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

طراحی خم موجبری با میزان عبور زیاد در شبکه ی بلور فوتونی کاگومه

الناز پیله ور[۱]، حسن کاتوزیان[۱] و محمد دانایی[۲]

[۱]آزمایشگاه تحقیقاتی فوتونیک (PRL)، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

[۲]دانشکده مهندسی برق، دانشگاه سمنان

چکیده – در این مقاله خم موجبری *60°* با قابلیت عبور زیاد برای قطبش *TM* در شبکه ی بلور فوتونی کاگومه پیشنهاد شده است. به این منظور، آرایه ی دو بعدی از میله های دی الکتریک به ضریب شکست *3.25* مورد استفاده قرار می گیرد. ساختار خم پیشنهادی با توپولوژی نواری باعث افزایش میزان پالس عبوری می شود. پهنای باند محدوده ای است که در آن میزان عبور بزرگتر از *0.8* یا *1dB* می باشد و حدود *4nm* حول طول موج مرکزی *1330nm* به دست می آید. شبیه سازی ها به کمک دو الگوریتم عددی *PWE* و *FDTD* انجام می گیرد.

کلید واژه- خم بلور فوتونی، شبکه ی کاگومه، قطبشTM، FDTD, PWE .

Design of a High-Transmission Waveguide Bend for Kagome Photonic Crystal Lattice

Elnaz Pilehvar[1], Hassan Kaatuzian[1]and Mohammad Danaie[2]

[1]Photonics Research Laboratory (P.R.L.), Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology,
[2]Faculty of Electrical Engineering, Semnan University

Abstract- In this paper, a 60° photonic crystal bending geometry for TM modes of a Kagome lattice is proposed. A two dimensional array of dielectric rods with refractive index of 3.25 is used for this purpose. The proposed bending structure has a tapered topology which increases the transmission pulse. A bandwidth is defined as the region where the transmission ratio is higher than 0.8 or equally 1dB and equals to 4nm where the central wavelength is at 1330nm. The simulation is performed with the help of two numerical algorithms which are called FDTD and PWE.

Keywords: FDTD, Kagome Lattice, Photonic Crystal Bend, PWE, TM Polarization

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-16]

۱- مقدمه

بلور های فوتونی، ساختارهای نوری با ضرایب دی الکتریک متناوب هستند که به دلیل توانایی منحصر به فردشان در نحوه ی کنترل انتشار نور، بسیار مورد توجه واقع شده اند. این تناوب، ویژگی های خاصی به بلور می بخشد که شکاف باند نوری یکی از آنها می باشد. به این معنی که، نور به ازای بازه ی فرکانسی خاصی قادر به انتشار درون ساختار نمی باشد [۲-۱]. در این بازه ی فرکانسی، بلور فوتونی همانند یک آینه عمل کرده و با بازتابش امواج جلوی انتشار آن ها در درون ساختار را می گیرد. در این صورت، با ایجاد نقص در بلور فوتونی و در نتیجه، ایجاد موجبر یا حفره ی تشدید، امکان کنترل و هدایت نور وجود خواهد داشت [۳]. آرایش های مختلفی مثل مربعی، مثلثی، کاگومه، لانه زنبوری و غیره با ساختارهای پایه ی مختلف مثل دایره، مربع، هگزاگونال و غیره برای ساخت بلور های فوتونی وجود دارد و مهم ترین هدف در انتخاب نوع ساختار، شکاف باند بزرگ می باشد که پیش نیازی برای رسیدن به ناحیه ی تک مود بزرگ می باشد. بلور های فوتونی به سه دسته ی یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی قابل تقسیم می باشند. تعداد ابعاد را تعداد راستاهایی که بلور در آنها متناوب می باشد، معین می کند. پروسه ساخت دشوار و تحلیل زمانبر بلور های سه بعدی سبب گشته است که اغلب، بلور های فوتونی دو بعدی مورد بحث قرار گیرند. بلور های فوتونی دو بعدی بسیاری از خواص بلور های سه بعدی را دارا هستند، ضمن آنکه تحلیل آنها به مراتب ساده تر از بلور های سه بعدی است [۴].

