

بررسی اثر ساختار در کندشدگی نور در بلورهای فوتونی دو بعدی دارای شکاف

صبا اصغری^{1*}، جمال بروستانی²

1. کارشناسی ارشد، فیزیک، دانشگاه تبریز

2. دانشیار، فیزیک، دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: 1396/04/30 تاریخ پذیرش: 1396/06/23

Investigation of Structural Effect on the Slowing of Light in Slotted Two-Dimensional Photonic Crystals

S. Asghari^{*1}, J. Barvestani²

1. Ms.C, Physics, Tabriz Univesity

2. Associate Professor, Physics, Tabriz University

Received: 2017/07/01 Accepted: 2017/09/14

Abstract

In this paper slow light properties in a photonic crystal waveguide were investigated and changing the radius of the adjacent rings of the slot were used for improving slow light properties. We have studied the characteristic of slotted photonic crystal waveguides slotted, then, by using the super cell method based on plane wave expansion method. For TE mode in a two-dimensional slotted photonic crystal with the symmetry of triangular lattice that has been formed of air rings in silicon background, by changing the radius of the first adjacent rings of the slot, we have achieved the group velocity of $c/40$ and $c/27$ in the bandwidth of 6.6nm and 11.2nm were achieved.

Keywords

Photonic Crystals, Slow Light, Slot, Waveguide.

چکیده

در این مقاله خواص نور کند در یک موجبر بلور فوتونی دارای شکاف بررسی شده است و برای بهبود مشخصه‌های نور کند از تغییر شعاع همسایه‌های اطراف شکاف استفاده کردیم. ویژگی موجبرهای بلور فوتونی دو بعدی شکاف‌دار را با استفاده از روش ابر سلول مبتنی بر روش بسط موج تخت مورد مطالعه قرار داده‌ایم. برای مد TE در یک بلور فوتونی دو بعدی با تقارن شبکه مثلثی که از حفره‌های هوا در زمینه سیلیکون تشکیل شده است، با تغییر شعاع حفره‌های همسایه اطراف شکاف، به سرعت گروه $\frac{c}{40}$ و $\frac{c}{27}$ در پهنای نواری 6.6 nm و 11.2nm دست یافته‌ایم.

واژگان کلیدی

بلورهای فوتونی، نور کند شکاف، موجبر.

مقدمه

بلورهای فوتونی که به دلیل ویژگی‌های قابل توجه‌شان در کنترل انتشار امواج الکترومغناطیسی، در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند، ساختارهای متناوبی از دی‌الکتریک‌ها هستند که به صورت مصنوعی ساخته می‌شوند و در تشابه با نیم رساناها یک ناحیه ممنوع فرکانسی دارند که گاف نوار فوتونی نامیده می‌شود [1]. با ایجاد نقص در بلور فوتونی می‌توان یک یا چند مد هدایت در داخل گاف نوار فوتونی به وجود آورد [3].

به عنوان مثال با ایجاد یک نقص خطی در بلور فوتونی کامل، یک موج‌بر بلور فوتونی به دست می‌آید و این موج‌بر نور را در راستای نقص هدایت می‌کند [2].

اگر تناوب ضریب دی‌الکتریک در دو جهت باشد بلور فوتونی دو بعدی است که از یک سری میله‌های دی‌الکتریک در یک زمینه دی‌الکتریک همگن با ضریب دی‌الکتریک متفاوت قرار دارند. با ایجاد تغییر در ویژگی‌های فیزیکی میله‌های دی‌الکتریک نقص‌های مختلف حاصل می‌شود. یک نوع از این نقص‌ها، شکاف است.

