

超胞周期性对花瓣形点缺陷声子晶体压电能量收集性能的影响

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9日; 录用日期: 2026年7月27日; 发布日期: 2026年8月4日

摘 要

声子晶体点缺陷能够在带隙内形成局域缺陷态, 并将弹性波能量限制在压电片附近, 是提高压电能量收集性能的重要途径。除缺陷模态和压电片尺寸外, 有限超胞的周期数直接影响带隙约束能力、倏逝波衰减程度以及缺陷模态的稳定性。本文基于一种花瓣形点缺陷声子晶体压电能量收集系统, 在压电片直径为10 mm、厚度为2.3 mm的优化参数基础上, 固定点缺陷位置, 分别研究x方向和y方向周期数对系统振动模态、输出电压和输出功率的影响。结果表明, x方向周期数对系统性能起主导作用, 随着超胞由 5×7 增加至 9×7 , 峰值输出电压由26.495 V提高至86.302 V, 最大输出功率由17.228 mW提高至32.257 mW; 继续增加至 10×7 后, 输出性能基本趋于饱和。y方向周期数起调节优化作用, 输出性能随周期数增加呈现先增大后减小的非单调变化, 其中 9×7 超胞取得最佳结果。在该尺寸下, 系统在100 M Ω 负载条件下获得86.302 V峰值输出电压、32.257 mW最大输出功率, 机电能量转换效率达到30.36%。研究结果表明, 合理的超胞周期数能够在保证能量局域效果的同时避免结构冗余, 为点缺陷声子晶体压电能量收集器的尺寸设计提供依据。

关键词

声子晶体, 点缺陷, 超胞周期性, 能量局域, 压电能量收集

Effect of Supercell Periodicity on Piezoelectric Energy Harvesting Performance of Petal-Shaped Point Defect Phononic Crystals

Yiman Yang, Miao Tian*

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

*通讯作者。

文章引用: 杨伊漫, 田苗. 超胞周期性对花瓣形点缺陷声子晶体压电能量收集性能的影响[J]. 凝聚态物理学进展, 2026, 15(3): 59-69. DOI: 10.12677/cmp.2026.153007

Abstract

Phononic crystal point defects can form localized defect modes within the bandgap, and confine elastic wave energy in the vicinity of piezoelectric patches, which serves as a critical approach to improving the performance of piezoelectric energy harvesting. In addition to defect modes and the dimensions of piezoelectric patches, the number of periods of a finite supercell directly affects the bandgap confinement capability, the attenuation degree of evanescent waves, and the stability of defect modes. Based on a petal-shaped point defect phononic crystal piezoelectric energy harvesting system, this paper fixes the position of the point defect on the basis of the optimized parameters that the piezoelectric patch has a diameter of 10 mm and a thickness of 2.3 mm, and investigates the effects of the number of periods in the x-direction and y-direction on the vibration mode, output voltage and output power of the system, respectively. The results show that the number of periods in the x-direction plays a dominant role in the system performance. As the supercell increases from 5×7 to 9×7 , the peak output voltage increases from 26.495 V to 86.302 V, and the maximum output power increases from 17.228 mW to 32.257 mW; when the supercell is further increased to 10×7 , the output performance basically tends to be saturated. The number of periods in the y-direction functions for adjustment and optimization, and the output performance exhibits a non-monotonic variation that first increases and then decreases as the number of periods increases, with the 9×7 supercell achieving the optimal performance. Under this dimension, the system obtains a peak output voltage of 86.302 V and a maximum output power of 32.257 mW at a load resistance of 100 M Ω , and the electromechanical energy conversion efficiency reaches 30.36%. The research findings indicate that a reasonable number of supercell periods can avoid structural redundancy while guaranteeing the energy localization effect, which provides a reference for the dimension design of point defect phononic crystal piezoelectric energy harvesters.

Keywords

Phononic Crystals, Point Defects, Supercell Periodicity, Energy Localization, Piezoelectric Energy Harvesting

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

随着无线传感器网络、结构健康监测系统以及低功耗电子器件的发展, 利用环境中的机械振动、声波和弹性波实现自供能已成为能量收集领域的重要方向。压电能量收集技术可通过正压电效应将机械能直接转换为电能, 具有结构简单、易集成和转换过程直接等优点[1]-[4]。然而, 实际环境中的弹性波能量密度通常较低, 若缺少有效的波场调控结构, 压电片附近难以形成足够强的局部振动, 系统输出电压和输出功率会受到明显限制。

声子晶体是一类具有周期性弹性参数或几何结构的人工材料, 能够通过带隙效应调控弹性波传播[5][6]。在完整带隙范围内, 弹性波在周期结构中传播受限, 只能以倏逝波形式衰减。当在完美声子晶体中引入点缺陷时, 带隙内部会出现局域缺陷态, 弹性波能量被限制在缺陷附近[7]-[10]。若将压电片布置在缺陷位置, 局域增强的机械振动便可转化为较高的电输出。

