

基于二维声子晶体的体声波谐振器仿真分析

石林豪¹, 轩伟鹏¹, 孙玲玲¹, 董树荣², 金浩², 骆季奎¹

(1. 杭州电子科技大学电子信息学院射频电路与系统教育部重点实验室, 浙江 杭州 310018;

2. 浙江大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 提出了一种基于声子晶体的新型体声波谐振器结构, 利用声子晶体在其带隙范围内对弹性波具有高反射率、低透射率的特点, 将声子晶体作为体声波谐振器底部的声反射层。首先计算出了4种不同结构声子晶体的带隙特性, 并使用有限元软件 COMSOL Multiphysics 对基于声子晶体的体声波谐振器结构进行建模仿真, 得出了主要结论。当体声波谐振器工作频率在声子晶体带隙范围内时, 直接以声子晶体作为体声波谐振器的衬底, 仿真得到的阻抗曲线较为平滑, 且 Q 值为 858.09, 有效机电耦合系数为 6.32%。

关键词: 体声波谐振器; 高反射率; 声子晶体; 有限元分析

中图分类号: TN629.1

文献标志码: A

doi:10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00251

Simulation of film bulk acoustic resonator based on two-dimensional phononic crystals

SHI Linhao¹, XUAN Weipeng¹, SUN Lingling¹, DONG Shurong², JIN Hao², LUO Jikui¹

1. Ministry of Education Key Lab of RF Circuits and Systems, School of Electronics and Information Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

2. College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract: A new structure of film bulk acoustic resonator (FBAR) based on phononic crystal (PnC) was proposed. The phononic crystal was used as the acoustic reflection layer at the bottom of the bulk acoustic wave resonator, which has the characteristics of high reflectivity and low transmittance of elastic wave in its band gap. The band gap characteristics of four kinds of phononic crystals with different structures were calculated by the finite element software COMSOL Multiphysics. The main conclusions are as follows. If the bulk acoustic resonator is working within the band gap of the phononic crystal, PnC can be used as the bottom acoustic reflection layer of the FBAR. With using PnC as the acoustic energy reflect structure, the impedance curve of FBAR is smooth, and the quality factor is closed to traditional FBAR with a value of 859 and effective mechanical coupling coefficient of 6.32%.

Key words: film bulk acoustic resonator, high reflectivity, phononic crystal, finite element analysis

0 引言

随着 5G 时代的到来, 各种无线通信设备所需要的工作频率不断提高, 射频频带也随之增加, 这就使得传统的声表面波 (SAW, surface acoustic wave) 滤波器不再能满足目前射频市场的需求^[1]。薄膜体声波谐振器 (FBAR, film bulk acoustic resonator) 是近年来出

现的一种采用压电薄膜加工的高频体声波谐振器, 因其具有体积小、品质因素高且工作频率高的优势, 目前已经成为当前市场的高频段主流滤波器之一^[2]。位于 FBAR 器件底部的声波反射结构是制备器件的关键, 但是目前市场所采用的空腔型 FBAR 耐功率承受度较低, 而布拉格反射结构制备难度较大^[3]。虽然近年来提出了采用声阻抗较低的柔性材料作为声波反

收稿日期: 2021-08-26 ; 修回日期: 2022-02-25

通信作者: 轩伟鹏, xuanweipeng@hdu.edu.cn

基金项目: 浙江省重点研发计划 (No.2021C05004)

Foundation Item: The Key Research and Development Program of Zhejiang Province (No.2021C05004)

射边界,但也存在声阻抗较低的柔性材料对声波反射能力不足导致器件 Q 值较低的问题^[4]。

声子晶体 (PnC, phononic crystal) 是由不同密度的材料周期性排列构成的,其基本特征为:带隙频率范围的弹性波在声子晶体中传播时会被抑制,而处于其他频率(通带)的弹性波可以传播。在带隙频率范围内,声子晶体对弹性波具有低透射率、高反射率的特性^[5]。研究表明,具有带隙特性的声子晶体在微电子机械系统(MEMS, micro-electromechanical system)声学谐振器方面具有广泛的应用价值。Wu 等^[6]创新性地提出了基于空气/硅构成的矩形晶格声子晶体的 SAW 谐振器,并通过实验证明基于声子晶体的 SAW 滤波器的插损相较于传统器件提高了 7 dB。随后, Siddiqi 等^[7]证明,对于频率在 10~200 MHz 范围内的兰姆波谐振器,使用二维声子晶体产生的声学带隙可以有效地减少由声波通过悬臂梁泄漏到基板上造成的锚点损耗,并且与传统谐振器相比,使用声子晶体的谐振器的 Q 值提升了接近 40%。虽然已经有许多研究人员成功将二维声子晶体用于提高 SAW 滤波器以及兰姆波谐振器的性能^[8-9],但还从未有人将其应用于体声波谐振器中。

