

基于声子晶体的兰姆波谐振器品质因数 改善机制研究

聂时进¹, 孟光¹, 郑凯², 黄栋², 刘钢^{2,3}

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 成都智远先进制造技术研究院有限公司, 四川 成都 610511;

3. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:针对兰姆波谐振器谐振频率在超过 6 GHz 时传输损耗高的问题, 提出了一种基于具有明显带隙的声子晶体(PnC)阵列的锚杆, 能有效提高薄膜铌酸锂兰姆波谐振器(LWR)的品质因数(Q), 从而降低兰姆波滤波器的插入损耗。通过构建 PnC 结构有限元仿真模型研究了 PnC 结构的色散关系, 采用 PnC 延迟线模型设计, 研究了 PnC 阵列的传输特性, 并通过建立谐振器性能的对比分析。结果表明, 在谐振频率稳定的条件下, 与传统均匀梁锚杆谐振器相比, PnC 阵列锚杆谐振器的 Q 值提升了 5 倍。

关键词: 锚杆损耗; 微机电系统(MEMS)谐振器; 声子晶体; 品质因数; 兰姆波

中图分类号: TN65; TN75 **文献标识码:** A

Enhancement Mechanism of Quality Factor in Lamb Wave Resonators by Phononic Crystals

NIE Shijin¹, MENG Guang¹, ZHENG Kai², HUANG Dong², LIU Gang^{2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Chengdu Zhiyuan Advanced Manufacturing Technology Research Institute Co., LTD, Chengdu 610511, China;

3. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: To address the high transmission loss of Lamb wave resonators at frequencies exceeding 6 GHz, this paper introduces an anchoring structure based on phononic crystal (PnC) arrays with distinct band gaps. This design effectively enhances the quality factor (Q) of lithium niobate Lamb wave resonators (LWRs), thereby reducing the insertion loss of Lamb wave filters. By constructing a finite element simulation model of the PnC structure, we analyzed the dispersion relationship of the PnC structure. Utilizing a PnC delay line model, we investigated the transmission characteristics of the PnC array. Through a comparative analysis of resonator performance, this study confirms that under stable resonance frequency conditions, the Q value of the resonator using PnC array anchors is increased by a factor of five compared to traditional uniform beam anchor resonators.

Key words: anchor loss; MEMS resonator; phononic crystal; quality factor; Lamb wave

0 引言

近年来,随着无线通信技术的迅速发展,6 GHz 频段(5 925~6 425 MHz)因同时具备覆盖率和容量的优势,为高数据速率和提高网络容量提供了契机^[1-3]。6.2 GHz 子频段是 6 GHz 频段的中心频率范围,传统的声表面波(SAW)滤波器和体声波(BAW)滤波器在该频段无法兼具大带宽和高频率

的通信需求^[4-6]。因此,吴梓莹等^[1]设计了中心频率为 6.2 GHz 的一阶反对称兰姆波滤波器,但由于兰姆波谐振器(LWR)品质因数(Q)较低,单位时间周期内谐振器存储能量和损耗能量之比较低,最终导致滤波器插入损耗较高。其中,锚杆损耗是 LWR 最大的能量损耗因素^[6-10]。而声子晶体(PnC)能够形成完全的声学带隙以禁止声波从谐振体内传播

收稿日期:2024-03-29

基金项目:四川天府峨眉计划资助

作者简介:聂时进(2000-),男,河北省石家庄市人,硕士生。

至谐振体外基底^[11-15],在减少锚杆损耗方面具备重大应用前景。本文提出了一种二维 PnC 结构的 LWR 锚杆设计方法,利用 PnC 结构产生的布喇格带隙,实现了锚杆损耗的高效抑制。首先采用有限元仿真法研究了 PnC 的能带结构和色散关系,并以最大带隙为目标导向,进一步优化 PnC 结构。其次通过基于多物理场的有限元延迟线模型验证了 PnC 的带隙覆盖谐振器的谐振频率范围。最后通过计算谐振器的导纳信息,评估谐振器的 Q 值变化,证实了 PnC 结构能够高效阻止声波通过锚杆传播。

