

柱式平板声子晶体点缺陷模式研究

黄翔宇^{1,2}, 刘永顺¹, 舒风风^{1,2}, 武俊峰¹, 吴一辉¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:柱式平板声子晶体结构有利于实现质量加载和液相检测, 该文提出并制备一种柱式平板声子晶体点缺陷。采用有限元法进行禁带计算分析, 仿真出该声子晶体点缺陷模式的振型。采用微机电系统(MEMS)工艺制备出硅基 AlN 声波传感器, 通过电极构型的模式选择对选定点缺陷模式的性能进行了测试分析。结果表明, 通过合理设计激励电极可获得较高频率声子晶体点缺陷模式。实验中选择激发的模式频率为 7.732 MHz, 其对应空气中品质因数 $Q=700$, 这为实现液相检测提供了理论基础和实验依据。

关键词:声子晶体; 柱式平板; 点缺陷; 选择性激励; 工艺加工

中图分类号: TN4; O59 **文献标识码:** A

Research on Point Defect Mode of Pillar Plate Phononic Crystal

HUANG Xiangyu^{1,2}, LIU Yongshun¹, SHU Fengfeng^{1,2}, WU Junfeng¹, WU Yihui¹

(1. State Key Lab. of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The pillar plate phononic crystal (PC) structure is benefit for the mass loading and liquid detection. A pillar plate phononic crystal point defect is proposed and fabricated in this paper. The band gap calculation is carried out by using the finite element method and the vibration mode of the point defect mode of the phononic crystal is simulated. An AlN acoustic wave sensor based on silicon is fabricated by MEMS processing. The performance of the selected point defect mode is tested and analyzed through the mode selection of the electrode configuration. The results show that the point defect mode with relative high frequency can be obtained through reasonably designing the electrode. In the experiment, the mode frequency of selective incentive is 7.732 MHz and the corresponding Q value is 700 in the air. This provides a theoretical and experimental basis for realizing the liquid phase detection.

Key words: phononic crystal; pillar plate; point defect; selective incentive; processing

0 引言

声子晶体^[1]的禁带^[2-4]和缺陷态^[5-8]特性使振动能量被局域在缺陷处。由于振动能量几乎都被反射回了缺陷部分而导致能量损耗较低, 所以, 其能量局域特性在谐振器中有广泛的应用前景。最近, T. T. Wu 等^[9]提出了一种柱式平板声子晶体。与常见的孔式声子晶体相比, 柱式平板声子晶体的优点有:

1) 在工艺加工上, 柱式平板声子晶体禁带的形成不需要高填充比, 对尺寸精度要求与刻蚀要求更低。

2) 该结构有一个完整的无孔平面, 这有利于质量加载、液相检测及液态环境中的生物检测等。

与目前常用的石英晶体微天平(QCM)等器件相比, 采用微机电系统(MEMS)工艺制作硅基平板声子晶体更易与 IC 器件集成, 高的机械强度和低的热膨胀系数可获得更优良的性能。通过设计电极排布方式对缺陷模式进行选择激励^[10-12]可获得单一高频模式信号。本文对柱状平板声子晶体点缺陷模式进行仿真分析, 对结构进行机械优化设计并工艺加工出该器件, 最后对该器件进行测试与分析。

收稿日期: 2016-06-28

基金项目: “八六三”计划基金资助项目(2015AA042603); 国家自然科学基金资助项目(51505456); 吉林省科技发展计划基金资助项目(20140101057JC, 20150520110JH); 吉林省“双十工程”重大科技攻关基金资助项目(201402011GX); 吉林省省级经济结构战略调整引导资金专项基金资助项目(2015Y028)

作者简介: 黄翔宇(1992-), 男, 江西南昌人, 硕士生, 主要从事微光机电系统的研究。通信作者: 吴一辉(1965-), 女, 浙江温州人, 研究员, 博士生导师, 博士, 吉林省高级专家, “八六三”先进制造领域专家, 中国仪器仪表学会精密机械分会常务理事, 中国微米纳米学会理事, 《传感技术学报》、《光学精密工程》编委。发表 SCI/EI 学术论文 100 余篇, 获授权发明专利 10 余项。

