بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

آیا فراتر رفتن از حد پراش در یک بلور فوتونی امکان پذیر است؟

امیر حسین برادران قاسمی

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده فیزیک

یکی از خصوصیات مورد توجه در بلورهای فوتونی توانایی آنها در جایگزیدگی فضایی نور می باشد که در ادواتی مثل موجبرها و کاواک ها مورد استفاده قرار می گیرند. از آنجایی که فیزیک ایجاد این جایگزیدگی تشکیل گاف فوتونی می باشد، میزان آن محدود به حد پراش اپتیکی می شود. در این مقاله امکان ایجاد جایگزیدگی فراتر از حد پراش مورد مطالعه قرار می گیرد. نشان داده خواهد شد که توسط المانهای یک ماده یونی، چگالی انرژی الکترومغناطیسی در مساحتی کوچکتر از یک دویستم مجذور طول موج مد یک موجبر بلور فوتونی جایگزیده می گردد.

کلید واژه- جایگزیدگی زیر موج، موجبر بلور فوتونی، مواد پاشنده یونی

Is it possible to go beyond the diffraction limit in a photonic crystal?

Amir Hossein Baradaran Ghasemi

Department of Physics, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

One of the important features of photonic crystals is the light localization. However, the localization is in the order of half wavelength Due to the diffraction-limited-based mechanism in photonic bandgap formation. In this paper, the possibility of sub-wavelength confinement of light in a photonic crystal waveguide is examined by ionic materials elements. It is shown that light can be confined in an area smaller than one Two-hundredth of the square wavelength of the waveguide modal field.

Keywords: Sub-wavelength confinement, Photonic crystal waveguide, Dispersive ionic materials

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

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

۱- مقدمه

یکی از روش های مورد توجه برای طراحی و ساخت مدارات مجتمع تمام اپتیکی استفاده از ساختارهای بلور فوتونی می باشد. دلایل عمده محبوبیت بلورهای فوتونی در این راستا می تواند در دو مورد ذیل خلاصه گردد: الف) توانایی بلورهای فوتونی در جایگزیدگی امواج الکترومغناطیسی در حجم کوچکی از فضا ب) تلفات انرژی کوچک در این جایگزیدگی. این دو خصیصه نتیجه تشکیل گاف فوتونی بدلیل تداخل میان امواج براگ حاصل از تناوب شبکه بلوری و پراکندگی از هر المان ساختار بلوری، می باشد [۱]. بطوریکه نتیجه آن، جایگزیدگی با تلفات انرژی کوچک نسبت به روش های دیگر خواهد بود. با این حال جایگزیدگی در بلور های فوتونی محدود به حد پراش اپتیکی ($\lambda/2$) است. بعبارت دیگر طول موج مد تشدیدی در باند گاف فوتونی کامل اول از مرتبه نصف ثابت شبکه بلور فوتونی می باشد. لذا ابعاد فضایی جایگزیدگی محدود به طول موج مد تشدیدی ساختار می گردد. بنابراین کوچک سازی ابعاد ساختار مدار مجتمع اپتیکی بر پایه بلورهای فوتونی در محدوده حد پراش متوقف می شود.

روشهای گوناگونی برای فراتر رفتن از حد پراش برای جایگزیدگی نور زیر طول موج مطرح شده اند که می تواند به موفقترین آنها یعنی استفاده از امواج سطحی پلاسمون-پلاریتون در ساختارهای تشکیل شده از فلز و دی الکتریک اشاره گردد [۲]. ولی اشکال استفاده از این روش در جایگزیدگی نور این است که بدلیل زمان واهلش بسیار کوتاه پلاسمون ها، تلفات جذب بسیار زیاد می باشد [۳].