1 PnC 锚杆的设计

PnC 是由不同阻抗的两种或两种以上材料周期性排列而成的功能材料/结构^[16-17]。当声波通过声子晶体传播时,由于内部声子结构的相互作用,组建了独特的色散关系曲线,并在该曲线间的频率范围内,声波被有效禁止传播,从而形成带隙区域。因此,PnC 板可有效地阻止锚杆泄漏能量,并限制谐振体外的机械振动,从而有助于提高谐振器的整体性能。声子带隙的范围和分布受材料的力学性能和几何尺寸的影响^[18-21]。带隙的产生主要是通过布喇格散射机制实现:在特定波长下,当正向传播布洛赫波和反向传播布洛赫波匹配且不耦合时,它们在能带结构空间叠加,并产生布喇格带隙^[22-25]。本文探究了在晶格常数 $a = 250 \text{ nm}$ 的 LiNbO_3 薄膜上,由高度 $h = 250 \text{ nm}$ 的 Pt 柱组成 PnC 结构的弹性波传播性能,其中 PnC 厚度与锚杆一致。研究表明,半径 $r = 50 \text{ nm}$ 的圆形 Pt 柱散射体单胞可产生相对其他材料较宽的带隙。图 1 为基于 Pt 柱的 PnC 基本单元结构。

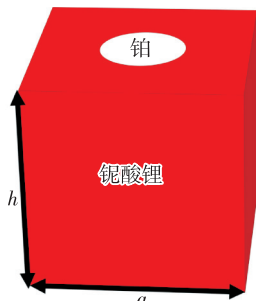


图 1 三维视图的 PnC 基本单元

声波在固体中的传播式为

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(c_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right) = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; u_i 为位移分量; t 为时间; c_{ijkl} 为弹性常数; $x_j (j=1,2,3)$ 分别为坐标的 x, y, z 轴。

另外,基于布洛赫原理分析了波数 k 与频率 ω 之间的色散关系,确定了结构的能带特性。在声子晶体中,传播的布洛赫波^[26]可表示为

$$u(r) = e^{i(k \cdot r)} \tilde{u}(r) \quad (2)$$

式中: u 为位移场; k 为 Bloch 波矢量; \tilde{u} 为 Bloch 位移函数,其周期性与声子晶体相同。

由于声子晶体规则的几何特性和基本单元的高度对称性,将布里渊区进一步约简为不可约布里渊区。对不可约布里渊区内的布洛赫波的分析可完全涵盖周期结构的布洛赫波。图 2 为基本单元的顶视图和不可约布里渊区。带隙宽度是不存在布洛赫波的频率范围,在带隙内禁止声波的传播。部分带隙至少在布里渊区的一个方向上是有效的,完全带隙在整个布里渊区均有效。

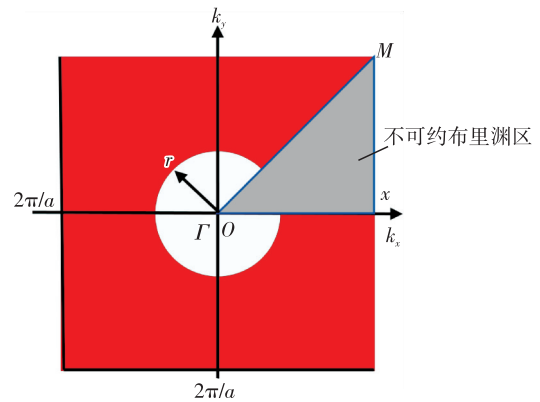


图 2 基本单元的顶视图和不可约布里渊区

通过扫描不可约布里渊区的路径 $\Gamma \rightarrow X \rightarrow M \rightarrow \Gamma$,研究波数 k 与频率 ω 之间的色散关系。在使用有限元分析软件 Comsol 进行参数设定时,设置晶格常数 $a = 250 \text{ nm}$,波矢的 x 分量与 y 分量分别为

$$k_x = \begin{cases} k \cdot \frac{\pi}{a} & (k < 1) \\ \frac{\pi}{a} & (1 \leq k \leq 2) \\ (3-k) \cdot \frac{\pi}{a} & (2 < k \leq 3) \end{cases} \quad (3)$$

$$k_y = \begin{cases} 0 & (k < 1) \\ (k-1) \cdot \frac{\pi}{a} & (1 \leq k \leq 2) \\ (3-k) \cdot \frac{\pi}{a} & (2 < k \leq 3) \end{cases} \quad (4)$$