بلور های فوتونی دو بعدی دارای دو نوع توپولوژی اساسی می باشند: دسته اول این کریستال ها شامل بسترهای دی الکتریکی هستند که در آنها حفره های هوا به صورت پریودیک تعبیه شده اند و دسته دوم میله های دی الکتریکی هستند که به صورت متناوب در هوا آرایش یافته اند. به طور کلی دسته اول برای نورهای تابشی با قطبش (Transverse Electric) TE و دسته ی دوم برای قطبش (Transverse Magnetic) TM دارای شکاف باند نوری بزرگ می باشد [۳].

موجبر در بلور های فوتونی با حذف یک یا چند ردیف از دی الکتریک ها در بلور ایجاد می شود. در صورتی که این ردیف های حذف شده باهم تقاطع داشته باشند خم تشکیل می شود. به دلیل عدم تطابق بین مودهای یک موجبر ساده و خم، بازتابش در خم رخ می دهد. بنابراین بازدهی خم را می توان با بهبود ساختار در نزدیکی خم افزایش داد. اتصالات پایه ی موجبری از قبیل زانوی °۹۰، زانوی ° ۶۰، انشعابات Tو Y و یا تقاطع های موجبری جز اولین موارد در زمینه ی بلور های فوتونی بودند که محققین به بررسی آنها پرداختند. نقش این ساختارها در طراحی مدارهای مجتمع نوری همانند نقش گره در مدارات مجتمع الکتریکی می باشد. به دلیل گسستگی که این اتصالات در مسیر سیگنال ایجاد می کنند، ساختاری بهینه و متقارن در نواحی خمیدگی و زانوها نیازمند است تا با افزایش بازده عبوری قابل استفاده در مدارهای مجتمع نوری باشند [۶-۵].

شبکه ی کاگومه از معروف ترین شبکه های دو بعدی می باشد که الگوی آن با حذف دی الکتریک های معینی از آرایه ی هگزاگونال ایجاد می شود. از برتری های این شبکه داشتن شکاف باند بزرگ برای مود TM می باشد. به همین دلیل، این ساختار کاربردهای بسیار زیادی در هم در عرصه ی آکادمیک و هم صنعت دارد. این شکاف باند علاوه بر فوتون ها، برای امواج آکوستیکی نیز، که فونون نامیده می شوند صادق است. اثرات آکوستواپتیک مثل پراکندگی بریلوئین برانگیخته در ابعاد نانو رخ می دهد و به اسم اپتو- مکانیک شناخته شده است. یکی دیگر از کاربردهای شبکه ی کاگومه در سوئیچ های تمام نوری فوق العاده سریع می باشد [۹-۷].

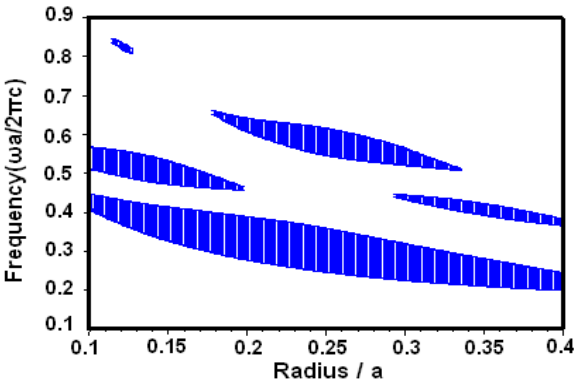
در بخش ۲ به ارائه طرح بهبود یافته ی خم موجبری با عبور بالا در شبکه ی کاگومه حول طول موج ۱۳۳۰ نانومتر خواهیم پرداخت و سپس در بخش نتیجه گیری ، به بررسی نتایج مربوط به طرح پیشنهادی خواهیم پرداخت.

