

طراحی و شبیه‌سازی لنزهای بلور فوتونی در ساختارهای نانومتری متفاوت

حمیدرضا طهماسبی | احمدرضا دارائی*

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، استان سیستان و بلوچستان

چکیده: با توجه به نیاز مدارات مجتمع نوری به ساختارهایی که نور را در مسیرهای مورد لزوم هدایت و در مکان‌های مناسب متمرکز کنند، استفاده از ویژگی‌های بلورهای فوتونی برای حصول لنزهای بلور فوتونی، مطرح می‌شود. این لنزها دارای قابلیت بالای تمرکز مدها در نقطه کانونی نانومقیاس، با اتلاف کم و قدرت تمرکز زیاد هستند. در این مقاله، با طراحی لنزهای بلور فوتونی با زدایش شیمیایی حفره‌های هوا در آرایش شش‌ضلعی در بستر دی‌الکتریک SiO_2 و با تاباندن امواج نوری تخت به این ساختارهای نانومتری متفاوت با چینش و گام‌های متفاوت و برهم‌کنش نور با ساختار، در نتیجه نور در نقاط مطلوبی متمرکز و کانونی می‌شود. نتایج حاصله از شبیه‌سازی، شامل دامنه میدان الکتریکی، شدت، توان و پهنای تمرکز با استفاده از برش مقطعی مدی در طول موج پنجره اول مخابراتی (850 nm)، بررسی شدند. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که این پارامترها را می‌توان در یک مقدار گام مشخص و بهینه، 385 nm، برای مقاصد کنترل و تمرکز لنزی مطلوبی در ابعاد کوچک نانومقیاس، به مقدار کسری از طول موج، $49/40 \mu\text{m}$ ، به کار برد. همچنین، نتیجه کمیت حساسیت بدست آمده برای استفاده از ساختار به‌عنوان حس‌گر نوری، به مقدار 645 nm/RIU است.

واژگان کلیدی: لنز بلور فوتونی، ضریب شکست تدریجی، گاف نواری، آرایه براگ، حفره‌های هوای باریک‌شونده.

* Corresponding author: daraei@phys.usb.ac.ir

بسامدی متأثر از این ویژگی‌ها، تحت نام گاف نواری فوتونی معرفی می‌شود. در بلورهای فوتونی، عامل دخیل در گاف نواری فوتونی، چینش تناوبی قرارگیری مواد دی‌الکتریک با هندسه خاص است. پهنای گاف نواری، بازه بسامدهای مجاز نور برای انتشار را کنترل می‌کنند و هرچه کنتراست ثابت دی‌الکتریک یا ضریب شکست در تناوب به کار رفته در بلور بیشتر باشد، گاف نواری پهن‌تر خواهد بود [۱، ۲].

معادله حاکم بر رفتار امواج در محیط مذکور، معادله موج الکترومغناطیسی برآمده از معادلات ماکسول است [۴]. بنابراین، می‌توان بلورهای فوتونی را طوری طراحی کرد که دارای گاف نواری کامل برای دو قطبش عرضی الکتریکی (Transverse

۱- مقدمه

بلورهای فوتونی ساختارهای هستند که می‌توانند نور را در ابعاد نانومقیاس تولید، تقویت، کنترل و هدایت نمایند و به دلیل بالا بودن سرعت نور نسبت به الکترون‌ها، امروزه سیستم‌های فوتونیک‌ی بتدریج جایگزین سیستم‌های الکترونی می‌شوند و ساختارهای متفاوتی از این بلورها طوری طراحی و ساخته می‌شوند تا این امور را محقق سازند [۱-۳].

همانند ساختار تناوبی اتم‌ها در نیم‌رساناها، بلورهای فوتونی دارای ساختار تناوبی ضریب شکست در یک، دو و یا سه بُعد با چینش هندسی مثلثی، شش‌گوشی، مربعی، مستطیلی و غیره، هستند و انتشار و یا عدم انتشار فوتون‌ها در این ساختارها در یک گستره

گذردهی نسبی است و می‌توان آن را بر حسب ضریب شکست، که کمیتی وابسته به بسامد موج فرودی است، مطابق رابطه (۲) نوشت:

$$\epsilon_r = (n - ik)^2 \quad (2)$$

که n قسمت حقیقی ضریب شکست و k قسمت موهومی ضریب شکست یا همان ضریب خاموشی ماده است. k برای سیلیکا (SiO_2) که در ساختار شبیه‌سازی استفاده شده، برابر با صفر است و در نتیجه، $\epsilon_r = n^2$ در نظر گرفته می‌شود. k_0 که عدد موج در فضای آزاد است، به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$k_0 = \omega_0 \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = \omega / c_0 \quad (3)$$

که c_0 سرعت نور در خلاء و ω بسامد زاویه‌ای است.