1 柱式平板声子晶体点缺陷模式仿真

1.1 声子晶体禁带特性与模式选择

对于柱式平板声子晶体,禁带特性取决于晶体结构,其结构如图 1 所示。选取厚为 $380\ \mu\text{m}$ 的单晶硅片作为基体,因为单晶硅材料声波损耗极小且加工工艺成熟。禁带计算采用有限元法,材料参数:密度 $\rho = 2\ 329\ \text{kg}/\text{m}^3$,杨氏模量 $E = 1.7 \times 10^{11}\ \text{Pa}$,泊松比 $\gamma = 0.28$ 。结构参数:晶格常数为 $400\ \mu\text{m}$,平板厚度为 $55\ \mu\text{m}$ 和 $65\ \mu\text{m}$,柱半径 $160\ \mu\text{m}$,柱高度为 $160\ \mu\text{m}$ 。

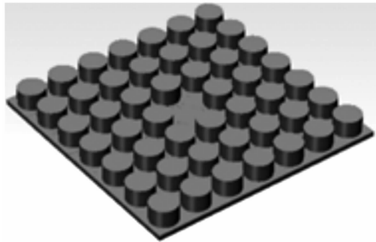


图 1 柱状平板声子晶体点缺陷结构

通过软件 COMSOL Multiphysics 5.0 计算禁带并进行模式振型分析。局域模式振型如图 2 所示。其结果如表 1 所示。当平板厚度为 $55\ \mu\text{m}$ 和 $65\ \mu\text{m}$ 时,存在 2 条禁带, $55\ \mu\text{m}$ 的禁带范围为 $2.68 \sim 3.25\ \text{MHz}$ 和 $7.18 \sim 8.19\ \text{MHz}$, $65\ \mu\text{m}$ 的禁带范围为 $3.18 \sim 3.8\ \text{MHz}$ 和 $7.9 \sim 8.4\ \text{MHz}$ 。 $55\ \mu\text{m}$ 的平板结构在禁带范围内共存在 4 个模式(见图 2(a)~(d))。 $65\ \mu\text{m}$ 的平板结构在禁带范围内共存在 3 个模式(见图 2(e)~(g))。

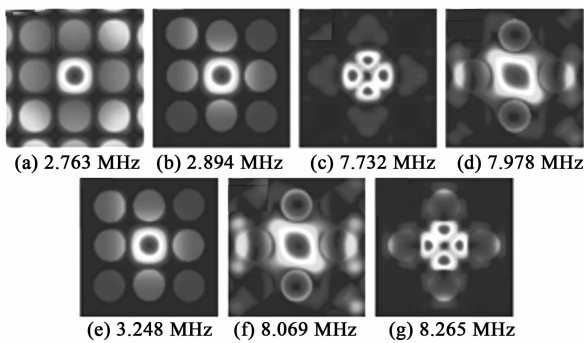


图 2 声子晶体点缺陷模式振型

表 1 禁带仿真结果

平板厚度/ μm	低频禁带/ MHz	高频禁带/ MHz	模式 数量
55	2.68~3.25	7.18~8.19	4
65	3.18~3.80	7.90~8.40	3

以平板厚度 $55\ \mu\text{m}$ 为例,通过选择性激励来筛选出图 2(c) 的高频模式来进行后续实验与测试分析。在 $7.732\ \text{MHz}$ 模式中,点缺陷内的振型如图 3 所示。由图可看出, x 轴上的 2 块区域振动方向相同,但与 y 轴上的 2 块区域振动方向相反,通过选择性激励点缺陷模式^[10-11] 的电极设计方法,设计如图 3 所示的电极,该电极的覆盖区域刚好对应该模式的振型峰值区域。由于其他 3 个模式的振型不同于该模式,故其他模式在该电极的激励下,模式响应会被抑制,从而筛选出所需模式。

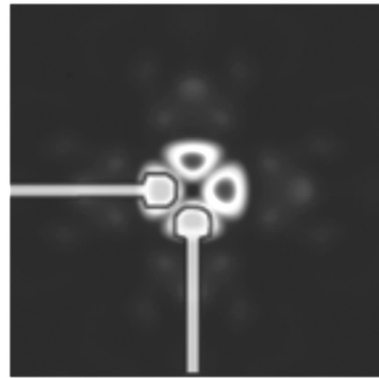


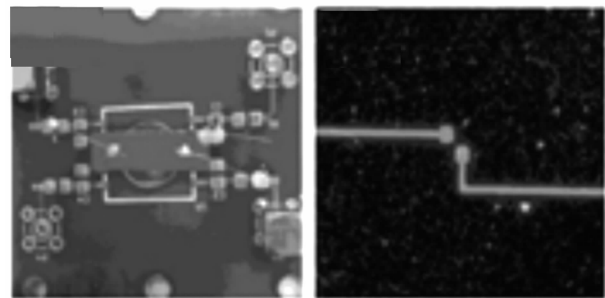
图 3 高频模式振型与对应电极设计

1.2 声子晶体理论灵敏度与 Q 值

利用软件 COMSOL Multiphysics 5.0,测量在缺陷处加载微小质量块后器件本征频率变化,可计算出该器件理论灵敏度为 $257.6\ \text{Hz}/\text{ng}$ 。此外,通过仿真可得整个器件包含的总能量与 AlN 层包含的能量,从而计算出真空中的理论 $Q \approx 2.2 \times 10^4$ 。