۲- طراحی خم موجبری با عبور بالا در شبکه ی بلور فوتونی کاگومه

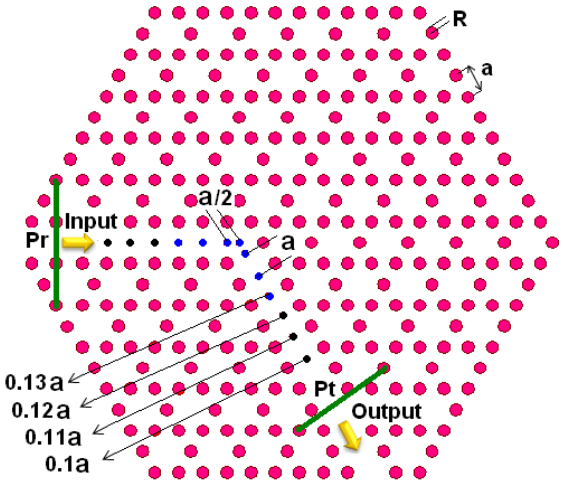
در این قسمت به طراحی ساختاری برای عبور نور از خم موجبری ۶۰ درجه با قطبش TM در شبکه ی کاگومه خواهیم پرداخت. به این منظور از آرایش میله های دی

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-16]

الکتریک در هوا استفاده خواهیم کرد. ضریب شکست میله های دی الکتریک n=۳.۲۵ در نظر گرفته شد. این ضریب شکست معادل با ترکیب عناصر گروه III-V جدول تناوبی مثل InGaAsP/InP می باشد [۱۰].یکی از پارامترهای مهم در طراحی های بلور فوتونی شعاع میله ها می باشد به طوری که در گستره ی وسیعی شکاف باند ایجاد کند. چرا که نور تنها با فرکانسی در محدوده ی شکاف باند قادر است در موجبر کریستال انتشار یابد. با مقایسه ی بین شعاع های میله های مختلف و شکاف باند متناظرشان با استفاده از روش بسط موج صفحه ای یا PWE (Plane Wave Expansion) و با حداقل تعداد باند n=4، مطابق شکل ۱ مشاهده می شود که شکاف باند به ازای R/a=۰.۲۵ (a ثابت شبکه) نسبت به شعاع های همسایه ماکزیمم می باشد. بنابراین این شعاع به عنوان شعاع بهنجار شده برای میله های دی الکتریک در نظر گرفته شد. افزایش اندازه ی شعاع بهنجار شده ی بزرگتر از ۰.۳ علاوه بر نداشتن شکاف باند ماکزیمم باعث شکننده شدن تر شدن ساختار نیز می شود. پایین ترین شکاف باند در ناحیه ی (ωa/2πc)-۰.۳۵۹(ωa/2πc) ۰.۲۴۶ با پهنای نسبی ۳۷.۳۵٪ و شکاف بعدی با پهنای نسبی ۱۲.۱٪ متمرکز شده است.C سرعت نور در خلأ و ω فرکانس زاویه ای می باشد.پس از ایجاد موجبر ساده با اضافه کردن میله های اضافی در داخل آن عرض ناحیه ی تک مود افزایش یافت و شعاع بهینه برای این میله های اضافی برابر با r_d=۰.۱۳a به دست آمد. منظور از ناحیه ی تک مود بازه ی فرکانسی می باشد که فقط یک مود عبوری وجود داشته باشد. بنابراین ساختار شکل ۲ برای خم موجبری ۶۰ درجه درشبکه ی بلور فوتونی کاگومه پیشنهاد گردید.



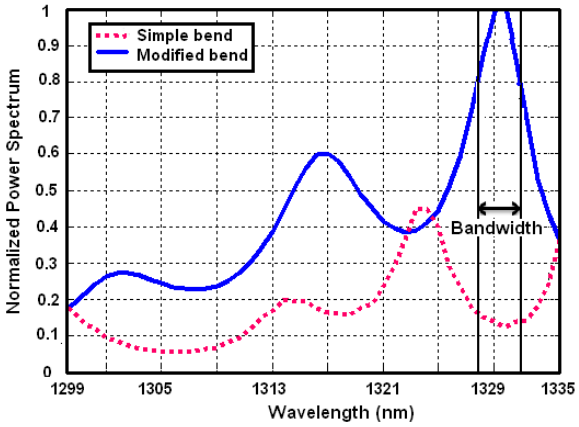
شکل ۱: مقایسه ی شکاف باند برای میله های با شعاع های مختلف در شبکه ی بلور فوتونی کاگومه