در این مقاله به مسئله جایگزیده کردن نور توسط پاشنده کردن ساختار بلور فوتونی پرداخته می شود و نشان داده می شود که جایگزیدگی نور تا ابعاد زیر طول موج در بلور فوتونی امکان پذیر است. ساختار مورد مطالعه یک بلور فوتونی دو بعدی شامل شبکه مربعی از استوانه های ماده یونی لیتیوم تانتالیت $LiTaO_3$ به عنوان ماده پاشنده با تلفات جذبی بسیار کمتر از فلزات می باشد که در فضای آزاد آرایش یافته اند. به این ترتیب قابلیت جایگزیدگی زیر طول موج میسر می گردد.

۲-روش

ایده مورد نظر در این مقاله بر این نکته استوار است که بنا بر تئوری وردشی در بلورهای فوتونی، انرژی الکترومغناطیسی مدهای با بسامد کوچکتر بطور عمده در ناحیه های با گذردهی الکتریکی بزرگتر تمرکز می یابند. لذا با افزایش گذردهی الکتریکی ε انتظار می رود که طول موج مد تحریکی در ساختار بلندتر گردد. به عبارت دیگر ساختار باند فوتونی به سمت بسامدهای کوچکتر کشیده می شوند. ولی نکته مهم در این خصوص آن است که اندازه گذردهی الکتریکی مواد طبیعی در بازه طیف اپتیکی محدود می باشند. از طرف دیگر در صورت وجود قطب طیفی در پاسخ اپتیکی ماده به موج الکترومغناطیسی (ماده پاشنده) رفتار غیر عادی در اطراف بسامد قطب مشاهده می گردد. از جمله مواد پاشنده مورد نظر در این تحقیق، مواد یونی هستند که بر حسب میزان قدرت برهمکنش فونونی شبکه یونی با موج الکترومغناطیسی (برهمکنش فونون-پلاریتون)، قابلیت ایجاد پاشندگی در بازه طیف مادون قرمز نزدیک تا مادون قرمز دور را دارا می باشند. پاسخ اپتیکی ماده یونی به خوبی توسط مدل لورنتس توضیح داده می شود [۴]. نکته مهم در این خصوص آن است که با پاشنده شدن محیط اطراف بسامد برهمکنش فونون-پلاریتون، پاسخ اپتیکی ماده به شدت تابع بسامد موج الکترومغناطیسی است و به این ترتیب برای مطالعه نحوه پاسخ موثر ماده در ساختار بلور فوتونی باید همگشت میان تابع گذردهی الکتریکی ماده و میدان الکتریکی موج در نظر گرفته شود. به این ترتیب اثر پاشندگی روی ساختار باند بلور فوتونی قابل مطالعه خواهد بود. از آن جایی که هدف این مقاله مطالعه میزان جایگزیدگی نور در یک ساختار فوتونیکی است، به کمیت مناسبی برای اندازه گیری این جایگزیدگی نیاز است. یکی از کمیت های مناسب برای این منظور محاسبه حجم مد در ساختار می باشد. این کمیت نحوه توزیع انرژی الکترومغناطیسی را نشان می دهد و به صورت زیر تعریف می گردد [۵]:

$$S_{eff} = 2\pi\left\langle x^2+y^2\right\rangle - 4\pi\langle x\rangle\langle y\rangle$$
$$\left\langle x^2+y^2\right\rangle = \frac{\iint_{UC}(x^2+y^2)u_{total}(x,y)\,dxdy}{\iint_{UC}u_{total}(x,y)\,dxdy}, \qquad (۱)$$

بطوریکه u_{total} نمایش دهنده چگالی انرژی

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

الکترومغناطیسی یک مد و علامت $\langle\ \rangle$ مقدار میانگین کمیات مورد نظر را نمایش می دهد. با توجه به اینکه ماده مورد مطالعه ماده ای پاشنده و اتلافی می باشد، چگالی انرژی بصورت زیر قابل تعریف خواهد بود [۶]:

