



ایجاد ضریب شکست منفی و کوک‌پذیر در بلورهای فوتونی دو بعدی ساخته شده از حفره‌های پر شده با بلور مایع در زمینه سیلیکون

عبدالرسول قرائتی^۱، زهرا زارعیان^۱، تایماز فتح الهی خلخالی^{۲*}

۱. گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی: ۴۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران - ایران

۲. پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۴/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۸/۱۱

چکیده

در این تحقیق یک بلور فوتونی دو بعدی با شبکه مثلثی شامل حفره‌های هوا، پر شده با بلور مایع در زمینه سیلیکون مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از روش بسط موج تخت و روش تفاضل‌های متناهی در حوزه زمان، ساختار نواری فوتونی، منحنی فرکانسی ثابت و نحوه توزیع میدان به ازای پارامترهای مختلف ساختاری بررسی می‌شود. در ادامه با توجه به مطالعات انجام شده و به ازای پارامترهای بهینه، طراحی ساختار به گونه‌ای انجام می‌شود که در یک ناحیه فرکانسی نسبتاً وسیع، این بلور فوتونی از خود رفتاری مشابه با ساختاری با ضریب شکست منفی نشان می‌دهد. خاصیت ضریب شکست منفی در این نوع ساختارها باعث می‌شود تا در یک محدوده فرکانسی خاص $(2\pi c/\alpha) - 0.2700(2\pi c/\alpha)$ ، هنگامی که یک منبع نور در یک سمت بلور فوتونی قرار داده شود، تصویر آن در سوی دیگر بلور فوتونی تشکیل می‌شود. در آخرین مرحله اثر اعمال ولتاژ خارجی بر بلورهای مایع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که اعمال میدان الکتریکی خارجی باعث تغییر ضریب شکست بلور و خواص نوری آن می‌شود و از این تغییرات می‌توان برای کوک‌پذیر کردن خاصیت ضریب شکست منفی استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: بلور فوتونی، ضریب شکست منفی، روش بسط موج تخت، روش تفاضل‌های متناهی حوزه زمان

Creating tunable negative refractive effect in two-dimensional photonic crystals composed of liquid crystal infiltrated air holes in Si background

A. Gharaati¹, Z. Zareian¹, T. Fathollahi Khalkhali^{2*}

1. Department of Physics, Payame Noor University (PNU), P.O.Box: 19395-4697, Tehran – Iran

2. Photonics and Quantum Technology Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 1339-14155, Tehran - Iran

Research Article

Received 7.7.2019, Accepted 2.11.2019

Abstract

In this study, we have considered a two-dimensional triangular lattice photonic crystal composed of liquid crystal infiltrated air holes in Si background. Then, we investigate the band structure, equifrequency contours, and the field intensity distribution for different values of structural parameter; using plane wave expansion and finite-difference time-domain methods. In the following, it is found that for the optimum values of geometrical parameters the structure represents a similar behavior with a system with a negative refractive index for a relatively wide frequency range. The negative refractive index causes that in a specified frequency width, the image of a light source appears perfectly on another side of the designed photonic crystal. In the end, the effect of an externally applied voltage on liquid crystals is studied. Our simulations reveal that applying the external electric field changes the refractive index of structure and can be used for tuning the negative refractive effect.

Keywords: Photonic crystal, Negative refractive effect, Plane wave method, Finite-difference time-domain method

*Email: tfathollahi@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

بلورهای فوتونی دسته جدیدی از محیط‌های نوری هستند که اغلب ساخته دسته بشر هستند و نمونه‌های نادری از آن در طبیعت یافت شده است که وجه مشترک تمامی این ساختارها وجود ضریب شکست متناوب می‌باشد [۱-۲]. این محیط‌ها دارای مشخصات ویژه‌ای هستند که با توجه به آن‌ها می‌توان از بلورهای فوتونی در کاربردهای مختلف استفاده نمود. بر اساس شکل هندسی، این دسته از بلورها به سه زیر گروه یک، دو و سه بعدی تقسیم می‌شوند. در بلور فوتونی یک‌بعدی، تغییرات ضریب شکست تنها در یک بعد اتفاق می‌افتد و در دو بعد دیگر ساختار یکنواخت است. نمونه‌ای از این ساختار، توری براگ است. علاوه بر این، از بلورهای فوتونی یک‌بعدی به‌طور وسیع در ساخت روکش ضد انعکاس استفاده می‌شود که امکان کاهش قابل توجه انعکاس از سطوح را فراهم می‌سازد و به‌طور گسترده برای بهبود کیفیت عدسی‌ها، منشورها و سایر ادوات نوری استفاده می‌شود. در بلورهای فوتونی دو بعدی و سه بعدی تناوب ضریب شکست به ترتیب در دو و سه بعد وجود دارد و تنوع چیدمان آن‌ها در مقایسه با ساختارهای یک‌بعدی بیش‌تر است. تمامی این بلورها (یک، دو و سه‌بعدی) در تشابه با نیمه‌هادی‌ها دارای یک ناحیه ممنوعه فرکانسی هستند، که امکان محبوس‌سازی نور را فراهم می‌کند [۳-۴]. بلورهای فوتونی سه بعدی امکان محدودسازی نور در تمامی ابعاد فضایی را ایجاد می‌کنند، ولی ساخت این دسته از بلورهای فوتونی با فن‌آوری امروز سخت و پرهزینه است. لذا بلور فوتونی دو بعدی به دلیل کاربردهای مشابه با بلورهای فوتونی سه بعدی و همچنین امکان ساخت آسان با فن‌آوری کنونی مورد علاقه محققان قرار گرفته‌اند.

