بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

# آیا توقف کامل نور در یک موجبر بلور فوتونی امکان پذیر است؟

امیر حسین برادران قاسمی

دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

**چکیده – توانایی در کاهش چشمگیر سرعت گروه موج الکترومغناطیسی بر پایه بلورهای فوتونی مورد توجه جامعه علمی می باشد. تا کنون ساختارهای مختلفی از ان بصورت تئوری و هم بصورت عملی مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از محدودیت های اساسی در میزان کاهش سرعت گروه، محدودیت در مقدار حاصلضرب زمان تاخیر-پهنای باند می باشد بطوریکه امکان صفر کردن سرعت گروه را منتفی می کند. ولی با این حال روشی دینامیکی ارائه شده است که فراتر از این حد رفته و توقف کامل موج الکترومغناطیسی را میسر می سازد. در این روش حداقل دو کاواک بلور فوتونی کوک شده با یک موجبر بلور فوتونی در یک سلول واحد شبکه مورد نیاز می باشد. در مقاله حاضر امکان حذف کاواک ها و قرار گرفتن آنها بعنوان جزئی از موجبر بلور فوتونی برای متوقف کردن نور با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان مورد مطالعه قرار می گیرد. برای این منظور از تلفیق پاشندگی طیفی و نوع نقص هندسی بکار رفته در ساختار بلوری، امکان ایجاد موجبری با مدهای کاواک گونه در سرتاسر بازه مولفه بردار موج امکان پذیر می شود.**

کلید واژه- نور کند، موجبر بلور فوتونی، پاشندگی طیفی، مواد پلاریتونی

# Is it possible to stop light in a photonic crystal waveguide?

Amir Hossein Baradaran Ghasemi

Department of Physics, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract- The ability to extreme slow down the electromagnetic group velocity using photonic crystals is an active research area. Hitherto, different photonic structures have been proposed and investigated both theoretically and experimentally. One of the important limit in slowing light down to zero is the delay-bandwidth product in optical systems. However, there is one proposed method in the literature in order to go beyond this limit so-called dynamic tuning for stopping light. According to this method, at least two cavity in a unit cell are needed to couple to photonic crystal waveguide coherently in order to form cavity-like modes in the structure. In this article, the possibility of eliminating the cavities and considering them as a geometrical defect in photonic crystal structure to introduce a line defect as a waveguide is investigated numerically for stopping light through finite-difference time-domain method. The proposed method is based on making use of both spectral dispersion and the geometrical defect which is introduced to the photonic crystal structure leading to cavity-like modes excitation in whole range of the wavevector component.

Keywords: Slow light, Photonic crystal waveguide, Spectral dispersion, Polaritonic materials



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-15 ]

## ۱- مقدمه

کند کردن سرعت گروه نور، یکی از موضوعات مهم و کاربردی در علم فوتونیک می باشد. اهمیت این موضوع در این است که به این طریق بدون نیاز به منابع همدوس پر توان، برهمنکش نور-ماده افزایش چشمگیری پیدا می کند و خواص غیر خطی ماده حتی در توان های تابشی کوچک برانگیخته می گردد. کاربردهای این عمل در شاخه های گوناگون فوتونیک از جمله در تحقق مدرات مجتمع تمام اپتیکی و میکروکاوک های با فاکتور-Q بسیار زیاد وارد می گردد. اخیرا فاکتور-Q بیش از $۱۰^{۱۲}$ در یک میکرو کره شیشه ای آلاییده شده به ایربیوم گزارش شده است [۱]. نور کند در مخابرات از راه دور، حافظه های تمام اپتیکی و همچنین کلید زنی نوری باعث کاهش چشمگیر توان مصرفی و مینیاتوری شدن این ادوات می گردد.

