下的声压分布图

Fig. 20. The spatial distribution of acoustic pressure for one-way prism with 45° incline in the cases of (a) positive incidence and (b) negative incidence. The corresponding results for prism with 60° incline in the cases of (c) positive incidence and (d) negative incidence.

的声波实现高效的单向调控, 且正向传播声波的出射角度可以非常方便的通过调节棱镜的倾角进行调控. 数值计算结果证明了该结构能够以极高的效率实现声波的单向传输, 且正向情况下的出射波的波形都几乎和入射波的波形相同(图20). 这种单向结构特有的波形保持及出射角可调的性质对于声学单向器件在超声医学成像及治疗领域的潜在应用是非常重要的. 该工作被 American Institute of Physics 以作为研究亮点形式专文报道, 其后得到 Science Daily, Physics News, PHYSORG 等多家科学网站相继转载, 并被顶级学术科普网站 Scientific American 制作成“科学60s”节目.

#### 4 声学三极管效应

尽管电子二极管的发明对于现代电子学的发展具有至关重要的作用, 但当代数字电路技术的诞生实际是以电子三极管的出现为真正标志. 对于光学或热学而言, 亦有着同样的发展历程: 光学二极管/热二极管的出现催生了能够实现光波/热流放大及开关作用的光学三极管/热三极管的发明. 上述工作中已经提出了可以像电子二极管控制电流一样实现声能流单向传播的声二极管模型并制备了原理性器件. 因此, 如能实现可对声波的放大及开关作用的声三极管, 将有望对整个声学领域产生重要的影响, 尤其对于聚焦超声治疗等需要对声能流实现特殊操控的领域意义重大. Nature Material 杂志在2010年的一篇关于声二极管的评论文章中就展望了这种可能性[20].

2014年程建春课题组提出了第一个声三极管理论模型, 可以像电子三极管操控电流般对声流

进行操控与放大[21]. 该模型为一个三端口的波导系统, 分别对应于电子三极管中的射极、基极和集电极, 如图21(a)所示. 图中NLM代表非线性媒质, LP<sub>1,2</sub>代表两个不同的声学低通(Low Pass)滤波器, 其频响特性在下面的图22中给出. 当声波波长远远大于波导截面尺寸时, 可将其简化为图21(b)的一维模型进行分析. 作为电子三极管的声学类比, 由基极端口输入的信号波(频率为 $\omega_s$ )可以用来控制集电极端口输出的另一个具有更强能量的输出信号(频率为 $\omega_s$ ), 由射极端口输入的抽运声波(频率为 $\omega_p$ )则作为放大声能量所需的能量来源. 这种声波的放大和开关效应的物理机理是通过非线性系统中三波混频作用转移到信号波上的声能量大于因非线性作用损失的能量. 基本的工作原理如图22所示. 在此基础上系统研究了非线性强度及抽运波强度等参数对声三极管性能的影响规律, 典型结果如图23所示, 图中 $I_s$ 和 $I_o$ 分别为输入

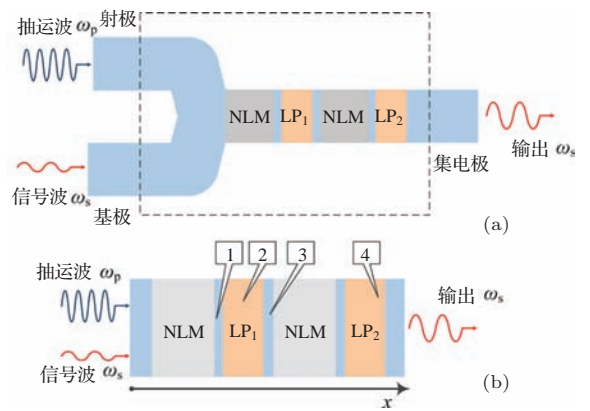


图21 (a) 声三极管示意图; (b) 简化一维模型  
Fig. 21. (a) Schematic illustration of an acoustic transistor (b) simplified one-dimensional model.