یکی از ویژگی‌های بلورهای فوتونی دو بعدی کوک‌پذیر بودن آن‌هاست. در این دسته از بلورهای فوتونی می‌توان با به کار بردن پلاسما، بلور مایع یا فلزات و اعمال یک میدان الکتریکی یا مغناطیسی خارجی، خواص نوری بلور فوتونی را تغییر داد. یکی از پر کاربردترین این مواد، بلورهای مایع هستند. مولکول‌های بلور مایع تحت تحریک میدان الکتریکی خارجی، هنگامی که ولتاژ اعمالی از ولتاژ بحرانی بزرگ‌تر شود، دچار تغییر در جهت‌گیری می‌شوند و در نتیجه تغییر قابل ملاحظه‌ای در ضرایب شکست بلور مایع به‌وجود می‌آید. بر این اساس، ساختار نواری بلور فوتونی شامل بلور مایع با اعمال ولتاژ تغییر می‌کند که منجر به تغییر در خواص نوری بلور می‌شود. بنابراین اگر بلور مایع یکی از عناصر تشکیل‌دهنده بلور فوتونی

باشد، می‌توان با اعمال یک میدان الکتریکی خارجی، ضرایب شکست حداقل یک جزء تشکیل‌دهنده بلور فوتونی را تغییر داد. با این تغییر ضریب شکست می‌توان خواصی را که بلور فوتونی متناسب با ساختار آن از خود نشان می‌دهد را کوک‌پذیر کرد [۵-۶]. به‌عنوان نمونه، می‌توان از بلورهای مایع برای تنظیم‌پذیر کردن گاف فوتونی در بلورهای فوتونی استفاده کرد [۷].

طی سال‌های اخیر مطالعات فراوانی بر روی مواد با ضریب شکست منفی انجام شده و همچنین ساخت مواد با چنین خاصیتی در عمل نیز محقق شده است. این خاصیت ابتدا در سال ۱۹۸۶ توسط وسلاگو به‌صورت تئوری بیان شد [۸]. ویژگی اصلی این مواد این است که در آن‌ها هم ضریب گذردهی الکتریکی ϵ و هم ضریب تراوایی مغناطیسی μ ، منفی هستند. منفی بودن این دو پارامتر باعث جهت‌گیری پادموازی بردار موج \vec{k} و بردار پوینتینگ \vec{S} نسبت به هم می‌شود. در نتیجه، جهت انتشار و جهت سرعت فاز یکسان نخواهد بود. در سال‌های ۲۰۰۲ میلادی، نوئومی ایده استفاده از بلورهای فوتونی با شبکه مثلثی به‌عنوان ساختارهایی با ضریب شکست منفی را مطرح کرد [۹]. در ادامه لو و دیگران در سال ۲۰۰۲ نوع دیگری از بلورهای فوتونی مربعی دو بعدی را مورد مطالعه قرار دادند که توانایی ایجاد ضریب شکست منفی را برای قطبش TE (قطبش الکتریکی) برای تمامی زوایای فرودی داشت [۱۰]. در ادامه نیز مطالعات دیگری در این زمینه بر روی بلورهای فوتونی صورت گرفت.

در این مقاله محققین تصمیم دارند ابتدا یک بلور فوتونی دو بعدی شامل حفره‌های هوا در زمینه ماده دی‌الکتریک سیلیکون با ساختار مثلثی را طراحی نمایند. سپس با استفاده از روش بسط موج تخت ساختار نواری آن را مورد مطالعه قرار دهند. در ادامه، این حفره‌های هوا با بلورهای مایع پر شده و مجدداً خواص نواری و نمودارهای منحنی فرکانس ثابت آن با اعمال یک ولتاژ خارجی مورد بررسی قرار گیرد و در پایان شرایط ایجاد محیط با ضریب شکست منفی و همچنین میزان تغییرات آن به ازای اعمال ولتاژ خارجی به صورت کامل بررسی خواهد شد.

۲. ساختار مورد بررسی و روش محاسباتی

ساختار فوتونی مورد بررسی در این تحقیق به‌صورت شبکه مثلثی از حفره‌های هوا با سطح مقطع دایروی در زمینه ماده همسانگرد سیلیکون $n_{Si} = 3/47$ می‌باشد که فضای داخل

همان‌گونه که در بخش مقدمه گفته شد، مواد با ضریب شکست منفی در یک محدوده فرکانسی دارای گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی منفی خواهند بود. وسلاگو برای اولین بار ضریب شکست با علامت منفی را انتخاب کرد به گونه‌ای که ϵ و μ هر دو دارای مقادیر منفی خواهند بود و n به صورت $-\sqrt{\epsilon\mu}$ تعریف می‌شود. اگر ضریب شکست منفی باشد سرعت فاز در آن منفی خواهد شد و معادلات ماکسول برای چنین محیطی بدون منبع به شکل زیر نوشته می‌شود [۱۵].

