بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

جفتگر بلور فوتونی دو بعدی متشکل از عدسی مدرج بلورفوتونی و موجبر

تایماز فتح الهی خلخالی[۱]، زهرا زارعیان[۲]

[۱]پژوهشکده‌ی فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

tfathollahi@aeoi.org.ir

[۲]دانشکده فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

zareian.zahra@gmail.com

چکیده - در این تحقیق بازده جفت‌شدگی مربوط به جفتگر متشکل از عدسی مدرج خطی بر پایه‌ی بلور فوتونی و موجبر بلورفوتونی با شبکه مثلثی محاسبه شده است. موجبر بلور فوتونی از میله‌های زیرکونیا ZrO_2 با سطح مقطع مربعی در دو نوع طراحی معمولی و قیفی شکل به کار رفته است. نتایج محاسبات و شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در جفتگر مذکور بیشترین بازده جفت‌شدگی مربوط به ترکیب موجبر قیفی با عدسی خطی مدرج است و مقدار آن dB ۴/۶۱ می‌باشد.

کلید واژه- بلور فوتونی دو بعدی، عدسی مدرج بلور فوتونی، روش بسط موج تخت، روش تفاضل محدود در حوزه زمان، جفتگر (جفت کننده)

Two Dimensional Photonic Crystal Coupler Composed of Graded Index Photonic Crystal Lens and waveguide

Taymaz Fathollahi Khalkhali, Zahra Zareian

Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran. tfathollahi@aeoi.org.ir

Physics Department, Payame Noor University, Tehran, Iran. zareian.zahra@gmail.com

Abstract- In this paper the coupler efficiency of a coupler is investigated which it composed of GRIN PC linear lens and triangular PCW. The PCW is applied in ZrO_2 rods in air by square cross section in two designed form namely regular and funnel form. The results of simulations and calculations showed that the highest coupling efficiency belongs to composition of funnel waveguide and linear lens in amount of ٤,٦١ dB.

Keywords: ۲D photonic crystal, Finite-Difference Time-domain Method, Photonic Crystal Couplers, Plane Wave Method

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

مفهوم بلور فوتونی به نوعی محیط نوری مصنوعی برمی-گردد که ضریب شکست آن به طور تناوبی در کل محیط تغییر می‌کند. متناسب با تغییر ضریب شکست در یک، دو ویا سه راستا، از تعریف بلور فوتونی یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی استفاده می‌شود[۱]. با طراحی های متفاوت این ساختار ها می‌توان به کاربردهای فراوانی از آن دست یافت. عدسی‌های بلور فوتونی با تغییرات تدریجی در ضریب شکست، نوعی کاربرد جذاب از این محیط نوری است که بر مبنای آن می‌توان وسایل نوری پیچیده‌تر مانند جفتگر (جفت کننده) را طراحی کرد. در این مقاله ابتدا عدسی مدرج طراحی شده است و سپس با موجبر بلور فوتونی جفت شده و بازده جفتگر محاسبه شده است.

بررسی ساختار و روش محاسباتی

در این پژوهش عدسی مدرج بلور فوتونی طراحی شده که متشکل از لوله‌های نازک زیرکونیا یا دی اکسید زیرکونیوم (ZrO_2) در زمینه هوا می‌باشد. اندازه ضریب شکست این ماده ۲/۱۶ است که در محدوده طول موجی وسیعی ثابت می‌باشد. این ویژگی دلیل خوبی برای استفاده از این ماده است علاوه بر اینکه این ماده در دماهای بالا پایدار است و در برابر خوردگی شیمیایی مقاومت دارد [۲]. سپس درون لوله ها با بلورهای مایع فنیل استیلن پر شده. این ماده دارای دو مقدار ضریب شکست عادی ۱/۵۹ و ضریب شکست غیر عادی ۲/۲۲ است [۳]. اگر بلورهای مایع تحت ولتاژ خارجی قرار بگیرند، جهت گیری آن‌ها تغییر می‌کند و منجر به تغییر در اندازه ضریب شکست ماده می‌شود. در این بررسی از اثر اعمالی ولتاژ خارجی صرف نظر شده و تنها مقدار ضریب شکست عادی بلورهای مایع در نظر گرفته شده است و در این حالت جهت گیری بلورهای مایع به موازات جهت محور x می‌باشد. ضریب شکست موثر بلورهای مایع از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$n_{eff,LC}^2 = \frac{n_e^2 n_o^2}{n_e^2 \cos^2(\theta) + n_o^2 \sin^2(\theta)} \qquad (۱)$$

