

طراحی و شبیه‌سازی تابع منطقی اکثریت سه ورودی تمام نوری بلور فوتونی

حجت شریفی

گروه مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، h.sharifi@vru.ac.ir

چکیده - در این مقاله یک تابع منطقی اکثریت سه ورودی تمام نوری با استفاده از ساختار بلور فوتونی دوبعدی مثلثی پیشنهاد شده است. این دروازه منطقی با استفاده از اثر غیرخطی کر و همچنین قرار دادن یک اتصال بلور فوتونی سه ورودی بهبود داده شده ایجاد شده است. از روش تفاضل محدود در حوزه زمان و همچنین روش بسط امواج تخت برای شبیه‌سازی استفاده شده است. توان مورد نیاز برای عملکرد صحیح مدار ۱۳ میکرو وات است و مساحت اشغالی دروازه منطقی فوق ۱۵۰ میکرو متر مربع است. تاخیر این دروازه منطقی ۲ پیکو ثانیه است. کلید واژه- تابع منطقی اکثریت سه ورودی، منطق آستانه، بلور فوتونی، دروازه منطقی تمام نوری.

مدارهای مجتمع نوری مطرح هستند. بلورهای فوتونی را می‌توان بصورت یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی ایجاد کرد اما به دلیل شباهت فرآیند ساخت بلورهای فوتونی دوبعدی با فرآیند ساخت مدارهای مجتمع الکترونیک مسطح، این ساختارها جذابیت بسیار زیادی پیدا کرده‌اند. این ساختارها بیشترین شانس را برای استفاده در طراحی و پیاده‌سازی افزاره‌های نوری سریع مانند موج‌برها، کاواک‌ها، دروازه‌ها و سویچ‌های منطقی دارند [۷-۱۰]. ایجاد نقص در ساختار بلور فوتونی امکان طراحی موج‌برها و کاواک‌ها را ایجاد می‌کند که برای کاربردهای سویچینگ استفاده می‌شوند [۱۱ و ۱۲]. برای طراحی مدارات تمام نوری می‌توان از اثر غیرخطی کراس‌استفاده کرد که برای این کاربرد مناسب است. اخیراً پژوهش‌های زیادی در زمینه طراحی دروازه‌های منطقی تمام نوری بلور فوتونی انجام شده است [۱۳-۱۷]. اما مهمترین مشکل آنها ورودی‌ها و خروجی‌های ناهمگن می‌باشد. به این معنی که ورودی‌ها و خروجی‌ها دارای مشخصات متفاوتی هستند. در [۱۳] یک دروازه منطقی AND تمام نوری پیشنهاد شده است که اساس کارکرد آن، تداخل بین یک خم موج‌بری که میله‌های غیرخطی در آن نهفته است و یک انشعاب T شکل می‌باشد. با ترکیب یک موج‌بر و یک کاواک غیرخطی، در [۱۴] دروازه‌های منطقی تمام نوری پیشنهاد شده است. در ساختارهای [۱۳ و ۱۴] ورودی‌ها دارای فرکانس‌های متفاوتی می‌باشند. در همین سال مقاله [۱۵] یک دروازه منطقی تمام

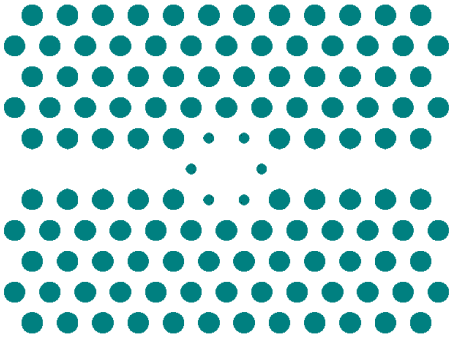
۱- مقدمه

با توجه به اینکه پیش‌بینی شده است که آینده مدارهای الکترونیک با محدودیت سرعت مواجه می‌شود، مدارهای مجتمع تمام نوری بعنوان یکی از بهترین روشهای جایگزین برای مواجه با این مساله مطرح می‌شوند. سویچ‌ها و دروازه‌های منطقی تمام نوری بلور فوتونی سریع از جمله اجزاء اساسی برای طراحی سیستم‌های پردازش اطلاعات و شبکه‌های نوری آینده می‌باشند [۱-۴].

