# سوئیچ اولتراسونیک ۲×۱ بر پایه تنظیم حرارتی بلور های فونونی دو بعدی از نوع جامد/جامد

مهران علی نژاد نائینی، علی بهرامی

آزمایشگاه تحقیقاتی الکترونیک نوری و نانوفوتونیک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

**چکیده - در این مقاله، یک تحقیق تئوری پیرامون تاثیرات دما بر روی یک ساختار بلور فونونی دو بعدی از نوع جامد/جامد انجام شده است که متشکل از چیدمان مربعی ستون هایی از جنس ایپاکسی (رزین) است که در یک بستر از جنس تنگستن که دارای ابعادی در مقیاس میکرومتر می‌باشد قرار گرفته اند. همچنین، یک سوئیچ اولتراسونیک بر پایه بلور های فونونی دو بعدی به صورت تئوری مورد بررسی قرار گرفته است. برای این حالت، با استفاده از تحلیل ساختار باند به روش المان محدود امکان تنظیم پذیری موقعیت فرکانسی و پهنای ساختار باند بلور فونونی در مقیاس مگاهرتز نشان داده شده است. نتایج عددی برای ساختار متناوب تنگستن/ایپاکسی(رزین) با شبکه مربعی نشان می‌دهد که موقعیت فرکانسی و پهنای شکاف باند وابستگی شدید به دما دارند و با تغییر دما از $25\ ^{\circ}C$ به $35\ ^{\circ}C$ به صورت مشخصی دچار تغییر می‌شوند. وابستگی شدید به دما و متناوب بودن بلور فونونی طراحی شده اثبات می‌کند که ساختار برای طراحی یک سوئیچ حرارتی مناسب می‌باشد. لذا با توجه به نتایج حاصل از شبیه سازی و محاسبات انجام شده یک سوئیچ اولتراسونیک ۲×۱ برای فرکانس f=1.48MHz در دمای اتاق گزارش شده است.**

کلید واژه- اثرات دمایی، المان محدود، اولتراسونیک، بلور فونونی، خواص الاستیک، سوئیچ، ناحیه بریلیون.

# An ultrasonic 1×2 switch based on thermally tuned two-dimensional solid/solid phononic crystals

Mehran alinejad Naini, Ali Bahrami

Optoelectronics and Nanophotonics Research Lab (ONRL), Department of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

Abstract- In this work, a theoretical study of the temperature effect on two-dimensional solid/solid phononic crystal structure composed of square array of Epoxy rods embedded in Tungsten matrix with sub micrometer geometries have been done. Moreover, an ultrasonic wave switch based on two-dimensional phononic crystal is theoretically investigated. For this case, the possibility of tuning the position and width of phononic band structures in megahertz range has been observed utilizing the analyses of the band structure by finite element method. The numerical results for the case of periodic Tungsten/Epoxy structure with square lattice show that the frequency position and width of the absolute band gap strongly depends on the temperature and change prominently when the temperature change from 25°C to 35°C .The strong dependence on temperature and periodicity of designed phononic crystal prove that the structure could be suitable enough for thermal switching. So, according to the simulation results and calculations the design of an acoustic wave 1×2 switch for the specific frequency of f=1.48MHz at room temperature has been reported.

Keywords: Brillouin zone, Elastic properties, Finite element, Phononic crystal, thermal effect, switch, Ultrasonic.



این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

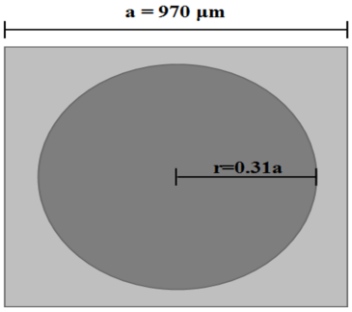
[ Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31 ]

