Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers
Vol. 22 No. 1, 2025
DOI: 10.61186/jiaeee.22.1.3

Design and Simulation of 1×4 Phononic Crystals Based Acoustic Demultiplexers with Square and Triangular Lattices

Maryam Imani[1] , Kiazand Fasihi[2]

[1] Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran
m.imani98@stu.gu.ac.ir
[2] Associate Professor, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran
k.fasihi@gu.ac.ir

Abstract:

Phononic crystals are made with periodic distributions of components embedded in a matrix with high contrast in mechanical properties. Destructive interference of several scattered waves leads to the appearance of the most prominent characteristic of phononic crystals, namely the phononic band gap. Using these crystals and creating defects in its periodicity, these crystals can be used in various applications such as filters, lenses, waveguides, demultiplexers, sensors, etc. In this study, we present two 2D phononic crystals with square and triangular lattices of water cylinders in mercury. To simulate the proposed devices, plane wave expansion method and finite element method in Comsol multiphysics software are used. The resonant frequencies of the proposed 1×4 demultiplexer with square lattice are 66.09, 68.23, 70.27 and 72.49 KHz. In this structure the mean of quality factors is 3042, the minimum crosstalk is -42 dB, and the dimensions of the structure is 218×118. The resonant frequencies of the second proposed 1×4 demultiplexer with triangular lattice are 75.69, 74.98, 74.26 and 73.57 KHz. In this structure the mean quality factor is 6326, the minimum crosstalk is -34 dB, and the dimensions of the structure is 103×297. Both proposed structures are superior in terms of dimensions, ease of construction and performance parameters.

Keywords: **Acoustic demultiplexer, Phononic crystal, Square and triangular lattices, Crosstalk, Quality factor.**

Article Type: Research

Received: 18. 11. 2023

Revised: 17. 09. 2024

Accepted: 30. 11. 2024

Corresponding author: K.Fasihi

Corresponding author's address: Faculty of Engineering, Golestan University. Gorgan, Iran

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-15]

[DOI: 10.61186/jiaeee.22.1.1]

Copyright © 2025 The Authors. Published by Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

1. Motivation of the work

It is expected that phononic crystals will be used in applications such as wireless communication, sensors, audio signal processing and ultrasound imaging in the near future. The increase in the use of devices based on phononic crystals in recent years and the acceleration of research and experiments in this field is a proof of the importance of parts based on these structures. Due to the increasing spread of sound and mechanical waves in the daily life environment, the need to control these types of waves is becoming more important. In this work, two high performances four channel acoustic demultiplexers, one implemented in a triangular phononic crystal structure and the other implemented in square phononic crystal structure, are proposed and investigated numerically using finite element method.

2. Contributions

In this research, for the first time, using a triangular phononic crystal structure, a 1×4 acoustic demultiplexer design is presented and its performance is investigated in comparison with other researches. The use of this type of demultiplexer compared to the square lattice based structure leads to similar results.

3. Procedures

For the design of the proposed four-channel acoustic demultiplexers, a fluid-fluid phononic crystal consisting of water cylinders on a mercury bed has been used. By removing a row of cylinders of the triangular (or square) phononic crystal structure (as a linear defect), the phononic waveguides are created to guide the acoustic waves. By changing the filler material of the specified cylinders from water to ENE, and changing the radius of these cavities, four resonant cavities are implemented. Based on the simulation results, the acoustic band gaps of square and triangular lattices are 43 to 118 kHz, and 56 to 93 kHz, respectively. By applying a Gaussian acoustic pulse to the input of the structure, the value of the normalized transmission spectrum can be calculated in each of the output ports. The simulations show that in square lattice based demultiplexer four channels with frequencies of 66.09, 68.23, 70.27 and 72.49 KHz are separated and directed to the output ports. These values in triangular lattice based demultiplexer are 75.69, 74.98, 74.26 and 73.57 KHz. Simulation results (which is done by Comsol software) show the proposed devices have superior characteristics such as high transmittance in the output channels, very high quality factors and low amount of crosstalk.

4. Findings

In square lattice based 1×4 demultiplexer the mean of quality factors is 3042, the minimum crosstalk is -42 dB, and the dimensions of the structure is 218×118. The resonant frequencies of the second proposed 1×4 demultiplexer with triangular lattice are 75.69, 74.98, 74.26 and 73.57 KHz. In this structure the mean quality factor is 6326, the minimum crosstalk is -34 dB, and the dimensions of the structure is 103×297. Both proposed structures are superior in terms of dimensions, ease of construction and performance parameters.

5. Conclusion

In this study, two 1×4 acoustic demultiplexers were designed and simulated using two-dimensional liquid-liquid phononic crystals, one with a square lattice and the other with a triangular lattice. The results show that the use of a triangular lattice, like the square lattice, leads to good wave separation (acceptable crosstalk and high quality factors in the transmitted spectra). The proposed demultiplexer with a triangular lattice has an average transmission of 66%, an average quality factor of 6326, and a crosstalk of -34 dB (these values in the square lattice-based demultiplexer are 74%, 3042, and -42 dB, respectively). Considering the obtained performance characteristics, the proposed devices can be well used in applications such as implementing acoustic demultiplexers.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-15]

[DOI: 10.61186/jiaeee.22.1.1]

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال بیست و دوم، شماره اول، بهار ۱۴۰۴، صفحات ۳-۱۰

DOI: 10.61186/jiaeee.22.1.3

طراحی و شبیه‌سازی دی‌مالتی‌پلکسرهای صوتی ۴×۱ مبتنی بر کریستال‌های فونونی با شبکه‌های مربعی و مثلثی