本文提出以 PnC 作为体声波谐振器的底部声反射层,代替传统的空腔或布拉格反射结构,形成 PnC-FBAR,该结构为现有 FBAR 的制备工艺提供了一个新思路。本文首先利用多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 计算出 4 种不同结构声子晶体的能带与反射系数图,其次建立基于 4 种不同声子晶体结构的 PnC-FBAR 仿真模型,最后将得出的结果与空腔型 FBAR 进行对比,从理论上证明了 PnC-FBAR 方案的可行性。

1 声子晶体原理

声子晶体是近年来一种新型人工结构功能材料,它的基本特征为:在带隙频率范围内,在声子晶体中传播的弹性波衰减很大^[10],任何弹性波的透射系数都几乎接近于 0,在不考虑衰减的情况下,此时声子晶体对弹性波的反射系数接近于 1。

本文研究的声子晶体结构为周期有限结构,因此我们可以简化这些结构的模型,只取它们的周期性结构进行分析。4 种不同晶胞声子晶体结构如图 1 所示,正方格子结构如图 1(a)所示,该结构由 5×5 的正方形晶胞构成,基体与散射体填充的分别是硅与空气,对其中一个重复性晶胞进行计算即可。计算声子晶体能

带图的方式主要有 4 种:平面波展开法、时域有限差分法、传递矩阵法与有限元分析法^[11]。本文选用的计算方式为有限元法(FEM, finite element method),波矢量 \mathbf{k} 作为 Floquet 周期性边界条件包含在模型中。对于周期性声子晶体结构,可以用一组基矢量 \mathbf{a}_i 进行描述。基矢量的方向与晶胞的周期性相对应,此时结构中每一个点的坐标可表示为

$$\mathbf{x} = n_i \mathbf{a}_i + \mathbf{x}_0 \tag{1}$$

其中, n_i 为整数, \mathbf{x}_0 表示质点在晶格中所对应的坐标。在此基础上,可以定义倒格子基矢量 \mathbf{b}_j , 应该满足以下关系。

$$\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{b}_j = 2\pi \delta_{ij} \tag{2}$$

质点在固体中的位移满足

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = e^{-i\omega t} \tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{x}) \tag{3}$$

其中, \mathbf{u} 为增量位移, $\tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{x})$ 表示在 \mathbf{x} 处质点的振动幅值。最后一项 $e^{-i\omega t}$ 描述了此质点随时间的振动形式,其中 ω 为角频率。Bloch 条件指出当弹性波在固体介质中传播时,位移需要满足

$$\tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{x} + \mathbf{r}) = e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{x}) \tag{4}$$

将此式进一步展开为

$$e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{x}_0) = e^{i[(m_i \mathbf{b}_i + \mathbf{k}_0) \cdot \mathbf{a}_i + n_j \mathbf{b}_j]} \tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{x}_0) = e^{i(\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r})} \tilde{\mathbf{u}}(\mathbf{x}_0) \tag{5}$$

其中, \mathbf{k} 、 \mathbf{k}_0 表示波卡量, $m_i \mathbf{b}_i$ 表示基矢量。

从式(5)可以看出,只需要研究每一种结构对应的波矢量在第一布里渊区内的情形即可计算出能带图^[12]。

在本文中,图 1 所示的 4 种声子晶体结构基体材料皆为硅,散射体材料也统一设定为空气。结构参数为:

