

## Research Paper

# Designing Slow Light Waveguides Consisting of Two-dimensional Photonic Crystals and Investigating its Tunability<sup>1</sup>

Taymaz Fathollahi – Khalkhali\*<sup>2</sup>, Maziyar Amraei<sup>3</sup> and Ali Aghamohammadi<sup>4</sup>

Received: 2024.02.10

Revised: 2024.04.26

Accepted: 2024.06.22

## Abstract

The purpose of this research is to investigate the group velocity of tunable two-dimensional photonic crystals. The first step considers a square lattice consisting of dielectric rods in the liquid crystal background. In the next step, this structure was rotated by 45 degrees and its photonic band structure was investigated. Then, by removing a row of dielectric material (silicon) rods a waveguide is made in the photonic crystal. The waveguide mode and the related group velocity of the waveguide mode were investigated. In the following, the effect of applying an external voltage and changing the refractive index of the background material on the group velocity was studied. Afterward, by applying geometrical changes to the size of waveguide side rods, the effect of mentioned geometrical change on the properties of the waveguide mode and the group velocity was investigated. The calculation results show that the group velocity is reduced and as a result, the group index is increased. The investigations carried out show that quantitatively, by applying an external voltage in the ordinary waveguides, the range of changes in the group index is between 7 and 10, but by applying changes in modified waveguides, this quantity changes in the range of 14 to 27, which can be adjusted by applying an external electric field.

**Keywords:** *Two-dimensional Photonic Crystal, Group Index and Velocity, Liquid Crystal, Plane Wave Expansion Method.*

<sup>1</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.46413.1390>

<sup>2</sup>Associate Professor, Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran. (Corresponding Author). Email: tfathollahi@aeoi.org.ir

<sup>3</sup> PhD Student, Department of Physics, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran. Email: mazyar\_amraie@yahoo.com

<sup>4</sup>Associate Professor, Department of Physics, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran. Email: aliaghamohammadi@gmail.com



# طراحی موجبرهای نور کُند متشکل از بلورهای فوتونی دوبعدی و بررسی کوک پذیری آن<sup>۱</sup> تایماز فتح الهی خلخالی<sup>۲\*</sup>، مازیار امرائی<sup>۳</sup> و علی آقا محمدی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۲

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال چهاردهم، پیاپی ۳۸، پاییز ۱۴۰۳

صص ۹۱ - ۱۰۵

## چکیده:

هدف از این پژوهش، بررسی سرعت گروه بلورهای فوتونی دوبعدی و تنظیم‌پذیر (یا کوک‌پذیر) است. در اولین مرحله، یک شبکه مربعی شامل مواد دی‌الکتریک در زمینه بلورمایع در نظر گرفته شد. در مرحله بعدی، این ساختار به اندازه ۴۵ درجه دوران داده شده و ساختار نوار فوتونی آن مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه با حذف یک ردیف از میله‌های ماده دی‌الکتریک (سیلیکون)، یک موجبر در این بلور فوتونی ایجاد و مد موجبری آن مورد مطالعه قرار گرفت. سپس سرعت گروه و ضریب گروه این مد موجبری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تاثیر اعمال ولتاژ خارجی و تغییر ضریب شکست ماده زمینه بر سرعت و ضریب گروه مد موجبری بررسی شد. در آخرین مرحله با اعمال تغییرات هندسی بر روی اندازه یک ردیف از میله‌های کناری موجبر اثر این تغییر هندسه بر روی ویژگی‌های مد موجبری و ضریب گروه بررسی شد. نتایج محاسبات عددی بر پایه روش بسط موج تخت نشان می‌دهد، با تغییر اندازه میله‌های کناری موجبر سرعت گروه کاهش یافته و متناسب با آن، ضریب گروه افزایش می‌یابد. در حقیقت، بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که به لحاظ کمی با اعمال ولتاژ خارجی در موجبر عادی محدوده تغییرات ضریب گروه بین ۷ تا ۱۰ است. اگرچه، با اعمال تغییرات در اندازه میله‌های کناری تغییرات این کمیت در محدوده ۱۴ الی ۲۷ قرار دارد که دامنه تغییرات بیشتری را نشان می‌دهد. به بیانی دیگر، با اعمال یک میدان الکتریکی خارجی می‌توان این کمیت فیزیکی را تنظیم‌پذیر نمود.

**واژگان کلیدی:** بلور فوتونی دوبعدی، ضریب و سرعت گروه، بلور مایع، روش بسط موج تخت.

<sup>۱</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.46413.1390>

<sup>۲</sup> دانشیار، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران. (نویسنده مسئول)  
tfathollahi@aeoi.org.ir

<sup>۳</sup> دانشجوی دکترا، گروه فیزیک، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران. Email: mazyar\_amraie@yahoo.com

<sup>۴</sup> دانشیار، گروه فیزیک، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران. Email: aliaghamohamadi@gmail.com



## ۱. مقدمه

موضوع بلورهای فوتونی در سه دهه گذشته مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. اگرچه، سیر پرشتاب تحولات علمی و جذابیت این حوزه از علم سبب شده که در همین مدت انواع ساختارهای بلور فوتونی طراحی، مدل سازی، بهینه سازی و ساخته شوند. در حقیقت، بلورهای فوتونی ساختارهای متناوب از مواد دی الکتریک بوده که به سه گروه یک، دو و سه بعدی تقسیم می شوند و اغلب ساخته دست بشر می باشند [۱-۲]. ویژگی تناوبی ثابت دی الکتریک بلورهای فوتونی در تشابه با پتانسیل متناوب در نیمه هادی ها، نواحی مجاز و ممنوعه بسامدی برای انتشار امواج الکترومغناطیسی ایجاد می نماید که مهمترین ویژگی این دسته از ادوات نوری می باشد [۳]. این ناحیه ممنوع شامل بسامدهایی است که به ازای آن ها، امواج الکترومغناطیسی مجاز به انتشار در بلور فوتونی نیستند. پهنای این ناحیه بسامدی به هندسه، اندازه، جنس و فضای ماده ای که ساختار تناوبی را می سازد، وابسته است.