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -i \frac{\omega}{c} \mu \vec{H} \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = i \frac{\omega}{c} \epsilon \vec{E}$$

در روابط فوق \vec{H} بردار میدان مغناطیسی، \vec{E} بردار میدان الکتریکی، ϵ تابع دی‌الکتریک و ω فرکانس زاویه‌ای و c سرعت نور است. حال با فرض آن که موج تختی به صورت $\exp(i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t))$ منتشر شود، معادلات ماکسول را می‌توان به صورت زیر ساده‌سازی کرد:

$$\vec{k} \times \vec{E} = -\frac{\omega}{c} \mu \vec{H}, \quad \vec{k} \times \vec{H} = +\frac{\omega}{c} \epsilon \vec{E} \quad (4)$$

روابط فوق با فرض ناچیز بودن اتلاف در محیط برقرار می‌باشد. اگر محیطی را انتخاب نماییم که قسمت حقیقی ϵ و μ منفی باشد و هم‌چنین قسمت موهومی آن بسیار کوچک باشد به طوری که بتوان از آن صرف‌نظر کرد، آن‌گاه \vec{k}, \vec{E} و \vec{H} تشکیل یک دستگاه راستگرد نمی‌دهد، بنابراین \vec{k} با $\vec{E} \times \vec{H}$ هم‌جهت نخواهد بود، پس ضریب شکست این مواد باید مقداری منفی باشد. از آن‌جا که بردار موج \vec{k} با سرعت فاز هم‌جهت است و بردار پوئین تینگ ($\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$) هم‌جهت با سرعت گروه می‌باشد، در مواد چپ‌گرد \vec{k}, \vec{S} و در نتیجه سرعت فاز و گروه در خلاف جهت هم هستند. به همین دلیل است که بردارهای \vec{k}, \vec{E} و \vec{H} در مواد چپ‌گرد یا همان شبه مواد تشکیل یک دستگاه چپ‌گرد را می‌دهند در حالی که در مواد معمولی یک دستگاه راست‌گرد را تشکیل می‌دهند.

در تحلیل بلورهای فوتونی، روش‌های عددی متنوعی وجود دارند که هر یک دارای مزایا و معایبی هستند. به‌طور کلی برای

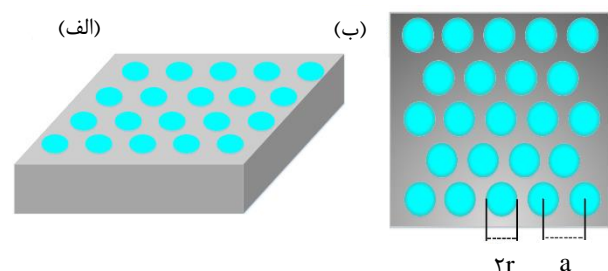
حفره‌های هوا با بلور مایع پر شده است. بلور مایع ماده ناهمسانگردی است که دارای ضرایب شکست عادی و غیرعادی می‌باشد. بلور مایع مورد استفاده در این تحقیق فنیل استیلین است که ضرایب شکست عادی و غیرعادی آن به ترتیب $n_o^{LC} = 1.59$ و $n_e^{LC} = 2.223$ است [۱۱-۱۲]. در این تحقیق فرض شده که راستای تناوب بلور در صفحه X-Y واقع شده است و حفره‌های پر شده از بلور مایع در راستای محور Z قرار دارد. جهت‌گیری بلور مایع با اعمال یک میدان الکتریکی خارجی تغییر می‌کند و قابل کنترل است. شکل ۱ نشان‌دهنده جهت‌گیری بلورهای مایع نسبت به محورهای مختصات می‌باشد و θ زاویه آن نسبت به محور Z است. بدون اعمال هیچ میدان خارجی جهت‌گیری آن‌ها در راستای محور X است. ولی با اعمال یک میدان الکتریکی خارجی در راستای حفره‌های پر شده از بلور مایع (محور Z)، این بلورها شروع به تغییر جهت به سمت محور Z می‌کنند. ضریب شکست مؤثر در چنین حالتی عبارت است از [۱۳]:

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

و رابطه زاویه θ با ولتاژ اعمالی عبارت است از:

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

که در رابطه فوق V_c ولتاژی است که در آن تغییر جهت بلورهای مایع شروع می‌شود و V_0 مقدار ثابتی است. لازم به ذکر است که مشاهدات تجربی به ما نشان می‌دهد که تغییرات ولتاژی بین صفر تا ده ولت می‌تواند بلورهای مایع را به تمام جهت‌گیری‌های دلخواه وادار نماید [۱۴].



شکل ۱. طرح‌واره بلور فوتونی با شبکه مثلثی شامل حفره‌های پر شده از بلور مایع در زمینه سیلیکون (الف) نمای کناری و (ب) نمای بالا.