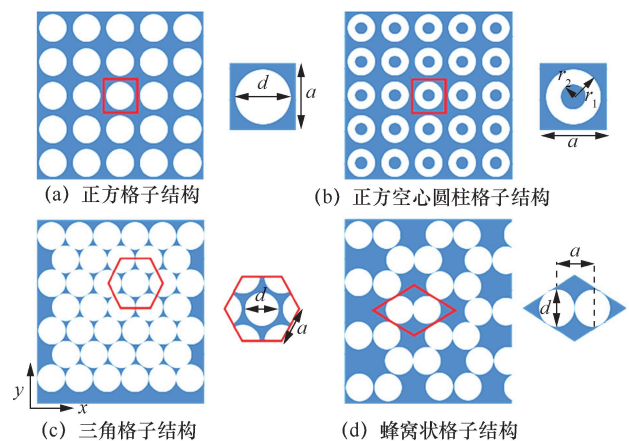


图 1 4 种不同晶胞声子晶体结构

图 1(a)所示的晶格常数 $a=0.9 \mu\text{m}$ ，散射体直径 $d=0.8 \mu\text{m}$ ；图 1(b)所示的晶格常数 $a=0.9 \mu\text{m}$ ，散射体半径 $r_1=0.4 \mu\text{m}$ 、 $r_2=0.3 \mu\text{m}$ ；图 1(c)所示两个相邻晶格之间的距离 $a=0.9 \mu\text{m}$ ，散射体直径 $d=0.8 \mu\text{m}$ ；图 1(d)两个相邻晶格的距离 $a=0.9 \mu\text{m}$ ，散射体直径 $d=0.8 \mu\text{m}$ ；硅与空气的材料参数见表 1。此外，为了分析各结构与 FBAR 联合仿真的工作频率，本文进一步使用 FEM 计算出图 1 所示声子晶体的反射系数图，反射系数计算方式示意图如图 2 所示，左右使用周期性分别为完美匹配层 (PML, perfect match layer)，用来吸收不必要的能量，上下使用周期性吸声边界以简化计算模型。上下两侧的蓝色区域分别为输入激励点与输出采样点。

材料	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	声速 $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	样式模量 E/GPa
硅	2 330	8 320	160
空气	1.293	343	—

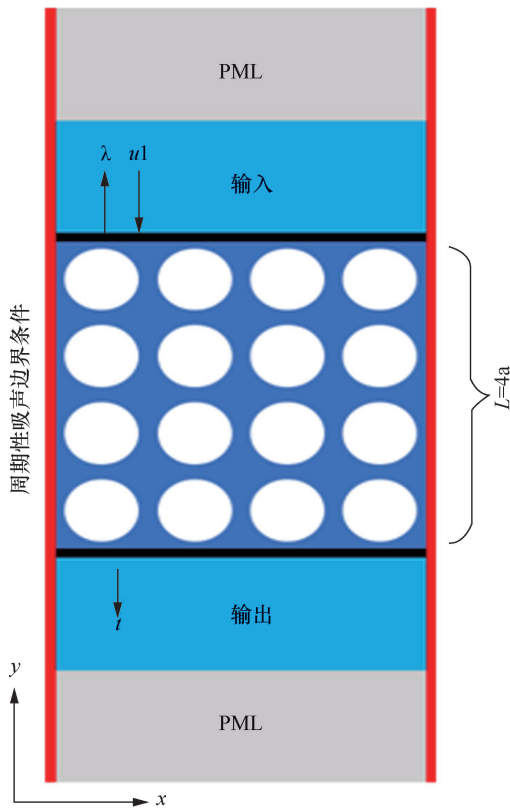
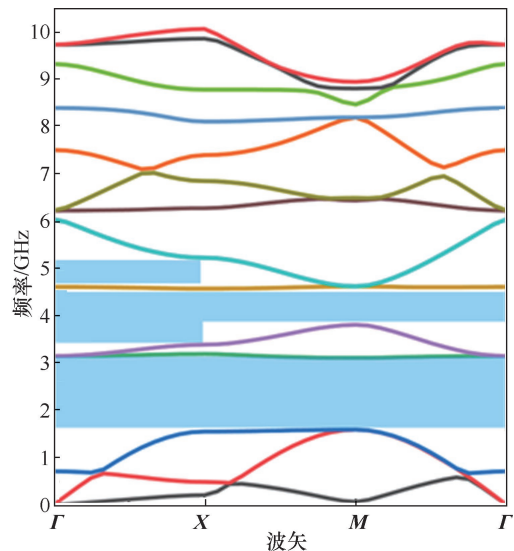