در حالت مطلوب، برای بدست آوردن کنترل کامل نور در هر سه جهت، لازم است یک بلور فوتونی سه بعدی ایجاد و استفاده شود. اما ساخت بلورهای فوتونی سه بعدی با فناوری فعلی سخت و پیچیده است. خوشبختانه، برخی از ویژگی های بلورهای فوتونی سه بعدی از راه بلورهای فوتونی دو بعدی نیز قابل دستیابی است. از این رو، پژوهشگران به سمت استفاده از بلورهای فوتونی دو بعدی تمایل پیدا کرده اند. بلورهای فوتونی افزون بر این که در ساختار کامل و بدون نقص کاربرد دارد، با ایجاد نقص های مختلف و کنترل شده ساختاری، کاربردهای متفاوت دیگری نیز پیدا می کنند [۴-۵]. این نقص ها در بلور فوتونی، اجازه انتشار موج نوری با طول موج معین را در ناحیه بسامدی شکاف فوتونی فراهم می سازد که می توان ادواتی برای هدایت و انتشار نور فراهم آورد. از این ادوات نوری که با ایجاد نقص در ساختار نواری بلور فوتونی ساخته می شوند، می توان به میکرو کاواک ها [۶]، فیلترها [۷] و موجبرها [۸] اشاره نمود.

شاید مهمترین یا یکی از مهمترین کاربردهای بلورهای فوتونی، ایجاد موجبرهای بلور فوتونی است. در حقیقت، با برداشتن یک ردیف از میله های دی الکتریک و ایجاد نقص خطی می توان یک موجبر بلور فوتونی ایجاد کرد. بلور فوتونی برای امواج با فرکانس واقع در محدوده شکاف فوتونی همانند یک آینه کامل رفتار می کند. بنابراین، اگر پرتو نوری با فرکانس واقع در محدوده شکاف فوتونی تحت هر زاویه ای به داخل این نقص خطی تابیده شود، در مرز بین نقص خطی و سطح بلور انعکاس می یابد [۹].



همانطور که می‌دانیم، سرعت نور فوق‌العاده بالا است و برای انتقال داده‌ها بین دو نقطه بسیار سودمند است. اما همین سرعت بالای نور موجب می‌شود که هدایت سیگنال‌های اپتیکی با مشکلاتی مواجه شود. یکی از روش‌های غلبه بر این مشکل، استفاده از نور کند یا نور کم سرعت است که افزون بر آن در پدیده‌هایی از قبیل ایجاد کلیدزنی نوری، ذخیره‌سازی اپتیکی و تاخیر زمان اپتیکی استفاده می‌شود [۱۰]. اثر نور کند به کاهش سرعت گروه اشاره می‌کند. به تازگی، پدیده نور کم سرعت در ساختارهای دی‌الکتریک، به ویژه مشددهای حلقوی تزویج‌یافته و بلورهای فوتونی مورد مطالعه قرار گرفته است. بنابراین، با توجه به امکان مهندسی ساختارهای بلور فوتونی، بررسی پدیده نور کم سرعت در این ساختارها توجه بسیاری را به خود جلب کرده و پژوهش‌های فراوانی بر روی این پدیده در بلورهای فوتونی انجام شده است [۱۱-۱۳].

در بررسی پدیده نور کم سرعت افزون بر سرعت گروه، ضریب گروه که با عکس سرعت گروه متناسب است، مورد بررسی و مطالعه پژوهشگران قرار گرفته است. به عنوان مثال، در بعضی مقالات تلاش شده تا پایین‌ترین سرعت گروه بدست آید. به عنوان نمونه، در مقاله اوستون و همکاران [۱۴]، با حذف یک ردیف از میله‌های یک شبکه مربعی در یک ساختار ساخته شده از مواد دی‌الکتریک در زمینه هوا و همچنین ایجاد یک ساختار شبیه به یک موجبر ساخته شده از کاواک‌های جفت شده، سرعت گروه بسیار پایینی بدست آمد، ولی در عوض ضریب گروه ساختار بیان شده بسیار بالا بود. در ادامه مطالعات دیگری منتشر شد که با ارائه الگویی جدید، ساختاری با سرعت گروه اندکی بیشتر و ضریب گروه پایین‌تری بدست آمد [۱۵]. مطالعات در این زمینه ادامه یافت و مقالات دیگری در این زمینه منتشر شد [۱۶]. در پی این مطالعات، پژوهشگران در سال‌های بعد تلاش کردند تا این کمیت‌های فیزیکی را با استفاده از مواد قابل هدایت و تغییرپذیر، کوک‌پذیر کنند. به عنوان مثال، پژوهشگران چینی با استفاده از مواد پلی استایرن ساختارهای نور کم سرعت و کوک‌پذیر را مورد بررسی قرار دادند [۱۷]. سپس، ساختارهایی در زمینه دی‌الکتریک از حفره‌های هوا پر شده از مواد مغناطیسی که تحت تاثیر میدان مغناطیسی کوک‌پذیر هستند بررسی شد [۱۸]. در سال‌های کنونی، از مواد دیگری چون گرافن [۱۹]، برای ایجاد سامانه‌های نور کند و کوک‌پذیر استفاده شد و این پژوهش‌ها همچنان ادامه دارد.

افزون بر موارد بیان شده، می‌توان با به کار بردن پلاسما، بلور مایع یا فلزات و اعمال یک میدان الکتریکی یا مغناطیسی خارجی، ویژگی‌های نوری بلور فوتونی را تغییر داد. یکی از پر کاربردترین این مواد، بلورهای مایع هستند. مولکول‌های بلور مایع در اثر تحریک میدان الکتریکی خارجی،

هنگامی که ولتاژ اعمالی از ولتاژ بحرانی بزرگتر شود، دچار تغییر در جهت گیری می‌شوند و در نتیجه تغییر قابل ملاحظه‌ای در ضرایب شکست بلور مایع به وجود می‌آید. بر این اساس، ساختار نواری بلور فوتونی شامل بلور مایع با اعمال ولتاژ تغییر می‌کند که منجر به تغییر در ویژگی‌های نوری بلور می‌شود. بنابراین، اگر بلور مایع یکی از عناصر تشکیل دهنده بلور فوتونی باشد، ویژگی‌های آن با استفاده از میدان الکتریکی خارجی می‌تواند کوک پذیر شود [۲۰].

