

撤稿声明

撤稿文章名: 作者:		基于不同缺陷态结构的声学超材料振动能量回收研究 黄子龙					
* 通讯作者.		邮箱:1526563806@qq.com					
期刊名: 年份: 卷数: 期数: 页码 (从X页到X页): DOI (to PDF): 文章ID: 文章页面: 撤稿日期:		应用物理(APP) 2024 14 7 550-559 https://doi.org/10.12677/app.2024.147059 1270879 https://www.hanspub.org/journal/PaperInformation?paperID=92473 2024-8-15					
撤 □ □ 撤	稿原因 (可多选): 所有作者 部分作者: 编辑收到通知来自于 稿生效日期:	 ○ 出版商 ○ 科研机构: ○ 读者: □ 其他: 2024-8-15 					
撤 ☑ □	稿类型 (可多选): 结果不实 〇 实验错误 〇 其他: 结果不可再得 未揭示可能会影响理解与结i 不符合道德	O 数据不一致 论的主要利益冲突	O 分析错误	O 内容有失偏颇			
	欺诈 ○ 编造数据 抄袭 侵权	 ○ 虚假出版 □ 自我抄袭 □ 其他法律相关: 	O 其他: □ 重复抄袭	□ 重复发表 *			
	编辑错误 〇操作错误	O 无效评审	O 决策错误	O 其他:			
□ 出) □	 □ 东西水西 □ 出版结果 (只可单选) □ 仍然有效. ☑ 完全无效. 						
「□□□□	作者行为 失误(只可单选): □ 诚信问题 ☑ 学术不端 □ 无 (不适用此条,如编辑错误)						
*	* 重复发表: "出版或试图出版同一篇文章于不同期刊."						



历史
作者回应:
□ 是,日期:yyyy-mm-dd
☑ 否
信息改正:
□ 是,日期:yyyy-mm-dd
☑ 否

说明:

"基于不同缺陷态结构的声学超材料振动能量回收研究"一文刊登在 2024 年 7 月出版的《应用物理》 2024 年第 14 卷第 7 期第 550-559 页上。由于数据有误,计算结果有问题,根据国际出版流程,编委会现 决定撤除此稿件,保留原出版出处:

黄子龙. 基于不同缺陷态结构的声学超材料振动能量回收研究[J]. 应用物理, 2024, 14(7): 550-559. https://doi.org/10.12677/app.2024.147059

所有作者签名:



基于不同缺陷态结构的声学 超材料振动能量回收研究

黄子龙

兰州交通大学数理学院,甘肃 兰州

收稿日期: 2024年6月14日; 录用日期: 2024年7月16日; 发布日期: 2024年7月25日

摘要

声学超材料能够实现低频振动能量的回收,在为无线电设备供能方面具有广阔的应用前景。本文的单胞 结构为在正方形环氧树脂基体板内由内向外依次嵌入钨散射体、硅橡胶包覆层。计算了声学超材料结构 的色散曲线和传输损失谱,并对结构进行了优化。通过设计点缺陷、线缺陷和不完整线缺陷结构,探究 了超胞结构的能量局域化特性及振动能量回收性能。研究发现; 三种不同的缺陷结构均能产生能量的局 域,其中点缺陷具有最强的能量局域效果且能量回收性能最佳。对于最优的点缺陷结构,在峰值电压频 率252.9 Hz处产生的输出电压为243.5 mV,最优输出功率为88.7 nW。本研究可为低频弹性波的控制及 无线低功耗仪器的供能提供了理论参考。

关键词

声学超材料,缺陷态,低频振动能量回收

Study on Vibration Energy Recovery of Acoustic Metamaterials Based on Different Defect State Structures

Zilong Huang

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

Received: Jun. 14th, 2024; accepted: Jul. 16th, 2024; published: Jul. 25th, 2024

Abstract

Acoustic metamaterials can recover low-frequency vibration energy and have broad application