مریم ایمانی[۱]، کیازند فصیحی[۲]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه گلستان- گرگان- ایران

m.imani98@stu.gu.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه گلستان- گرگان- ایران

k.fasihi@gu.ac.ir

چکیده: کریستال‌های فونونی با توزیع‌های دوره‌ای از مواد کامپوزیتی تعبیه شده در ماتریسی با تباین بالا در خواص مکانیکی، ساخته می‌شوند. در این ساختارها، تداخل مخرب امواج پراکنده منجر به ظهور برجسته‌ترین مشخصه کریستال‌های فونونی یعنی شکاف باند فونونی می‌شود. با استفاده از این مشخصه‌ی کریستال‌های فونونی و ایجاد نقص در ساختار متناوبشان، می‌توان از آن‌ها در کاربردهای گوناگونی مانند طراحی و ساخت فیلترها، لنزها، موج‌برها، دی‌مالتی‌پلکسرها، حسگرها و ... بهره برد. در این پژوهش طراحی و شبیه‌سازی دو دی‌مالتی‌پلکسر آکوستیکی مبتنی بر کریستال‌های فونونی دو بعدی، تشکیل شده از استوانه‌های آب در بستر جیوه، با شبکه مربعی و نیز مثلثی ارائه شده است. برای شبیه‌سازی‌ها از روش‌های بسط موج صفحه‌ای و نیز روش المان محدود در نرم‌افزار کامسول بهره گرفته شده است. فرکانس‌های تشدید دی‌مالتی‌پلکسر با شبکه‌ی مربعی پیشنهادی عبارت‌اند از چهار فرکانس ۶۶/۰۹، ۶۸/۲۳، ۷۰/۲۷، ۷۲/۴۹ کیلوهرتز. در این ساختار میانگین ضریب کیفیت، میزان کمینه هم‌شنوایی ۴۲- دسی‌بل و ابعاد ساختار ۲۱۸×۱۱۸ میلی‌مترمربع است. فرکانس‌های تشدید دی‌مالتی‌پلکسر با شبکه‌ی مثلثی پیشنهادی عبارت‌اند از چهار فرکانس ۷۵/۶۹، ۷۴/۹۸، ۷۴/۲۶، ۷۳/۵۷ کیلوهرتز. در این ساختار میانگین ضریب کیفیت ۶۳۲۶، میزان کمینه هم‌شنوایی ۳۴- دسی‌بل و ابعاد ساختار ۲۹۷×۱۰۳ میلی‌متر مربع است. این ساختارها از حیث ابعاد، سهولت طراحی و ساخت، قابلیت توسعه و نیز پارامترهای عملکردی نسبت به همتایان خود برتری دارند.

کلمات کلیدی: دی‌مالتی‌پلکسر صوتی، کریستال فونونی، شبکه های مربعی و مثلثی، هم‌شنوایی، ضریب کیفیت

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۷

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر کیازند فصیحی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشگاه گلستان، دانشکده فنی و مهندسی گرگان

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-15]

[DOI: 10.61186/jiaeee.22.1.1]

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. ۱۴۰۴ ©. ناشر این مقاله، انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران است.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.

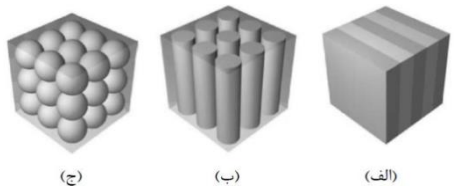
Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license

(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

۱- مقدمه

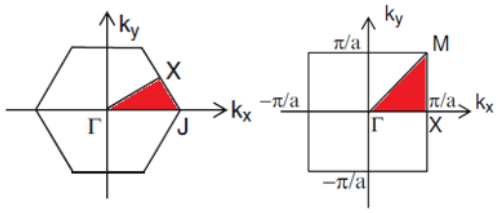
کریستال‌های فونونی[۱] مواد تناوبی مصنوعی برای کنترل و دست‌کاری انتشار امواج الاستیک یا صوتی هستند. به تعبیر دیگر ساختارهای دوره‌ای هستند که حداقل از دو ماده تشکیل‌شده‌اند؛ یک ماتریس میزبان به‌عنوان بستر و پراکنده‌کننده‌های دوره‌ای که بصورت مرتب در ماتریس قرارگرفته‌اند [۱]. ماهیت تناوبی در کریستال‌های فونونی خواص جدیدی به آن‌ها می‌دهد که در مواد حجمی دیگر یافت نمی‌شود به‌عنوان‌مثال این ساختارهای متناوب می‌توانند شکاف باندهای[۲] صوتی را ارائه دهند؛ گستره‌های فرکانسی که به ازای آن‌ها انتشار امواج صوتی در درون ساختار ممنوع است. با بهره‌گیری شکاف باند فرکانسی ایجاد شده، بسیاری از ادوات صوتی مبتنی بر کریستال‌های فونونی طراحی یا ساخته‌شده‌اند مانند: فیلترها[۳][۳،۲]، دی‌مالتی‌پلکسرها[۴][۴]، حسگرها[۵][۵]، منابع[۶][۶]، سوئیچ‌ها[۷][۷] و موج‌برها[۸][۸].

موقعیت و اندازه‌ی شکاف باند به عواملی همچون اختلاف خواص فیزیکی ماده تشکیل دهنده المان‌های تناوبی و بستر، کسر پرشدگی[۹] و آرایش کریستال بستگی دارد. اضافه کردن نقص‌ها[۱۰] به یک کریستال فونونی اجازه طراحی و پیاده‌سازی ادواتی مانند موج‌برها و کاواک‌های تشدید را می‌دهد، به این ترتیب انتشار امواج صوتی درون شکاف نواری کنترل شده و کارکردهای جدیدی در یک ساختار بسیار فشرده فراهم خواهد شد. افزایش استفاده از افزاره‌های مبتنی بر کریستال‌های فونونی در سال‌های اخیر و شتاب تحقیقات و آزمایش‌ها در این عرصه دلیل بر اهمیت قطعات مبتنی بر این ساختارها است. با توجه به گسترش روزافزون امواج صوتی و مکانیکی در محیط زندگی روزمره، نیاز برای مهار این نوع امواج بیشتر از پیش مورد اهمیت قرار می‌گیرد. تأثیر حتمی کریستال‌های فونونی در آینده‌ی نزدیک در کاربردهایی مانند مخابرات بی‌سیم، حس‌گر، پردازش سیگنال صوتی و تصویربرداری سونوگرافی مورد انتظار است. کریستال‌های فونونی از لحاظ ابعاد به سه دسته‌ی یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی به معنای تناوب در یک، دو و سه جهت تقسیم می‌شوند. منظور از تناوب در جهت‌های مختلف، خواص مکانیکی و پارامترهای ساختار ازجمله چگالی و سرعت صوت است که به‌صورت متناوب تغییر می‌کنند. شبیه‌سازی کریستال‌های سه‌بعدی قطعاً به دریافت نتایج بهتر و دقیق‌تری منجر می‌شود، اما ازآنجایی‌که کریستال‌های دوبعدی بسیاری از ویژگی‌های کریستال‌های سه‌بعدی را دارند[۲]، و از طرفی زمان کمتری برای شبیه‌سازی نیاز داشته و به منابع سخت افزاری کمتری نیز احتیاج دارد، به همین خاطر در این پژوهش از کریستال‌های دوبعدی استفاده خواهد شد. شکل ۱ تقسیم‌بندی کریستال فونونی از لحاظ ابعاد را نشان می‌دهد.