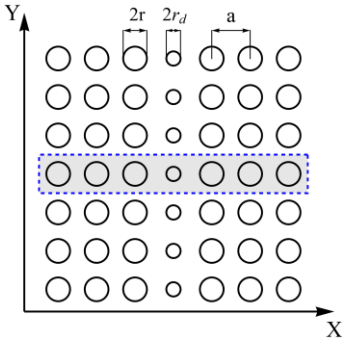
$$u_{total}(x,y)=\frac{\varepsilon_o}{4}\Big(\mathrm{Re}[\varepsilon(x,y)] + \frac{2\omega\,\mathrm{Im}[\varepsilon(x,y)]}{\Gamma}\Big)\left|\vec{E}(x,y)\right|^2 + \frac{\mu_o}{4}\left|\vec{H}(x,y)\right|^2. \qquad (۲)$$

در رابطه فوق $\vec{E}(x,y)$ و $\vec{H}(x,y)$ به ترتیب میدان های برداری الکتریکی و مغناطیسی مد الکترومغناطیسی ساختار می باشد. همچنین Re و Im نمایش دهنده قسمت های حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی ماده می باشند. ضریب Γ بسامد میرایی بدلیل تلفات جذب در ماده می باشد. در رابطه فوق گذردهی الکتریکی خلاء و تراوایی مغناطیسی خلاء به ترتیب با ε_o و μ_o نشان داده شده اند. با توجه به دو بعدی بودن ساختار مورد مطالعه، تنها کافی است که چگالی انرژی روی سطح ساختار محاسبه گردد و به این ترتیب انتگرال گیری روی سطح سلول واحد شبکه انجام می پذیرد. با بدست آوردن میدان های برداری توسط روش روش تفاضل-محدود در حوزه زمان و قرار دادن آنها در رابطه (۲) و محاسبه انتگرال رابطه (۱)، حجم مد بدست می آید. کمیت مورد نظر برای نمایش میزان جایگزیدگی نسبت λ^2/S_{eff} می باشد. بطوریکه λ در این کمیت طول موج مد انتشاری موجبر می باشد.

۲-۳- نتایج و بحث

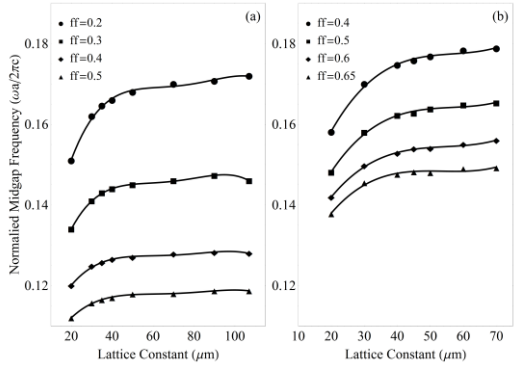
شکل ۲ شماتیک مقطع دو بعدی از موجبر بلور فوتونی با شبکه مربعی از المان های استوانه ای ماده یونی را نمایش می دهد. ناحیه محاسباتی با مستطیل نقطه چین نمایش داده شده است و با استفاده از شرط مرزی بلاخ از بقیه فضا جدا شده است. در ضمن نقص در شبکه توسط استوانه های مرکزی با شعاع r_d کوچکتر از استوانه های شبکه r تعریف شده است.

بسامد مرکزی نرمالیزه مربوط به پایین ترین گاف فوتونی کامل ساختار مورد مطالعه بر حسب ثابت شبکه a و کسر پرشدگی های مختلف $ff=\pi r^2/a^2$ برای هر دو قطبش TM و TE در شکل ۳ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد کاهش ثابت شبکه برای مد های قطبش TM باعث کاهش بسامد مرکزی نرمالیزه گاف فوتونی می شود و این کاهش در کسر پرشدگی ff=۰/۵ به بیشترین مقدار خود می رسد.