بلورهای فوتونی ساختارهایی هستند که در آنها ضریب شکست ماده بصورت متناوب می‌باشد که گاف فوتونی^۱ را فراهم می‌کنند- یک بازه فرکانسی که در محدوده آن موج الکترومغناطیس قابلیت انتشار ندارد و قابلیت کنترل و مهندسی مسیر حرکت نور را فراهم می‌کند [۵ و ۶]. بلورهای فوتونی به دلیل قابلیت متراکم سازی کلی بعنوان یک ساختار مناسب در

¹ Photonic Band gap

بصورت شبکه مثلثی دوبعدی از حفره‌های هوا در ماده گالیوم آرسناید است که در شکل ۱ مشخص است. ضریب شکست ماده گالیوم آرسناید مورد استفاده در شبیه‌سازی برای طول موج‌های اطراف ۱۵۵۰ نانومتر برابر $\frac{3}{6}$ است که گاف فوتونی قابل توجه ارائه می‌دهد. شعاع حفره‌های هوا برابر $0.3a$ می‌باشد و برای محاسبه گاف فوتونی ساختار از روش بسط امواج تخت استفاده شده است و ساختار دارای دو گاف فوتونی برای قطبش TE می‌باشد که بازه بزرگتر در محدوده $0.199(a/\lambda)$ و $0.266(a/\lambda)$ است که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. ساختار بلور فوتونی شبکه مثلثی دوبعدی از حفره‌های هوا در ماده گالیوم آرسناید

شبیه‌سازی‌ها با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان انجام شده است و ناحیه شبیه‌سازی توسط یک ناحیه PML^2 با ضخامت ' a ' احاطه شده است تا نور تابشی را جذب کند و همچنین مقاومت ثابت برای موج داشته باشد و از بازتاب‌های ناخواسته اجتناب شود. ' a ' مقدار ثابت شبکه می‌باشد. با انتخاب طول موج مرکزی برابر ۱۵۵۰ نانومتر مقدار ثابت شبکه برابر ۳۸۵ می‌باشد و همچنین اندازه مش در شبکه بلور فوتونی برای شبیه‌سازی $a/20$ در نظر گرفته شده است. ساختار پیشنهادی این مقاله، با ایجاد یک تشدیدگر غیرخطی که دو عدد موجبر ورودی و خروجی را به هم متصل

نوری OR با استفاده از تشدیدگرهای حلقوی غیرخطی طراحی کرده‌اند که فرکانس ورودی‌ها و خروجی آن متفاوت می‌باشند. با استفاده از منطقی آستانه می‌توان مدارهایی طراحی کرد که ورودی‌ها و خروجی‌ها همگن می‌باشند.

در این مقاله یک تابع منطقی اکثریت سه ورودی بلور فوتونی پیشنهاد شده است. سویچ‌ها و توابع منطقی از جمله اجزای اساسی در مدارهای تمام نوری هستند که کاربرد وسیعی در زمینه انتقال و پردازش اطلاعات دارند. با کاربرد مواد غیرخطی در ساختار بلور فوتونی بسیاری از پدیده‌های جالب توجه از جمله پایداری دوسویه^۲ ایجاد می‌شود. در سیستم‌هایی که پایداری دوسویه را فراهم می‌کنند توان خروجی تابعی از توان ورودی می‌باشد. هنگامی که توان ورودی کم است، توان خروجی یک مقدار کمی از توان سیگنال ورودی می‌باشد در حالیکه با افزایش توان ورودی، توان خروجی در ابتدا به آرامی افزایش می‌یابد اما زمانیکه توان ورودی به یک مقدار مشخص برسد، توان خروجی به یکباره افزایش می‌یابد. برای ساختار پیشنهادی از یک شبکه بلور فوتونی دوبعدی مثلثی از حفره‌های هوا در ماده گالیوم آرسناید استفاده شده است که تطابق بیشتری با فناوری ساخت مدارهای مجتمع دارد.

این مقاله به اینصورت سازماندهی شده است که در قسمت ۲ ساختار سیستم بلور فوتونی مورد استفاده در طراحی توصیف شده است. طراحی ساختار تابع منطقی اکثریت سه ورودی در قسمت ۳ انجام شده است و نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آنها در قسمت ۴ آورده شده است. در قسمت ۵ نتیجه گیری مقاله انجام شده است.

