

## اثر کانونی شدن امواج الکترومغناطیسی در بلور فوتونی دو بعدی با ثابت شبکه متغیر تدریجی

فریال بخشی گرمی و جمال بروستانی

گروه حالت جامد و الکترونیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

پست الکترونیکی: barvestani@tabrizu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۱۳؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۶/۱۰)

### چکیده

در این مقاله اثر کانونی شدن امواج الکترومغناطیسی در یک بلور فوتونی دو بعدی با ثابت شبکه متغیر تدریجی متشکل از میله‌های سیلیکون در زمینه هوا بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که بلور فوتونی مدرج توانایی کانونی کردن امواجی با پهنای عرضی بزرگ را در بسامدهای نزدیک به لبه پایین نوار گاف دارد، که در این بسامدها شکل منحنی هم‌بسامد مقعر نمی‌باشد. ساختار نوار فوتونی و منحنی‌های هم‌بسامد مربوط به این بلور با استفاده از روش بسط موج تخت اصلاح شده و محاسبه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با استفاده از روش تفاضلات محدود در حوزه زمان به دست آمده است.

**واژه‌های کلیدی:** بلور فوتونی مدرج، ثابت شبکه، ضریب شکست، گاف نوار فوتونی

### ۱. مقدمه

اما با معرفی بلورهای فوتونی مدرج این امکان به وجود آمد که، نور بدون نیاز به ایجاد نقص داخل بلور فوتونی منحرف شود. در واقع بلور فوتونی مدرج را می‌توان به صورت چند لایه از بلورهای فوتونی مختلف تصور کرد که هر لایه خواص پاشندگی و جهت سرعت انتشار خاص خود را دارد، همچنان که نور از لایه‌های متوالی عبور می‌کند، جهت انتشارش با توجه به جهت سرعت گروه محلی آن تعیین می‌شود. تغییر سرعت گروه

برای بالا بردن هدایت انتشار نور، بلورهای فوتونی‌ای معرفی شده است که در آن‌ها پارامترهای بلور فوتونی دارای تغییرات تدریجی است. این پارامترها می‌تواند کسر پرشدگی یا ثابت شبکه باشد. به این بلورها، بلورهای فوتونی مدرج گفته می‌شود. در مطالعات قبلی انجام شده به منظور تنظیم نور و تغییر جهت انتشار آن لازم بود که از نقص داخل ساختار استفاده شود [۱].

ویژه مقداری مربوط به  $kx$  و  $ky$  به شکل زیر در می‌آید:

$$k_y \begin{bmatrix} [e_x] \\ [h_z] \end{bmatrix} = \frac{1}{k_0} \begin{bmatrix} -k_0 [G_y] & -k_0^2 + ([G_x] + k_x)^{-1} (k_x + [G_x]) \\ -k_0^2 [-] & -k_0 [G_y] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [e_x] \\ [h_z] \end{bmatrix}, \quad (1)$$

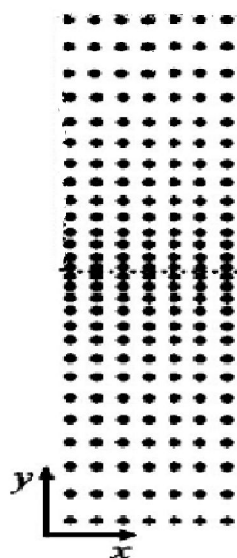
$$k_x \begin{bmatrix} [e_x] \\ [h_z] \end{bmatrix} = \frac{1}{k_0} \begin{bmatrix} k_0 [G_x] & k_0^2 + ([G_y] + k_y)^{-1} (k_y + [G_y]) \\ -k_0^2 [-] & -k_0 [G_x] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [e_x] \\ [h_z] \end{bmatrix}. \quad (2)$$

### ۳. بحث و نتایج

بلور فوتونی مورد بررسی شامل شبکه مربعی دو بعدی از میله‌های سیلیکون با ثابت دی‌الکتریک ۱۲ و شعاع  $0.22a$  در زمینه هوا با ثابت دی‌الکتریک ۱ می‌باشد که ثابت شبکه آن در جهت  $y$  دارای تغییرات تدریجی، و در جهت  $x$  ثابت و برابر  $a$  است. این بلور به طور نمادین در شکل ۱ نشان داده شده است. در این بلور ثابت شبکه در مرکز ساختار دارای کمترین مقدار و برابر با  $0.375a$  و در لبه‌ها دارای بیشترین مقدار که برابر با  $1.4a$  است. گام افزایشی برای ثابت شبکه برابر با  $0.15a$  در نظر گرفته شده است. این بلور در نظر گرفته شده دارای ۷ لایه در جهت  $x$  و ۲۸ لایه در جهت  $y$  است، به گونه‌ای که حول محور افقی مرکزی دارای تقارن است.