文章引用: 黄子龙. 基于不同缺陷态结构的声学超材料振动能量回收研究[J]. 应用物理, 2024, 14(7): 550-559. DOI: 10.12677/app.2024.147059

prospects in the field of energy supply for radio equipment. In this paper, the single cell structure is the tungsten scatterer and silicone rubber coating layer embedded in the square epoxy resin matrix plate from inside to outside. The dispersion curve and transmission loss spectrum of the acoustic metamaterial structure are calculated and the structure is optimized. By designing point defect, line defect and incomplete line defect structures, the energy localization characteristics and vibration energy recovery performance of the supercellular structure are investigated. It is found that the three different defect structures can generate energy localization, and the point defect has the strongest energy localization effect and the best energy recovery performance. For the optimal point defect structure, the output voltage generated at the peak voltage frequency of 252.9 Hz is 243.5 mV and the optimal output power is 88.7 nW. This study can provide a theoretical reference for the control of low frequency elastic waves and the power supply of wireless low power instruments.

Keywords

Acoustic Metamaterials, Defect State, Low Frequency Vibration Energy Recovery

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u>

CC Open Access

1. 引言

声学超材料是一种具有负质量密度或负折射率等异常物理特性的新型人工复合材料,通过特定方式 对结构的单元进行排列,能够实现对弹性波的精准调整,1 [2]。当声学超材料完全按周期性进行排列时,称为完美声学超材料结构。通过海声学超材料结构中的一个或多个单元替换为不同材料或不同几何结构 的单元时,其周期性结构被破坏,使弹性波在缺乏附近表现出异常的传播特性[3] [4]。当声学超材料结构 中存在点缺陷时,在缺陷着构附力弹性波会被局域,并在带隙频率范围内会产生一条新的通带,在该频 率处弹性波能够无损耗地通过结构形成缺陷态模式。当声学超材料结构中存在较为复杂的线缺陷或面缺 陷时,弹性波会沿着线缺陷或面缺陷的方向进行传播。这些特殊的传播形式使得声学超材料在声振动能 量回收[5] [6]、声聚焦[7]和低频减振降噪[8]等领域具有广泛应用。

能量回收系统能够将环境中的声能和机械能转化为宝贵的电能并加以回收利用。由于声学超材料的 独特性能能够实现对入射波方向和振幅的调控,为实现高性能的能量回收提供了可能。近年来,在能量 回收系统中引入力子晶体和声学超材料来实现高密度的能量回收的研究不断激增,包括弹性波的聚焦[9]、 这位[10]和回收[11]寿。Chuang 等人[12]通过实验和理论分析相结合的方法测得了弹性波在超材料结构中 传播的位移运射率,在缺陷带频率附近,缺陷处的弹性波能量得到了显著增强。Sigalas 等人[13]利用平 面波展带法研究了弹性波在二维周期性复合材料中的传播,通过数学分析的方法实现了特定缺陷带频率 的结构,并实现了能量的转化。Yao 等人[14]和 Li 等人[15]通过改变几何结构的尺寸与材料的属性实现缺 陷带频率的可调,在缺陷态频率处弹性波实现了能量的局域。在此基础上,Jo 等人[16]研究了超胞大小 及缺陷态位置对能量回收性能的影响,对弹性波的定位及回收进行了具体的研究,发现在5×7 的超胞结 构中,位于第三位的缺陷能够获得更高的回收性能。Kim 等人[17]提出了一种梯度折射率的振动能量回收 装置,通过设计电极结构,大大降低了相反方向的多模态应变产生的电压相消效应,是普通振动能量回 收装置的 17.7 倍。He 等人[18]基于修正的耦合应力理论和混合有限元方法,探究了尺寸效应对微结构能 量回收性能的影响,当模型的尺寸减小时,带隙及缺陷带频率会增大。Xiang 等人[19]提出了一种螺旋型 三维声子晶体结构,基于弹性梁在散射体附近振动变形大的特点,获得了更高的能量回收性能。Deng 等 人[20]提出一种新型带点缺陷的多孔双柱超材料板,利用超材料的缺陷态特性增强了振动能量的局域化性 能,探究了孔大小与电边界条件和电路连接方式对能量回收性能的影响。

