

پوشش نامرئی سازی با خاصیت خودجمع‌کنندگی بلورهای فونونی برای امواج آکوستیکی

۱- سیده مهدیه قرشی بیرامی ۲- علی بهرامی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، mahdiyehghoreshi@gmail.com

۲- دانشیار دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، bahrami@sut.ac.ir

چکیده

باتوجه به اهمیت موضوع نامرئی‌سازی در کاربردهای نظامی و مخابراتی دستیابی به آن به یکی از مسائل مورد توجه در سال‌های اخیر مبدل شده است. در این مقاله پوششی ارائه شده است که با قرار گرفتن آن پوشش در اطراف اجسام با شکل و اندازه‌های مختلف، مانع تشخیص آن‌ها توسط امواج آکوستیک می‌شود که در نامرئی‌سازی زیردریایی‌ها، آنتن‌ها و اجسام دیگر می‌تواند کاربرد داشته باشد. مفهوم خودجمع‌کنندگی و وجود شکاف باند در بلورهای فونونی به ما کمک کرده است تا با استفاده از آن‌ها مسیر موج را در جهتی تغییر دهیم که امواج به جسم برخورد نکرده و بازتابی به سمت آشکارساز نداشته باشد. همچنین در انتهای ساختار، امواج دوباره بازسازی می‌شوند تا اثر سایه ایجاد شده توسط جسم در حالت بدون پوشش از بین برود. برای اثبات عملکرد، نمودارهای بازتاب و انتقال برای ساختار در فرکانس ۳ کیلوهرتز که جز فرکانس صوت انسان است بدست آمده است.

کلمات کلیدی: نامرئی‌سازی- بلورهای فونونی- پوشش- امواج- خودجمع‌کنندگی

۱. مقدمه

پدیده نامرئی‌سازی رویای دیرینه انسان بوده که از نقطه نظر امنیتی دارای اهمیت است و فکر داشتن ارتش نامرئی در ذهن دولت مردان کشورها بوده است. مرئی و قابل تشخیص بودن اجسام ناشی از رسیدن امواج پراکنده شده از اجسام به آشکار سازها می‌باشد. اگر پوششی برای جسم طراحی شود که مانع رسیدن امواج پراکنده شده به آشکار ساز شود، تشخیص آن ممکن نخواهد بود. بنابراین پارامتری که در نامرئی‌سازی دارای اهمیت است پراکندگی سطح مقطع می‌باشد که با نسبت توان امواج پراکنده شده به توان امواج تابشی به دست می‌آید. عمل نامرئی‌سازی در ابتدا برای امواج الکترومغناطیسی بخصوص امواج مرئی انجام شده و سپس به امواج آکوستیکی، الاستیکی، حرارتی و ... بسط داده شده است. اولین روشی که برای نامرئی‌سازی معرفی شده بود، روش حذف پراکندگی است. در روش حذف پراکندگی با استفاده از تئوری Mie امواج پراکنده شده از سطح جسم بدست می‌آید، سپس با استفاده از پوشش‌هایی از جنس فراماده [۱، ۲] یا پلاسمون [۲، ۳] امواج مخالف این امواج پراکنده شده تولید می‌شود تا آن‌ها را خنثی کند اما از آنجایی که امواج پراکنده شده شدیداً وابسته به شکل، اندازه و جنس جسم هستند، مورد استقبال زیادی قرار نگرفتند و محققان به دنبال روش‌های دیگری از جمله استفاده از تکنیک تبدیل مختصات رفتند [۴-۶]. با درک تغییر ناپذیر بودن معادلات ماکسول برای امواج الکترومغناطیسی و معادلات امواج آکوستیکی در مایعات تحت تبدیل مختصات، محققان توانستند فضایی ایجاد کنند که امواج آن را دور بزنند و با جسمی که در آن فضا قرار دارد برخورد نداشته باشند. دستیابی به این چنین پوشش‌هایی نیازمند مواد با خواص خاصی می‌باشد که به طور طبیعی وجود ندارد لذا باید از فراماده برای تولید آن استفاده می‌کردند که اولین بار پندری و همکارانش در سال ۲۰۰۶ برای امواج میکروویو این پوشش را ارائه دادند [۷]. استفاده از فراماده به علت جنس فلز آن تلفات بالایی دارد و فقط برای فرکانس‌های محدود امکان دستیابی وجود دارد لذا بعداً با معرفی بلورهای فوتونی پارامترهای مورد نیاز تحت تبدیلات