این میله ها در یک شبکه مثلثی قرار دارند که محور نوری $\Gamma - K$ است. اندازه شعاع میله‌ها از مرکز ساختار به سمت لبه‌ها در جهت عرضی محور نوری به طور تدریجی کاهش میابد. در مرحله‌ی بعد موجبر بلور فوتونی متشکل از میله-هایی با سطح مقطع مربع در شبکه مثلثی، در مقابل عدسی مدرج قرار می‌گیرد. ترکیب مذکور جفتگر (جفت کننده) می‌باشد و برای محاسبه‌ی بازده جفتگر از روش انتگرال‌گیری عددی سیمپسون در محدوده‌ی $-6\lambda \le y \le 6\lambda$ توسط رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود.

$$\frac{\int_{-6\lambda}^{6\lambda} |E_Z|^2_{Graded\ Index\ Lens+Waveguide}}{\int_{-6\lambda}^{6\lambda} |E_Z|^2_{Waveguide}} \qquad (۲)$$

با ضرب لگاریتم این نسبت در عدد ده، بازده جفتگر بر حسب دسی بل محاسبه می‌گردد [۴].

در این مقاله برای تعیین مشخصات پاشندگی بلور فوتونی و همچنین موجبر بلور فوتونی از روش بسط موج تخت PWE استفاده شده است که روشی عددی بر اساس بسط فوریه میدان‌های الکترومغناطیسی و ثابت دی‌الکتریک است[۵]. از طرف دیگر برای بررسی نحوه‌ی توزیع میدان الکترومغناطیسی در درون ساختار و انتشار موج و بررسی نمودارهای عبور و بازتاب در ساختار محدود نسبت به زمان از روش تفاضل محدود در حوزه زمان FDTD استفاده شده. این روش بر اساس گسسته سازی فضا (تبدیل فضای پیوسته به مجموعه گسسته‌ای از گره‌ها) انجام می‌شود. در معادلات ماکسول مشتقات جزیی با تفاضل‌های محدود جایگزین می‌شوند. در نهایت مجموعه‌ای از معادلات جبری خطی ایجاد می‌شود که با استفاده از شرایط اولیه و مرزی حل می‌شوند. به دلیل گسسته سازی فضا، مقداری بازتاب

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

از مرزهای ناحیه محاسباتی وجود دارد که با وارد کردن لایه‌ای نازک با ضریب جذب بالا به نام PML (در این مقاله ۲a) تابش میرا می‌شود[۶]. در این مقاله که از بسته-ی نرم‌افزاری MIT استفاده شده، هر سلول واحد به ۳۰ نقطه شبکه تقسیم شده و در فاصله 5a از سمت چپ عدسی منبع نوری استاندارد قرار داده شده و آشکار ساز نیز به طور متقارن در سمت راست قرار داده شده است.