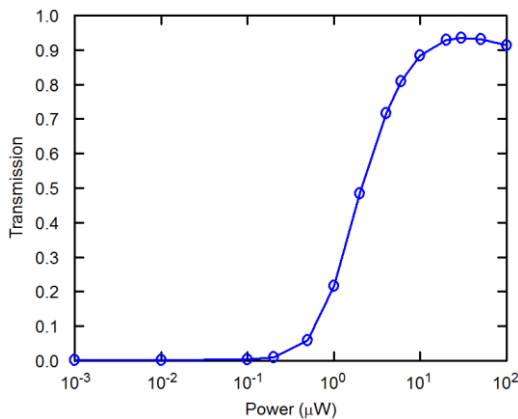
۲- ساختار پیشنهادی

ساختار شبکه بلور فوتونی مورد استفاده در این مقاله

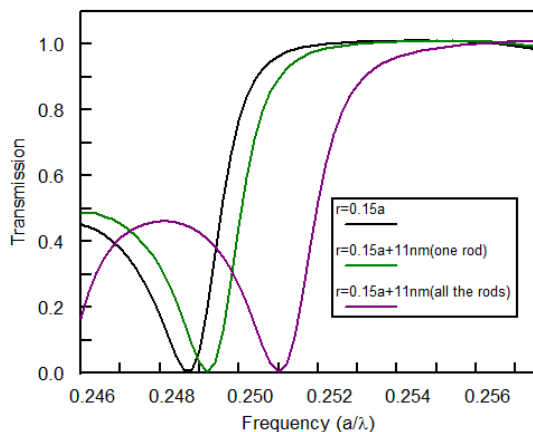
³ Perfectly Matched Layer

² Bistability

منظور تعدادی از کاواکها با فرکانس تشدید متفاوت را بصورت آبشاری پشت سر هم قرار می دهیم. توجه به این نکته ضروری است که اختلاف فرکانس تشدید در کاواکهایی که پشت سر هم قرار می دهیم باید به اندازه کافی کم باشد تا یک آشکارساز ایده آل ایجاد شود. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است زمانیکه شعاع همه میله های غیرخطی را تغییر دهیم فرکانس تشدید به مقدار زیادی جابجا می شود اما زمانیکه فقط شعاع یکی از میله ها را تغییر دهیم مقدار کمتری تغییر در فرکانس تشدید ایجاد می شود و بنابراین می توان دقت بالاتری را بدست آورد



شکل ۳. نمودار مشخصه نسبت انتقال توان ورودی به خروجی به ازای مقادیر مختلف برای توان سیگنال ورودی برای ساختار پیشنهادی اصلی



شکل ۴. نمودار تغییر فرکانس تشدید در شعاع های مختلف برای میله های غیر خطی کاواک

۳- طراحی ساختار تابع منطقی اکثریت سه ورودی

بلورهای فوتونی بعنوان یک ساختار مناسب برای طراحی مدارات مجتمع تمام نوری مطرح هستند. در این قسمت یک

می کند طراحی شده است. با استفاده از این ساختار می توان پدیده پایداری دوسویه را مشاهده کرد که یک جنبه اساسی از مکانیزم سویچینگ مورد استفاده در این مقاله است. پدیده پایداری دوسه یک حالت موثر برای سویچینگ نوری می باشد که حلقه پسماند^۴ را ایجاد می کند. یک کاواک حلقوی با کاهش شعاع برخی از حفره ها در ساختار بلور فوتونی دوبعدی ایجاد شده است. یک ماده غیرخطی که داری اثر کر شدید می باشد، در ناحیه کاواک نهفته شده است [۱۸-۲۰]. در موادی که دارای اثر غیرخطی کر هستند، ضریب شکست ماده متناسب با شدت سیگنال بصورت خطی تغییر می کند.