در ابتدا ایده نور کند از طریق برانگیختن پاشندگی طیفی در ماده در بازه تشدید ان با موج الکترومغناطیسی محقق گردید. استفاده از پاشندگی طیفی مواد در کاهش سرعت گروه محدود به مکانیزم برهمکنش نور-ماده می باشد. به عنوان مثال جذب نور توسط گذار ترازهای انرژی درونی اتم های تشکیل دهنده ماده در فرایند پاشندگی به خصوصیات ذاتی کوانتمی ماده بر می گردد. با مطرح شدن ایده بلورهای فوتونی در مهندسی ساختار باندهای پاشندگی روشی نوین در طراحی و ساخت افزارهای کاربردی مبتنی بر نور کند ارائه گردید. تا کنون ساختارهای مختلفی از موجبرهای بلور فوتونی برای ایجاد نور کند در بازه های مختلف طیفی معرفی شده اند [۲-۶].

در تمامی ساختارهای بلور فوتونی معرفی شده برای مهندسی ساختار باند، تنها امکان تخت کردن قسمتی از نوار مد هدایت در بازه ای محدود از بردار موج وجود دارد. لذا کمیت حاصل ضرب زمان تاخیر-پهنای باند همواره به عنوان محدودیتی در طراحی افزاره های نور کند مطرح می باشد. بطوریکه با توجه به پهنای طیفی پالس نوری مورد نظر، تاخیر زمانی از حدی بیشتر (سرعت گروه از حدی کوچکتر) نمی گردد که این حد بستگی به طول موج نور، تغییر ضریب شکست گروه و طول انتشار دارد [۷]. در سال ۲۰۰۴ ایده ای مطرح شد که توسط آن توقف کامل نور امکان پذیر می شد. این به این مفهوم است که نوار مد هدایت موجبر در سراسر بازه بردار موج کاملا تخت و پهنای طیفی پالس نوری صفر می گردد [۹و۸]. این ایده از روش اولیه ایجاد نور کند توسط شفافیت القایی الکترومغناطیسی EIT گرفته شده است و در حال حاضر بنام کوک سازی دینامیکی شناخته می شود. این روش بر اساس جفت شدگی میان کاواک و موجبر در یک ساختار بلور فوتونی می باشد. ابتدا کاواک بصورت باز عمل می کند و پالس نوری فرودی با پهنای طیفی بزرگ با موجبر جفت شده و وارد آن می گردد. سپس به کمک یک فرایند غیر خطی مثلا روش الکترواپتیکی ضریب شکست در یک فرایند بی درو مدوله می شود. کاواک در این حالت بصورت بسته عمل کرده و پالس نوری در آن محبوس می گردد. در این حالت پهنای طیفی مد هدایت ساختار صفر شده و اطلاعات طیفی پالس نوری بصورت فضایی در تک تک مولفه های بردار موج ذخیره می شود. در نهایت با جفت کردن دوباره کاواک به موجبر، پالس نوری باز یابی شده و از موجبر خارج می گردد. نکته مهم در این کوک سازی این است که بدلیل وجود تقارن انتقالی گسسته در ساختار بلور فوتونی، بردار موج ثابت حرکت است و اطلاعات با صفر شدن پهنای طیفی از دست نمی روند [۱۰].

برای توقف کامل نور و یا به عبارتی صفر شدن سرعت گروه بر اساس کوک سازی دینامیکی، نیاز است که حداقل دو ساختار کویته در سلول واحد شبکه بلور فوتونی در نظر گرفته شود. همچنین در یک ساختار فوتونی استاتیک مانند یک ساختار موجبر بلور فوتونی متعارف و یا یک موجبر تشدید کنند تزویج شده CROW، توقف کامل نور بر اساس انچه که در منابع علمی ذکر شده، امکان پذیر نیست. در این مقاله با ارائه ساختاری از یک موجبر بلور فوتونی امکان ایجاد نوار مد هدایت کاملا تخت را در حالت استاتیک بررسی کرده و نشان داده می شود که با تلفیق پاشندگی طیفی و یک کاواک در سلول واحد شبکه، توقف کامل نور امکان پذیر است.