که در آن

$$H_{\vec{G}, \vec{G}'} = \|\vec{k} + \vec{G}\| \|\vec{k} + \vec{G}'\| \eta(\vec{G} - \vec{G}') \begin{bmatrix} \hat{e}_\tau \cdot \hat{e}'_\tau & -\hat{e}_\tau \cdot \hat{e}'_\tau \\ -\hat{e}_\tau \cdot \hat{e}'_\tau & \hat{e}_\tau \cdot \hat{e}'_\tau \end{bmatrix} \quad (9)$$

و در نهایت از طریق ماتریس ذکر شده می‌توان ساختار نواری فوتونی را محاسبه نمود.

در این تحقیق از روش تفاضل‌های متناهی در حوزه زمان برای شبیه‌سازی نحوه‌ی انتشار نور در بلورهای فوتونی استفاده می‌شود. این روش بر پایه گسسته‌سازی فضا یا به عبارتی جایگزینی فضای پیوسته با مجموعه‌ی گسسته‌ای از نقاط می‌باشد [۱۷]. سپس مشتقات در معادلات ماکسول با تفاضل‌های محدود جای‌گزین شده، که منجر به سیستمی از معادلات جبری در مختصات می‌شود. این سیستم معادلات به‌طور ترتیبی با شروع از شرایط اولیه و مرزی و با حل معادلات ماکسول روی یک شبکه گسسته، توزیع میدان را به‌دست می‌دهد. در شبیه‌سازی‌های مربوط به نحوه‌ی چگونگی توزیع میدان از یک پالس گوسی شکل به‌عنوان منبع میدان استفاده شده است. این پالس به شکلی طراحی شده است که میدان الکتریکی آن فقط در راستای محور Z دارای مؤلفه غیرصفر می‌باشد و مؤلفه الکتریکی میدان در صفحه Y-X صفر می‌باشد. در اصطلاح به این نوع پالس TM Gaussian pulse گفته می‌شود. لازم به ذکر است که در این تحقیق یک ناحیه مستطیل شکل به‌عنوان ناحیه محاسباتی در نظر گرفته شده و تناوب بلور در راستای صفحه Y-X می‌باشد و هر واحد مربع شکل از این ناحیه محاسباتی به ۳۰×۳۰ ناحیه تقسیم شده است. واضح است که با افزایش این ناحیه‌های مشبک و کوچک‌تر شدن اندازه آن‌ها دقت محاسبات بالاتر خواهد رفت. در پایان این بخش لازم به‌ذکر است که به‌منظور استفاده از روش بسط موج تخت و تفاضل‌های متناهی در حوزه زمان و مطالعه بلورهای فوتونی به صورت نظری، نیاز به استفاده از برنامه‌نویسی و شبیه‌سازی کامپیوتری خواهد بود. نرم‌افزارهای زیادی وجود دارند که بر مبنای روش بسط موج تخت و روش تفاضل‌های متناهی طراحی شده‌اند. یکی از بهترین و پرکاربردترین این نرم‌افزارها^۱ MPB و MEEP^۲ می‌باشد که توسط محققین دانشگاه MIT^۳ طراحی شده و در این تحقیق از آن استفاده شده است [۱۸-۱۹].

مطالعه عددی ساختارهای دی‌الکتریک مانند بلورهای فوتونی، دو روش محاسباتی وجود دارد: روش‌های عددی در حوزه فرکانس و روش‌های عددی در حوزه‌ی زمان.

از بین روش‌های عددی در حوزه فرکانس در این تحقیق از روش بسط موج تخت برای محاسبه نمودار ساختار نواری و منحنی‌های هم‌فرکانس ثابت استفاده می‌شود [۱۶]. به‌طور خلاصه باید بگوییم که برای به‌دست آوردن ساختارهای نواری و نمودارهای هم‌فرکانس ثابت لازم است که معادله مستقل از زمان ماکسول، $(\frac{\omega}{c})^2 \vec{H}(\vec{r}) = \nabla \times [\frac{1}{\epsilon(\vec{r})} \nabla \times \vec{H}(\vec{r})]$ را در ویژه پایه‌های توابع فوریه بسط دهیم. به‌دلیل 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 فوق \vec{R} بردار شبکه فضای حقیقی است. برای حل معادله مستقل از زمان ماکسول و تبدیل آن به یک معادله ویژه مقداری همانند روش حل معادله شردینگر در فیزیک حالت جامد، میدان مغناطیسی $\vec{H}(\vec{r})$ را برحسب بردارهای پایه شبکه وارون بسط داده و رابطه زیر را به‌دست می‌آوریم:

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

می‌توان تابع دی‌الکتریک $\epsilon(\vec{r})$ را نیز مانند میدان مغناطیسی $\vec{H}(\vec{r})$ بر حسب بردارهای پایه شبکه وارون بسط داد:

$$\epsilon^{-1}(\mathbf{r}) = \sum_{\vec{G}} \eta(\vec{G}) e^{i\vec{G} \cdot \mathbf{r}} \quad (7)$$