$$n = n_0 + n_2 I \quad (1)$$

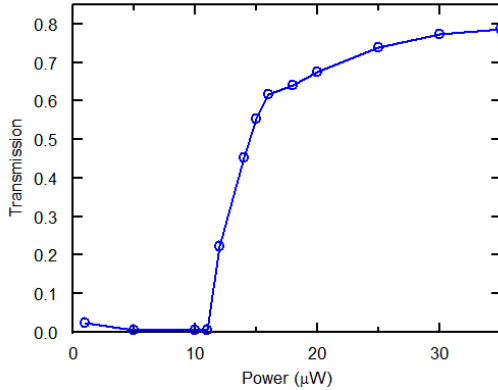
در رابطه ۳ کمیت n_0 ، مقدار ضریب شکست در ناحیه خطی می باشد و n_2 و I نیز به ترتیب ضریب اثر غیرخطی کر و شدت نور می باشند. فرض شده است که ناحیه غیرخطی نقص دارای ضریب شکست 2.6 و ضریب غیرخطی $2.7 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{W}$ است که با استفاده از روش ارائه شده در [۲۰] در ناحیه نهفته شده است.

با اعمال روش شبیه سازی DFT، فرکانس $0.2481(a/\lambda)$ را که یکی از فرکانس های تشدید این کاواک است، بعنوان فرکانس سیگنال ورودی در نظر گرفته شده است که دلیل آن مقدار بزرگتر مشخصه انتقال در مود این کاواک و همچنین شیب بیشتر در نمودار انتقال از مقدار کم به زیاد می باشد. هرچقدر که شیب نمودار انتقال از مقدار کم به زیاد بیشتر باشد توان کمتری برای عملیات سویچینگ نیاز است. با اعمال سیگنال ورودی با توان های مختلف میزان نسبت انتقال سیگنال به خروجی ساختار در شکل ۳ نشان داده شده است.

با توجه به اینکه برای ایجاد یک آشکار ساز با کارایی بالا باید انتقال توان در آن با شیب زیاد انجام شود و بنابراین برای این

⁴ Hysteresis loop

۲۰۲۰ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

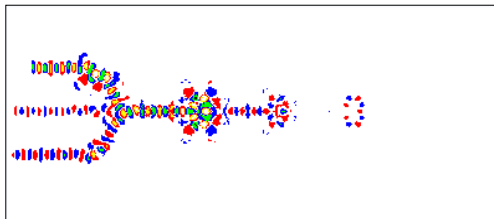


شکل ۶. نمودار مشخصه نسبت انتقال در مقابل توان ورودی با مقدار آستانه ۱۳/۵

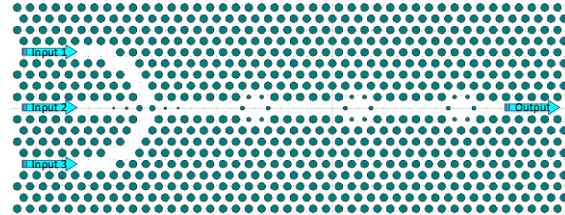
۴- نتایج شبیه سازی

در این مقاله یک ساختار مناسب برای طرحی تابع منطقی اکثریت سه ورودی پیشنهاد شده است. با قرار دادن یک اتصال بلور فوتونی سه ورودی بهبود یافته و یک آشکارساز آستانه پشت سر هم بصورت آبخاری این ساختار طراحی شده است. همچنین با انجام شبیه سازی با روش تفاضل محدود در حوضه زمان، توزیع میدان در ساختار در شکل ۶ نشان داده شده است.

فرض می شود که سیگنال های ورودی دارای طول موج ۱۵۵۰ نانومتر با پروفایل گوسی می باشند. یک موج پیوسته با مقدار توان ۹ میکرو وات به ورودی ها اعمال می شود. همانطور که در شکل های ۶ و ۷ مشخص است زمانی که دو یا سه تا از ورودی ها فعال باشند، توان ورودی به تشخیص دهند سطح آستانه از مقدار آستانه بیشتر است و بنابراین تشخیص دهنده سطح آستانه فعال می شود. زمانی که فقط یکی از ورودی ها فعال باشد توان ورودی به تشخیص دهند سطح آستانه کمتر از مقدار آستانه خواهد بود و بنابراین تشخیص دهند سطح آستانه غیر فعال خواهد بود.