برای مطالعه رفتار نور به خصوص رفتار کانونی شدن آن داخل این ساختار، از منحنی هم بسامد استفاده می‌کنیم. همان طور که می‌دانیم برای رسم ساختار نوار بلورهای فوتونی، جهت‌های اصلی انتشار در راستای مرزهای منطقه بریلوین تعریف می‌شود. منطقه بریلوین منطقه‌ای دو بعدی از بردارهای موج می‌باشد که هر بردار موج توسط دو مؤلفه  $kx$  و  $ky$  تعریف می‌شود که متناظر با یک بسامد در هر نوار فوتونی می‌باشد. در حالی که برای یک بسامد در هر نوار فوتونی، مکان هندسه‌ای از بردارهای موج را داریم.

با تصویر کردن سطوح پاشندگی در صفحه بردار موج کتورهای دو بعدی مربوط به مکان هندسی بردارهای موج در

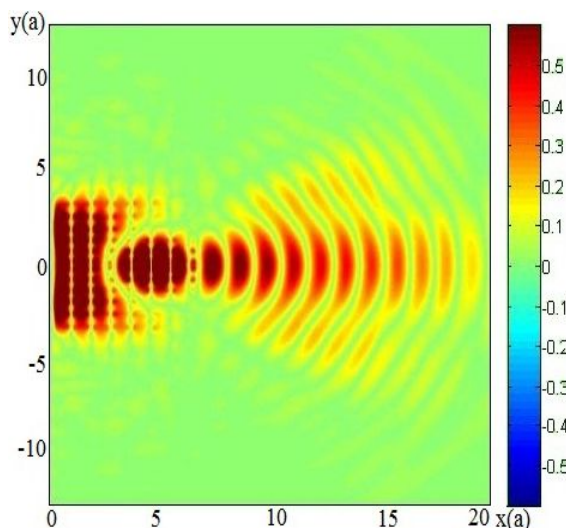


شکل ۱. تصویر نمادین از بلور فوتونی با ثابت شبکه مدرج.

داخل ساختار را می‌توان از طریق مطالعه انحنای منحنی‌های هم بسامدی مشاهده کرد [۲]. اگر انحنای مقعر باشد، اثر کانونی شدن در بلور فوتونی دو بعدی اتفاق خواهد افتاد که این حالت معمولاً در بسامدهای بالای نوار گاف رخ می‌دهد [۳]. اما در اینجا خواهیم دید در بسامدی واقع در نوار اول که شکل منحنی هم بسامد مقعر نمی‌باشد نیز بلور قادر به کانونی کردن موج الکترومغناطیسی است. در این تحقیق بلور فوتونی مورد بررسی شامل شبکه مربعی دو بعدی از میله‌های سیلیکون در زمینه هوا می‌باشد که ثابت شبکه آن در جهت  $y$  دارای تغییرات تدریجی، و در جهت  $x$  ثابت می‌باشد. ساختار نوار و منحنی‌های هم بسامد مربوط به این بلور با استفاده از روش بسط موج تخت اصلاح شده [۴] و محاسبه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و توزیع فضایی آن‌ها با استفاده از روش تفاضلات محدود در حوزه زمان [۵] به دست آمده است.

