

مزیت پاشندگی طیفی در موجبر بلور فوتونی

امیر حسین برادران قاسمی

دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده - موجبر های بلور فوتونی بعنوان کانال های ارتباط دهنده قسمت های مختلف یک مدار مجتمع تمام اپتیکی از اهمیت زیادی برخوردار می باشند. بطوريکه با جایگزینه کردن نور در حجم کوچکی از فضا وظیفه انتقال انرژی را به عهده دارند. یکی از چالش های مهم در طراحی موجبرهای بلور فوتونی مسئله اتفاق انرژی در موجبری است. در این خصوص در این مقاله به اثر پاشندگی طیفی در عملکرد یک موجبر بلور فوتونی پرداخته می شود. موجبر بلور فوتونی مورد نظر از شبکه ای مربعی از استوانه های ماده دی الکتریک پاشنده در فضای آزاد تشکیل شده است. با محاسبه ساختار باند تصویر شده و ضریب تضعیف مربوط به برخی از مدهای ویژه موجبر طراحی شده، نشان داده می شود که پاشنده بودن المان ها در مقایسه با ساختاری متناظر که از المان های دی الکتریک غیر پاشنده تشکیل شده باشد، اتفاق انرژی موجبر را بطور محسوسی کاهش می دهد. روش بکار رفته در استخراج ساختار باند تصویر شده و مدهای ویژه موجبر، استفاده از روش محاسباتی تفاضل محدود در حوزه زمان دو بعدی برای ساختارهای پاشنده می باشد.

کلید واژه- اتفاق انرژی، پاشندگی طیفی، موجبر بلور فوتونی، مواد یونی

Dispersion Benefit in a Photonic Crystal Waveguide

Amir H. Baradaran Ghasemi

Department of Physics, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract- Photonic crystal waveguides are one of the important key components in an all-optical integrated circuit. They localize light inside the guiding region for transmission of optical energy. A major challenge to design an efficiency-improved photonic crystal waveguide is the issue of loss. In this paper, the effect of spectral dispersion on the loss reduction is examined through Lithium Tantalate as a strong dispersive dielectric material. The waveguide structure consists of the square lattice of Lithium Tantalate cylinders in air matrix. It has been shown that energy loss related to some waveguide Eigen modes are appreciably mitigated using dispersive dielectric cylinders in the structure compared to that of corresponding structure made of non-dispersive dielectric cylinders. The method used for extracting the corresponding projected band structure and the attenuation coefficient of the modal fields is two-dimensional finite-difference time-domain method for dispersive structures.

Keywords: Energy loss, material dispersion, Photonic crystal waveguide, Ionic materials

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

۱- مقدمه

الکترومغناطیسی نقش دارد. از لحاظ تئوری، هر چه پهنهای طیفی گاف فوتونی بیشتر باشد و هر چه بسامد مد نقص تولید شده به مرکز گاف فوتونی نزدیکتر باشد آن مد با جایگزیدگی قوی تر در گاف فوتونی تشدید می‌گردد و تلفات انرژی بدلیل ساختار هندسی کاوش می‌یابد [1]. در مورد نحوه بررسی جایگزیدگی موج به مقاله اخیر ارائه شده در بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران ارجاع داده می‌شود [2]. در عمل چهار پارامتر طراحی در این خصوص عبارتند از ضرایب شکست ماده تشکیل دهنده بلور فوتونی و محیط پس زمینه آن، نوع شبکه برآوه، نسبت پر شدگی اجزاء تشکیل دهنده بلور و عنوان چهارمین پارامتر، اندازه نقص هندسی بکار رفته در شبکه بلور فوتونی که می‌توانند در طراحی موجبری با تلفات کم مورد توجه قرار گیرند. یکی از مهمترین پارامترهای طراحی برای افزایش چشمگیر پهنهای طیفی گاف فوتونی، افزایش اختلاف ضرایب شکست میان اجزاء ماده تشکیل دهنده بلور فوتونی و محیط پس زمینه آن می‌باشد. ولی در انتخاب مواد برای رسیدن به اختلاف ضریب شکست بزرگ محدودیت وجود دارد. همچنین با توجه به محدودیت‌های ساخت، امکان تغییر نسبت پر شدگی اجزاء و اندازه نقص هندسی به هر میزان امکان پذیر نمی‌گردد.