هدف ابتدایی در این پژوهش، بررسی ساختار نواری فوتونی شبکه مربعی شامل ستون‌های سیلیکون در زمینه بلور مایع می‌باشد. سپس، ساختار نواری فوتونی این شبکه تحت زاویه دوران ۴۵ درجه مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، تلاش می‌شود با حذف یک ردیف از میله‌های سیلیکونی، یک موجبر در این بلور فوتونی ایجاد و مد موجبری آن مطالعه شود. در مرحله بعد با تغییر اندازه، سطح مقطع میله‌های سیلیکون به ازای تمامی مقادیر ممکن مد موجبری در حالت‌های مختلف بررسی و ساختار بهینه انتخاب می‌شود. سپس، مشخصات مربوطه چون سرعت گروه و پاشندگی سرعت گروه بررسی می‌گردد. همچنین، از آنجایی که ماده زمینه با بلور مایع پر شده است، اثر اعمال ولتاژ بر روی موجبر نور کند و اثر آن بر روی کوک پذیری کمیت‌های این موجبر مطالعه می‌شود. در پایان، تمامی کمیت‌های بیان شده به ازای تغییر اندازه سطح مقطع میله‌های مجاور موجبر و کوک پذیری این کمیت‌ها بررسی خواهد شد.

## ۲. ساختار مورد بررسی و روش محاسباتی

ساختار فوتونی مورد بررسی در این پژوهش، به صورت یک شبکه مربعی از میله‌های سیلیکون ( $n_{si} = 3.67$ ) با سطح مقطع دایروی در زمینه بلور مایع در نظر گرفته شده است. بلور مایع ماده‌ای ناهمسانگرد است که دارای ضرایب شکست عادی و غیرعادی می‌باشد. بلور مایع مورد استفاده در این پژوهش فنیل استیلن است که ضرایب شکست عادی و غیرعادی آن به ترتیب  $n_o^{LC} = 1.59$  و  $n_e^{LC} = 2.223$  می‌باشد. در اینجا فرض شده است که راستای تناوب بلور در صفحه  $X - Y$  و میله‌های سیلیکونی در راستای محور  $Z$  قرار دارد.

شکل (۱) نشان‌دهنده جهت گیری بلورهای مایع نسبت به محورهای مختصات می‌باشد و  $\theta$  زاویه آن نسبت به محور  $Z$  است. بدون اعمال هیچ میدان خارجی جهت گیری آن‌ها در راستای محور  $X$  است. اگرچه، با اعمال یک میدان الکتریکی خارجی در راستای محور  $Z$ ، جهت گیری این



بلورها شروع به تغییر جهت به سمت محور  $Z$  ها می کنند. ضریب شکست موثر در چنین حالتی عبارت است از [۲۱]:

$$n_{eff,LC}^2 = \frac{n_e^2 n_o^2}{n_e^2 \cos^2(\theta) + n_o^2 \sin^2(\theta)} \quad (1)$$

و رابطه زاویه  $\theta$  با ولتاژ اعمالی عبارت است از:

$$\theta = \begin{cases} 0, & V \leq V_C \\ \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \left( \exp\left(-\frac{V - V_C}{V_0}\right) \right), & V > V_C \end{cases} \quad (2)$$

که در رابطه بالا،  $V_C$  ولتاژی است که در آن تغییر جهت بلورهای مایع شروع می شود و  $V_0$  مقدار ثابتی است. مشاهدات تجربی نشان می دهد که با تغییرات ولتاژی بین صفر تا ۱۰ ولت، می توان بلورهای مایع را به تمام جهت گیری های دلخواه وادار نمود [۲۲].

منظور از کاهش سرعت نور، کاهش سرعت گروه یک پالس منتشر شونده در محیط مورد نظر است. سرعت گروه از راه شیب منحنی پاشندگی  $\omega - k$  در یک محدوده بسامدی، به صورت زیر محاسبه می شود [۲۳-۲۴]:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n_g} \quad (3)$$

که در آن،  $c$  سرعت نور در خلا و  $n_g$  ضریب گروه است. بنابراین برای نور کم سرعت، شیب منحنی پاشندگی در یک محدوده بسامدی ناچیز است. همچنین، کمیت پاشندگی سرعت گروه که معیاری از اعوجاج پالس نوری است، به صورت زیر تعریف می شود.

$$GVD = \frac{d^2k}{d\omega^2} = -\frac{1}{v_g^3} \frac{d^2\omega}{dk^2} \quad (4)$$

با توجه به رابطه (۴)، با کاهش سرعت گروه، پاشندگی سرعت گروه افزایش می یابد. ولی برای حالتی که  $\frac{d^2\omega}{dk^2}$  کمینه باشد، مقدار پاشندگی سرعت گروه نیز کمینه خواهد شد. بنابراین، هنگامی

که یک مُد موجبری با یک نقطه عطف در منحنی پاشندگی ایجاد شود، نور کُند با سرعت گروه پائین بدست خواهد آمد.

در تحلیل بلورهای فوتونی روش‌های گوناگونی وجود دارد که هر یک دارای مزایا و معایبی هستند. به صورت همه جانبه، مطالعه و بررسی ساختارهای دی‌الکتریک چون بلورهای فوتونی با کمک حل معادلات ماکسول یا هلمهولتز با استفاده از روش‌های تحلیلی، نیمه‌تحلیلی و عددی ممکن است. در این پژوهش، از روش بسط موج تخت به منظور محاسبه ساختار نوار فوتونی، محاسبه مُد موجبری، سرعت گروه و پاشندگی سرعت گروه استفاده می‌شود.

