

حافظه نوری فلش مبتنی بر نور کند در بلورهای فوتونی

علی ابراهیمی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ مینا نوری^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی سهند- تبریز- ایران - aliebrahimi121@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی سهند- تبریز- ایران - noori@sut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، طراحی و شبیه‌سازی نوع جدیدی از حافظه‌های نوری مبتنی بر نور کند در ساختار بلور فوتونی نوع میله با شبکه شش ضلعی برای اولین بار ارائه می‌شود که کنترل فرآیند نوشتن، نگهداری و خواندن اطلاعات به صورت مستقل و با تغییر ضریب شکست صورت می‌گیرد. حافظه نوری معرفی شده از نوع فلش است که بر پایه‌ی مفهوم نور کند در بلورهای فوتونی به دست آمده و قابلیت کارکرد به صورت موازی و بر اساس روش مالتی پلکسینگ طول موج را دارد. حافظه برای عملکرد در طول موج کاری ۱۵۵۰ نانومتر با پهنای باند ۱ نانومتر طراحی شده، هرچند عملکرد ساختار با استفاده از اصل مقیاس پذیری در بلورهای فوتونی به محدوده وسیعی از طول موج‌های باند مخابرات نوری قابل گسترش است. فاکتور کیفیت در محل سلول حافظه برای ساختار پیشنهادی برابر با $3/4 \times 10^5$ است که با افزایش سایز حافظه قابل ارتقاء است. طول عمر فوتون با لحاظ کردن فاکتور کیفیت $3/4 \times 10^5$ برابر با $0/6$ نانوثانیه است. ویژگی‌های قابل توجه ساختار پیشنهادی برای حافظه نوری، امکان کنترل مستقل فرایند نوشتن و خواندن اطلاعات، اندازه کوچک، سرعت بالای فرایند خواندن و نوشتن، مدت زمان طولانی برای نگهداری حافظه و ایجاد تطبیق ضریب شکست گروه تقریباً برابر برای درگاه‌های ورودی/خروجی و سلول حافظه است که باعث افزایش بازده الحاق می‌شود.

واژه‌های کلیدی: حافظه نوری فلش، بلور فوتونی، نور کند، فاکتور کیفیت.

Optical Flash Memory based on Slow Light in Photonic Crystals

Ali Ebrahimi¹, MSc Student; Mina Noori², Assistant professor

1- Department of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, Email: aliebrahimi121@gmail.com

2- Department of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, Email: noori@sut.ac.ir

Abstract: In this article, design and simulation of an optical memory based on slow light phenomenon is presented for the first time in a hexagonal rod-type photonic crystal. The write, storage, and read processes are controlled independently by refractive index change. The proposed flash memory is capable of operating in either parallel form or by taking advantage of wavelength division multiplexing technique. Here, the memory cell is designed to function at $\lambda=1550\text{nm}$, however, the scalability rule in photonic crystals aids to adjust the operating wavelength in a wide optical communication frequency range. The Q-factor of the proposed memory cell is $\sim 3.4 \times 10^5$ and this can be enhanced considering larger memory structure. The photon lifetime of 0.6ns is achieved for the memory cell for Q-factor of about 3.4×10^5 . The fascinating characteristics of the presented optical memory include independently controlled write and read processes, compact size, high-speed operation, long photon lifetime, and perfect group index matching between the memory cell and the input/output ports which enhances the coupling efficiency.

Keywords: Optical flash memory, photonic crystal, slow light, quality factor.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۱۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۱۳

نام نویسنده مسئول: مینا نوری

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی سهند- تبریز- ایران.

۱- مقدمه

همچنین نمونه‌های دیگری از حافظه‌های نوری در بستر بلور فوتونی که به شکل الکترو-نوری^۵ کنترل می‌شوند، نیز ارائه شدند [۲۴]. در [۲۵]، نوعی ساختار حافظه نوری با کاواک حلقوی در بستر بلور فوتونی با کمک نور غیرخطی و اثر کر نشان داده شده‌است که بر پایه سازوکار دو پایایی عمل می‌کند و مدت زمان تغییر حالت حافظه برابر ۵ پیکوثانیه است. در این پژوهش از فاکتور کیفیت پایین در حد ۳۰ برای دستیابی به تغییر حالت سریع استفاده شده است. امتیاز دیگر این پژوهش طراحی کاواک با مدهای تبهگن^۶ است که باعث شده تا سیگنال و پمپ دارای طول موج واحدی باشند. سلول حافظه ارائه شده در [۲۵]، به آرایه‌ای از سلولهای حافظه قابل تعمیم است.

در پژوهش دیگری با استفاده از تغییر فاز مواد^۷ و با حذف نیاز به نور بایاس مداوم برای نگهداری بیت حافظه، زمان خواندن و نوشتن به ترتیب برابر با ده نانو ثانیه و ۵۰۰ پیکو ثانیه به دست آمده‌است [۲۶].

