فانو سوییچ نوری مبتنی بر بلور فوتونی بهبود یافته

محمدحسن یاوری، محمدحسن رضایی

دانشگاه شاهد، دانشکده فنی و مهندسی، کد پستی: ۳۳۱۹۱۱۸۶۵۱

چکیده – در این تحقیق یک سوییچ تمام نوری با طیف عبور فانو ارائه شده است که نسبت به نمونه قبلی این نوع سوییچ ها، شاهد طیف فانوی تیز تر و با کنتراست بیشتر و در نتیجه مصرف توان کمتر می باشیم. در افزاره جدید با بهبود ضریب کیفیت کاواک فعال در طیف فانو به مشخصات بهتری دست یافته ایم. در این مقاله شبیه سازی ساختار ارائه شده با روش *FDTD* انجام شده است و برای مقایسه ساختار بهبود یافته با ساختار قبلی، به نقش بهبود ضریب کیفیت کاواک ها در بهبود طیف فانو پرداخته شده است و در نتیجه انطباق یافته ها با طیف عبور خروجی و مقایسه طیف خروجی با سوییچ قبلی صورت می پذیرد.

کلید واژه- سوییچ نوری، سوییچ زنی تمام نوری، فانو سوییچ، بلور فوتونی

Improved Fano All Optical Switch based on Photonic Crystal Slabs

Mohammad Hasan Yavari, Mohammad Hasan Rezaei

Shahed University , Faculty of Engineering, ZIP code: 3319118651

Abstract-In this research, an all optical fano switch based on photonic crystal slab which has a fano shape transmission spectrum is demonstrated. fano resonance characteristics is improved toward high contrast and sharper spectrum. In proposed device, the quality factor of the active cavity is compared with old structures and the improvement of quality factor is addressed. The structure has been simulated by FDTD. The proposed device because of its so sharp transmission spectrum will be in kind of devices which consume very low energy. Output spectrum of the modified switch is validated by the results reported in the literature.

Keywords: Optical switch , All optical switching , Fano switch , Photonic Crystal

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- مقدمه

در یک دهه اخیر ، فناوری های مبتنی بر فوتونیک در ارتباطات داده جهانی به امری فراگیر تبدیل شده است [۱] . افزایش روز افزون پهنای باند داده، نیازمندی های مصرف توان پایین و مقرون به صرفه بودن ارتباطات داخلی نوری برچیپ [۲]، یک نقشه ی راه را برای نیازمندی های طراحی اجزای فوتونیکی ترسیم نموده است [۳], [۴] .

یکی از انواع این ساختارهای مبتنی بر کاواک که اخیرا توسط مورک و همکاران [۵] در دانشگاه دانمارک توسعه داده شده است و می توان آن را نسل جدیدی از ساختارهای کاواک-موجبر به حساب آورد، ساختاری است مبتنی بر رزونانس فانو که در آن طیف فرکانسی خروجی دارای تغییری شدید و ناگهانی می باشد که موجب می گردد در مقایسه با طیف معمول لورنتزین، مصرف توان افزاره کاهش یافته و همچنین مشخصه کنتراست بهبود یابد که از این نوع ساختار ها می توان در طراحی سوییچ های مبتنی بر بلور فوتونی با مصرف انرژی فوق پایین بهره جست. در مقاله پیشرو ساختاری مبتنی بر بلور فوتونی با بالک InGaAsP جهت دستیابی به این طیف ارائه گردیده است.

۲- طراحی ساختار

مشخصات ساختار ارائه شده در مقاله عبارت است از یک تیغه بلور فوتونی با ساختار مثلثی، و حفره های هوا که برای انتشار موج TE مناسب می باشد. ثابت شبکه، ضخامت و شعاع حفره به ترتیب ۰/۴۶ µm، ۰/۲ µm و ۰/۱۱۵µm می باشد. در شکل ۲-الف، موجبر L۱ با حذف یک ردیف از حفره ها، و کاواک ها نیز از شیفت دو حفره کنار هم در ساختار ایجاد شده است. طراحی ساختار به گونه ای است که برای طول موج مخابراتی۱/۵۵ میکرومتر مناسب می باشد[۶].