### ۲. روش محاسبات

روش بسط موج تخت اصلاح شده اساساً یک فرمول‌بندی تغییر یافته از بسط موج تخت معمولی است. فرمول‌بندی جدید یک مسئله ویژه مقداری است که مؤلفه‌های بردار موج را برای یک بسامد داده شده به دست می‌دهد. برتری این روش آن است که برای مواد پاشنده هم مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶]. معادلات



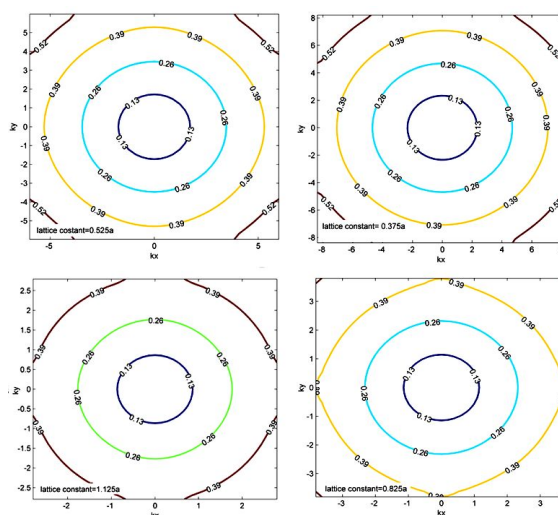
شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) توزیع فضایی میدان الکتریکی داخل بلور فوتونی با ثابت شبکه مدرج در بسامد  $(\frac{\tilde{S}a}{\nu f c})$  برای مد TM.

فوتونی مدرج کانونی می‌شود. در این مقاله راستای تغییرات تدریجی ثابت شبکه را عمود بر راستای انتشار نور در نظر گرفتیم ولی در مقالات مشابه قبلی راستای انتشار نور هم راستای تغییرات تدریجی ثابت شبکه در نظر گرفته شده است که با استفاده از این روش بلور فوتونی مدرج خاصیت یک سو کنندگی پیدا می‌کند و در جهت مخالف نور را کانونی نمی‌کند [۹].

در شکل ۴ اندازه میدان الکتریکی در خروجی ساختار با منحنی پرننگ و در ورودی ساختار با منحنی خط چین نشان داده شده است. در این حالت پهنای کل نصف بیشینه برابر با  $1/80a$  به دست آمده است که نسبت به پهنای موج ورودی  $5/2a$  کاهش یافته است.

همچنین با در نظر گرفتن سه گام افزایشی مختلف برای ثابت شبکه که برابر با  $0/15a$ ،  $0/10a$  و  $0/05a$  می‌باشد، اندازه میدان الکتریکی را محاسبه کرده و پهنای کل نصف بیشینه آن را در لایه‌های مختلف بلورهای فوتونی مدرج در نظر گرفته شده به دست آوردیم. نتایج در شکل ۵ نشان داده شده است.

همان طور که در شکل دیده می‌شود، در هر سه بلور فوتونی مدرج پهنای کل نصف بیشینه موج با عبور از لایه‌ها در جهت  $x$  کاهش پیدا می‌کند که برای لایه هفتم، به کمترین مقدار می‌رسد. همچنین مشاهده می‌شود با زیاد شدن گام افزایشی

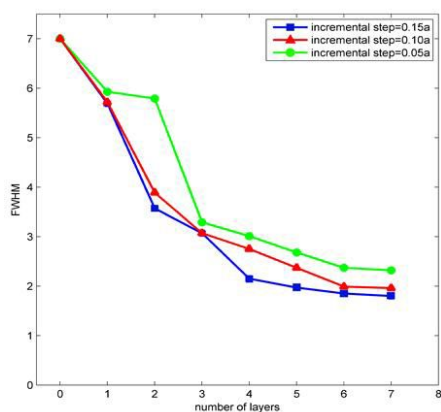


شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) منحنی‌های هم بسامد بلور فوتونی دو بعدی متشکل از میله‌های سیلیکون در زمینه هوا به ازای ثابت شبکه‌های برابر با  $0/375a$ ،  $0/525a$ ،  $0/825a$  و  $1/125a$  برای مد TM.

بسامد ثابت  $\omega$  در فضای معکوس بدست می‌آید. این کنتورها منحنی‌های هم بسامد نامیده می‌شوند. در این مقاله بسامد موج ورودی را ثابت و برابر با  $(\frac{\tilde{S}a}{\nu f c})$  و قطبش آن را TM در نظر گرفتیم. این بسامد را نزدیک به لبه پایینی نوار گاف واقع در نوار اول انتخاب کرده‌ایم. در شکل ۲ منحنی‌های هم بسامد برای بلور فوتونی دو بعدی به ازای چهار ثابت شبکه مختلف برابر با  $0/375a$ ،  $0/525a$ ،  $0/825a$  و  $1/125a$  رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در بسامد مورد نظر انحنای منحنی هم بسامد به ازای ثابت شبکه‌های مختلف تغییر می‌کند. با تغییر انحنای منحنی هم بسامد سرعت گروه تغییر می‌کند که خود این عامل باعث تغییر جهت نور و کانونی شدن آن می‌شود.