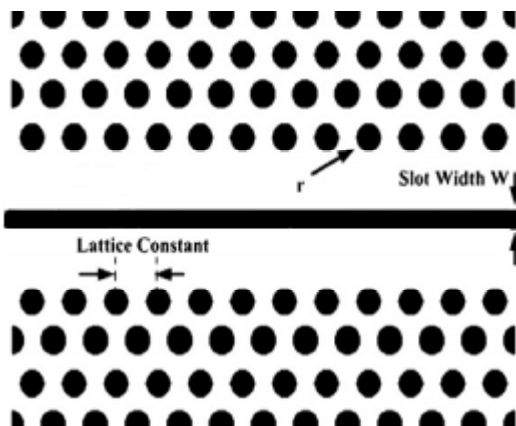
شکاف‌دار کردن بلورهای فوتونی با جایگزین کردن یک ردیف از حفره‌های هوا با یک شکاف باریک شکل می‌گیرد. با ایجاد شکافی از هوا، مدی درون نوار ممنوع فرکانسی ظاهر می‌شود که به مد شکاف موسوم است [4]. سرعت گروه پایین نور در ساختارهای معین می‌تواند جهت کاهش چشمگیر در اندازه تغییرات فاز، تأخیر زمانی و عناصر جبران‌کننده پاشندگی استفاده شود. در سال‌های اخیر توجه دانشمندان و محققان زیادی را به خود جلب کرده است. در این مقاله با تغییر شعاع همسایه‌های اطراف شکاف، به دنبال دستیابی به پهنای نوار وسیع با سرعت گروه پایین هستیم [6].

ساختار بلور فوتونی دارای شکاف

شکاف‌دار کردن بلورهای فوتونی با جایگزین کردن یک ردیف از سوراخ‌های هوا با یک شکاف باریک صورت می‌گیرد [5].

طرح نمادین بلور فوتونی شکاف‌دار با شبکه مربعی و مثلی در شکل (1) مشاهده می‌کنیم. حفره‌های هوا با شعاع $r = 0.3a$ و شکافی به پهنای $S = 0.3a$ و ثابت

دی‌الکتریک $\epsilon_s = 1$ که در زمینه‌ای با ثابت دی‌الکتریک $\epsilon_0 = 12$ قرار گرفته است. در حالت کلی ثابت دی‌الکتریک شکاف و حفره‌ها یکی هستند [7].



شکل 1. طرح نمادین بلور فوتونی دارای شکاف با شبکه مثلی [1].

روش محاسباتی

ساختار نوار الکترونی در بلورهای طبیعی به روش بسط موج تخت با جای‌گذاری تابع موج الکترون‌ها در معادله شرودینگر به دست می‌آید.

روش بسط موج تخت اصلی‌ترین روش برای محاسبه ساختار باند و تحلیل انتشار امواج الکترومغناطیسی درون بلورهای فوتونی و موج‌برهای بلور فوتونی است [8].

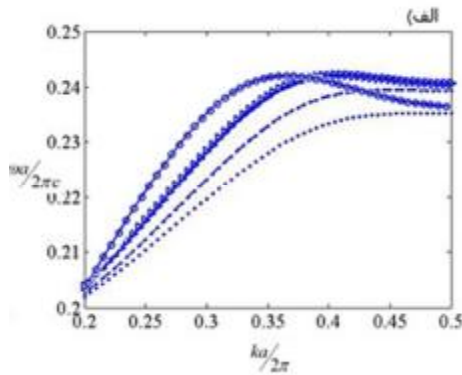
برای درک انتشار پالس نوری در بلور فوتونی لازم است سرعت گروه و پاشندگی سرعت گروه را از طریق ساختار باند فوتونی به دست آوریم. سرعت گروه شیب منحنی برحسب ضریب گروه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$n_g = \frac{dw}{dk} = \frac{c}{n_g} \quad (1)$$

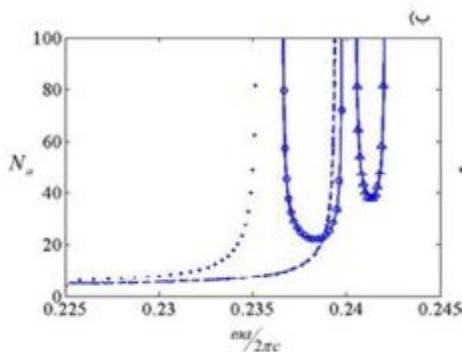
معیار شایستگی نور کند که به صورت حاصل‌ضرب تأخیر زمانی گروه در پهنای باند بهنجار شده تعریف می‌شود،