现有研究多关注单胞构型、缺陷形式和压电片参数对能量收集性能的影响[11]-[16], 而有限超胞周期数本身对缺陷态局域能力和电输出性能的影响仍需要进一步讨论。对于有限尺寸声子晶体而言, 周期数不足会削弱带隙约束, 使缺陷模态受到边界效应影响并造成能量泄漏; 周期数过大虽然有助于逼近无限周期结构, 但会增加结构尺寸和计算成本, 也未必继续带来明显性能增益。因此, 确定合适的超胞尺寸, 是点缺陷压电能量收集系统设计中的关键问题。

本文以花瓣形点缺陷声子晶体压电能量收集系统为研究对象, 在已优化压电片几何参数的基础上, 分别改变 x 方向和 y 方向超胞周期数, 分析不同尺寸下的振动模态、输出电压频响特性和输出功率变化规律, 进一步揭示周期性完善程度与能量局域化效率之间的关系。

2. 花瓣形点缺陷压电能量收集系统

本研究采用的二维声子晶体由铝板经周期性打孔构成, 其单胞结构如图 1(a)所示。单胞晶格常数 $a = 40$ mm, 铝板厚度 $h = 2$ mm, 花瓣形孔洞的几何参数为: 中心圆孔半径 $b = 10$ mm, 花瓣外侧宽度 $c = 8$ mm。铝的材料参数为: 质量密度 $\rho = 2700$ kg/m³, 杨氏模量 $E = 70$ GPa, 泊松比 $\nu = 0.33$, 波速为 3160 m/s。通过有限元方法结合 Bloch 周期边界条件, 计算得到该单胞在 50~57 kHz 范围内的能带结构, 如图 1(b)所示。结果显示, 在 51.01 kHz 至 56.13 kHz 之间存在一个完全带隙(图中蓝色阴影区域)。在该带隙频率范围内, 任何布洛赫波矢对应的弹性波模式均被禁止传播。

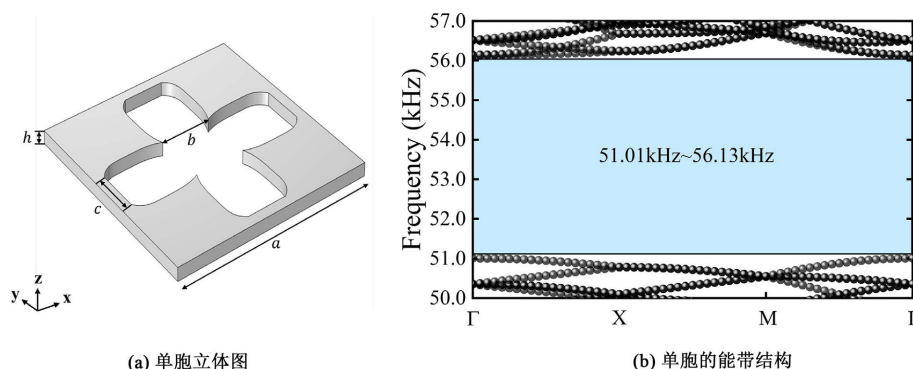


Figure 1. Unit cell stereogram and its energy band structure
图 1. 单胞立体图及其能带结构

基于上述单胞, 首先构造由 7×7 个单胞组成的超胞, 如图 2(a)所示。为引入点缺陷, 将中心位置(第 4 行, 第 4 列)单胞中的花瓣形孔洞移除, 形成一个完整的铝质区域。该点缺陷破坏了声子晶体的平移对称性, 从而在完全带隙内产生缺陷态, 使特定频率的弹性波能量被局域在缺陷处。在点缺陷中心的上表面贴附锆钛酸铅(PZT-5H)圆盘形压电片, 其几何参数采用前期优化得到的最优值: 直径 $d = 10$ mm, 厚度 $t = 2.3$ mm。PZT-5H 相关的非零矩阵元取值如表 1 所示。图 2(b)为点缺陷超胞的能带结构。

基于声子晶体的压电能量收集系统模型如图 3 所示。在超胞的 x 方向两侧添加铝质延伸段并设置完美匹配层(PMLs)作为无反射吸收边界, 模拟无限域中的波传播; 在 y 方向上设置周期性边界条件(PBCs)以保证该方向上的无限周期排列, 完美匹配层和周期性边界条件分别用蓝色和绿色表示。在距离超胞左端 100 mm 的位置, 沿 z 方向施加振幅为 20 nm 的简谐位移激励, 用于激发板的 A0 阶 Lamb 波, 如图 3 红色部分所示。所有谐波分析中, 整体结构的损耗因子设置为 0.0001。为确保计算精度, 超胞结构的最大网格尺寸设置为目标缺陷带频率激发 A0 Lamb 波波长的十分之一, 经网格收敛性验证满足模拟精度要求。