را توسط بلورها بدست آوردند که تلفات پایینتری دارد و ساخت آن راحت‌تر است [۸، ۹]. نوع دیگر پوشش‌ها که با تبدیل مختصات کار می‌کند پوشش‌های فرشی هستند که بازتاب از سطح این پوشش‌ها به گونه‌ای انجام می‌شود که گویی از سطح صاف بازتاب شده و حضور جسم تشخیص داده نمی‌شود [۱۰-۱۲]. در پوشش‌هایی که با تبدیل مختصات به دست می‌آید عمده مشکلی که وجود دارد محدود بود ابعاد جسم و عدم دسترسی آسان به ویژگی‌های مورد نیاز می‌باشد. از دیگر روش‌های نامرئی‌سازی می‌توان به روش خط انتقال، پوشش‌های فعال، استفاده از بلور فوتونی برای امواج الکترومغناطیسی و بلور فوتونی برای امواج مکانیکی اشاره کرد.

در حوزه‌ی نور از بلورهای فوتونی برای طراحی پوشش‌های نامرئی‌سازی استفاده شده است [۱۳، ۱۴] اما از آنجایی که بلورهای فوتونی بعد از بلورهای فوتونی معرفی و کشف شده‌اند استفاده از آنها در پوشش‌های نامرئی‌سازی به ندرت دیده شده است. ما در این مقاله ساختاری را ارائه خواهیم داد که از دو ویژگی منحصر بفرد بلور فوتونی شامل اثر خودجمع‌کنندگی و وجود شکاف باند استفاده کرده و مسیر موج را به نحوی تغییر می‌دهیم که امواج به جسم برخوردی نداشته باشد و عملکرد این پوشش مستقل از جنس، شکل و اندازه جسم است. ساختار ارائه شده از یک بلور جامد-سیال با رادهایی از جنس استیل داخل بستر آب تشکیل شده است.

در ادامه مراحل طراحی ساختار را بیان کرده و نتایج آن را مورد بحث و بررسی قرار می‌دهیم. در نهایت جمع‌بندی از ساختار پیشنهاد شده را ارائه می‌دهیم.

۲. فرایند طراحی

بلورهای فوتونی ساختارهای متناوبی هستند که ویژگی‌های الاستیکی مواد در یک، دو یا سه بعد تغییر می‌کند. بلورهای فوتونی برای کنترل و هدایت امواج مکانیکی بکار می‌رود، همانند بلورهای فوتونی برای امواج الکترومغناطیسی [۱۵]. ویژگی‌های مهم بلورهای فوتونی مانند وجود شکاف باند، اثر خود جمع‌کنندگی و شکست منفی باعث شده تا در کاربردهای بسیاری از جمله موجبری، کاواک و پوشش‌های نامرئی‌سازی مورد استفاده قرار گیرد. معادله انتشار برای امواج در محیط‌های ناهمگن از جمله بلور فوتونی به صورت زیر است:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \nabla \cdot (\rho c_i^2 \nabla u_i) + \nabla \cdot (\rho c_i^2 \frac{\partial \vec{u}}{\partial x_i}) + \frac{\partial}{\partial x_i} [(\rho c_i^2 - 2\rho c_i^2) \nabla \cdot \vec{u}] \quad (1)$$