در این مقاله به مزیت وجود پاشندگی طیفی در اجزاء تشکیل دهنده بلور فوتونی به عنوان پارامتر پنجم در طراحی موجبر بلور فوتونی با تلفات کم پرداخته می‌شود. برای این کار از ماده یونی لیتیوم تانتالیت LiTaO_3 به عنوان ماده ای با پاشندگی قوی در بازه تراهertz طیف الکترومغناطیسی، به عنوان اجزاء تشکیل دهنده موجبر بلور فوتونی استفاده می‌گردد. ساختار فوتونیکی مورد مطالعه شبکه مربوطی دو بعدی از استوانه‌های LiTaO_3 می‌باشد که در هوا قرار گرفته اند و در راستای موجبری شعاع استوانه‌ها به عنوان نقص شبکه کوچکتر انتخاب شده اند. طرحواره ساختار موجبر مورد مطالعه در شکل (۱) همراه با سلول واحد UC شبکه دو بعدی نمایش داده شده است. برای محاسبه اتلاف انرژی مربوط به یک مد ویژه موجبر دو منبع اتلافی یعنی اتلاف انرژی بدلیل جذب در ماده ΔP_1 و اتلاف انرژی بدلیل فرار آن از راستای موجبری ΔP_2 که به دلیل ناکارآمدی ساختار هندسی موجبر اتفاق می‌افتد مورد بررسی قرار می‌گیرد.

امروزه بلورهای فوتونی به عنوان ساختارهای مناسب برای طراحی و ساخت مدارات مجتمع فوتونی مورد توجه هستند. دلیل این توجه قابلیت کنترل همه جانبی انتشار موج الکترومغناطیسی در دو و سه بعد توسط این ساختارها توسط ایجاد گاف فوتونی می‌باشد بطوری که چگالی حالت‌های فوتونی در این ناحیه کاملاً صفر می‌شود. یکی از پیامدهای آن عدم انتشار موج در ناحیه طیفی گاف فوتونی می‌باشد. از کاربردهای جالب این پدیده جایگزیده کردن نور در حجم کوچکی از فضا (نسبت به طول موج نور) با ایجاد نقص‌های هندسی در ساختار شبکه، می‌باشد [1]. از آنجایی که مکانیزم تولید گاف فوتونی بدون اتلاف است، انتظار می‌رود که جایگزیدگی ایجاد شده به این روش نسبت به روش‌های دیگر مثل استفاده از پلاسمون‌های سطحی در پلاسمونیک دارای تلفات انرژی کمتری باشد. یکی از المان‌های اساسی در این خصوص طراحی موجبرهای بلور فوتونی فشرده است که بتواند نور را در مسیر موجبری با تلفات ناچیز جایگزیده کند. به این ترتیب برای مرتبط کردن قسمت‌های مختلف یک مدار مجتمع تمام اپتیکی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. موجبرهای بلور فوتونی در این تعریف متناظر با سیم‌های الکتریکی مورد استفاده در مدارات مجتمع الکترونیکی هستند. در عمل طراحی موجبر بلور فوتونی با اتلاف انرژی ناچیز به دو دلیل اساسی یکی از چالش‌های بزرگ در علم فوتونیک به حساب می‌آید. دلیل اول این است که امواج الکترومغناطیسی توسط ماده جذب می‌شوند و در نواحی طیفی مختلف بسته به ساختار اتمی و مولکولی ماده، میزان جذب متفاوت خواهد بود. به عنوان مثال، جذب اکثر مواد در طیف تراهertz بسیار زیاد می‌باشد. لذا اجزاء تشکیل دهنده بلور فوتونی صرف نظر از مکانیزم تولید گاف فوتونی، انرژی الکترومغناطیسی را هدر می‌دهند. دلیل دوم این است که بسته به محل و پهنهای طیفی گاف فوتونی ممکن است جایگزیدگی نور در میان نقص وارد شده در شبکه بلوری بطور قوی صورت نگیرد و انرژی موج جایگزیده به تدریج به بیرون از گاف فوتونی نشست کند و به اصلاح مد جایگزیده به مدهای خارج از گاف جفت گردد. بنابراین ساختار هندسی موجبر نیز در تلفات انرژی