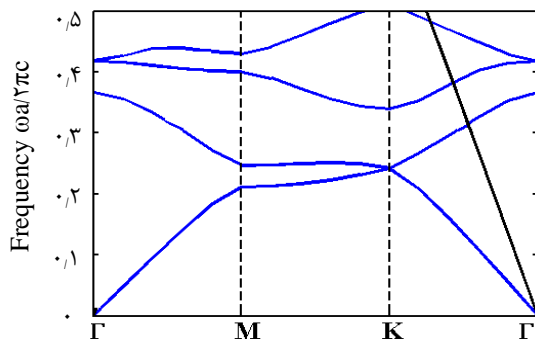
در روابط فوق \vec{k} بردار موج در ناحیه اول بریلوئن و \vec{G} بردار شبکه معکوس است. λ نشان‌گر دو نوع قطبش برای هر موج تخت است، به‌طوری‌که بردارهای واحد \hat{e}_λ ($\lambda = 1, 2$) با توجه به طبیعت عرضی بودن میدان مغناطیسی ($\nabla \cdot \vec{H}(\vec{r}) = 0$) بر بردار $\vec{k} + \vec{G}$ عمود هستند. با جای‌گذاری روابط (۶) و (۷) در معادله مستقل از زمان ماکسول، یک معادله ماتریسی خطی به‌صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\sum_{\vec{G}'} H_{\vec{G}, \vec{G}'} \begin{pmatrix} h_{\vec{G}', 1} \\ h_{\vec{G}', 2} \end{pmatrix} = \frac{\omega^2}{c^2} \begin{pmatrix} h_{\vec{G}, 1} \\ h_{\vec{G}, 2} \end{pmatrix} \quad (8)$$

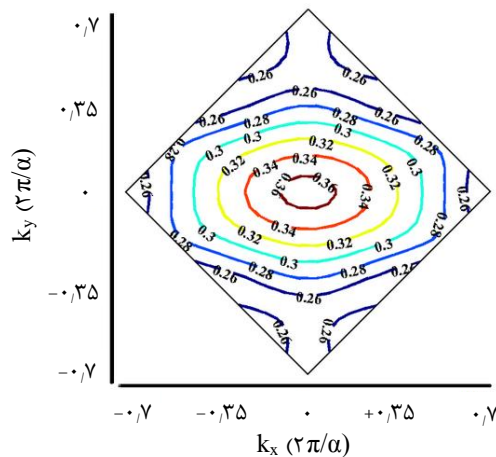
1. MIT Photonic BANDS
2. MIT Electromagnetic Equation Propagation
3. Massachusetts Institute of Technology

۳. نتایج و بحث

شکل (۲ الف) ساختار نواری فوتونی شبکه را برای مُد TM نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود خط نور با نوار دوم از ساختار نواری نقطه تلاقی دارد و با توجه به شرایط ذکر شده برای به وجود آمدن خاصیت ضریب شکست منفی، این امکان وجود دارد که در این ناحیه و فرکانس‌های پایین‌تر از آن شرایط ضریب شکست منفی به وجود آید. در مرحله بعد با استفاده از روش بسط موج تخت منحنی با فرکانس ثابت مربوط به همین نوار محاسبه و رسم شده است. نتایج این محاسبات به‌طور خلاصه در شکل (۲ ب) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به ازای فرکانس‌های کم‌تر از $(\omega a / \pi c) = 0.32$ منحنی آرام آرام از حالت دایروی خارج و شکل محدب به خود می‌گیرد. در واقع در این ناحیه فرکانسی شرط دوم ذکر شده برای ایجاد خاصیت ضریب شکست منفی به وجود آمده است، در نتیجه می‌توان انتظار داشت با برآورده شدن دو شرط مذکور خاصیت ضریب شکست منفی به خوبی قابل مشاهده باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۲. الف) ساختار نواری فوتونی شبکه مثلثی متشکل از حفره‌های پر شده از بلور مایع، بدون اعمال میدان خارجی، در زمینه سیلیکون برای قطبش الکتریکی به ازای $r = 0.42a$ (ب) و منحنی فرکانس ثابت متناظر با نوار دوم در ساختار نواری فوتونی.

در این بخش بررسی خود را با یک ساختار مثلثی شکل از حفره‌های دایروی شکل هوا در زمینه‌ای از سیلیکون آغاز می‌نماییم. در ادامه فرض می‌کنیم که این حفره‌های هوا از بلور مایع پر شده است. در این بلور فوتونی r شعاع حفره‌های هوا و a ثابت شبکه (فاصله بین مرکز دو حفره همسایه با کم‌ترین فاصله) می‌باشد. در بلورهای فوتونی دو بعدی برای نور تابشی عمود بر محور میله‌ها دو نوع قطبش الکتریکی (مُد TM) و مغناطیسی (مُد TE) وجود دارد. در قطبش الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در راستای میله‌ها یا حفره‌های تشکیل‌دهنده بلور قرار دارند [۷، ۱۱]. در این تحقیق قطبش TM مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای به وجود آمدن شرایطی مشابه با ساختاری با ضریب شکست منفی باید دو شرط در بلورهای فوتونی باید وجود داشته باشد. اول این که نمودارهای با فرکانس ثابت باید در ناحیه فرکانسی مورد نظر محدب باشد یا به عبارت دیگر باید انحنای آن به سمت بیرون باشد تا اطمینان حاصل شود که سرعت گروه موج فرودی و موج شکسته شده در یک سوی خط عمود بر فصل مشترک دو سطح قرار دارند و دیگری این که مساحت منحنی فرکانس ثابت در فرکانس مورد نظر باید بزرگ‌تر از منحنی مربوط به خط نور (نمودار پاشندگی $(\omega = ck/n)$) برای محیط ساده بدون هیچ تناوبی) در همان فرکانس باشد. به عبارت دیگر در ساختار نواری بلور فوتونی مورد مطالعه، فرکانس مورد نظر باید پایین‌تر از محل تلاقی خط نور با نوار مورد نظر باشد [۹].

