

声波在一维声子晶体中共振隧穿的研究*

王文刚 刘正猷 赵德刚 柯满竹

(武汉大学物理科学与技术学院, 武汉 430072)

(2005 年 12 月 30 日收到, 2006 年 3 月 16 日收到修改稿)

通过从实验和理论方面对声波在一维声子晶体单晶体和被小的共振腔分开的双晶体中传播时发生的隧穿和共振隧穿现象的研究, 观察到了声子晶体单晶体在带隙频率范围内发生的隧穿现象, 而对于双晶体样品, 在带隙频率范围内出现了很强的共振透射峰. 共振发生时, 实验测得的群时间很大, 但是没有共振时, 群速度却很快.

关键词: 声波, 声子晶体, 隧穿, 共振

PACC: 4320, 4385D, 7255

1. 引言

近 10 年来, 对于声波和弹性波在像声子晶体这种周期性带隙材料中传播的研究极其活跃^[1-18]. 这种材料的性质中最引人注意的是声子晶体中完全禁带的存在. 处于带隙频率范围内的声波或者弹性波将被禁止在声子晶体中传播. 根据声子晶体的这一性质, 可望设计出一种新型的隔音材料, 同时还可将声子晶体用于声波导^[18], 声滤波器和声透镜^[12]等等. 随着越来越多的关于声子晶体的理论^[1-10]和实验^[11-18]方面的研究, 新的现象被不断发现, 例如声波的局域化, 负折射现象^[14], 隧穿效应^[17]等等. 因此对声子晶体的研究有重要的应用前景.

隧穿效应是量子力学中最典型的现象之一, 在光子晶体中也发现了这一现象^[19-21]. 那么在声子晶体中是否也存在这一现象呢? 最近有文献报道了 Yang 等人^[13]通过实验测量三维声子晶体的群速度, 发现了在带隙频率范围内, 群速度随着样品厚度线性增加的现象, 这和量子力学中隧穿效应的特征是一样的. 本文从实验和理论方面研究声波在一维声子晶体中的隧穿和共振隧穿这一现象. 通过对透射系数和群时间的测量, 可以更清晰地了解这一现象.

2. 实验测量和分析

本文实验中研究的样品是由放置在水中的平行

周期排列的塑料板构成的一个一维声子晶体, 周期数为 4, 晶格常数为 1.4mm (水: 密度 $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 纵波波速 $v_L = 1.49 \text{ km/s}$; 塑料板: 密度 $\rho = 1.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 纵波波速 $v_L = 2.75 \text{ km/s}$). 当中间两块板之间的距离增加到 3mm 时, 该样品就构成了一个双晶体结构, 从而具备了共振隧穿出现的条件. 实验用的主要仪器是通用公司的超声设备, 图 1 给出了实验装置示意图, 整个实验过程都是在水中进行的. 脉冲信号发生/接收器 (panametrics model 5900P/R) 产生一个持续时间很短的脉冲, 经放在远场的超声换能器 (transducer) 将这个脉冲转换为平面波输出, 另一个超声换能器则在远场接收 (见图 1), 换能器的中心频率是 0.5MHz. 分别测量有样品和无样品时得到的信号, 就是入射和透射信号. 再通过傅里叶变换法, 得到频率和透射振幅的关系. 而对于每个频率的透射系数的关系可以根据下面公式计算得到

$$|T(w)| = A_{\text{trans}}(w) / A_{\text{in}}(w). \quad (1)$$

图 2 是入射声波通过声子晶体单晶体和双晶体样品后的透射信号对比图, 强度是经过归一化的. 通过变换以后, 可得到每一频率所对应的透射系数关系 (图 3). 图中可以清晰的看到, 在实验频率范围内, 对于声子晶体单晶体存在着 2 个带隙: 一个是从 0.18MHz 到 0.44MHz, 另一个是从 0.54MHz 到 0.79MHz. 但是当中间两块之间的距离增加, 形成双晶体结构后, 在带隙中出现了明显的共振透射峰, 共

* 国家自然科学基金 (批准号 50425206, 10174054, 10418014) 和教育部博士点基金 (批准号 20020486013) 资助的课题.