انتقالی شبکه در یک بلور فوتونی پدیده های جالبی را موجب می گردد [4]. در این مقاله به جنبه بهبود اتلاف موجبری در شرایط خاص پرداخته می شود.

۳- محاسبه تلفات موجبر

کمیت مورد نظر برای محاسبه تلفات موجبر، ضریب تضعیف α می باشد که توسط قانون بیر-لامبرت با رابطه زیر تعریف می گردد،

$$P(y) = P(y_o = 0) e^{-2\alpha y} \quad (2)$$

بطوریکه $P(y)$ نمایش دهنده توان انتشاری در راستای موجبر (راستای محور مختصات y) و $P(y_o = 0)$ توان $P(y)$ را در مختصات $y=0$ می باشند. توان $P(y)$ را می توان با انتگرال گیری از متوسط زمانی مولفه بردار پوئنتینگ در راستای موجبری با بردار یکه \hat{y} طبق رابطه زیر بدست آورد

$$P = \Delta z \operatorname{Re} \left[\int_{UC} \vec{E}(x, y) \times \vec{H}^*(x, y) \cdot \hat{y} dx \right], \quad (3)$$

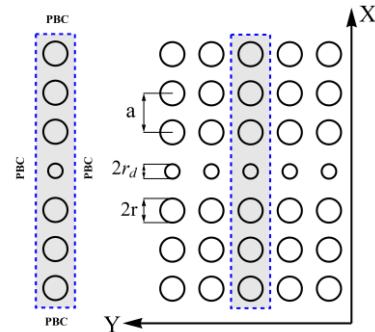
که در آن $\vec{E}(x, y)$ و $\vec{H}(x, y)$ به ترتیب میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی مد ویژه موجبر می باشند. همچنین علامتهای $*$ و Re به ترتیب نمایش دهنده همیوگ مختلط میدان و قسمت حقیقی کمیت مختلط می باشند. با مشتق گیری از رابطه (2) ضریب تضعیف بر حسب دو منبع اتلافی ذکر شده در مقدمه بصورت زیر بدست می آید،

$$\alpha = -\frac{\Delta P_1 + \Delta P_2}{2 P \Delta y}. \quad (4)$$

تلفات جذب توسط ماده را می توان با استفاده از روش جریان القاء شده بر حسب میدان الکتریکی و تابع ضریب شکست ساختار $n(x, y)$ بصورت زیر نمایش داد [5]

$$\Delta P_1 = -\varepsilon_o \omega \Delta z \iint_{UC} \operatorname{Re}[n(x, y)] \operatorname{Im}[n(x, y)] |\vec{E}(x, y)|^2 dx dy, \quad (5)$$

که در آن ω بسامد زاویه ای مد ویژه موجبر می باشد. همچنین علامت Im نمایش دهنده قسمت موهومی کمیت مختلط است. انتگرال رابطه (5) روی سطح سلول واحد موجبر گرفته می شود. از طرف دیگر تلفات توان