شکل ۲: ساختار نواری پیشنهادی برای خم موجبری ۶۰ درجه در شبکه ی بلور فوتونی کاگومه. این ساختار شامل ۴ میله ی اضافی در داخل موجبر می باشد که شعاع آن ها به صورت تدریجی و برابر با ۰.۱a، ۰.۱۱a، ۰.۱۲a، ۰.۱۳a تغییر می یابد.

نور عبوری با فرکانسی برابر با (ωa/2πc) ۰.۳۳ از سمت چپ و از قسمت input به منحنی وارد می شود و از قسمت output خارج می گردد. Pt و Pr توان عبوری و بازتابشی از خم موجبری را نشان می دهند. به جای استفاده از شعاع های یکسان در داخل موجبر، تغییر شعاع میله های اضافی به صورت تدریجی یا به عبارتی استفاده از ساختار نواری با شعاع های ۰.۱a، ۰.۱۱a، ۰.۱۲a، ۰.۱۳a می تواند باعث افزایش بیشتر عبور در پهنای باند وسیعتر و همچنین کاهش نور بازتابشی شود. در حالی که استفاده از دی الکتریک های با شعاع یکسان در داخل موجبر پهنای باند کمتری نسبت به حالت نواری دارد. همچنین در یک فرکانس خاص میزان قله ی نور عبوری در حالت بدون ساختار نواری کمتر از حالت نواری است. دلیل این امر به دلیل افزایش مودهای هدایتی از بیرون به داخل موجبر یا در واقع افزایش میدان الکتریکی درون موجبر می باشد. منحنی عبور نرمالیزه به ورودی به ازای طول موج قبل از بهبود خم موجبری با خط چین و پس از آن با خط تیره در شکل ۳ و با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه ی زمان یا FDTD (Finite Difference Time Domain) نشان داده شده است. اگر پهنای باند را طیف گذر بالاتر از ۰.۸ یا 1dB تعریف کنیم، پهنای باند ساختار حدود ۴ nm حول طول موج مرکزی ۱۳۳۰nm به دست می آید. بنابراین ثابت شبکه ی بلور فوتونی باید

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-16]



شکل ۴: مقدار عبور نرمالیزه نسبت به طول موج نشان می دهد که پهنای باندی حدود ۴nm حول طول موج مرکزی ۱۳۳۰nm به دست می آید. منحنی خط چین میزان عبور نرمالیزه شده به ورودی قبل و منحنی پیوسته بعد از بهبود ساختار می باشد.

برابر با nm ۴۳۲ باشد. طول موج۱۳۳۰nm از جمله پرکاربردترین طول موج ها در مخابرات فیبر نوری می باشد و اهمیت آن به دلیل حداقل بودن میزان پاشندگی نور هنگام عبور از میان فیبر نوری می باشد[۱۱]

روش های مختلفی در خم های موجبری با زوایای مختلف در شبکه های دیگری مثل مثلثی و مربعی پیشنهاد گردیده است ولی هدف اصلی همگی آن ها افزایش پهنای باند به قیمت کاهش میزان نور عبوری از خم می باشد [۱۳-۱۲]. بنابراین این ساختارها نمی توانند در کاربردهایی مثل فیلتر طول موج، سوئیچ های تمام نوری، مدولاتورها و لیزر که نیاز به استفاده از منحنی های تیز در طول موج های خاص می باشد مورد استفاده قرار بگیرند. در این مقاله با استفاده از شبکه ی کاگومه ی میله ای در قطبش TM به این هدف رسیدیم.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله، شیوه ی جدیدی برای افزایش میزان عبور از داخل خم موجبری ۶۰ درجه ی شبکه ی بلور فوتونی کاگومه پیشنهاد شده است و نشان داده شد که با استفاده از ساختار نواری یا تغییر شعاع میله های اطراف تقاطع به صورت تدریجی می توان میزان عبور از خم موجبری را افزایش داد. پهنای باند در ناحیه ای تعریف می شود که میزان عبور بزرگتر از 0.8 یا 1dB می باشد و برابر با ۴nm حول طول موج مرکزی ۱۳۳۰nm به دست آمد. این تیزی منحنی عبور کاربردهای خاص خود را دارد مثل فیلتر طول موج، مدولاتور، سوئیچ های نوری و لیزر.