شکل (۱): دسته‌بندی کریستال فونونی ازلحاظ ابعاد الف) یک بعدی، ب) دو بعدی، ج) سه بعدی

همچنین با توجه به مواد تشکیل‌دهنده‌ی شبکه‌ی کریستال، کریستال‌های فونونی را می‌توان به سه دسته جامد_سیال[۱۱]، جامد_جامد[۱۲]، سیال_سیال[۱۳]، تقسیم کرد. ساختارهای متناوب از تکرار متناوب یک جز در فضا ایجاد می‌شوند که آن جز کوچک را سلول واحد می‌نامند. در ساختارهای متناوب برای به‌دست آوردن خواص کل سازه کافی است بخش کوچکی از ساختار بررسی شود و آن را به کل ساختار تعمیم داد. هر سلول واحد[۱۴] را می‌توان به چند بخش مساوی کوچک‌تر تقسیم کرد. به هرکدام از آن زیربخش‌ها که امکان کوچک‌سازی بیشتر آن وجود ندارد، ناحیه‌ی بریلیون تقلیل‌ناپذیر گفته می‌شود. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب ناحیه‌ی بریلیون تقلیل‌ناپذیر[۱۵] برای ساختار با شبکه‌ی مربعی و مثلثی را نشان می‌دهند.



(ب) (الف)

شکل(۲): ناحیه‌ی بریلیون تقلیل‌ناپذیر الف) شبکه مربعی ب) شبکه مثلثی

اولین مطالعه عددی کریستال‌های فونونی در سال ۱۹۹۳ توسط سیگالاس انجام شد که با استفاده از روش بسط موج صفحه‌ای رابطه‌ی پاشیدگی برای ساختاری متشکل از کره‌هایی در بستر یک ماده همگن، شکاف باند فونونی مشاهده و اندازه‌گیری شد [۹]. مطاعی و بهرامی [۱۰] در سال ۲۰۱۶ یک دی‌مالتی‌پلکسر ۸ کاناله مبتنی بر کریستال فونونی با شبکه مربعی متشکل از استوانه‌های آب در بستر تنگستن، با کسر پرشدگی ۰/۴۶ طراحی و شبیه‌سازی کردند. نقص اعمالی در ساختار تغییر شعاع ۰/۰۱ میلی‌متری و جایگزینی آب با متیل نانوفلوروبیوتیل‌اتر[۱۶] (MNE) در استوانه‌های مسیر خروجی بود. رستمی دوگلسرا و همکاران [۱۱] نیز یک دی‌مالتی‌پلکسر صوتی قابل‌تنظیم با دو کانال خروجی طراحی کردند. این ساختار دارای شبکه‌ی مربعی، متشکل از استوانه‌های آب در بستر جیوه، و با کسر پرشدگی ۰/۳۰ بود.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-15]

[DOI: 10.61186/jiaeee.22.1.1]

نقص‌های نقطه‌ای از تغییر جنس یکی از استوانه‌ها در مسیر خروجی از آب به MNE و اتیل‌نانوفلوروبیوتیل‌اتر[۱۷] (ENE) حاصل شده بود. دوگلسرا و همکاران [۱۲] در تکمیل کار قبلی خود، یک دی‌مالتی‌پلکسر صوتی کریستال فونونی با ساختاری چنگال شکل با ۴ پورت خروجی ارائه دادند. ساختار پیشنهادی آن‌ها از یک شبکه مربعی از استوانه‌های پر شده با آب در بستر جیوه تشکیل شده بود. در طرح قبلی این گروه، هدف سوئیچ کردن فرکانس دو کانال خروجی صرفاً با تنظیم دمای ماده پرکننده حفره‌ها بود، درحالی‌که هدف از طرح جدید در نظر گرفتن یک سیگنال صوتی پهن باند و دی‌مالتی‌پلکس کردن آن به چهار کانال باند باریک با ضرایب کیفیت بالا (در دمای ثابت) بود. نقص‌های اعمالی به چهار کانال خروجی مشتمل بر تغییر جنس استوانه‌های تشکیل‌دهنده کاواک‌های کانال‌های خروجی از آب به MNE و تغییر در اندازه‌ی شعاع‌های این استوانه‌ها بود. فانگ و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۲۳ یک حسگر کریستال فونونی با سختار دو بعدی، با ضریب کیفیت بالا و حساسیت عالی برای تشخیص غلظت استون ارائه دادند. میانگین مقدار ضریب کیفیت این ساختار برای غلظت¬های ده تا صد درصد برابر ۳۰۶۹۰ است. ماده‌ی بستر جیوه و پراکنده کننده‌ها از جنس آب هستند. شکاف باند این ساختار در محدوده‌ی ۱۹ تا ۲۲ کیلوهرتز است و نقص ایجادشده در ساختار موجب پدید آمدن مد نقصی در فرکانس ۲۴۵۶۰ هرتز شده است. ایمانی و فصیحی [۱۴] با بهره‌گیری از کاواک‌های رینگ رزوناتوری که مستقیما در مسیر کانال‌های خروجی قرار می‌گیرند، دی‌مالتی-پلکسری ۱×۳ در یک بستر بلور فوتونی شش ضلعی ارائه نمودند که می‌تواند سه کانال باند باریک را به خروجی‌ها هدایت نماید. طرح پیشنهادی آن‌ها با برخورداری از ویژگی‌هایی همچون عبوردهی بیشتر از ۰/۷، میانگین ضریب کیفیت حدوداً برابر با ۳۳۳۰۰ و مقدار هم‌شنوایی بسیار ناچیز بین کانال‌ها (که در بدترین حالت ۴۵- دسی‌بل است)، از عملکردی مناسب برای تحقق یک دی مالتی پلکسر ۱×۳ برخوردار است.