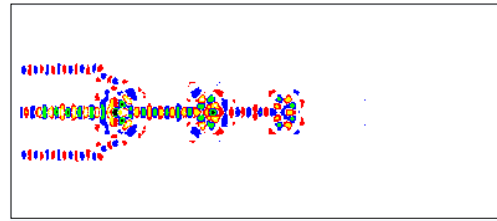
ساختار کارا برای طراحی یک تابع منطقی اکثریت سه ورودی معرفی شده است. در اینجا تعداد سه عدد از کاواک های معرفی شده در قسمت قبل بصورت آبخاری پشت سر هم قرار داده شده اند که در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش شدت نور، ضریب شکست ماده غیرخطی تغییر می کند و فرکانس تشدید کاواک جابجا می شود. افزایش شدت نور ورودی باعث جابجا شدن فرکانس تشدید کاواک اول به سمت چپ می شود و بنابراین مقداری از نور ورودی از موج بر عبور خواهد کرد. اما کاواک بعدی جلوی عبور نور جهت رسیدن به خروجی را سد می کند. بنابراین شدت نوری بیشتری برای عبور نور از کاواک بعدی نیاز است و از این رو با اضافه کردن کاواک غیرخطی بعدی بصورت آبخاری مقدار سطح توان آستانه به سمت بالا جابجا می شود. قرار دادن نواحی کاواک بصورت آبخاری نه تنها باعث جابجایی سطح توان آستانه به مقادیر بزرگتر مناسب برای سوئیچ می شود بلکه باعث ایجاد شیب تند در انتقال از مقدار کم به زیاد نیز می شود که در نتیجه کارایی آشکارساز آستانه نیز بهبود می یابد (شکل ۶). همانگونه که در شکل ۵ نشان داده شده است در این ساختار شعاع تمام میله های غیرخطی در هر ناحیه کاواک بصورت صعودی افزایش می یابد و این باعث افزایش میزان توان آستانه می شود. مقادیر مختلف شعاع بصورت $r_1 = r_2 = r_3 = 0.15a$ می باشند. در ورودی این ساختار از یک اتصال بلور فوتونی برای ایجاد مجموع ورودی ها استفاده شده است. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، با افزایش شعاع بصورت صعودی در ساختار فوق میزان توان آستانه به مقدار ۱۳/۵ تنظیم می شود. بنابراین زمانی که تعداد دو یا سه ورودی فعال باشند میزان توان خروجی اتصال از مقدار آستانه بیشتر می شود و خروجی به سطح یک می رود. اما زمانی که فقط یکی از ورودی ها فعال باشند، مقدار توان خروجی اتصال از مقدار آستانه کمتر می شود و خروجی به مقدار سطح صفر می گیرد.



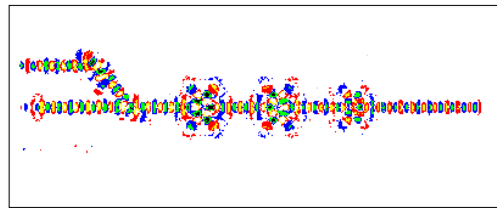
شکل ۵. ساختار پیشنهادی برای طراحی تابع منطقی اکثریت سه