در ادامه در بخش دوم روش مورد نظر بررسی می گردد. در بخش سوم به مطالعه ساختار موجبر و نمودارهای استخراج شده ساختار باند تصویر شده پرداخته می شود. در نهایت نتیجه مورد نظر در بخش چهارم، ارائه می گردد.



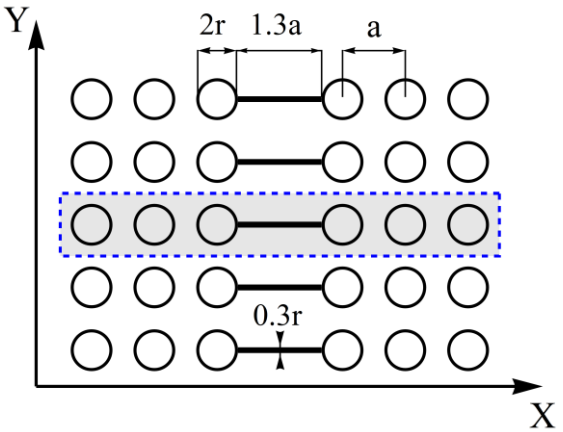
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-15 ]

## ۲- روش

شرط اساسی برای توقف کامل نور در یک موجبر بلور فوتونی با توجه به اینکه مولفه بردار موج در راستای موجبری (ثابت انتشار) ثابت حرکت است این است که موجبر در نمودار ساختار نواری، نوار هدایتی کاملا تخت با شیب صفر در سراسر مولفه بردار موج داشته باشد. به این ترتیب تمام مراتب پاشندگی از جمله پاشندگی مرتبه اول که مربوط به سرعت گروه موج الکترومغناطیسی می شود صفر می گردد. در واقع فیزیک مسئله تولید امواج ایستاده در موجبر می باشد. روش بکار رفته در این مقاله این است که ابتدا با پاشنده کردن ماده تشکیل دهنده بلور فوتونی نور کند ایجاد شود. سپس با وارد کردن نقص مناسب در ساختار موجبر بلور فوتونی امکان ایجاد مدهای ایستاده در ساختار فراهم گردد.

به منظور ایجاد پاشندگی طیفی در ساختار بلور فوتونی از ماده یونی لیتیوم تانتالیت $LiTaO_3$ به عنوان ماده ای با برهمکنش فونون-پلاریتون بسیار قوی استفاده می شود. تشدید این ماده در بسامد فوتون های اپتیکی عرضی در ۴/۲۵ THz اتفاق می افتد. ساختار بلوری مورد نظر از یک شبکه مربعی از استوانه های این ماده ایجاد می گردد. همچنین نقص هندسی در شبکه برای ایجاد موجبر بلور فوتونی از برداشتن یک خط از استوانه ها و قرار دادن میله هایی از همان ماده بوجود می آید.

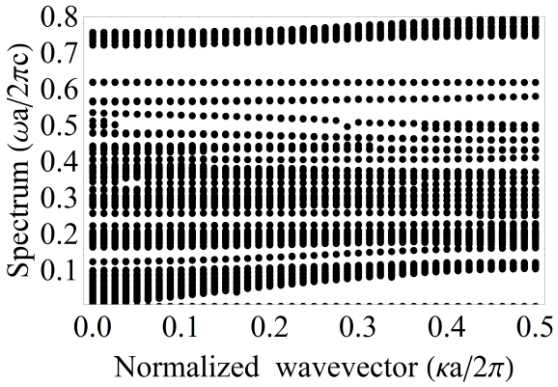



شکل ۱: طرح واره موجبر بلور فوتونی برای توقف کامل نور. مستطیل خط چین سلول واحد شبکه را نمایش می دهد.