جنس ماده به کاررفته شده در تیغه، InGaAsP دارای پیک فوتولومینسانس در طول موج ۱/۴۷ µm می باشد. ساختار، یک ساختار کاواک- موجبر بوده که در آن از دو کاواک برای ایجاد طیفی تیز تر از طیف لورنتزین با نام طیف فانو، استفاده شده است.

طول عمر یک کاواک یا Q بیانگر میزان انرژی ذخیره شده در کاواک به انرژی اتلافی در هر سیکل نور می باشد. هنگامی که ماده کاواک دارای جذب نباشد، انرژی اتلافی تنها توسط تلف تشعشعی از سطح کاواک صورت می گیرد [۷] . ساختار باندی این ساختار با شبیه سازی توسط نرم افزار لومریکال به فرم شکل ۱ خواهد بود. همانطور که مشاهده می گردد ساختار برای طول موج مرکزی حدود ۱/۵۵ میکرومتر طراحی شده است (a =۰/۴۶).

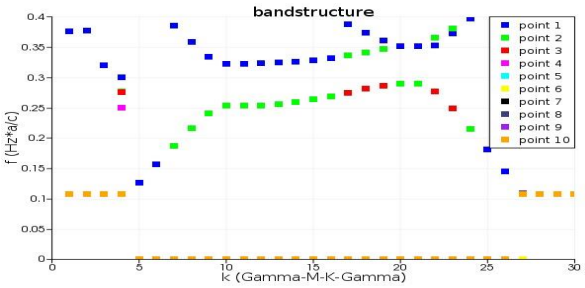
در این ساختار کاواک شماره ۱ با شیفت به دو طرف به اندازه ۹۲ nm به وجود آمده است، و حفره های دوم و سوم هر طرف کاواک نیز به ترتیب به اندازه ۱۱/۵ nm و ۹۲ nm به دو طرف شیفت یافته اند (شکل۳). همچنین حفره شماره ۲ از شیفت دو حفره کناری به اندازهnm ۸۵ به دو طرف و همچنین دو حفره دوم به اندازهnm ۲۰ به هر طرف ایجاد شده است. از آنجا که پروفایل میدان نور کوپل شده به یک کاواک معمولی که با شیفت ساده دو حفره از هر طرف ایجاد شده است دارای پوش میدان الکتریکی مثلثی می باشد، بنابراین به نظر می رسد با توجه به اینکه فرم مثلثی دارای تغییرات ناگهانی نور در برخورد با دیواره های سفت است، با بهبود دیواره های کاواک به نحوی که پوش حالت گوسی پیدا کند (شکل ج -۲)، و به عبارتی شدت تغییرات در برخورد با دیواره ها کاهش یابد، تلفات تشعشعی از تیغه به غلاف (هوا) کاهش و در نتیجه Q کاواک افزایش یابد[۸] و این دقیقا همان کاری است که برای کاواک شماره ۱ همانطور که پیشتر مقادیر آن بیان شد، در این مقاله انجام شده است (شکل۳). روش های مختلفی برای محاسبه طول عمر مد های یک کاواک بلور فوتونی یا متناظرا Q وجود دارد یکی از این روش ها که در آن از شکل طیف عبور استفاده می شود، عبارت است از FWHM مربوط به شکل لورنتزین تبدیل فوریه میدان خروجی که در اینجا مد TE و درنتیجه میدان الکتریکی، مطرح می باشد، در اینجا نیز از همین روش استفاده شده است.