为了匹配 Bloch 定理,并得到声子晶体的色散

关系,可以将包含 k_x 和 k_y 的 Floquet 周期性应用于沿 x 、 y 轴的边界条件。在频域求解器中选择的参数扫频范围为 $0 \sim 3$,沿着不可约布里渊区进行扫频^[27-29]。材料的性质对 PnC 结构的带隙有很大影响。对于固体-固体声子晶体,质量密度和杨氏模量是调节带隙的两个主要力学特性。声子晶体的外基底材料选择铌酸锂,与谐振器的压电材料一致。散射体材料分别研究了金(Au)、铝(Al)、银(Ag)和铂(Pt)4种不同的金属。图3为4种柱状材料的色散关系曲线,在所有带隙中,使用Pt作为散射体材料的PnC结构产生的带隙最宽,并且与LWR的谐振频率更匹配。

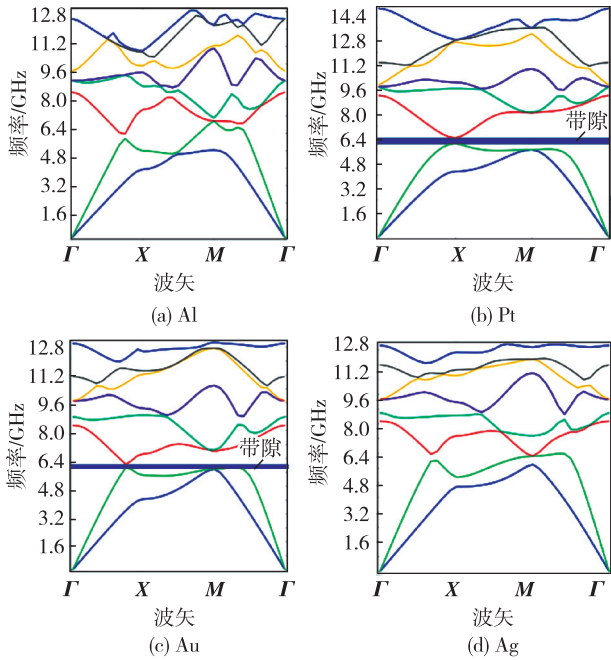


图3 不同散射体的PnC色散关系

通常带隙越大,越能更高效地阻止声波的传播。理想情况下,带隙应该完全覆盖兰姆波谐振器的谐振频率范围^[27]。带隙的中心频率 f_c 和带隙宽度(BW)是声学带隙的两个关键参数, f_c 决定 PnC 结构生效频率, BW 影响 PnC 结构抑制声波的能力。定义:

$$f_c = \frac{f_U + f_L}{2} \quad (5)$$

$$BW = f_U - f_L \quad (6)$$

式中 f_U , f_L 分别为带隙的上、下频率边界。由式(5)、(6)可得,散射体为Pt的PnC色散,其 $f_c = 6.21$ GHz, $BW = 0.47$ GHz。

正方体基底嵌入散射体圆柱的结构可通过改变

散射体圆柱的半径 r 调整声波带隙,以覆盖谐振器的谐振频率。为了获得最大的带隙,本文分析了 r 对 PnC 带隙的影响。表1是散射体材料为Pt的中心频率和带隙宽度随 r 的变化情况,证实了 $r = 49$ nm 是 PnC 设计中创建最大带隙的最佳选择。

表1 PnC中心频率和带隙宽度随 r 的变化

r/nm	f_c/GHz	带隙宽度/GHz
48	5.95	0.49
49	6.09	0.53
50	6.21	0.47
51	6.29	0.43

2 传输特性分析

本文通过计算弹性波的传输特性,评估了所提出的PnC锚杆中声带隙抑制声波的能力。与色散关系中使用的无限周期散射体阵列不同,传输特性分析使用的模型是有限散射体阵列(延迟线模型),如图4所示。