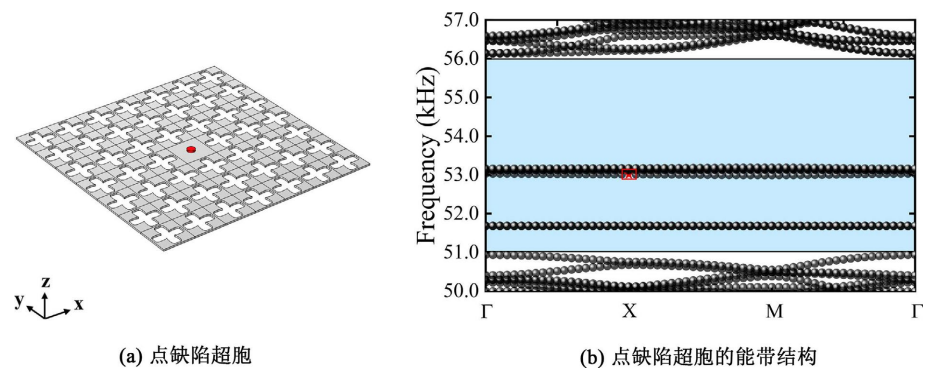


Figure 2. Point defect supercell and its energy band structure
图 2. 点缺陷超胞及其能带结构

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
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

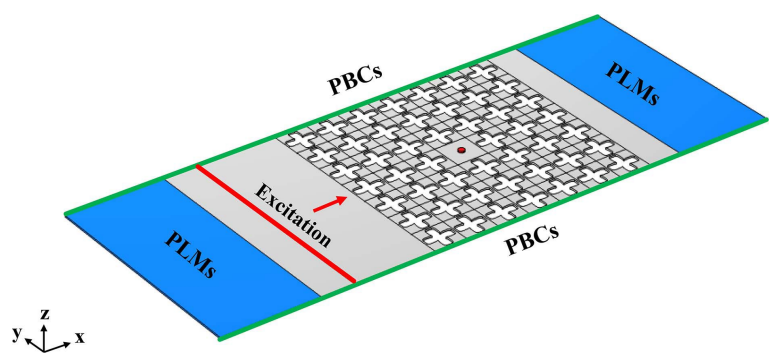


Figure 3. PnC-Based PEH system with excitation source and PMLs
图 3. 基于 PnC 的 PEH 系统，包括激励源和完美匹配层

3. x 方向周期性对能量局域和收集性能的影响

3.1. 振动模式与电压频响特性

x 方向为弹性波主要传播方向,其周期数直接影响带隙约束的完整性和缺陷态对入射波的捕获能力。图 4 给出了外接电阻为 $100\text{ M}\Omega$ 时,不同 x 方向周期数超胞在峰值频率下的 z 方向振动模式。可以看到,当超胞尺寸为 5×7 和 6×7 时,缺陷处虽出现一定程度的局域振动,但能量分布仍较为分散,说明有限周期结构尚未形成充分的带隙约束。随着 x 方向周期数增加,缺陷处逐渐形成更清晰的单极子振动模式,能量局域效果明显增强。

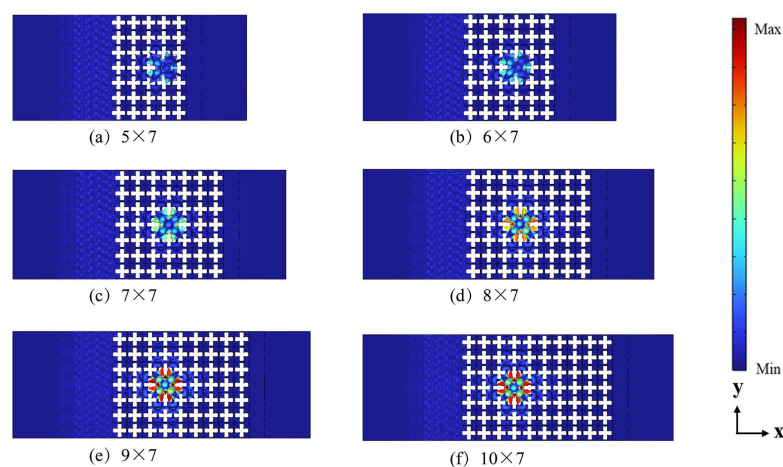
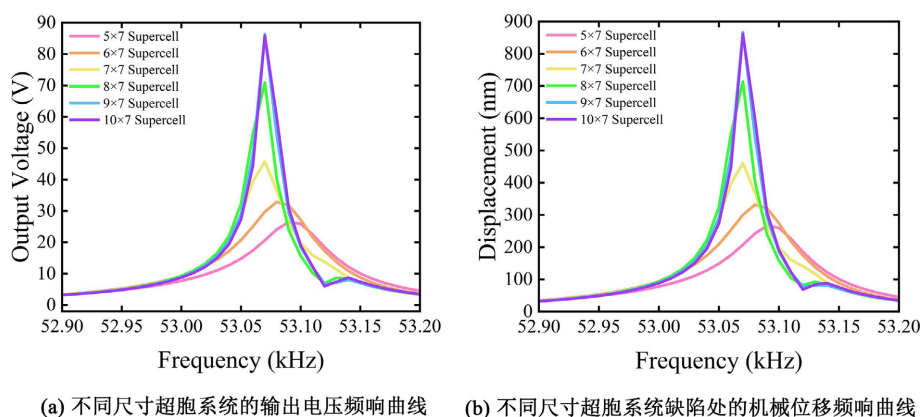