طبق تئوری وردشی [۹]:

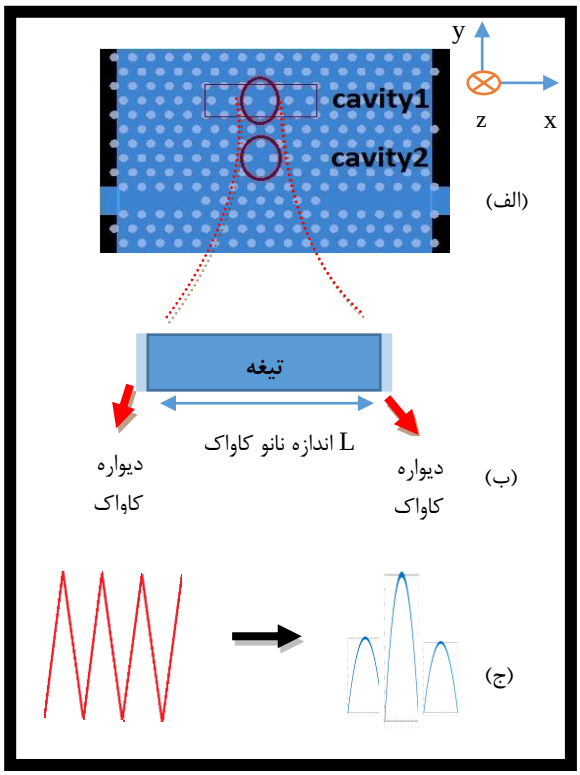
$$U_f(H) = \frac{(\nabla \times E, \nabla \times E)}{(E, \varepsilon_r E)} = \frac{\int d^3r |\nabla \times E(r)|^2}{\int d^3r \varepsilon(r) |E(r)|^2} \qquad (۱)$$

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

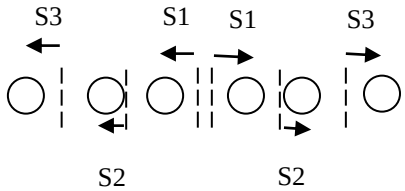
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]



شکل ۱: ساختار نواری تیغه فوتونیک کریستال دو بعدی مثلثی با ضریب شکست ۳/۳۳۴ و دوره تناوب و شعاع حفره به ترتیب ، ۰/۴۶و ۰/۱۱۵ میکرومتر و همچنین دارای باند ممنوعه به مرکز حدود µm۱/۵۵۶.



شکل ۲ : الف: نمایی از صفحه تناوبی ب: نمایی از کاواک به طول L در صفحه x-z (صفحه عمود بر صفحه تناوبی) شامل. ج: فرم پوش میدان الکتریکی در صفحه بین صفحه تناوبی و غلاف (هوا) در محل کاواک بر حسب مکان- شکل سمت چپ بدون نرم کردن لبه های کاواک-شکل سمت راست با نرم کردن لبه های کاواک- به فرم بیان شده در مقاله.



شکل ۳ : نحوه شیفت دادن حفره های اطراف کاواک در کاواک۱.

همانطور که در رابطه ۱ مشهود است، برای مینیمم شدن U (تابعک انرژی الکترومغناطیسی)، میدان الکتریکی باید انرژی اش را در ماده با ε بیشتر متمرکز سازد تا مخرج ماکزیمم شود و همچنین میزان نوسانات مکانی را مینیمم کرده و به عبارتی صورت مینیمم گردد. بنابراین دو نتیجه، طبق تئوری وردشی مدهای با فرکانس پایین تر، انرژی خود را در ماده با ε بیشتر متمرکز می سازند. عکس این قضیه نیز صادق می باشد یعنی به عبارتی مدهای با فرکانس بالاتر نیز انرژی خود را در ε کمتر قرار می دهند.

بنابراین طبق این تئوری می توان فرکانس مد کوپل شده به کاواک را تنظیم کرد. درواقع این کار را می توان با تغییر شکل کاواک انجام داد.

در ساختارهای بلور فوتونی و خصوصا در نانوکاواک ها شدت میدان درون کاواک ها به علت تحدید خوبی که ساختار دارد، بسیار زیاد است و بنابراین اثرات غیرخطی به وضوح مشاهده می گردد.

با استفاده از نظریه اختلال رابطه ساده بین شیفت فرکانسی Δω و تغییر ضریب شکست Δn ناشی از اعمال اختلالی کوچک به صورت زیر می باشد[۹] :

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} \approx -\frac{\Delta n}{n}.E_E \qquad (۲)$$

که E_E عبارت است از بخشی از انرژی میدان الکتریکی که در ناحیه مختل شده حضور دارد.