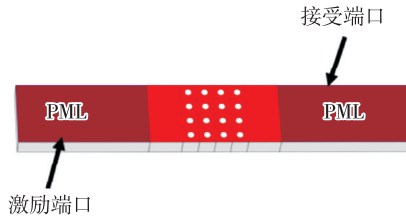


图4 用于分析传输特性的 4×4 PnC 示意图

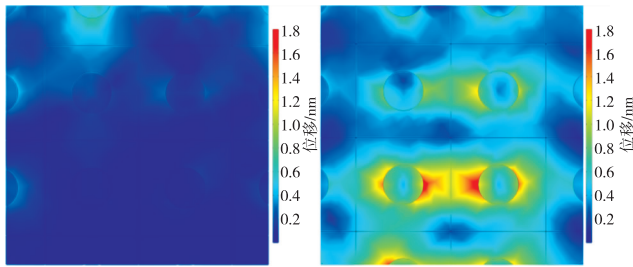
激励和接受端口设置在 4×4 PnC 基本单元的两侧。在有限元模型中,将完美匹配层(PML)设置在结构的两侧,以减小声波反射效应;在激励端口的界面上施加 x 、 y 、 z 方向的固定位移,以激发不同的机械波,上下边界设置为自由边界条件。传输损耗为

$$S_{21} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{d_{\text{receiving}}^2}{d_{\text{source}}^2} \right) \quad (7)$$

式中: P_1 , P_2 分别为激励端口和接受端口位移的时间平均功率; $d_{\text{receiving}}$, d_{source} 分别为激振面和受振面总位移大小。

图5(a)是激励频率为6.1GHz时落入带隙的结构位移分布,此时入射波几乎被完全反射,机械能被很好地限制在激励端口。图5(b)是激励频率为7GHz且位于带隙外时结构的位移分布。由图可看出,PnC锚杆有大量机械能泄漏。图6为PnC的传输特性曲线。由图可知,在5.65~6.45GHz

内声波有较强的衰减现象,并且覆盖了谐振器的工作频率(6.2 GHz)。



(a) 激励频率为6.1 GHz (b) 激励频率为7 GHz

图 5 不同激励频率的 PnC 位移分布

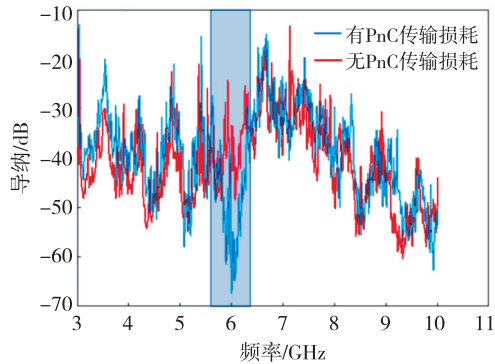


图 6 PnC 的传输特性曲线

3 LWR 设计与有限元分析

通过建立具有均匀梁锚杆和 PnC 阵列锚杆的谐振器 Q 值的对比分析,验证了 PnC 结构抑制锚杆损耗的有效性。这两种谐振器均由 300 nm 厚的 LiNbO₃ 薄膜压电层和 70 nm 厚的 Au 电极组成。采用对称边界条件,对谐振器的 1/4 进行仿真。谐振器 PnC 锚杆只用 PnC 结构代替了 1/2 的锚杆,而均匀梁锚杆是均匀基底材料,其厚度和材料都与压电层相同。LWR 的其余参数如表 2 所示。

表 2 LWR 设计值

换能器叉指数/对	谐振腔长度/ μm	谐振腔宽度/ μm
5	120	40
锚杆长度/ μm	锚杆宽度/ μm	叉指电极间距/ μm
5	20	5

为了精确评估锚杆损耗,通过锚杆耗散的声波再反射回谐振器前必须被完全吸收。吸收边界条件(ABC)和完美匹配层(PML)是有限元模拟中常用的两种技术,但 PML 在几何尺寸和边界条件上比 ABC 提供了更多的灵活性^[8]。如图 7 所示,在有限元模型中,采用包含长方体基板和半圆柱 PML 来假设半无限基板,基板半径和 PML 半径均为 λ (λ