图 2 反射系数计算方式示意图

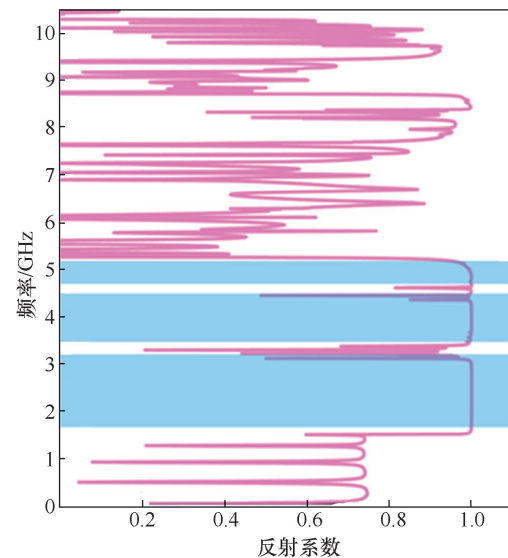
4 种结构的能带与反射系数计算结果如图 3~图 6 所示。

从图 3~图 6 可以看出，图 1 中 4 种所示声

子晶体在 0~10 GHz 的范围内都至少有一个超过 500 MHz 的带隙，并且在每一个结构的带隙范围内，右边的反射系数图都能与之相对应，也即前文所提到的在带隙范围内，声子晶体对声波的反射能力接近于全反射，也就是反射系数接近于 1。FBAR 底部声反射层的作用就是将声波反射到压电层中，防止声波泄漏到衬底造成器件能量损失，在传统的空腔结构中，由于空气的声阻抗接近于零，因此空气对声波的反射可以理解为完全反射^[13]，而本节计算出 4 种声子晶体对声波的反射能力也接近于完全反射，因此可以将声子晶体代替传统 FBAR 的底部空腔，形成 PnC-FBAR 的新型结构。