۳- بررسی وضعیت بهبود طیف فانو با افزایش Q

با اعمال تغییرات به کاواک شماره ۱ در شکل ۳، تلفات ناشی از تشعشع مد نوری به درون غلاف به شدت کاهش می یابد و با تقسیم ضریب کیفیت ساختار به دو ضریب کیفیت Q_{load} و Q_{unload} که اولی ناشی از کوپلینگ کاواک به المان های دیگر(کاواک و موجبرها) و دومی ناشی از تشعشع به صورت عمودی به درون غلاف می باشد می توان گفت با این کار Q_{unload} به خوبی بهبود یافته است. برای بهبود Q_{load} که به نحوی وابسته به طراحی ساختار می باشد ، طراحی ساختار به گونه ای انجام شده است که با قرار دادن کاواک شماره ۱ بالای کاواک شماره ۲ و دور از موجبر، Q_{load} افزایش یافته است در واقع کاواک

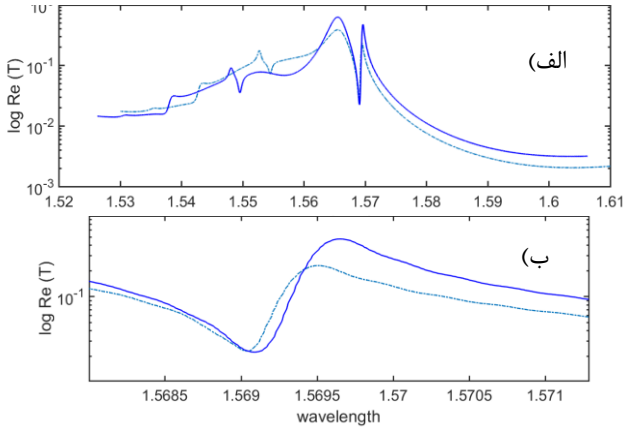
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

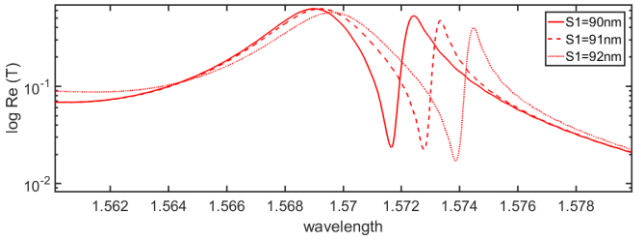
شماره ۱ دارای کوپلینگ فقط با یک کاواک و در نتیجه دارای Q_{load} بزرگ بوده (کوپلینگ غیر مستقیم با موجبر) و کاواک شماره۲ با داشتن کوپلینگ با هردو المان کاواک شماره۱ و موجبر دارای Q_{load} بسیار کمتر می باشد که قرار گرفتن تراز گسسته کاواک دوم در پیوستار کاواک اول منجر به فراهم آوردن طیف فانو می گردد. بنابراین با افزایش بیشتر Q_{unload} کاواک شماره۱ در واقع به این گسسته سازی کمک کرده و اختلاف بیشتر Q دو کاواک (تراز پیوسته و گسسته) فراهم آمده است که بنحوی منجر به تیز تر شدن طیف نامتقارن فانو می گردد. نتایج حاصله از شبیه سازی ساختار با روش FDTD که در شکل۴ نمایش داده شده است، گویای همین مطلب می باشد. در نمودار بزرگنمایی شده طیف، شکل ۴- ب که مربوط به نمودار لگاریتمی تبدیل فوریه خروجی می باشد، فاصله دو پیک در این ساختار ارائه شده حدود ۰/۴۵و $\Delta\lambda$ در حدودnm ۰/۵ می باشد که در مقایسه با افزاره ارائه شده قبلی در سال ۲۰۱۳ حدود ۵۰ درصد بهبود در کنتراست یا فاصله پیک به پیک مشاهده می گردد. مصالحه ای در این ساختار به ازای اندازه کاواک ها بین فاصله پیک به پیک و $\Delta\lambda$ دارد به طوری که با کاهش $\Delta\lambda$ ، میزان کنتراست پیک به پیک نیز کاهش می یابد که آن را باید در طراحی ها مورد توجه قرار داد. نمودارهای شکل ۵ که به ازای اندازه های مختلف کاواک شماره۱ رسم شده اند این مصالحه را به طور شهودی به نمایش می گذارند. با توجه به وابستگی میزان تغییر ضریب شکست به شدت نور ورودی، هر چه عمل سوییچ زنی با تغییر ضریب شکست کمتری صورت پذیرد بنابراین به انرژی مصرفی کمتری برای سوییچ زنی نیازمندیم و طبق رابطه(۲) این کاهش، تا حدی کمتر از ۵۰ درصد خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

