

声波的“单行道”^{*}

——声二极管的理论实验研究

梁彬 程建春[†]

(南京大学物理学院声学研究所 南京 210093)

摘要 作为第一个可实现电整流的器件,电子二极管的发明标志着现代电子学的诞生,并在全球范围内引发了各个领域内的革命,最终深刻地改变了我们的整个生活. 声波作为一种重要的经典波,具有比电磁波更为悠久的历史及更为普遍的存在形式. 因此,若能设计并实现一种可像电子二极管控制电流那样对声能量进行整流的声学器件,这将对声学的器件制造、实际应用乃至整个声学研究领域都产生重大影响,其学术意义及应用价值的重要性不言而喻. 文章详细介绍了利用超晶格与非线性声学材料构成的声二极管的理论实验方面的最新研究进展.

关键词 声二极管,声整流,超晶格,非线性声学材料,气泡

One-way street for acoustic waves: Theoretical design and experimental realization of acoustic diodes

LIANG Bin CHENG Jian-Chun[†]

(*Institute of acoustics, Department of physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

Abstract The invention of electric diodes, which were the first devices to enable the rectification of current flux, marked the emergence of modern electronics, led to worldwide revolutions in many aspects, and eventually changed our daily lives significantly. Compared with electricity, the acoustic wave is an important form of classical wave that is more ubiquitous in nature and has a much longer research history. It is therefore apparent that the counterpart devices for rectifying acoustic propagation, if they could be successfully designed and fabricated, would have deep implications for acoustic devices and applications, and the field of acoustics in general. This article presents a comprehensive discussion of the theoretical design and experimental realization of an acoustic diode that consists of a superlattice and a nonlinear acoustic medium.

Keywords acoustic diode, acoustic rectification, superlattice, nonlinear medium, bubbles

1 能量可以走“单行道”吗? ——声整流实现具有重大意义

在喧闹繁华的城市中,尽管我们身边的大多数道路都是双向通车的,但在一些特定情况下(例如交通特别拥堵的城市道路),将车流限制在单一方向上(也就是我们日常所见的单行道)是非常重要的.事实上,除了真实可见的车辆外,人们也可以令看不见的能量沿“单行道”前进——即实现所谓的整流效

应. 最重要的例子就是我们在每一个电路中都可以看到身影的电子二极管,其最基本、也是最重要的功能是电的单向导通性. 作为第一个可对能量产生整流作用的人造器件,电子二极管的发明具有里程碑式的重要意义,在世界范围内产生了极为深远的影响,引起了现代社会的根本性变革. 可以说,没有电

^{*} 国家重点基础研究发展计划(批准号:2011CB7079)、国家自然科学基金(批准号:10804050,10874086,10974093,11074123)资助项目

2012-03-09 收到

[†] 通讯联系人. Email: jcheng@nju.edu.cn

子二极管,就没有目前丰富而多样化的通信与传媒手段,更没有现在我们所拥有的多姿多彩的信息化生活.因此,电子二极管被誉为 20 世纪最伟大的发明之一.

受电子二极管的启示,人们开始关注对其他形式能量的整流现象的理论实验研究.对于电磁波,由于其特有的偏振特性及法拉第旋转的非互易性,人们利用磁光晶体的法拉第效应,可以方便地制造出允许光向一个方向通过而阻止向相反方向通过的光隔离器,实现了光的单向传输.从 2004 年起,新加坡国立大学的李保文课题组^[1,2]在理论上研究了 Frenkel-Kontorova 链构成的非线性动力学系统中的不对称热传输现象,提出了可实现单向热传导的“热二极管”理论模型,其反常的热力学特性如图 1 所示.其后,美国加州州立大学伯克利分校的 Chang 等人^[3]及日本早稻田大学的 Kobayashi 等人^[4]进一步在实验上制备出了有效的热整流器件.2005 年,美国加州州立大学圣地亚哥分校的 Nesterenko 课题组^[5]在实验上发现了孤立波在由一系列钢球组成的非线性系统中的反常反射现象,实现了对孤立波的整流作用.