در [۲۷]، طراحی حافظه نوری با استفاده از خاصیت ترمو-اپتیکی مواد مدنظر قرار گرفته‌است و ساختار دارای دو پایایی ترمو-اپتیک است که قابلیت نوشتن، پاک کردن و خواندن یک بیت حافظه به صورت تجربی نشان داده شده‌است. زمان نوشتن-خواندن کمتر از ۵۰۰ میکروثانیه است که نسبت به حافظه‌های ترمو-اپتیکی از پیش گزارش شده، بهبود داشته‌است و بازه دمایی مناسب برای عملکرد آن ۲۵-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد است.

پژوهش [۲۸]، به معرفی نوعی دیگر از حافظه‌های نوری با استفاده از نانو ذره‌های طلا در بستر شیشه‌ای می‌پردازد که با بهبود مازول یانگ ساختار (بهبود دو برابری) و تغییر شکل نانوذرها قابلیت ذخیره‌سازی چند سطحی را هم‌زمان فراهم می‌کند و قابلیت ذخیره حجم وسیعی از داده‌ها در حد ۱۰ ترابایت با طول عمر بیش از ۶۰۰ سال را دارد.

در [۲۹]، حافظه نوری با تغییر فاز ماده $Ge_2Sb_2Te_5$ به وسیله نور ارائه شده‌است که قابلیت ذخیره سازی ۳۴ سطح (تقریباً ۵ بیت) را دارد. مدت زمان ماندگاری مواد در حالات ساختاری مرتب‌شده و نامرتب به طور چشمگیری بالاست و تنها با تابش لیزر خاص امکان تغییر حالت ماده فراهم می‌شود که به نوعی می‌توان از تغییر فاز ماده برای نگهداری داده‌ها بهره گرفت.

ایجاد حافظه از نوع فلش با کنترل مستقل فرایند نوشتن، نگهداری و خواندن اطلاعات در بستر بلور فوتونی تا کنون گزارش نشده‌است. در این مقاله امکان تحقق حافظه نوری نوع فلش در بستر بلور فوتونی برای اولین بار با استفاده از نور کند نشان داده خواهد شد.

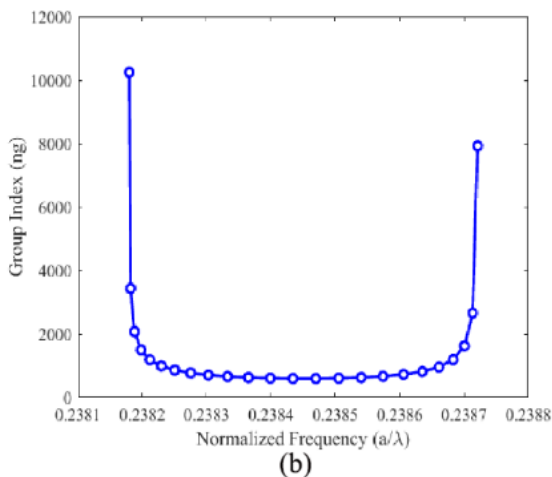
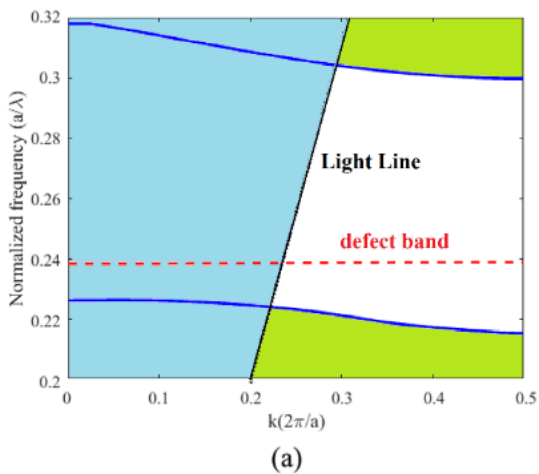
در این مطالعه، با استفاده از مفهوم نور کند در بلورهای فوتونی به طراحی حافظه نوری فلش با فاکتور کیفیت بالا پرداخته شده‌است که با داشتن فاکتور کیفیت و طول عمر فوتون بالا می‌تواند اطلاعات را در مدت زمان‌های طولانی‌تری در داخل سلول حافظه نگهداری کند. در طراحی حافظه مورد نظر از دو نوع ساختار بلور فوتونی نوع میله با ویژگی نور کند استفاده شده‌است. برای سلول حافظه، موجبر بلور فوتونی شامل میله دی‌الکتریک در داخل کانال با شعاع ۷۴ نانومتر است که به عنوان