جدول 1. مشخصات و نتایج مربوط به شکل (2 و 3) که از تغییر شعاع حفره های هوا همسایه اول شکاف در شبکه مثلثی شامل حفره های هوا با شعاع $r = 0.3a$ در زمینه سیلیکون به دست آمده است. شعاع حفره های همسایه دوم شکاف است.

R_1	شکل منحنی	n_g	پهنای نوار (nm)	$\frac{Dw}{w}$	$n_g \cdot \frac{Dw}{w}$
0/32 a	5/9	228	0/1196	0/7056
0/3 a	-----	5.4	218	0.118	0/6144
0/285 a	▲▲▲▲	40/8	6/6	0/0037	0/1509
0/275 a	○●○●	26/5	13/5	0/008	0/212



شکل 2. تغییرات ایجاد شده در مد موج بری شبکه مثلثی (مد TE) شامل حفره های هوا در زمینه سیلیکون، در اثر تغییر شعاع های همسایه اول شکاف. (علامت های منحنی ها متناظر با علامت های قید شده در جدول است)



شکل 3. تغییرات ضریب گروه بر حسب فرکانس مربوط به منحنی های پاشندگی در اثر تغییر شعاع همسایه های اول اطراف شکاف

اندازه های از تعداد بیت های ذخیره شده در یک دستگاه نوری را مشخص می کند و به صورت زیر بیان می شود:

$$\omega_m \text{ که NDPB} = n_g \cdot \frac{Dw}{w_m} \quad (2)$$



فرکانس مرکزی بهنجار شده پالس نوری است.

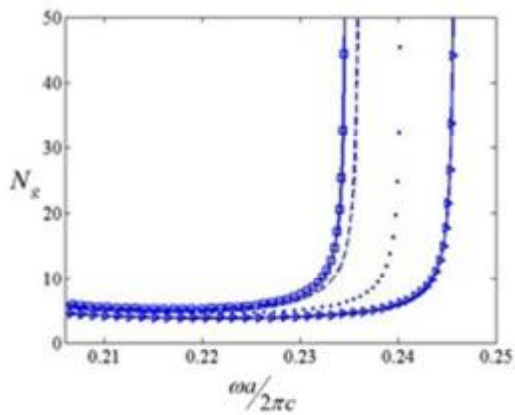
نتایج

یک بلور فوتونی دو بعدی دارای شکافی به پهنای $S = 0.3a$ با تقارن شبکه مثلثی متشکل از حفره های هوا در زمینه سیلیکون $\epsilon_p = 12$ را در نظر گرفته ایم که در آن a برابر با ثابت شبکه است برای به دست آوردن طول موجی در محدوده طول موج مخابراتی، ثابت شبکه را برابر 400nm در نظر گرفته ایم.

سپس با تغییر دادن شعاع حفره های همسایه اطراف شکاف، تغییر حالت منحنی و جابه جایی مد نقص درون نوار ممنوعه فرکانسی و ضریب گروه آن را برای مد TE بررسی کرده ایم. این تغییرات را برای همسایه اول و دوم اطراف شکاف در نظر گرفته ایم.

جدول 2. مشخصات و نتایج مربوط به شکل (5و4) که از تغییر شعاع حفره‌های همسایه دوم شکاف در شبکه مثلثی شامل حفره‌های هوا با شعاع $r = 0.3a$ در زمینه سیلیکون به دست آمده است. در این حالت است و R_2 شعاع حفره‌های همسایه دوم شکاف است.