۲- طراحی و شبیه سازی

برای طراحی دی‌مالتی‌پلکسرهای ۴×۱ پیشنهادی از کریستال فونونی سیال- سیال متشکل از استوانه‌های آب در بستر جیوه استفاده شده است. در طرح‌های پیشنهادی اول و دوم به ترتیب از کریستال فونونی با ساختار شبکه مربعی و مثلثی استفاده شده است. در هر دو طرح فاصله‌ی بین اجزا یا همان ثابت شبکه ۹/۰۰۰ میلی‌متر و مقدار شعاع برای هریک از استوانه‌ها ۲/۷۸۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده برای بدست آوردن ویژگی‌های عملکردی ادوات صوتی پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار کامسول[۱۸] انجام شده است. از روش بسط موج صفحه‌ای[۱۹] برای به دست آوردن منحنی‌های پراکندگی ساختارهای متناوب نامحدود استفاده شده است. برای بررسی رفتار مکانی-زمانی امواج مکانیکی و طیف انتقال در ساختارهای مبتنی بر کریستال‌های فونونی از روش محاسباتی المان محدود[۲۰] بهره گرفته شده، که یکی از ابزارهای محاسباتی قوی برای بررسی رفتار مکانی-زمانی موج‌های الاستیک است. در ادامه دو طرح پیشنهادی مبتنی بر شبکه‌های فونونیکی مربعی و مثلثی ارائه و به‌تفصیل همراه با نتایج شبیه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۱- طرح اول: دی مالتی پلکسر صوتی ۴×۱ با ساختار مربعی

در طرح نخست، ساختار شبکه‌ی کریستال مورد استفاده مربعی بوده و مقدار کسر پرشدگی آن طبق رابطه‌ی زیر ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

$$FF=\frac{\pi\times r^2}{a^2} \quad (1)$$

در این ساختار یک موج‌بر افقی انتها باز به‌عنوان موج‌بر ورودی و چهار موج‌بر عمودی دیگر به‌عنوان مسیرهای خروجی در نظر گرفته شده است. به‌منظور ایجاد تزویج‌های تشدیدی بین موج‌بر ورودی و خروجی‌ها از نقص نقطه‌ای استفاده شده است که این نوع نقص‌ها با تغییر ماده‌ی درون یکی از استوانه‌های مسیر خروجی (استوانه بنفش رنگ) از آب به چهار ماده‌ی دیگر ایجاد شده‌اند. مشخصات فیزیکی مواد استفاده شده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات فیزیکی مواد استفاده شده در طراحی دی‌مالتی‌پلکسر پیشنهادی با شبکه مربعی

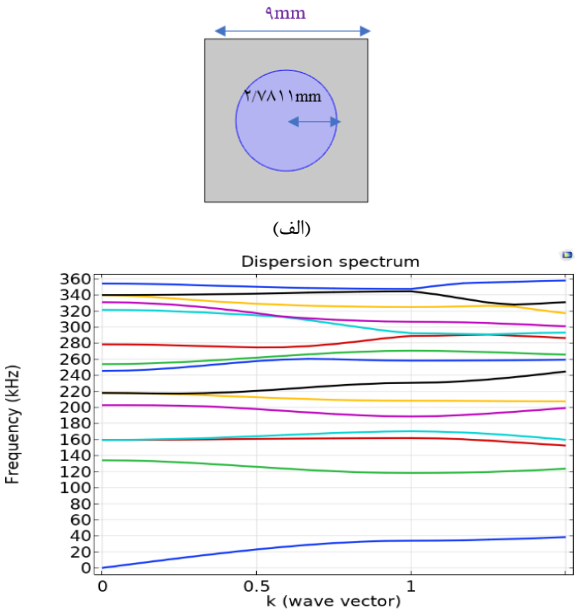
	آب	جیوه	ENE	MNE	Mat1	Mat2
چگالی $(\frac{kg}{m^3})$	۹۹۶	۱۳۵۳۳	۱۴۲۱	۱۵۱۵	۱۴۸۳	۱۴۵۲
سرعت صوت $(\frac{m}{s})$	۱۴۹۶	۱۴۴۹	۶۶۲/۶	۶۰۰/۲	۶۲۱	۶۴۱

در جدول فوق دو ماده‌ی Mat1 و Mat2 به‌صورت فرضی و با خواص فیزیکی بین MNE و ENE انتخاب شده‌اند. برای محاسبه شکاف باند فونونیکی، سلول واحد ساختار به صورتی که در شکل ۳ (الف) نشان داده شده، انتخاب می‌شود. بر اساس پارامترهای ارائه شده، منحنی پاشیدگی این ساختار محاسبه و در شکل ۳ (ب) نشان داده شده است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-15]

[DOI: 10.61186/jiaeee.22.1.1]

طبق شکل فوق، محدوده شکاف باند فونونیکی بازه‌ی فرکانسی ۴۳ تا ۱۱۸ کیلوهرتز را شامل می‌شود. در ادامه برای یافتن مد نقص خطی (مود موج‌بری) درون ساختار یک سوپرسل ۵×۱ بررسی و منحنی‌های پاشیدگی ساختار محاسبه می‌شود. برای مشاهده شکاف باند فونونیکی و مد نقص خطی (موجبر) ایجاد شده در درون شکاف باند بایستی کل ساختار شبیه‌سازی شود، اما برای سادگی و صرف زمان شبیه‌سازی کمتر بهتر است از تعریف سوپرسل استفاده شود. با تکرار دوره‌ای سوپرسل ساختار نهایی تشکیل می‌شود و ازاین‌رو نتایج حاصله از بررسی سوپرسل را می‌توان به کل ساختار تعمیم داد؛ این یکی از ویژگی‌های بسیار مهم ساختارهای متناوب است.



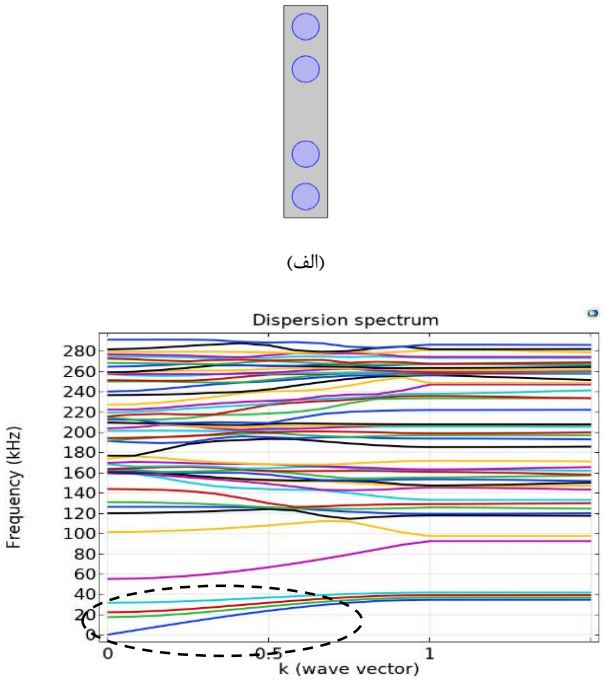
(الف)

(ب)

شکل(۳): (الف) سلول واحد (ب) منحنی پاشیدگی برای دی‌مالتی‌پلکسر ۴×۱ با شبکه مربعی

از میان مدهای نقص خطی ایجاد شده در داخل شکاف باند فونونی، مد نقص خطی مشخص شده با بیضی خط چین، با بازه‌ی تعریف فرکانسی ۵۶ تا ۹۳ کیلوهرتز، دارای شیب خطی مناسبی بوده و برای طراحی دی‌مالتی‌پلکسر صوتی پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۵ دی‌مالتی‌پلکسر ۴×۱ پیشنهادی طرح اول با ابعاد ۱۱۸×۲۱۸ میلی‌متر مربع نشان داده شده است. استوانه‌ی مرکزی خروجی اول با MNE، خروجی دوم با Mat1، خروجی سوم با Mat2 و خروجی چهارم با ENE پر شده است.