برای شبیه‌سازی در این مقاله، از روش المان محدود (FEM) بهره برده شد. با توجه به تقارن‌ها، مدل سه‌بعدی با یک سیستم دوبعدی جایگزین شد تا سرعت محاسبات افزایش یابد. حداکثر اندازه اجزاء شبکه‌بندی (mesh) مثلی در این روش، به مقدار کسری از طول موج در محیط، به اندازه $\lambda/10$ استفاده می‌شود. فیزیک مورد نظر، شامل حل معادله موج الکترومغناطیسی هلمهولتز بر اساس دامنه بسامدی (Electromagnetic Waves, Frequency Domain) است. شرایط مرزی برای حل معادله، همان شرایط مرسوم پیوستگی مؤلفه مماسی میدان الکتریکی در فصل مشترک‌های حفره‌های-هوا-دی‌الکتریک برای امواج الکترومغناطیسی، به فرم محاسباتی رسانای الکتریکی کامل (Perfect Electric Conductor) است. دامنه محاسباتی در کرانه‌های سیستم به صورت شرط مرزی پراکندگی (Scattering Boundary Condition) محدود و بریده شده است. به‌طور کلی در طراحی هندسه ساختار، مستطیلی با ابعاد $17 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ شامل ۴۲ حفره-هوا در هر زوج ردیف، به شکل تکرارپذیر با شعاع متغیر از کناره‌ها به سمت مرکز، در نظر گرفته شده‌اند.

نمونه‌ای از تصویر ساختار طراحی شده بلور فوتونی، در شکل ۱ نشان داده شده است. این ساختار، دارای آرایه حفره‌های هوای باریک‌شونده (tapered) به سمت خط قائم میانی بوده و فاصله مراکز حفره‌های هوا، یعنی گام‌ها (Λ)، در مراحل شبیه‌سازی تغییر داده می‌شوند.

(electric - TE) و عرضی مغناطیسی (Transverse magnetic - TM) باشند [۱،۲].

انواع دریافت، ارسال و تمرکز مدی می‌تواند با موجودیت گاف نواری فوتونی و ایجاد نقص در شبکه تناوبی ایجاد شود طوری که مدهای کاواک و موجبری رخ دهند و زمینه کاربردهای گوناگونی فراهم آید. از جمله، نور می‌تواند در تشابه با ادوات انحنادار لنز شکل و یا با ضریب شکست تدریجی، مسیری غیرمستقیم را به صورت واگرا یا همگرا طی کند [۵-۷].

با تغییر در شعاع حفره-هوا در بلورهای فوتونی در جهت عمود بر راستای انتشار نور، مقدار کسر پرشدگی تغییر می‌کند و باعث می‌شود پارامترهایی مانند ضریب شکست مؤثر و سرعت گروه تغییر یابند و این به نوبه خود باعث پاشندگی و نیز تغییر مسیر انتشار نور می‌شود [۸-۱۳].

این لنزهای تخت بلور فوتونی را می‌توان با شیوه‌های متنوع رشد بلور و زدایش شیمیایی (etching) و روش‌های مرتبط با آن‌ها رشد داده و فرآوری کرد. این لنزها، جایگزینی مناسب برای لنزهای معمول با سطوح منحنی که دارای محدودیت در توان تمرکز و عدم تطبیق در جفت‌شدگی هستند، است و همچنین قابلیت تنظیم برای بسامدهای پایین و بالا و نیز امواج آکوستیکی را دارند [۱۴،۱۷].

در این پژوهش، به طراحی و شبیه‌سازی انواع متفاوت بلور فوتونی دوبعدی به قصد طراحی لنزهای بلور فوتونی، و کاربرد آن در حس‌گری نوری مواد نانومقیاس، پرداخته می‌شود.