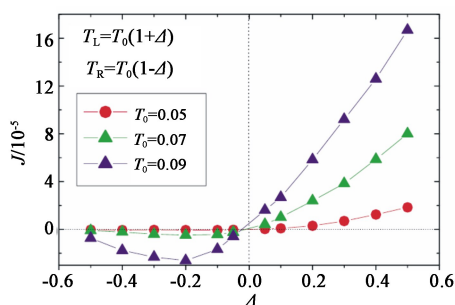


图 1 不同温度下,热二极管模型中的热流—温差关系曲线(T_L 与 T_R 分别代表系统左侧与右侧的温度.这里的热流和温差均已归一化为无量纲量)

声是比电更为常见的能量载体.与电相比,声波为人类所认识与研究的历史要悠久得多,在自然界中的存在形式也要普遍得多.如果能够设计出一种能像电子二极管控制电流那样实现声波整流的“声二极管”器件,使声波分别由这种器件两侧入射时具有类似电子二极管那样的“单向导通”的透射特性,其学术意义及应用价值的重要性将是显而易见的.然而,声波在本质上是由压力改变引起媒质疏密变化而产生的机械波,在媒质内的传播方式很复杂,亦不具备类似电磁波的偏振特性及类似法拉第旋转的非互易效应,这都使得声波沿“单行道”行进成为一个更为艰难的任务.事实上,如何实现声波的整流始

终是物理研究领域的难题之一.

2 打破系统的对称性——如何突破互易原理的限制

声学理论中经典的互易原理决定了在任何一个线性声学系统中,声能量的透射都是完全对称的.举个简单例子,当我们将演讲者与听众的位置对调时,演讲的效果不会受到任何影响.换言之,在我能听到对方的声音时,对方同样也能听到我发出的声音,这似乎也是理所应当.然而,声二极管的实现却要求我们必须完成一个违反常规思维的任务:实现一种完全不对称的声能量流动方式!由互易原理可知,线性声学系统显然不能满足我们的需要,必须引入非线性机制来打破整个系统的对称性,这是设计声二极管的首要前提.

在声学领域中,某些特定的材料具有很强的声学非线性效应(例如含有大量气泡的流体等),当声波在其中传播时,气泡会在声波的作用下发生强烈的非线性振动,成为非线性声波的次级辐射源,导致声波能量会因非线性效应而被部分转移为二次谐波(即频率变为原来的 2 倍).因此,只需加入此类强非线性声学材料,就可以方便地将一部分声能量由原来的基波转移至二次谐波,使整个声学系统呈现出一定程度的非线性效应,从而打破系统的对称性.

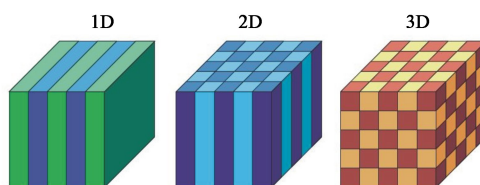


图 2 一维(1D),二维(2D)以及三维(3D)声子晶体的结构示意图

然而,仅通过非线性材料的引入并不足以实现声二极管效应;仍然需要其他机制来实现一种滤波效应,使基波与二次谐波表现出不同的透射特性.这种滤波效应可以通过采用一种特殊的声学人工结构——声子晶体来实现.声子晶体是通过类比自然晶体的微观结构,将不同声学材料在空间上按一定的周期排列而形成的人工结构.图 2 为典型的声子晶体结构示意图.声子晶体最重要的性质就是能带结构,它允许某些特定频段的声波完全通过,而其余频率的声波能量则基本上被反射.

3 简单结构有大用处——声二极管的理论模型

2009年,南京大学程建春课题组^[6]利用强声学非线性介质与声子晶体的巧妙组合,原创性地提出了第一个结构简单但却十分有效的“声二极管”理论模型,首次实现了将声能流限制在单一方向上的声整流效应.声二极管理论模型由一个声学超晶格(由厚度分别为 d_I 与 d_{II} 的媒质I与II交替层叠而成的一维声子晶体)与一块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3所示.在该模型中,声学非线性机制的引入是为了破坏系统对称性,使入射声能量部分地转移到二次谐波上,并利用超晶格结构特有的能带特性产生滤波作用,对二次谐波呈“带通”效应,而对基波呈“带阻”效应.

