

基于点缺陷的花瓣形声子晶体中的弹性波能量局域和压电能量收集

杨伊漫, 田苗*

兰州交通大学数理学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2026年5月1日; 录用日期: 2026年6月1日; 发布日期: 2026年6月9日

摘要

本文设计了一种具有花瓣状孔洞结构的 7×7 二维正方晶格声子晶体(PnC)压电能量收集(PEH)系统。通过移除中心单胞的孔洞引入点缺陷, 并在缺陷处粘贴圆盘形压电片, 以实现弹性波能量的局域, 并利用压电效应进行收集。分析了该结构在点缺陷处产生的六种局域模式, 研究了系统的力学与电学输出性能, 并探讨了压电片直径和厚度对其电能输出性能的影响。结果表明, 当压电片直径为10 mm、厚度为2.3 mm时, 系统的最大输出电压和功率分别达到45.727 V和17.891 mW, 机电能量转换效率为16.84%。通过优化压电片与缺陷模式的匹配关系, 该工作显著提升了能量转换效率, 为高性能压电能量收集系统的设计提供了新思路。

关键词

压电能量收集, 声子晶体, 能量局域, 缺陷态, 弹性波

Elastic Wave Energy Localization and Piezoelectric Energy Harvesting in Petal-Shaped Phononic Crystals Based on Point Defects

Yiman Yang, Miao Tian*

School of Mathematics and Physics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: May 1, 2026; accepted: June 1, 2026; published: June 9, 2026

*通讯作者。

文章引用: 杨伊漫, 田苗. 基于点缺陷的花瓣形声子晶体中的弹性波能量局域和压电能量收集[J]. 声学 & 振动, 2026, 14(2): 63-76. DOI: 10.12677/ojav.2026.142006

Abstract

A 7×7 two-dimensional square-lattice phononic crystal (PnC) piezoelectric energy harvesting (PEH) system with a petal-shaped hole structure was designed. A point defect was created by removing the hole in the central unit cell, where a disc-shaped piezoelectric patch was affixed to localize and harvest elastic wave energy. The six localized modes generated at the point defect were analyzed. The mechanical and electrical output performance of the system was then examined, followed by an investigation into the impact of the patch's diameter and thickness on power output. The results show that with a patch diameter of 10 mm and thickness of 2.3 mm, the system achieves a maximum output voltage of 45.727 V and a maximum power of 17.891 mW, corresponding to an electromechanical conversion efficiency of 16.84%. By optimizing the match between the piezoelectric patch and the defect mode, this work significantly enhances energy conversion efficiency and offers a new design approach for high-performance PEH systems.

Keywords

Piezoelectric Energy Harvesting, Phononic Crystals, Energy Localization, Defect State, Elastic Waves

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着物联网(IoT)、无线传感网络和微电子机械系统(MEMS)的快速发展,低功耗电子设备的自供能需求日益迫切[1][2]。压电能量收集技术因其可直接将环境中的机械能转化为电能[3],成为解决这一问题的有效途径之一。该技术凭借高机电转换效率[4]、结构紧凑以及环境适应性强[5][6]等优势,在交通运输、智能家居、可穿戴设备、植入式医疗设备等领域展现出广泛的应用潜力[7]-[9]。然而,传统压电能量收集装置受限于环境振动频率的随机性和能量密度低等问题,难以满足实际应用中高效稳定供能的需求。基于声子晶体和声学超材料的压电能量回收技术近年来取得了显著进展。其核心机制主要包括声学黑洞效应[10]、蹦床效应[11]、彩虹捕获效应[12][13]、完美镜效应[14]、声子晶体透镜[15][16]、拓扑绝缘体[17][18]以及缺陷态机制[19]-[22]等。这些机制通过调节弹性波或声波的传播特性,实现了在压电能量回收装置附近能量的局部增强,从而显著提高了装置的电输出性能,并为自供电低功率电子设备提供了一种创新的解决方案。

声子晶体作为一种人工复合的周期性结构,可通过带隙调控抑制特定频率弹性波的传播[23][24]。通过引入缺陷态可实现能量局域化[19]-[22],结合压电材料的机电耦合效应,可显著提升能量收集效率[7][25]。近年来,研究者通过优化声子晶体的单胞构型、缺陷设计及压电材料参数,逐步提升了系统的输出性能。2019年, Park 等人设计了一种二维八角形声子晶体单胞,与圆形单胞相比,八角晶格拥有更宽的带隙尺寸与更小的晶格常数,并通过缺陷态将能量局域化,产生了 1.59 mW 的输出功率,与裸板相比,输出功率提高了 20 倍以上[26]。2020年, Lee 等人通过优化压电片的几何和材料特性,成功将输出功率从 1.59 mW 放大至 2.7 mW [27]。2022年, Zhang 等人引入参数方程设计的声子晶体单胞,并研究了三种半封闭缺陷的能量收集能力[14]。Jo 等人通过设计 L 形三缺陷,拓宽了能量收集的带宽,最高产生了 3.92

mW 的输出功率[28]。2024 年, Zhang 等人提出了不完整线缺陷概念, 与传统的点缺陷和线缺陷相比, 输出功率分别提高了 31.88 倍和 2.51 倍[29]; 并且研究了不完整线缺陷尺寸对弹性波能量局域和收集性能的影响, 获得最大输出电功率为 12.78 mW [30]。

现有研究多聚焦于单胞几何优化或缺陷类型设计, 对压电材料几何参数与能量局域化协同作用机制的探索仍不充分, 另外, 以往研究主要关注系统的最大输出电功率, 鲜少评估其机电能量转换效率。针对上述问题, 本文选用基于有限元分析方法的 COMSOL Multiphysics 6.2 仿真计算软件进行研究, 提出了一种基于点缺陷的花瓣状孔洞结构二维声子晶体压电能量收集系统。首先, 采用有限元方法计算了该二维声子晶体的能带结构, 其存在较宽带隙; 然后, 计算了中心具有点缺陷的 7×7 超胞的能带结构, 在完美声子晶体带隙中出现了缺陷态色散曲线, 选择其中六种缺陷态, 分析其振动模式对压电效应的影响; 最后, 模拟计算了压电片直径和厚度对输出电压和电功率的影响, 确定了最大输出功率对应的直径和厚度, 并计算了系统的机电能量转换效率。本工作围绕宽频带隙设计、缺陷模态选择性激发与几何参数协同优化, 为开发高性能压电能量收集系统提供了理论依据与技术路径。

2. 压电效应理论

压电材料的响应由以下耦合方程描述:

$$S = s^E \cdot T + d^T \cdot E \quad (1)$$

$$D = d \cdot T + \varepsilon^T \cdot E \quad (2)$$

其中: S 为应变向量(6×1), T 为应力向量(6×1), E 为电场强度矢量(3×1), D 为电位移矢量(3×1), s^E 为恒定电场下的弹性柔顺矩阵(6×6), d 为压电应变常数矩阵(3×6), d^T 为 d 矩阵的转置矩阵(6×3), ε^T 为恒定应力下的介电常数矩阵(3×3)。式(1)右边第一项表示由应力产生的应变; 第二项表示外电场产生的应变, 即逆压电效应。式(2)右边第一项表示应力产生的电位移矢量, 即正压电效应; 第二项表示电场介电响应产生的电位移矢量。