حافظه‌های نوری یکی از اساسی‌ترین اجزاء در سیستم‌های پردازش اطلاعات نوری هستند که اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. ایجاد خطوط تاخیری، بافرها و حافظه‌های نوری در حالت کلی نیازمند بستری برای کنترل سرعت و کندکردن نور هستند، از اینرو فرایند کندکردن نور که برای اولین بار در سال ۱۹۹۹ توسط پروفیسور لنه هائو با چگالش بوز-انشتین نشان داده شد، توجه زیادی را به خود جلب کرد و بعدها روش‌های مختلف و متنوع‌تری برای تحقق نور کند گزارش شد که شامل شفافیت القایی الکترومغناطیسی^۱، نوسان جمعیت همدوس^۲، استفاده از پاشندگی مواد مثل فلزات و بلورهای فوتونی هستند [۳-۴]. یکی از روش‌هایی که اخیراً جهت ذخیره اطلاعات نوری مدنظر قرار گرفته‌است، کندکردن نور با استفاده از مفاهیم کوانتومی همچون شفافیت القایی الکترومغناطیسی در سیستم‌های چند ترازه است [۳،۴]، که قادر است یک حالت کوانتومی مفید را از طریق تعامل با نور ذخیره کند [۵،۶]. از بین تمام روش‌های کندکردن نور، بلورهای فوتونی به دلیل داشتن ویژگی‌های منحصر به فرد همچون قابلیت مقیاس‌پذیری، کنترل‌پذیری بالا، ماهیت چندپارامتری بودن، امکان کارکرد در دمای اتاق و فرایند ساخت هماهنگ با تکنولوژی‌های روز بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۷-۹]. بلورهای فوتونی در محدوده وسیعی از کاربردها همچون سویچ‌های نوری، مدولاتورهای نوری، گیت‌های نوری، حسگرها و حافظه‌های نوری مورد بررسی و استفاده قرار گرفته‌اند [۱۰-۱۴].

مطالعات صورت‌گرفته بر روی حافظه‌های نوری نشان می‌دهد که ساختارهای مطالعه‌شده و تحقق‌یافته با توجه به دشواری‌های تحقق حافظه‌های از نوع فلش، عمدتاً از نوع حافظه رم هستند. در سال‌های اخیر تحقق حافظه نوری در بستر فیبر نوری با استفاده از باریک سازی^۲ فیبر در محل ذخیره داده نوری و با اعمال ناخالصی‌های خاص صورت گرفته و از پالس کنترلی برای خواندن اطلاعات استفاده می‌شود [۱۶، ۱۵]. اصلی‌ترین چالش این نوع حافظه‌های نوری، عدم قابلیت مجتمع‌سازی است. اولین حافظه نوری در بستر سیلیکون با استفاده از کاواک به شکل L و استفاده از نور غیرخطی محقق شد ولی توان نوری بالا برای کنترل حافظه در حد ۰/۴ میلی وات و زمان نگهداری پایین در حد ۱۰۰ پیکوثانیه از ایرادهای آن بود [۱۷، ۱۸]. در سال ۲۰۱۲، نمونه ساخته‌شده حافظه نوری از نوع رم با استفاده از اثر نور غیرخطی و دو پایایی^۴ InGaAsP مدفون در بستر InP، تحقق یافت که نیاز به اعمال نور بایاس به طور مداوم داشت و پالس توان پایینی به عنوان پالس کنترلی برای تغییر طول موج تشدید کاواک عمل می‌کرد [۱۹]. از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴، حافظه نوری نوع رم با ۳۲ کانال با استفاده از جابجایی موقعیت حفره‌ها و ایجاد کاواک با فاکتور کیفیت بالا و مفهوم دوپایایی ساخته شد که به صورت سری و با روش مالتی‌پلکسینگ طول موج عمل می‌کرد [۲۰-۲۲]. در سال ۲۰۱۵، یک نمونه حافظه تمام نوری با استفاده از کاواک L-شکل بهینه با مواد InGaAsP در InP معرفی شد [۲۳].

بررسی قرار می‌گیرد. به منظور کنترل پذیر کردن فرایند خواندن و نوشتن اطلاعات، از حفره‌های حلقوی برای موجبر ورودی و خروجی استفاده می‌شود که با تغییر ضریب شکست حفره امکان کنترل کامل حافظه نوری فراهم می‌شود. تغییر ضریب شکست را می‌توان با استفاده از وارد کردن مایع، کنترل دما، اعمال پتانسیل و یا نور غیرخطی به وجود آورد و کنترل کرد. در این مقاله، هر جزء از ساختار حافظه که شامل سلول نگهداری اطلاعات و موجبرهای ورودی و خروجی است، به صورت مجزا معرفی و تحلیل می‌شوند و در نهایت نحوه ترکیب این اجزاء برای تحقق حافظه نوری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای ساختار پایه با ضریب شکست مؤثر $3/4$ و شعاع $R=0/3a$ ، $a)$ ثابت شبکه بلور فوتونی است) باند ممنوعه برای قطبیدگی TM_{10} (میدان الکتریکی عمود بر صفحه تناوب و میدان مغناطیسی در صفحه تناوب است)، در محدوده فرکانس بهنجار^{۱۱} شده $0/228$ تا $0/316$ قرار دارد. برای ایجاد ساختار سلول حافظه که به عنوان محل نگهداری اطلاعات نوری قلمداد می‌شود، طبق شکل ۲، با در نظر گرفتن میله‌هایی با شعاع $r=0/2a$ در داخل موجبر به صورت دو در میان بیشترین مقدار ضریب شکست گروه برابر با 647 در محدوده فرکانس بهنجار شده $0/2387$ تا $0/2382$ ، به دست آمده است.