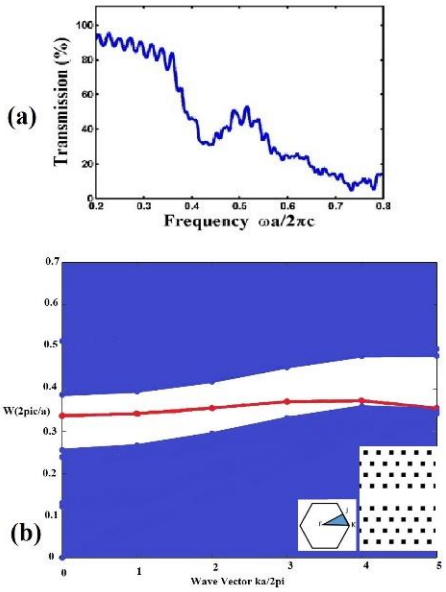
نتایج و بحث

در این بخش به توضیح فرآیند بررسی خود می‌پردازیم. در ابتدا یک ساختار بلور فوتونی مدرج متشکل از لوله‌های زیرکونیا در شبکه مثلثی با مقدار ضریب شکست n= ۱۶/۲ در زمینه‌ی هوا طراحی می‌کنیم که درون لوله‌ها با بلورهای مایع فنیل استیلن پر شده است. این ماده تحت تاثیر ولتاژ الکتریکی خارجی دچار تغییر در مقدار ضریب شکست می‌شود و لذا ما در این بررسی تنها مقدار ضریب شکست عادی آن را لحاظ کرده‌ایم و میزان ولتاژ خارجی صفر است. ساختار دارای ۱۷ لایه در جهت محور x و ۲۵ لایه در جهت محور y است و شعاع میله‌ها از مرکز به سمت لبه‌ها در جهت عمود به محور نوری کاهش می‌یابد. از آنجایی‌که تغییرات شعاع سطح مقطع دایره‌ای میله‌ها توسط رابطه خطی زیر انجام می‌شود، ساختار را یک ساختار خطی تعریف می‌کنیم.

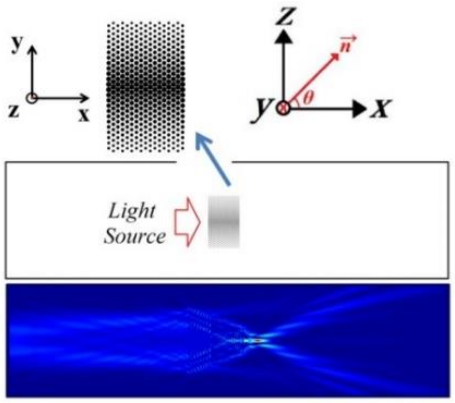
$$r(y) = r_i - \left[\frac{r_f - r_i}{(n-1)/2}\right]\left(\frac{y}{a}\right) \qquad (۳)$$

مقادیر r_i و r_f به ترتیب شعاع میله در y= ۰، شعاع آخرین ردیف میله در راستای محور y در لبه‌های ساختار و n تعداد میله‌های دی‌الکتریک در راستای y می‌باشد. مقدار شعاع از ۰/۵۰a در مرکز تا ۰/۲۵a در لبه‌ها تغییر می‌کند. ساختار توسط یک منبع نوری گاوسی پهن باند از سمت چپ در فاصله حدود 5a تحت تابش قرار می‌گیرد و به طور متقارن آشکار ساز را قرار می‌دهیم و نمودار عبور را به دست می‌آوریم.

طبق شکل(a)۱ ناحیه (۲πc/a) (۰/۳۸ – ۰/۰۵) میزان عبور بالایی را نشان می‌دهد. نوسان‌های مشاهده شده در نمودار، ناشی از بازتاب‌های پشتی از لایه‌های جلو و پشتی است که در ساختار مدرج وجود دارد و نوسان‌های فابری – پرو نامیده می‌شوند. سپس ساختار توسط منبع نوری گاوسی تحت تابش قرار می‌گیرد. از آنجایی‌که چگالی ثابت دی‌الکتریک در مرکز ساختار بیشتر است و نور تمایل به متمرکز شدن در آن ناحیه را دارد، انتظار داریم اثر کانونی سازی ایجاد شود که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود.



شکل ۱: (a) نمودار طیف عبور از عدسی خطی مدرج (b) بسامد نقص موجبر با میله‌های مربعی زیرکونیا

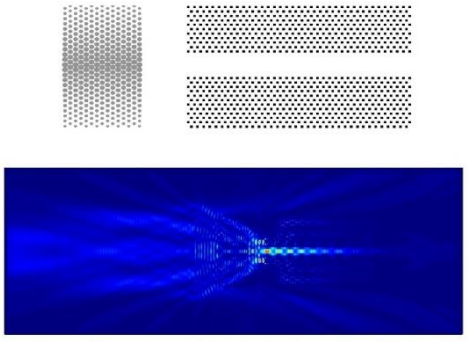


[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

شکل ۲: تصویر شماتیکی از عدسی خطی مدرج با شبکه مثلثی و تغییرات خطی شعاع میله‌ها در راستای عمود به محور نوری و توزیع شدت نور عبوری از آن در صفحه y-x