به صورت خلاصه باید بیان شود که برای بدست آوردن ساختارهای نواری و نمودارهای هم‌فرکانس، لازم است معادله مستقل از زمان ماکسول که به شکل 
$$\vec{\nabla} \times \left[ \frac{1}{\epsilon(\vec{r})} \vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}) \right] = \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 \vec{H}(\vec{r})$$
 است، در ویژه پایه‌های توابع فوریه بسط داده شود. برای حل معادله بالا، از روش‌های مشابه برای حل معادله شرودینگر در فیزیک حالت جامد استفاده می‌شود. به دلیل تناوب در ساختار بلورهای فوتونی تابع دی‌الکتریک  $\epsilon(\vec{r})$  برای چنین محیط‌هایی یک تابع متناوب از بردار  $\vec{r}$  می‌باشد:

$$\epsilon(\vec{r} + \vec{R}) = \epsilon(\vec{r}) \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $\vec{R}$  بردار شبکه فضای حقیقی است.

برای حل معادله ویژه برداری بیان شده و تبدیل آن به یک معادله ویژه مقرداری همانند روش حل معادله شرودینگر در فیزیک حالت جامد، میدان مغناطیسی  $\vec{H}(\vec{r})$  را بر حسب بردارهای پایه شبکه وارون بسط داده و رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\vec{H}(\vec{r}) = \sum_{\vec{G}} \sum_{\lambda=1}^2 h_{\vec{G},\lambda} \hat{e}_{\lambda} e^{i(\vec{k} + \vec{G}) \cdot \vec{r}} \quad (6)$$

به روش مشابه می‌توان تابع دی‌الکتریک را بر حسب بردارهای پایه شبکه وارون بسط داد که با جایگذاری آن و رابطه (۶) در معادله مستقل از زمان ماکسول، یک ماتریس خطی به شکل زیر حاصل می‌شود:

(۷)

$$\sum_{\vec{G}'} H_{\vec{G},\vec{G}'} \begin{pmatrix} h_{\vec{G}',1} \\ h_{\vec{G}',2} \end{pmatrix} = \frac{\omega^2}{c^2} \begin{pmatrix} h_{\vec{G},1} \\ h_{\vec{G},2} \end{pmatrix}$$



که در آن،

$$H_{\vec{G}, \vec{G}'} = |\vec{k} + \vec{G}| |\vec{k} + \vec{G}'| \eta (\vec{G} - \vec{G}') \begin{bmatrix} \hat{e}_2 \cdot \hat{e}'_2 & -\hat{e}_2 \cdot \hat{e}'_1 \\ -\hat{e}_1 \cdot \hat{e}'_2 & \hat{e}_1 \cdot \hat{e}'_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

و در پایان، از راه ماتریس بیان شده می‌توان ساختار نواری فوتونی و سایر کمیت‌های متناسب با آن را بدست آورد [۲۵-۲۶].

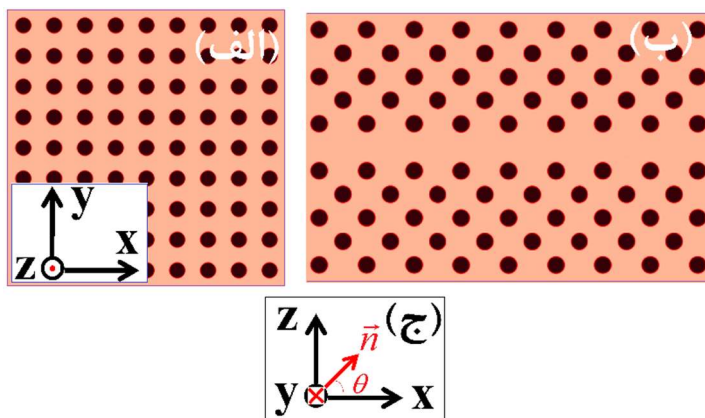
نرم افزارهای زیادی وجود دارند که بر اساس روش بسط موج تخت کار می‌کنند، یکی از بهترین و پرکاربردترین این نرم افزارها MPB<sup>1</sup> می‌باشد، که در این پژوهش از آن استفاده شد [۲۷-۲۸].

### ۳. نتایج و بحث

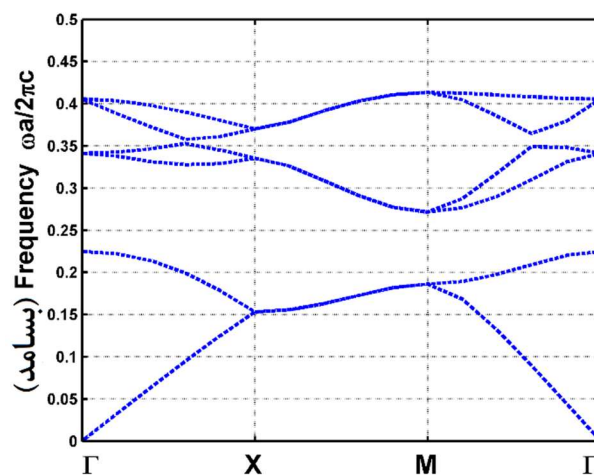
در این پژوهش در ابتدا ساختار نوار فوتونی یک شبکه مربعی شامل میله‌های سیلیکونی در زمینه بلور مایع مورد بررسی قرار داده شد. نمایش طرحواره سطح مقطع این ساختار در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. در این بلور فوتونی شعاع میله‌های سیلیکونی و  $a$  ثابت شبکه (فاصله بین مرکز دو میله همسایه با نزدیک‌ترین فاصله) می‌باشد. در این پژوهش، مُد قطبشی الکتریکی (مُد TM) که در آن میدان الکتریکی در راستای میله‌های سیلیکونی فرض شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اولین مرحله ساختار نوار فوتونی این بلور با استفاده از روش بسط موج تخت مورد بررسی قرار می‌گیرد. محاسبه ساختار فوتونی شبکه بیان شده به ازای تمامی مقادیر ممکن از شعاع میله‌های دی‌الکتریک بر پایه همین روش نشان می‌دهد که در این ساختار به ازای تمامی مقادیر ممکن از شعاع میله‌های دی‌الکتریک بر پایه همین روش نشان می‌دهد که در این ساختار به ازای شعاع  $r = 0.25a$  یک شکاف فوتونی با پهنای  $\Delta\omega = 0.0469 \left(\frac{2\pi c}{a}\right)$  بدست می‌آید. همانطوری که در شکل (۲) قابل مشاهده است، فرکانس لبه پائینی و بالایی شکاف فوتونی به ترتیب عبارتند از:  $0.2247 \left(\frac{2\pi c}{a}\right)$  و  $0.2716 \left(\frac{2\pi c}{a}\right)$ .