در اینجا با استفاده از بهبود ضریب کیفیت unload یکی از کاواک ها که ناشی از تلفات بین تیغه فوتونیک کریستال و غلاف (هوا) بود، ساختار قبلی بهبود یافت. در واقع با افزایش کنتراست طیف فانو خروجی و یا همچنین کاهش $\Delta\lambda$ (با توجه به مصالحه ای که بین این دو پارامتر وجود دارد)، مشخصه های بهتری از جمله کاهش انرژی مصرفی و امکان ایجاد پالس سوییچ زنی تیز تر مشاهده گردید.



شکل ۴ : الف) طیف فانو خروجی مربوط به ساختار در حالت بهبود کاواک۱ (خط توپر)، و نمودار شیفت یافته در طول موج در حالت بدون بهبود(نمودار خط چین). ب) قسمت بزرگنمایی شده مربوط به طیف فانو. (محور عمودی نمودارها لگاریتمی است.)



شکل۵ : جابجایی طیف فانو همراه با کاهش عرض طیف و کاهش کنتراست با افزایش اندازه کاواک(از راست به چپ). همانطور که مشاهده می گردد با تغییر سایز کاواک از طریق جاروب میزان شیفت S1 از ۹۰ تا ۹۲ نانومتر، طیف در طول موج جابجا شده است.

مراجع

[1] Baliga, J., Ayre, R., Hinton, K., Sorin, W. V., Tucker, R. S. "Energy consumption in optical IP networks." Journal of Lightwave Technology., Vol. 27, No.13, pp. 2391-2403, 2009.

[2] Miller, D. A. "Device requirements for optical interconnects to silicon chips." Proceedings of the IEEE., Vol. 97 No. 7, pp. 1166-1185, 2009.

[3] Kirchain, R., Kimerling, L. "A roadmap for nanophotonics." Nature Photonics., Vol. 1, No. 6, pp. 303-305, 2007.

[4] Rattner, J. "Plenary: The future of silicon photonics." Photonics in Switching. Optical Society of America, 2010.

[5] Yu, Y., Xue, W., Hu, H., Oxenløwe, L. K., Yvind, K., Mork, J. "All-Optical Switching Improvement Using Photonic-Crystal Fano Structures." IEEE Photonics Journal., Vol. 8, No. 2, pp. 1-8, 2016.

[6] Nozaki, K., Shinya, A., Matsuo, S., Sato, T., Kuramochi, E., Notomi, M. "Ultralow-energy and high-contrast all-optical switch involving Fano resonance based on coupled photonic crystal nanocavities." Optics express., Vol. 21, No. 10, pp. 11877-11888, 2013.

[7] Asano, T., Song, B. S., Akahane, Y., Noda, S."Ultrahigh-Q nanocavities in two-dimensional photonic crystal slabs" IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics., Vol. 12, No. 6, pp. 1123-1134, 2006.

[8] Akahane, Y., Asano, T., Song, B. S., Noda, S. "High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal." Nature., Vol. 425, No. 6961, pp. 944-947, 2003.

[9] Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., Meade, R. D. *Photonic crystals: molding the flow of light*. Princeton university press, 2011.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]