در شکل ۱ طرح واره ساختار مورد نظر نمایش داده شده است. در این شکل موجبری در راستای محور-y انجام می گردد. روش محاسباتی برای استخراج ساختار نواری تکنیک تفاضل محدود در حوزه زمان FDTD پاشنده دو بعدی می باشد. روش مورد نظر برای پیاده سازی پاشندگی در روش FDTD و محاسبه چگالی انرژی مدهای ساختار در مقالات [۱۱-۱۳] ارائه شده اند.

## ۳- نتایج

نمودار ساختار نواری تصویر شده در امتداد موجبر در شکل ۲ نمایش داده شده است. ثابت شبکه و نسبت پر شدگی استوانه ها در سلول واحد شبکه بترتیب ۴۵ میکرومتر و ۰/۳ می باشند.




شکل ۲: ساختار نواری تصویر شده موجبر بلور فوتونی با ثابت شبکه ۴۵ میکرومتر و نسبت پر شدگی ۰/۳ . در بسامد نرمالیزه ۰/۶۱۷ نوار هدایتی با شیب صفر در سراسر مولفه بردار موج در راستای انتشار تولید می شود.

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می گردد در بسامد نرمالیزه ۰/۶۱۷ معادل با بسامد ۴/۱۲ تراهرتز، نوار کاملا تختی با شیب صفر (حداقل تا حد دقت محاسبه) در سراسر مولفه بردار موج در امتداد موجبر ایجاد می گردد. این نوار نشان می دهد که امواج ایستاده در موجبر تولید شده است. برای بررسی مد تحریک شده در بسامد مذکور مولفه میدان الکتریکی و چگالی انرژی الکترومغناطیسی جایگزیده در موجبر در شکل ۳ نمایش داده شده است.

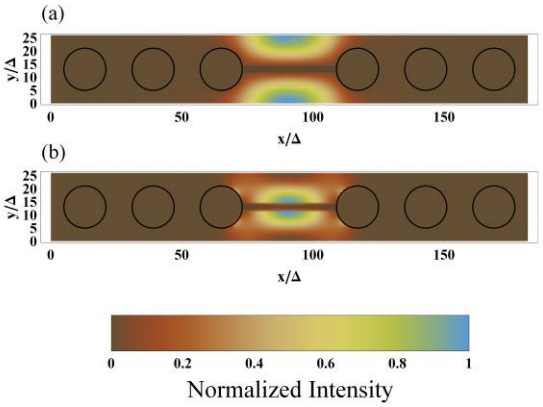
نیم رخ میدان الکتریکی و چگالی انرژی مد برانگیخته شده نشان می دهد که نفوذ انرژی الکترومغناطیسی مد جایگزیده در ماده لیتیوم تانتالیت بسیار کم می باشد و ماکزیمم انرژی در فضای میان ماده یونی تمرکز یافته است. لذا انتظار می رود که تلفات مد مورد نظر در موجبر کوچک باشد. از انجایی که تشدید فونون های اپتیکی عرضی در لیتیوم تانتالیت که موجب پاشندگی شدید آن می گردد در بسامد ۴/۲۵ تراهرتز



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-15 ]

اتفاق می افتد این جایگزیدگی در فضای اطراف ماده اهمیت زیادی پیدا می کند.




شکل ۳: نیم رخ (a) مولفه میدان الکتریکی و (b) چگالی انرژی الکترومغناطیسی مد برانگیخته با سرعت گروه صفر نمایش داده شده است. رنگ قهوه ای تیره شدت صفر و رنگ آبی شدت ماکزیمم را نمایش می دهد. همچنین محورهای افقی و عمودی، نمایش دهنده شبکه فضایی گسسته شده در راستای محور مختصات x و y می باشند.