<sup>1</sup> Mit photonic bands





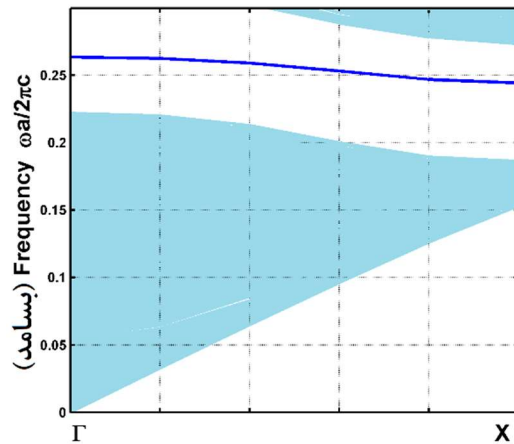
**شکل ۱** (الف) شکل طرحواره سطح مقطع یک بلور فوتونی دو بعدی با شبکه مربعی، (ب) ساختار طرحواره یک موجر بلور فوتونی ساخته شده در یک بلور فوتونی مربعی با دوران ۴۵ درجه و (ج) جهت گیری بلور مایع نسبت به محورهاى مختصات.



**شکل ۲** ساختار نوار فوتونی شبکه مربعی با میله‌های دایروی سیلیکون در زمینه بلور مایع بدون اعمال ولتاژ برای  $r = 0.25a$

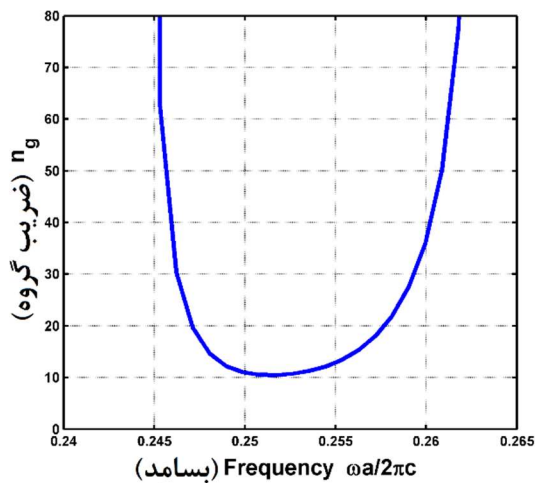
در ادامه به ازای همین کمیت ( $r = 0.25a$ ) در ابتدا شبکه مربعی را به اندازه ۴۵ درجه دوران داده و در مرحله بعد یک ردیف از میله‌های آن حذف می‌شود. با حذف یک ردیف از میله‌ها، یک مد موجبری در ناحیه ممنوعه بسامدی قابل مشاهده است. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، یک مد هدایت موجبری در ناحیه ممنوعه بسامدی به وجود آمده است و یک نقطه عطف در منحنی ایجاد شده است که در حقیقت، ناحیه مورد نظر برای ایجاد نور کند می‌باشد.





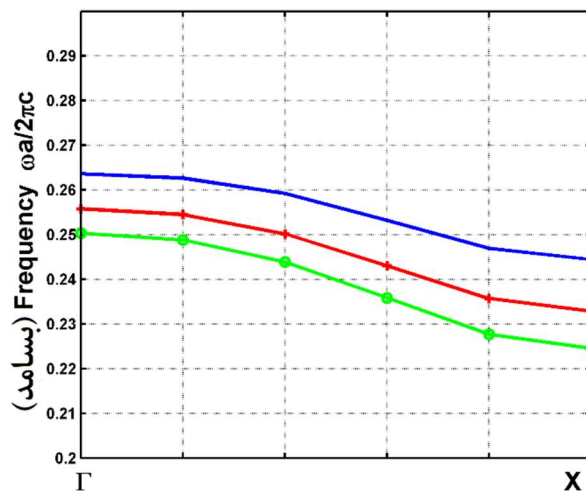
شکل ۳ ساختار نواری فوتونی تصویر یافته موجبر بلور فوتونی ساخته شده در شبکه مربعی با زاویه دوران ۴۵ درجه با میله‌های دایروی سیلیکون در زمینه بلور مایع بدون اعمال ولتاژ برای  $r = 0.25a$

در مرحله بعد شیب این مُد موجبری با استفاده از روش بسط موج تخت محاسبه می‌شود. همانطور که رابطه (۳) نشان می‌دهد، شیب منحنی پاشندگی  $\omega - k$  سرعت گروه مُد موجبری را نشان می‌دهد. همچنین عکس آن، نشان‌دهنده ضریب گروه می‌باشد. هر چه سرعت گروه کمتر باشد به مشخصات مربوط به یک موجبر نور کند نزدیک‌تر شده‌ایم. به همین منظور شیب این منحنی حساب شده و در شکل (۴) در بسامدهای مختلف به نمایش در آمده است.



