



طراحی و تحلیل سوئیچ تمام نوری بلور فوتونی با طول کم

ارمغان اسحقی، میر مجتبی میر صالحی و امیر رضا عطاری

گروه برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

ar_es82@stu-mail.um.ac.ir

چکیده- در این مقاله یک سوئیچ تمام نوری با استفاده از ایجاد خاصیت غیرخطی در تزویج کننده جهتی بلور فوتونی و بهره بردن از یک ساختار خم موجبری با بازده بالا، طراحی و تحلیل شده است. تزویج کننده جهتی مورد استفاده برای حداقل کردن طول سوئیچ طراحی شده است. به این ترتیب طول تزویج کننده نسبت به نمونه های مشابه در حدود ۲۰٪ کاهش می یابد. عملکرد سوئیچینگ با استفاده از تغییر ضریب شکست ناحیه تزویج بین دو موجبر در اثر خاصیت غیرخطی کر محقق می شود. روش عددی *FDTD* برای بررسی مشخصات سوئیچ مورد استفاده قرار گرفته است.

کلید واژه- بلور فوتونی، تزویج کننده جهتی، خاصیت غیرخطی کر، سوئیچ تمام نوری

کد PACS - ۴۸۱۵، ۱۳۰

۲- تزویج کننده جهتی طراحی شده برای تحقق

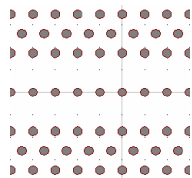
۱- مقدمه

سوئیچینگ

یک تزویج کننده جهتی که از دو موجبر موازی تشکیل شده است (شکل ۱)، دارای دو مود ویژه به نام سوپرمود زوج و فرد می باشد. نوری را که به یکی از موجبرهای موازی محدود شده است، می توان به صورت مجموع سوپر مودهای زوج و فرد با اختلاف فاز مشخص بیان کرد. هنگامی که اختلاف فاز پس از طی طول تزویج به $(2n+1)\pi$ برسد، نور به موجبر دیگر منتقل خواهد شد. عبارت فوق به صورت زیر بیان می شود:

$$(k_e - k_o)L_c = (2n+1)\pi \quad (1)$$

که k_o و k_e به ترتیب عدد موج مربوط به سوپر مودهای زوج و فرد و L_c ، طول ناحیه تزویج می باشد. برای انجام



شکل ۱: تزویج کننده جهتی بلور فوتونی

عملیات سوئیچینگ، اختلاف فاز بین سوپر مود ها باید به $2m\pi$ تغییر کند. یعنی چنانچه اختلاف فاز بین دو سوپر مود مضرب زوجی از π باشد، از موجبر ورودی سیگنال و اگر

در سال های اخیر بلورهای فوتونی به دلیل ویژگی های منحصر به فرد خود برای استفاده در مدارهای مجتمع نوری با ابعادی در حدود طول موج بسیار مورد توجه قرار گرفته اند [1]. ساخت قطعات سوئیچینگ تمام نوری [2]، [3]، دیودهای نوری، خم های غیرخطی [4] و ایزولاتورهای نوری [5] با استفاده از بلورهای فوتونی غیرخطی گزارش شده است. به دلیل کاربرد مهم سوئیچ های تمام نوری در سیستم های مخابرات نوری و پردازش تمام نوری اطلاعات، تحقیقات گسترده ای در زمینه سوئیچ تمام نوری صورت گرفته است.

سرعت گروه کم نور در مدارهای بلور فوتونی، برهم کنش های غیرخطی را افزایش می دهد. این ویژگی سبب کاهش ابعاد قطعات نوری و توان مصرفی آنها در مقایسه با سایر قطعات نوری مانند قطعات اپتوالکترونیکی می شود.