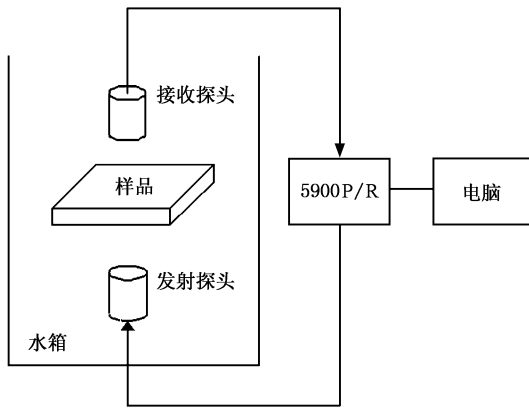


图 1 实验装置示意图

振峰的强度比附近带隙频率范围内的透射强度大很多,不过由于吸收的影响,共振峰的强度值并没有到理论所预测的强度 1.0.关于吸收的影响,本文后面将会讨论.我们从实验结果中拟合出了一个吸收系数,用转移矩阵法计算出了这两种情况的理论结果(图 3 中虚线).实验结果和理论计算结果相当吻合.

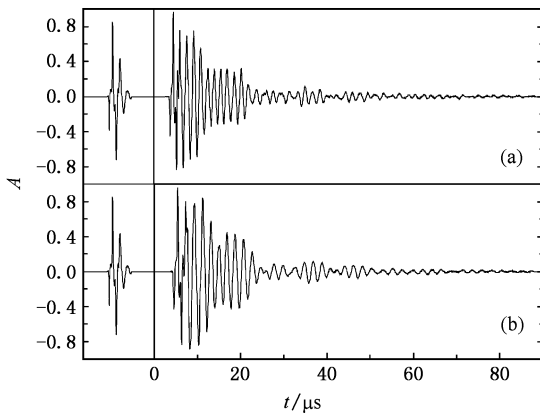


图 2 入射和透射信号 (a) 声子晶体单晶体样品;(b) 双晶体样品

按照文献 [17] 的方法,实验中也测量了群时间 t_g 和群速度 v_g 作为隧穿效应的重要依据.我们用很窄的高斯束(带宽为 0.01MHz)对入射和透射信号进行数字滤波,可得到高斯束通过样品之后峰值的时间延迟,即为群时间 t_g .从实验结果中,可以明显地发现直接隧穿时,时间是很短的,而有共振时的群时间比直接通过空腔的时间要大 50 倍左右,也就是说共振持续的时间很长(见图 4(b)).相反地,没有共振时群时间比声波通过构成晶体的任一种材料(水或者塑料板)的时间都要短(见图 4(a)),因为直接隧穿时,群速度是很大的.有共振和没有共振时的群

速度的差别是与群时间相反的:有共振时的群速度大约为没有共振时的群速度的 1/40.实验结果和用转移矩阵法计算的理论结果(图 4 中实线)符合得很好.

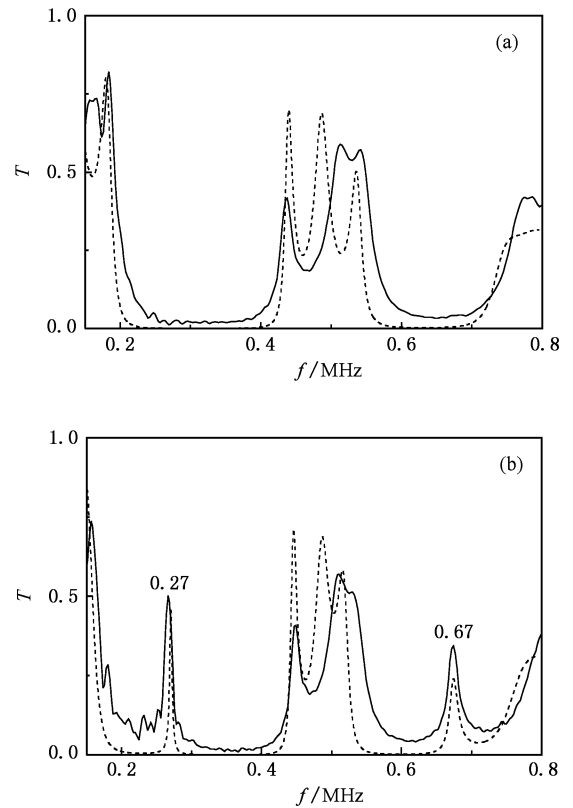


图 3 透射系数的实验(实线)和理论(虚线)结果 (a) 声子晶体单晶体样品;(b) 双晶体样品

研究声子晶体的隧穿效应,群速度和群时间随样品厚度的变化是一个重要依据.我们计算了在 0.275MHz 时,声波穿过声子晶体单晶体时的群速度随时间变化的关系图.对于声子晶体单晶体来说是没有共振发生的.图 5 中清晰地显示了群速度随着样品厚度的增加是线性增大的,而群时间却是和样品厚度无关的.即使是有吸收的情况下,群速度和群时间随厚度变化的关系也是和没有吸收的情况类似的.这证明了实验中隧穿现象是确实存在的.