为波长)。

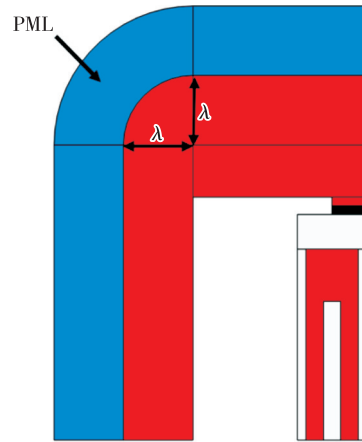


图 7 包含基板和 PML 的 LWR(1/4)示意图

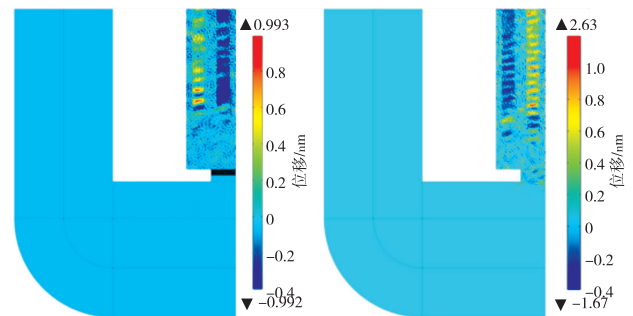
4 结果与讨论

Q 表示谐振器储存的峰值能量与每周期通过锚杆损耗的能量之比。Q 值越高,锚杆损耗被抑制得越好。谐振器的 Q 为

$$Q = \frac{f}{-3 \cdot \Delta f} \quad (8)$$

式中: f 为谐振器的谐振工作频率; Δf 为 -3 dB 带宽。

采用均匀梁锚谐振器的 Q 值低,这意味着有很大比例的声能通过锚杆被耗散。PnC 锚杆具有的完全带隙可高效抑制声波通过锚杆传播,并显著改善 Q,采用 PnC 板锚杆的谐振器实现了比现有方案中更高的 Q^[1]。通过对均匀梁锚杆谐振器与 PnC 锚杆谐振器有限元模型进行频域分析,并施加各向同性机械阻尼来估计材料损失^[3],可得到应力位移,如图 8 所示。由图 8(a)可看出,均匀梁锚杆有明显的位移并扩散到谐振器基底,说明部分声波被耗散。由图 8(b)可看出,PnC 锚杆和基底中无明显位移,这表明声波被耗散的程度降低。



(a) PnC 板锚杆 (b) 均匀梁锚杆

图 8 PnC 板锚杆和均匀梁锚杆的位移图

图 9 为 PnC 板锚杆和均匀梁锚杆的导纳图。

由图可看出,均匀梁锚杆和 PnC 板锚杆的 LWR 谐振频率分别为 6.24 GHz 和 6.25 GHz。通过计算谐振频率与-3 dB 带宽之比可知,均匀梁锚杆和 PnC 板锚杆谐振器的 Q 值分别为 69 和 352,即采用 PnC 锚杆使 Q 值提高了 5 倍,计算结果进一步证明了 PnC 锚杆能增强 LWR 的性能,并且 PnC 板锚杆对谐振频率影响较小,未产生额外的杂散模式。