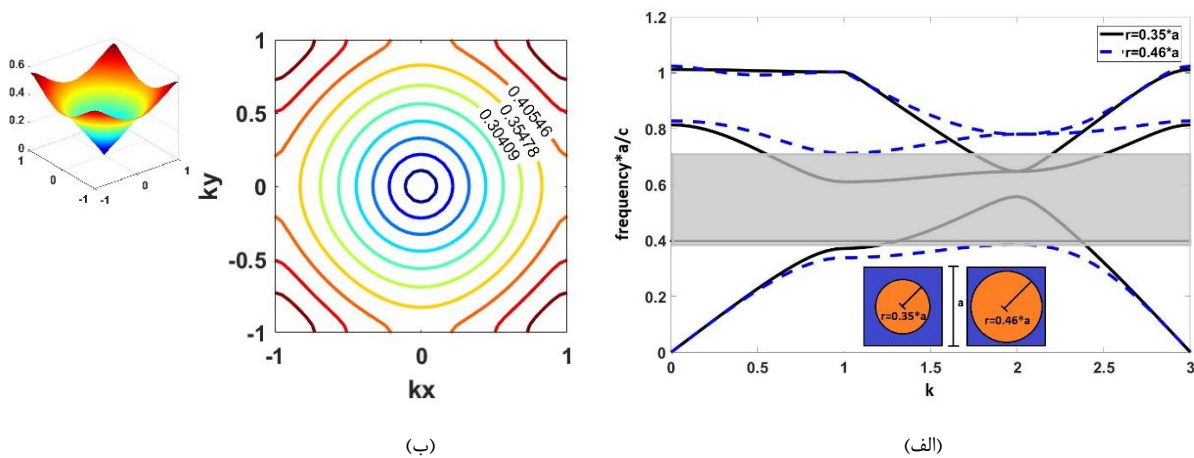
که در آن ρ ، u_i ، c_l و c_t به ترتیب چگالی جرم، بردار جابه‌جایی، سرعت عرضی و سرعت طولی مواد است و از آنجاییکه که محیط همگن نیست مقادیر این پارامترها در موقعیت‌های مکانی متفاوت، تغییر می‌کند. از طرف دیگر به علت متناوب بودن ساختار بلور فوتونی برای حل معادله ۱ از تئوری بلاخ استفاده می‌شود که با حل معادلات در ناحیه بیریلیون جواب کامل ساختار و ساختار باند بلور فوتونی بدست خواهد آمد.

اولین ویژگی که در این ساختار استفاده شده است اثر خود جمع‌کنندگی است که به معنای انتشار امواج در یک مسیر مستقیم و بدون پراکندگی و خم‌شدگی است. برای تشخیص اثر خود جمع‌کنندگی در بلورهای فوتونی از نمودارهای فرکانس عددی استفاده می‌شود و فرکانس‌هایی که نمودار آن‌ها شکل صاف و همواری دارند، دارای اثر خودجمع‌کنندگی هستند و موج با هر زاویه‌ای به ساختار بخورد با زاویه صفر و بدون پراکندگی از بلور عبور خواهد کرد. در واقع در محیط‌های ناهمگن انتشار امواج با جهت سرعت گروه کنترل می‌شود که همواره عمود بر نمودارهای فرکانس عددی می‌باشد و زمانی که این نمودار صاف باشد سرعت گروه برای زاویه‌های تابش متفاوت، در یک جهت خواهد بود. لازم به تذکر است که در برخی از نمودارها فقط بازه محدودی به شکل صاف است و موج در زاویه تابش محدودی دارای اثر خود جمع‌کنندگی می‌باشد. ما برای دستیابی به اثر خود جمع‌کنندگی سلول واحدی با شبکه مربعی از جنس آب و شعاع راد (۲) ۰٫۳۵ برابر ثابت شبکه (a) از جنس استیل، در نظر می‌گیریم که پارامترهای فیزیکی مورد نیاز برای مواد استفاده شده، در جدول ۱ آورده شده است. همچنین ساختار باند و نمودار فرکانس عددی متناظر با آن در شکل ۱ به نشان شده است.