总之,目前关于振动能量回收的研究多大集中于中高频领域,而环境中广泛存在的低频振动能量回 收的研究较少。因此,本文提出了一种新型的二维三组元声学超材料结构,利用有限元方法计算了结构 的色散曲线及传输损失谱,探究了几何结构参数对弹性波带隙的影响,设计并分析了三种不同缺陷结构 的能量局域特性及振动能量回收性能。

2. 振动能量回收性能分析

2.1. 模型建立

为了实现低频振动能量的回收,在正方形环氧树脂基体中嵌入钨散射体及硅橡胶包覆层,提出了一 种二维三组元的新型声学超材料结构,如图1所示。声学超材料板的几何结构参数和材料的参数分别由 表1和表2所列。



Figure 1. Structure of acoustic metamaterial plate. (a) Unicellular structure; (b) Schematic diagram of the first Brillouin zone 图 1. 声学超材料板结构。(a) 单胞结构; (b) 第一布皇渊区示意图

Table 1. Geometric parameters	of acoustic	metamaterial
表 1. 声学超材料的几何参数		

				几何参数/mm			
_	а		r1	r_2	h	1	h_2
_	30		9	12	10	0	2
T	able 2. Materia . 2. 材料参数	l parameters					
	材料	密度/ (kg·m ⁻³)	杨氏模量 (GPa)	剪切模量 (GPa)	压电系数/ (C·m ⁻²)	介电常数 ×10 ⁻⁸ /(F·m ⁻¹)	弹性常数 ×10 ¹⁰ /(N·m ²)
_	橡胶	1600	9.94×10^{-4}	3.38×10^{-4}	—	—	—
	环氧树脂	1180	4.35	1.59	—	—	—
	钨	19,100	354	131.1	—	—	—
	PZT-5H	7500		—	23.24	3.01	11.74

本文利用有限元的方法对声学超材料结构的色散曲线和传输损失谱进行了计算,在周期性结构中, 弹性波的传播方程可以写为:

$$\sum_{j=1}^{3} \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left(\sum_{i=1}^{3} \sum_{k=1}^{3} c_{ijkl} \frac{\partial u_{k}}{\partial x_{l}} \right) = \rho \frac{\partial^{2} u_{i}}{\partial t^{2}}, (i = 1, 2, 3)$$
(1)

式中, ρ 为声学超材料的密度, u_i 为结构产生的位移,t、 c_{ijkl} 分别表示时间和弹性常数。由 Bloch-Floquet 定理,弹性波在具有周期性排列的声学超材料中传播时表现为晶格调制的平面波,其 Bloch 波为:

$$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{r}) = \boldsymbol{u}_{k}(\boldsymbol{r})e^{i(\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r})}$$
⁽²⁾

其中 r、k、 $u_k(r)$ 分别为节点处的位移矢量、波矢量和特征波振幅。由 Bloch 定理可知,对于周期性排列的声学超材料,本征波矢量的振幅 $u_k(r)$ 和基矢量 R_n 的平移周期性是一致的,即

$$\boldsymbol{u}_{k}\left(\boldsymbol{r}\right) = \boldsymbol{u}_{k}\left(\boldsymbol{r} + \boldsymbol{R}_{n}\right) \tag{3}$$

结合式(2)和(3)可以得到,在空间域中本征波的矢量场 u 可以表示为:

$$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{r} + \boldsymbol{R}_n) = \boldsymbol{u}(\boldsymbol{r}) e^{i(\boldsymbol{k} \cdot \boldsymbol{R}_n)}$$
(4)