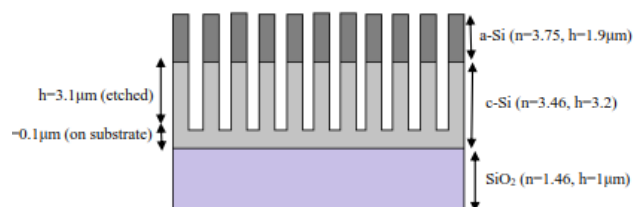


محل نگهداری اطلاعات نوری عمل می‌کند. بهینه سازی و روال طراحی چنین ساختاری با هدف دستیابی به معیار تأخیر در پهنای باند بالا در مرجع [۳۰]، به تفصیل توضیح داده شده است. در مرجع [۳۰] کاربرد موجبری مدنظر بود ولی با اعمال تغییراتی و نگه داشتن یک راد در داخل کانال، کاواک نوری فوق باند باریک با فاکتور کیفیت بالا محقق شده است که برای سلول حافظه نوری بسیار مطلوب است. در این مقاله، برای کنترل فرایند نوشتن و خواندن اطلاعات نوری از موجبرهای ورودی و خروجی قابل کنترل که متشکل از حفره‌های حلقوی در داخل موجبر است، استفاده شده است. ساختارهای طراحی شده برای موجبرهای ورودی و خروجی و سلول حافظه در طول موج کاری، از نظر ضریب شکست گروه بسیار به هم نزدیک بوده و شرایط بهتری از نظر الحاق نور فراهم می‌کنند. نتایج گزارش شده در این مطالعه کاربردهای بالقوه‌ای برای پردازش، انتقال و نگهداری اطلاعات نوری با استفاده از ساختارهای مبتنی بر نور کند ایجاد می‌کند.

نرم افزار مورد استفاده برای محاسبه ساختارهای باند و توزیع میدان در این مقاله، آرسافت^۸ است که به ترتیب از روش‌های بسط امواج تخت و تفاضلات محدود حوزه زمانی بهره می‌برد. برای محاسبه ضریب شکست مؤثر ساختار نیز از نرم‌افزار لومریکال^۹ استفاده شده است. ترتیب نگارش مقاله به این صورت است که در ادامه، موجبرهای ورودی و خروجی با قابلیت کنترل ضریب شکست و مد ناراستی هدایتی ارائه می‌شود و سپس ساختار حافظه نوری مورد نظر به همراه نحوه عملکرد آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- طراحی حافظه نوری با قابلیت کنترل مستقل فرایند نوشتن، نگهداری و خواندن اطلاعات با استفاده از نور کند

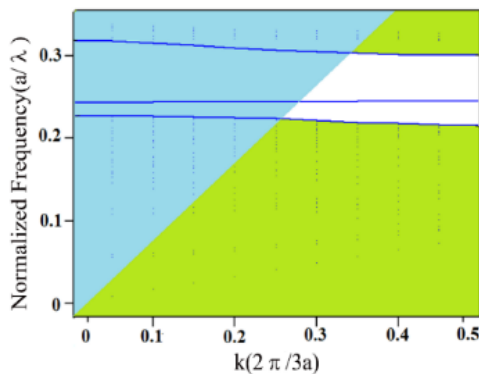
ساختار پایه مورد استفاده در این مقاله که به عنوان بستری مناسب برای طراحی حافظه نوری در نظر گرفته شده است، شامل ساختار بلور فوتونی نوع میله با چینش شش ضلعی است که توصیف دقیق ساختار عملی آن با دید از جانب در شکل ۱ آمده است و ساخت تجربی موجبر مشابه آن در [۳۱] ارائه شده است.



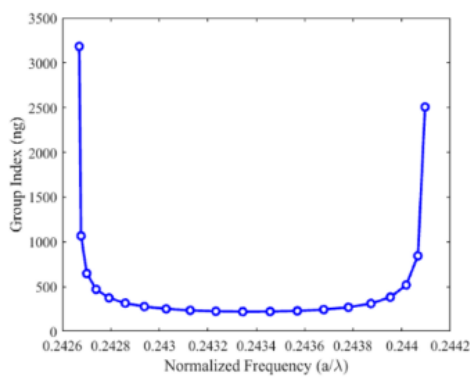
شکل ۱: شماتیکی از ساختار با دید از جانب و توزیع ضریب شکست ساختار مورد نظر.

هرچند که تحلیل دقیق ساختار عملی نیازمند شبیه‌سازی سه بعدی است اما با بهره‌گیری از مفهوم ضریب شکست مؤثر (که برابر با $n_{eff}=3/4$ محاسبه شده است)، ساختار با حفظ دقت کافی به صورت دو بعدی مورد

خواهند بود، که در بازه فرکانسی ۰/۲۴۲۷ تا ۰/۲۴۴۱ قرار می‌گیرد و از نظر فرکانسی بسیار نزدیک به مد هدایتی برای سلول حافظه است.