مراجع

[1] Johnson S.G., Joannopoulos J.D., Photonic Crystals, The Road From Theory to Practice, Springer, 2002.

[2] Joannopoulos J.D, Johnson S.G, Winn J.N, Meade R.D, *Photonic Crystals: Modeling the Flow of Light*, 2nd Edition, Prinston University Press, 2008.

[3] S. G. Johnson and J. D. Joannopoulos, Introduction to Photonic Crystals: Bloch's Theorem, Band Diagrams, and Gaps. MIT University Press, 2003.

[4] Foghani S., Kaatuzian H., Danaie M., *Simulation and design of a wideband T-shaped photonic crystal splitter*, **Optica Applicata**, Vol. XL, No. 4, 2010, pp. 863-872.

[5] Johnson, Steven G; Manolatou, Christina; Fan, Shanhui; Villeneuve, Pierre R; Joannopoulos, J.D.; Haus, H.A., "*Elimination of Cross Talk in Waveguide Intersections*", **Optics Letter**, Vol. 23, No. 23, p. p. 1855-1857, December 1998.

[6] Mekis, A; Chen, J.C.; Kurland, I.; Fan, S.; Villeneuve, P.R.; Joannopoulos, J.D., "*High Transmission Through Sharp Bends in Photonic Crystal Waveguides*", **Physics Review Letter**, Vol. 77, No. 18, p. p. 3787-3790, October 1996.

[7] Ma, P.; Robin, F.; Jackel, H., "Realistic Photonic Band Gap Structures for TM-Polarized Light for All-Optical Switching", **Optica Express**, Vol. 14, p. p. 12794-12802, 2006.

[8] Nielsen, J.B.; Ssndergaard, T.; Barkou, S.E.; Bjarklev, A.; Broeng, J.; Nielsen, M.B., "*Two-Dimensional Kagome Structure, Fundamental Hexagonal Photonic Crystal Configuration*", **Electronics Letter**, Vol. 35, No. 20, p. p. 1736-1737, September, 1999.

[9] Pennec, Y.; Jafari Rouhani, B.; Boudouti, E.H.; Li, C.; Hassouani, Y.E; Vasseur, J.O.; Papanikolaou, N.; Benchabane, S.; Laude, V.; Martinez , A., "*Simultaneous Existence of Phononic and Photonic Band Gaps in Periodic Crystal Slabs*", **Optics Express**, Vol. 18, No. 13, p. p. 14301-14310, 2010.

[10] Ma, P.; Jackel, H., "Low Crosstalk Waveguide Intersections In Honeycomb Lattice Photonic Crystals for TM-Polarized Light", **Journal of Optics**, Vol. 13, p. p. 1-6, July, 2011.

[11] Pilehvar, Elnaz.; Kaatuzian, Hassan.; Danaie, Mohammad., "*Simulation and Design of a Low Crosstalk Hexagonal Photonic Crystal Crossover Waveguide*", **Optics ond Photonics Journal**, Vol. 3, No. 2B, p. p. 209-211, June, 2013.

[12] Hu, Z.; Lu, Y.Y., "Improved Bends for Two-Dimensional Photonic Crystal Waveguides", Optics Communications, Vol. 284, p. p. 2812-2816, 2011.

[13] Xiao, S.; Qiu, M., "Study of Transmission Properties for Waveguide Bends by Use of a Circular Photonic Crystal", **Physics Letter A**, Vol. 340, p. p. 474-479, 2005.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-16]