۲- شبیه‌سازی لنزهای بلور فوتونی

۲-۱- تئوری و ساختار لنزهای بلور فوتونی

برای بدست آوردن مؤلفه‌های میدان‌های الکترومغناطیسی در ساختارهای فوتونی مورد بررسی، معادله موج به فرم رابطه (۱) مورد استفاده قرار می‌گیرد:

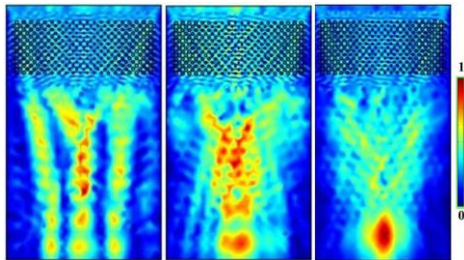
$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \vec{E} - k_0^2 \epsilon_r \vec{E}) = 0 \quad (1)$$

که μ_r تراوایی مغناطیسی نسبی محیط است که در اینجا بدلیل غیرمغناطیسی بودن محیط، برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. ϵ_r

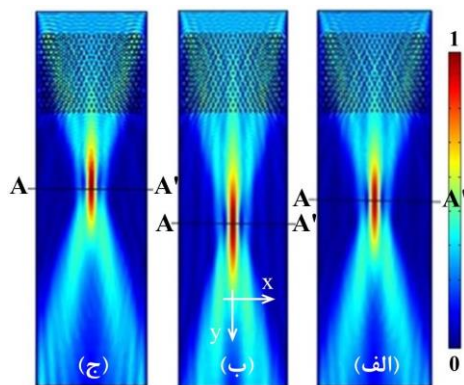
از انتخاب r_0 و $\tan \alpha$ مقدار d_1 را از رابطه (۷) تعیین کرده و در محاسبه شعاع‌های r و r' در روابط (۴) و (۵) به کار بسته و همچنین، از طریق رابطه (۸) مقدار گام تنظیم می‌شود. بنابراین، با انتخاب مناسب و بهینه‌سازی پارامترها می‌توان ساختاری ایجاد کرد که اندازه آن با توجه به مقدار تغییر شعاع و تنظیم گام، تغییر کند و بتوان ساختار را در طول موج‌های مورد نظر بررسی کرد.

۲-۲- شبیه‌سازی ساختار لنز بلور فوتونی

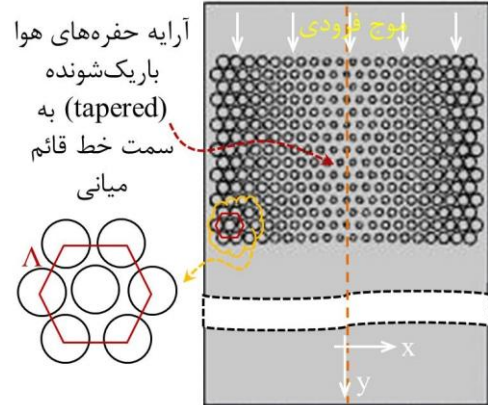
در طی مراحل اولیه بهینه‌سازی برای تمرکز مدی مطابق بخش قبل، چند نمونه از نقش‌های میدان مدی را که عدم تمرکز و کانونی‌نشده‌گی در آنها دیده می‌شوند، برای مقایسه با نتایج بعدی، در شکل ۲ آورده شده است. البته پس از انجام مراحل، بهترین کانونی‌شدگی در پنجره اول مخابراتی (850 nm) به‌زای مقدار گام 385 nm به‌دست آمد. برای مقایسه کانونی‌شدگی، مقادیر گام از 365 nm تا 495 nm برای بررسی تغییر داده شد. شکل ۳، نتایج شبیه‌سازی مربوط به سه گام متفاوت (الف) 385 nm ، (ب) 396 nm و (ج) 374 nm هستند که تغییرات میدان متمرکز شده به وضوح مشاهده می‌شود.



شکل ۲: عدم تمرکز و کانونی‌نشده‌گی در ساختار، هنگام بررسی‌های اولیه



شکل ۳: نور کانونی‌شده در پنجره اول مخابراتی در گام الف) 385 nm ، ب) 396 nm و ج) 374 nm