Figure 4. The vibration modes in the z-direction at different peak frequencies for different supercell sizes when the external resistance is $100\text{ M}\Omega$ (Variation in x direction)

图 4. 外部电阻为 $100\text{ M}\Omega$ 时,不同超胞尺寸峰值频率下 z 方向的振动模式(x 方向变化)

图 5 给出了在 $100\text{ M}\Omega$ 的外部电阻下,不同 x 方向周期数下的输出电压和缺陷处机械位移频响曲线。六种超胞均在 53 kHz 附近出现峰值,但峰值幅值差别明显。 5×7 、 6×7 、 7×7 、 8×7 、 9×7 和 10×7 超胞的最大输出电压分别为 26.495 V 、 32.851 V 、 45.727 V 、 70.992 V 、 86.302 V 和 85.878 V 。输出电压随周期数增加整体呈现先快速上升后趋于稳定的变化趋势。



(a) 不同尺寸超胞系统的输出电压频响曲线 (b) 不同尺寸超胞系统缺陷处的机械位移频响曲线

Figure 5. Output voltages and frequency response curves of mechanical displacements at defect locations for different-sized supercell systems (Variation in x direction)

图 5. 不同尺寸超胞系统的输出电压和缺陷处的机械位移频响曲线(x 方向变化)

3.2. 输出功率与外接电阻关系

为进一步评价电能提取能力, 计算不同超胞在各自开路谐振频率下输出电压和输出功率随外接电阻的变化关系, 如图 6 所示。随着外接电阻增大, 输出电压逐渐升高并趋近于开路电压; 输出功率则呈现先增大后减小的规律, 说明系统存在最优负载电阻。不同 x 方向周期数对应的最大输出功率依次为 17.228 mW、17.663 mW、17.891 mW、25.730 mW、32.257 mW 和 32.469 mW。

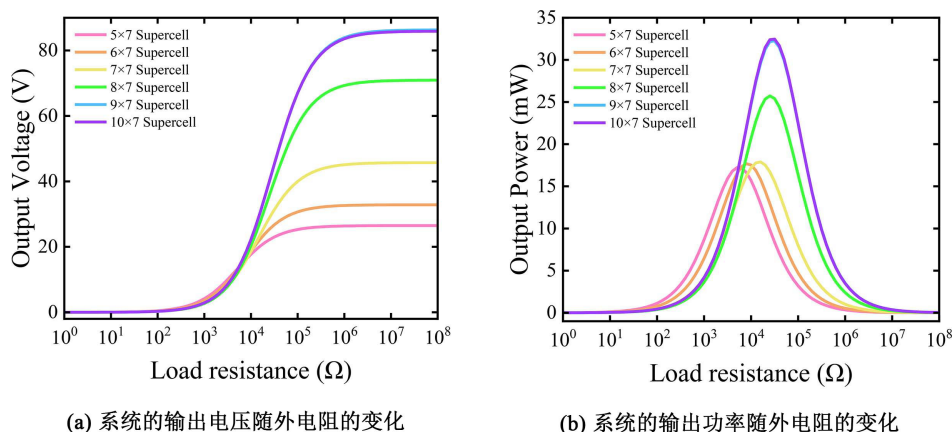


Figure 6. The variation of the output voltage and output power of the system with respect to the external resistance (Variation in x direction)

图 6. 系统的输出电压和输出电功率随外部电阻的变化情况(x 方向变化)

根据输出功率的变化特征, 可将 x 方向周期数的影响划分为三个主要阶段。第一阶段为周期性不足导致的功率平台期, 对应 5×7 至 7×7 的超胞尺寸范围。在这一阶段, 缺陷在 x 方向上的完美晶格层非常有限, 有限的周期数无法形成完整的带隙约束, 具体表现为带隙形成不充分、边界效应显著以及缺陷态频率漂移。输出电压从 26.495 V 增至 45.727 V, 增幅达 72.6%, 但输出功率仅从 17.228 mW 微增至 17.891 mW, 增幅仅 3.8%。这种电压显著上升而功率增长缓慢的现象表明, 在周期数严重不足条件下, 虽然缺陷处能够形成一定幅度的振动, 但系统的阻抗匹配状态尚未优化, 能量提取效率较低, 大量局域能量未能有效转化为电功率输出。