قابل ذکر است که در طرح پیشنهادی شعاع هیچ یک از استوانه‌های ساختار دچار تغییر نشده و به عبارتی شعاع همه‌ی آن‌ها همان r است. به هنگام شبیه‌سازی، به‌منظور جلوگیری از انعکاس امواج به درون ساختار و و ایجاد واگرایی و همچنین حصول نتایج دقیق‌تر، در اطراف کریستال نواحی جاذب موج (لایه کاملا تطبیق شده) با عنوان PML[۲۱] در نظر گرفته می‌شود. در ساختار مورد بررسی عرض این ناحیه ۱/۵ برابر ثابت شبکه، لحاظ شده است.



(الف)

(ب)

شکل(۴): (الف) سوپرسل ۵×۱ (ب) منحنی‌های پاشیدگی و منحنی مد نقص خطی حاصل از محاسبه باندها در سوپرسل ۵×۱ معرفی شده

با اعمال پالس موجی در گستره فرکانسی ۶۶ تا ۷۳ کیلوهرتز به ورودی S_1 می‌توان شاهد ایجاد منحنی‌های طیفی عبور میان‌گذر نظیر هرکدام از کاواک‌های تعبیه شده در مسیرهای خروجی بود. شکل ۶ میزان عبوردهی موج از چهار مسیر خروجی را نشان می‌دهد.

شکل (۶) نشان‌دهنده‌ی تفکیک بسیار خوب در چهار کانال خروجی است. بر این اساس مقدارهای دقیق فرکانس‌های تشدید کاواک‌ها و ضریب کیفیت آنها محاسبه شده و نتایج در جدول ۲ گردآوری شده است.

لازم به ذکر است ضریب کیفیت طبق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

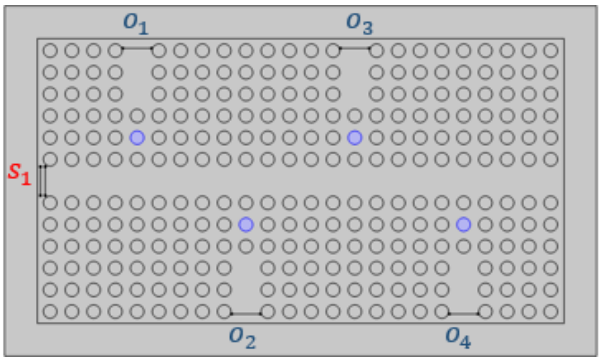
$$Q = \frac{f_0}{FWHM} \qquad (۲)$$

در رابطه‌ی فوق f_0 مقدار فرکانس مرکزی هر پیک تشدید است و FWHM[۲۲] پهنای فرکانسی است که در آن مقدار انتقال بیشتر از نصف مقدار ماکزیمم است. در آخر با محاسبه طیف‌های عبوری بر حسب واحد دسی‌بل، و محاسبه مقادیر آن در فرکانس‌های تشدید، مقدار هم‌شنوایی

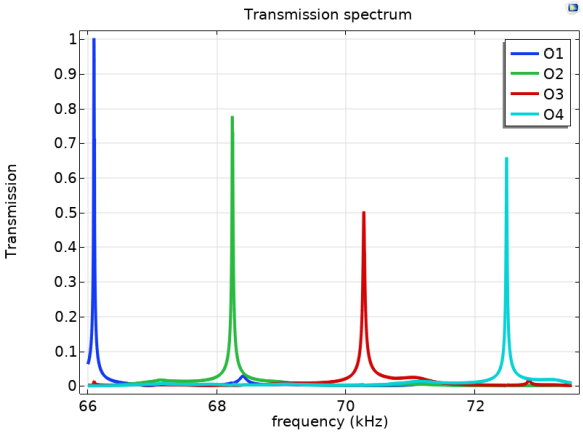
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-15]

[DOI: 10.61186/jiaeee.22.1.1]

بین کانال‌های خروجی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در شکل ۷ منحنی-های مورد اشاره برای محاسبه هم‌شنوایی بین کانال‌های خروجی نشان داده شده است.



شکل(۵): ساختار دی‌مالتی‌پلکسر ۴×۱ با شبکه مربعی. شعاع همه‌ی استوانه‌ها برابر با r بوده و ماده‌ی پر شده در استوانه‌های با رنگ متفاوت در خروجی های O_1 تا O_4 به ترتیب عبارتند از MNE، Mat2، Mat1 و ENE

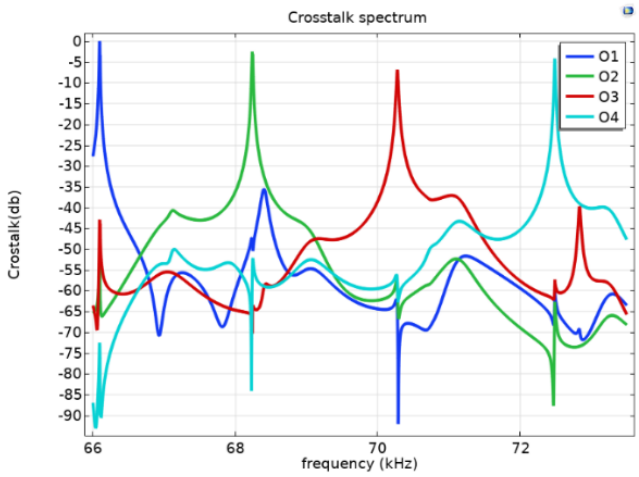


شکل(۶): منحنی طیف انتقال نرمالیزه شده دی‌مالتی‌پلکسر ۴×۱ با شبکه مربعی

جدول (۲): فرکانس مرکزی و ضریب کیفیت دی‌مالتی‌پلکسر ۴×۱ با شبکه مربعی

	O_1	O_2	O_3	O_4
f_0 (kHz)	۶۶/۰۹۳	۶۸/۲۳۸	۷۰/۲۷۹	۷۲/۴۹۲
FWHM	۱۸	۱۹	۳۵	۲۵
Q	۳۶۷۲	۳۵۹۲	۲۰۰۸	۲۸۹۸

با بررسی نتایج می‌توان نتیجه گرفت که دی‌مالتی‌پلکسر طراحی شده با برخورداری از میانگین عبوردهی۷۴٪، مقدار میانگین ضریب کیفیت در حدود ۳۰۴۲ و همچنین بدترین مقدار هم‌شنوایی بین کانال‌ها ۴۲- دسی‌بل، قادر به تفکیک مناسب چهار کانال طول‌موجی است.