شکل ۴ ضریب گروه مُد موجبری در موجبر ساخته شده در شبکه مربعی با زاویه دوران ۴۵ درجه با میله‌های دایروی سیلیکون در زمینه بلور مایع بدون اعمال ولتاژ برای  $r = 0.25a$

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، در یک پهنای بسامدی مناسب نور کندی وجود دارد که سرعت گروه آن در این محدوده فرکانسی کمابیش ثابت است. یا به عبارت دیگر میزان پاشندگی نور ناچیز خواهد بود و می‌توان از این محدوده بسامدی بهره مناسب را برد. در مرحله بعد، تاثیر اعمال میدان الکتریکی خارجی و تغییر جهت بلورهای مایع مورد بررسی قرار می‌گیرد. می‌دانیم که با اعمال ولتاژ و ایجاد میدان الکتریکی مناسب جهت‌گیری بلورهای مایع و در نتیجه زاویه  $\theta$  تغییر می‌کند. در این مرحله همه کمیت‌های ساختاری نسبت به حالت بیان شده قبلی ثابت نگه داشته شد و تنها زاویه  $\theta$  تغییر می‌کند. نتایج محاسبات نشان می‌دهد با اعمال مقدار کمی ولتاژ امکان تغییر در مُد موجبری و در ادامه ضریب گروه وجود دارد. شکل (۵) مُد موجبری و فرکانس متناظر آن را به ازای سه زاویه  $\theta = 0^\circ, 30^\circ \& 40^\circ$  نشان می‌دهد. در این شکل به ترتیب نوارهای آبی، قرمز و سبز رنگ مُد موجبری سه زاویه صفر، سی و چهل را نشان می‌دهد. به روشنی قابل مشاهده است که با تغییر ضریب شکست زمینه ناحیه موجبری و مُد موجبری تغییر کرده است.

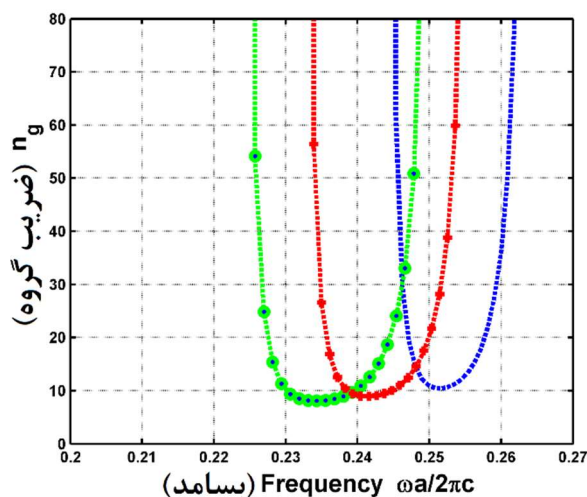


شکل ۵ ساختار نواری فوتونی تصویر یافته موجبر بلور فوتونی ساخته شده در شبکه مربعی با زاویه دوران  $45^\circ$  درجه با

$\theta = 0^\circ$  (blue),  $30^\circ$  (red) &  $40^\circ$  (green) میله‌های دایروی سیلیکون در زمینه بلور مایع به ازای

$$r = 0.25a \text{ برای}$$





شکل ۶ ضریب گروه مُد موجبری در موجبر ساخته شده در شبکه مربعی با زاویه دوران ۴۵ درجه با میله‌های دایروی

سیلیکون در زمینه بلور مایع به ازای  $0^\circ$  (blue),  $30^\circ$  (red) &  $40^\circ$  (green)  $\theta$  برای

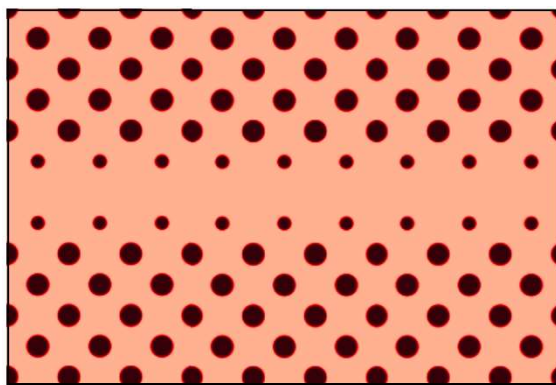
$$r = 0.25a$$

در حقیقت، شکل (۶) نشان می‌دهد که با تغییر اندک در ولتاژ اعمالی می‌توان ویژگی‌های نوری موجبر را هدایت و تغییر داد. با مقایسه شکل‌های (۵) و (۶) می‌توان دریافت که با اعمال ولتاژ بیرونی فرکانس مُد نقص، به سمت بسامدهای پایین‌تر منتقل می‌شود. همچنین پهنای بسامدی نمودارهای  $\bar{U}$  شکل بیشتر می‌شوند. این افزایش پهنای بسامدی نشان می‌دهد که ناحیه نورکند افزایش پیدا کرده است که نوعی برتری محسوب می‌شود. هر چند کاهش اندک  $n_g$  نشان‌دهنده افزایش اندک سرعت گروه می‌باشد.

در مرحله بعد به منظور انجام یک بررسی کامل‌تر، تغییر اندازه یک ردیف از میله‌های جانبی موجبر ساخته شده در شبکه مربعی با زاویه دوران ۴۵ درجه مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل (۷)). این ساختار نیز چون ساختار پیشین ساخته شده از میله‌های سیلیکونی در زمینه بلور مایع می‌باشد. در این بخش به ازای یک مقدار معین از شعاع میله‌های اصلی ( $r$ ) مُد موجبری به ازای تغییر اندازه شعاع میله‌های کناری ( $R$ ) بررسی و این روش برای تمامی مقادیر ممکن از شعاع میله‌های اصلی تکرار شد. نتایج محاسبات نشان می‌دهد، کمیت بهینه شعاع اصلی میله‌های دی‌الکتریک  $r = 0.25a$  است. نتایج محاسبات بر پایه بسط موج تخت بیان می‌کند که به ازای  $r = 0.25a$  &  $R = 0.15a$  و به ازای سه زاویه  $\theta = 0^\circ, 30^\circ$  &  $40^\circ$  سه مُد موجبری با شیبی کمتر نسبت به حالت قبلی در شکل (۸)