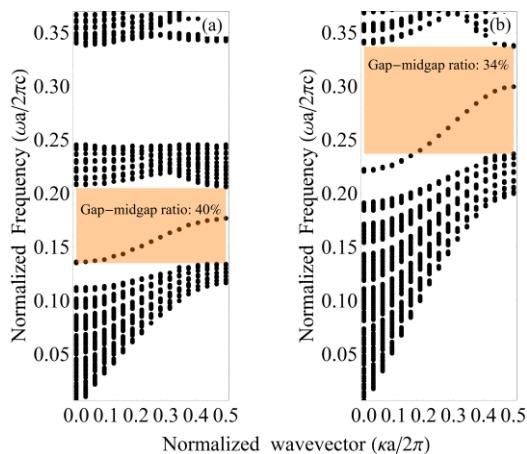
شکل ۱: طرح موجبر بلور فوتونی که از شبکه ای مربعی از استوانه های ماده دی الکتریک در فضای آزاد شکل گرفته است. ثابت شبکه a ، شعاع استوانه ها r و شعاع استوانه های نقص با r_d نمایش داده شده اند. همچنین سلول واحد شبکه موجبر و ناحیه محاسباتی با خط چین مشخص شده است. نماد PBC شرط مرزی بلاخ را در پیرامون ناحیه محاسباتی نمایش می دهد.

۲- پاشندگی طیفی پلاریتونی

پاشندگی طیفی بدلیل برهمنکنش نور و ماده و تشکیل قطب های طیفی در پاسخ اپتیکی ماده بوجود می آید بطوری که ضریب گذردهی الکتریکی ماده بطور صریح تابعی از بسامد می گردد. در مواد یونی بدلیل وجود ارتعاشات شبکه، جفت شدگی میان فونون های اپتیکی عرضی و امواج الکترومغناطیسی عرضی بوجود می آید که به آن برهمنکنش فونون-پلاریتون گفته می شود و در بسامد تشدید فونون اپتیکی عرضی ماده یونی ω_T صورت می گیرد [3]. نتیجه این برهمنکنش افزایش چشمگیر ثابت دی الکتریک در بسامدهای کوچکتر و نزدیک به بسامد تشدید است و همبسته با آن درصد بالایی از انرژی الکترومغناطیسی بسته به شدت برهمنکنش توسط ماده در بسامد تشدیدی جذب می گردد. تابع دی الکتریک یک ماده یونی (ω_e) را می توان توسط یکتابع تک قطبی لورنتسی بصورت زیر نمایش داد

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\sigma}{i\omega\varepsilon_o} + \frac{(\varepsilon_{DC} - \varepsilon_\infty)\omega_T^2}{\omega_T^2 - \omega^2 - i\omega\Gamma}, \quad (1)$$

بطوری که ω_e گذردهی الکتریکی خلاء و ε_∞ و ε_{DC} به ترتیب ثابت دی الکتریک در بسامد اپتیکی و بسامد صفر می باشند. همچنین تلفات اهمی ماده توسط ضریب هدایت پذیری σ و تلفات جذب ماده یونی توسط بسامد میرایی Γ منظور شده است. تلفیق برهمنکنش فونون-پلاریتون و گاف فوتونی ساختاری حاصل از تقارن گسسته



شکل ۲: ساختار باند تصویر شده برای (a) موجبر طراحی شده از استوانه های ماده پاشنده و (b) موجبر طراحی شده از استوانه های ماده دی الکتریک غیر پاشنده با گذردهی الکتریکی ω_e . نواحی ها شور خورده نمایش دهنده گاف فوتونی دارای باند نقص می باشد.

۵- نتیجه‌گیری

بررسی اثر پاشنده‌گی ماده تشکیل دهنده یک موجبر بلور فوتونی دو بعدی از طریق محاسبه ساختار باند فوتونی نشان می دهد که جایگزیدگی باند مدهای نقص در نواحی مرکزی گاف فوتونی در ساختاری که از مواد پاشنده ساخته شده باشد، بیشتر می باشد. لذا ضریب تضعیف انرژی حداقل یک مرتبه بزرگی کوچکتر می باشد. این در حالی است که تلفات جذب ماده پاشنده توسط بسامد میرایی ماده در محاسبات در نظر گرفته می شود. علت این رفتار بزرگتر شدن پهنهای گاف فوتونی بدليل افزایش کنتراست ضرایب شکست در بلور فوتونی پاشنده است بطوریکه جفت شدگی مدهای نقص درون گاف به مدهای خارج از آن ضعیف تر می گردد.