第二阶段为周期性完善与能量局域化增强阶段, 对应 7×7 至 9×7 的超胞尺寸范围。在这一阶段, 随着 x 方向周期数从 7 增加至 9, 周期性逐步完善, 带隙约束能力持续增强。当周期数从 7 增加至 8 时, 系统发生质变性跃升, 输出电压从 45.727 V 跃升至 70.992 V, 输出功率从 17.891 mW 激增至 25.730 mW; 当周期数继续从 8 增加至 9 时, 性能进一步提升, 输出电压攀升至 86.302 V, 输出功率跃升至 32.257 mW。这一连续增强过程的核心机制在于: 随着周期数增加, 带隙内的波衰减更完全, 缺陷与周围完美晶格的耦合更弱, 能量泄漏显著减少, 同时系统的阻抗匹配状态逐步优化, 能量提取效率持续提升。从 7×7 到 9×7 的整个阶段, 输出电压从 45.727 V 增长至 86.302 V, 增幅 88.7%, 输出功率从 17.891 mW 增长至 32.257 mW, 增幅 80.3%, 呈现出稳定而持续的增强趋势, 体现了周期性完善对能量局域化和提取效率的双重提升作用。

第三阶段为系统性能饱和阶段, 当 x 方向周期数从 9 增加至 10 时, 输出电压从 86.302 V 轻微变化至 85.878 V, 下降 0.5%, 输出功率从 32.257 mW 微增至 32.469 mW, 增加 0.7%, 系统性能基本稳定。这表明周期数已达到收敛阈值, 继续增加周期数对能量局域化的提升已十分有限, 其物理机理在于带隙特性趋近于无限周期理想情况, 缺陷态频率稳定在 53.07 kHz 不再变化, 倏逝波衰减已达到完全性, x 方

向隔离层厚度已超过特征衰减长度, 能量在到达边界前已衰减至可忽略水平, 同时能量局域化达到几何上限, 在带隙完整形成的条件下缺陷处的能量密度由缺陷本身的设计决定而非由周期数决定, 阻抗匹配也已稳定, 能量提取效率达到饱和。

图 7 所示的输出电压与输出功率随超胞尺寸的变化曲线清晰地展示了 x 方向周期数的收敛特性, 从 5×7 到 7×7 性能增长平缓, 从 7×7 到 9×7 性能持续快速提升, 而从 9×7 到 10×7 性能基本持平, 最佳超胞尺寸 9×7 的出现标志着 x 方向周期数恰好满足带隙完整形成所需的最小周期数, 是周期性完善程度、能量局域化效率与能量提取能力最优平衡的结果。因此, 选择 9×7 作为后续研究的最佳超胞尺寸, 既保证了能量收集性能的优化, 又避免了计算资源的浪费, 体现了科学与工程实践的合理平衡。

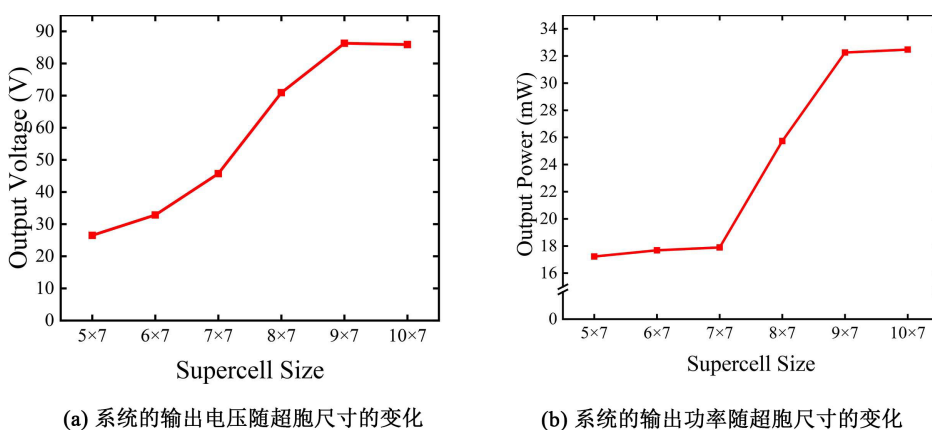


Figure 7. The output voltage and output power of the system vary with the change of the supercell size in the x direction

图 7. 系统的输出电压与输出功率随 x 方向上超胞尺寸的变化

4. y 方向周期性对能量局域和收集性能的影响

4.1. 振动模式与频响特性

在确定 x 方向周期数后, 进一步研究 y 方向周期数对系统性能的影响。固定 x 方向周期数为 9, 构建 9×5 、 9×6 、 9×7 、 9×8 和 9×9 五种超胞。与 x 方向不同, y 方向不是波的主要传播方向, 但会影响缺陷两侧横向隔离层厚度以及入射波作用于超胞的有效横向尺寸。

图 8 给出了不同 y 方向周期数超胞在峰值频率下的 z 方向振动模式。可以看到, 不同超胞尺寸下缺陷处均保持单极子振动模式, 说明 y 方向周期数变化没有改变目标缺陷态的基本振动形式, 主要影响的是振动幅值和能量局域强度。