(a) 正方形格子声子晶体的能带图



(b) 在 0~10 GHz 该结构的反射系数图

图 3 矩形声子晶体的能带特性

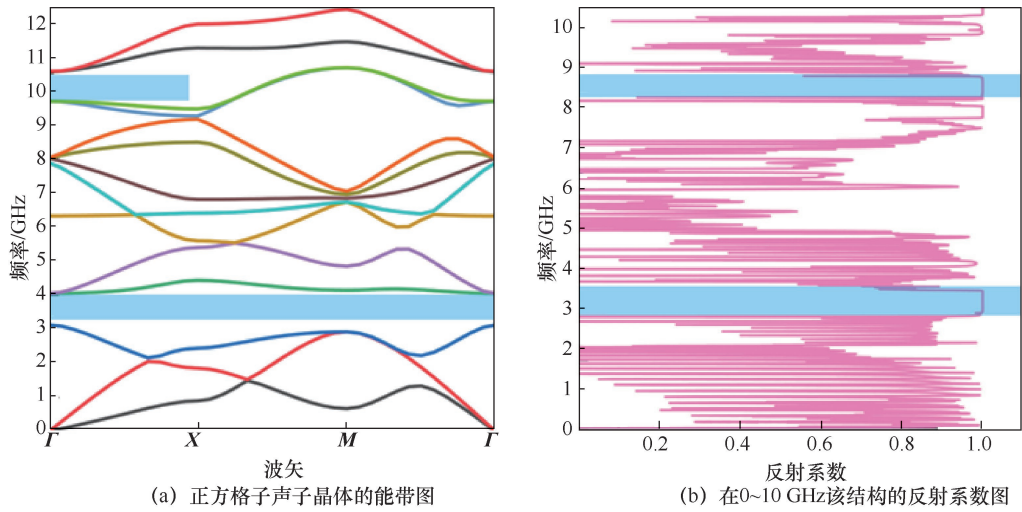


图4 正方空心圆柱型声子晶体的能带特性

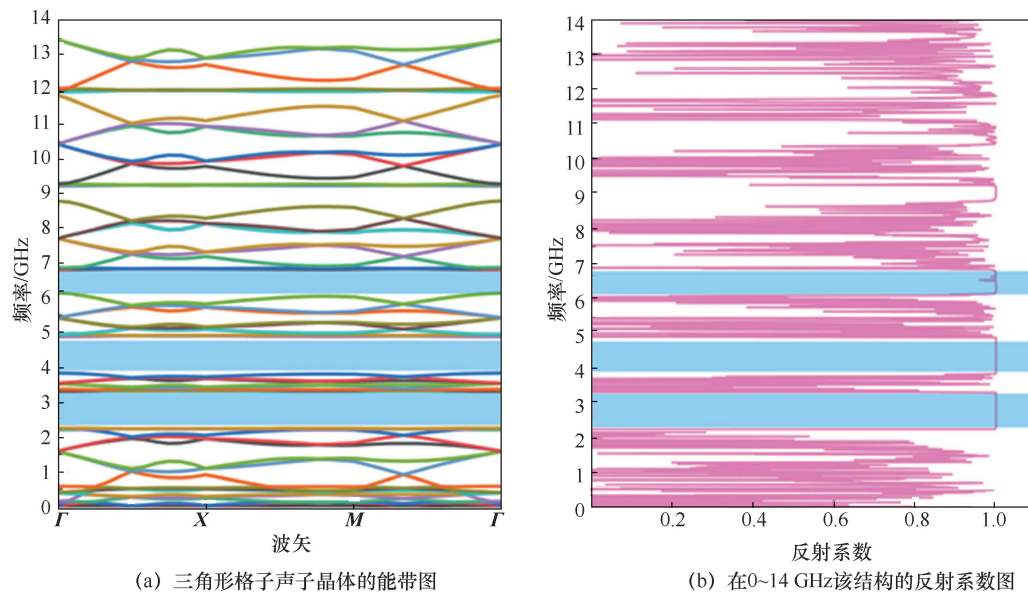


图5 三角型声子晶体的能带特性

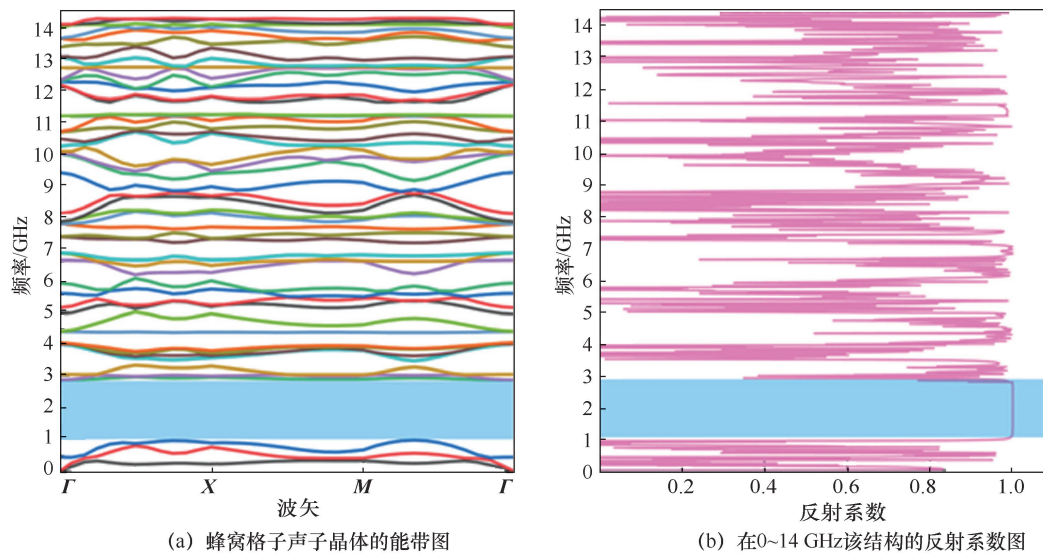


图6 蜂窝型声子晶体的能带特性

2 PnC-FBAR 建模及仿真结果

为了验证 PnC-FBAR 的可行性,分析其性能规律,本文建立了基于 AlN FBAR 的二维有限元仿真模型,如图 7 所示。首先确定各层使用的材料,从上到下依次为 Mo 上电极、AlN 压电层、Mo 下电极、声子晶体结构、Si 衬底。本文分别在 4 种结构的带隙范围内确定器件工作频率,分别是 2.4 GHz、3.4 GHz、2.7 GHz、2.4 GHz,因此 4 种结构仿真的 AlN 压电层厚度分别是 1 000 nm、500 nm、900 nm 与 1 000 nm。其余各层厚度保持一致,分别是 Mo 上电极厚度是 200 nm,Mo 下电极厚度是 250 nm,衬底厚度是 10 μm。

FBAR 的性能优劣主要通过品质因数 Q 和有效机电耦合系数 K_{eff} 衡量。 Q 表示 FBAR 周期内存储能量与耗散能量之比, Q 值越大器件损耗越低,

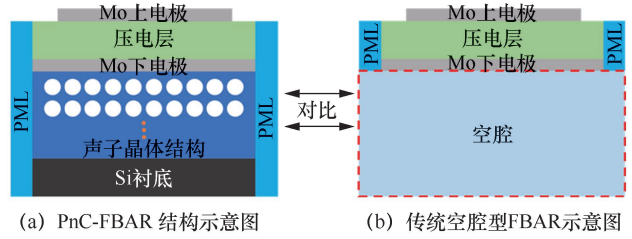


图 7 基于 AlN BAW 的二维有限元仿真模型

说明器件性能越好^[14],其计算式为

$$Q(f) = \frac{f}{2} \times \left| \frac{\partial Z}{\partial f} \right|, K_{\text{eff}} = \frac{\pi^2}{4} \times \left(\frac{f_a - f_r}{f_a} \right) \quad (6)$$