为了进一步描述声学超材料对弹性波的衰减效果,计算了1×7半无限周期性声学超材料结构的传输 损失谱,如图2所示。为了减少反射波对计算结果的影响,在x方向上的两端添加完美匹配层。为了满 足声学超材料的周期性,在y方向上添加 Bloch 周期性边界条件。在x方向上的左侧端口施加位移激励 *d*_{in},在x方向上的右侧端口拾取位移响应*d*_{out}。传输损失*T*定义为:

$$T = 20 \lg \frac{d_{\text{out}}}{d_{\text{in}}} \tag{5}$$

Figure 2. Structure for calculating acoustic metamaterial transmission loss spectrum 图 2. 计算声学超材料传输损失谱的结构





如图 3 为声学超材料的能带结构和传输损失谱,可以看出,在 78.2~284.5 Hz 的频率范围内存在一个

局域共振带隙。传输损失谱的衰减范围与能带结构的带隙范围相对应,验证了计算结果的准确性,A、B 两点分别为带隙的起始频率及截止频率。

2.2. 单胞结构优化

为了在低频范围内获得较宽的带隙,对结构的几何参数进行了优化。如图 4 为结构的几何参数对带隙的起始频率与截止频率的影响。设基体板厚度为2 mm,散射体及包覆层的高度从2 mm 增加到 15 mm, 计算结果如图 4(a)所示。可以发现随着散射体高度的增加,带隙的起始频率不断降低,截止频率逐渐升高并稳定于 285 Hz,使得带隙的宽度不断增加。设散射体及包覆层的高度为 10 mm,基体板的厚度由 2 mm 增加到 10 mm,计算结果如图 4(b)所示。可以看出,随着基体板厚度的增加,带隙的起始频率不断升高, 截止频率逐渐降低,使得带隙的宽度逐渐变窄。当散射体及包覆层的高度增加到 10 mm 时,带隙的宽度 的变化较小,为了获得宽频、轻质的声学超材料结构,本文最终选取散射体及包覆层高度为 10 mm、板 厚为 2 mm 的声学超材料结构。



Figure 4. Influence of geometrical parameters of the structure on elastic wave band gap. (a) The effect of scatterer height on the band gap; (b) Influence of substrate plate unckness on band gap E(A + back = a + back



为了分析带隙随结构参数变化的原因,计算了声学超材料结构的起始频率和截止频率处的振动模态 图,如图 5 所示,图中箭头表示位移场,箭头的方向及长度代表该点处介质偏移的方向和偏移的大小。 A 点的振动是由散射体及包覆层的一侧发生偏移,并带动结构的另外一侧散射体和包覆层做扭转运动, 这个过程中包覆层结构产生拉伸或压缩运动,使得基体结构中传播的行波与局域振子之间发生耦合作用, 从而产生了带隙。B 点的振动模态图中散射体几乎处于静止状态,基体板向上偏移,包覆层做扭转运动, 使得基体板在 x 或 y 方向上的合作用减弱,最终使得基体板的行波与局域振子的耦合作用减弱,导致带隙的截止。

当散射体及包覆层高度增加时会导致声学超材料结构的质量增大,使得 A 点处散射体偏移程度减弱, 包覆层结构的拉伸或压缩运动更加显著,增强了基体中行波与局域振子的耦合作用,因此带隙的起始频 率降低;而在 B 点处,随着散射体及包覆层高度的增加,基体板的行波与局域振子的耦合作用逐渐减弱, 散射体及包覆层的高度增加到一定的程度时,由于散射体几乎处于静止状态,此时基体的行波与局域振 子的耦合作用几乎保持不变,因此,带隙的截止频率先升高后保持不变。当基体板的厚度不断增加时, 由于受到基体板的限制作用,使得 A 点处包覆层结构的拉伸或压缩运动逐渐减弱,基体中行波与局域振 子的耦合作用降低,因此带隙的起始频率降低;在 B 点处由于基体板厚度的增加,使得基体板的偏移减 小,导致基体板的行波与局域振子的耦合作用不断减弱,因此截止频率降低。