图 9 显示了不同 y 方向周期数下的输出电压和机械位移频响曲线。 9×5 、 9×6 、 9×7 、 9×8 和 9×9 超胞在近开路条件下的峰值输出电压分别为 59.328 V、72.094 V、86.302 V、81.963 V 和 75.131 V。与 x 方向的单调增长并趋于饱和不同, y 方向周期数增加时, 输出电压呈现先增大后减小的非单调变化规律。

4.2. 输出功率与物理机制分析

图 10 给出了不同 y 方向周期数下输出电压和输出功率随外接电阻的变化关系。输出功率也呈现先增大后减小的规律, 9×5 、 9×6 、 9×7 、 9×8 和 9×9 超胞的最大输出功率分别为 11.865 mW、29.506 mW、32.257 mW、31.885 mW 和 27.204 mW。其中, 9×7 超胞取得最高输出功率。

当 y 方向周期数由 5 增加至 7 时, 系统性能提升明显。一方面, y 方向尺寸增大使得入射 A_0 Lamb

波的能量输入端横截面积增加, 在波能量密度一定的情况下, 进入超胞区域的总能量增加, 为缺陷处能量局域提供了更充分的能量来源; 另一方面, y 方向周期数的增加也意味着缺陷在 y 方向上的完美晶格隔离层逐步增厚, 倏逝波在到达 y 方向无限区域前衰减更完全, 缺陷与 y 方向无限周期区域的耦合强度减弱, y 方向的能量扩散损失显著降低。两种因素共同作用, 使 9×7 超胞获得最佳能量局域和电输出性能。

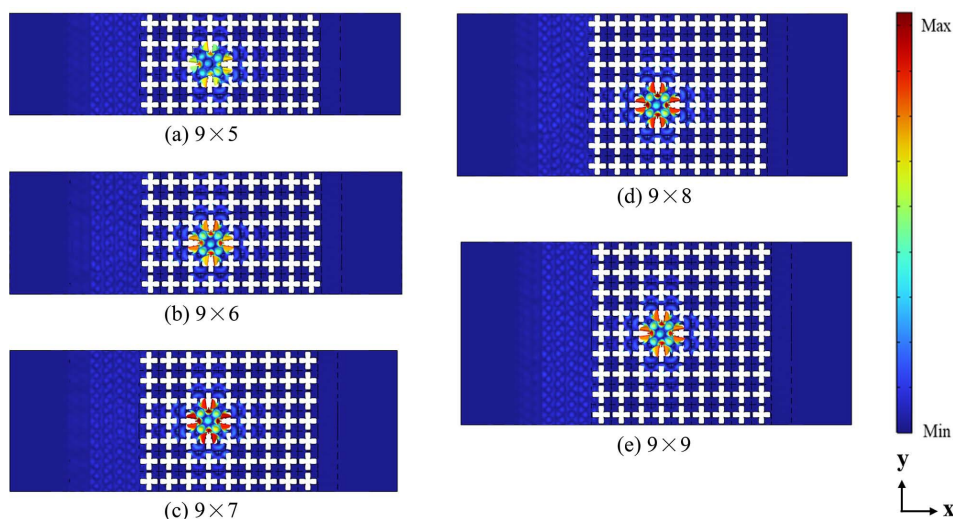


Figure 8. The vibration modes in the z -direction at different peak frequencies for different supercell sizes when the external resistance is $100 \text{ M}\Omega$ (Variation in y direction)

图 8. 外部电阻为 $100 \text{ M}\Omega$ 时不同超胞尺寸峰值频率下 z 方向的振动模式(y 方向变化)

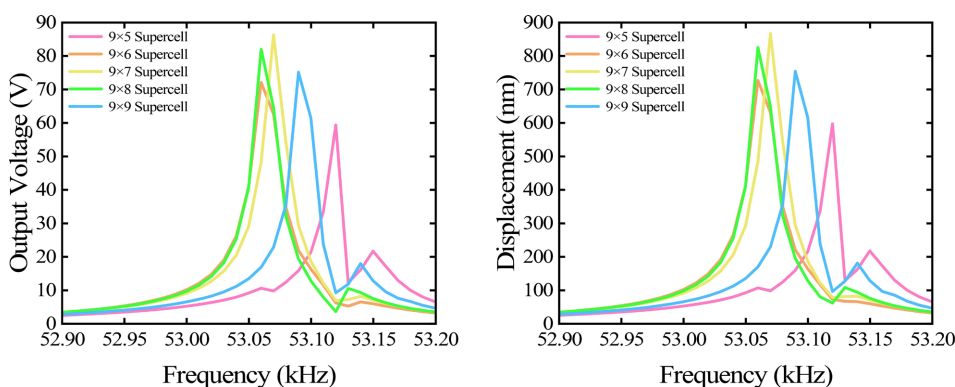


Figure 9. Output voltages and frequency response curves of mechanical displacements at defect locations for different-sized supercell systems (Variation in y direction)