其中, f 表示谐振频率, Z 为器件阻抗, f_r 与 f_a 分别代表 FBAR 的串联谐振频率与并联谐振频率点。

4 种结构在其带隙频率范围内作为 FBAR 声反射层的阻抗与相应的空腔型 FBAR 的阻抗对比如图 8 所示,当 PnC-FBAR 的工作频率在相应声子晶体的带隙

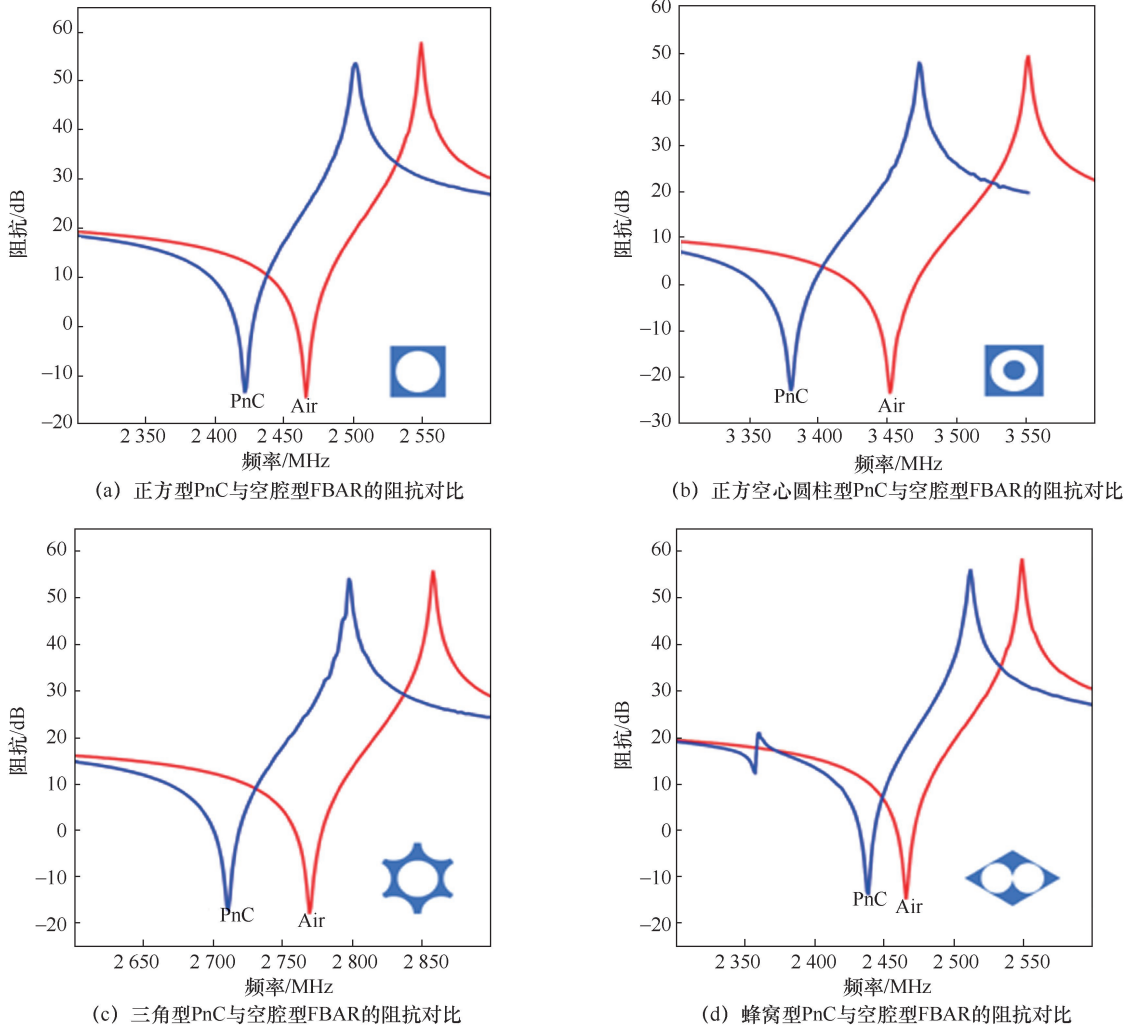


图 8 PnC-FBAR 与空腔型 FBAR 的阻抗对比

范围内时,其阻抗曲线相对平滑,没有出现明显的寄生谐振。但可以明显看到 PnC-FBAR 的频率略低于传统的空腔型 FBAR,这是 PnC-FBAR 声子晶体结构与衬底的负载效应造成的。此外,如果进一步减小扫描步长,PnC-FBAR 对比传统结构将会出现较多的凸点,声子晶体对声波的反射能力只是接近于空气,因此在 PnC-FBAR 结构中,仍会有部分声波从压电层泄漏到衬底中,造成额外的寄生谐振。在相同条件下,本文选取第一种结构的 PnC-FBAR 与 SMR-FBAR、Air-FBAR 作对比,不同结构器件性能对比见表 2,PnC-FBAR 的 Q 值最低,但是接近于 SMR 结构。该仿真结果从理论上证明了 PnC-FBAR 方案的可行性。

此外,本文进一步研究了随着声子晶体纵向周期排列层数增大对 PnC-FBAR 结构的影响。随着声子晶体纵向排列层数的增加,其反射系数将会增大,最后接近于一个常数^[15],而作为 FBAR 的底部声反射层,随着反射系数增大,器件的 Q 值必然会提升,因此本文对这一猜测进行了理论仿真,结果证明了猜测,随着纵向层数增加,PnC-FBAR 结构的 Q 值也同时增大。如图 9(a)所示,随着声子晶体纵向排列层数增加,其阻抗曲线寄生谐振逐渐减少,且更加平滑,器件的 Q 值也逐渐升高。

3 结束语