本文选择压电材料 PZT-5H, 其相关的非零矩阵元取值如表 1 所示, 由 COMSOL 内置材料库导出。若压电片形状为圆盘, 选取圆面的法线方向为 z 轴, 上下表面为两极与外电阻相接构成回路。当角频率为 ω 的弹性波经过压电片, 使其发生形变时, 以下讨论其短路电流、开路电压和最大输出功率。

Table 1. Parameter characteristics of PZT-5H

表 1. PZT-5H 的参数特性

弹性柔顺系数	s_{11}^E	16.50 ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$)
	s_{12}^E	-4.78 ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$)
	s_{13}^E	-8.45 ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$)
	s_{33}^E	20.70 ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$)
	s_{44}^E	43.50 ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$)
	s_{66}^E	42.60 ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$)
压电应变常数	d_{31}	-274 pm/V
	d_{33}	593 pm/V
	d_{15}	741 pm/V

续表

压电应力常数	e_{31}	-6.62 C/m ²
	e_{33}	23.30 C/m ²
	e_{15}	17.03 C/m ²
恒定应力下的介电常数	ϵ_{11}^T	27.71 nF/m
	ϵ_{33}^T	30.10 nF/m

当外接电阻为零(短路)时, 电极间的电势差为零, 即 $E = 0$, 则:

$$S = s^E \cdot T$$

$$D = d \cdot T$$

此时逆压电效应消失, 只存在弹性力学本构方程。正压电效应存在, 应力产生电位移矢量, 即在电极表面产生电荷, 电荷可通过外部导线流动, 形成短路电流, 其峰值电流为:

$$I_{sc} = \omega(d_{31}(T_{m1} + T_{m2}) + d_{33}T_{m3})\bar{A} \quad (3)$$

其中 \bar{A} 为压电片有效面积, T_{m1} , T_{m2} , T_{m3} 分别为沿 x, y, z 方向的最大正应力。

当外接电阻非常大(开路)时, 满足条件 $D = 0$, 则:

$$S = s^E \cdot T + d^T \cdot E$$

$$D = d \cdot T + \epsilon^T \cdot E = 0$$

若压电片厚度为 t , 则开路电压为:

$$V_{oc} = E_3 t = -\frac{1}{\epsilon_{33}^T}(d_{31}(T_1 + T_2) + d_{33}T_3)t \quad (4)$$

当外接电阻为任意情况时, 压电片在机械激励下可以等效为一个交流电压源与一个内电容 $C_p = \frac{\epsilon_{33}^T \bar{A}}{t}$

串联, 连接负载 R 。当负载电阻 $R = \frac{1}{\omega C_p}$ 时, 负载与容抗匹配, 功率最大, 最大平均功率为:

$$\langle P \rangle_{\max} = \frac{\omega C_p V_{oc}^2}{4} = \frac{\omega \bar{A} (d_{31}(T_{m1} + T_{m2}) + d_{33}T_{m3})^2 t}{4 \epsilon_{33}^T} \quad (5)$$

由式(3)、(4)、(5)可以看出, 压电片能够产生较强的压电效应主要与压电片的厚度 t 、压电片电极的有效面积 \bar{A} 和应力的分布(振动模式)有关。由表 1 可知, $d_{31} < 0$, $d_{33} > 0$, 若要使得 $(d_{31}(T_{m1} + T_{m2}) + d_{33}T_{m3})$ 有最大的取值, 需要 z 方向的正应力与 x, y 方向的正应力相反, 即纵向拉伸横向压缩或者纵向压缩横向拉伸, 这种振动模式能够产生最强的压电效应。

3. 用于压电能量收集的缺陷态模式

我们设计了一种铝制二维正方晶格声子晶体板, 其单胞具有花瓣状孔洞结构, 如图 1(a)所示。单胞的晶格常数 $a = 40$ mm、铝板厚度 $h = 2$ mm, $b = 10$ mm, 花瓣外侧宽度 $c = 8$ mm。铝的质量密度为 2,700 kg/m³, 杨氏模量为 70 GPa, 泊松比为 0.33, 波速为 3160 m/s。

通过有限元分析、弹性波控制方程和 Floquet-Bloch 定理, 得到了单胞在 50.0~57.0 kHz 频率范围内的能带结构, 如图 1(b)所示, 图中蓝色区域是全带隙(51.01~56.13 kHz), 在该带隙范围内, 布洛赫矢量的

所有值以及弹性波的所有极化模式都被禁止传播[31][32]。与其他传统单胞(如圆孔形)相比,花瓣形单胞具有更大的相对带隙宽度[33],更有利于能量收集。

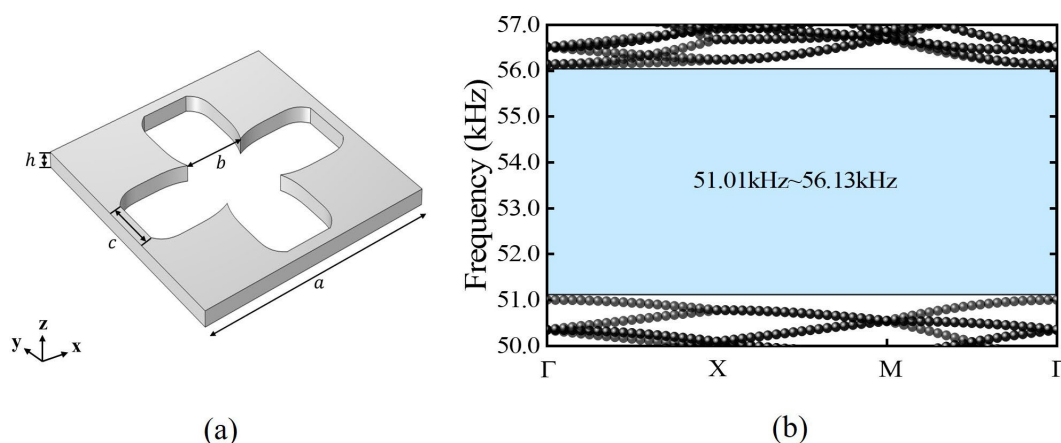


Figure 1. (a) Stereoscopic diagram of the unit cell; (b) Band structure of the unit cell

图 1. (a) 单胞立体图; (b) 单胞的能带结构

如图 2(a)所示,构造 7×7 个单胞组成的超胞,其中第 4 行第 4 列的单胞没有花瓣状孔洞,可以看作点缺陷。在点缺陷中心上表面贴附 PZT-5H 圆盘压电片,用红色表示。这里圆盘直径取值 $d = 8$ mm,厚度取值 $t = 2$ mm。