(a)



(b)

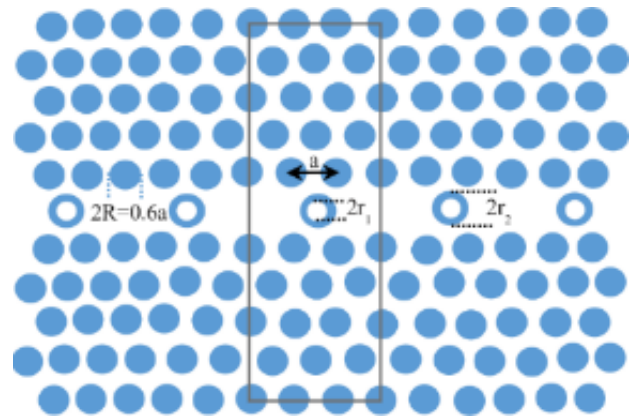
شکل ۴: (a) ساختار باند و (b) ضریب شکست گروه برای مد ناراستی هدایتی برای موجبر با حفره‌های حلقوی به صورت دو در میان در داخل کانال به‌ازای شعاع‌های داخلی و بیرونی به ترتیب برابر با $0.3a$ و $r_2 = 0.4a$ و $r_1 =$

فاکتور کیفیت سلول حافظه در برنامه Rsoft برای ساختار شکل ۵ و حفره‌های هوایی در حلقه‌ها محاسبه شد که مقدار $3/4 \times 10^5$ را نتیجه داد. فاکتور کیفیت با زمان نگهداری حافظه طبق رابطه بالاتر باشد، نرخ هدر رفت انرژی از کاواک کمتر و یا به عبارت بهتر، زمان نگهداری حافظه بالاتر خواهد بود. نرخ خاموشی متناسب با رابطه نمایی $e^{-t/\tau}$ یا $e^{-t/\tau}$ است که با انتخاب $\lambda = 1550$ nm، زمان خاموشی یا طول عمر فوتون و یا زمان نگهداری حافظه برابر با $0/6$ نانوثانیه خواهد بود.

شکل ۲: (a) ساختار باند و (b) ضریب شکست گروه برای مد ناراستی سلول حافظه.

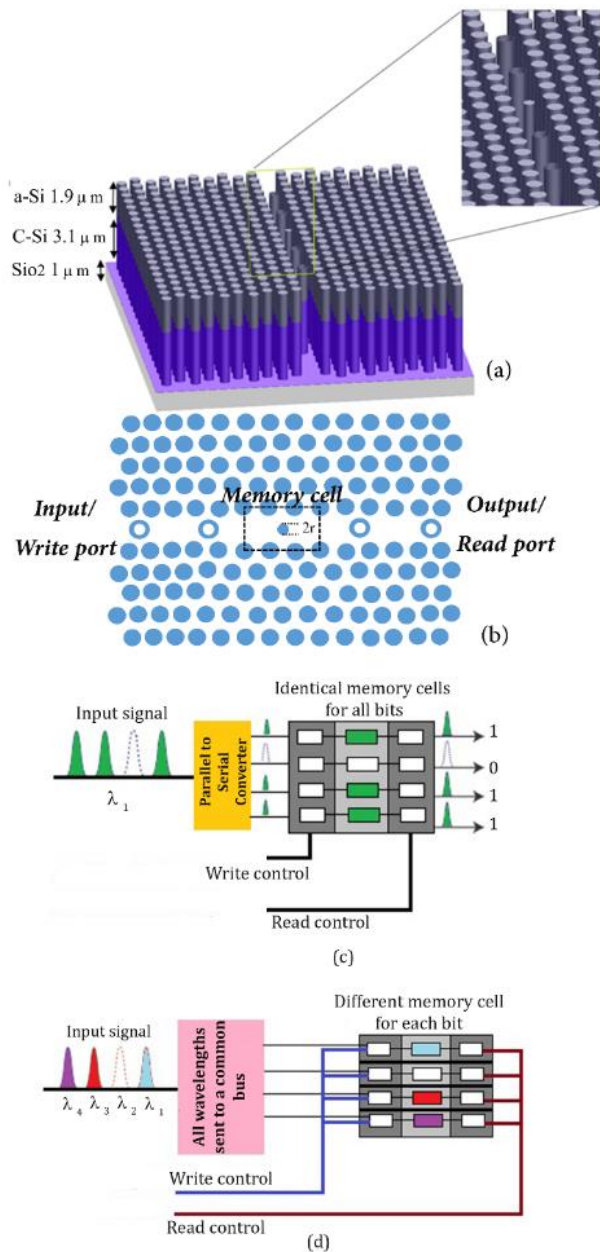
مد ناراستی هدایتی با این توصیف در داخل باند ممنوعه و در زیر خط نور قرار دارد که باعث کاهش تلفات و هدررفت نشتی نور به دیواره‌های موجبر و هوا می‌شود.

برای طراحی درگاه کنترل‌پذیر برای فرایند خواندن و نوشتن اطلاعات به صورت مستقل از هم، و برای دستیابی به ضریب شکست گروه نزدیک به ۶۴۷ در طول موج کاری، از ساختار مشابه سلول حافظه استفاده شده است با این تفاوت که میله‌های دی‌الکتریک در داخل کانال با حفره‌های حلقوی دو در میان در داخل موجبر جایگزین شده‌اند. ابر شبکه 3×5 در نظر گرفته شده برای تحلیل موجبرهای ورودی و خروجی در شکل ۳ نشان داده شده است.