吸收是影响实验结果的一个重要因素.没有吸收时,按照理论计算的预测共振透射峰值是可以到达 1.0 的.而在实验所用的声子晶体样品中,却有能量损失,其导致的结果见图 3(b).这里的吸收主要来源于塑料板,吸收系数可表示为 $a \frac{\omega^2}{2\rho v^3}$ (这里 a 是个常数, ρ 是塑料板的密度, v 是塑料板的纵波波

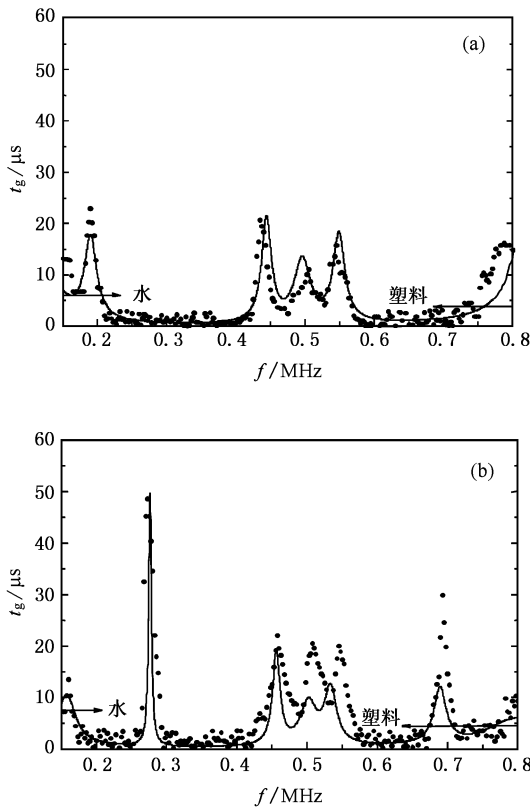


图 4 频率和群时间对应的关系图 (a) 声子晶体单晶体样品; (b) 双晶体样品(实验(圆点)和理论(实线)结果,两个水平箭头分别代表了水和塑料板的群时间)

速^[22]我们通过对透射系数的理论结果和实验结果进行拟合得到 a 的值约为 150.0. 通过实验测得的群时间和频率的关系进一步确认了吸收系数的值(图 4). 吸收破坏了原本较长的多重散射路径, 使得带隙不完整, 这也是导致群速度变小的原因(图 5). 这种波的不完全相消导致了传播过程中的能量损失和透射峰值的降低.

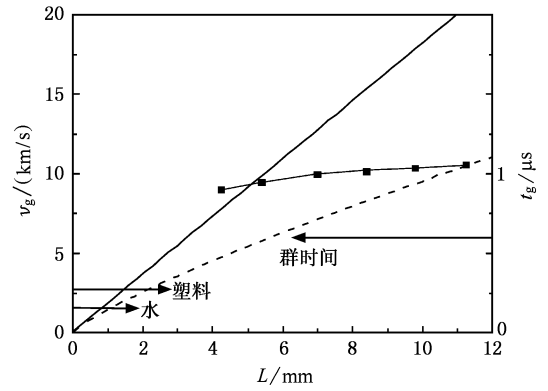


图 5 没有吸收(实线)和有吸收(虚线)的情况下群速度随样品厚度变化的关系图. 左边的两个水平箭头分别代表水和塑料板的纵波速度(右边的水平箭头代表的是没有吸收时群时间随样品厚度 L 变化的关系, 方形符号和连接线代表的是有吸收时的群时间随样品厚度 L 变化的关系)

3. 结 论

本文主要从实验和理论上研究了声波在声子晶体单晶体和被小的共振腔分开的双晶体中传播时发生的隧穿和共振隧穿现象. 这种实验现象和电子通过单势垒和双势垒时发生的隧穿和共振隧穿现象类似, 但是换成经典波以后, 波的所有参数都是能够被测量的, 就能够得到相位方面的信息, 以便于更清晰地解释这些现象. 通过实验和理论计算发现了在带隙频率范围内, 群时间是很短的这一典型的隧穿特性. 对于双晶体样品, 实验中发现带隙频率范围内出现了很高的共振峰, 并且共振发生时, 群时间的值很大, 由此可知共振持续的时间很长. 在发生隧穿时, 群速度随着样品厚度增加而线性增加, 但是群时间保持不变. 转移矩阵理论很好地解释了实验结果.