شکل ۱: ساختار طراحی شده بلور فوتونی دوبعدی

در ابتدا، به‌منظور بررسی ساختار لنز بلور فوتونی، موج در راستای y از بالای تصویر به بلور تابانده و در پنجره اول مخابراتی، یعنی طول موج‌های حدود 850 nm مورد بررسی قرار گرفت. نور پس از برهمکنش و طی مسیر انتشارش در بلور، در صورت فراهم بودن شرایط، در نتیجه ممکن است در نقطه و فاصله معینی از ابتدای آن، در داخل و یا خارج از بلور، متمرکز یا کانونی شود. مقدار کانونی‌شدگی نور به پارامترهایی از قبیل شعاع حفره‌ها (r و r')، فاصله بین حفره‌ها (گام) و طول موج نور فرودی بستگی دارد. به‌منظور کنترل و بهینه‌سازی مکان و مقدار کانونی‌شدگی امواج در پنجره مخابراتی مذکور، در ابتدا پارامترهای زیر تعریف می‌شوند:

$$r = r_0 + md_1 \tan \alpha \quad (۴)$$

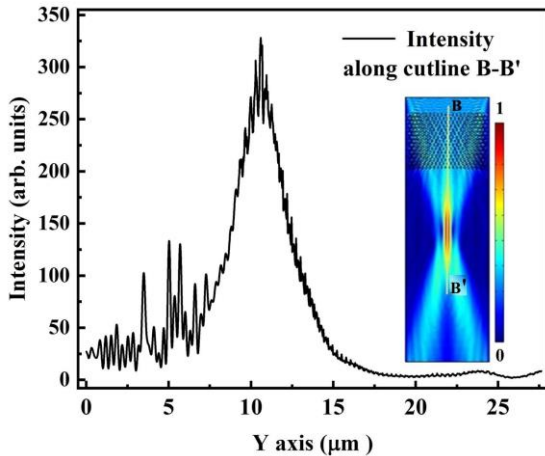
$$r' = r_{01} + md_1 \tan \alpha \quad (۵)$$

$$r_{01} = r_0 - (d_1 * \tan \alpha) \quad (۶)$$

$$d_1 = r_0 / (8 \tan \alpha) \quad (۷)$$

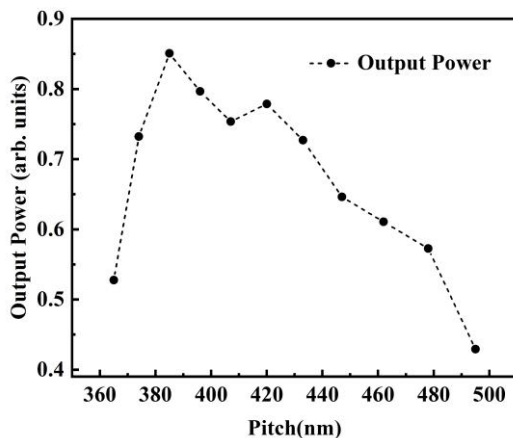
$$X = (19/2)d_1 \quad (۸)$$

که r شعاع حفره‌های هوای موجود در ردیف‌های فرد و r' شعاع حفره‌های هوای موجود در ردیف‌های زوج، m شماره حفره (m ام)، $\tan \alpha$ مقدار بازشدگی حفره‌ها (افزایش شعاع از مرکز به کناره) و X مقدار گام است. شعاع نخستین حفره-هوا در میانه ساختار است. در این بهینه‌سازی، مقدار شعاع از 50 nm تا 250 nm تغییر داده شد. در نتیجه مقدار گام نیز با توجه به مقدار شعاع، متغیر بوده است. با توجه به مقادیر متفاوت تعریف شده در بالا برای شعاع و گام، مقدار کانونی‌شدگی در پنجره اول مخابراتی محاسبه شدند. روابط (۴) و (۵) به‌ترتیب شعاع‌های حفره‌های هوا در ردیف اول (و فرد) و دوم (و زوج) را تعیین می‌کنند. با استفاده



شکل ۵: شدت میدان الکتریکی، برحسب موقعیت مکانی بر روی خط برش طولی BB' در راستای محور Y در دی الکتریک از قسمت ورودی تا خروجی، برای وضعیت گام و شعاع بهینه؛ تصویر مندرج در زمینه: نقشه توزیع شدت مدی

با استفاده از رابطه $\epsilon_0 c |E|^2$ برای محاسبه مقدار توان، می‌توان در ابتدا مقدار توان خروجی را در نقطه‌ی کانونی یعنی راستای خط برش عرضی AA' با مقدار ورودی از بالای ساختار بلور فوتونی، مقایسه کرد. نسبت چگالی توان خروجی به توان ورودی (بر واحد طول در راستای x) برای گام ۳۸۵ nm به مقدار تقریباً ۸ برابر افزایش یافته است. برای مقایسه و بررسی، نمودار توان خروجی به ازای مقادیر متفاوت گام از ۳۶۵ nm تا ۴۹۵ nm در شکل ۶ ترسیم شده است.