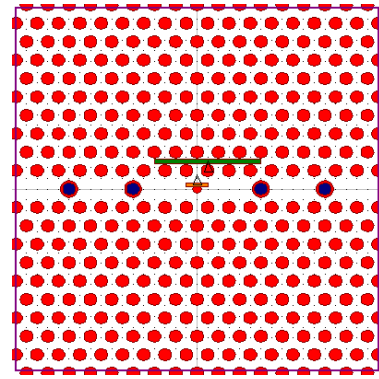
شکل ۳: موجبر بلور فوتونی با حفره‌های حلقوی در داخل موجبر برای درگاه ورودی و خروجی حافظه نوری مورد نظر.

به‌ازای مقادیر مختلفی از شعاع‌های داخلی و بیرونی حفره‌های حلقوی و با در نظر گرفتن ملاحظات ساخت (ضخامت دیواره حفره‌های حلقوی حداقل ۳۰ نانومتر باشد) [۳۲]، ساختار تحلیل شده و نتایج به‌دست آمده مورد بررسی قرار گرفتند. هدف از تحلیل ساختار باند برای موجبر بلور فوتونی با حفره‌های حلقوی نشان داده شده در شکل ۳، دستیابی به مدهای ناراستی هدایتی در مجاورت مد سلول حافظه است به طوری که به‌ازای حفره‌های هوایی همپوشانی بین مدهای درگاه ورودی و خروجی وجود نداشته باشد، از طرفی مد درگاه ورودی و خروجی در فرکانس‌های بهنجار شده بالاتری نسبت به مد سلول حافظه قرار گیرد تا با افزایش ضریب شکست حفره‌ها و کشیده شدن باند به سمت فرکانس‌های پایین‌تر و در نتیجه ایجاد همپوشانی بین باندها فرایند نوشتن و خواندن به صورت کنترل‌پذیر صورت گیرد. فرکانس مرکزی مد سلول حافظه نوری برابر با $a/\lambda = 0/2385$ است. به‌ازای شعاع داخلی و بیرونی حفره‌های حلقوی برابر $0.3a$ و $0.4a$ ، مد هدایتی و ضریب شکست گروه درگاه‌های ورودی و خروجی مطابق با شکل ۴



شکل ۶: (a) شمای سه بعدی از ساختار حافظه نوری و (b) دید از بالای ساختار معادل با ضریب شکست مؤثر، (c) ترکیب حافظه موازی و (d) براساس WDM.

ساختار پیشنهادی برای حافظه نوری فلش با استفاده از روش بسط موج تخت برای ابرشبکه 5×3 به‌ازای مقادیر مختلفی از ضریب شکست حفره داخلی حلقه‌های داخل موجبر در درگاه ورودی و خروجی مورد بررسی قرار می‌گیرد تا محدوده قابل قبول ضریب شکست برای فرایند نوشتن و خواندن تعیین گردد. نحوه‌ی عمل‌کرد حافظه در حالت کلی به این صورت است که ابتدا اطلاعات از طریق درگاه ورودی باید در سلول حافظه نوشته شوند، پس برای نوشتن اطلاعات در سلول حافظه باید شرایطی فراهم شود که باند ناراستی درگاه ورودی و سلول هم‌پوشانی داشته‌باشند که با افزایش ضریب شکست حفره‌های حلقوی این امکان فراهم می‌شود بعد از رسیدن اطلاعات به محل نگهداری با

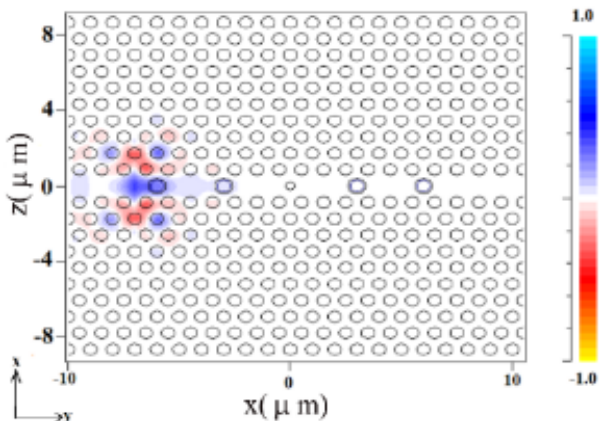


شکل ۵: محاسبه فاکتور کیفیت برای سلول حافظه با استفاده از نرم‌افزار Rsoft.

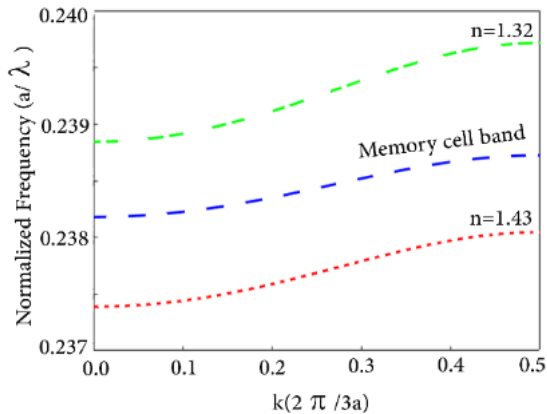
۳- شبیه‌سازی و بررسی عملکرد حافظه نوری طراحی شده

ساختار حافظه نوری پیشنهادی در این مقاله، ترکیبی از ساختارهای اشاره شده در بخش قبل به عنوان سلول حافظه جهت نگهداری داده و موجبرهای کنترل‌پذیر ورودی و خروجی برای نوشتن و خواندن اطلاعات است که در بخش ۲ تحلیل شد. مطابق با شکل ۶، موجبر بلور فوتونی با میله‌دی‌الکتریک در مرکز کانال به عنوان محل نگهداری اطلاعات است که در دو سمت آن موجبر بلور فوتونی با حفره‌های حلقوی به منظور نوشتن و خواندن اطلاعات قرار گرفته است.