## ۱- مقدمه

ساختارهای مختلف یک بلور فونونی در مطالعات اخیر به شدت مورد توجه واقع شده است و کاربرد های متنوعی بر پایه این شبکه‌ها طراحی و ساخته شده است. شبکه‌های بلور فونونی در خواص و نحوه انتشار شباهت‌هایی به شبکه های بلور فوتونی دارند. در این شبکه‌ها تفاوت هایی که منجر به متمایز شدن آن‌ها گشته است، قدرت عملکرد و زمینه کاری متفاوتی را برای این بلورها در بخش‌های مختلف پیش روی کاربر قرار داده است. بلورهای فونونی ساختارهای منظمی هستند که از ارتعاشات متناوب اجزای درون ساختار شبکه خود تشکیل شده اند. در طراحی یک بلور فونونی انتخاب مواد مناسب بسیار با اهمیت می‌باشد. مواد مورد استفاده در یک بلور فونونی باید اختلاف قابل توجهی در خواص الاستیک داشته باشند تا شکل گیری و تنظیم ساختار باند برای طراح ممکن باشد [۱]. یکی از ویژگی های اصلی یک بلور فونونی قابلیت ایجاد شکاف باند فرکانسی در طیف انتشار می‌باشد. در واقع وقتی یک ساختار متناوب در معرض برخورد با یک موج مکانیکی قرار می‌گیرد یک شکاف باند برای آن حاصل می‌شود. در این ناحیه سرعت حرکت فونون‌ها به صفر رسیده و هیچ فرکانسی اجازه عبور ندارد. تئوری براگ که اساس ایجاد شکاف باند در یک ساختار متناوب می‌باشد دو شرط کلی برای ایجاد یک شکاف باند را تفاوت فیزیکی بالا بین مواد سازنده و همچنین درصد تخلخل مناسب برای اجزای درون شبکه می‌داند [۲]. تنظیم پذیری ساختار باند یک بلور فونونی یکی از زمینه‌هایی است که در سال‌های اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته و روش‌های گوناگونی برای آن پیشنهاد شده است. یکی از روش‌ها افزودن فشار به ساختار و تغییر کرنش و کشش می‌باشد [۳]. تغییر هندسه ساختار، افزودن یک لایه از ماده ای با خواص الاستیک نزدیک به خواص الاستیک مواد تشکیل دهنده ساختار و یا تغییر درجه حرارت ساختار توسط یک میکروهیتر نیز از روش‌های معرفی شده دیگر در این زمینه است. در زمینه تغییر حرارت ساختار کارهای گوناگونی انجام شده است [۴-۵]و نتایج حاصل نشان دهنده این موضوع است که اگر خواص الاستیک (عدد پوآسون، ماژول یانگ، سرعت صوت) مواد موجود در میله‌ها با تغییر دما تغییر یابند، آنگاه ساختار باند بلور فونونی تغییر می‌کند و موقعیت فرکانسی و پهنای باند ساختار دچار تغییر می‌گردد [۶]. در این مقاله با استفاده از این مطالعات و با توجه به تاثیر پذیری دمایی ساختارهای متناوب فونونی، کنترل ساختار باند با تغییر درجه حرارت بهبود یافته است و با استفاده از این ویژگی یک سوئیچ اولتراسونیک ۲×۱ در محدوده فرکانسی مگاهرتز بر پایه بلورهای فونونی طراحی شده است که اولین نمونه از سوئیچ‌های تک ورودی-چند خروجی بر پایه بلورهای فونونی می‌باشد.

## فرآیند طراحی

با توجه به ویژگی‌های ساختارهای متناوب فونونی و با هدف به دست آوردن یک شکاف باند بزرگ از ساختار طراحی شده، در این مقاله یک ساختار بلور فونونی دو بعدی و متناوب با چیدمان اجزای ۱۷×۱۶ طراحی شده است. در این ساختار میله‌هایی که از جنس ایپاکسی (رزین) هستند درون یک شبکه مربعی از جنس تنگستن به صورت متناوب چیده شده‌اند. مواد انتخاب شده برای ساختار اختلاف عددی بالایی در خواص الاستیک خود دارند که با توجه به تئوری براگ وجود شکاف باند در ساختار باند را برای ما فراهم می‌کنند. با توجه به خواص یک بلور فونونی و به منظور کاهش حجم محاسبات با بررسی سلول واحد ساختار می‌توانیم ساختار باند معادل کل شبکه را داشته باشیم. شکل(۱) نمایشگر سلول واحد ساختار بلور فونونی دو بعدی طراحی شده می‌باشد. می‌دانیم که مشابه ساختارهای متناوب فوتونی، سلول واحد دارای صفحه بریلیون اول می-باشد که با توجه به تقارن چرخشی که ناحیه بریلیون کاهش یافته دارا می‌باشد محاسبات در آن صورت می‌گیرد تا مود-های تکراری محاسبه نشده و حجم محاسبات کاهش یابد.