图 9. 不同尺寸超胞系统的输出电压和缺陷处的机械位移频响曲线(y 方向变化)

当 y 方向周期数继续增加至 8 和 9 时, 输出性能开始下降。此时, 横向输入面积继续增大所带来的边际收益趋于减弱, 远离缺陷区域的能量难以有效耦合至缺陷位置; 同时, 横向隔离层厚度已经基本满足倏逝波衰减要求, 继续增加周期数难以进一步降低扩散损失。过大的 y 方向尺寸还可能引入弱的整体模态扰动, 使部分能量从缺陷单极子模态分散到其他振动形式中, 导致峰值振幅和输出功率回落。

值得注意的是, 9×8 超胞的输出功率为 31.885 mW , 与 9×7 的 32.257 mW 非常接近, 说明在 y 方向周期数达到 7 以后, 系统性能已接近最优平台; 但 9×9 超胞的功率下降至 27.204 mW , 表明继续增加

横向周期数并不能持续提升能量收集能力。

综上所述, 最佳超胞尺寸 9×7 的出现, 标志着能量输入端面积效应与能量局域化效率达到了最优匹配, 是 y 方向隔离层厚度恰好满足倏逝波完全衰减需求、输入端面积增益尚未饱和、且超胞整体模式扰动尚未显现的综合结果, 其 32.257 mW 的峰值输出功率较 9×5 超胞提升了 172% , 充分体现了优化 y 方向周期数对能量收集性能的显著提升作用。图 11 为系统的输出电压与输出功率随超胞尺寸的变化情况。

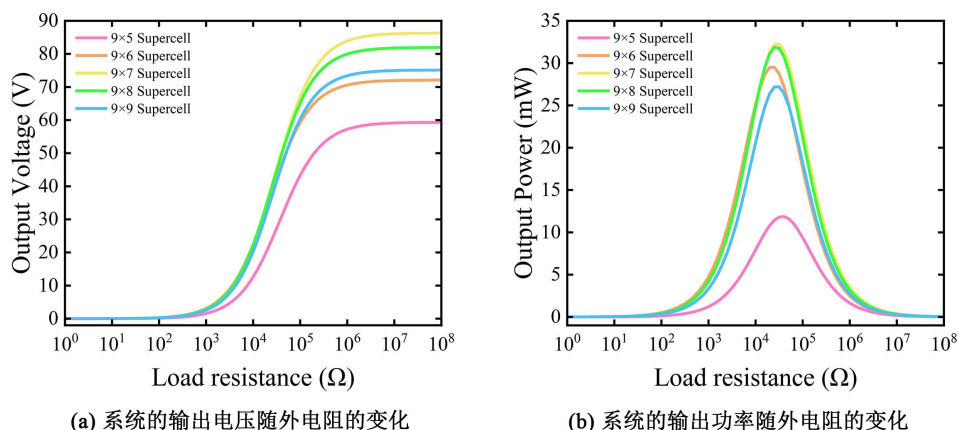


Figure 10. The variation of the output voltage and output power of the system with respect to the external resistance (Variation in y direction)

图 10. 系统的输出电压和输出电功率随外部电阻的变化情况(y 方向变化)

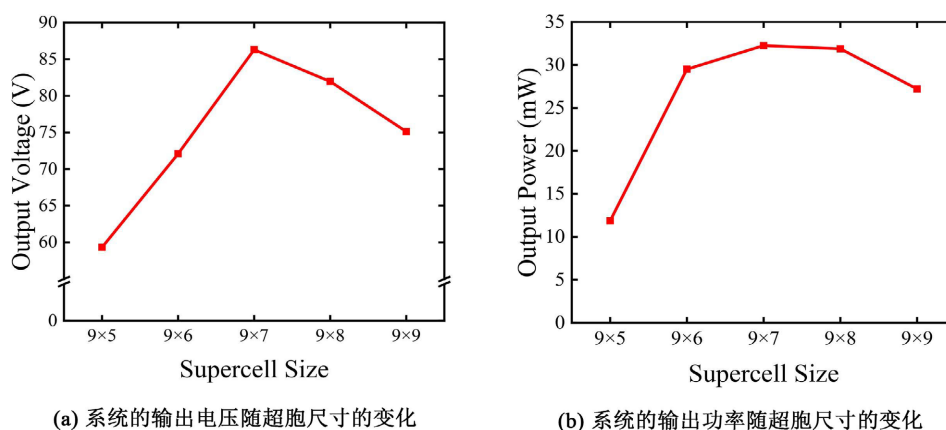


Figure 11. The output voltage and output power of the system vary with the change of the supercell size in the y direction

图 11. 系统的输出电压与输出功率随 y 方向上超胞尺寸的变化

5. 机电能量转换效率

在最佳超胞尺寸 9×7 下, 系统在 $100 \text{ M}\Omega$ 外接电阻条件下取得峰值输出电压 86.302 V 和最大输出功率 32.257 mW 。机械波的平均输入功率可以表示为:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 v S$$