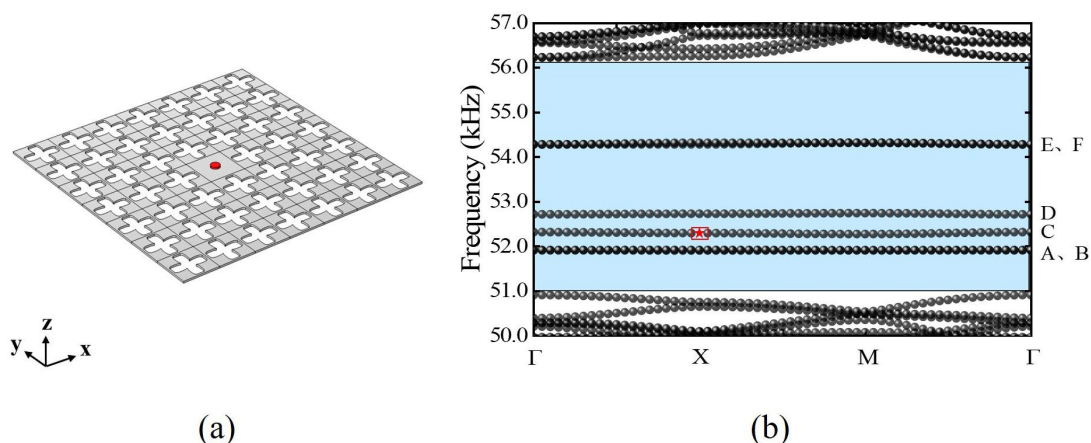


Figure 2. (a) Point defect supercell; (b) Band structure of the point defect supercell

图 2. (a) 点缺陷超胞; (b) 点缺陷超胞的能带结构

压电片短路情况下,无逆压电效应,其弹性力学效应不受影响。此时可以计算出点缺陷超胞的能带结构,如图 2(b)所示。比较图 1(b)和图 2(b)可以看出,点缺陷超胞与完美声子晶体的能带结构高度一致,但在完全带隙内存在六条平坦的色散曲线,意味着这些模式的群速度为零,振动能量局域在点缺陷处,称为缺陷态,这是缺陷与周围单胞相互作用的结果[34]。

图 2(b)显示了在声子带隙内形成了 6 条缺陷带,对应的缺陷态模式分别记为 A、B、C、D、E、F 模式,对应频率分别为 51.911、51.923、52.299、52.732、54.282 和 54.318 kHz。图 3 显示了这六个缺陷态对应的振动模式在 xy 平面内的投影。

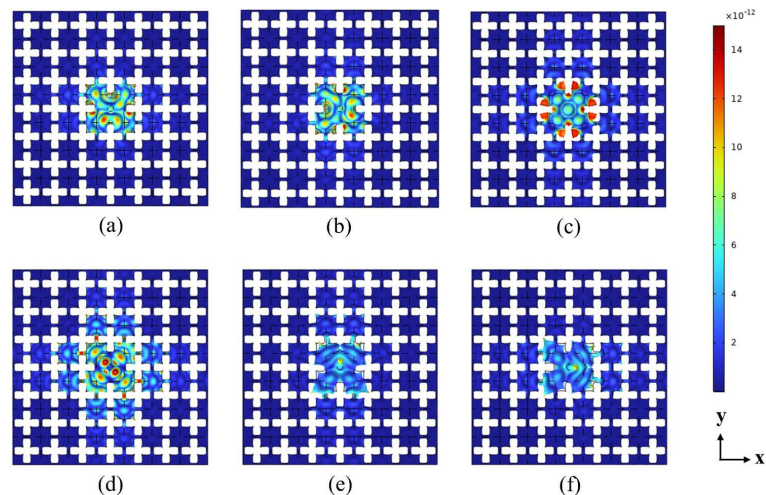


Figure 3. Defect mode shapes under the external electrical resistance of 0Ω : (a) 51.911 kHz (A); (b) 51.923 kHz (B); (c) 52.299 kHz (C); (d) 52.732 kHz (D); (e) 54.282 kHz (E); and (f) 54.318 kHz (F)

图 3. 在外部电阻为 0Ω 时的缺陷态模式: (a) 51.911 kHz (A); (b) 51.923 kHz (B); (c) 52.299 kHz (C); (d) 52.732 kHz (D); (e) 54.282 kHz (E); (f) 54.318 kHz (F)

可以看到, A、B 模态, E、F 模态是简并的, A、B、D、E、F 五个模态在压电片处主要发生了切应变, 其对应的压电效应较小。模态 C 在压电片处产生了比较明显的 z 方向拉伸, 这种模态将会对压电片产生较强的压电效应。后续我们将基于模态 C 进行讨论。

4. 系统能量局域及收集性能

4.1. 系统描述

基于声子晶体的压电能量收集系统如图 4 所示。在超胞的 x 方向两侧添加铝板并设置完美匹配层 (PMLs) 作为吸收波的边界条件; 在 y 方向上设置周期性边界 (PBCs) 保证无限域, 完美匹配层和周期性边界条件分别用蓝色和绿色表示。压电片与外部电阻之间连接 AC-DC 变换器, 工作时能将正弦交流电压信号转换为直流电压信号 [35]。在距离超胞左端 100 mm 位置, z 方向加载 20 nm 恒定振幅的谐波来激发板的 A0 Lamb 波, 如图 4 中红色部分所示。A0 Lamb 波有利于实现压电片处的纵向拉伸以产生较强的压电效应。所有谐波分析中, 整体结构的损耗因子设置为 0.0001。超胞结构的网格单元由四面体组成, 其余部分由六面体组成。Tol 等研究发现当超胞结构最大网格尺寸小于等于激发 A0 Lamb 波长的七分之一时, 数值模拟结果与实验结果一致 [34] [36]。因此, 本研究超胞结构最大网格尺寸设为目标缺陷带频率激发 A0 Lamb 波长的十分之一, 足以满足数值模拟研究的精度。

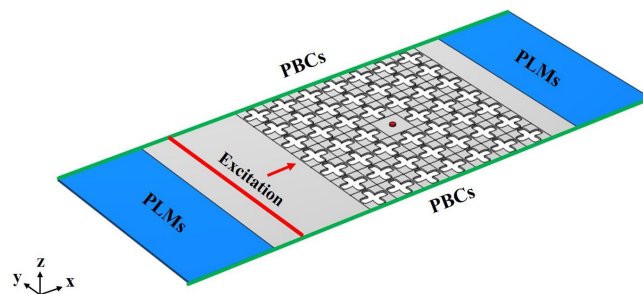


Figure 4. PnC-based PEH system with excitation source and PMLs
图 4. 基于 PnC 的 PEH 系统, 包括激励源和完美匹配层