[1] Kafesaki M, Sigalas M M, Garcia N 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 4044
 [2] Chen Y Y, Ye Z 2001 *Phys. Rev. E* **64** 036616
 [3] Liu Z Y, Chen C T, Sheng P, Goertzen A L, Page J H 2000 *Phys. Rev. B* **62** 2446
 [4] Mei J, Liu Z Y, Shi J, Tian D C 2003 *Phys. Rev. B* **67** 245107
 [5] Qiu C Y, Zhang X D, Liu Z Y 2005 *Phys. Rev. B* **71** 054302
 [6] Wu F G, Zhong H L, Zhong S, Liu Z Y, Liu Y Y 2003 *Eur. Phys. J. B* **34** 265
 [7] Qiu C Y, Liu Z Y, Shi J 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 224105

[8] Wu F G, Liu Y Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1434 (in Chinese) [吴福根、刘有延 2002 物理学报 **51** 1434]
 [9] Psarobas I E, Stefanou N, Modinos A 2000 *Phys. Rev. B* **62** 5536
 [10] Wen J H, Wang G, Liu Y Z, Yu D L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3384 (in Chinese) [温激鸿、王刚、刘耀宗、郁殿龙 2004 物理学报 **53** 3384]
 [11] Montero F R de Espinosa, Jimenez E, Torres M 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 1208
 [12] Vasseur J O, Deymier P A, Chenni B, Djafari-Rouhani B, Dobrzynski L, Prevost D 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3012

- [13] Yang S X , Page J H , Liu Z Y , Cowan M L , Chan C T , Sheng P 2004 *Phys. Rev. L* **93** 024301
- [14] Ke M Z , Liu Z Y , Qiu C Y , Wang W G , Shi J , Wen W J , Sheng P 2005 *Phys. Rev. B* **72** 064306
- [15] Liu Z Y , Zhang X X , Mao Y W , Zhu Y Y , Yang Z , Chan C T , Sheng P 2000 *Science* **289** 1734
- [16] Torres M , Montero F R 2004 *Ultrasonics* **42** 787
- [17] Yang S X , Page J H , Liu Z Y , Cowan M L , Chan C T , Sheng P 2002 *Phys. Rev. L* **88** 104301
- [18] Khelif A , Choujaa A , Djafari-Rouhani B , Wilm M , Ballandras S , Laude V 2003 *Phys. Rev. B* **68** 214301
- [19] Steinberg A M , Kwist P G , Chiao P Y 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 708
- [20] Spielmann C , Szipocs R , Stingl A , Krausz F 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 2308
- [21] Mojahedi M , Schamiloglu E , Hegeler F , Malloy K J 2000 *Phys. Rev. E* **62** 5758
- [22] Ma D Y 2004 *Theory of modern acoustics* [马大猷 2004 现代声学基础(北京 : 科学出版社)] p30

Resonant tunneling of acoustic waves in 1D phononic crystal^{*}

Wang Wen-Gang Liu Zheng-You Zhao De-Gang Ke Man-Zhu

(Department of Physics , Wuhan University , Wuhan 430072 , China)

(Received 30 December 2005 ; revised manuscript received 16 March 2006)

Abstract

We investigated theoretically and experimentally the acoustic waves tunneling and resonant-tunneling through one-dimensional phononic crystals within the frequency gap. The phononic crystal consists of parallel and periodically arrayed plastic plates immersed in water. Acoustic tunneling was observed for this single crystal structure at frequencies inside the band gaps. By slightly increasing the separation of the two plates in the middle , a double-crystal structure forms , which allows acoustic waves to resonantly tunnel through it , with transmission peaks observed inside the band gaps. At resonance , the measured group time is large , while off resonance very fast group velocity is found.

Keywords : acoustic wave , phononic-crystal , tunneling , resonant tunneling

PACC : 4320 , 4385D , 7255

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50425206 , 10174054 and 10418014) and the Doctoral Research Foundation of Ministry of Education of China (Grant No. 20020486013).