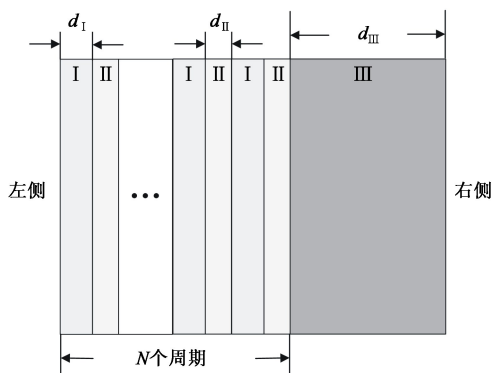


图3 声二极管理论模型剖面示意图

对于声二极管模型,一般定义声波由非线性媒质一侧入射时的传播方向为正方向,反之则为负方向.对图3所示模型而言,正(负)方向则对应声波由右侧(左侧)入射时的传播方向.图4直观地表示了声二极管模型的基本工作原理.当由强非线性媒质一侧入射的声波(频率为 ω)沿正向传播时,因声学非线性效应产生的二次谐波(频率变为 2ω)可以通过整个系统,此时整个系统在声能流作用下呈现出部分“导通”现象,且“导通率”随入射声强的提高不断增大;而由另一侧入射的声能量(频率为 ω 的基波)则直接被声子晶体结构完全反射.通过研究声波在图3所示模型中的传播,可在理论上证明该模型能像电子二极管控制电流一样对声能流进行有效的整流作用.图5(a)为声波在该声二极管理论模型中分别沿正方向与负方向传播时的能量透射系数频响曲线的数值计算结果.图中灰色区域为利用超晶格色散关系得到的满足声整流条件的频段位置.显然,

在这些频段内的声波沿两个相反方向传播时的透射特性存在极大差异,表明了声整流现象的存在.图5(b)则为声能量透射系数与入射声压之间的关系曲线,显然,该曲线表现出与电子二极管伏安关系极其类似的基本关系.图中声压取值的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).

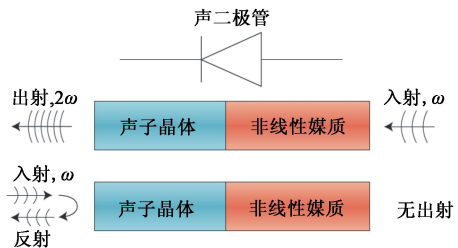


图4 声二极管模型的基本工作原理图

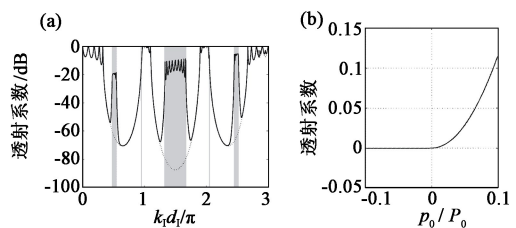


图5 (a) 声波沿正方向(实线)及反方向(虚线)传播时的能量透射系数频响曲线;(b) 声能量透射系数随入射声波的归一化幅度的变化曲线(其中 k_I 为媒质I中的波数大小, p_0 为入射声波声压幅值, P_0 为大气压(1.01×10^5 Pa))

由图5可看出声二极管模型的一个重要特点,即声波沿反方向入射时的透射系数由超晶格在禁带内的声衰减量决定,其值极小($N=10$ 时可接近200dB),表明声二极管对反向入射的声波强度有极好的耐受性,而电子二极管在反向电压过大时容易出现“反向击穿”效应,这是声二极管与电子二极管相比的一个显著优势,对于声二极管在高强度聚焦超声治疗等重大领域方面的应用具有极其重要的意义.