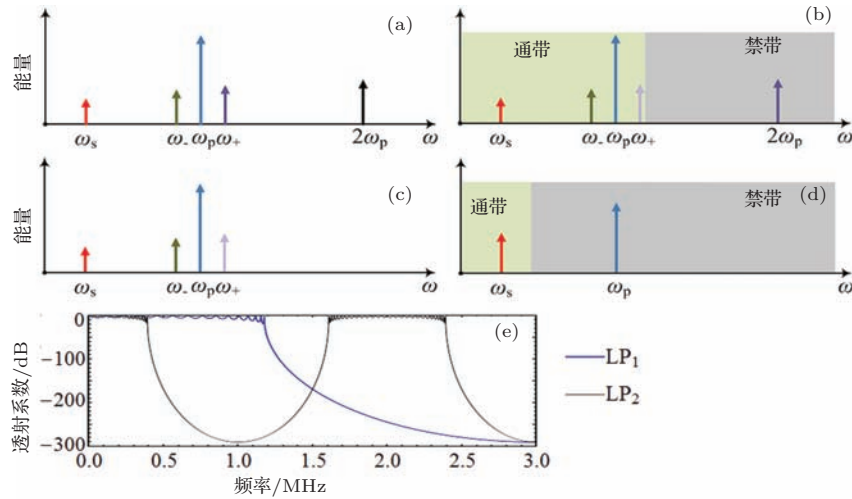


图 22 (a)—(d) 图 21 中 1—4 区域中的频谱成分示意图; (e) 图 21 中标记为 LP<sub>1</sub> 和 LP<sub>2</sub> 的两个声晶体的透射谱  
 Fig. 22. (a)—(d) The schematic illustration of the spectral components in regions 1—4 marked in Fig. 21. (e) The transmission spectra of the two phononic crystals LP<sub>1</sub> and LP<sub>2</sub> in Fig. 21.

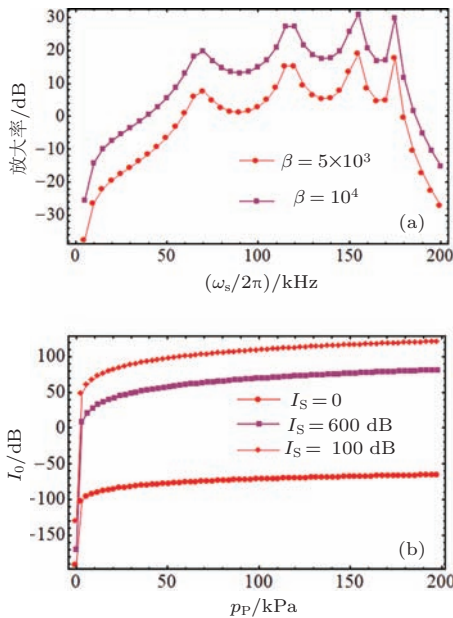


图 23 (a) 两种不同非线性强度下的声三极管放大率对比; (b) 输出信号强度与抽运波强度间的关系曲线  
 Fig. 23. (a) The amplification ratio of the acoustic transistor with two particular nonlinearities. (b) The dependence of the output signal on the amplitude of the pump wave.

与输出信号的声强,  $\beta$  为非线性媒质的等效非线性参数大小. 数值计算结果表明声三极管模型可以像电子三极管调控电流般实现对声能流的控制, 尤其是该结构中输出声信号与输入声信号具有相同频率, 表明其具有用于实现级联以及逻辑运算的潜力. 声三极管首次实现了声能流的放大与开关效应, 并提供了实现声学逻辑门等新概念器件的可能性, 有望在声学信号处理等领域产生广泛应用并启发新的设计思想.

### 参考文献

- [1] Li B, Wang L, Casati G 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 184301
- [2] Chang C W, Okawa D, Majumdar A, Zettl A 2006 *Science* **314** 1121
- [3] Kobayashi W, Teraoka Y, Terasaki I 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 171905
- [4] Nesterenko V F, Daraio C, Herbold E B, Jin S 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 158702
- [5] Liang B, Yuan B, Cheng J C 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 104301
- [6] Liang B, Guo X S, Tu J, Zhang D, Cheng J C 2010 *Nature Mater.* **9** 989
- [7] Boehler N, Theocharis G, Daraio C 2011 *Nature Mater.* **10** 665
- [8] Kan W W, Liang B, Zhu X F, Zou X Y, Yang J, Cheng J C 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 134508
- [9] Zhu X F, Zou X Y, Liang B, Cheng J C 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 124909
- [10] Li X F, Ni X J, Feng L, Lu M H, He C, Chen Y F 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 084301
- [11] Li Y, Tu J, Liang B, Guo X S, Zhang D, Cheng J C 2012 *J. Appl. Phys.* **112** 064504
- [12] Yuan B, Liang B, Tao J C, Zou X Y, Cheng J C 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 043503
- [13] Li R Q, Liang B, Li Y, Kan W W, Zou X Y, Cheng J C 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 263502
- [14] Li Y, Liang B, Gu Z M, Zou X Y, Cheng J C 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 053505
- [15] Zou X Y, Liang B, Yuan Y, Zhu X F, Cheng J C 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 164504
- [16] Li C H, Ke M Z, Ye Y T, Xu S J, Qiu C Y, Liu Z Y 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 023511
- [17] Jia H, Ke M Z, Li C H, Qiu C Y, Liu Z Y 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 153508
- [18] Danworaphong S 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 201910
- [19] Yuan B, Liang B, Tao J C, Zou X Y, Cheng J C 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 043503
- [20] Li B W 2010 *Nature Mater.* **9** 962
- [21] Liang B, Kan W W, Zou X Y, Yin L L, Cheng J C 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 083510

