بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

نور کند بدون پاشندگی درموجبر بلور فوتونی با شبکه لانه زنبوری

محمد مهدی جهان‌بخشیان و روح الله کریم زاده

دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده –این پژوهش به بررسی خواص نور کند در یک موجبر بلور فوتونی در شبکه‌ی لانه‌زنبوری می‌پردازد. برای این ساختار ضریب شکست گروه ، پاشندگی و رفتار تخت با روش بسط امواج تخت محاسبه شده است. محاسبات عددی نشان می‌دهد که رفتار تخت باند هدایت، پاشندگی و ضریب شکست گروه با تغییر عرض دهانه‌ی موجبر و شعاع حفره‌ها بهبود می‌یابد.

کلید واژه- بلور فوتونی، پاشندگی، نور کند

Dispersionless Slow light photonic crystal waveguide in Honeycomb lattice

M.Jahanbakhshian[1] and R.Karimzadeh[1]

[1]Department of Physics, Shahid Beheshti University, Tehran

Abstract- In this paper we have studied the slow light properties of photonic crystal waveguide in honeycomb lattice. For this structure, the group index , dispersion and the flat band behavior are calculated through the plane wave expansion method. It is shown that by changing the hole size and the width of the waveguide , the group index , dispersion and behavior of flat band can be improved.

Keywords: dispersion, photonic crystal, slow light

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

۱-مقدمه

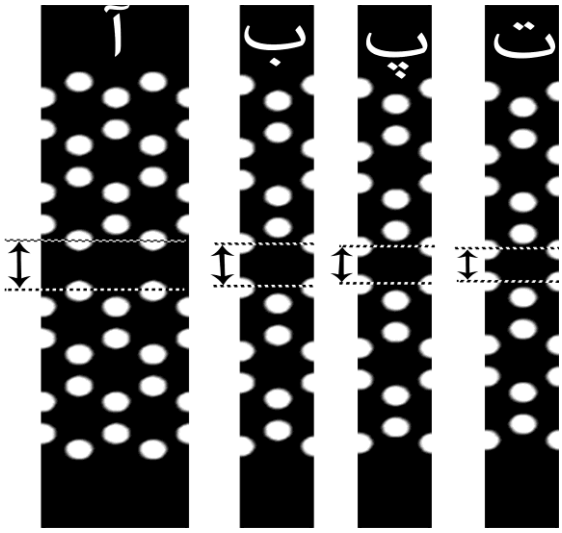
بلورهای فوتونی، محیطی با ضریب شکست متناوب هستند، که تناوب آن ها از مرتبه طول موج نور است. این تناوب باعث به وجود آمدن یک باند ممنوعه در رابطه‌ی پاشندگی بلور فوتونی می شود یعنی به ازای هر عدد موج هیچ فرکانسی در این محیط منتشر نخواهد شد و فقط دامنه میدان در محیط میرا می شود[۱]. با افزودن ناخالصی به یک بلور فوتونی می توان یک فرکانس، یک مد و حتی چند مد را داخل باند ممنوعه بلور فوتونی به-وجود می‌آید. به عنوان نمونه با اضافه کردن یک ناخالصی خطی(حذف یک ردیف از حفره‌ها) به بلور فوتونی یک موجبر به وجود می‌آید. این ناخالصی باعث می شود یک یا چند مد در داخل باند ممنوعه بلور فوتونی تشکیل شود. این موجبر در راستای ناخالصی خطی نور را هدایت می‌کند[۲] که با این ویژگی موجبر می‌توان قطعاتی با بازتاب صفر و انحناهای تند طراحی نمود[۳و۴]. در نور کند برهمکنش نور و ماده نسبت به نور معمولی افزایش می‌یابد این ویژگی باعث می‌شود که برای مشاهده اثرات اپتیکی خطی یا غیر خطی، توان ورودی یا طول نمونه کمتر نیاز باشد. در خطوط تاخیر مخابرات نیز لازم است که پالس نوری را برای مدت زمانی بدون تغییر نگه‌داری کرد به همین علت موجبرهای بلور فوتونی نور کند بدون پاشندگی کاربردهای فراوانی در خطوط تاخیر و اپتیک غیر خطی دارد.

برای ایجاد نور کند لازم است سرعت گروه را کاهش دهیم. در پی کاهش سرعت گروه، پاشندگی سرعت گروه GVD افزایش می‌یابد، افزایش GVD نیز موجب می شود تا پالس نوری هنگام انتشار، بهم ریخته و شکل اصلی خود را از دست بدهد[۵]. به همین علت موجبر بلور فوتونی باید اثرات پاشندگی نداشته باشد در نتیجه باید با روش-های مختلف GVD موجبر را کنترل کرد که از جمله این روش ها می‌توان به تغییر شعاع دو ردیف اول موجبر[۶]، تغییر دهانه‌ی موجبر[۷]، انتقال افقی و عمودی در ردیف ابتدایی نسبت به محور موجبر[۸] ایجاد شکاف و استفاده از حفره‌های حلقوی شکل[۹] اشاره کرد.