مراجع

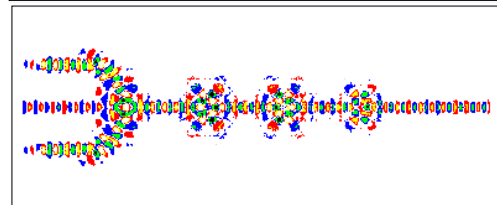
- [1] Lee, El-Hang. "Micro/nano-scale optical network: A new challenge toward next generation." *Transparent Optical Networks, 2008. ICTON 2008. 10th Anniversary International Conference on*. Vol. 4. IEEE, 2008.
- [2] Robinson, S., and R. Nakkeeran. "A bandpass filter based on 2D circular photonic crystal ring resonator." *Wireless And Optical Communications Networks (WOCN), 2010 Seventh International Conference On*. IEEE, 2010.
- [3] Bchir, Riadh, Afrah Bardaoui, and Hatem Ezzaouia. "Design of silicon-based two-dimensional photonic integrated circuits: XOR gate." *Optoelectronics, IET* 7.1 (2013): 25-29.
- [4] Yang, Yi-Pin, et al. "Binary Operating in All-Optical Logic Gates Based on Photonic Crystals." *2012 International Symposium on Computer, Consumer and Control*. 2012.
- [5] Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., Meade, R. D., Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Princeton University Press, Princeton (1995).
- [6] Noda, Susumu, and Toshihiko Baba, eds. *Roadmap on photonic crystals*. Vol. 1. Springer Science & Business Media, 2003.
- [7] Li, Xiao-qiang, and Yi Xu. "Optical sensing by using photonic crystal based Mach-Zehnder interferometer." *Optics Communications* 301 (2013): 7-11.
- [8] Fasihi, Kiazand, and Shahram Mohammadnejad. "Highly efficient channel-drop filter with a coupled cavity-based wavelength-selective reflection feedback." *Optics express* 17.11 (2009): 8983-8997.
- [9] Shinya, Akihiko, et al. "All-optical flip-flop circuit composed of coupled two-port resonant tunneling filter in two-dimensional photonic crystal slab." *Optics Express* 14.3 (2006): 1230-1235.
- [10] Bao, Junjie, et al. "All-optical NOR and NAND gates based on photonic crystal ring resonator." *Optics Communications* 329 (2014): 109-112.
- [11] Sukhoivanov, Igor A., and Igor V. Guryev. *Photonic crystals: physics and practical modeling*. Vol. 152. Springer, 2009.
- [12] Johnson, Steven G., et al. "Linear waveguides in photonic-crystal slabs." *Physical Review B* 62.12 (2000): 8212.
- [13] Zhu, Zhi-Hong, et al. "High-contrast light-by-light switching and AND gate based on nonlinear photonic crystals." *Optics Express* 14.5 (2006): 1783-1788.
- [14] Jung, Young Jin, et al. "Reconfigurable all-optical logic AND, NAND, OR, NOR, XOR and XNOR gates implemented by photonic crystal nonlinear cavities." *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*. Optical Society of America, 2009.
- [15] Andalib, P., and N. Granpayeh. "All-optical ultra-compact photonic crystal NOR gate based on nonlinear ring resonators." *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 11.8 (2009): 085203.
- [16] Danaie, Mohammad, and Hassan Kaatuzian. "Design and simulation of an all-optical photonic crystal AND gate using nonlinear Kerr effect." *Optical and Quantum Electronics* 44.1-2 (2012): 27-34.
- [17] Bai, Jibo, et al. "Photonic not and nor gates based on a single compact photonic crystal ring resonator." *Applied optics* 48.36 (2009): 6923-6927.



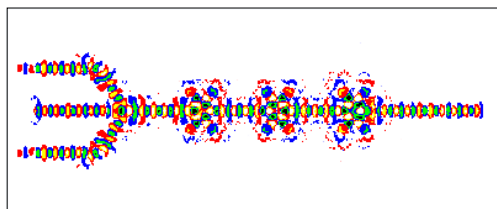
شکل ۷. توزیع میدان برای ساختار پیشنهادی زمانیکه فقط یکی از ورودی‌ها فعال باشد.



شکل ۸. توزیع میدان برای ساختار پیشنهادی زمانیکه فقط دو تا از ورودی‌ها فعال باشد



شکل ۹. توزیع میدان برای ساختار پیشنهادی زمانیکه هر سه ورودی‌ها فعال باشد



۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک تابع منطقی اکثریت سه ورودی تمام نوری بلور فوتونی با شبکه مثلثی دوبعدی از حفره‌های هوا در ماده گالیوم آرسناید پیشنهاد شده است. با قرار دادن یک اتصال بلور فوتونی و سه عدد کاواک غیر خطی بصورت آبشاری پشت سر هم ساختار پیشنهادی طراحی شده است. تاخیر دروازه منطقی پیشنهادی برابر ۲ پیکو ثانیه محاسبه شده است و توان عملیاتی آن ۱۳ میکرو وات می باشد.



چهارمین کنفرانس ملی ایده های نو در مهندسی برق



۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

- [18] Hitoshi, Nakamura, et al. "Ultra-fast photonic crystal/quantum dot alloptical switch for future photonic networks." *Optics express* 12.26 (2004): 6606-6614.
- [19] Nakamura, H., et al. "Large enhancement of optical nonlinearity using quantum dots embedded in a photonic crystal structure for all-optical switch applications." *Lasers and Electro-Optics Society, 2002. LEOS 2002. The 15th Annual Meeting of the IEEE*. Vol. 2. IEEE, 2002.
- [20] Fushman, Ilya, et al. "Controlled phase shifts with a single quantum dot." *Science* 320.5877 (2008): 769-772.