2 声子晶体点缺陷工艺流程研究

首先,利用光刻显影溅射等工艺,在 AlN 层的表面制作上电极,然后在该层喷保护胶。其次,在硅层利用光刻显影蒸发等工艺分别制作铝掩膜和胶掩膜,并对此结构进行 2 次刻蚀。最后,对经上述处理后的器件边缘进行腐蚀,制作地点极并连接至 PCB 板上。器件和器件局部结构如图 4 所示。



(a) 点缺陷谐振器正面

(b) 电极局部放大图

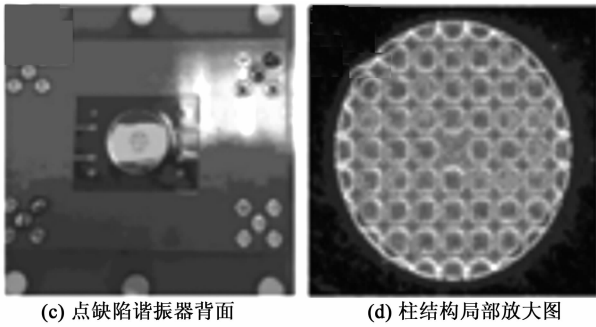


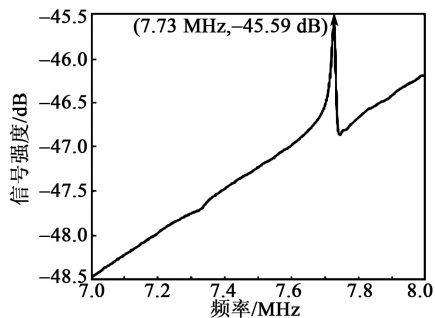
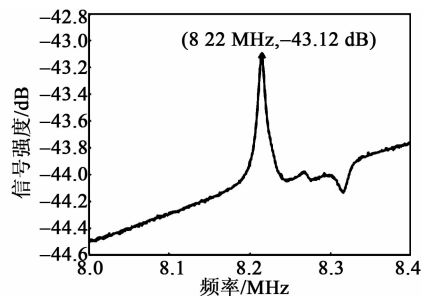
图4 器件和器件局部结构

设计图4(d)中的圆形包络可减小应力集中现象,且可在刻蚀设备中更好地进行气体交换。在中心器件与外围的连接处,采用部分柱结构作为连接,可提高器件的机械强度及器件的性能稳定性。

3 测试结果与误差分析

3.1 测试结果

用网络分析仪对该器件进行测试并导出所需数据。网络分析仪测试参数:带宽 300 Hz,扫描点数量为 801,扫描频率范围为 2~10 MHz(器件对应的 2 条理论禁带范围)。利用 MATLAB 绘制结果,底厚 55 μm 和 65 μm 的输出端信号分别如图 5、6 所示。当底厚 55 μm 和 65 μm 、频率分别为 7.726 MHz 和 8.215 MHz 时,有局域模式的产生。与仿真数据局域模式频率对比可看出,其都处在对应的禁带范围内。当扫描其他频段时,由于电极的选择性激励,无其他有效输出信号。

图5 底厚 55 μm 器件信号测试结果图6 底厚 65 μm 器件信号测试结果

3.2 测试结果误差分析

如表 2 所示,当底厚为 55 μm 时,仿真模式频率为 7.732 MHz,而实际频率为 7.726 MHz,此时误差为 0.078%。当底厚 65 μm 时,仿真频率为 8.265 MHz,而实际频率为 8.215 MHz,此时误差为 0.6%,故认为该器件模式振型结果与仿真模式振型结果基本一致。

表2 测试结果分析

平板厚度/ μm	仿真模式频率/MHz	实际模式频率/MHz	误差/%
55	7.732	7.726	0.078
65	8.265	8.215	0.600

模式频率产生误差的原因:

- 1) 刻蚀不完全陡直,导致柱结构是喇叭状。
- 2) 柱结构底端连接处刻蚀存在倒角与圆角。
- 3) 通过对该器件剖面发现,有很多“小针”结构,这些“小针”结构会对能量局域产生一定的影响。