با توجه به این که حفره‌های هوا از بلور مایع پر شده است، ابتدا حالتی را در نظر می‌گیریم که هیچ‌گونه میدان الکتریکی خارجی به بلور فوتونی اعمال نشده است در این حالت بلورهای مایع در صفحه Y-X قرار دارند یا به عبارت دیگر جهت‌گیری خاصی وجود ندارد یا $\theta = 0^\circ$.

در این حالت به ازای تمامی مقادیر ممکن از شعاع حفره‌های پر شده از بلور مایع، یعنی از کم‌ترین مقدار ممکن تا بیش‌ترین مقدار ممکن که در آن حفره‌ها در آستانه‌ی همپوشانی قرار می‌گیرند، ساختار نواری و منحنی فرکانس ثابت را با استفاده از روش بسط موج تخت مورد بررسی قرار گرفت.

بعد از بررسی همه حالت‌های ممکن و محاسبه ساختار نواری و منحنی فرکانس ثابت به ازای تمامی مقادیر ممکن از شعاع حفره‌های پر شده از بلور مایع، مشاهده شد که به ازای $0.38a < r < 0.44a$ شرایط ممکن برای به وجود آمدن حالتی با خواص ضریب شکست منفی در ساختار قابل مشاهده است.

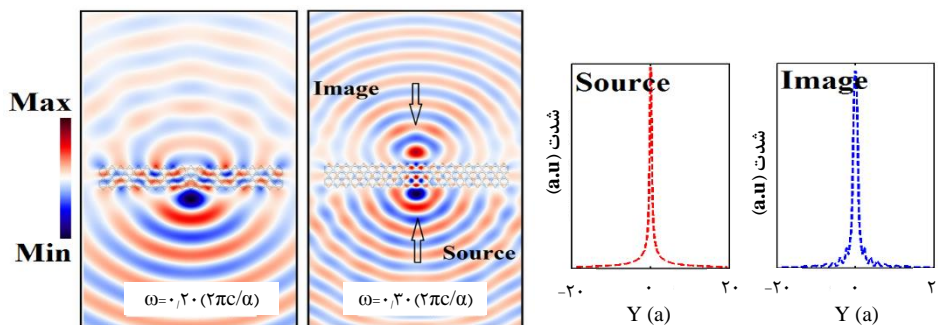
زاویه θ ، تصاویر تشکیل شده در سوی دیگر بلور را بدون تغییر در موضع منبع یا فرکانس آن بررسی کردند. شکل ۴ به ازای زوایای مختلف جهت‌گیری مولکول‌های بلور مایع، تصویر تشکیل یافته در سوی دیگر بلور فوتونی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با تغییر میدان الکتریکی خارجی محل تصویر تشکیل یافته تغییر می‌کند و به این ترتیب می‌توان تصویر را در نقاط مختلفی متناسب با نیاز تشکیل داد.

تمامی مطالعات فوق بر روی تک‌فرکانس تابشی $(2\pi c/a)$ 0.3000 انجام شده است. از روی نمودارهای شکل ۲ می‌توان دریافت که به ازای فرکانس‌های پایین‌تر از محل برخورد خط نور تا جایی که منحنی فرکانس ثابت تحذب خود را حفظ کند، خاصیت ضریب شکست منفی قابل مشاهده است. برای بررسی این موضوع منبع نور مشابه ولی با فرکانس‌های دیگری در همان محل قبلی قرار گرفت و به‌عنوان موج فرودی به بلور فوتونی تابانیده شد. در این حالت فرض می‌شود که هیچ میدان الکتریکی خارجی به سیستم وارد نشده و بلورهای مایع دارای جهت‌گیری اولیه خود هستند.

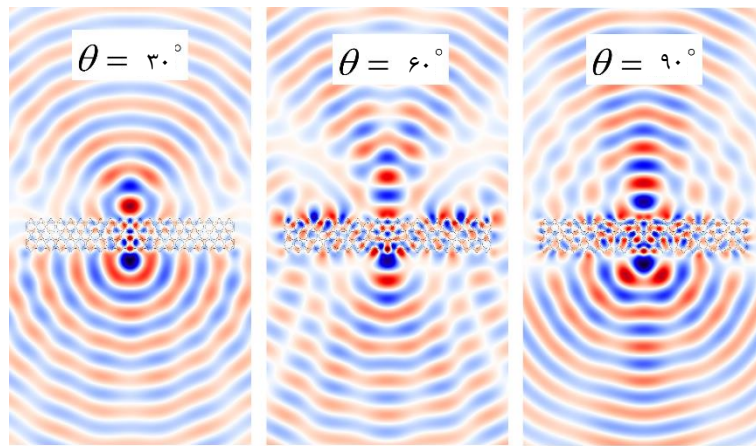
همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در بازه وسیعی از فرکانس‌های نور فرودی، تصویر منبع به خوبی در سوی دیگر بلور تشکیل شده است. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده به ازای فرکانس نوری در بازه $(2\pi c/a)$ 0.3131 - $(2\pi c/a)$ 0.2700 خاصیتی مشابه با ساختار دارای ضریب شکست منفی در بلور فوتونی طراحی شده قابل مشاهده است. تا به حال بیش‌تر ساختارهای طراحی شده از بلورهای فوتونی در یک فرکانس خاص یا محدوده کوچکی از فرکانس خاصیت ضریب شکست منفی را از خود نشان می‌دادند، ولی در این ساختار، این ناحیه فرکانسی بسیار گسترده است. هم‌چنین کیفیت تصویر تشکیل یافته بسیار مناسب است و می‌توان خواص آن را از طریق میدان الکتریکی خارجی تغییر داد.