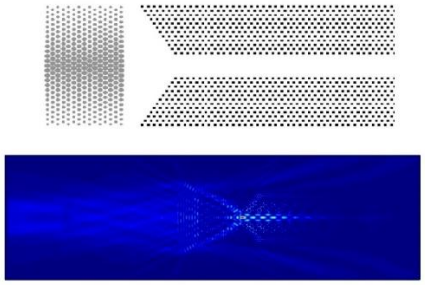
سپس شبکه مثلثی متشکل از میله‌های زیرکونیوم با سطح مقطع مربعی به طول ضلع ۰/۴۵a در زمینه هوا طراحی می‌کنیم و با حذف یک ردیف از میله‌ها موجبر معمولی ایجاد می‌شود. نتایج شبیه سازی بسامد نقص را در بسامد متعامد ۰/۳۷ نشان می‌دهد که در شکل ۱(b) نشان داده شده است. در واقع نقص خطی ایجاد شده در شبکه مثلثی بلور فوتونی، باعث ایجاد بسامد نقص در محدوده‌ی نوار گاف فوتونی می‌شود که به معنی مجاز بودن انتشار نور تابیده شده به موجبر، فقط تحت آن بسامد است.

حال با ترکیب عدسی مدرج خطی و موجبر مذکور اثر جفتگری ساختار بررسی می‌شود که در شکل ۳ مشاهده می‌شود. با تغییر دادن فاصله موجبر از عدسی خطی و همچنین تغییر در تعداد میله‌های حذفی موجبر، بالاترین مقدار بازده جفت‌شدگی مربوط به فاصله ۱۳a موجبر از عدسی با مقدار ۲/۴۳dB و W۵ (حذف ۵ ردیف از میله‌ها) می‌باشد.



شکل۳: جفتگر متشکل از عدسی مدرج خطی و موجبر معمولی با حذف ۵ ردیف از میله‌های مربعی همراه با نمودار توزیع شدت نور عبوری از آن در صفحه x-y.

حال طراحی موجبر را تغییر می‌دهیم و موجبر قیفی را ایجاد می‌کنیم. مجددا با تغییرات در تعداد میله‌های حذف شده و مکان قرارگیری موجبر در مقابل عدسی خطی، بیشترین مقدار بازده جفتگر مربوط به‌W۵ در فاصله ۸a از عدسی به مقدار ۴/۶۲dB می‌باشد که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود.



شکل ۴: جفتگر متشکل از عدسی مدرج خطی و موجبر قیفی شکل با حذف ۵ ردیف از میله‌های مربعی همراه با نمودار توزیع شدت نور عبوری از آن در صفحه x-y.

نتیجه‌گیری

با بررسی جفتگر متشکل از عدسی مدرج خطی و موجبر با شبکه مثلثی و قیفی شکل شامل میله‌های زیرکونیا با سطح مقطع مربعی در زمینه هوا به این نتیجه می‌رسیم که نوع موجبر قیفی در مقایسه با موجبر معمولی به افزایش بازده جفت‌شدگی منجر می‌شود در حالی که استفاده از میله‌هایی با سطح مقطع مربع در مقایسه با تحقیق‌های پیشین انجام شده [۴و۶] باعث کاهش میزان بازده جفت‌شدگی می‌شود.

مرجع‌ها

[۱] E. Yablonovitch, “Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics”, Phys. Rev. Lett., Vol. ۵۸, pp. ۲۰۵۹-۲۰۶۲, ۱۹۸۷.

[۲] D. L. Wood, K. Nassau, "Refractive index of cubic zirconia stabilized with yttria", Appl. Opt., Vol. ۲۱, pp. ۲۹۷۸-۲۹۸۱, ۱۹۸۲.

[۳] T. Fathollahi Khalkhali, A. Bananej, “Manipulating femtosecond pulse shape using liquid crystals infiltrated one-dimensional graded index photonic crystal waveguides composed of coupled-cavities”, Phys. Lett. A., Vol. ۳۸۱, pp. ۳۳۴۲, ۲۰۱۷.

[٤] A. O. Cakmak, E. Colak, H. Caglayan, H. Kurt, E. Ozbay, “High efficiency of graded index photonic crystal as an input coupler”, Appl. Phys., Vol. ۱۰۵, pp. ۱۰۳۷۰۸, ۲۰۰۹.

[٥] M. Plihal, A. A. Maradudin, “Photonic band structure of two-dimensional system, The triangular lattice”, Phys. Rev. B., Vol. ٤٤, No.١٦, pp. ٨٥٦٥-٨٥٧١, ١٩٩١.

[٦] A. Gharaati, Z. Zareian, T. Fathollahi. Khalkhali, “Investigation of the coupling efficiency between graded index photonic crystal-based flat lenses and various types of waveguides”, Pramana J Phys., Vol. ٩٥, No. ٢٣, ٢٠٢١

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]