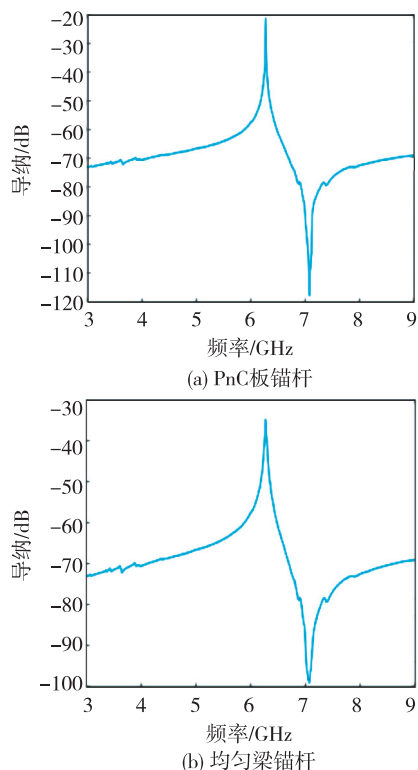


图9 PnC板锚杆和均匀梁锚杆的导纳图

5 结束语

本文首先提出了一种工作在 6 GHz 频段、宽带隙的新型声子晶体结构,通过研究声子晶体结构的色散关系,分析了散射体材料、半径对声子晶体带隙的影响,并通过对比分析构建了最优声子晶体结构。散射体的材料为 Pt,半径为 50 nm,带隙中心频率为 6.21 GHz,带隙宽度为 0.47 GHz。通过延迟线模型仿真获得了 PnC 阵列的声波衰减范围为 5.65~6.45 GHz,完全覆盖了谐振器的谐振频率,有效地抑制了锚杆损耗。通过谐振器有限元模型仿真可得,与传统均匀梁锚杆^[1]相比,在 LWR 的谐振频率基本保持不变的前提下,加载 PnC 结构的 LWR 的 Q 值有较大提升(Q 从 69 提高到 352),显著降低了兰姆波滤波器的插入损耗,实现了兰姆波传感器的高精度要求,在未来无线通信或传感领域

中具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] WU Ziyang, YANG Kai, LIN Fuhong, et al. 6.2 GHz lithium niobate MEMS filter with FBW of 11.8% and IL of 1.7 dB[C]//[S. l.]:2022 IEEE MTT-S International Conference on Microwave Acoustics and Mechanics (IC-MAM),2022: 98-101.
- [2] ZOU J, LIN C M, PISANO A P. Quality factor enhancement in lamb wave resonators utilizing butterfly-shaped aln plates[C]//Chicago, IL, USA:In Proceedings of the 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium,2014:81-84.
- [3] LIU Y,CAI Y,ZHANG Y,et al. Materials,design,and characteristics of bulk acoustic wave resonator:A review[J]. Micromachines, 2020,11: 630.
- [4] 于晓权,何杰,马晋毅.压电 MEMS 兰姆波器件技术的最新进展与展望[J].压电与声光,2022,44(2):223-229. YU Xiaoquan, HE Jie, MA Jinyi. Recent advances and prospects of Lamb wave devices based on piezo-MEMS [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2022, 44 (2): 223-229.
- [5] ZOU J, LIU J, TANG G. Transverse spurious mode compensation for AlN Lamb wave resonators[J]. IEEE Access, 2019, 7:67059-67067.
- [6] 张沂,孙延龙.单晶 LNBAW 谐振器有限元仿真研究[J].压电与声光,2022,44(1):26-29. ZHANG Yi, SUN Yanlong. FEM simulation study on single crystalline LN BAW resonator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2022,44(1):26-29.
- [7] SEGOVIA-FERNANDEZ J, CREMONESI M, CASSELLA C, et al. Experimental study on the impact of anchor losses on the quality factor of contour mode AlN resonators[C]//Barcelona, Spain:In Proceedings of the 2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2013: 2473-2476.
- [8] FRANGI A, CREMONESI M, JAAKKOLA A, et al. Analysis of anchor and interface losses in piezoelectric MEMS resonators[J]. Sens Actuators A:Phys,2013, 190: 127-135.
- [9] BINDEL D S, GOVINDJEE S. Elastic PMLs for resonator anchor loss simulation[J]. Int J Numer Methods Eng, 2005, 64:789-818.
- [10] SIDDIQI M W U, FEDELI P, TU C, et al. Numerical analysis of anchor loss and thermoelastic damping in