در این قسمت به منظور بررسی و مشاهده واقعی خاصیت ضریب شکست، بلور فوتونی طراحی شده را در مقابل یک منبع نوری تک فرکانس قرار می‌دهیم. در این حالت فرض می‌کنیم پهناي این منبع نوری $0.5a$ می‌باشد. پهناي بلور فوتونی مورد بررسی در راستای محور y ها $2\sqrt{3}a$ فرض شده است هم‌چنین فاصله منبع نوری از بلور فوتونی $2\sqrt{3}a$ - در نظر گرفته شده است. با توجه به مطالب بیان شده انتظار داریم که یک تصویر متقارن در سوی دیگر بلور فوتونی تشکیل شود.

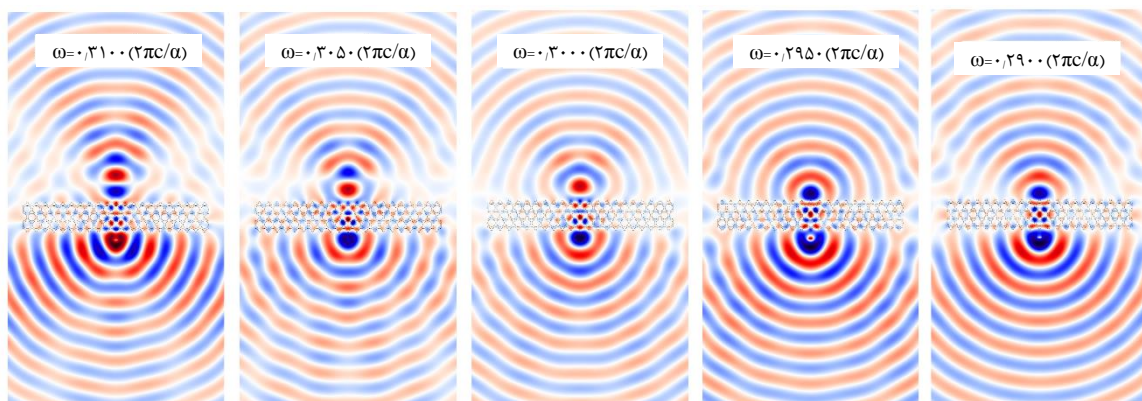
شکل ۳ توزیع میدان الکترومغناطیسی ناشی از برخورد منبع نور با فرکانس $(2\pi c/a)$ 0.3000 به ساختار بلور فوتونی را نشان می‌دهد. این منبع نور در فاصله $2\sqrt{3}a$ - از ساختار قرار دارد و مشاهده می‌شود که تصویر همین منبع نور در سوی دیگر بلور فوتونی تشکیل شده است. هم‌چنین برخورد نور ناشی از یک منبع نوری دیگر با همان مشخصات و با فرکانس متفاوت در این شکل نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با توجه به این که فرکانس $(2\pi c/a)$ 0.2000 شرایط لازم برای ایجاد خاصیت ضریب شکست منفی را ندارد، تصویر آن در سوی دیگر بلور مشاهده نمی‌شود. هم‌چنین در این شکل نحوه توزیع میدان در محل منبع و محل تشکیل تصویر در راستای محور y ها نشان داده شده است. به خوبی قابل ملاحظه است که تصویر تشکیل شده تمامی خواص منبع نور اصلی را دارد. می‌دانیم که فقط تحت شرایطی که ضریب شکست محیط منفی باشد، شکل منبع نور در سوی دیگر ساختار تشکیل می‌شود و با توجه به تصاویر نشان داده در شکل ۳ به خوبی می‌توان دریافت که در این ساختار با استفاده از مواد معمولی مانند مواد دی‌الکتریک و بلورهای مایع چنین خاصیتی به خوبی به دست آمده است. در مرحله بعد، تأثیر 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 θ تغییر می‌کند. در این مرحله محققین، به ازای تمامی مقادیر ممکن از



شکل ۳. تصویر ناشی از یک منبع نور با فرکانس $(2\pi c/a)$ 0.2 و $(2\pi c/a)$ 0.3 و پروفایل شدت میدان الکترومغناطیسی در محل حضور منبع و تصویر برای فرکانس $(2\pi c/a)$ 0.3 .