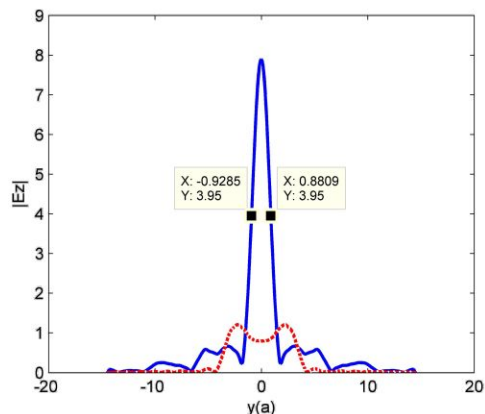
در مطالعات مشابه انجام شده با در نظر گرفتن شعاع میله‌ها به عنوان متغیر تدریجی هم باعث تغییر سرعت گروه و در نتیجه کانونی شدن نور شدند [۸].

توزیع فضایی میدان الکتریکی در داخل بلور فوتونی مدرج مورد بررسی، در شکل ۳ نشان داده شده است. پهنای موج گاوسی ورودی هم برابر با  $7a$  فرض شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، موج با ورود از سمت چپ به درون بلور فوتونی مدرج حالت جمع شدگی به خود می‌گیرد و در خروجی بلور



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) پهنای کل نصف بیشینه میدان الکتریکی در لایه‌های مختلف بلور فوتونی مدرج به ازای گام‌های افزایشی  $0.15a$ ،  $0.10a$  و  $0.05a$  برای ثابت شبکه.

موجی با پهنای عرضی بزرگ در حدود چند ثابت شبکه را در بسامدی واقع در نوار اول نزدیک به نوار گاف را دارد. همچنین با تغییر دادن گام افزایشی برای ثابت شبکه به این نتیجه رسیدیم که اگر گام افزایشی افزایش پیدا کند، پهنای کل نصف بیشینه موج داخل بلور کاهش پیدا کرده و قدرت کانونی کردن آن افزایش می‌یابد.



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) اندازه میدان الکتریکی در خروجی (منحنی پر رنگ) و ورودی (منحنی خط چین) بلور فوتونی دو بعدی متشکل از میله‌های سیلیکون در زمینه هوا با ثابت شبکه مدرج در بسامد  $0.39 \left(\frac{Sa}{\lambda c}\right)$  برای مد TM.

مقادیر پهنای کل نصف بیشینه موج کاهش پیدا می‌کند که این مقادیر به ازای بیشترین گام افزایشی در مقایسه با دو حالت دیگر کوچک‌تر به دست آمده است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

با بررسی رفتار موج الکترومغناطیسی در بلور فوتونی با ثابت شبکه مدرج ملاحظه شد که این بلور توانایی کانونی کردن

#### مراجع

1. W Prather, S Shi, J Murakowski, G J Schneider, A Sharkawy, C Chen, B L Miao, and R Martin, *J. Phys. D* **40** (2007) 2635.
2. E Akmansoy, E Centeno, K Vynck, D Cassagne, and J M Lourtioz, *Appl. Phys. Lett.* **92** (2008) 133501.
3. J Zhi-Jian, P Jing-Cui, and Z Ren-Long, *Chinese Phys. Lett.* **23** (2006) 3359.
4. F Almén, “*Band Structure Computations for Dispersive Photonic Crystals*”, Linköping University Electronic Press (2007).
5. A Taflove and S C Hagness, “*Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*”, Artech House (2005).
6. K S Yee, *IEEE Trans. Antenas Propagat.* **14** (1966) 302.
7. H T Chien and C C Chen, *Opt. Soc. Am.* **14** (2006) 10759.
8. H Kurt, D Yilmaz, A E Akosman and E Ozbay, *Optics Express* **20** 18 (2012) 20635.