4 制造一个真正的声二极管——声二极管的实验实现

关于声二极管的理论研究成果在物理学顶尖杂志 *Physical Review Letters* 上发表后^[6], *Physical Review Focus*^[7]与 *Nature News*^[8]迅速将其作为亮点进行了专题评论与报道,认为该工作展现了一种全新的声二极管结构,并开辟了新的设计可能性.但该研究仅停留在理论阶段,并无相关实验结果的支持,因而继续开展对声二极管样品的实验研究不仅十分重要,也是非常必要的.因此,程建春课题组^[9]在2010年继续开展了相关实验研究并取得了重大

突破,设计并制造了世界上第一个有效的声二极管器件样品.

声二极管器件的样品由一个超晶格(superlattice)与一个强声学非线性材料(nonlinear medium, NLM)组合而成,如图6所示.超晶格由6片相同厚度(1.4mm)的玻璃等间距(1.1mm)地交替放置在水中构成.实验中选用了含超声造影剂微泡(SonoVue®)的溶液制作强声学非线性媒质的样品,其主要原因有两方面:一方面,超声造影剂微泡溶液已在理论上及实验上被证明具有很好的声学非线性效应^[10,11],这对于声二极管器件的设计制备及声整流现象的实验观测均十分有利;另一方面,超声造影剂微泡长期以来在生物医学超声等领域已得到极其广泛的应用,在临床上被证明对人体是十分安全的.选用超声造影剂微泡溶液来构建声二极管器件,对于此类器件未来在医学超声等关键领域的应用具有重要意义.

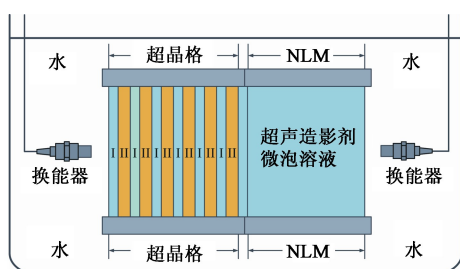


图6 声二极管样品及部分测量装置的剖面示意图

如图6所示,在水槽中利用一对宽带声学换能器对声二极管样品的声透射系数进行测量.为更好地研究声二极管的整流特性,引入了声整流比参量,定义为 T_+/T_- .这里 T_+ 与 T_- 分别为声波沿正方向和反方向传播时的能量透射系数.在入射声波频率高于0.5MHz、低于2.3MHz的范围内,理论计算与实验测量均表明存在两个满足声整流条件(即基波频率处于禁带内,而其二倍频处于通带)的频段,声整流现象有可能在这两个频段内出现.

对由3个不同的非线性媒质样品构成的声二极管样品,分别测量了声波沿正、反两个方向传播时的透射系数随入射声波频率的变化规律,并计算了其声整流比大小,结果如图7和图8(a)所示.由图7可以看出,在满足声整流条件的两个频段内(绿色区域,见《物理》网刊彩图,下同),沿正方向与反方向传播的声波的透射特性存在极大差异,这证明了声二极管效应的存在.这与理论预测的声二极管模型的声透射系数的频响特性(图3)完全一致^[12].在声整流频段外,两个相反方向上的声透射系数基本相同,

仅存在微小的实验测量误差.在声整流频段内,声二极管样品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1万倍.此外,声二极管的工作效率受超声造影剂微泡浓度的影响,且存在一个相对的最优化值.当微泡含量过低时,非线性媒质样品的声学非线性效应很弱,致使由其构成的声二极管样品整流效率低;然而过高的微泡浓度会造成气泡对声波的衰减效应过大,同样会降低声二极管的工作效率.