SPECIAL ISSUE—Celebrating 100 anniversary of physical science in Nanjing University

## Recent advances in acoustic one-way manipulation\*

Liang Bin<sup>1)</sup> Yuan Ying<sup>2)</sup> Cheng Jian-Chun<sup>1)†</sup>

1) (Key Laboratory of Modern Acoustics, MOE, Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

2) (The School of Mathematics and Physics, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

( Received 9 January 2015; revised manuscript received 28 January 2015 )

## Abstract

Realizations of one-way manipulations in various kinds of energy flux are always highly desirable. The most famous example should be the invention of electric diodes which marked the emergence of modern electronics and resulted in worldwide technology revolutions. Acoustic wave, albeit a classical wave with much longer research history in comparison with the electricity, has long been thought to propagate easily along two opposite directions in any path. Hence it should be intriguing to realize the one-way transmission of acoustic waves by designing the acoustical analogy of electric diodes, which would have deep implications in all the acoustics-based applications and the field of acoustics in general. In this review, we briefly describe recent advances in acoustic one-way manipulation which has become a new frontier of science and is of remarkable significance in both the physics and engineering communities. The emergence of the first “acoustic diode”, formed by coupling a phononic crystal (PC) with a nonlinear medium, offers the possibility of rectifying acoustic energy flux by breaking through the barrier of reciprocity principle via the introduction of nonlinearity. Despite of the efforts in enhancing the performances of nonlinear acoustic diodes by updating their structures, the inherent shortcomings in nonlinear systems such as low efficiency and narrow bandwidth still attract considerable attentions on the potential of linear structures, aiming at constructing a one-way manipulation on particular modes of an acoustic wave without breaking the reciprocity principle. A series of linear acoustic one-way devices have already been designed and fabricated with significantly improved performances. On the basis of asymmetric mode conversion, a linear one-way plate for Lamb waves is designed. High efficient one-way transmission for plane waves propagating along two opposite directions is realized by coupling a PC and a diffraction structure. Unidirectional waveguide is designed and fabricated which only allows for a plane wave incident from one of the two openings to pass. A unidirectional structure with a total thickness as thin as the wavelength is realized by reconstructing the otherwise plane wavefront with acoustic gratings. An acoustic gradient-index structure is proposed that can directly manipulate the wave trajectory asymmetrically and then yield asymmetric acoustic transmission within a considerably broad band. Acoustic metamaterials with near-zero indexes have also been employed to realize unidirectional transmission with a controllable transmitting angle and consistent wavefront. These advances are important steps towards the practical applications which generally require integration and minimization of devices having high efficiency and broad bandwidth. The recently emerged “acoustic transistor” has been described as well, which can be regarded as the acoustical counterpart of an electric transistor and enables the amplification and switch of acoustic waves by an acoustic wave, or by exploiting the three-wave mixing effect. We also discuss the challenge and promise of the usage of acoustic one-way devices in controlling acoustic waves.

**Keywords:** acoustic one-way transmission, acoustic diode, phononic crystal, acoustic transistor**PACS:** 43.35.+d, 43.25.+y**DOI:** 10.7498/aps.64.094305

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant Nos. 2010CB327803, 2012CB921504), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11174138, 11174139, 11222442, 81127901, 11274168).

† Corresponding author. E-mail: [jcheng@nju.edu.cn](mailto:jcheng@nju.edu.cn)