در این پژوهش برای بدست آوردن ضریب شکست گروه مناسب و پاشندگی نزدیک به صفر از شبکه لانه زنبوری با شعاع مختلف و دهانه‌ی متفاوت استفاده شده است. مشاهده می‌شود که با تغییر شعاع و دهانه موجبر می‌توان به ضریب شکست گروه برابر با ۳۷ دست یافت. در حالی-که پاشندگی مرتبه دو آن نزدیک به صفر است.

۲-طراحی موجبر

در طراحی این موجبر از پایه مثلثی با شبکه لانه زنبوری استفاده شده است، تفاوت شبکه مثلثی و این شبکه در تعداد حفره‌ها در یک منطقه شبکه است. در این نوع شبکه دو حفره در هر منطقه وجود دارد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود برای تشکیل موجبر دو سمت محور موجبر را به طور متقارن از محور موجبر فاصله می‌دهیم تا عرض آن به مقدار مشخص برسد (عرض موجبر دهانه موجبر در حالتی که تغییری در آن ایجاد نشود برابر با A است). برای محاسبه روابط پاشندگی از بسط امواج تخت دو بعدی[۱۰] با ضریب شکست معادل ۲.۹ با نرم افزار mpb [۱۱]و روش ابر سلول با اندازه‌ی $(1\times11)a$ استفاده شده است (a ثابت‌شبکه).



شکل ۱ ابر سلول استفاده شده در محاسبات برای عرض موجبرهای مختلف، شکل آ دهانه‌ی موجبر 1/6A، شکل ب 1/4A، شکل پ1/2A، شکل ت 1/0A، A عرض موجبر در حالت بدون انتقال

۳-نتایج

مدهای که در داخل باند ممنوعه و زیر خط نوری قرار گرفته‌اند را مدهای هدایت می‌نامند. این مدها با توجه به تقارن موجبر به دو نوع زوج و فرد تقسیم می‌شوند. در این پژوهش مدTE زوج را بررسی خواهیم کرد. در محاسبه‌ی ضریب شکست گروه و پاشندگی مرتبه دو از روابط زیر استفاده میشود:

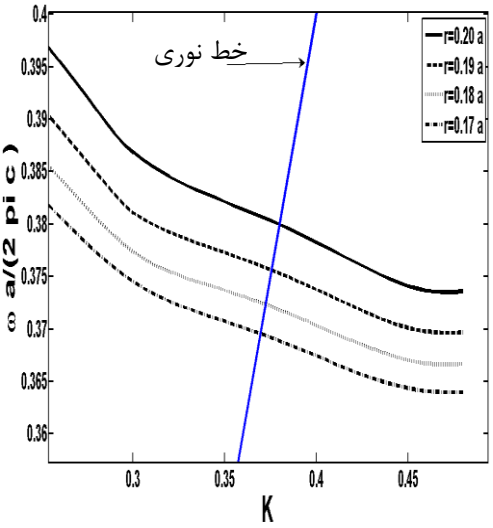
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

$$V_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \qquad (1)$$

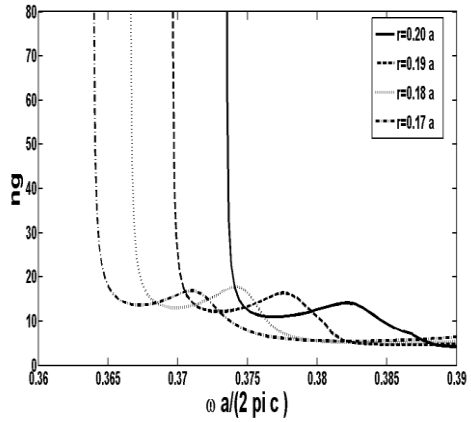
$$\beta_2 = \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} = \frac{1}{V_g^3}\frac{\partial^2 \omega}{\partial k^2} \qquad (2)$$

در شکل ۲، با کاهش شعاع حفره‌ها یک انتقال کاهشی در فرکانس‌ها و تغییر کمی در رفتار تخت باند مشاهده می‌شود. طبق نظریه‌ی تغییرات الکترومغناطیس[۱۲] مد فرکانس‌های کمتر، در محیط با ضریب گذردهی بیشتر متمرکز است، هنگامیکه که شعاع حفره‌ها را کاهش می‌دهیم باعث افزایش ضریب شکست معادل موجبر می‌شود در نتیجه یک انتقال قرمز در باند هدایت مشاهده می‌شود.