شکل ۱: نمای کناری از سلول واحد بلوری فونونی دو بعدی طراحی شده تنگستن/ایپاکسی.



این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31 ]

با توجه به میزان ثابت شبکه و شعاع میله‌ها که در شکل(۱) نمایش داده شده است، درصد تخلخل برای این ساختار برابر $ff = 0.31$ است و لذا باتوجه به فرآیند-های ساخت، ابعاد انتخاب شده برای ساختار محدودیتی در این جهت ایجاد نخواهد کرد. بر اساس قانون هوک و روابط جنبشی، انتشار موج در یک ساختار متناوب با مواد الاستیک با روابط (۳-۱) بیان می‌شود [۷].

$$\rho u_{p,tt} = \sigma_{pq,q}\,, \qquad (۱)$$

$$\sigma_{pq} = C_{pqrs}\varepsilon_{rs}\,, \qquad (۲)$$

$$\varepsilon_{rs} = \frac{1}{2}\left(u_{r,s} + u_{s,r}\right), \qquad (۳)$$

که در این روابط $u_p$ *بیانگر جابجایی*، $\sigma_{pq}$ بیانگر میزان کشش، $\varepsilon_{rs}$ بیانگر میزان کرنش و $C_{pqrs}$ نشانگر تانسور سختی می‌باشد. با توجه به تناوب موجود در یک ساختار دو بعدی بلور فونونی، اگر برای یک سلول واحد میزان سختی را با K و ماتریس جرمی را با M نمایش دهیم آنگاه معادله حرکت اویلر-لاگرانژ می‌تواند اعمال شود و منجر به ایجاد رابطه (۴) می‌شود [۷].

$$(K - \omega^2 M)v = 0, \qquad (۴)$$

معادله (۴) بیانگر نوسانات یک سلول واحد است و فرکانس-های ویژه ساختار از آن محاسبه می‌شود. لذا برای این حالت یک ابر سلول واحد ۵×۱ طراحی می‌شود که در میله مرکزی آن یک نقص به وجود آمده است. با ایجاد یک نقص مناسب در ساختار و برهم زدن تناوب آن می‌توان یک مود مشخص را در یکی از شکاف باندها عبور داد. لذا ایجاد نقص در این حالت با تغییر ماده میله مرکزی و ایجاد یک استوانه با تغییر شعاع داخلی آن در ابر سلول واحد طراحی شده صورت می‌گیرد. ماده باریوم استرانتیوم تایتان برای این کار

جدول ۱

خواص الاستیک ایپاکسی (رزین) در دماهای متفاوت[۶]

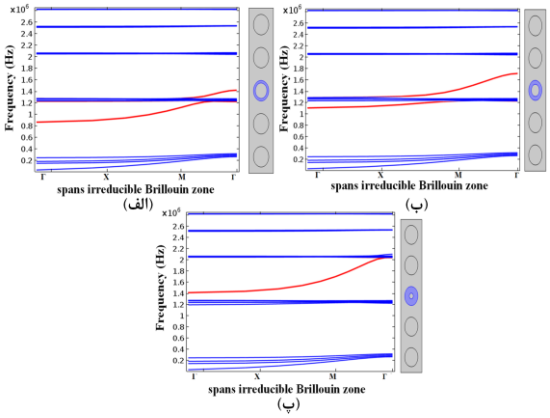
| | | |
|---|---|---|
| دما(°C) | ۲۵ | ۳۵ |
| ماژول یانگ(GPa) | ۴/۳۵ | ۴/۹۷ |
| عدد پوآسون | ۰/۳۳ | ۰/۴۱ |

جدول ۲

خواص الاستیک باریوم استرانتیوم تایتان در دماهای متفاوت[۸]

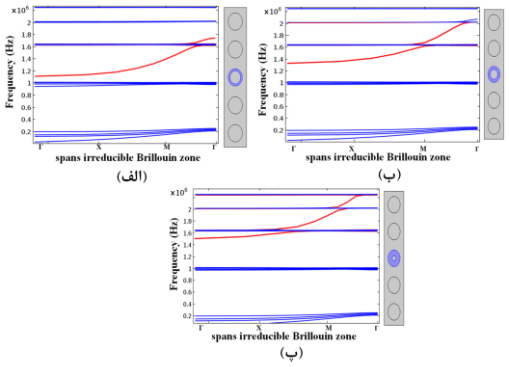
| | | |
|---|---|---|
| دما(°C) | ۲۵ | ۳۵ |
| ماژول یانگ(GPa) | ۳/۱۲۵ | ۲/۰۷ |
| عدد پوآسون | ۰/۴۱۷ | ۰/۴۳۹ |

