

文章编号: 1007-2985(2011) 02-0042-03

抗反射层结构平板声子晶体棱镜成像*

李金凤, 邓 科, 赵鹤平

(吉首大学物理科学与信息工程学院, 湖南 吉首 416000)

摘 要: 采用数值模拟的方法, 分析了抗反射层结构对平板声子晶体棱镜的透射压力场分布及成像的影响. 分析发现: 利用抗反射层结构可以减小棱镜界面的反射, 提高成像质量, 从而增强其实用性. 该结论对声子晶体功能器件的实际应用具有一定的指导意义.

关键词: 声子晶体; 抗反射层; 成像

中图分类号: T Q174

文献标志码: A

近年来, 利用声子晶体的导带性质设计各种波功能器件已成为研究热点, 利用其等频色散线的性质实现声波准直、汇聚及负折射成像^[1-5]. 但是, 由于阻抗相差很大, 在均匀介质和声子晶体界面会发生不必要的反射, 从而导致声波入射到声子晶体中的耦合效率较低. 减少界面反射提高耦合效率就成为一个很重要的问题. 文献[6]提出了利用反射层结构来减小声子晶体界面的不必要反射, 进而优化声子晶体器件的思想. 笔者把抗反射层(ARC)思想应用到平板声子晶体棱镜中, 分析了抗反射层宽度对点源通过平板棱镜负折射成像的影响, 力图为提高棱镜的透射效率提供理论指导, 有利于更多地理解抗反射层对声子晶体棱镜的影响.

抗反射层(ARC)的基本思想: 在声子晶体器件的入射方和出射方分别插入一层结构, 经过优化设计使所插入的结构与棱镜在界面形成多重反射光束, 此光束产生总体干涉相消, 从而减少了入射波在界面的反射, 从而提高器件的透射率. 笔者研究的对象是由半径为 $0.45a$ 的钢圆柱六角排列于空气基体中构成的二维声子晶体, 其中 a 是晶格常数, 采用的计算方法是多重散射法(MST)^[7]. 计算中所用材料参数如下: 对于空气, $\rho = 1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $C^L = 0.34 \times 10^3 \text{ ms}^{-1}$; 对于钢, $\rho = 7.67 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $C^T = 3.23 \times 10^3 \text{ ms}^{-1}$, $C^L = 6.01 \times 10^3 \text{ ms}^{-1}$, 其中 ρ 表示密度, C^T 和 C^L 分别表示横波波速和纵波波速.

1 计算结果

1.1 带结构和等频色散线

图 1 给出了钢圆柱六角地排列于空气中的声子晶体的带结构, 其中半径为 $0.45a$. 图 1 右上方的插图为频率在 0.745 Hz 附近的等频色散线(EFCs).

从图 1 中可以看出该频率附近的 EFCs 均接近于圆, 并且随着频率的增加半径减小, 因此在这个频率范围内有效折射率能够被定义为 $n = -|k|c/\omega$, 其中: k 为波矢; ω 为基体中的波速; ω 为频率. 声子晶体的这种负折射行为可以用来设计新型的声子晶体功能器件, Qiu 等^[3]利用该声子晶体设计了一个平板点源

* 收稿日期: 2011-02-10

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(09JJ6011); 湖南省高等学校科研基金项目资助(08A055); 湖南省教育厅科学研究项目(09C787); 吉首大学校级科研项目资助(09JDY004, 10JD023)

作者简介: 李金凤(1985), 女, 四川宜宾人, 吉首大学物理科学与信息工程学院硕士研究生, 主要从事声子晶体研究.

通讯作者: 赵鹤平(1966), 男, 湖南桑植人, 吉首大学物理科学与信息工程学院教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事复合介质物理研究.

成像棱镜, 能实现对点源的远场成像, 具有非常广阔的应用前景. 但是由于声子晶体填充率过高, 且工作频率接近第 2 条带的顶端, 该棱镜界面反射非常严重, 成像质量不好. 根据 ARC 的思想, 笔者在该平板声子晶体棱镜的 2 边等距 $1.9a$ 处分别放入一排钢圆柱 ARC 结构, 其半径为 $0.48a$.

1.2 ARC 棱镜的成像效应

由于 ARC 结构是针对垂直入射的波所设计, 对垂直入射的波所起的作用是最好的, 所以首先研究了波垂直入射的情形. 图 2 给出了频率为 0.745 、宽度为 $17a$ 的高斯波束从样品下方垂直入射到厚度为 9 层的透射压力强度分布. 其中图 2- a 为无 ARC 时的强度分布, 显示大部分入射波都被反射回去, 出射强度较弱; 图 2- b 为有 ARC 结构时的强度分布, 可以看到板后的场明显的增强了. 图 2- c 是 $y = 58a$ 时的压力强度曲线, 显示包含有 ARC 结构的棱镜对应的强度峰值比不包含 ARC 结构时要高, 不含 ARC 时强度最强值为 0.25 , 含有 ARC 时为 0.40 , 高出了 60% .