شکل(۷): منحنی هم‌شنوایی بین کانال‌های خروجی دی‌مالتی‌پلکسر ۴×۱ با شبکه مربعی

بر این اساس مقادیر هم‌شنوایی بین کانال‌های خروجی برحسب دسی‌بل محاسبه و جهت مقایسه در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول (۳): مقادیر هم‌شنوایی بین کانال‌های خروجی (بر حسب دسی‌بل) در دی‌مالتی‌پلکسر ۴×۱ با شبکه مربعی

	O_1	O_2	O_3	O_4
O_1	-	-۵۲dB	-۴۲dB	-۷۲dB
O_2	-۴۲dB	-	-۶۰dB	-۵۰dB
O_3	-۶۲dB	-۵۷dB	-	-۵۵dB
O_4	-۶۰dB	-۶۳dB	-۵۷dB	-

۲-۲- طرح دوم: دی مالتی پلکسر صوتی ۴×۱ با شبکه مثلثی

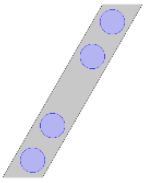
در پژوهش دوم یک دی‌مالتی‌پلکسر ۴×۱ با استفاده از ایجاد نقص در یک کریستال فونونی دوبعدی با شبکه‌ی مثلثی طراحی و شبیه‌سازی شده است. استفاده از ساختار مثلثی نسبت به ساختار مربعی منجر به تفکیک فرکانسی بهتری خواهد شد و دی‌مالتی‌پلکسر حاصل از مزایای بیشتری نسبت به طرح اول برخوردار است. قابل ذکر است که تاکنون ساختارهایی فونونیکی با شبکه مثلثی کمتر مورد پژوهش قرار گرفته و ادوات صوتی بسیار کمی بر اساس آن‌ها ارائه شده است. در اینجا نیز به مانند طرح اول فاصله‌ی بین استوانه‌ها (ثابت شبکه) و شعاع استوانه‌ها به ترتیب ۹/۰۰۰ و ۲/۷۸۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده، و مقدار کسر پرشدگی آن طبق رابطه‌ی ۳، برابر ۰/۳۴ خواهد بود.

$$FF=\frac{\pi\times r^2}{\frac{\sqrt{3}}{2}\times a^2} \qquad (۳)$$

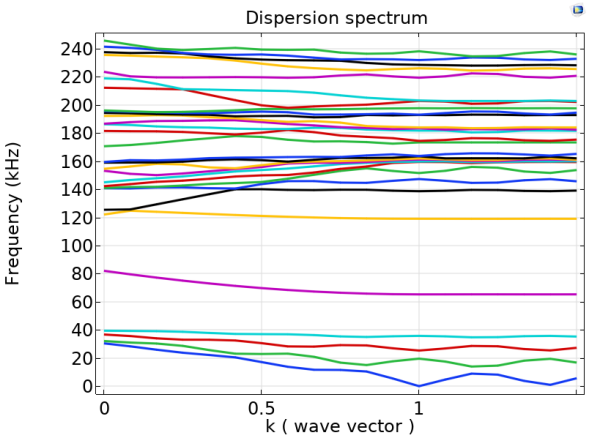
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-15]

[DOI: 10.61186/jiaeee.22.1.1]

شکل ۸ سوپرسل انتخابی و منحنی‌های پاشیدگی که معرف محدوده‌ی شکاف باند و منحنی مد نقص است را نشان می‌دهد.



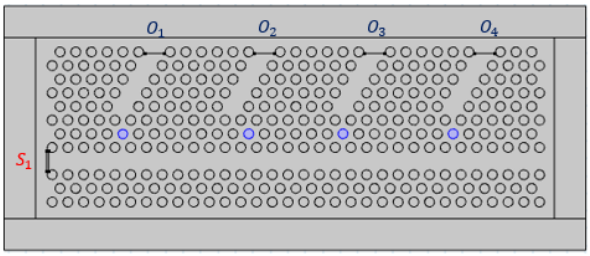
(الف)



(ب)

شکل(۸): (الف) سوپرسل ۵×۱ استفاده شده (ب) منحنی طیف پاشیدگی و مد نقص خطی به ازای سوپرسل معرفی شده

طبق شکل فوق محدوده‌ی شکاف باند آکوستیکی ایجاد شده در ساختار، محدوده‌ی ۴۰ تا ۱۲۰ کیلوهرتز بوده و مد نقص خطی ایجاد شده بازه‌ی فرکانسی ۶۵ تا ۸۰ کیلوهرتز را شامل می‌شود. ساختار پیشنهادی شامل یک ورودی و ۴ خروجی بوده و متشکل از ۱۲ ردیف ۳۴ تایی از استوانه-های پر شده با آب در بستر جیوه در شبکه‌ای مثلثی است. برای طراحی از دو نوع نقص خطی و نقطه‌ای بهره گیری شده به‌طوری‌که با حذف ردیف‌هایی از استوانه‌ها یک موجبر ورودی و چهار موجبر خروجی ایجاد شده و با تغییر جنس ماده‌ی استوانه‌های بنفش رنگ و نیز تغییر شعاع آن‌ها، یک دی‌مالتی‌پلکسر با مشخصات عملکردی بالا طراحی شده است. شکل ۹ ساختار کلی دی‌مالتی‌پلکسر ۴×۱ پیشنهادی با شبکه‌ی مثلثی به همراه منبع ورودی S_1 و چهار خروجی را نشان می‌دهد که در آن شعاع استوانه‌های بنفش رنگ واقع در مسیرهای خروجی اول تا چهارم به ترتیب مقادیر ۰/۹۶r، ۰/۹۷r، ۰/۹۸r و ۰/۹۹r انتخاب شده است.