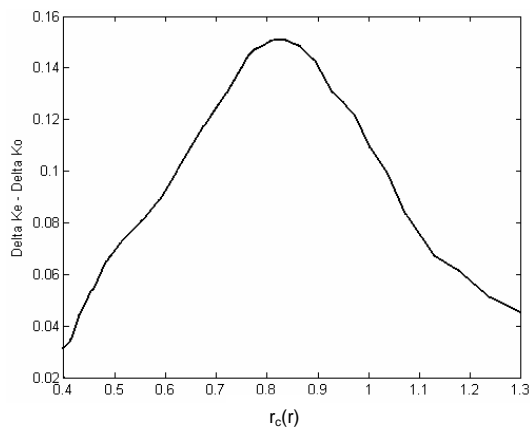
تزویج کننده های جهتی^۱ از اجزای اساسی شبکه های نوری محسوب می شوند. تزویج کننده های جهتی بلور فوتونی در درمقایسه با انواع دیگر تزویج کننده ها، اندازه کوچکتر و عملکرد بهتری دارند [6]، [7]. سوئیچ ارائه شده در این تحقیق با استفاده از مزایای تزویج کننده های جهتی بلور فوتونی و خم های با بازده بالا طراحی شده است.

در شکل ۲ مشاهده می کنید. برای تحقق سوئیچ تمام نوری، ناحیه تزویج بین دو موجبر (ردیف میانی میله ها در شکل ۱) از ماده غیرخطی با اثر غیرخطی χ^2 تشکیل شده است. در مواد نوری دارای اثر غیرخطی کر، ضریب شکست ماده بر حسب شدت میدان به طور خطی تغییر می کند. رابطه ضریب شکست در این مواد به صورت زیر می باشد.

$$n = n_0 + n_2 I \quad (2)$$

در این رابطه، n_0 ضریب شکست خطی، n_2 ضریب غیرخطی کر و I شدت میدان اعمالی می باشد. مقدار n_2 در ساختار مورد بررسی $1.5 \times 10^{-17} m^2/W$ می باشد.

برای افزایش تفاوت ثابت های انتشار در دو حالت خطی و غیرخطی شعاع میله های دی الکتریک ناحیه مرکزی بین دو موجبر به عنوان پارامتر طراحی مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۳: تفاوت ثابت های انتشار سوپرمود های زوج و فرد در دو حالت مختلف کار سوئیچ بر حسب شعاع میله های دی الکتریک در ناحیه تزویج بین دو موجبر (r_c). (شعاع میله ها در کل ساختار بلور فوتونی $r = 0.2a$ می باشد).

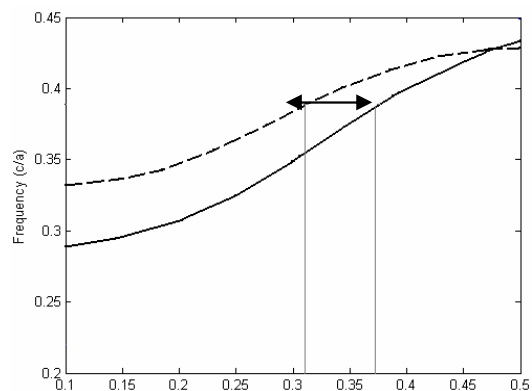


شکل ۴: شماتیک ساختار سوئیچ ارائه شده (شعاع میله ها در ردیف میانی $0.176a$ و طول ردیف میانی $19a$ می باشد).

در شکل ۳ که با شبیه سازی به روش بسط موج صفحه ای^۱ بدست آمده است، نمودار تفاوت ثابت های انتشار سوپرمودهای زوج و فرد در دو حالت خطی و غیرخطی در

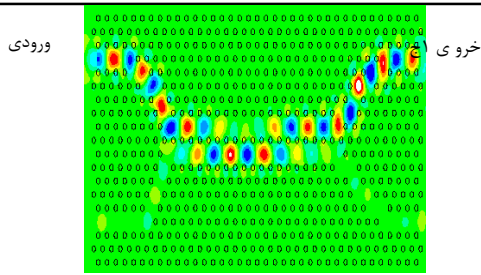
مضرب فردی از π باشد، از موجبر دیگر سیگنال دریافت خواهیم کرد. طول مورد نیاز تزویج کننده برای انجام عملیات سوئیچینگ، با $(\delta k_e - \delta k_o)^{-1}$ متناسب است [8]، که δk_e و δk_o به ترتیب تفاوت ثابت های انتشار مربوط به سوپرمودهای زوج و فرد در دو حالت مختلف کار سوئیچ می باشد. تغییر ثابت انتشار، به دلیل خاصیت غیر خطی کر و در نتیجه متفاوت بودن ضریب شکست موثر ساختار به ازای توان های مختلف ورودی حاصل می شود.