4.2. 系统的机械输出性能

在外部电阻为 $0\ \Omega$ 和 $100\ \text{M}\Omega$ 情况下, 计算了系统的机械输出性能。图 5 展示了 $51.0\sim 54.0\ \text{kHz}$ 范围内不同频率下缺陷中心压电片 z 方向的机械位移频响函数。从图 5 中可以看出, 与振幅为 $20\ \text{nm}$ 的入射波相比, 当外部电阻为 $0\ \Omega$ 时, 在 $52.290\ \text{kHz}$ 处, 最大振幅为 $280.86\ \text{nm}$; 当外部电阻为 $100\ \text{M}\Omega$ 时, 在 $52.340\ \text{kHz}$ 处, 最大振幅为 $298.41\ \text{nm}$ 。这也证实了所设计的声子晶体在点缺陷处的弹性波能量局域化。短路和开路时的峰值频率有所不同。短路时, 弹性力学性质不受压电效应影响, 短路本征频率与机械固有频率相同; 而在开路时, 由于逆压电效应的存在, 使得压电材料的有效刚度增加, 从而使本征频率升高, 因此开路本征频率略高于短路本征频率。

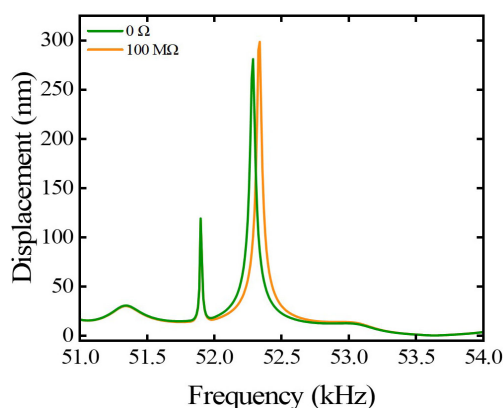


Figure 5. Mechanical displacement frequency response curves at the system defect with external resistances of $0\ \Omega$ and $100\ \text{M}\Omega$

图 5. 外部电阻 $0\ \Omega$ 和 $100\ \text{M}\Omega$ 时, 系统缺陷处的机械位移频响曲线

4.3. 系统的电输出性能

图 6 为外部电阻 $100\ \text{M}\Omega$ 时, 该系统的输出电压频响曲线($51.0\ \text{kHz}\sim 54.0\ \text{kHz}$), 可以看出, 在 $52.34\ \text{kHz}$ 处, 出现输出电压峰值, 最大输出电压为 $20.33\ \text{V}$ 。图 7 显示了该缺陷态对应的振动模式在 xy 平面内的投影, 我们看到, 从左侧施加的入射波在通过缺陷结构之后几乎没有传播, 其中突出的能量局域明显发生在缺陷的中心位置。

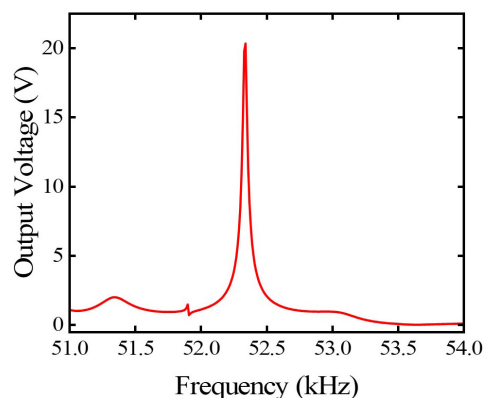


Figure 6. Frequency response curve of the system's output voltage at an external resistance of $100\ \text{M}\Omega$

图 6. 外部电阻 $100\ \text{M}\Omega$ 时, 系统的输出电压频响曲线

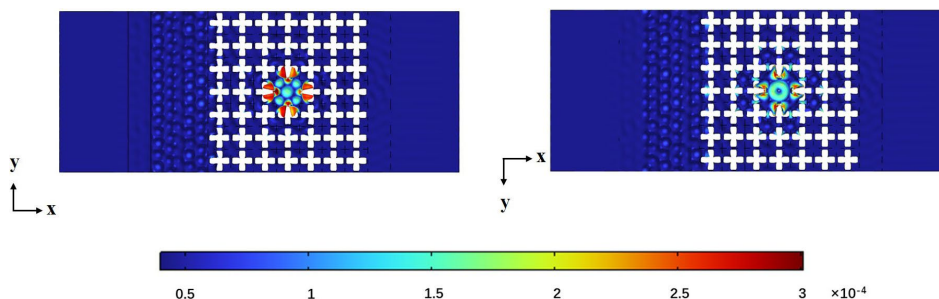


Figure 7. Vibration mode in the z-direction at the peak frequency of 52.34 kHz
图 7. 峰值频率下(52.34 kHz), z 方向的振动模式

扫描计算外部电阻(0 Ω~100 MΩ)得到了点缺陷超胞的输出电压和输出电功率与外部电阻的变化关系(图 8(a)~(b))。可以看出, 输出电压随着外部电阻的增加而增加, 在接近开路时, 最大输出电压为 20.33 V, 如图 8(a)所示。输出功率方面, 存在一个使输出功率最大的最优电阻, 在外部电阻为 15.849 kΩ 时, 有最大输出功率 3.82 mW, 如图 8(b)所示。

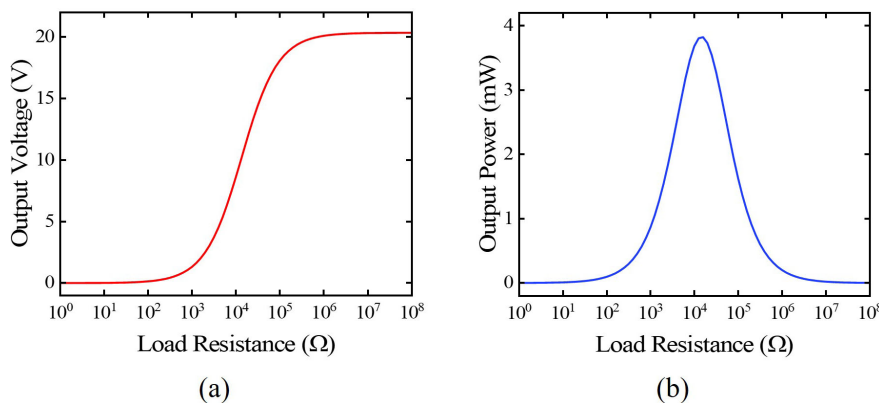


Figure 8. Electrical output performance of the system at open-circuit resonant frequency; (a) Output voltage; (b) Output power
图 8. 系统在开路谐振频率下的电输出性能: (a) 输出电压; (b) 输出功率

4.4. 通过调整压电片的几何参数增强能量收集性能

由(5)式可知, 对于给定材料的压电片, 给它施加周期性应力, 它的最大平均功率与压电片的有效面积 \bar{A} 和厚度 t 有关。首先, 压电片的直径越大并不意味着它的等效面积越大。如果直径太大, 振动模式的应变节线可能出现在压电片上, 节线两侧的应变相反使得电压出现抵消, 等效面积反而减小。

在 50 kHz 左右的频率下, 2 mm 厚的铝板上产生的入射平面波波长 λ 为 19 mm, 可由公式(6)计算得出:

$$\lambda = \sqrt{\frac{2\pi h}{f}} \left[\frac{Y}{12\rho(1-\mu^2)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