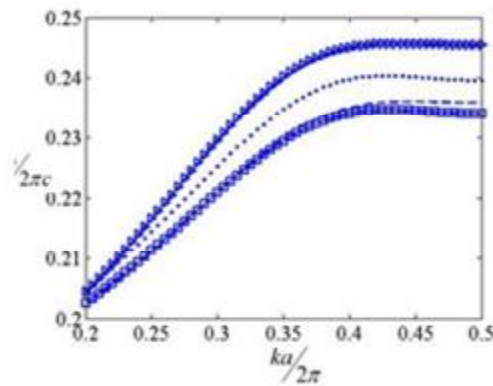
R_2	شکل منحنی	n_g	پهنای نوار (nm)	$\frac{Dw}{w}$	$n_g \cdot \frac{Dw}{w}$
0/285 a		4/17	248	0/134	0/5608
0/3 a	-----	5/4	218	0/1137	0/614
0/32 a		5/65	205	0/1077	0/6086
0/34 a	5/01	226	0/121	0/6050



شکل 5. تغییرات ضریب گروه بر حسب فرکانس مربوط به منحنی‌های پاشندگی در اثر تغییر شعاع همسایه‌های دوم اطراف شکاف

همان طور که از اطلاعات جدول (2) مشاهده می‌شود، در این حالت با افزایش مقادیر ضریب گروه با کاهش پهنای نوار روبه‌رو شده‌ایم. از طرفی، مشاهده می‌شود که میزان تغییر ضریب گروه و همچنین $n_g \cdot \frac{Dw}{w}$ تغییر به صورت جزئی است.

همان طور که از اطلاعات جدول (1) مشخص شده است، با کاهش شعاع همسایه اول، ضریب گروه (سرعت گروه) بیشتر (کمتر) و پهنای نوار کمتر شده است که با توجه به افزایش ماده دی‌الکتریک بلور، مورد انتظار است. با افزایش شعاع همسایه‌های اول میزان $n_g \cdot \frac{Dw}{w}$ افزایش یافته است.



شکل 4. تغییرات ایجاد شده در مد موج‌بری شبکه مثلثی (مد TE) متشکل از حفره‌های حفره‌ای شکل هوا در زمینه سیلیکون، در اثر تغییر شعاع حفره‌های همسایه دوم شکاف

جدول 3. مشخصات و نتایج مربوط به شکل (6 و 7) که از تغییر همزمان شعاع حفره های همسایه اول و دوم اطراف شکاف در شبکه مثلثی شامل حفره های هوا با شعاع $R = 0.3a$ در زمینه سیلیکون به دست آمده است. در این حالت شعاع حفره های همسایه اول و R_2 شعاع همسایه دوم شکاف است.

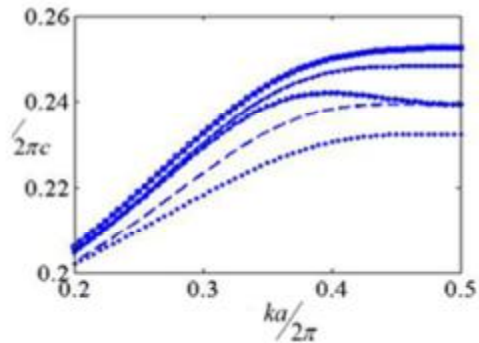
R_1	R_2	شکل منحنی	n_g	پهنای نوار (nm)	$\frac{Dw}{w}$	$n_g \cdot \frac{Dw}{w}$
0/28 a	0/32 a	.....	27	11/2	0/0066	0/1789
0/31 a	0/29 a	▲▲▲▲	4/37	254	0/1347	0/6007
0/3 a	0/3 a	-----	5/4	218	0/1137	0/614
0/32 a	0/32 a	.....	6/6	201	0/1052	0/69680
0/34 a	0/28 a	□□□□	4	262	0/1444	0/5777

مطابق جدول (3)، با تغییر هم زمان شعاع حفره های همسایه اول و دوم شکاف ضریب گروه بالای 27 را به دست آورده ایم. علاوه بر اینکه این مقدار، مقدار بالایی است، حاصل ضرب ضریب گروه - پهنای نوار آن نیز مقدار نسبتا بالایی است و برابر با 11/2 نانومتر است. از این رو این ناحیه فرکانسی می تواند ناحیه مناسبی برای کاربرد نور کند باشد.