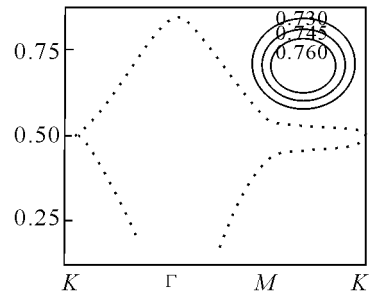


图 1 声子晶体带结构

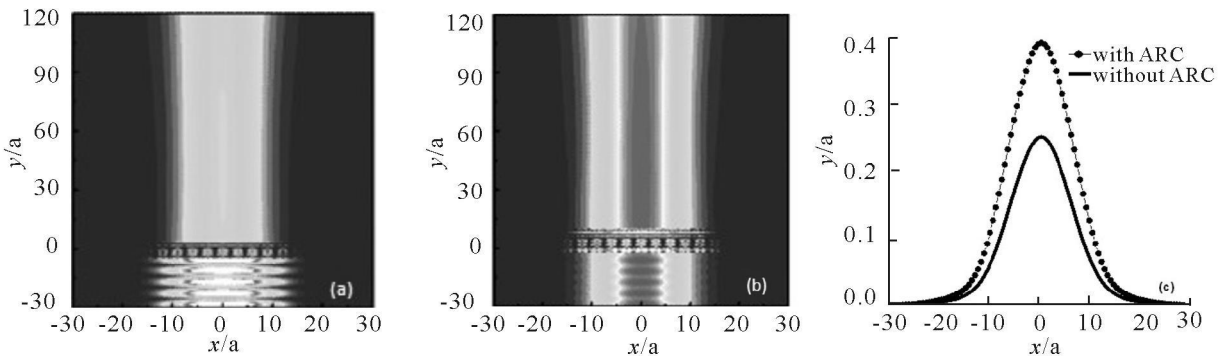


图 2 平板声子晶体棱镜的压力场强度分布

对于点源入射情形, 点源放置在距平板 $6a$ 处. 图 3- a 为频率为 0.745 的点源入射到无 ARC 结构的平板声子晶体棱镜时的负折射成像图, 结果发现界面反射较为强烈, 成像的强度很弱. 图 3- b 为包含有 ARC 结构的声子晶体棱镜在点源入射时的负折射成像. 通过与 3- a 比较可以发现, 成像的效果得到了明显增强, 入射波在界面的反射也明显减弱. 图 3- c 则为 $y = 58a$ 时的压力强度图, 包含 ARC 结构的棱镜对应的强度峰值比无 ARC 结构时要高, 不含 ARC 时最强强度值为 0.083 , 含有 ARC 时为 0.123 , 高出了 48% , 但比高斯束垂直入射到同样棱镜时提升的幅度要低, 这是由于点源包含任意角度的平面入射波, 而 ARC 层是对垂直入射的效果最好的原因.

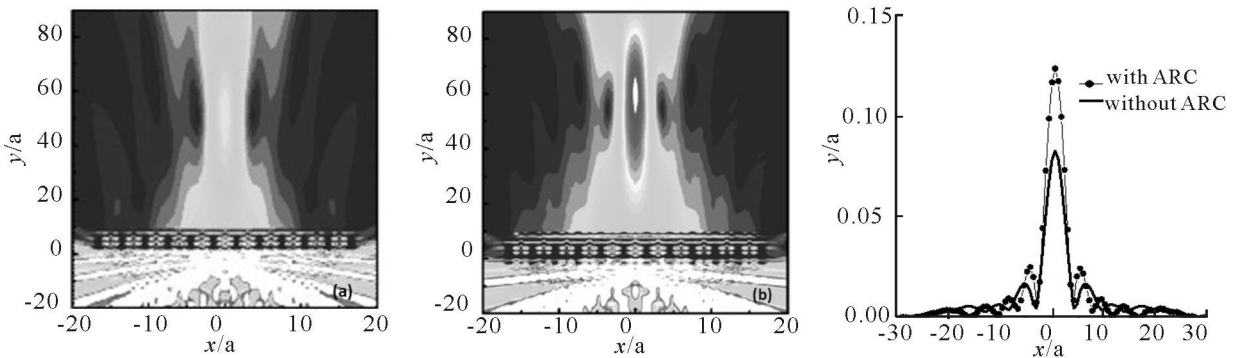


图 3 频率为 0.745 的点源透过此棱镜时的成像效果

为了研究不同宽度的 ARC 层对点源入射时的影响, 数值模拟了不同宽度 ARC 层时的压力强度分布如图 4 所示. 由于压力强度最强的点应落在 $x = 0$ 这条轴线上, 所以图 4- a 给出了在不同宽度 ARC 下板后的压力场强度最强点的位置分布, 从该图中可以看出, 当宽度大于 $21a$ 时, 压力场强度最强点的位置与