- piezoelectric AlN-on-Si Lamb wave resonators [J]. *J Micromech Microeng*, 2019, 29:105013.
- [11] PANDEY M, REICHENBACH R B, ZEHNDER A T, et al. Reducing anchor loss in MEMS resonators using mesa isolation [J]. *J Microelectromech Syst*, 2009, 18: 836-844.
- [12] VAN BEEK J, PUERS R. A review of MEMS oscillators for frequency reference and timing applications [J]. *J Micromech Microeng*, 2011, 22: 013001.
- [13] ZAFAR L R, HUANG J, KHAN M A. Quality enhancement and insertion loss reduction of a rectangular resonator by employing an ultra-wide band gap diamond phononic crystal [J]. *Chin J Phys*, 2020, 65: 481-490.
- [14] HSU J C, HSU F C, HUANG T C, et al. Reducing anchor loss in micromechanical resonators using phononic crystal strips [C]//Orlando, FL, USA; In Proceedings of the 2011 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2011: 2483-2486.
- [15] LIN C M, HSU J C, SENESKY D G, et al. Anchor loss reduction in AlN Lamb wave resonators using phononic crystal strip tethers [C]//Taipei, Taiwan; In Proceedings of the 2014 IEEE International Frequency Control Symposium, 2014: 1-5.
- [16] BAO F H, WU X Q, ZHOU X, et al. Spider web-like phononic crystals for piezoelectric MEMS resonators to reduce acoustic energy dissipation [J]. *Micromachines*, 2019, 10: 626.
- [17] KUO N K, ZUO C, PIAZZA G. Microscale inverse acoustic band gap structure in aluminum nitride [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 093501.
- [18] OSEEV A, LUCKLUM R, ZUBTSOV M, et al. SAW-based phononic crystal microfluidic sensor—microscale realization of velocimetry approaches for integrated analytical platform applications [J]. *Sensors*, 2017, 17: 2187.
- [19] MAURIN F, CLAEYS C, DECKERS E, et al. Probability that a band-gap extremum is located on the irreducible Brillouin-zone contour for the 17 different plane crystallographic lattices [J]. *Int J Solids Struct*, 2018, 135, 26-36.
- [20] SONG A, WANG X, CHEN T, et al. Low-frequency bandgaps of two-dimensional phononic crystal plate composed of asymmetric double-sided cylinder stubs [J]. *Int J Mod Phys B*, 2016, 30: 1650029.
- [21] SIDDIQI M W U, LEE J E Y. Wide acoustic bandgap solid disk-shaped phononic crystal anchoring boundaries for enhancing quality factor in AlN-on-Si MEMS resonators [J]. *Micromachines*, 2018, 9: 413.
- [22] BAO F H, BAO J F, LEE J E Y, et al. Quality factor improvement of piezoelectric MEMS resonator by the conjunction of frame structure and phononic crystals [J]. *Sens Actuators A Phys*, 2019, 297: 111541.
- [23] OTSUKA P H, DANWORAPHONG S, VERES I, et al. Confinement of acoustic fields in a honeycomb phononic crystal slab [C]//Luang Prabang, Laos; In Proceedings of the 2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology, 2019: 1-3.
- [24] RONDA S, ARAGÓN J L, IGLESIAS E, et al. The use of phononic crystals to design piezoelectric power transducers [J]. *Sensors*, 2017, 17: 729.
- [25] ANUFRIEV R, NOMURA M. Phonon and heat transport control using pillar-based phononic crystals [J]. *Sci Technol Adv Mater*, 2018, 19: 863-870.
- [26] MA C, GUO J, LIU Y. Extending and lowering band gaps in one-dimensional phononic crystal strip with pillars and holes [J]. *J Phys Chem Solids*, 2015, 87: 95-103.
- [27] BABOLY M G, SU M, REINKE C, et al. The effect of stiffness and mass on coupled oscillations in a phononic crystal [J]. *AIP Adv*, 2013, 3: 112121.
- [28] MOHAMMADI S, EFTEKHAR A A, ADIBI A. Large simultaneous band gaps for photonic and phononic crystal slabs [C]//San Jose, CA, USA; In Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics, 2008.
- [29] KHELIF A, ACHAOUY Y, BENCHABANE S, et al. Locally resonant surface acoustic wave band gaps in a two-dimensional phononic crystal of pillars on a surface [J]. *Phys Rev B*, 2010, 81: 214303.