طراحی صحیح تزویج کننده از نکات کلیدی در طراحی سوئیچ نوری می باشد. برای کاهش طول سوئیچ، باید تفاوت بین δk_e و δk_o تا حد ممکن زیاد باشد. بدین منظور ساختارهایی پیشنهاد شده است که اکثر آنها مربوط به بلورهای فوتونی سوراخدار می باشد. یاماموتو^۱ و همکارانش ایده کاهش ضریب شکست ناحیه تزویج بین دو موجبر را برای ایجاد یک ناحیه با فرکانس ثابت در رابطه پاشندگی

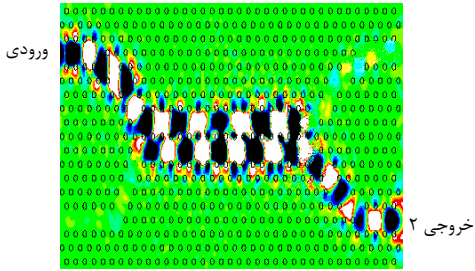


شکل ۵: نمودار باند سوپرمود (خط پریده) و فرد (خط پیوسته) برای یک بلور فوتونی دوبعدی با آرایش مسی، a میله های دی الکتریک. تفاوت ثابت های انتشار این دو سوپرمود در فرکانس $a/\lambda = 0.39$ مشخص شده است.

سوپرمود زوج در بلور فوتونی سوراخدار پیشنهاد کردند [8]. در ساختار فوق مقدار هم شنوایی بین دو خروجی سوئیچ مورد بررسی قرار نگرفته است، در حالیکه میزان هم شنوایی در سوئیچ های ساخته شده در بلورهای فوتونی میله ای بسیار مطلوب است [9]. بلور فوتونی مورد استفاده در این تحقیق، یک بلور دو بعدی با آرایش مثلثی می باشد. میله های دی الکتریک قرار گرفته در هوا دارای ضریب شکست $n = 3.4$ و شعاع $r = 0.2a$ می باشند، که a ثابت شبکه در نظر گرفته شده است. نمودار باند سوپرمودهای زوج و فرد این ساختار را

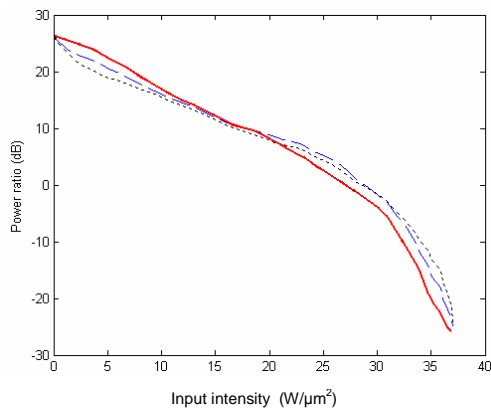


(الف)



(ب)

شکل ۵: دو وضعیت مختلف کار سوئیچ (الف) سوئیچ در وضعیت خطی با اعمال ورودی با شدت کم (ب) سوئیچ در وضعیت غیرخطی با اعمال ورودی با شدت زیاد.



شکل ۶: نسبت توان خروجی ۱ به ۲ بر حسب شدت ورودی در طول موج های 1550nm (خط پر)، 1542nm (نقطه چین) و 1555nm (خط بریده) منحنی های فوق برای ثابت شبکه $a=604.5\mu\text{m}$ رسم شده اند.

شکل ۶ نسبت توان خروجی ۱ به ۲ را بر حسب شدت سیگنال ورودی نشان می دهد. در سوئیچ تمام نوری طراحی شده نسبت توانی بیشتر از 25dB در محدوده وسیعی از طول موج ها قابل دستیابی است.