式中 h 为声子晶体板的厚度, f 为外部激励频率, Y 、 ρ 、 μ 分别为材料的杨氏模量、密度以及泊松比。有研究表明, 当振荡介质的尺寸小于 $\lambda/2$ 时, 应变区域以及缺陷内部具有相同符号的输出电压, 此时电压叠加增强; 当直径大于 $\lambda/2$ 时, 压电片覆盖了符号相反的应变区域, 发生了电压抵消[27]。因此, 需选取

适当的直径,从而最大限度地提高电输出性能。图9显示了压电片厚度固定为2 mm,外部电阻为100 M Ω 时,具有不同直径压电片超胞的输出电压频响曲线(51.0 kHz~54.0 kHz)。

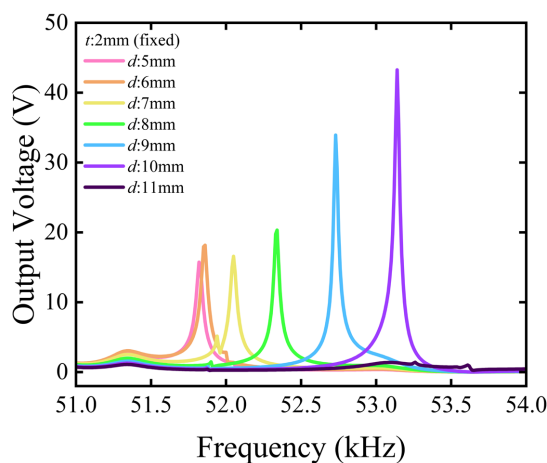


Figure 9. Frequency response curves of output voltage for piezoelectric patch systems with different diameters at an external resistance of 100 M Ω

图9. 在外部电阻为100 M Ω 时,不同直径的压电片系统的输出电压频响曲线

图10(a)和图10(b)分别为开路谐振频率下(压电片直径为5 mm时为51.82 kHz、6 mm时为51.86 kHz、7 mm时为52.05 kHz、8 mm时为52.34 kHz、9 mm时为52.73 kHz、10 mm时为53.14 kHz、11 mm时为53.26 kHz)不同直径压电片系统的输出电压、输出电功率随外部电阻(0 Ω ~100 M Ω)变化的关系。从图10中可以看出,输出电压随着外部电阻的增大而单调增大,当外部电阻增到趋近于开路状态时,输出电压达到最大值并保持不变。而输出功率随外部电阻的增大先增大后减小,存在一个使输出功率最大的最佳外电阻(压电片直径为5 mm时为10,000 Ω 、6 mm时为12,589 Ω 、7 mm时为10,000 Ω 、8 mm时为15,849 Ω 、9 mm时为19,953 Ω 、10 mm时为19,953 Ω 、11 mm时为15,849 Ω)。

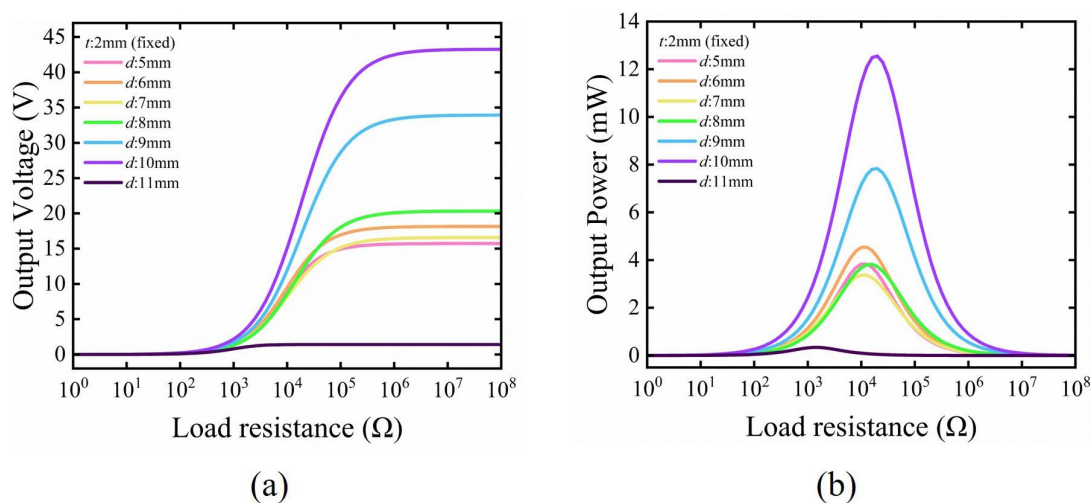


Figure 10. Variations of (a) the output voltage and (b) the output electric power of the system with the external resistance when the piezoelectric patch has different diameters

图10. 压电片为不同直径时,系统的(a)输出电压和(b)输出电功率随外部电阻的变化情况

系统的输出电压和随压电片直径的变化如图 11(a)所示。当压电片直径从 5 mm 增加到 11 mm 时, 输出电压先增大后减小, 当直径为 10 mm 时达到最大值, 为 43.267 V。当压电片直径增加到 11 mm 时, 由于电压抵消, 此时输出电压最低, 仅有 1.4126 V。输出功率随压电片直径的变化如图 11(b)所示, 最大功率 12.554 mW, 最小功率 0.3408 mW。可以看出, 在压电片直径为 10 mm 时, 系统的输出电压和输出功率达到最大值。因此, 我们选择为 10 mm 为最优直径。

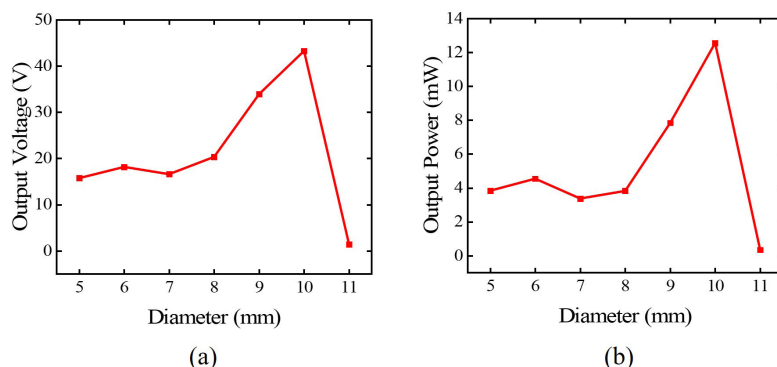


Figure 11. The (a) output voltage and (b) output power of system versus the diameter of piezoelectric patch
 图 11. 系统的(a) 输出电压与(b) 输出功率随压电片直径的变化

其次, 我们讨论压电片厚度对能量收集效果的影响。由式(4)、(5)可以看出, 压电片的输出电压和最大输出功率理论值与压电片的厚度 t 成正比。但是振动能量从铝板向压电片传输的过程中, 其能量传输效率还受到机械阻抗匹配的影响。能量传输效率公式:

$$\eta = \frac{4Z_{Al}Z_p}{(Z_{Al} + Z_p)^2} \quad (7)$$

其中 Z_{Al} 为铝板的机械阻抗, Z_p 为压电片的机械阻抗。可以看出, 当铝板和压电片的机械阻抗越接近时, 能量传输效率越高。但当压电片厚度增大时, 其机械阻抗也随之增大, 能量传输效率也随之减小。两种效应的竞争导致存在最佳的压电片厚度。