چهارمین همایش ملی فناوری‌ها و نوین در مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک ایران

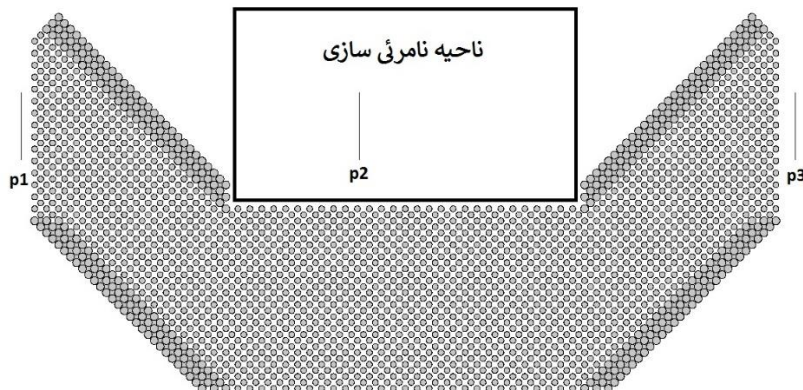
جدول ۱ پارامترهای فیزیکی آب و استیل

ماده	چگالی جرم (Kg/m^3)	ماژول یانگ (GPa)	نسبت پواسون	سرعت صوت (m/s)
آب	۱۰۰۰	-	-	۱۴۹۰
استیل	۷۶۷۰	۲۱۵	۰,۳۱	-



شکل ۱ (الف) ساختار باند بلور فونونی با شبکه مربعی به شعاع ۰,۳۵ برابر ثابت شبکه (ب) نمودار فرکانس عددی باند اول

شکل ۱ (الف) ساختار باند فرکانس نرمالیزه را برای بلور فونونی با $r=0.35*a$ و $r=0.46*a$ نشان می‌دهد که با تعیین مقادیر مختلف ثابت شبکه ساختار باند را در فرکانس‌های مختلف می‌توان به دست آورد. در شکل ۱ (ب) نمودار فرکانس عددی بلور با شعاع ۰,۳۵ برابر ثابت شبکه، نشان داده شده است که در فرکانس نرمالیزه ۰,۴ یک نمودار صاف ارائه داده است پس اثر خود جمع‌کنندگی در این فرکانس دیده خواهد شد. ما در کار خود برای اینکه فرکانس صوتی انسان را به عنوان منبع خارجی در نظر بگیریم، ثابت شبکه را مقدار ۲۰ سانتی‌متر انتخاب کردیم تا در فرکانس ۳ کیلو هرتز اثر خود جمع‌کنندگی ایجاد شود. با توجه به شکل ۱ (الف) و اطلاعاتی که در مورد بلورهای فونونی داریم، با افزایش شعاع در صورتی که ثابت شبکه مقدار ثابت داشته باشد، باند اول ساختار باند به سمت پایین کشیده شده و پهنای باند ممنوعه ایجاد شده در بلور، بزرگ‌تر می‌شود و یک سری از فرکانس‌ها که قبلاً جز باند عبور بودند دیگر اجازه انتشار در بلور را نخواهند داشت. مثلاً فرکانس نرمالیزه ۰,۴ که دارای اثر خود جمع‌کنندگی است با افزایش شعاع به ۰,۴۶ برابر ثابت شبکه، دیگر جز باند ممنوعه بلور شده و اجازه انتشار در مسیر مستقیم را ندارد. پس ما میتوانیم با افزایش شعاع رادها در مسیر حرکت، جهت امواج را تغییر دهیم. به عبارتی رادهای با شعاع بزرگ‌تر مانند یک آینه بازتابنده عمل کرده و می‌تواند در امواج خمش ۹۰ درجه ایجاد کند [۱۶]. شماتیک ساختار پیشنهادی برای پوشش نامرئی‌سازی در شکل ۲ آورده شده است.