شکل(۹): ساختار دی‌مالتی‌پلکسر ۴×۱ پیشنهادی با شبکه مثلثی. استوانه‌های رنگی در مسیرهای خروجی یک تا چهار با ماده ENE پر شده و شعاع آنها به ترتیب عبارتند از: ۰/۹۶r، ۰/۹۷r، ۰/۹۸r و ۰/۹۹r

در این طرح عرض نواحی PML به‌اندازه‌ی ۲ برابر ثابت شبکه در نظر گرفته شده است و ابعاد کل ساختار ۱۰۳×۲۹۷ میلی‌متر مربع است. مشخصات فیزیکی مواد استفاده شده در این دی‌مالتی‌پلکسر از جدول ۱ قابل استخراج است.

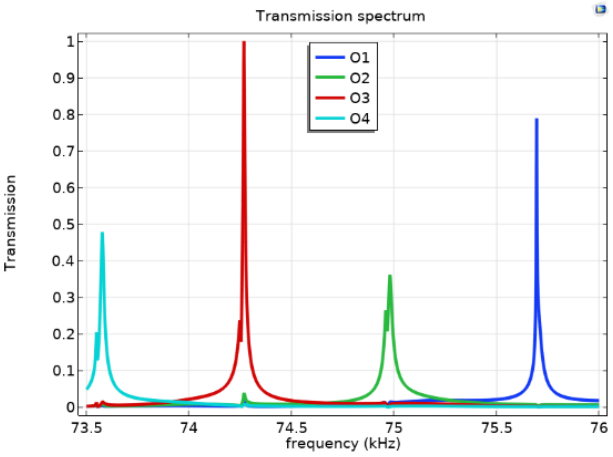
با اعمال یک پالس موجی به ورودی ساختار، و نیز گذاشتن مانیتورهایی در دهانه‌های خروجی کانال‌ها می‌توان منحنی‌های طیفی میان‌گذر نظیر هرکدام از ۴ کانال خروجی را محاسبه نمود. در شکل ۱۰ منحنی‌های طیف انتقال ساختار نشان داده شده است. نقص نقطه‌ای اعمال شده در مسیر کانال خروجی اول، استوانه‌ای است که با ENE پر شده است و شعاعی برابر ۰/۹۶r دارد. وجود این نقص نقطه‌ای باعث می‌شود تا امواج با فرکانس ۷۵/۶۹۶ کیلوهرتز دارند از آن عبور و به سمت کانال خروجی نظیر هدایت شوند. به همین ترتیب با افزایش مقدار شعاع استوانه‌های نقص، همان‌طور که در شکل ۱۰ نیز مشخص است، فرکانس مرکزی کانال‌های خروجی کاهش خواهد یافت (در واقع می‌توان دید که مقدار شعاع و مقدار فرکانس تشدید نظیر نقص‌های نقطه‌ای با یکدیگر رابطه‌ی عکس دارند). فرکانس‌های مرکزی و ضرایب کیفیت نظیر کاواک‌های مرتبط با هر کدام از کانال‌های خروجی محاسبه شده و در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول (۴): فرکانس مرکزی و ضریب کیفیت کاواک‌های موجود در مسیرهای خروجی دی‌مالتی‌پلکسر ۴×۱ با شبکه مثلثی

	O_1	O_2	O_3	O_4
f_0 (kHz)	۷۵/۶۹۶	۷۴/۹۸۰	۷۴/۲۶۸	۷۳/۵۷۷
FWHM	۶	۲۵	۱۲	۲۱
Q	۱۲۶۱۶	۲۹۹۸	۶۱۹۰	۳۵۰۴

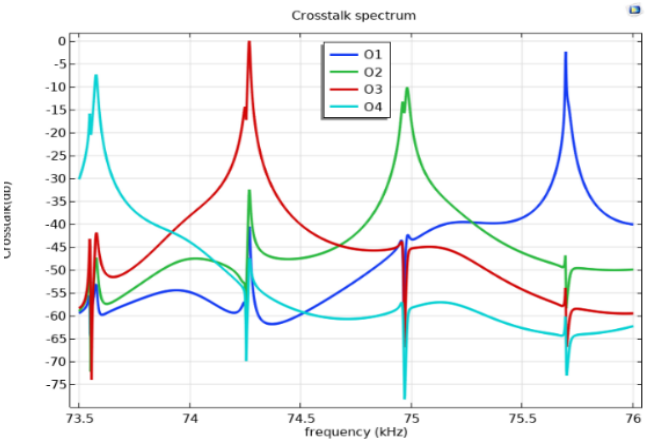
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-15]

[DOI: 10.61186/jiaeee.22.1.1]



شکل (۱۰): منحنی طیف انتقال نرمالیزه شده دی‌مالتی‌پلکسر ۴×۱ با شبکه مثلثی

در ادامه شبیه‌سازی‌های طرح دوم، منحنی‌ها و مقادیر مربوط به هم‌شنوایی بین کانال‌های خروجی به ترتیب در شکل ۱۱ و جدول ۵ نشان داده شده است.



شکل (۱۱): منحنی‌های هم‌شنوایی دی‌مالتی‌پلکسر ۴×۱ پیشنهادی با شبکه‌ی مثلثی

جدول (۵): مقدار هم‌شنوایی بین کانال‌های خروجی در دی‌مالتی‌پلکسر ۱×۴ پیشنهادی با شبکه‌ی مثلثی

	O_1	O_2	O_3	O_4
O_1	-	-۴۵dB	-۵۴dB	-۶۰dB
O_2	-۴۲dB	-	-۴۸dB	-۶۰dB
O_3	-۴۰dB	-۳۴dB	-	-۴۷dB
O_4	-۴۷dB	-۴۷dB	-۴۲dB	-

براساس نتایج شبیه‌سازی، میانگین میزان عبوردهی در این دی‌مالتی-پلکسر حدود ۶۶٪ بوده و میانگین ضریب کیفیت کاواک‌های تعبیه شده در کانال‌های خروجی ۶۳۲۷ است. همچنین بدترین میزان هم‌شنوایی بین کانال‌ها ۳۴- دسی‌بل است که مقدار ناچیزی است و نشان از کیفیت عملکردی بالای این ساختار دارد.

۳- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی دی‌مالتی-پلکسر پیشنهادی با پژوهش‌های گذشته

در این بخش ویژگی‌های ساختاری و عملکردی پنج پژوهش انجام شده در گذشته با طرح‌های پیشنهادی، مورد مقایسه قرار می‌گیرند. در جدول ۶ این مهم نشان داده شده است.