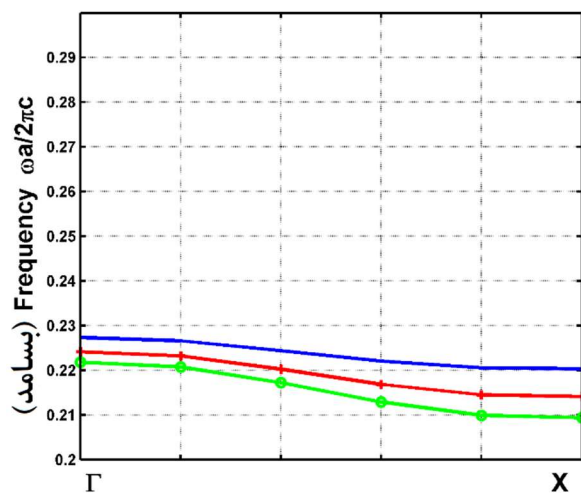
قابل مشاهده است. لازم به بیان است که این مقدار از شعاع میله‌های جانبی حالت بهینه شده است و این محاسبات برای تمام حالت‌های ممکن از شعاع میله‌های جانبی تا حد ممکن (مرز همپوشانی میله‌ها) انجام شده است.

در ادامه مطابق با حالت قبلی به ازای کمیت‌های بهینه سرعت گروه و ضریب گروه برای هر سه حالت بیان شده با استفاده از روش بسط موج تخت مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل (۹) قابل مشاهده است، با اعمال ولتاژ خارجی به ازای کمیت‌های بیان شده شیب نمودار تغییر می‌کند. البته شیب نمودار در این حالت نسبت به حالتی که میله‌های کناری هیچ گونه تغییری نداشتند، کمتر شده است. کاهش شیب متناسب با کاهش سرعت گروه و در نتیجه افزایش ضریب گروه می‌باشد. در حقیقت، تغییر اندازه شعاع میله‌های کناری سبب کاهش سرعت گروه و افزایش ضریب گروه شده است که همین مقدار را نیز می‌توان با اعمال ولتاژ خارجی تغییر داد.

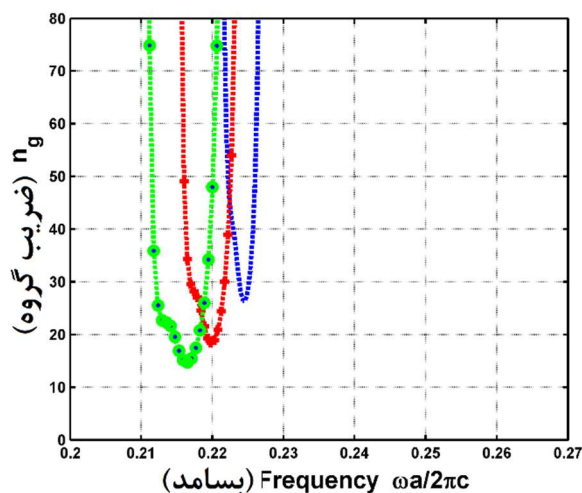


شکل ۷ ساختار طرحوار یک موجبر بلور فوتونی ساخته شده در یک بلور فوتونی مربعی با دوران ۴۵ درجه.





شکل ۸ ساختار نواری فوتونی تصویر یافته موجبر بلور فوتونی ساخته شده در شبکه مربعی با زاویه دوران ۴۵ درجه با میله‌های دایروی سیلیکون در زمینه بلور مایع به ازای  $\theta = 0^\circ$  (blue),  $30^\circ$  (red) &  $40^\circ$  (green) برای  $r = 0.25a$  &  $R = 0.15a$



شکل ۹ ضریب گروه مُد موجبری در موجبر ساخته شده در شبکه مربعی با زاویه دوران ۴۵ درجه با میله‌های دایروی سیلیکون در زمینه بلور مایع به ازای  $\theta = 0^\circ$  (blue),  $30^\circ$  (red) &  $40^\circ$  (green) برای  $r = 0.25a$  &  $R = 0.15a$

#### ۴. نتیجه گیری

نتایج محاسبات عددی بر پایه روش بسط موج تخت نشان داد که در ساختارهای ساده بلور فوتونی ساخته شده از میله‌های سیلیکونی در زمینه بلور مایع، با زاویه دوران ۴۵ درجه، به ازای کمیت‌های

بهینه دارای یک شکاف فوتونی با پهنا  $\Delta\omega = 0.0469\left(\frac{2\pi c}{a}\right)$  است. نتایج محاسبات عددی نشان داد که با حذف یک ردیف از میله‌ها امکان ایجاد مد موجبری با سرعت گروه پایین در این ساختار وجود دارد و می‌توان با اعمال یک میدان الکتریکی خارجی سرعت گروه و ضریب گروه آن را تغییر داد. در مرحله بعد، با تغییر اندازه یک ردیف از میله‌های کناری موجبر، مشاهده شد که سرعت گروه به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش و ضریب گروه حداقل به اندازه سه برابر افزایش یافته است. نتایج این محاسبات می‌تواند در ساختارهای نوری و کوک‌پذیر مورد استفاده قرار گیرد.