2.3. 不同缺陷的声学超材料结构设计及能量回收性能分析

2.3.1. 不同缺陷的声学超材料结构设计及缺陷态分析

当完美声学超材料中的材料或结构被替换为具有不同几何或材料性质的结构时,会局部破坏声学超 材料的周期性,在带隙范围内产生缺陷带。由于弹性波可以在缺陷频率附近与一定的缺陷模态发生机械 共振,因此可以将弹性波局域在缺陷的内部,通过将振动能量回收系统附加在缺陷上能够显著的提高系 统的回收性能。然而,当缺陷的种类不同时,在缺陷频率附近弹性波的传输特性也不同,从而获得不同 的能量回收效果。为了获得更高的能量回收效率,本文设计了三种不同种类的缺陷形式,如图 6 所示, 其中压电片的半径均为*r*₁,高度均为*h*₂。如图 6(a)为点缺陷超胞结构,是在 5 × 7 的完美声学超材料板结 构中将位于第三行第三列的单胞散射体及包覆层替换为压电材料 PZT-5H 形成的(图中红点)。如图 6(b) 为线缺陷超胞结构,是在 5 × 7 超胞结构中移除第二行的散射体及包覆层结构,并将压电材料放置于第三 行第三列中(图中红点)形成的。如图 6(c)为不完整线缺陷结构,在点缺陷的基础上移除第三行中第一列及 第二列的散射体及包覆层结构形成。



Tigure 6. Acoustic meramaterial plate structures with different defect types 图 6. 不同缺陷类型的声学超材料板结构

通过 超胞结构的 x、y 方向施加 Bloch 周期边界条件,利用有限元法计算了不同缺陷类型的声学超 材料的能带结构,如图 7(a)~(c)所示。可以看出,在完全带隙内,因缺陷的存在使完全带隙结构中出现了 通带,使得该频率的弹性波可以在声学超材料板中传输,点缺陷、线缺陷及不完整线缺陷的缺陷带频率 分别为 256.4 Hz、221.5 Hz 和 236.7 Hz。如图 7(d)~(f)分别为不同类型的缺陷结构在对应的缺陷带频率处 弹性波能量的聚焦情况,可以发现,点缺陷结构具有更强的能量聚焦效果。

2.3.2. 不同缺陷的声学超材料结构能量回收性能分析

为了对不同缺陷类型的声学超材料板结构的振动能量回收性能进行分析,在声学超材料板结构的左

侧施加振动幅值为 10 μm 的 z 方向位移激励。图 8 为外接电阻为 100 MΩ 时,不同缺陷类型的声学超材 料板结构的输出电压随频率的变化情况,点缺陷、线缺陷及不完全线缺陷结构的最大输出电压分别为 243.5 mV、83.4 mV 和 141.4 mV,相应的电压峰-峰值频率分别为 252.9 Hz、225 Hz 和 246.4 Hz。可以发 现,在缺陷频率处,点缺陷结构具有最大的输出电压。不同缺陷结构声学超材料的电压峰 - 峰值对应的 频率如表 3 所列。



Figure 7. Acoustic metamaterial bandgap and defect state patterns of different defect types. (a) and (d) are point defect bandgap and defect state mode; (b) and (e) are line defect band gap and defect state mode; (c), (f) are incomplete defect bandgap structure and defect state mode

图 7. 不同缺陷类型的声学超材料带隙及缺陷态模式。(a)、(d)为点缺陷带隙及缺陷态模式;(b)、(e)为线缺陷带隙及 缺陷态模式;(c)、(f)为不完整缺陷带隙构及缺陷态模式

Table 3. Output perform	nance o	f different defe	ot types when the	external resistance	is 100 MΩ
表 3. 外部电阻为 100	MΩ时	,不同缺陷类	型的输出性能		