شکل ۴. توزیع میدان الکترومغناطیسی در دو سوی بلور برای حالتی که زاویه θ تغییر کرده به ازای فرکانس فرودی $0.3(\pi c/\alpha)$.



شکل ۵. توزیع میدان الکترومغناطیسی به ازای فرکانسهای فرودی متفاوت.

از حد پراش، تصویرسازی زیر طول موج، اثر عدسی کامل و ابر منشور، اثر خود موازی سازی، شنل نامرئی و ادوات جنگی، جاسوسی و رادارگریز و کاربردهای فراوان دیگر استفاده نمود.

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق یک بلور فوتونی با ساختار مثلثی شامل حفره های هوا پر شده از بلور مایع در زمینه سیلیکون مورد بررسی قرار گرفت. بلورهای مایع موادی هستند که با استفاده از اعمال یک میدان خارجی می توان خواص نوری آنها را تغییر داد. در مرحله اول، بدون هیچ گونه اعمال میدان خارجی ساختار نواری فوتونی محاسبه شد و برای نوارهای مختلف منحنی فرکانس ثابت شبیه سازی شد. سپس با توجه به شرایط لازم برای به وجود آمدن خاصیت ضریب شکست منفی، بررسی شد که به ازای چه پارامترهای ساختاری، این خاصیت قابل مشاهده است. نتایج محاسبات نشان داد که به ازای پارامترهای بهینه امکان ایجاد بلور فوتونی با خاصیت ضریب شکست منفی در بازه فرکانسی نسبتاً وسیعی وجود دارد. همچنین این شبیه سازی ها نشان می دهد که می توان با اعمال میدان خارجی محل و نوع تصویر تشکیل یافته در سوی دیگر بلور را تغییر داد. از خاصیت ضریب شکست منفی به دست آمده می توان در بررسی موج بر بلور فوتونی و نور کُند، کانونی کردن امواج فراتر

1. E. Yablonovitch, *Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics*, [Phys. Rev. Lett.](#) **58**, 2059 (1987).
2. S. John, *Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices*, [Phys. Rev. Lett.](#) **58**, 2486 (1987).
3. C.M. Anderson, K.P. Giapis, *Larger Two-Dimensional Photonic Band Gaps*, [Phys. Rev. Lett.](#) **77**, 2949 (1996).
4. H. Liu, et al, *Characteristics of photonic band gaps in woodpile three-dimensional terahertz photonic crystals*, [Opt. Express.](#) **15**, 695 (2007).
5. K. Busch, S. John, *Liquid-Crystal Photonic-Band-Gap Materials: The Tunable Electromagnetic Vacuum*, [Phys. Rev. Lett.](#) **83**, 967 (1999).
6. R. Ozaki, et al, *Electrically color-tunable defect mode lasing in one-dimensional photonic-band-gap system containing liquid crystal*, [Appl. Phys. Lett.](#) **82**, 3593 (2003).
7. Hiroyuki Takeda, Katsumi Yoshino, *Tunable refraction effects in two-dimensional photonic crystals utilizing liquid crystals*, [Phys. Rev. E.](#) **67**, 056607 (2003).
8. V.G. Veselago, *The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ* , [Phys-Uspekhi.](#) **92**, 517 (1967).
9. M. Notomi, *Negative refraction in photonic crystals*, [Opt Quant Electron.](#) **31**, 133 (2002).
10. C. Lou, et al, *All angle negative refraction without negative effective index*, [Phys. Rev. B.](#) **65**, 2011041 (2002).
11. T. Fathollahi Khalkhali, A. Bananej, *Tunable complete photonic band gap in anisotropic photonic crystal slabs with non-circular air holes using liquid crystals*, [Optics Commun.](#) **369**, 79 (2016).
12. Hiroyuki Takeda, Katsumi Yoshino, *TE-TM mode coupling in two-dimensional photonic crystals composed of liquid-crystal rods*, [Phys. Rev. E.](#) **70**, 026601 (2004).
13. T. Fathollahi Khalkhali, A. Bananej, *Manipulating femtosecond pulse shape using liquid crystals infiltrated one-dimensional graded index photonic crystal waveguides composed of coupled-cavities*, [Phys. Lett. A.](#) **381**, 3342 (2017).
14. Hsin-Yu Yao, Shang-Min Yeh, *Voltage-Controllable Guided Propagation in Nematic Liquid Crystals*, [Advances in Condensed Matter Physics](#), Vol. **2018**, Article ID 8185641, 4 (2018).
15. S.A. Ramakrishna, *Physics of negative refractive index materials*, [Rep. Prog. Phys.](#) **68**, 449 (2005).
16. B. Rezaei, et al, *Absolute band gap properties in two-dimensional photonic crystals composed of air rings in anisotropic tellurium background*, [Optics Commun.](#) **282**, 2861 (2009).
17. S.H. Chang, A. Taflove, *Finite-difference time-domain model of lasing action in a four-level two-electron atomic system*, [Opt. Express.](#) **12**, (2004) 3827.
18. A.F. Oskooi, et al, *MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method*, [Comput. Phys. Commun.](#) **181**, 687 (2010).
19. S.G. Johnson, J.D. Joannopoulos, *Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a plane wave basis*, [Opt. Express.](#) **8**, 173 (2001).