本文首先介绍了声子晶体基本理论、声子晶体能带结构计算方式,利用有限元仿真计算出 4 种结构在一定频段内的反射系数,并且根据该反射系数,将 4 种结构分别与 FBAR 联合进行有限元仿真,仿真结果清晰地表明声子晶体可以代替传统 FBAR 的空腔结构,声子晶体具有在禁带内对声波接近全反射的能力,可以作为 FBAR 的底部声反射层,本文为 FBAR 器件的结构设计提供了一种全新思路。

参考文献:

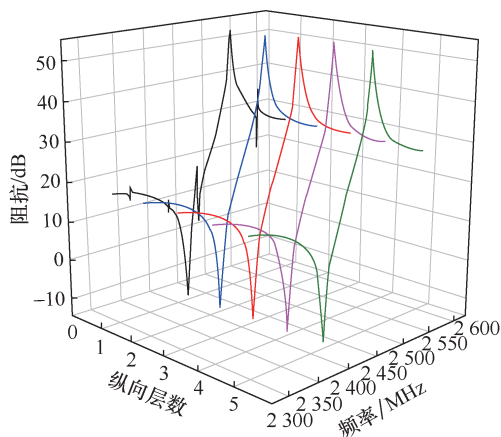
[1] 谢和平,张树人,杨成韬,等.薄膜体声波谐振器的研究进展[J].材料导报,2006,20(S2):330-332.
XIE H P, ZHANG S R, YANG C T, et al. Research progress in film bulk acoustic resonator[J]. Materials Review, 2006, 20(S2): 330-332.

[2] 韩东,胡顺欣,冯彬,等.Si基薄膜体声波谐振器(FBAR)技术研究[J].半导体技术,2012,37(6):456-459,469.
HAN D, HU S X, FENG B, et al. Study on silicon-based film bulk acoustic resonator (FBAR) technology[J]. Semiconductor Technology, 2012, 37(6): 456-459, 469.

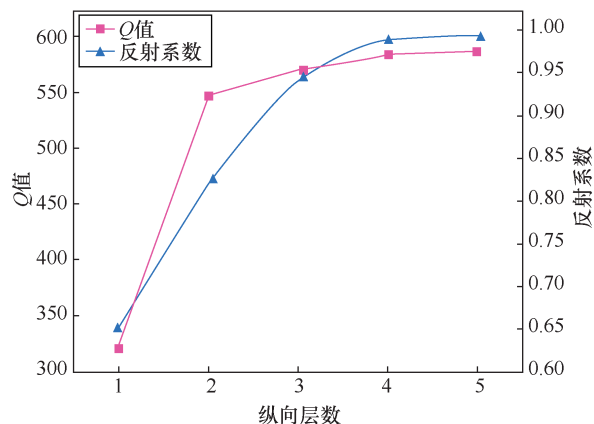
[3] 焦向全.体声波谐振器空腔结构研究[D].成都:电子科技大学,2015.
JIAO X Q. Research on cavity structure of film bulk acoustic resonator[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.