## ۴- نتیجه گیری

تولید موج ایستاده در یک موجبر شرط اساسی در توقف کامل نور است. پایستگی مولفه بردار موج به عنوان ثابت حرکت در یک ساختار موجبر بلور فوتونی امکان انتقال اطلاعات پالس نوری از فضای بسامد به فضای بردار موج را می دهد. لذا تنها کاری که باقی می ماند این است که در یک فرایند دینامیکی مانند اثر الکترواپتیکی در تغییر ضریب شکست ماده، پهنای طیفی نوار هدایت یک موجبر را بصورت بی درو به صفر رساند و اطلاعات طیفی پالس اپتیکی را در مولفه های بردار موج ذخیره کرد و در طی یک فرایند معکوس دوباره ان را بصورت یک پالس نوری بازیابی کرد. در این مقاله امکان محقق کردن شرط اصلی توقف کامل نور با تلفیق پاشندگی طیفی و نقص هندسی کویته-گونه در خود موجبر بلور فوتونی میسر می شود.

## مراجع

[1] V. Huet, A. Rasoloniaina, P. Guillemé, P. Rochard, P. Féron, M. Mortier, A. Levenson, K. Bencheikh, A. Yacomotti, and Y. Dumeige, “Millisecond Photon Lifetime in a Slow-Light Microcavity”, Phys. Rev. Lett. Vol. 116, 133902, 2016.

[2] J. Hou, D. Gao, H. Wu, R. Hao, and Z. Zhou, “Flat Band Slow Light in Symmetric Line Defect Photonic Crystal Waveguides”, IEEE PHOTON. TECH. LETT., Vol. 21, No. 20, pp. 1571-1573, 2009.

[3] M. D. Settle, R. J. P. Engelen, M. Salib, A. Michaeli, L. Kuipers, and T. F. Krauss, “Flatband slow light in photonic crystals featuring spatial pulse compression and terahertz bandwidth”, Opt. Exp., Vol. 15, No. 1, pp. 219-226, 2007.

[4] J. Li, T. P. White, L. O’Faolain, A. Gomez-Iglesias, and T. F. Krauss, “Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides”, Opt. Exp., Vol. 16, No. 9, pp. 6227-6232, 2008.

[5] M. Xiao-Yu, Z. Geng-Yan, H. Yi-Dong, Z. Wei and P. Jiang-De, “Zero-Dispersion Slow Light with Wide Bandwidth in Photonic Crystal Coupled Waveguides”, Chinese Phys. Lett., Vol. 25, No. 12, 4311, 2008.

[6] S. A. Schulz, L. O'Faolain, D. M. Beggs, T. P. White, A. Melloni and T. F. Krauss, ”Dispersion engineered slow light in photonic crystals: a comparison”, J. Opt., Vol. 12, No. 10, 104004, 2010.

[7] T. Baba, “Slow light in photonic crystals”, Nat. Photonics, Vol. 2, pp. 465-473, 2008.

[8] M. F. Yanik and S. Fan, “Stopping Light All Optically”, Phys. Rev. Lett. Vol. 92, 083901, 2004.

[9] M. F. Yanik, W. Suh, Z. Wang, and S. Fan, “Stopping Light in a Waveguide with an All-Optical Analog of Electromagnetically Induced Transparency”, Phys. Rev. Lett. Vol. 93, 233903, 2004.

[10] M. F. Yanik and S. Fan, “Stopping and storing light coherently”, Phys. Rev. A, Vol. 71, 013803, 2005.

[11] A. H. Baradaran Ghasemi, S. Mandegarian, H. Kebriti and H. Latifi, “Bandgap generation and enhancement in polaritonic cylinder square-lattice photonic crystals”, J. Opt., Vol. 14, No. 5, 055103, 2012.

[۱۲] برادران قاسمی، امیر حسین، "محاسبه جایگزیدگی نور در موجبر بلور فوتونی پاشنده"، کنفرانس فیزیک محاسباتی ایران، ۱۳۹۴.

[13] A. H. Baradaran Ghasemi and H. Latifi, “Miniaturized ultra-low loss subwavelength waveguide at terahertz frequency”, J. Phys. D: Applied Physics, Vol. 49, No. 15, 155104, 2016.



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-15 ]