انتخاب می‌شود که خواص الاستیک آن نیز نسبت به دما حساس می‌باشند. خواص مواد استفاده شده در میله‌ها در جداول ۱ و ۲ نمایش داده شده است [۶-۸]. لذا در شکل(۲) برای ساختار بلور فونونی طراحی شده، مقدار ۳۵ فرکانس ویژه یک ابر سلول واحد برای بلور فونونی با ایجاد نقص‌های متفاوت در دمای اتاق نمایش داده شده است که بیانگر ساختار باند فرکانسی آن در ناحیه بریلیون کاهش یافته می‌باشند.




شکل ۲: ابر سلول طراحی شده با نقص در میله مرکزی و ساختار باند با تغییر ماده میله مرکزی و تغییر شعاع داخلی استوانه طراحی شده به میزان: (الف) $r_1 = 0.8 \times r$ ؛ (ب) $r_2 = 0.6 \times r$ ؛ (پ) $r_3 = 0.30 \times r$.

همانطور که در شکل(۳) مشخص است، ایجاد نقص منجر به عبور یک مود در شکاف باند اول شده و کاهش شعاع داخلی استوانه در میله مرکزی منجر به تغییر موقعیت فرکانسی مود حاصل از نقص می‌شود. اگر دمای ساختار ابر سلول واحد ۵×۱ طراحی شده را توسط یک میکرو هیتر به ۳۵ درجه سانتی گراد تغییر دهیم، ساختار باندهای به دست آمده در شکل(۲) دچار تغییر می‌شود که نتایج در شکل(۳) نمایش داده شده است.




شکل۳ : ابر سلول طراحی شده با نقص در میله مرکزی و تغییر شعاع داخلی استوانه طراحی شده در درمای ۳۵ درجه سانتی گراد.



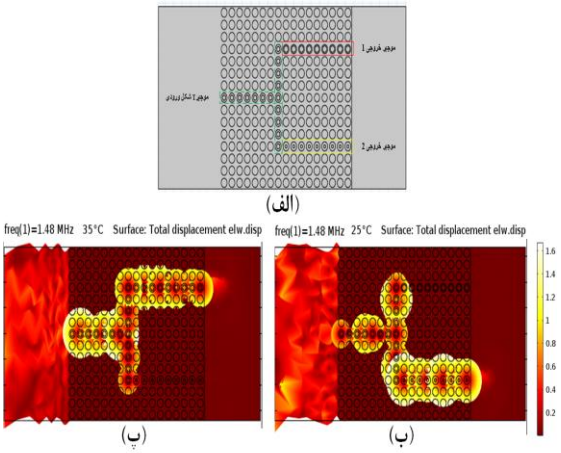
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31 ]

با توجه به شکل (۳) با افزایش ۱۰ درجه ای دما، مودهای نقص به سمت فرکانس‌های بالاتر تغییر مکان می‌دهند و به این دلیل خواص ماده استفاده شده در میله میانی به درجه حرارت وابسته می‌باشد. این در شرایطی است که کاهش شعاع داخلی استوانه موقعیت فرکانسی مود نقص را به سمت فرکانس‌های پایین می‌آورد. بنابراین شرایط لازم برای طراحی یک سوئیچ اولتراسونیک مهیا می‌شود.

## ۳- مکانیزم سوئیچینگ و نتایج شبیه سازی

با توجه به نتایج حاصل از ساختارهای طراحی شده در شکل(۲) و تاثیر اعمال دما بر ساختارهای باند در شکل(۳)، ساختار یک سوئیچ اولتراسونیک متشکل از یک موجبر T شکل و دو موجبر خروجی در شکل ۴ نمایش داده شده است. موجبر T شکل با ساختاری که شعاع درونی استوانه در میله مرکزی $r_2 = 0.6 \times r$ است ساخته شده است و در هر دو دما فرکانس f=1.48MHz را عبور می‌دهد. مقدار شعاع داخلی استوانه برای موجبر خروجی اول برابر $r_1 = 0.8 \times r$ و برای موجبر خروجی دوم برابر $r_3 = 0.3 \times r$ می‌باشد.