表 2 不同结构器件性能对比

结构	f_r /MHz	f_a /MHz	Δf /MHz	K_{eff}	Q_r	Q_p
PnC-FBAR	2 421.3	2 501.6	80.3	6.32%	858.09	595.60
Air-FBAR	2 465.6	2 548.4	82.8	6.69%	1 065.62	1 037.92
SMR-FBAR	2 454.1	2 525.4	71.3	5.54%	918.09	802.08



(a) 随着纵向层数增加,器阻抗更加平滑



(b) 随着纵向层数增加,反射系数增大, Q 值也随之增大

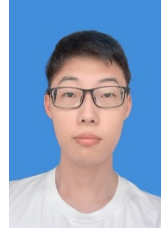
图 9 声子晶体纵向层数对 PnC-FBAR 器件性能的影响

- [4] 杨泰, 张根, 秦康宁, 等. 一种基于柔性基底的薄膜体声波谐振器[J]. 压电与声光, 2018, 40(6): 901-904.
YANG T, ZHANG G, QIN K N, et al. A thin film bulk acoustic resonator based on flexible substrate[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2018, 40(6): 901-904.
- [5] GARCIA-RAFFI L M, SALMERÓN-CONTRERAS L J, HERRE-RO-DURÁ I, et al. Broadband reduction of the specular reflections by using sonic crystals: a proof of concept for noise mitigation in aerospace applications[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 73: 300-308.
- [6] WU T T, WU L C, HUANG Z G. Frequency band-gap measurement of two-dimensional air/silicon phononic crystals using layered slanted finger interdigital transducers[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(9): 094916.
- [7] SIDDIQI M, LEE J. AlN-on-Si MEMS resonator bounded by wide acoustic bandgap two-dimensional phononic crystal anchors[M]. 2018.
- [8] TONG Y J, HAN T. Anchor loss reduction of lamb wave resonator by pillar-based phononic crystal[J]. Micromachines, 2021, 12(1): 62.
- [9] TU C, LEE J E Y, ZHANG X S. Dissipation analysis methods and *Q*-enhancement strategies in piezoelectric MEMS laterally vibrating resonators: areview[J]. Sensors, 2020, 20(17): 4978.
- [10] LI Y, LIANG B, ZOU X Y, et al. Extraordinary acoustic transmission through ultrathin acoustic metamaterials by coiling up space[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(6): 063509.
- [11] WANG T, WANG H, SHENG M P, et al. Complete low-frequency bandgap in a two-dimensional phononic crystal with spindle-shaped inclusions[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(4): 046301.
- [12] 鄂羽佳. SMR 全绝缘布拉格反射栅的设计、制备与表征[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
E Y J. Design, fabrication and characterization of SMR fully insulated Bragg reflector[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology. 2019.
- [13] ZHU X, XIAO Y, WEN J, YU D. Flexural wave band gaps and vibration reduction properties of a locally resonant stiffened plate (In Chinese) [EB]. 2016.
- [14] NGUYEN N, JOHANNESSEN A, ROTH S, et al. A design approach for high-Q FBARs with a dual-step frame[J]. IEEE

Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2018, 65(9): 717-725.

- [15] 刘松, 罗春荣, 翟世龙, 等. 负质量密度声学超材料的反常多普勒效应[J]. 物理学报, 2017, 66(2): 024301.
LIU S, LUOC R, ZHAI S L, et al. Inverse Doppler effect of acoustic metamaterial with negative mass density[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(2):024301.

[作者简介]



石林豪 (1997-), 男, 杭州电子科技大学电子信息学院硕士生, 主要研究方向为薄膜体声波谐振器。

轩伟鹏 (1990-), 男, 博士, 杭州电子科技大学副教授, 主要研究方向为压电 MEMS 器件、薄膜体声波器件及其在传感器、滤波器等领域的基础理论与应用。

孙玲玲 (1956-), 女, 杭州电子科技大学教授、射频电路与系统教育部重点实验室主任, 主要研究方向为微波毫米波集成电路与智能系统设计。

董树荣 (1973-), 男, 浙江大学教授, 主要研究方向为 MEMS、智能传感、柔性电子。

金浩 (1979-), 男, 浙江大学副教授, 主要研究方向为 MEMS、医疗电子。

骆季奎 (1960-), 男, 浙江大学教授, 主要研究方向为智能传感器, 纳米发电机, 基于表面声波的微流体器件、微泵、微混合器、传感器等。