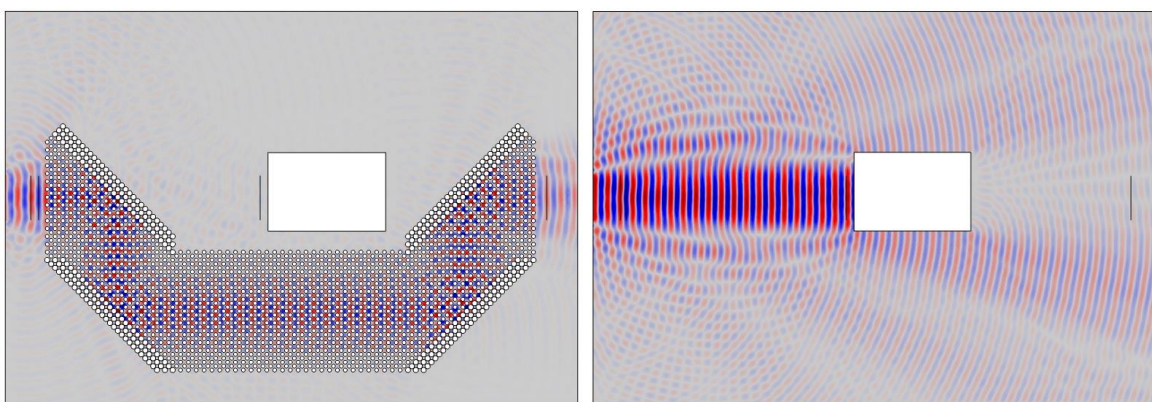


شکل ۲ شماتیک پوشش نامرئی سازی با بلور فونونی

همانطور که در شکل ۲ قابل مشاهده است در کل ساختار از رادهایی با شعاع 0.35 برابر ثابت شبکه استفاده شده که دارای خاصیت خودجمع‌کنندگی است و در قسمت‌هایی از ساختار در ردیف‌های سه‌تایی شعاع به 0.46 برابر ثابت شبکه افزایش یافته که به علت شکاف باند مانند آینه‌های بازتاب‌کننده برای امواج عمل می‌کند. امواج قبل از رسیدن به جسم به آینه‌های بازتابنده برخورد کرده و خمش 90° درجه پیدا می‌کنند در انتهای ساختار نیز دوباره با خمش 90° درجه به مسیر اصلی خود باز می‌گردند.

۳. نتایج و بحث

هدف از نامرئی‌سازی، کم کردن بازتاب به سمت آشکارساز و بازسازی موج در پشت ساختار است. به منظور مشاهده عملکرد پوشش ارائه شده، نحوه انتشار موج برای جسم با و بدون پوشش مانند شکل ۳ شبیه‌سازی شده است.



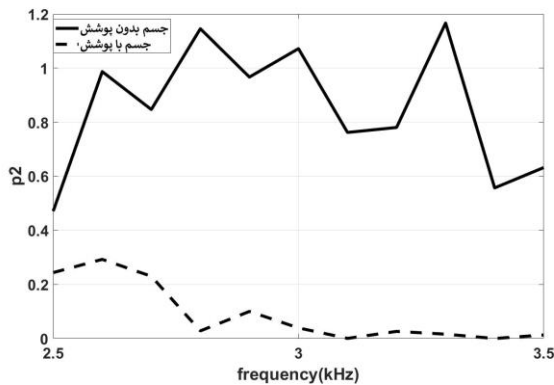
(ب)

(الف)

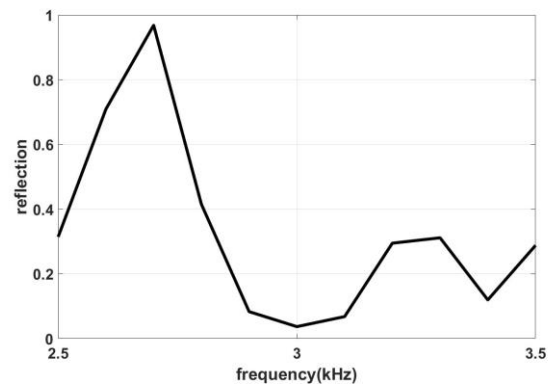
شکل ۳ (الف) انتشار موج برای جسم بدون پوشش (ب) انتشار موج برای جسم با پوشش فونونی ارائه شده