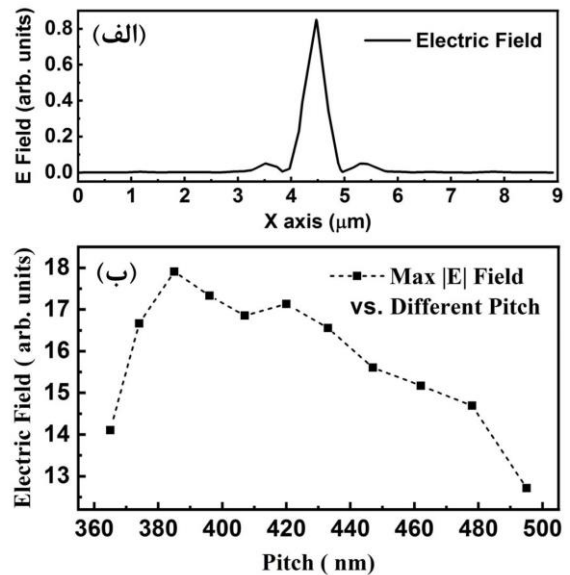


شکل ۶: نمودار توان خروجی به‌ازای مقادیر متفاوت گام

برای بررسی دقیق‌تر پهنای تمرکز امواج در ساختار، از مقدار کمی FWHM بهره برده و درواقع چون هدف عدسی‌شدگی و کانونی‌شدگی و همچنین، جفت‌شدگی با ادوات نوری با تلفات کمینه است، این مقدار برای راستای محور x مورد بررسی قرار گرفت. با تغییرات گام و شعاع حفره‌های هوا، فاصله کانونی نسبت

همچنین، برای بررسی و درک درست از مقدار این تغییرات و پیدا کردن بهترین گام، نمودارهای تغییرات میدان الکتریکی، شدت میدان الکتریکی، توان تمرکز مدی و همچنین، پهنای تمرکز لنزی FWHM در پنجره مذکور رسم می‌شوند.

اندازه میدان الکتریکی برحسب موقعیت مکانی در راستای خط برش عرضی AA' در دی الکتریک، در وضعیت گام و شعاع بهینه در شبیه‌سازی، استخراج و در شکل ۴-الف ترسیم شده است. بیشینه میدان الکتریکی در کانون تمرکز بر خط برش عرضی AA'، به ازای مقادیر متفاوت گام از ۳۶۵ nm تا ۴۹۵ nm اندازه‌گیری و در شکل ۵-ب رسم شد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، میدان الکتریکی به ازای مقدار گام ۳۸۵ nm بیشینه است.

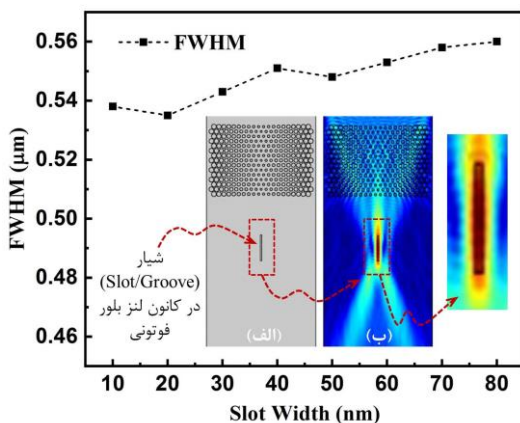


شکل ۴: اندازه میدان الکتریکی برحسب موقعیت مکانی بر روی خط برش عرضی AA' در دی الکتریک، در وضعیت گام و شعاع بهینه، (ب) نمودار تغییرات اندازه بیشینه میدان الکتریکی بر روی همان خط، به ازای مقادیر متفاوت گام از ۳۶۵ nm تا ۴۹۵ nm

برش مقطعی شدت میدان الکتریکی به‌ازای گام بهینه ۳۸۵ nm و شعاع مربوطه، با استفاده از رابطه $I = |E|^2$ در شبیه‌سازی، محاسبه شده و در شکل ۵ نشان داده شده است. تصویر مندرج در زمینه گراف، نقشه توزیع و تمرکز مدی را نمایش می‌دهد که خط برش طولی BB' در راستای محور Y در آن علامت‌گذاری شده است.