شکل ۴: (الف) ساختار سوئیچ طراحی شده بر پایه یک بلور فونونی ۱۷×۱۶؛ انتشار امواج در ساختار در دمای (ب) ۲۵ °C؛ (پ) ۳۵ °C.

با توجه به شکل ۴(الف) یک منبع ارسال امواج در سمت چپ بلور فونونی طراحی شده قرار دارد و در دمای اتاق موج در فرکانس f=1.48MHz را به سمت ساختار ارسال می-کند. لذا همانطور که در شکل ۴ (ب)و(پ) نمایش داده شده است، امواج با عبور از موجبر T شکل از موجبر بالایی خارج می‌شوند و در صفحه سازگار جذب که در انتهای ساختار قرار داده شده، جذب می‌شوند، سپس توسط یک میکروهیتر که در زیر ساختار قرار می‌گیرد، دمای آن ۱۰ درجه افزایش می‌یابد و فرکانس f=1.48MHz به موجبر پایینی کوپل شده و از آن خارج می‌شود. کلیه محاسبات مربوط به انتشار سطوح فشار امواج منطبق با روش المان محدود می‌باشد که توسط نرم افزار کامسول صورت گرفته است. بر اساس این روش دامنه محاسبه شده به تعداد عناصر ساختار بلور فونونی دو بعدی تقسیم می‌شود و سپس مقادیر جابجایی الاستیک بر اساس مقادیر نودال المان‌های طراحی شده در ساختار محاسبه می‌شود. بنابراین یک سوئیچ اولتراسونیک ۲×۱ حرارتی در دمای اتاق طراحی شده است که با توجه به شبیه سازی‌های صورت گرفته نشتی و پاشندگی ندارد.

## نتیجه‌گیری

دراین مقاله ساختارهای بلور فونونی دوبعدی جامد/جامد معرفی و از ویژگی های آن‌ها تحت یک ساختار متناوب استفاده شد. لذا با توجه به ویژگی‌های ساختار باند این بلورها و استفاده از موادی در ساخت آن که تاثیر پذیری آن به دما را ممکن می‌ساخت، یک سوئیچ اولتراسونیک ۲×۱ با اعمال حرارت در دمای اتاق طراحی شده که در بلورهای فونونی هیچ نمونه مشابهی ندارد. کلیه محاسبات و شبیه سازی‌ها بر پایه روش المان محدود صورت گرفت.

## مراجع


[1] A. Khelif and A. Adibi, *Phononic Crystals*: *Fundamentals and Applications* (Springer, New York, 2015).

[2] S. Mohammadi, A. A. Eftekhar, A.Khelif, W. D. Hunt and A. Adibi, "Evidence of large high frequency complete phononic band gaps in silicon phononic crystal plates," Appl. Phys. Lett., Vol. 92, p. 221905, 2008.

[3] A. Bayat and F. Gordaninejad, "Switching band-gaps of a phononic crystal slab by surface instability," Smart Materials and Structures., Vol. 24, p. 075009, 2015.

[4] B. Rostami-Dogolsara, M. K. Moravvej-Farshi, and F. Nazari, "Designing Switchable Phononic Crystal-Based Acoustic Demultiplexer," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control., Vol. 63, pp. 1468-1473, 2016.

[5] Y. Yao, F. Wu, X. Zhang and Z. Hou, "Thermal tuning of Lamb wave band structure in a two-dimensional phononic crystal plate," J. Appl. Phys., Vol. 110, p.123503, 2011.

[6] K. L. Jim, C. W. Leung, S. T. Lau, S. H. Choy and H. L. W. Chan, "Thermal tuning of phononic bandstructure in ferroelectric ceramic/epoxy phononic crystal," Appl. Phys. Lett., Vol. 94, p. 193501, 2009.

[7] IA. Veres, T. Berer, and O. Matsuda, "Complex band structures of two dimensional phononic crystals: Analysis by the finite element method," J. Appl. Phys., Vol. 114, p. 083519, 2013.

[8] Z. Bian, W. Peng and J. Song, "Thermal tuning of band structures in a one-dimensional phononic crystal," J. Appl. Mech., Vol. 81, p. 041008, 2014.




این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31 ]