چهارمین همایش ملی فناوری‌ها و نوین در مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک ایران

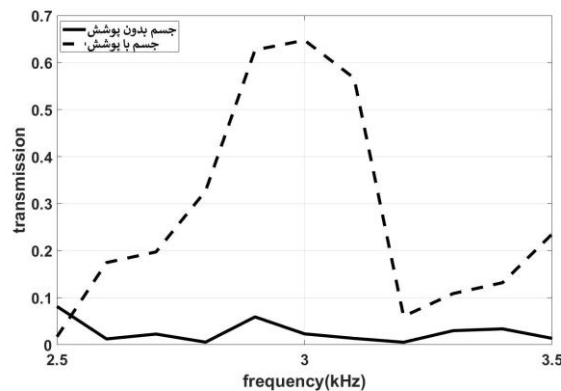
همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، وقتی امواج با فرکانس ۳ کیلوهرتز وارد ساختار می‌شوند چون دارای خاصیت خودجمع‌کنندگی هستند بدون پخش‌شدگی داخل بلور منتشر می‌شوند اما زمانی که امواج به نواحی از ساختار که در آن شعاع را افزایش داده‌ایم می‌رسند، چون فرکانس ۳ کیلوهرتز در آن بلور جز باند ممنوعه است باعث شکست ۹۰ درجه‌ای موج می‌شود. در ادامه کار، برای بدست آوردن بازتاب یک پروب اندازه‌گیری در پشت ساختار (P1) قرار می‌گیرد و همچنین یک پروب داخل ناحیه نامرئی‌سازی (P2) قرار می‌گیرد تا میزان موج رسیده شده به آن ناحیه را اندازه‌گیری کند. یک پروب نیز در انتهای ساختار (P3) قرار گرفته تا شدت موج بازسازی شده را اندازه‌گیری کند. محل این پروب‌ها در شکل ۲ قابل مشاهده است. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری این پروب‌ها در شکل ۴ آورده شده است.



(ب)



(الف)



(پ)

شکل ۴ (الف) نمودار بازتاب از ساختار نامرئی‌سازی (ب) امواج رسیده به پروب ۲ واقع در ناحیه نامرئی‌سازی برای جسم با و بدون پوشش (پ) دامنه موج رسیده به پروب ۳ واقع در پشت ساختار برای جسم با و بدون پوشش

با توجه به نمودار شکل ۴ (الف) بازتاب از ورودی ساختار در فرکانس ۳ کیلوهرتز که دارای اثر خودجمع‌کنندگی است مقادیر خیلی پایینی دارد که توسط آشکارسازها قابل تشخیص نخواهد بود. علاوه بر آن نمودار شکل ۴ (ب) که شدت موج رسیده به ناحیه نامرئی‌سازی را نشان می‌دهد نیز در مقایسه با شدت موجی که به جسم بدون پوشش می‌رسد مقدار خیلی پایینی دارد. نمودار شکل ۴ (پ) شدت موج رسیده شده به پشت ساختار را در حضور پوشش نشان می‌دهد که یک مقدار تقریبی ۰,۶۵ دارد که نسبت به ورودی نرمالیزه شده و در مقایسه با حالتی که جسم هیچ پوششی ندارد شدت افزایش یافته است که با معنای کاهش اثر سایه است.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله، با استفاده از دو ویژگی مهم بلورهای فونونی برای امواج آکوستیکی یک پوشش نامرئی سازی فونونی برای فرکانس ۳ کیلو هرتز که جز فرکانس صحبت انسان است، طراحی کرده‌ایم که عملکرد آن مستقل از شکل، اندازه و جنس جسم مورد نظر برای نامرئی سازی است. در ابتدا با استفاده از خاصیت خودجمع‌کنندگی مانع از پخش‌شدگی امواج شده سپس در مسیر این امواج خود جمع‌کننده نقص‌هایی در ساختار ایجاد کرده‌ایم که آن فرکانس جز شکاف باند بوده و مانع از ادامه مسیر مستقیم برای امواج شده بنابراین، امواج دچار شکست ۹۰ درجه‌ای شده و به جسم برخورد نمی‌کنند. برای اثبات عملکرد نامرئی سازی دامنه موج بازتاب شده، موج رسیده به جسم و موج رسیده به پشت جسم را برای جسم با و بدون پوشش نامرئی سازی به دست آوردیم که در حضور پوشش ارائه شده، بازتاب و موج رسیده به جسم کم شده که مانع تشخیص جسم می‌شود در عوض موج رسیده به پشت ساختار افزایش یافته و اثر سایه را از بین برده است.