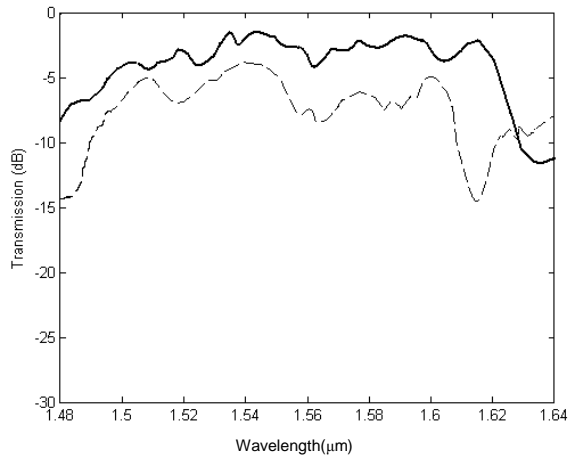
۴- خم موجبری با بازده بالا

در اکثر سوئیچ های تمام نوری بلور فوتونی برای کاهش هم شنوایی در خروجی از خم موجبری استفاده می شود. مزیت استفاده از این خم ها افزایش نسبت توان در خروجی ها و

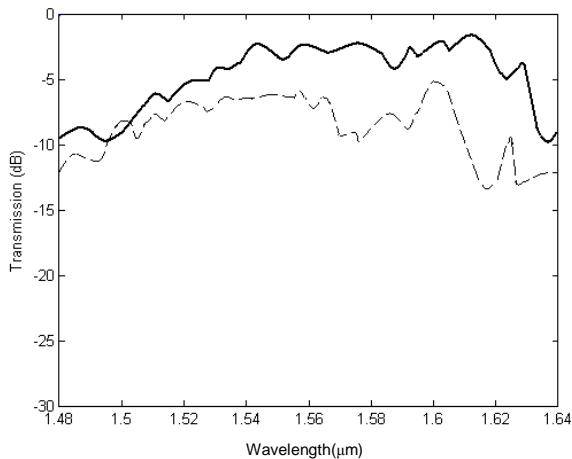
فرکانس $\frac{a}{\lambda} = 0.39$ و شدت ورودی $35\text{W}/\mu\text{m}^2$ مشاهده می شود. این نمودار در شدت های ورودی $30\text{W}/\mu\text{m}^2$ و $40\text{W}/\mu\text{m}^2$ نیز محاسبه شد. اندازه شعاعی که تفاوت ثابت های انتشار سوپر مودهای زوج و فرد در آن حداکثر است، با تغییر مقدار شدت ورودی تقریباً بدون تغییر باقی می ماند. با توجه به این نمودار مقدار شعاع ناحیه مرکزی را برابر $r_c = 0.88r$ انتخاب می کنیم. شعاع های کوچکتر به دلیل افزایش چشمگیر هم شنوایی بین خروجی های سوئیچ مورد استفاده قرار نگرفتند. با انتخاب مقدار فوق برای شعاع ناحیه مرکزی طول مورد نیاز تزویج کننده برای تحقق سوئیچ، $L_c = 19a$ بدست آمد که نسبت به ساختارهای مشابه [9]، [10] کاهشی در حدود ۲۰٪ نشان می دهد. شبیه سازی های PWE با استفاده از امکان Bandsolve نرم افزار RSOFTE انجام شده است. این شبیه سازی ها در یک بلور فوتونی خطی و طی دو مرحله صورت گرفته است. در مرحله اول، شبیه سازی ها با در نظر گرفتن ضریب شکست خطی، n_0 ، برای ساختار انجام شده است. شبیه سازی های مرحله دوم با تغییر اندازه ضریب شکست به مقداری که از رابطه (۲) بدست می آید، صورت گرفته است.