图 12 显示了压电片直径固定为 10 mm, 外部电阻为 100 MΩ 时, 具有不同厚度压电片超胞的输出电压频响曲线(52.5 kHz~53.5 kHz)。

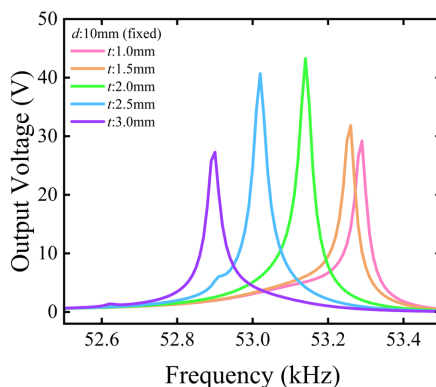


Figure 12. When the external resistance is 100 MΩ, the frequency response curve of the piezoelectric disc system with different thickness's output voltage
 图 12. 在外部电阻为 100 MΩ 时, 不同厚度的压电片系统的输出电压频响曲线

图 13(a)和图 13(b)显示了压电片直径固定为 10 mm 时, 开路谐振频率下(压电片厚度为 1.0 mm 时为 53.29 kHz、1.5 mm 时为 53.26 kHz、2.0 mm 时为 53.14 kHz、2.5 mm 时为 53.02 kHz、3.0 mm 时为 52.90 kHz)不同压电片厚度系统的输出电压、输出电功率和外部电阻($0 \Omega \sim 100 \text{ M}\Omega$)变化的关系。此时输出电压依旧随着外部电阻的增大而单调增大, 输出功率在最佳外电阻(压电片厚度为 1.0 mm 时为 $31,623 \Omega$ 、1.5 mm 时为 $31,623 \Omega$ 、2.0 mm 时为 $19,953 \Omega$ 、2.5 mm 时为 $12,589 \Omega$ 、3.0 mm 时为 $10,000 \Omega$)处达到最大值。

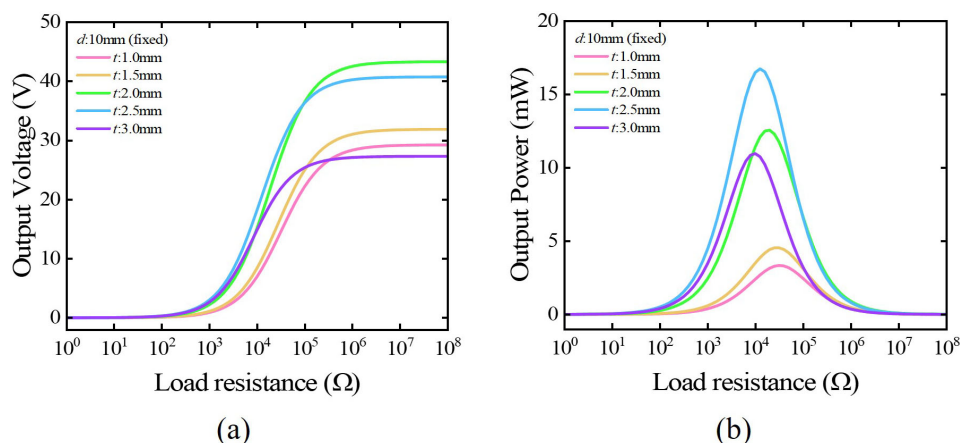


Figure 13. Variations of (a) the output voltage and (b) the output electric power of the system with the external resistance when the piezoelectric patch has different thickness (1.0~3.0 mm)

图 13. 压电片为不同厚度时(1.0~3.0 mm), 系统的(a) 输出电压和(b) 输出电功率随外部电阻的变化情况

从图 14 中可以看出, 当压电片厚度为 2.5 mm 和 3.0 mm 时, 输出电压和输出功率较大。因此, 我们细化精度, 在 2.5~3.0 mm 的范围内, 研究了厚度为 2.0、2.1、2.2、2.3、2.4、2.5 mm 的压电片系统在开路谐振频率下(压电片厚度为 2.0 mm 时为 53.14 kHz、2.1 mm 时为 53.12 kHz、2.2 mm 时为 53.09 kHz、2.3 mm 时为 53.07 kHz、2.4 mm 时为 53.04 kHz、2.5 mm 时为 53.02 kHz)的输出电压、输出电功率和外部电阻($0 \Omega \sim 100 \text{ M}\Omega$)变化的关系, 如图 14(a)和图 14(b)所示。同样地, 输出电压随着外部电阻的增大而单调增大, 输出功率在最佳外电阻(压电片厚度为 2.0 mm 时为 $19,953 \Omega$ 、2.1 mm 时为 $15,849 \Omega$ 、2.2 mm 时为 $15,849 \Omega$ 、2.3 mm 时为 $15,849 \Omega$ 、2.4 mm 时为 $12,589 \Omega$ 、2.5 mm 时为 $12,589 \Omega$)处达到最大值。

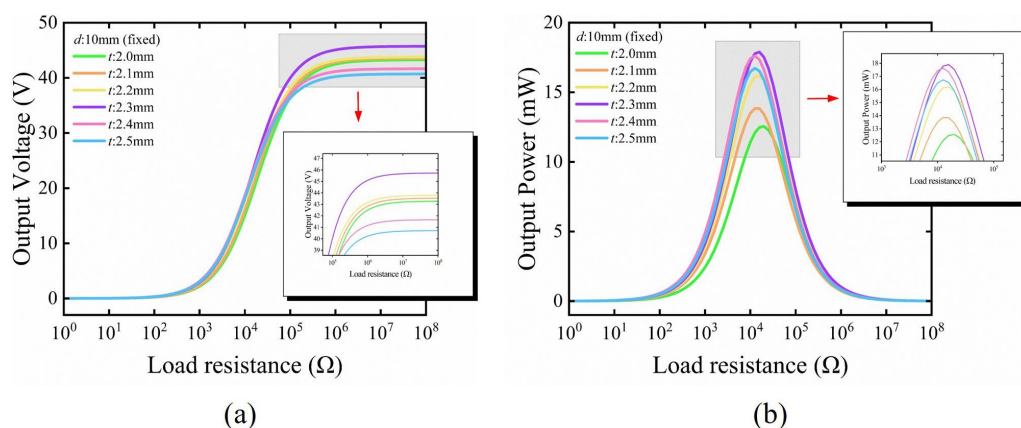


Figure 14. Variations of (a) the output voltage and (b) the output electric power of the system with the external resistance when the piezoelectric patch has different thickness (2.0~2.5 mm)

图 14. 压电片为不同厚度时(2.0~2.5 mm), 系统的(a) 输出电压和(b) 输出电功率随外部电阻的变化情况

系统的输出电压和输出功率随压电片厚度的变化如图 15(a)和图 15(b)所示。可以看出, 当压电片厚度从 1.0 mm 增加到 2.3 mm, 会产生更高的开路电压与输出功率, 当厚度大于 2.3 mm 时, 输出电压与输出功率逐渐下降。输出电压与输出功率都在 2.3 mm 处达到最大值, 为 45.727 V 和 17.891 mW。因此, 我们选择为 2.3 mm 为最优厚度。