۳-۲- حس‌گری نانوذرات با استفاده از شیوه شکاف در ماده ساختار و در کانون لنز بلور فوتونی

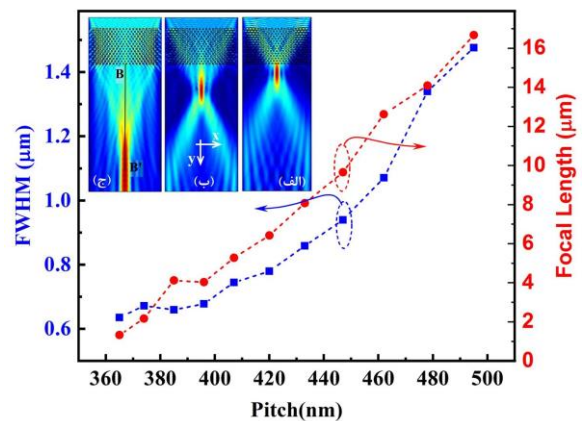
یکی از شیوه‌های مهم در استفاده از میدان‌های الکترومغناطیسی برای موارد کاربردی، محبوس نمودن قوی میدان در ناحیه شکافدار ساختار به‌همراه بهره‌گیری از موج میراثونده (evanescent waves) است. حال با توجه به کنترل و تمرکز قوی میدان در ساختار به صورت لنز، می‌توان این دو شیوه (لنز و شکاف) را برای کاربرد حس‌گری نانوذرات، تلفیق نمود. برای این منظور، سیستم را می‌توان طوری طراحی کرد که با ایجاد یک شکاف در ساختار بلور فوتونی، دقیقاً در کانون لنز، مکانی برای قرارگیری نانوذره فراهم آید و بدین ترتیب بر مبنای برهمکنش تابش-ماده، از این ساختار به عنوان یک حس‌گر استفاده کرد. به منظور شبیه‌سازی در این قسمت، در ابتدا شیاری نانومتری به شکل مکعب مستطیل تا نیمه ضخامت تیغه، اچینگ می‌شود که فضای آن را هوا پر می‌نماید. سیستم را برای طول موج دلخواه تنظیم نموده و از لنزینگ کماکان مطمئن باید بود (شکل ۸)؛ عرض شیار با نمو ۵ نانومتری از ۱۰ تا ۸۰ نانومتر و طول آن $1\text{ }\mu\text{m}$ تا $2\text{ }\mu\text{m}$ تغییر داده شد (در شکل نیامده است). سپس ماده مورد حس‌گری، مثلاً پلی‌استایرین (polystyrene) با ضریب شکست 1.57 ، به عنوان یک ماده پرکننده در شیار قرار داده می‌شود.



شکل ۸: نمودار $(FWHM)_x$ و تغییرات کوچک آن، در حضور شیاری ۱۰ تا ۸۰ نانومتری که در تصویر مندرج در زمینه دیده می‌شود: الف) شیار حاوی پلی‌استایرین در بستر SiO_2 و ب) نور کانونی شده (و تصویر بزرگ‌شده در سمت راست) دارای $(FWHM)_x=0.49$ است.

به لبه بلور تغییر می‌کند و این تغییرات به دلیل تغییر در ضریب شکست مؤثر و کسر پرشدگی در ساختار می‌باشد که با تنظیم آن، کانونی شدگی می‌تواند به صورت کنترل‌شده‌ای با تغییرات مذکور، در نقاط متفاوت رخ دهد.

در شبیه‌سازی، کانونی‌شدگی نور در ساختار برای طول موج 850 nm محاسبه شد و تغییرات مکانی آن روی خط برش طولی BB' در نمودار شکل ۷ به وضوح مشاهده می‌شود. مقدار کمینه‌ای برای پهنای تمرکز، برابر با $0.659\text{ }\mu\text{m}$ $(FWHM)_{x,\min}$ برای گام‌های کوچک حاصل شد (نمودار شکل ۷). تصویر مندرج در زمینه گراف، نقشه توزیع میدان الکتریکی مد را نمایش می‌دهد که خط برش طولی BB' در راستای محور y در آن علامت‌گذاری شده است. با کنترل پارامترهای ساختار می‌توان فاصله کانونی تا لبه بلور را نیز تنظیم نمود و از این ویژگی نیز در جفت‌شدگی تابش بین موجبرها در شرایط متفاوت استفاده کرد. همانطوری که در شکل ۷ دیده می‌شود نقطه تمرکز پرتو توسط لنز بلور فوتونی در گام 385 nm که گام بهینه است، با فاصله کانونی $4.12\text{ }\mu\text{m}$ به دست آمده است. همان طوری که گفته شد، موقعیت کانون لنز به توسط ساختار قابلیت تنظیم را دارد تا در هر نقطه مطلوبی، حتی داخل خود ساختار قرار گیرد.