物理量	点缺陷	线缺陷	不完整线缺陷
峰值频率(Hz)	252.9	225.0	246.4
输出电压(mV)	243.5	83.4	141.4

为了分析这一现象产生的原因,考虑弹性波在声学超材料结构中传播的衰减和缺陷周围单胞的充分 周期性之间的关系。对于点缺陷和不完整线缺陷而言,虽然不完整线缺陷结构在能量传输过程中衰减较 小,但由于缺陷周围的单胞数量不足,导致缺陷附近的能量局域性能较差,使结构的输出电压降低。对 比线缺陷和不完整线缺陷结构,弹性波在传输过程中的衰减是一致的,但由于线缺陷结构的右侧缺乏一 定的单胞结构,使得缺陷附近的能量局域性能较弱,系统的回收电压较低。

为了对不同缺陷结构声学超材料板的回收性能进行分析,计算了不同超胞结构的输出电压及输出功率随外接电阻的变化情况。图 9(a)为不同的缺陷结构在电压峰 - 峰值对应的频率下(252.9 Hz、225 Hz 和 246.4 Hz),能量回收系统的输出电压随外接电阻的变化情况。可以发现,随着外接电阻的增大,系统的输出电压增大并稳定于最大值。图 9(b)为不同的缺陷结构在电压峰 - 峰值对应的频率下(252.9 Hz、225 Hz

和 246.4 Hz),能量回收系统的输出功率随外接电阻的变化情况。在外接最优电阻分别为 158.49 kΩ、177.83 kΩ 和 177.83 kΩ 时,不同超胞大小的输出功率达到最大值,分别为 88.7 nW、9.2 nW、和 29.1 nW,可以 发现点缺陷结构具有最大的能量输出性能。表 4 列出了能量回收系统在不同缺陷结构下,相应最优外接 电阻时输出功率的计算结果。



Figure 8. Variation of output voltage with frequency for different defect structures 图 8. 不同缺陷结构的输出电压随频率的变化





Figure 9. Relation between output performance of different defect structures and external resistance. (a) Variation of the output voltage with the external resistance; (b) The output power varies with the external resistance **图 9.** 不同缺陷结构的输出性能与外接电阻的关系。(a) 输出电压随外接电阻的变化; (b) 输出功率随外接电阻的变化

3. 结论

针对低频振动能量回收的问题,本文在正方形环氧树脂基体板中由内向外依次嵌入钨散射体及硅橡胶包覆层,设计了一种二维三组元的新型声学超材料结构,利用有限元方法计算了该结构的色散曲线和传输损失谱,并对结构进行了几何参数优化。通过设计点缺陷、线缺陷和不完整线缺陷结构,研究了不同缺陷态结构的能量局域特性和低频振动能量回收性能。结果表明,点缺陷态结构的声学超材料能够获得最高的能量回收性能,对应的最优输出电压和功率分别为243.5 mV、88.7 nW。此研究为声学超材料低频振动能量回收提供了一种新的技术参考。