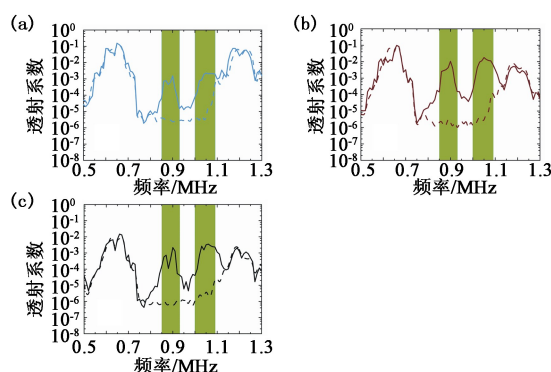


图7 由3个不同的非线性媒质样品构成的声二极管模型的声透射系数测量值.图中实线与虚线分别表示声波沿正方向和反方向传播时的声透射系数.3个非线性媒质样品的造影剂微泡浓度约分别为(a)0.025%;(b)0.05%;(c)0.1%

图8(b)为实验测得的声二极管样品透射声能流随入射声压的变化曲线.显然,入射声压与声能流之间的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,声能流无法透过;然而由于微泡溶液的强非线性,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.但当入射声波的声压很大时,微气泡在强声场的作用下开始破裂,导致透射声能流的减小.因此,声二极管样品在结构参数及材料选取方面尚存在很大的可优化空间.

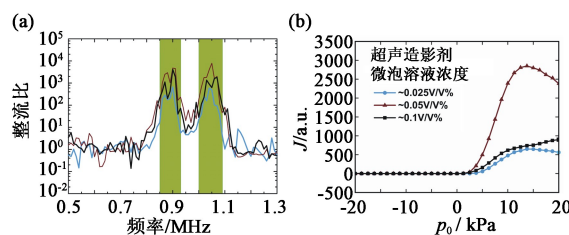


图8 对3个不同的非线性媒质样品构成的声二极管模型测量得到的(a)声整流比曲线和(b)透射声能流与入射声压的关系曲线.三个非线性媒质样品的造影剂微泡浓度约分别为0.025%(蓝线)、0.05%(红线)和0.1%(黑线),见《物理》网刊彩图

声二极管的实验研究工作发表在 *Nature* 子刊 *Nature Materials* 上后^[9],迅速引起了学术界的广泛关注, *Nature News*^[13], *Physics Today*^[14] 及

American Institute of Physics^[15]等重要学术网站相继对其进行专文介绍与报道,并予以高度评价,认为该工作可能具有不亚于电子二极管的重大意义。

5 声音“单向行驶”的意义——声二极管的应用展望

让声波沿单一方向传播的意义何在?众所周知,一个声学系统中的声传播方式通常是互易的,自然界中不可能存在能实现声整流效应的天然材料;而对于我们的常规思维而言,声波的单向流动也是无法理解的.显然,声二极管效应的实现是复杂声学媒质中声能量控制领域的重大突破,可解决传统意义上声能量无法在不同方向上实现非对称传输的物理难题,使得对声波能量的单向控制成为可能,对于复杂媒质中声传播特性研究领域而言具有开创性的重大意义.因此,声二极管研究在理论上有着极为深刻的物理意义,富含基础性的学术价值。

那么,能够实现声整流的声二极管器件又可能产生怎样重要的应用前景呢?毕竟,并非每个场合都需要声音的单向传播.比如当我们聆听一场美妙的音乐会时,我们希望听到的天籁之音实际上是由直达声波与反射声波同时叠加合成的效果.如果没有反射声波(就像在旷野中一样),音乐的效果会大打折扣.但是,若将声整流效应应用于处理噪音或语音信号,那么就有可能制造出像单向可视玻璃一样的“单向声屏障”.此外,声学是一个外延性极强的学科,除了我们可以听到的声音外(音乐、语音等),还有许多的实际应用是由听不见的声音——超声来完成的.超声的重要应用之一就是用于医学上的诊断,即超声医学成像.典型的例子就是我们非常熟悉的B超.在利用超声成像的过程中,首先向体内发射超声波,由反射形成的回波会被接收装置接收,我们正是通过分析这种回波信号来得到体内脏器或胎儿等对象的超声图像,从而检测体内脏器的健康程度或胎儿的发育情况.然而,有一部分反射声波会对入射声波形成干扰,从而降低成像的对比度及分辨率.如果我们可以利用声二极管使这些声波不再被反射回声源,则将有助于显著改善医学超声成像的质量.此外,超声也可以应用于医学治疗,人们可以利用高强度聚焦超声(high intensity focused ultrasound, HIFU)在体外杀死身体内部的肿瘤,但由于聚焦声场强度极高,经人体内部组织反射回来的高强度声波