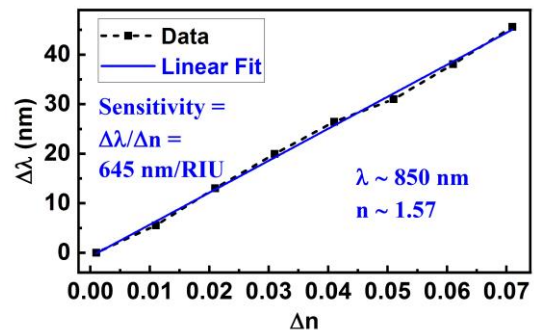


شکل ۷: نمودار پهنای $(FWHM)_x$ و تغییرات فاصله کانونی به‌ازای مقادیر متفاوت گام از 365 nm تا 495 nm ؛ تصویر مندرج در زمینه: کانون لنز روی خط برش طولی BB' در راستای محور y . در گام الف) 365 nm ، ب) 385 nm و ج) 500 nm

مراجع

- [1] H. Benisty, V. Berger, J. M. Gerard, D. Maystre, A. Tcheltnokov, "Photonic crystals: Towards nanoscale photonic devices," Springer, 2nd Ed., 2008.
- [2] C.M. Soukoulis, "Photonic crystals and light localization in the 21st century," (Vol. 563), Springer Science & Business Media, 2012.
- [3] E. Yablonovitch, "Photonic band-gap structures," J. Opt. Soc. Am. B, 10(2), 283-295, 1993.
- [4] A. Zangwill, "Modern Electrodynamics," Cambridge University Press, 2012.
- [5] H. Wang, Y. M. He, T. H. Chung, H. Hu, Y. Yu, S. Chen, X. Ding, M.C. Chen, J. Qin, X. Yang, R. Z. Liu, "Towards optimal single-photon sources from polarized microcavities," Nature Photonics, 1-6, 2019.
- [6] Halevi, P., Krokhin, A.A. and Arriaga, J., "Photonic crystals as optical components," Appl. Phys. Lett., 75(18), 2725-2727, 1999.
- [7] A. Daraei, M. E. Daraei, "Compact nanocavity with elliptical slot inside photonic wire bandgap materials including sidewalls gratings for biosensing," Appl. Phys. A, 122(7), 662, 2016.
- [8] C. Tan, T. Niemi, C. Peng, M. Pessa, "Focusing effect of a graded index photonic crystal lens," Opt. Commun., 284(12), 3140-3143, 2011.
- [9] H. T. Chien, C. C. Chen, "Focusing of electromagnetic waves by periodic arrays of air holes with gradually varying radii," Opt. Express, 14(22), 10759-10764, 2006.
- [10] F. Gauffillet, É. Akmansoy, "Design of flat graded index lenses using dielectric Graded Photonic Crystals," Opt. Mater., 47, 555-560, 2015.
- [11] Y. Qi, X. Sun, S. Wang, W. Li, Z. Wang, "Design of an Electrically Tunable Micro-Lens Based on Graded Photonic Crystal," Crystals, 8(7), 303, 2018.

به واسطه اندرکنش نور-ماده و تغییر ضریب شکست محیط انتشار نور در جایی که ماده حس‌گری با چگالی‌های متفاوت حضور دارد، طول موج تابش دچار تغییر می‌شود. این تغییر طول موج، یکی از انواع معیارهای حس‌گری شناخته شده و می‌تواند اندازه‌گیری شود. نتایج شبیه‌سازی برای حس‌گری با استفاده از ساختار مرکب لنز و شکاف در شکل ۹ به نمایش درآمده است. مقدار پارامتر "حساسیت" که به صورت $S = \Delta\lambda / \Delta n$ تعریف می‌شود، از نمودار برازش خطی، 645 nm/RIU به دست آمده است.