جدول (۶): مقایسه ویژگی‌های عملکردی دی‌مالتی‌پلکسرهای ارائه شده در پژوهش‌های گذشته و طرح‌های پیشنهادی

	[۱۰]	[۱۱]	[۱۲]	[۱۳]	[۱۴]	طرح پیشنهادی ۱	طرح پیشنهادی ۲
میانگین ضریب کیفیت	-	۲۶۹۰	۳۵۴۵	۳۰۶۹۰	۳۳۳۰۰	۳۰۴۲	۶۳۲۶
کمینه هم‌شنوایی (dB)	-۲۶	-	-۳۲	-۴۵	-	-۴۲	-۳۴
میانگین عبور دهی	۲۰٪	۹۰٪	۷۰٪	۷۰٪	۶۰٪	۷۴٪	۶۶٪
ابعاد (mm^2)	۱۱۷ × ۴۵۵	۱۵۰ × ۱۵۵	۱۶۰ × ۲۲۰	×۲۴۳ ۱۸۰	-	×۲۱۸ ۱۱۸	×۱۰۳ ۲۹۷
نوع ساختار	چهار ضلعی	چهار ضلعی	چهار ضلعی	چهار ضلعی	شش ضلعی	چهار ضلعی	شش ضلعی

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از کریستال‌های فونونی دوبعدی سیال _سیال دو دی‌مالتی‌پلکسر صوتی ۴×۱ یکی با شبکه مربعی و دیگری با شبکه مثلثی، طراحی و شبیه‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهد که بهره‌گیری از ساختار مثلثی نیز به مانند شبکه مربعی منجر به تفکیک خوب امواج (همشنوایی مناسب و ضرایب کیفیت بالا در طیف‌های عبوری) می‌شود. دی‌مالتی‌پلکسر پیشنهادی با شبکه‌ی مثلثی دارای میانگین میزان عبوردهی ۶۶٪ و میانگین ضریب کیفیت ۶۳۲۶ برای کاواک‌های کانال‌های خروجی و همشنوایی ۳۴- دسی‌بل است. این مقادیر در دی‌مالتی‌پلکسر مبتنی بر شبکه مربعی به ترتیب عبارتند از ۷۴٪ ، ۳۰۴۲ و ۴۲- دسی‌بل است. با توجه به ویژگی‌های عملکردی به دست آمد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-15]

[DOI: 10.61186/jiaeee.22.1.1]

ه، ادوات پیشـــنهـادی بـه خوبی می‌تواننـد در کـاربردهـایی همچون پیاده‌سازی دی‌مالتی‌پلکسرهای صوتی به کار گرفته شوند.

مراجع

[1] F. Taleb, S. Darbari, & A. Khelif, (2021). Reconfigurable locally resonant surface acoustic demultiplexing behavior in ZnO-based phononic crystal. Journal of Applied Physics, 129(2).

[2] A. Khelif, B. Djafari-Rouhani, J. O. Vasseur, P. A. Deymier, P. Lambin, & L. Dobrzynski, (2002). Transmittivity through straight and stublike waveguides in a two-dimensional phononic crystal. Physical Review B, 65(17), 174308.

[3] A. Khelif, B. Djafari-Rouhani, J. O. Vasseur, & P. A. Deymier, (2003). Transmission and dispersion relations of perfect and defect-containing waveguide structures in phononic band gap materials. Physical Review B, 68(2), 024302.

[4] H. Gharibi, & A. Bahrami, (2020). Phononic crystals for sensing FAMEs with demultiplexed frequencies. Journal of Molecular Liquids, 305, 112841.

[5] P. Moradi, H. Gharibi, A. M. Fard, & A. Mehaney, (2021). Four-channel ultrasonic demultiplexer based on two-dimensional phononic crystal towards high efficient liquid sensor. Physica Scripta, 96(12), 125713.

[6] C. Qiu, Z. Liu, J. Shi, & C. T. Chan, (2005). Directional acoustic source based on the resonant cavity of two-dimensional phononic crystals. Applied Physics Letters, 86(22).

[7] A. Bahrami, M. Alinejad-Naini, & F. Motaei, (2021). A proposal for 1× 4 phononic switch/demultiplexer using composite lattices. Solid State Communications, 326, 114179.

[8] A. Shakeri, S. Darbari, & M. K. Moravvej-Farshi, (2019). Designing a tunable acoustic resonator based on defect modes, stimulated by selectively biased PZT rods in a 2D phononic crystal. Ultrasonics, 92, 8-12.

[9] M. M. Sigalas, (1992). Elastic and acoustic wave band structure. Journal of sound and vibration, 158(2), 377-382.

[10] F. Motaei, & A. Bahrami, (2020). Eight-channel acoustic demultiplexer based on solid-fluid phononic crystals with hollow cylinders. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 39, 100765.

[11] B. Rostami-Dogolsara, M. K. Moravvej-Farshi, & F. Nazari, (2016). Designing switchable phononic crystal-based acoustic demultiplexer. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 63(9), 1468-1473.

[12] B. Rostami-Dogolsara, M. K. Moravvej-Farshi, & F. Nazari, (2019). Designing phononic crystal based tunable four-channel acoustic demultiplexer. Journal of Molecular Liquids, 281, 100-107.

[13] T. Fang, X. Sun 1, X. Wen, Y. Li 1, X. Liu 1, T. Song, Y. Song, Z. Liu, "High-performance phononic crystal sensing structure for acetone solu tion concentration sensing," Scientific Reports, vol. 13, no. 1, p.7057, 2023.

[14] Imani M, Fasihi K. Design and simulation of 1×3 acoustic demultiplexer based on hexagonal phononic crystal ring resonators. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2024; 21 (3) :85-91

زیر نویس‌ها

[1] Phononic crystal
[2] Band gap
[3] Filters
[4] Demultiplexers
[5] Sensors
[6] Sources
[7] Switches
[8] Waveguides
[9] Fill fraction
[10] Defects
[11] Fluid-Liguid
[12] Fluid-Fluid
[13] Liquid-Liquid
[14] Unit cell
[15] Irreducible Berelion zone
[16] Methyl Nonafluorobutyl Ether (MNE)
[17] Ethyl Nonafluorobutyl Ether (ENE)
[18] Comsol software
[19] Plan Wave Expansion (PWE)
[20] Finite-Element Methode (FEM)
[21] Perfectly matched layer
[22] Full Width Half Maximum (FWHM)

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-15]

[DOI: 10.61186/jiaeee.22.1.1]