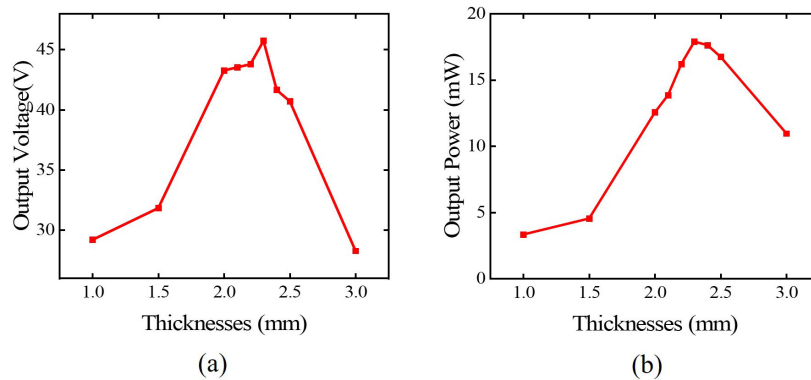


Figure 15. The (a) output voltage and (b) output power of system versus the thickness of piezoelectric patch
图 15. 系统的(a) 输出电压与和(b) 输出功率随压电片厚度的变化

最后, 我们讨论一下该系统的机电能量转化效率。机械波的平均输入功率可以表示为:

$$I = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 v S \tag{8}$$

其中, ρ 为铝板质量密度, A 为振幅, ω 为角频率, v 为波速, S 为弹性波输入端面积。代入数值计算可得机械波平均输入功率为 106.25 mW, 当压电片直径为 10 mm、厚度为 2.3 mm 时, 系统输出功率达 17.891 mW, 可以计算得到系统的最优机电能量转化效率为 16.84%。表 2 汇总了本工作和几个同类型工作中的单胞晶格常数、最大输出电压和最大输出功率, 对比发现, 本工作中获得的开路电压和最大输出功率与同类型工作相比有较大的提高。

Table 2. Comparison with previous studies.

表 2. 本文与以往研究的比较

参考文献	晶格常数[mm]	最大输出电压[V]	最大输出功率[mW]	与其他模型相比, 我们的输出功率是它的多少倍
本文工作	30	45.727	17.891	
[16]	34	4.55	1.59	11.25
[28]	27	16.158	1.392	12.85
[32]	34	5.2	2.7	6.63
[33]	33	46.8	3.92	4.56
[34]	27	22.21	1.68	10.65
[37]	25	4.05	1.28	13.98

5. 结论

本工作采用数值模拟分析了具有花瓣状孔洞结构的二维正方晶格声子晶体的缺陷态模式, 并讨论了

压电片的几何尺寸对弹性波能量局域和收集性能的影响。模拟结果表明, 我们设计的具有点缺陷花瓣形声子晶体能量收集系统, 通过优化压电片的直径和厚度, 成功地实现了能量收集效果的大幅增强。优化后系统输出功率达 17.891 mW, 转换效率 16.84%。因此, 本工作的结果将有助于通过合理设计具有声子晶体中压电片的尺寸, 可有效提高压电能量收集系统的能量局域和收集性能。

参考文献

- [1] Portilla, L., Loganathan, K., Faber, H., Eid, A., Hester, J.G.D., Tentzeris, M.M., *et al.* (2023) Wirelessly Powered Large-Area Electronics for the Internet of Things. *Nature Electronics*, **6**, 10-17. <https://doi.org/10.1038/s41928-023-00927-x>
- [2] Kang, J.G., Kim, H., Shin, S. and Kim, B.S. (2024) Fluid Flow to Electricity: Capturing Flow-Induced Vibrations with Micro-Electromechanical-System-Based Piezoelectric Energy Harvester. *Micromachines*, **15**, Article 581. <https://doi.org/10.3390/mi15050581>
- [3] Shu, Y.C. and Lien, I.C. (2006) Analysis of Power Output for Piezoelectric Energy Harvesting Systems. *Smart Materials and Structures*, **15**, 1499-1512. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/6/001>
- [4] Sun, W., Jang, H. and Seok, J. (2021) Magnetically Coupled Piezoelectric Galloping-Based Energy Harvester Using a Tandem Configuration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **161**, Article 107952. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107952>
- [5] Maassen, K.F., Brown, J.S., Choi, H., Thompson, L.L. and Bostwick, J.B. (2020) Acoustic Analysis of Ultrasonic Assisted Soldering for Enhanced Adhesion. *Ultrasonics*, **101**, Article 106003. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2019.106003>
- [6] Hu, G., Wang, J. and Tang, L. (2021) A Comb-Like Beam Based Piezoelectric System for Galloping Energy Harvesting. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **150**, Article 107301. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107301>
- [7] Li, T. and Lee, P.S. (2022) Piezoelectric Energy Harvesting Technology: From Materials, Structures, to Applications. *Small Structures*, **3**, Article 2100128. <https://doi.org/10.1002/sstr.202100128>
- [8] Xu, C., Song, Y., Han, M. and Zhang, H. (2021) Portable and Wearable Self-Powered Systems Based on Emerging Energy Harvesting Technology. *Microsystems & Nanoengineering*, **7**, Article No. 25. <https://doi.org/10.1038/s41378-021-00248-z>
- [9] Zhao, Z., Dai, Y., Dou, S.X. and Liang, J. (2021) Flexible Nanogenerators for Wearable Electronic Applications Based on Piezoelectric Materials. *Materials Today Energy*, **20**, Article 100690. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2021.100690>
- [10] Deng, J., Guasch, O., Zheng, L., Song, T. and Cao, Y. (2021) Semi-Analytical Model of an Acoustic Black Hole Piezoelectric Bimorph Cantilever for Energy Harvesting. *Journal of Sound and Vibration*, **494**, Article 115790. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115790>
- [11] Lee, G., Park, J., Choi, W., Ji, B., Kim, M. and Rho, J. (2023) Multiband Elastic Wave Energy Localization for Highly Amplified Piezoelectric Energy Harvesting Using Trampoline Metamaterials. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **200**, Article 110593. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110593>
- [12] Tang, X.L., Ma, T.X. and Wang, Y.S. (2023) Topological Rainbow Trapping and Acoustic Energy Amplification in Two-Dimensional Gradient Phononic Crystals. *Applied Physics Letters*, **122**, Article 112201. <https://doi.org/10.1063/5.0138982>
- [13] Yuan, W., Zhang, Y., Pan, Y., Huang, Y., Zhao, J., Yang, F., *et al.* (2024) Topological Rainbow Trapping, Concentration and Guiding in Graded Elastic Valley Phononic Crystal Plate. *Engineering Structures*, **304**, Article 117596. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117596>
- [14] Zhang, L., Tan, T., Yu, Z. and Yan, Z. (2022) Topological Imbalanced Phononic Crystal with Semi-Enclosed Defect for High-Performance Acoustic Energy Confinement and Harvesting. *Nano Energy*, **100**, Article 107472. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107472>
- [15] Wang, K., Li, X., Cao, L., Guo, P., Fan, G., Qin, J., *et al.* (2024) Enhancement of Piezoelectric Energy Harvesting for Flexural Waves by a Metasurface-Assisted Phononic Cavity. *Results in Physics*, **63**, Article 107870. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2024.107870>
- [16] Kim, D.S., Choi, W., Kim, S., Kim, E., Nahm, S. and Kim, M. (2023) Correlating Multimode Strain and Electrode Configurations for High-Performance Gradient-Index Phononic Crystal-Based Piezoelectric Energy Harvesting. *Materials Horizons*, **10**, 149-159. <https://doi.org/10.1039/d2mh01041k>
- [17] Wen, Z., Jin, Y., Gao, P., Zhuang, X., Rabczuk, T. and Djafari-Rouhani, B. (2022) Topological Cavities in Phononic Plates for Robust Energy Harvesting. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **162**, Article 108047. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108047>