۶- مراجع

- [1] Joannopoulos J D, Johnson S G, Winn J N and Meade R D, *Photonic Crystal Molding the Flow of Light*, Princeton University, 2008.
- [2] امیر حسین برادران قاسمی, "آیا فراتر رفتن از حد پراش در یک بلور فوتونی امکان پذیر است؟", بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران, ۱۳۹۳.
- [3] Kittel C, *Introduction to Solid State Physics*, Wiley, chap14, 2005.
- [4] Baradaran Ghasemi A. H., Mandegarian S., Kebriti H., and Latifi H., *Bandgap generation and enhancement in polaritonic cylinder square-lattice photonic crystals*, *J. Opt.* 14, 055103, 2012.
- [5] Snyder A W and Love J D, "Optical Waveguide Theory", chap 11, Chapman and Hall, 1983.
- [6] Taflove A and Hagness S C, "Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method", Artech House, 2000.

بدليل فرار از راستای موجبری توسط انتگرال گیری از متوسط زمانی مولفه بردار پوئنتیک در راستای عمود بر موجبر بصورت

$$\Delta P_2 = -\Delta z \operatorname{Re} \left[\int_{UC} \vec{E}(x, y) \times \vec{H}^*(x, y) \cdot \hat{x} dy \right], \quad (4)$$

می تواند نمایش داده شود. در این رابطه بردار یکه \hat{x} جهت عمود بر راستای موجبر را نمایش می دهد.

۴- ساختار باند موجبر پاشنده و غیر پاشنده

برای بدست آوردن ضریب تضعیف به کمک رابطه (4) لازم است میدان های الکتریکی و مغناطیسی مد ویژه مورد نظر موجبر در کل سلول واحد شبکه محاسبه شود. در این مقاله میدان های مورد نظر توسط روش تفاضل محدود در حوزه زمان FDTD دو بعدی برای محیط پاشنده محاسبه شده اند [6]. به این منظور فضای محاسباتی توسط شرط مرزی بلاخ به یک سلول واحد شبکه که در شکل (1) نمایش داده شده است، محدود می گردد. طبیعت پاشنده LiTaO_3 از طریق انتگرال پیچش بردار میدان الکتریکی و تابع پاسخ دی الکتریک آن در الگوریتم FDTD لاحظ می گردد. ساختار باند تصویر شده LiTaO_3 برای موجبر طراحی شده از استوانه های ماده TM در شکل (a) نمایش داده شده است. همچنین برای بررسی اثر پاشنده‌گی، ساختار باند موجبر هنگامی که المان های آن از استوانه های دی الکتریک غیر پاشنده که ثابت دی الکتریک آن برابر با ثابت دی الکتریک بسامد اپتیکی LiTaO_3 باشد، محاسبه و در شکل (b) نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می گردد، ساختار پاشنده باعث تولید دو گاف فوتونی در بازه طیفی نرماییه صفر تا $0/37$ می شود. در ضمن پهنهای طیفی گاف فوتونی دارای باند نقص بزرگتر از پهنهای طیفی مشابه در ساختار غیر پاشنده می باشد. ضریب تضعیف محاسبه شده از رابطه (4) برای مدهای $ka/2\pi=0.2$, ویژه ساختار پاشنده اطراف نقطه $\omega a/2\pi c=0.15$ تقریباً برابر با $a=0.1 \text{ m}^{-1}$ بودست می آید که معادل 0.43 dB/m می باشد. همچنین ضریب تضعیف مربوط به ساختار غیر پاشنده متناظر، اطراف نقطه مذکور تقریباً برابر با $a=1.0 \text{ m}^{-1}$ محاسبه می شود که معادل 4.3 dB/m است.