شکل ۲: سطح مقطع ساختار در صفحه x-y. موجبر از شبکه ای مربعی شامل المان های استوانه ای از ماده لیتیوم تانتالیت تشکیل شده است. ثابت شبکه، شعاع استوانه ها و شعاع استوانه های نقص به ترتیب با a، r و r_d نشان داده شده اند. مستطیل نقطه چین آبی رنگ نماینده سلول واحد مورد استفاده جهت تحلیل مسئله می باشد.

همچنین کاهش ثابت شبکه برای مدهای قطبش TE نیز باعث کاهش بسامد مرکزی نرمالیزه گاف فوتونی می شود ولی این کاهش برای مقادیر بزرگتر از کسر پر شدگی ff نسبت به مدهای قطبش TM، اتفاق می افتد و بسامد مرکزی نرمالیزه در کسر پرشدگی ff=۰/۶۵ به کمترین مقدار خود می رسد.



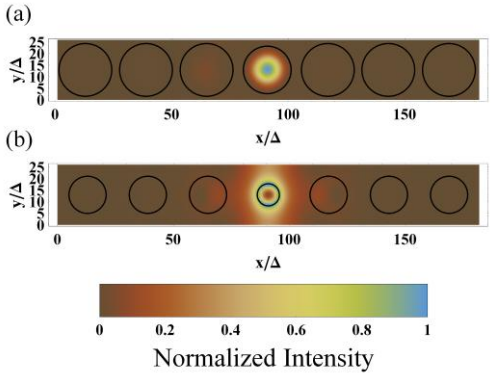
شکل ۳: بسامد مرکزی نرمالیزه بر حسب ثابت شبکه در کسرهای پر شدگی مختلف (a) برای قطبش TM و (b) برای قطبش TE.

علت کاهش بسامد مرکزی نرمالیزه گاف فوتونی کامل، افزایش چشمگیر گذردهی الکتریکی موثر ماده بدلیل پاشندگی حول بسامد فونون اپتیکی عرضی است بطوریکه موجب تحریک مدهای ویژه با بسامدهای کوچکتر می شود. بنابراین امکان منیاتوری کردن ساختار موجبر نتیجه این کاهش بسامد خواهد بود.

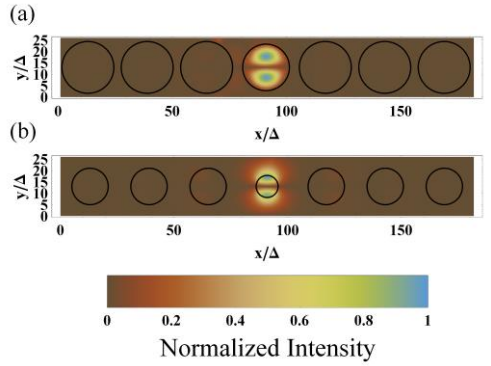
برای مطالعه کمی این پدیده و نمایش میزان جایگزیدگی نور در فضایی به مراتب کوچکتر از طول موج نور مورد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

مطالعه، کمیت حجم مد و همچنین چگالی انرژی الکترومغناطیسی و بردار پوئنتینگ در راستای انتشار موج محاسبه شده اند. در شکل ۴ چگالی انرژی مد تحریکی در بسامدهای ۱/۱ تراهرتز و ۰/۹۵ تراهرتز به ترتیب برای قطبش TM و TE نمایش داده شده اند. در شکل، فضای محاسباتی با توجه به اندازه گام فضایی مورد استفاده به ۱۸۲×۲۶ مربع یکسان گسسته شده است.



شکل ۴: چگالی انرژی الکترومغناطیسی در یک سلول واحد از موجبر برای (a) قطبش TE و (b) قطبش TM. دایره های سیاه رنگ نمایش دهنده محل استوانه های ماده پاشنده می باشند. نقص درون سلول واحد توسط استوانه مرکزی با شعاع rd=۰٫۹r برای قطبش TE و شعاع rd=۰٫۶ برای قطبش TM در نظر گرفته شده اند. مختصات برحسب اندازه گام فضایی Δ در دو راستای x و y نرمالیزه شده اند.