## منابع

- [1] Yablonovitch E., "Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics", *Phys. Rev. Lett.*, 58, 2059-2062, 1987. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2059>.
- [2] John S., "Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices", *Phys. Rev. Lett.*, 58, 2486-2489, 1987. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2486>.
- [3] Anderson CM., Giapis KP., "Larger Two-Dimensional Photonic Band Gaps", *Phys. Rev. Lett.*, 77, 2949-2952, 1996. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.2949>.
- [4] Rezaei B., Khalkhali TF., Vala AS., Kalafi M., "Absolute band gap properties in two-dimensional photonic crystals composed of air rings in anisotropic tellurium background", *Optics Commun.*, 282, 2861-2869, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.04.048>.
- [5] Fathollahi-khalkhali T., Rezaei B., "Investigation of Tunable Complete Photonic Band Gap in Two-dimensional Photonic Crystals Composed of Plasma Column in Kerr Nonlinear Dielectric Background", *Iranian Journal of Applied Physics*, 12, 17-30, 2022. (In Persian) <https://doi.org/10.22051/ijap.2022.36037.1208>.
- [6] Zhao Y., Zhang YN., Lv RQ, Li J., "Electric Field Sensor Based on Photonic Crystal Cavity with Liquid Crystal Infiltration", *J. Lightwave Technol.*, 35, 3440-3446, 2017. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2576500>.
- [7] Brunetti G., Dell'Olio F., Conteduca D., Armenise MN., Ciminelli C., "Ultra-Compact Tuneable Notch Filter Using Silicon Photonic Crystal Ring Resonator", *J. Lightwave Technol.*, 37, 2970-2980, 2019. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2908364>.
- [8] Hu YC., Chen HM., Xiang T., "Mach-Zehnder modulator based on a tapered waveguide and carrier plasma dispersion in photonic crystal", *J. Opt. Technol.*, 88, 242-251, 2021. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000242>.
- [9] Tamura T., Kondo K., Terada Y., Hinakura Y., Ishikura N., Baba T., "Silica-Clad Silicon Photonic Crystal Waveguides for Wideband Dispersion-Free Slow Light", *J. Lightwave Technol.*, 33, 3034-3040, 2015. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2420685>.
- [10] Bhagat D., Gaikwad M., "A review on production of slow light with material characterization", *Materials Today: Proceedings.*, 43, 1780-1783, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.453>.
- [11] Ebnali-Heidari A., Prokop C., Ebnali-Heidari M., Kamutsch C., "A Proposal for Loss Engineering in Slow-Light Photonic Crystal Waveguides", *J. Lightwave Technol.*, 33, 1905-1912, 2015. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2391196>.
- [12] Mao Y., Li Z., Hu W., Dai X., Xiang Y., "Topological Slow Light Rainbow Trapping and Releasing Based on Gradient Valley Photonic Crystal", *J. Lightwave Technol.*, 40, 5152-5156, 2022. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3171289>.



- [13] Ma CJ, Ren LY., Xu YP., Wang YL, Zhou H., Fu HW., Wen J., “Theoretical and experimental study of structural slow light in a microfiber coil resonator”, *Appl. Opt.*, 54, 5619-5623, 2015. <https://doi.org/10.1364/AO.54.005619>.
- [14] Üstün K., Kurt H., “Ultra slow light achievement in photonic crystals by merging coupled cavities with waveguides”, *Opt. Express*, 18, 21155-21161, 2010. <https://doi.org/10.1364/OE.18.021155>.
- [15] Liang J., Ren LY., Yun MJ., Wang XJ., “Wideband slow light with ultralow dispersion in a W1 photonic crystal waveguide”, *Appl. Opt.*, 50, G98-G103, 2011. <https://doi.org/10.1364/AO.50.000G98>.
- [16] Varmazyari V., Habibiyan H., Ghafoorifard H., “Slow light in ellipse-hole photonic crystal line-defect waveguide with high normalized delay bandwidth product”, *J. Opt. Soc. Amer. B* 31, 771–779, 2014. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.31.000771>.
- [17] Tian H., Long F., Liu W., Ji Y., “Tunable slow light and buffer capability in photonic crystal coupled-cavity waveguides based on electro-optic effect”, *Optics Commun*, 285, 2760-2764, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.01.086>.
- [18] Guillan-Lorenzo O., Diaz-Otero FJ., “Slow light in tunable low dispersion wide bandwidth photonic crystal waveguides infiltrated with magnetic fluids”, *Optics Commun*, 359, 49-52, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.09.057>.
- [19] Kumar D., Devi KM., Kumar R., Chowdhury DR., “Dynamically tunable slow light characteristics in graphene based terahertz meta surfaces”, *Optics Commun*, 491, 126949, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.126949>.
- [20] Khalkhali TF., Bananej A., “Manipulating femtosecond pulse shape using liquid crystals infiltrated one-dimensional graded index photonic crystal waveguides composed of coupled-cavities”, *Physics Letters A*, 381, 3342-3347, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2017.08.022>.
- [21] Busch K., John S., “Liquid-Crystal Photonic-Band-Gap Materials: The Tunable Electromagnetic Vacuum”, *Phys. Rev. Lett.*, 83, 967, 1999. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.967>.
- [22] G V Tkachenko *New Developments in Liquid Crystals (Ukraine: IntechOpen) (2009)*.
- [23] Liang J., Ren LY., Yun MJ., Han X., Wang XJ., “Wideband ultraflat slow light with large group index in a W1 photonic crystal waveguide”, *J. Appl. Phys.*, 110, 063103, 2011. <https://doi.org/10.1063/1.3634074>.
- [24] Mao Y., Li Z., Hu W., Dai X., Xiang Y., “Topological Slow Light Rainbow Trapping and Releasing Based on Gradient Valley Photonic Crystal”, *J. Lightwave Technol.*, 40, 5152-5156, 2022. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3171289>.
- [25] Plihal M., Maradudin AA., “Photonic band structure of two-dimensional systems: The triangular lattice”, *Phys. Rev. B*, 44, 8565, 1991. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.44.8565>.
- [26] Park J., Min B., “Spatiotemporal plane wave expansion method for arbitrary space-time periodic photonic media”, *Opt. Lett.*, 46, 484-487, 2021. <https://doi.org/10.1364/OL.411622>.
- [27] Johnson SG., Joannopoulos JD., “Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell’s equations in a planewave basis”, *Opt. Express*, 8, 173-190, 2001. <https://doi.org/10.1364/OE.8.000173>.
- [28] Fathollahi-Khalkhali T, Shiri R., “An ultra-sensitive refractive index-based photonic crystal biosensor with the coupled cavity-waveguide structure”, *Indian J. Phys.*, 97, 4427–4437, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12648-023-02772-2>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