شکل ۹: نمودار حس‌گری مرتبط با ساختار مرکب لنز و شکاف

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله، از ویژگی‌های منحصربفرد بلورهای فوتونی برای طراحی و شبیه‌سازی لنزهای بلور فوتونی، استفاده شده است. لنزهای مذکور می‌توانند امواج را در نقطه کانونی نانومقیاس، با اتلاف کم و با قابلیت بالایی متمرکز کنند. در این مقاله، طراحی لنزهای بلور فوتونی با زدایش حفره‌های-هوا با شعاع و گام متغیر در آرایش شش‌ضلعی در بستر دی‌الکتریک SiO_2 در نظر گرفته شده است. با تاباندن امواج نوری تخت و برهم‌کنش نور با این ساختارهای نانومقیاس در چینش و گام‌های متفاوت، انتشار نور در نقاط دلخواهی برون یا درون آرایه‌ها کانونی و متمرکز شده است. در شبیه‌سازی، دامنه میدان الکتریکی، شدت، توان و پهنای کانونی‌شدگی با استفاده از برش مقطعی توزیع میدان‌ها در پنجره اول مخابراتی (طول موج 850 nm)، بررسی شدند. مقدار گام بهینه 385 nm برای مقاصد کنترل مطلوب لنز از نظر تمرکز و فاصله کانونی در ابعاد کوچک نانومقیاس، به مقدار کسری از طول موج، $0.49 \mu\text{m}$ حاصل شد. نتایج شبیه‌سازی برای کمیت "حساسیت" ساختار حس‌گری مرکب شیوه لنز-شکاف، به مقدار 645 nm/RIU به دست آمده است.

- [12] M. Turduev, E. Bor, H. Kurt, "Photonic crystal based polarization insensitive flat lens," *J. of Phys. D: Appl. Phys.*, 50(27), 275105, 2017.
- [13] W. Zhang, W. Tan, Q. Yang, T. Zhou, J. Liu, "Subwavelength focusing in visible light band by a Fibonacci photonic quasi-crystal plano-concave lens," *J. Opt. Soc. Am. B*, 35(10), 2364-2367, 2018.
- [14] M. I. Kotlyar, Y. R. Triandaphilov, A.A. Kovalev, V. A. Soifer, M. V. Kotlyar, L. O'Faolain, "Photonic crystal lens for coupling two waveguides," *Appl. Optics*, 48(19), 3722-3730, 2009.
- [15] M. Turduev, I. H. Giden, H. Kurt, "Design of flat lens-like graded index medium by photonic crystals: Exploring both low and high frequency regimes," *Opt. Commun.*, 339, 22-33, 2015, 2011.
- [16] S. Gao, Y. Dou, Q. Li, X. Jiang, "Tunable photonic crystal lens with high sensitivity of refractive index," *Opt. Express*, 25(6), 7112-7120, 2017.
- [17] P. Xu, J. Zheng, J. Zhou, Y. Chen, C. Zou, A. Majumdar, "Multi-slot photonic crystal cavities for high-sensitivity refractive index sensing," *Opt. Express*, 27(3), 3609-3616, 2019.



Design and Simulation of Photonic Crystal Lenses in Various Nano-Structures

Hamidreza Tahmasbi, Ahmadreza Daraei*

Department of Physics, Faculty of Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

Abstract: Owing to the requirements of integrated circuits to the structures that guide light in the requisite directions and focus on appropriate sites, benefiting photonic crystal properties to achieve photonic crystal lenses is proposed. These lenses have the high capability of focus for modes at the nano-scale focal point, with low loss. In this paper, photonic crystal lenses are designed through etching air-holes in a hexagonal arrangement in SiO₂ dielectric substrate. By applying plane waves to these different nanometer structures with a variety of arrangements and pitches and interaction of light with structure, thereby light is focused at desired points. The results of the simulations, including electric field amplitude, intensity, power, and focusing width were investigated using field profiles at the wavelength of the first telecommunication window (850 nm). The simulation results indicated that these parameters can be applied at a specified and optimal pitch value, 385 nm, for optimum control and concentration in lensing at small nano-scale dimensions within a fraction of wavelength, $\sim 0.49 \mu\text{m}$. Also, the result of the Sensitivity for applying the structure as an optical sensor is 645 nm/RIU.

Keywords: Photonic Crystal Lenses, Graded Refractive Index, Bandgap, Bragg Arrays, Tapered Air-Holes