上述因素都会对最终的实验模式频率结果产生影响。

该器件仿真真空 $Q \approx 22\ 000$,而通过测量的实验数据计算得出实际空气中 $Q \approx 700$,实际真空中 $Q \approx 800$ 。这是由于存在空气损耗和表面损耗^[13]造成的。随着器件尺寸的缩小,谐振体表面积/体积比增加,柱底刻蚀部分有大量“小针”,且由于刻蚀过程需要对 AlN 层涂抹泵油,对泵油的祛除问题未得到完全的解决,AlN 层的表面有粘附物。而谐振体表面粗糙、粘附物及晶格缺陷等都会使能量在表面损耗,从而影响 Q 值。通过实际空气与真空中 Q 值的对比可以得出,该器件 Q 值降低的主要因素是表面损耗,而不是空气损耗。

综上所述,实验数据与仿真数据虽然有一定的偏差,但如果能对工艺和泵油的祛除问题进行改进,就可进一步提高器件的 Q 值,从而更好地用于实际的液相检测中。

4 结束语

本文提出并制备了一种柱式平板声子晶体点缺陷。通过模式选择,筛选出我们需要的高频模式。用网络分析仪测量和采集在高频模式下的信号,并对结果进行绘制与分析,说明了表面损耗是 Q 值降低的主要因素。

如果能进一步优化工艺与设计,那么该平板结构的声子晶体上可应用于质量加载、液体的处理及

采用表面修饰法固定生物抗原等。柱式平板声子晶体有利于解决通常孔式声子晶体质量加载和液相处理较难的问题。

参考文献:

- [1] 张荣英,姜根山,王璋奇,等. 声子晶体的研究进展及应用前景[J]. 声学技术, 2006, 25(1): 35-42.
ZHANG Rongying, JIANG Genshan, WANG Zhanqi, et al. Progress in researches of phononic crystal and the application perspectives[J]. Technical Acoustics, 2006, 25(1): 35-42.
- [2] 刘启能. 介质吸收对一维声子晶体禁带的影响[J]. 压电与声光, 2009, 31(2): 230-233.
LIU Qineng. Effect of medium absorption on the one-dimensional photonic crystal forbidden band[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(2): 230-233.
- [3] ZHAN Zhengqiang, WEI Peijun. Influences of anisotropy on band gaps of 2D phononic crystal[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2010, 23(2): 181-188.
- [4] MATAR O B, ROBILLARD J F, VASSEUR J O, et al. Band gap tunability of magneto-elastic phononic crystal[J]. J Appl Phys, 2012, 111(5): 054901.
- [5] YAO Zongjian, YU Guilin, WANG Yuesheng, et al. Propagation of bending waves in phononic crystal thin plates with a point defect[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(13): 2571-2576.
- [6] 席锋, 刘启能. 非对称掺杂的一维声子晶体的缺陷模特性[J]. 压电与声光, 2011, 33(2): 280-283.
XI Feng, LIU Qineng. Particularity of one dimensional asymmetric doped photonic crystal[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(2): 280-283.
- [7] 刘启能. 研究一维掺杂声子晶体缺陷模的解析方法[J]. 物理学报, 2011, 60(4): 44302.
LIU Qineng. Analytic method of studying defect mode of 1D doped phononic crystal[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(4): 44302.
- [8] 侯丽娜, 侯志林, 傅秀军. 局域共振型声子晶体中的缺陷态研究[J]. 物理学报, 2014, 63(3): 343.
HOU Lina, HOU Zhilin, FU Xiujun. Defect state of the locally resonant phononic crystal[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(3): 343.
- [9] WU T T, HUANG Z G, TSAI T C, et al. Evidence of complete band gap and resonances in a plate with periodic stubbed surface[J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(11): 111902.
- [10] MOHAMMADI S, EFTEKHAR A A, POURABOLGHASEM R, et al. Simultaneous high-Q confinement and selective direct piezoelectric excitation of flexural and extensional lateral vibrations in a silicon phononic crystal slab resonator[J]. Sens Actuators A, 2011, 167(2): 524-530.
- [11] MARCHAL R, BOYKO O, BONELLO B, et al. Dynamics of confined cavity modes in a phononic crystal slab investigated by in situ time-resolved experiments[J]. Physical Review B, 2012, 86(22): 4302-1-4.
- [12] HUNG C H, WANG W S, LIN Y C, et al. Design and fabrication of an AT-cut quartz phononic Lamb wave resonator[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2013, 23(6): 065025.
- [13] 刘军. 高Q声子晶体声波传感器机理及实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.