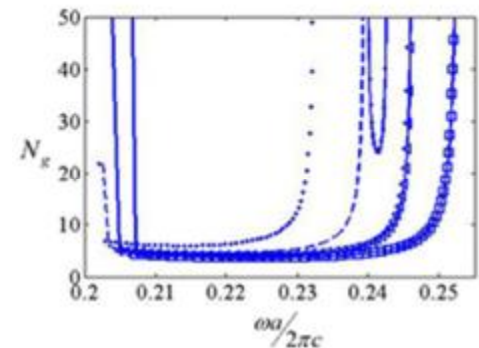
بحث و نتیجه گیری

محاسبات نشان می دهند با تغییر شعاع حفره های همسایه اطراف شکاف می توان مشخصه های نور را کنترل کرد. در حالی که به طور همزمان شعاع حفره های همسایه اول و دوم شکاف برای مد TE در شبکه مثلثی را تغییر دادیم، توانستیم به ضریب گروه بالایی دست یابیم. در این حالت ضریب گروه 27 در پهنای نواری 11/2 نانومتر به دست آمده است، که حاصل ضرب ضریب گروه - پهنای نوار آن 0/1789 بود. همچنین با تغییر شعاع همسایه های ردیف اول به ضریب گروه 41 در پهنای نواری 6/6 نانومتر به دست آمده است، که حاصل ضرب ضریب گروه - پهنای نوار آن 0/1509 بود.

با جابه جایی همسایه های اطراف شکاف در بلور فوتونی دارای بره ضریب گروه 42 در پهنای نوار 6.7 نانومتر به دست آمده است [2]. که نتایج مشابه با نتایج به دست آمده در این مقاله است.



شکل 6. تغییرات ایجاد شده در مد موجبری شبکه مثلثی (مد TE) متشکل از حفره های حفره ای شکل هوا در زمینه سیلیکون، در اثر تغییر همزمان شعاع حفره های همسایه اول و دوم شکاف



شکل 7. تغییرات ضریب گروه بر حسب فرکانس مربوط به منحنی های پاشندگی در اثر تغییر همزمان شعاع حفره های همسایه اول و دوم شکاف

References

- [1] Schulz, S.A., O'Faolain, L., Beggs, D.M., Shite, T.P., Melloni, A. and Krauss, T.F., 2010. Dispersion engineered slow light in photonic crystals: a comparison. *Journal of Optics*, 12(10).
- [2] Su, J., Li, Y., Peng, C. and Sang, Z., 2010. wideband and low dispersion slow light in slotted photonic crystal waveguide. *Optics Communications*, 283(14).
- [3] Scullion, M.G., Krauss, T.F. and Di Falco, A., 2013. Slotted photonic crystal sensors. *Sensors*, 13(3).
- [4] Di Falco, A., O'Faolain, L. and Krauss, T.F., 2008. Dispersion control and slow light in slotted photonic crystal waveguides. *Applied Physics Letters*, 92(8).
- [5] Liu, B., Sang, T., Tang, J., Li, X., Dong, C. and He, Y., 2013. wideband slow light with low dispersion in asymmetric slotted photonic crystal waveguides. *Applied optics*, 52(34).
- [6] Khurgin, J.B. and Tucker, R.S. eds., 2008. *Slow light: Science and applications*. CRC press.
- [7] Chutinan, A. and Noda, S., 2000. waveguides and waveguide bends in two-dimensional photonic crystal slabs. *Physical review B*, 62(7).
- [8] Di Falco, A., O'Faolain, L. and Krauss, T.F., 2008. Dispersion control and slow light in slotted photonic crystal waveguides. *Applied Physics Letters*, 92(8).