- [18] Li, B., Chen, H., Xia, B. and Yao, L. (2023) Acoustic Energy Harvesting Based on Topological States of Multi-Resonant Phononic Crystals. *Applied Energy*, **341**, Article 121142. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121142>
- [19] Gantasala, S., Thomas, T. and Rajagopal, P. (2023) Enhanced Piezoelectric Energy Harvesting Based on Sandwiched Phononic Crystal with Embedded Spheres. *Physica Scripta*, **98**, Article 035029. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/acb9c5>
- [20] Zhang, G., He, Z., Wang, S., Hong, J., Cong, Y. and Gu, S. (2024) Elastic Foundation-Introduced Defective Phononic Crystals for Tunable Energy Harvesting. *Mechanics of Materials*, **191**, Article 104909. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2024.104909>
- [21] Li, J.R., Guo, J.C. and Zhang, Z. (2023) Enhanced Energy Localization and Harvesting by Design of Phononic Crystal Defects. *International Journal of Modern Physics B*, **38**, Article 2450244. <https://doi.org/10.1142/s0217979224502448>
- [22] Cao, D.X., Li, S.S., Guo, X.Y., Chen, X.M. and Lai, S.K. (2024) Buckling-Driven Piezoelectric Defect-Induced Energy Localization and Harvesting Using a Rubik's Cube-Inspired Phononic Crystal Structure. *Smart Materials and Structures*, **33**, Article 035036. <https://doi.org/10.1088/1361-665x/ad254a>
- [23] Lee, G., Lee, D., Park, J., Jang, Y., Kim, M. and Rho, J. (2022) Piezoelectric Energy Harvesting Using Mechanical Metamaterials and Phononic Crystals. *Communications Physics*, **5**, Article 94. <https://doi.org/10.1038/s42005-022-00869-4>
- [24] Akbari-Farahani, F. and Ebrahimi-Nejad, S. (2024) From Defect Mode to Topological Metamaterials: A State-of-the-Art Review of Phononic Crystals & Acoustic Metamaterials for Energy Harvesting. *Sensors and Actuators A: Physical*, **365**, Article 114871. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114871>
- [25] Mahapatra, S.D., Mohapatra, P.C., Aria, A.I., Christie, G., Mishra, Y.K., Hofmann, S., et al. (2021) Piezoelectric Materials for Energy Harvesting and Sensing Applications: Roadmap for Future Smart Materials. *Advanced Science*, **8**, Article 2100864. <https://doi.org/10.1002/advs.202100864>
- [26] Park, C., Shin, Y.C., Jo, S., Yoon, H., Choi, W., Youn, B.D., et al. (2019) Two-Dimensional Octagonal Phononic Crystals for Highly Dense Piezoelectric Energy Harvesting. *Nano Energy*, **57**, 327-337. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.12.026>
- [27] Lee, T.G., Jo, S.H., Seung, H.M., et al. (2020) Enhanced Energy Transfer and Conversion for High Performance Phononic Crystal-Assisted Elastic Wave Energy Harvesting. *Nano Energy*, **78**, Article 105226. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105226>
- [28] Jo, S.H., Yoon, H., Shin, Y.C., et al. (2022) L-Shape Triple Defects in a Phononic Crystal for Broadband Piezoelectric Energy Harvesting. *Nano Convergence*, **9**, Article 29. <https://doi.org/10.1186/s40580-022-00321-x>
- [29] Zhang, G.Y., Liu, Z.J., Li, B.Z., et al. (2024) Phononic Crystals with Incomplete Line Defects: Applications in High-Performance and Broadband Acoustic Energy Localization and Harvesting. *Smart Materials and Structures*, **33**, Article 085036. <https://doi.org/10.1088/1361-665x/ad649c>
- [30] Zhang, G.Y., Liu, Z.J., Guo, Y., et al. (2024) Effect of Incomplete Line Defect Size on Energy Localization and Harvesting in Phononic Crystals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **156**, 3921-3929. <https://doi.org/10.1121/10.0034600>
- [31] Kushwaha, M.S., Halevi, P., Dobrzynski, L. and Djafari-Rouhani, B. (1993) Acoustic Band Structure of Periodic Elastic Composites. *Physical Review Letters*, **71**, 2022-2025. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.71.2022>
- [32] Romero-García, V., Sánchez-Pérez, J.V., Castiñeira-Ibáñez, S. and Garcia-Raffi, L.M. (2010) Evidences of Evanescent Bloch Waves in Phononic Crystals. *Applied Physics Letters*, **96**, Article 124102. <https://doi.org/10.1063/1.3367739>
- [33] Paul, S., Overvelde, J.T.B., Hochhalter, J. and Wang, P. (2024) Effects of Void Geometry on Two-Dimensional Monolithic Porous Phononic Crystals. *Applied Physics Letters*, **124**, Article 212201. <https://doi.org/10.1063/5.0203024>
- [34] Jo, S.H., Yoon, H., Shin, Y.C., et al. (2020) Designing a Phononic Crystal with a Defect for Energy Localization and Harvesting: Supercell Size and Defect Location. *International Journal of Mechanical Sciences*, **179**, Article 105670. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105670>
- [35] Lee, S. and Youn, B.D. (2011) A Design and Experimental Verification Methodology for an Energy Harvester Skin Structure. *Smart Materials and Structures*, **20**, Article 057001. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/5/057001>
- [36] Tol, S., Degertekin, F.L. and Erturk, A. (2016) Gradient-Index Phononic Crystal Lens-Based Enhancement of Elastic Wave Energy Harvesting. *Applied Physics Letters*, **109**, Article 063902. <https://doi.org/10.1063/1.4960792>
- [37] Jo, S.H., Yoon, H., Shin, Y.C. and Youn, B.D. (2020) A Graded Phononic Crystal with Decoupled Double Defects for Broadband Energy Localization. *International Journal of Mechanical Sciences*, **183**, Article 105833. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105833>