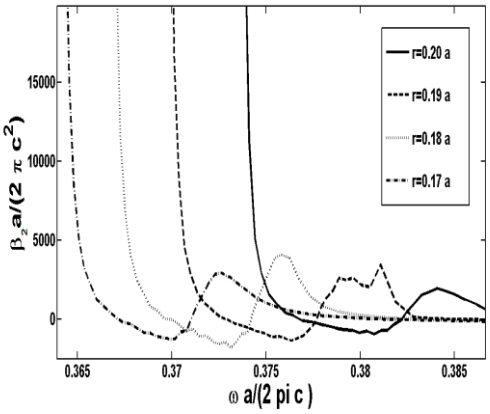
در موجبر نور کند دو نوع مکانیزم هدایت وجود دارد، هدایت تحت تاثیر ضریب شکست که مانند هدایت نور در فیبر نوری عمل میکند و هدایت باند ممنوعه[۷]. نقطه‌ی برخورد این دو هدایت رفتار تخت باند و پهنای باند فرکانسی را مشخص می‌کند. در شکل ۳ مشاهده می‌شود که با کاهش شعاع، ضریب شکست گروه افزایش می‌یابد اما از رفتار تخت خارج شده و پاشندگی آن افزایش می‌یابد(شکل۴) که این ناشی از انتقال نقطه‌ی برخورد دو نوع هدایت به فرکانس‌های کمتر و عدد موج‌های بزرگتر است.



شکل ۲، فرکانس بهنجار بر حسب عدد موج برای شعاع 0/2a(خط)، 0/19a(خط‌چین)، 0/18a(نقطه‌چین) و 0/17a(خط‌نقطه)



شکل ۳، ضریب شکست گروه بر حسب فرکانس بهنجار برای شعاع 0/2a(خط)، 0/19a(خط‌چین)، 0/18a(نقطه‌چین) و 0/17a(خط‌نقطه)



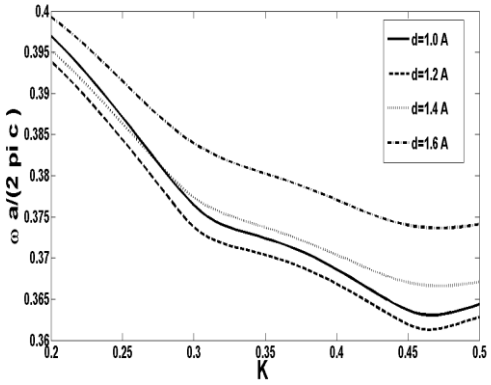
شکل ۴، پاشندگی مرتبه دوم بر حسب فرکانس بهنجار برای شعاع 0/2a(خط)، 0/19a(خط‌چین)، 0/18a(نقطه‌چین) و 0/17a(خط‌نقطه)

همانطور که در شکل ۴ مشخص است، پاشندگی این نوع شبکه از مرتبه $10^3 \frac{a}{2\pi c^2}$ است (a ثابت شبکه، c سرعت نور) که با انتخاب ثابت شبکه a=640nm این پاشندگی از مرتبه $10^{-21}\frac{s^2}{m}$ می‌شود که مقدار مناسبی است.

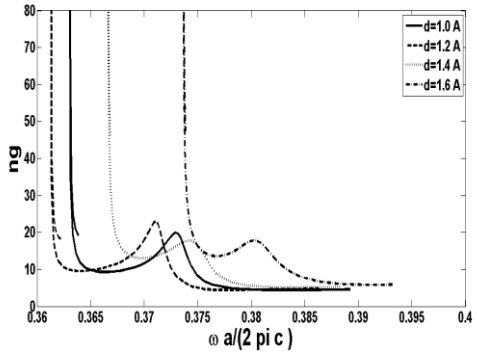
موجبر با عرض d=1A رفتار تخت از خود نشان نداده و پاشندگی بزرگی دارد هنگامیکه عرض موجبر را افزایش می‌دهیم و به d=1/2A می‌رسانیم، رفتار تخت و پاشندگی بهبود می‌یابد(شکل۵). با افزایش مجدد آن و رساندن به d=1/4A مشاهده می‌کنیم که موجبر دو مد هدایت دارد در صورتیکه در حالات قبل تک مد بوده است(شکل ۷و ۵). مد هدایت دوم این موجبر خاصیت تخت از خود نشان نداده و پاشندگی بزرگی را داراست اما مد اول دارای

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

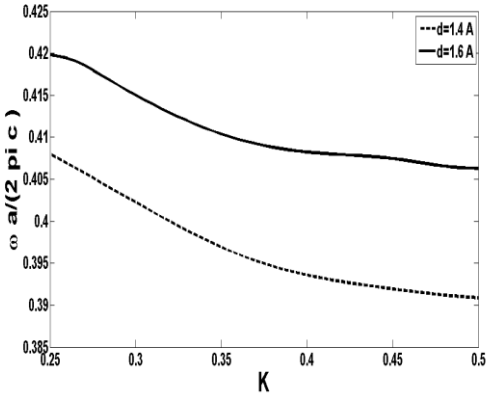
خاصیت تخت و پاشندگی نزدیک به صفر است، هنگامیکه عرض موجبر را به d=1/6A می‌رسانیم، هر دو مد خاصیت تخت یا پله‌ای دارند با این تفاوت که پاشندگی یکی از مدها بسیار بزرگ است شکل۸و۶.