参考文献

- [1] 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. <u>https://doi.org/10.1103/physrevlett.71.2022</u>
- [2] 黄唯纯,颜士玲,李鑫,等.关于声学超构材料名词术语的探讨[J].中国材料进展,2021,40(1):1-6+20-21.
- [3] Thomes, R.L., Beli, D. and De Marqui, C. (2022) Space-Time Wave Localization in Electromechanical Metamaterial Beams with Programmable Defects. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 167, Article IV: 108550. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108550
- [4] Chen, Z., Guo, B., Yang, Y. and Cheng, C. (2014) Metamaterials-Based Enhanced Energy Harvesting: A Review. *Physica B: Condensed Matter*, **438**, 1-8. <u>https://doi.org/10.1016/j.physb.2013.12.040</u>
- [5] Birir, J.K., Gatari, M.J., Syed Akbar Ali, M.S. and Rajago pal, P. (2024) Metamaterial Enhanced Subwavelength Imaging of Inaccessible Defects in Guided Ultrasonic Wave Inspection. NDT & E International, 143, Article ID: 103070. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2024.103070
- [6] Okudan, G., Xu, C., Danawe, H., Tol, S. and Ozevin, D. (2022) Controlling the Thickness Dependence of Torsional Wave Mode in Pipe-Like Structures with the Gradient-Index Phononic Crystal Lens. *Ultrasonics*, **124**, Article ID: 106728. <u>https://doi.org/10.1016/j.ultras.2022.106728</u>
- [7] Fu, K., Zhao, Z. and Jin, L. (2019) Programmable Granular Metamaterials for Reusable Energy Absorption. *Advanced Functional Materials*, **29**, Article ID: 1901258. <u>https://doi.org/10.1002/adfm.201901258</u>
- [8] 李晓春, 易秀英, 肖清武, 等, 三组元声子晶体中的缺陷态[J]. 物理学报, 2006(5): 2300-2305.
- [9] Motaei, F. and Bahrami, A. (2022) Energy Harvesong from Sonic Noises by Phononic Crystal Fibers. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 10522. https://doi.org/10.1038/s41598-022-14134-9
- [10] Ma, T., Fan, Q., Li, Z., Zhang, C. and Wang, Y. (2020) Flexural Wave Energy Harvesting by Multi-Mode Elastic Metamaterial Cavities. *Extreme Mechanics Letters*, **41**, Article ID: 101073. <u>https://doi.org/10.1016/j.eml.2020.101073</u>
- [11] Sun, K.H., Kim, J.E., Kim, J. and Song, K. (2017) Sound Energy Harvesting Using a Doubly Coiled-Up Acoustic Metamaterial Cavity. Smart Materials and Structures, 26, Article ID: 075011. <u>https://doi.org/10.1088/1361-665x/aa724e</u>
- [12] Chuang K., Zhang, Z. and Wang, H. (2016) Experimental Study on Slow Flexural Waves around the Defect Modes in a Phonenic Crystal Beam Using Fiber Bragg Gratings. *Physics Letters A*, **380**, 3963-3969. https://doi.org/10.1016/j.physleta.2016.09.055
- [13] Sigalas, M.M. (1997) Elastic Wave Band Gaps and Defect States in Two-Dimensional Composites. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **101**, 1256-1261. <u>https://doi.org/10.1121/1.418156</u>
- [14] Yao, Z., Yu, G., Wang, Y. and Shi, Z. (2009) Propagation of Bending Waves in Phononic Crystal Thin Plates with a Point Defect. *International Journal of Solids and Structures*, **46**, 2571-2576. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.02.002
- [15] Li, Y. Zhu, L., Chen, T., *et al.* (2018) Elastic Wave Confinement and Absorption in a Dissipative Metamaterial. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, **56**, 158-163.
- [16] Jo, S., Yoon, H., Shin, Y.C., Choi, W., Park, C., Kim, M., 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 ID: 105670. <u>https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105670</u>
- [17] Kim, S., Choi, J., Seung, H.M., Jung, I., Ryu, K.H., Song, H., et al. (2022) Gradient-Index Phononic Crystal and Helmholtz Resonator Coupled Structure for High-Performance Acoustic Energy Harvesting. Nano Energy, 101, Article ID: 107544. <u>https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107544</u>
- [18] He, Z., Zhang, G., Chen, X., Cong, Y., Gu, S. and Hong, J. (2023) Elastic Wave Harvesting in Piezoelectric-Defect-Introduced Phononic Crystal Microplates. *International Journal of Mechanical Sciences*, 239, Article ID:

107892. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107892

- [19] Xiang, H., Chai, Z., Kou, W., Zhong, H. and Xiang, J. (2024) An Investigation of the Energy Harvesting Capabilities of a Novel Three-Dimensional Super-Cell Phononic Crystal with a Local Resonance Structure. *Sensors*, 24, Article No. 361. <u>https://doi.org/10.3390/s24020361</u>
- [20] Deng, T., Zhao, L. and Jin, F. (2024) Dual-Functional Perforated Metamaterial Plate for Amplified Energy Harvesting of Both Acoustic and Flexural Waves. *Thin-Walled Structures*, **197**, Article ID: 111615. <u>https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111615</u>