۳- ساختار سوئیچ تمام نوری پیشنهادی

با استفاده از ساختار تزویج کننده جهتی طراحی شده در بخش ۲ سوئیچ تمام نوری مورد نظر حاصل شده است. شماتیک ساختار این سوئیچ در شکل ۴ مشاهده می شود. انتخاب وضعیت کار سوئیچ توسط شدت سیگنال ورودی انجام می شود. در حالتی که شدت سیگنال ورودی به اندازه ای کم است که اثر غیرخطی بی تاثیر است، سیگنال نوری از خروجی ۱ دریافت خواهد شد. با افزایش شدت ورودی به دلیل اثر غیرخطی و افزایش ضریب شکست ناحیه تزویج، سیگنال نوری به خروجی ۲ منتقل می شود. دو وضعیت مختلف کار سوئیچ با استفاده از شبیه سازی های FDTD در شکل ۵ مشاهده می شود. این شبیه سازی ها با استفاده از نرم افزار RSOFTE انجام شده است. این نرم افزار دارای قابلیت شبیه سازی محیط های غیرخطی کر به روش FDTD می باشد. انجام شبیه سازی های غیرخطی با استفاده از این نرم افزار نیاز به تعریف ضریب غیرخطی کر و شدت میدان نرمالیزه شده دارد.



(الف)



(ب)

شکل ۸: طیف انتقال از ورودی به (الف) خروجی ۱ در حالت شدت ورودی کم (ب) خروجی ۲ در حالت شدت ورودی زیاد. (منحنی پر مربوط به وضعیت استفاده از خم های بهبود یافته و منحنی خط چین مربوط به وضعیت استفاده از خم های معمولی می باشد).

قرار گرفت. با انتخاب شعاع ناحیه مرکزی بین موجبر ها به عنوان پارامتر طراحی و یافتن مقدار بهینه آن، طول تزویج کننده نسبت به ساختار های مشابه حدود ۲۰٪ کاهش پیدا کرده است. استفاده از این ساختار هم شنوایی مطلوبی را که قابل مقایسه با سایر طرح ها است، نتیجه می دهد. با در نظر گرفتن اثر ساختار خم موجبری بر هم شنوایی بین دو خروجی سوئیچ و میزان انتقال به خروجی ۳، از خم های 60° بهبود یافته در این سوئیچ استفاده شده است. با استفاده از این ساختار پیشنهادی، طیف انتقال از ورودی به خروجی های ۱ و ۲ نسبت به حالت عدم استفاده از خم های دارای انتقال بهبود یافته، افزایش پیدا کرده است.

ایراد آنها کاهش بازده انتقال از ورودی به

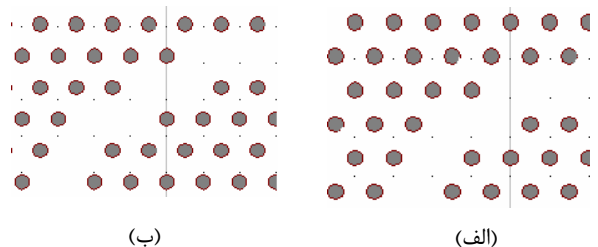
خروجی می باشد. تحقیقات بسیاری برای افزایش بازده در خم های موجبری صورت گرفته است [11]، [12].

در این تحقیق با در نظر گرفتن اثر نوع ساختار خم 60° بر روی هم شنوایی بین دو خروجی سوئیچ، از خم های با ضریب انتقال بهبود یافته ارائه شده در مرجع [13] استفاده شده است. برای کاهش هر چه بیشتر هم شنوایی و در عین حال افزایش بازده انتقال، نوع خم ها متفاوت انتخاب شده است. در خم های قرار گرفته در انتهای ناحیه تزویج (شکل ۴) از ساختار با یک میله دی الکتریک جابجا شده (شکل ۷ (الف)) و در خم های نزدیک به ورودی و خروجی ها، از ساختار با سه میله جابجا شده (شکل ۷ (ب)) استفاده شده است. به منظور جلوگیری از انتقال سیگنال به خروجی ۳، خم های ابتدای ناحیه تزویج بدون تغییر در ساختار استفاده شده اند. ترکیب های دیگر خم ها نیز در ساختار سوئیچ مورد بررسی قرار گرفتند. این ترکیب ها، با وجود بهبود طیف انتقال در برخی موارد، به دلیل افزایش زیاد هم شنوایی در خروجی ها مورد استفاده قرار نگرفتند. شکل ۸ طیف انتقال از ورودی به خروجی ها را در دو حالت استفاده از خم های بهبود یافته و خم های 60° معمولی نشان می دهد.