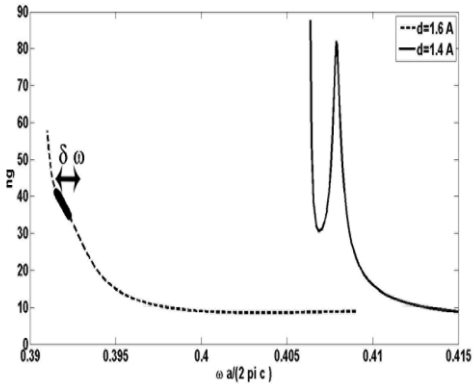
شکل ۵، فرکانس بهنجار برحسب عددموج برای مد پایه به ازای عرض موجبر(خط‌نقطه) d=1/6A ،(نقطه‌چین) d=1/4A ,(خط‌چین) d=1/2Aو d=1/0 A(خط) (A عرض موجبر بدون انتقال)



شکل ۶، ضریب شکست گروه بر حسب فرکانس بهنجار به ازای عرض موجبر(خط‌نقطه) d=1/6A ،(نقطه‌چین) d=1/4A ,(خط‌چین) d=1/2Aو d=1/0 A(خط) (A عرض موجبر بدون انتقال)



شکل ۷، فرکانس بهنجار برحسب عددموج برای مد دوم، دو موجبر با عرض (خط چین)d=1/4A و(خط) d=1/6A



شکل ۸، ضریب شکست گروه برای مد دوم هدایت برای دو موجبر با عرض(خط) d=1/4A و(خط چین) d=1/6A

نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از شبکه لانه‌زنبوری در موجبر بلور فوتونی نور کند با سرعت گروه 0/06c بدون پاشندگی طراحی شده است. محاسبات انجام شده نشان داد که میتوان با تغییر شعاع حفره‌ها و عرض موجبر رفتار تخت باند هدایت را بهبود و پاشندگی آن را کاهش داد.

مراجع

[1] John D. Joannopoulos, Joshua N. Winn*Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*

[2] Steven G. Johnson, Pierre R. Villeneuve, Shanhui Fan, and J. D. Joannopoulos, *Linear waveguides in photonic-crystal slabs*, **PHYSICAL REVIEW B**, 62(2000)

[3] Attila Mekis, J. C. Chen, I. Kurland, Shanhui Fan, Pierre R. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, *High Transmission through Sharp Bends in Photonic Crystal Waveguides*, **PHYSICAL REVIEW B**,*77(1996)*

[4] A. Ferrando, E. Silvestre, J. J. Miret, and P. Andr´es, *Nearly zero ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers*, **OPTICS LETTERS**, 25(2000)

[5] Toshihiko Baba,*Slow light in photonic crystals,* **nature photonics**, 2, 465-476(2008)

[6] Lars H. Frandsen, Andrei V. Lavrinenko, Jacob Fage-Pedersen, and Peter I. Borel , *Photonic crystal waveguides with semi-slow* light ***and tailored dispersion properties***, **OPTICS EXPRESS**, 14 (2006)

[7] A. Yu. Petrova and M. Eich ,Zero dispersion at small group velocities in photonic crystal waveguides, **APPLIED PHYSICS LETTERS,** 85(2004)

[8] Juntao Li, Thomas P. White , Liam O'Faolain, Alvaro Gomez-Iglesias, and Thomas F. Krauss, *Systematic design of flat band slow light in* ***photonic crystal waveguides*** , **OPTICS EXPRESS** ,16(2008)

[9] Kong-Tao Zhu, Tian-Song Deng, Yan Sun, Qi-Feng Zhang, Jin-Lei Wu**,** *Slow light property in ring-shape-hole slotted photonic crystal waveguide,* **Optics Communications,** 219(2013)

[10] Steven G. Johnson and J. D. Joannopoulos, Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis, **OPTICS EXPRESS, 8(2000)**

[11] http://ab-initio.mit.edu/**mpb**

[12] Steven G. Johnson, M. Ibanescu, M. A. Skorobogatiy,* O. Weisberg, J. D. Joannopoulos and Y. Fink, *Perturbation theory for Maxwell's equations with shifting material boundaries*, **PHYSICAL REVIEW E, 65(2002)**

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