شکل ۵: مولفه میانگین بردار پوئنتینگ در راستای انتشار موجبر در یک سلول واحد برای (a) قطبش TE و (b) قطبش TM. دایره های سیاه رنگ نمایش دهنده محل استوانه های ماده پاشنده می باشند. نقص درون سلول واحد توسط استوانه مرکزی با شعاع rd=۰٫۹r برای قطبش TE و شعاع rd=۰٫۶r برای قطبش TM در نظر گرفته شده اند. مختصات برحسب اندازه گام فضایی Δ در دو راستای x و y نرمالیزه شده اند.

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می گردد چگالی انرژی برای قطبش TE بطور کامل در ماده پاشنده متمرکز می گردد مقدار جایگزیدگی با توجه به رابطه (۱) برابر با λ^2/S_{eff} =۲۲۰ می باشد. همچنین مقدار جایگزیدگی برای قطبش TM برابر λ^2/S_{eff} =۱۰۳ بدست می آید.

مقدار جایگزیدگی بیشتر برای قطبش TE نسبت به قطبش TM در شکل ۴ قابل مشاهده می باشد. مولفه میانگین بردار پوئنتینگ در راستای Y در شکل ۵ برای هر دو قطبش بطور مجزا نمایش داده شده است. ماهیت انتشاری مدهای دو قطبی تحریکی در راستای موجبر برای هر یک از دو قطبش در شکل ۵ مشاهده می گردد.

۲-۴- نتیجه گیری

در این مقاله به امکان جایگزیده کردن نور در زیر طول موج و عبور از حد پراش در ساختار بلور فوتونی پرداخته شد است. به این منظور یک موجبر بلور فوتونی دو بعدی شامل استوانه های ماده یونی لیتیوم تانتالیت که در شبکه ای مربعی منظم شده اند مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که جایگزیدگی در مساحتی بیش از دویست برابر کوچکتر از مجذور طول موج مد تحریکی موجبر، امکان دارد. این یافته در مینیاتوری کردن ادوات فوتونیکی و مدارات مجتمع فوتونیکی اهمیت دارد.

سپاسگزاری

نویسنده از دکتر حمید لطیفی بدلیل مهیا ساختن امکانات علمی و آزمایشگاهی جهت انجام فعالیت های پژوهشی اینجانب سپاسگزاری می نماید.

مراجع

[۱] Joannopoulos J. D., Johnson S. G., Winn J. N., and, Meade R. D., *Photonic Crystal Molding the Flow of Light*, Princeton University, ۲۰۰۸.

[۲] Gacemi D., Mangeney J., Colombelli R., and Degiron A., *Subwavelength metallic waveguides as a tool for extreme confinement of THz surface waves*, **Scientific Reports**, ۳ (۲۰۱۳) ۱۳۶۹.

[۳] ۲۰. Heilweil E. J. and Hochstrasser R. M., *Nonlinear spectroscopy and picosecond transient grating study of colloidal gold*, **J. Chem. Phys.** ۸۲, ۱۱ (۱۹۸۵) ٤٧٦٢.

[٤] Baradaran Ghasemi A. H., Mandegarian S., Kebriti H., and Latifi H., *Bandgap generation and enhancement in polaritonic cylinder square-lattice photonic crystals*, **J. Opt.** ١٤ (۲۰۱۲) ۰۵۵۱۰۳.

[۵] Foresi J. S., Villeneuve P. R., Ferrera J., Thoen E. R., Steinmeyer G., Fan S., Joannopoulos J. D., Kimerling L. C., Smith H. I. and Ippen E. P., *Photonic-bandgap microcavities in optical waveguides*, **Nature** ۳۹۰ (۱۹۹۷) ١٤٣.

[٦] Ruppin R., Electromagnetic energy density in a dispersive and absorptive material, **Phys. Lett. A.** ۲۹۹, ۲-۳ (۲۰۰۲) ۳۰۹.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]