شکل ۸، نتایج بسط موج تخت برای موجبر با حفره‌های حلقوی پر شده با مایع مناسب و یا تغییر ضریب شکست مایع در اثر نور غیرخطی را نشان می‌دهد که با تغییر ضریب شکست در داخل حفره‌های حلقوی، به ازای ضریب شکست در بازه $1/32$ تا $1/43$ ، مد موجبر ورودی و خروجی به سمت فرکانس‌های بهنجار شده پایین‌تر جابه‌جا شده و در نتیجه همپوشانی بین مدهای هدایتی در دو ساختار با فرکانس مرکزی $0/2385$ $a/\lambda =$ امکان‌پذیر خواهد شد.



شکل ۷: توزیع میدان برای الحاق نور 1550 نانومتر به ساختار به‌ازای حفره‌های حلقوی هوایی در موجبر ورودی.

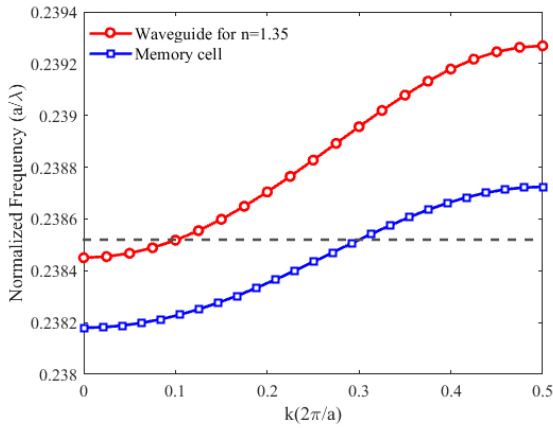


شکل ۸: مدهای هدایتی برای موجبرهای ورودی و خروجی به ازای ضرایب شکست $1/32$ و $1/43$ برای حفره‌های حلقوی و مقایسه محدوده همپوشانی باندها با باند ناراستی سلول حافظه.

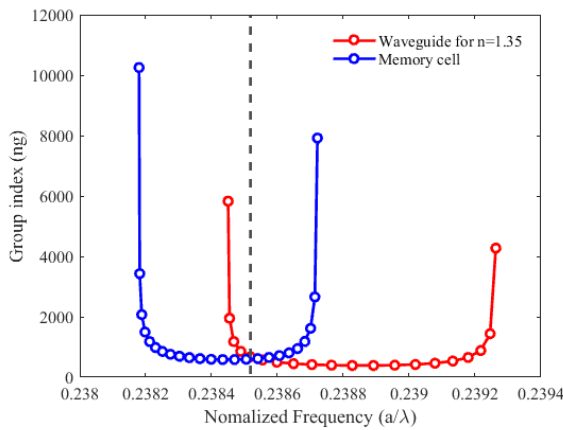
ساختار پیشنهادی برای حافظه از مفهوم نور کند (و در نتیجه باندهای ناراستی تخت) برای ایجاد و یا عدم ایجاد همپوشانی مدهای موجبر ورودی-خروجی و سلول حافظه بهره می‌گیرد. از آنجایی که کنترل همپوشانی و یا عدم همپوشانی بین باندهای ناراستی با استفاده از باندهای تخت با مصرف توان پایین امکان‌پذیر است، فلذا این ساختار با اعمال نور غیرخطی با توان پایین‌تر قادر به تزویج و یا برعکس عدم تزویج نور بین سلول حافظه و موجبر خواهد شد.

بازگرداندن ضریب شکست به حالت قبلی و رفع همپوشانی اطلاعات تا زمان دلخواه (که با فاکتور کیفیت و سطح توان نور ورودی تنظیم می‌شود) در سلول نگه‌داری می‌شود. برای خواندن اطلاعات همان فرایندی که برای نوشتن انجام شد باید به ساختار اعمال شود که یکسان بودن درگاه ورودی و خروجی باعث می‌شود شرایط یکسانی برای ایجاد همپوشانی باندها و در نتیجه نوشتن و خواندن اطلاعات فراهم شود.