宽度等于 $21a$ 时的差别不大. 图 4- b 是在不同 ARC 宽度时压力场强度最强值分布图, 从该图中看出, 当 ARC 宽度大于等于 $21a$ 时最大强度值变化很小. 由图 4 可以得出如下结论: 当 ARC 的宽度小于 $21a$ 时, 对包含任意入射方向平面波的点源的影响不可忽略, 不管是像的位置还是强度都变化较大; 当 ARC 的宽度大于等于 $21a$ 时, 不管是像的位置还是强度变化都不大, 这种变化可以忽略不计, 对点源入射, ARC 层宽度取到 $21a$ 就可以.

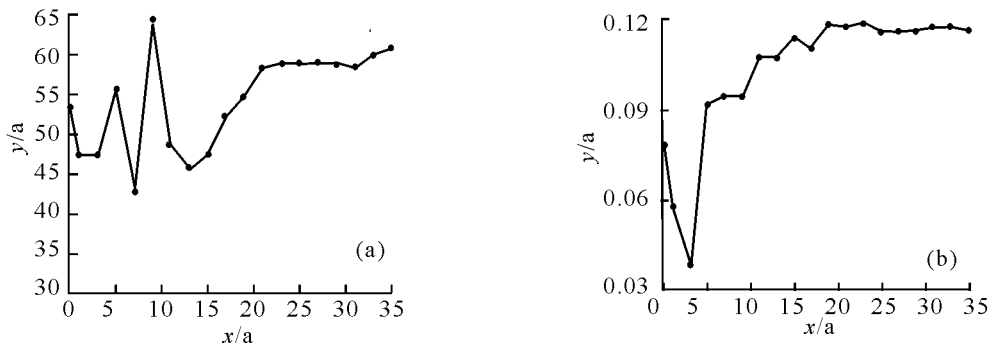


图 4 不同 ARC 宽度时点源透过棱镜时成像最强的位置图和强度值图

2 结语

用多重散射方法比较了插入 ARC 层前后平板声子晶体棱镜的强度分布和成像效果, 模拟结果表明: ARC 层对高斯束和点源通过棱镜后的强度分布有明显增强的效果; 对点源成像, 在适当的 ARC 层宽度下就能达到最大的增强效果. 笔者认为抗反射层确实可以有效的减小声子晶体界面的不必要反射, 提高声子晶体的透射效率, 从而增强了其实用性.

参考文献:

- [1] CHEN Liang-shan, KU O Chao-hsien, YE Zhen. Acoustic Imaging and Collimating by Slabs of Sonic Crystals Made from Arrays of Rigid Cylinders in Air [J]. Appl. Phys. Lett., 2004, 85: 1 072-1 074.
- [2] DENG Ke, DING Yi-qun, HE Zhao-jian, et al. Graded Negative Index Lens with Designable Focal Length by Phononic Crystal [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2009, 42: 185 505-185 508.
- [3] QIU Chun-yin, ZHANG Xiang-dong, LIU Zheng-you. Far-Field Imaging of Acoustic Waves by a Two-Dimensional Sonic Crystal [J]. Phys. Rev. B., 2005, 71: 054 302-054 307.
- [4] ZHANG Xiang-dong, LIU Zheng-you. Negative Refraction of Acoustic Waves in Two-Dimensional Phononic Crystals [J]. Appl. Phys. Lett., 2004, 85: 341-343.
- [5] HU Xin-hua, SHEN Yi-feng, LIU Xiao-hua, et al. Superlensing Effect in Liquid Surface Waves [J]. Phys. Rev. E, 2004, 69: 030 201-030 204.
- [6] 邓科. 声子晶体及声超常材料的特性调控与功能设计 [D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- [7] MEI Jun, LIU Zheng-you, SHI Jing, et al. Theory for Elastic Wave Scattering by a Two-Dimensional Periodical Array of Cylinders: An Ideal Approach for Band-Structure Calculations [J]. Phys. Rev. B., 2003, 67: 245 107-245 113.

Imaging of Plane Phononic Crystal Lens with Antireflection Coating Structures

LI Jing-feng, DENG Ke, ZHAO He-ping

(College of Physics Science and Information Engineering, Jishou University, Jishou 416000, China)

Abstract: The effect of the antireflection coating (ARC) structures on the intensity distribution of transmission pressure field and imaging of the plane phononic crystal lens have been studied by numerical simulations in this paper. The simulated results show that the performance of the device can be significantly improved by the ARC structure. This work affords benefits for practical application of acoustic devices.

Key words: phononic crystal; antireflection coating; imaging

(责任编辑 陈炳权)