با استفاده از خم های بهبود یافته طیف انتقال از ورودی به خروجی های ۱ و ۲، نسبت به وضعیت استفاده از خم های معمولی بهبود پیدا کرده است (شکل ۸).

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق یک سوئیچ تمام نوری بر مبنای استفاده از تزویج کننده جهتی بلور فوتونی ارائه شد و مورد تحلیل



شکل ۷: خم های بهینه مورد استفاده در سوئیچ تمام نوری ارائه شده (الف) ساختار با یک میله دی الکتریک جابجا شده (ب) ساختار با سه میله دی الکتریک جابجا شده



۶- مراجع

- [1] R. E. Slusher, and B. J. Eggleton, *Nonlinear Photonic Crystals*, Springer, 2003.
- [2] M. Soljacic, M. Ibanescu, S. G. Johnson, Y. Fink, J. D. Joannopoulos, "Optimal bistable switching in nonlinear photonic crystals", **Phys. Rev. E** 66, pp. 55601-55604, 2002.
- [3] M. Soljacic, M. Ibanescu, C. Luo, S. G. Johnson, S. Fan, Y. Fink, and J. D. Joannopoulos, "All-optical switching structure using optical bistability in non-linear photonic crystals", Proc. of **SPIE**, vol. 5000, pp. 200-214, 2003.
- [4] S. F. Mingaleev and Y. S. Kivshar, "Nonlinear transmission and light localization in photonic-crystal waveguides", **J. Opt. Soc. Am.**, vol. B19, pp. 2241-2249, 2002.
- [5] M. Soljacic, C. Luo, J. D. Joannopoulos, and S. Fan, "Nonlinear photonic crystal microdevices for optical integration", **Opt. Lett.**, vol. 28, pp. 637-639, 2002.
- [6] C-C. Chen, C-Y. Chen, W. Wang, F. Huang, C. Lin, W. Chiu, and Y. Chan, "Photonic crystal directional couplers formed by InAlGaAs nano-rods", **Opt. Express**, vol. 13, no. 1, pp. 38-42, 2002.
- [7] P. Strasser, R. Fluckiger, R. Wust, F. Robin, and H. Jackel, "InP-based compact photonic crystal directional coupler with large operation range", **Opt. Express**, vol. 15, no. 13, pp. 8472-8478, 2007.
- [8] N. Yamamoto, T. Ogawa, and K. Komori, "Photonic crystal directional coupler switch with small switching length and wide bandwidth", **Opt. Express**, vol. 14, no. 3, pp. 1223-1229, 2006.
- [9] A. Locatelli, D. Modotto, D. Paloschi, and C. D. Angelis, "All optical switching in ultrashort photonic crystal couplers", **Opt. Comm.**, vol. 273, pp. 97-102, 2004.
- [10] H. Zhou, X. Jiang, T. Yu, J. Yang, M. Wang, "Two-mode interference switching in photonic crystal waveguide", Proc. of **International Symposium on Biophotonics, Nanophotonics and Metamaterials**, pp. 332-334, 2006.
- [11] K. Rauscher, D. Erni, J. Smajic, and Ch. Hafner, "Improved transmission for 60° photonic crystal waveguide bends", Proc. of **PIERS**, 2004.
- [12] L. H. Frandsen, A. Harpoth, P. I. Borel, and M. Kristensen, "Broadband photonic crystal waveguide 60° bend obtained utilizing topology optimization", **Opt. Express**, vol. 12, no. 24, pp. 5916-5921, 2004.
- [13] A. Talneau, L. Gouezigou, N. Bouadma, M. Kafesaki, C. M. Soukoulis, and M. Agio, "Photonic-crystal ultrashort bends with improved transmission and low reflection at 1.55μm", **Appl. Phys. Lett.** vol. 80, no. 4, pp. 547-549, 2002.