منابع

- [1] Fan-Yi, M., Ying, L., Qun, W., and Le-Wei, L., 2009. Invisibility of a metamaterial cloak illuminated by spherical electromagnetic wave, *Applied Physics A*, 95, 881-888.
- [2] Andrea, A., Nader, E., 2005. Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings, *Physical Review E*, 72, 016623(23 pages).
- [3] Hailei W., Xiangdong, Z., 2009. Achieving multifrequency transparency with cylindrical plasmonic cloak, *Journal of Applied Physics*, 106, 053302(7 pages).
- [4] Ulf, L., 2006. Optical Conformal Mapping, *Science*, 312, 1777-1780.
- [5] Pendry, J. B., Schurig, D., Smith, D. R., 2006. Controlling Electromagnetic Fields, *Science*, 312, 1780-1782.
- [6] Jian, Z., Tianning, C., Qingxuan, L., Xiaopeng, W., Jie, X., Ping, J., 2016. Acoustic invisibility cloaks of arbitrary shapes for complex background media, *Applied Physics A*, 122, 285 (7 pages).
- [7] Schurig, D., Mock, J.J., Justice, B.J., Cummer, S.A., Pendry, J.B., Starr, A.F., Smith, D.R., 2006. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies, *Science*, 314, 977-980.
- [8] Elena, S., Ran, D., Nanid, G., Saeid, J., Georg, S., Ravi, P., 2016. Superluminal media formed by photonic crystals for transformation optics-based invisibility cloaks, *Journal of Optics*, 18, 044007 (11 pages).
- [9] Saeid, J., George, S., Navid, G., Elena, S., 2018. Spatial dispersion of index components required for building invisibility cloak medium from photonic crystals, *Journal of Optics*, 20, 045102 (9 pages).
- [10] Liu, r., Ji, C., Mock, J. J., Chin, J. Y., Cui, T. J., Smith, D. R., 2009. Broadband Ground-Plane Cloak, *Science*, 323, 366-369.
- [11] Yan, X., Shenyun, W., Geyi, W., 2014. Carpet cloak with photonic crystal shield that permits information exchange, *Physica B: Condensed Matter*, 451, 68-72.
- [12] Shi-Wang, F., Sheng-Dong, Z., Liyun, C., Yigan, Z., A-li, C., Yan-Feng, W., Krupali, D., Yue, W., Badreddine, A., 2020. Reconfigurable curved metasurface for acoustic cloaking and illusion, *Physical Review B*, 101, 024104 (17 pages)
- [13] Olivier, V., Nathalie, F., Xavier, M., Didier, L., 2008. Photonic-crystal-based cloaking device at optical wavelengths, *Applied optics*, 47, 1358-1362.
- [14] Navid, G., Elena, S., 2016. Employing self-collimation phenomena in photonic crystals for the invisibility cloak development, in *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, 1967-1968.
- [15] Abdelkarim, K., Ali, A., 2015. *Phononic crystals*, Springer.
- [16] Jing, L., Fugen, W., Huilin, Z., Yuanwei, Y., Xin, Z., 2015. Acoustic beam splitting in two-dimensional phononic crystals using self-collimation effect, *Applied physics*, 118, 144903 (7 pages).