容易破坏超声换能器,并对聚焦路径上的正常组织造成伤害.若能利用声二极管减少甚至消除高强度反射声波,就能够有效地降低对正常组织及超声换能器的损害程度,从而提高高强度聚焦超声治疗的疗效.显然,声整流的实现对于医学超声等关键领域具有非常重大的意义,可能打破现有成像和治疗方式的局限,从而产生一些新机理、新方法,甚至引发某些根本性的变革.因此,声二极管有望应用于各种需要对声能量实现特殊控制的重要场合,不仅具有广阔的应用前景,更蕴含着巨大的潜在经济价值。

6 结束语

可使声波沿“单行道”传播的声二极管的设计与实现,不仅富含基础性的学术意义,亦可望在各种重要场合表现出广阔的应用前景.然而我们也同时注意到,目前在声二极管方面完成的研究还处于初级阶段,尽管成功制造了第一个示意性样品,但其工作效率仍然很低,声透射率也很低,并且能量损耗极大,远远无法满足实际应用的需求.此外,根据电子电路的发展历程与趋势来看,基本元件一旦出现后,势必会对此类元件小型化、集成化特性提出强烈需求.显然,现有声二极管表现出的样品尺寸大、材料稳定性差等缺点,使人们无法直接将其进一步应用于开发相关的声学集成化器件.总之,声二极管研究是一个新兴的、同时富有蓬勃生机的科学研究领域,势必吸引更多的科研人员投身其中,未来将继续深入开展对声二极管的理论及实验研究,在努力探索新的声二极管工作机理的同时,通过寻找新材料或设计新结构等手段来进一步提高声二极管样品的工作效率,以期最终能够制造出真正具备实际应用功能的声二极管器件,并以此为基础在相关的声学化集成器件的发展道路上继续迈进。

参考文献

- [1] Li B W, Wang L, Casati G. Phys. Rev. Lett., 2004, 93: 184301
- [2] Li B W, Lan J H, Wang L. Phys. Rev. Lett., 2005, 95: 104302
- [3] Chang C W *et al.* Science, 2006, 314: 1121
- [4] Kobayashi C, Teraoka Y, Terasaki I. Appl. Phys. Lett., 2009, 95: 171905
- [5] Nesterenko V F *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 95: 158702.
- [6] Liang B, Yuan B, Cheng J C. Phys. Rev. Lett., 2009, 103: 104301
- [7] Monroe D. One-Way Mirror for Sound Waves. Phys. Rev. Focus, 24, story 8, (2009)

- [8] A sonic one-way street. *Nature News*, Vol. 461, 17 September (2009). (doi:10.1038/461318e)
- [9] Liang B, Guo X S, Tu J *et al.* *Nature Materials*, 2010, 9(12): 989
- [10] Ostrovsky L A. J. *Acoust. Soc. Am.* ,1991, 90: 3332
- [11] Zabolotskaya E A, Ilinskii Yu A, Meegan G D *et al.* *J. Acoust. Soc. Am.* ,2005, 118: 2173
- [12] Liang B, Zou X Y, Yuan B *et al.* *App. Phys. Lett.* , 2010, 96 (23): 233511
- [13] Cressey D. A one-way system for sound, *Nature News*, 24 October (2010). (doi:10.1038/news.2010.559)
- [14] Chinese team develops “acoustic rectifier”, *Physics Today*, 25 October (2010). (http://blogs.physicstoday.org/news-picks/2010/10/chinese_team_develops_acoustic/)
- [15] Shewe P F. One way sound. *Inside Science News Service*, 8 December (2010). (<http://www.insidescience.org/research/one-way-sound>)