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 。

则系统机电能量转换效率为：

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{32.257}{106.25} \times 100\% = 30.36\%$$

该结果表明，超胞周期数优化不仅提高了缺陷处机械振动幅值，而且有效提升了机械能向电能的转换能力。与仅优化压电片几何参数时的 7×7 超胞相比， 9×7 超胞的输出功率由 17.891 mW 提升至 32.257 mW，说明超胞周期性是影响点缺陷声子晶体能量收集性能的重要结构参数。表 2 汇总了本工作和几个同类型工作中的单胞晶格常数、输入激励、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]	输入激励[nm]	最大输出电压[V]	最大输出功率[mW]
本文工作	40	20	86.302	32.257
[7]	34	10	5.2	2.7
[8]	34	10	4.55	1.59
[12]	33	20	29.4	3.92
[13]	20	30	7.79	2.17
[14]	25	10	4.05	1.28
[17]	27	50	16.185	1.387
[18]	27	30	22.21	1.68

6. 结论

本文基于花瓣形孔洞声子晶体点缺陷压电能量收集系统，研究了超胞周期性对能量局域化与电输出性能的影响。主要结论如下：

1) x 方向周期数对系统输出性能起主导作用。随着周期数由 5 增加至 9，缺陷处单极子局域模态逐步增强，带隙约束趋于完整，输出电压和输出功率显著提高；当周期数继续增至 10 时，系统性能基本饱和，说明 9 个 x 方向周期已能够满足缺陷态能量局域所需的有效隔离条件。

2) y 方向周期数对系统性能具有调节优化作用。周期数由 5 增加至 7 时，输入端面积增大和横向倏逝波衰减增强共同提高缺陷处能量净输入；周期数继续增加时，输入面积增益饱和，并可能产生弱模态扰动，使输出性能略有回落。

3) 综合 x 方向和 y 方向优化结果，最佳超胞尺寸为 9×7 。在该尺寸下，系统于 $100 \text{ M}\Omega$ 负载下获得 86.302 V 峰值输出电压，最大输出功率达到 32.257 mW，机电能量转换效率为 30.36%。该结果说明，合理设计超胞周期数能够显著增强声子晶体缺陷态能量局域化效率，为高性能压电能量收集器设计提供有效途径。

后续研究可进一步从实验验证、结构加工误差、阻尼损耗、压电片粘接层影响以及多缺陷/梯度结构协同优化等方面展开，以提高该类器件在实际环境中的适用性和稳定性。

参考文献

[1] 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>

- [2] Li, J.R., Guo, J.C. and Zhang, Z. (2024) 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>
- [3] Tang, X.L., Zhang, X.Q., Ma, T.X., Kim, M. and Wang, Y.S. (2025) Topological Rainbow Trapping and Broadband Piezoelectric Energy Harvesting of Acoustic Waves in Gradient Phononic Crystals with Coupled Interfaces. *Applied Acoustics*, **233**, Article 110630. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.110630>
- [4] 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>
- [5] 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>
- [6] 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 No. 94. <https://doi.org/10.1038/s42005-022-00869-4>
- [7] 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>
- [8] Park, C.S., Shin, Y.C., Jo, S.H., Yoon, H., *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>
- [9] Wu, L.Y., Chen, L.W. and Liu, C.M. (2009) Acoustic Energy Harvesting Using Resonant Cavity of a Sonic Crystal. *Applied Physics Letters*, **95**, Article 013506. <https://doi.org/10.1063/1.3176019>
- [10] Yang, A., Li, P., Wen, Y., Lu, C., Peng, X., Zhang, J., *et al.* (2013) Enhanced Acoustic Energy Harvesting Using Coupled Resonance Structure of Sonic Crystal and Helmholtz Resonator. *Applied Physics Express*, **6**, Article 127101. <https://doi.org/10.7567/apex.6.127101>
- [11] Jo, S.H., Lee, D., Yoon, H. and Youn, B.D. (2023) Double Piezoelectric Defects in Phononic Crystals for Ultrasonic Transducers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **56**, Article 074002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/acb21a>
- [12] 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 No. 29. <https://doi.org/10.1186/s40580-022-00321-x>
- [13] Jo, S.H. and Youn, B.D. (2021) A Phononic Crystal with Differently Configured Double Defects for Broadband Elastic Wave Energy Localization and Harvesting. *Crystals*, **11**, Article 643. <https://doi.org/10.3390/cryst11060643>
- [14] 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>
- [15] Zhang, G.Y., Liu, Z.J., Li, B.Z., Dou, X.L., *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>
- [16] Zhou, X., Wu, S., Wang, X., Wang, Z., Zhu, Q., Sun, J., *et al.* (2024) Review on Piezoelectric Actuators: Materials, Classifications, Applications, and Recent Trends. *Frontiers of Mechanical Engineering*, **19**, Article No. 6. <https://doi.org/10.1007/s11465-023-0772-0>
- [17] 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>
- [18] 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>