همان‌طور که اشاره شد، شرط عبور نور از بین هریک از زیر بخش‌های حافظه نوری موردنظر، ایجاد همپوشانی بین مدهای هدایتی سلول حافظه و هربخش است، یعنی ایجاد شرایطی که طول موج 1550 نانومتر امکان انتشار در هر دو جزء ساختار را داشته‌باشد. مدهای هدایتی در موجبر ورودی/خروجی و سلول حافظه از نظر فرکانس، اختلاف کمی با هم دارند که با اضافه کردن مایعی با ضریب شکست مناسب به داخل حفره‌های حلقوی این اختلاف اندک قابل جبران بوده و با جابه‌جایی باند هدایتی موجبرهای ورودی و خروجی به سمت فرکانس‌های بهنجار شده پایین‌تر همپوشانی بین باندها در هر جز ساختار فراهم می‌شود. روش اعمال مایع برای درک آسان‌تر تغییر ضریب شکست و ایجاد همپوشانی یا عدم همپوشانی، ارائه شده‌است درحالی‌که روش کارآمدتر بهره‌گیری از نور غیرخطی برای ساختار پیشنهادی است تا با کم‌ترین توان نوری و با سرعت بالا بتوان پروسه خواندن و نوشتن را کنترل کرد. به دلیل مستقل بودن دو درگاه از هم، کنترل فرایند نوشتن و خواندن به صورت مستقل از هم قابل کنترل است. داشتن خصوصیت نور کند در این ساختار به عنوان ایده اصلی طراحی، باعث شده تا شیب مدهای هدایتی نزدیک به صفر شود تا شرایط برای همپوشانی و عدم همپوشانی بین مدها راحت‌تر و با تغییر اندک در ضریب شکست مایع اضافه‌شده که می‌تواند به صورت الکتریکی، حرارتی و نور غیرخطی حتی با پر و خالی کردن حفره‌ها با روش‌های شناخته‌شده در سیال‌های نوری^{۱۲} نیز فراهم گردد. کنترل فرایند خواندن و نوشتن اطلاعات در حافظه پیشنهادی، با استفاده از اثر نور غیرخطی مایع درون حفره‌های حلقوی که می‌تواند شامل مایعات با محدوده ضریب شکست مناسب، مایعات به همراه نانو ذرات و یا مایعات با ترکیبات یونی باشد، قابل تحقق است [۳۳-۳۷]. روش کار به این صورت است که برای مایعات با ضریب غیرخطیت مثبت (منفی)، باید از مایعاتی با ضریب شکست کمتر از $1/32$ (بیش‌تر از $1/43$) استفاده شود تا با اعمال اثر غیرخطی و با افزایش (کاهش) ضریب شکست، همپوشانی مدهای سلول حافظه و درگاه‌های ورودی و خروجی ایجاد شود. به‌ازای حفره‌های حلقوی هوایی، نتایج تحلیل تفاضل محدود حوزه زمانی در شکل ۷ نشان داده شده‌است که بیان‌گر عدم امکان الحاق نور به ورودی به‌خاطر عدم همپوشانی مدهای هدایتی بین دو جزء از ساختار است. عدم همپوشانی بین مدهای هدایتی سلول حافظه و موجبر با حفره‌های حلقوی هوایی که به ترتیب در محدوده $0/2387-0/2382$ و $0/2441-0/2427$ قرار دارند، به معنی عدم امکان الحاق نور 1550 نانومتر (که ساختار کلی براساس آن تنظیم شده) به درگاه ورودی است.



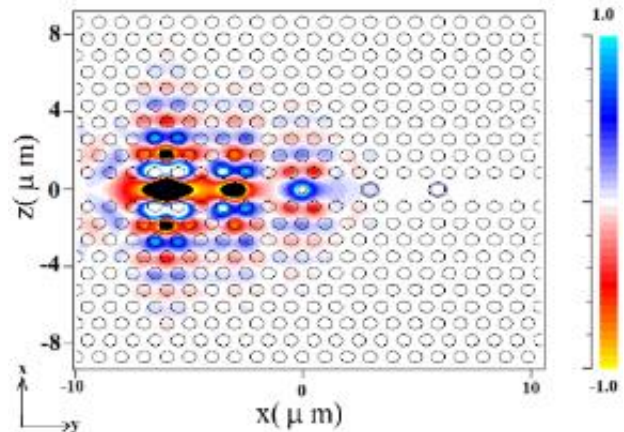
(a)



(b)

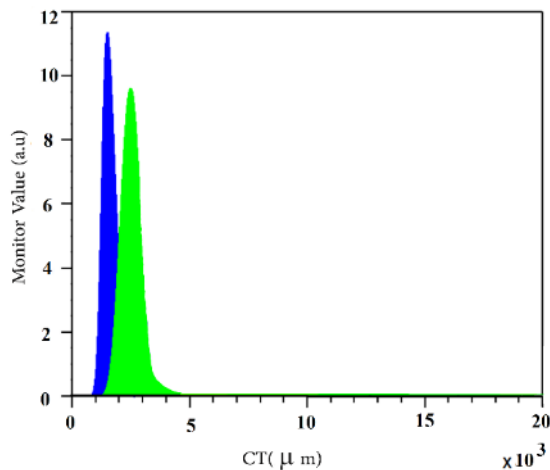
شکل ۱۰: نمودار (a) باندهای ناراستی و (b) ضرایب شکست گروه برای سلول حافظه و موجبر ورودی-خروجی به‌ازای $n=1.35$. برای نگهداری اطلاعات در محل سلول حافظه، می‌توان با بازگرداندن ساختار به حالت قبلی، هم‌پوشانی مدها را از بین برده و اطلاعات را در داخل ساختار مرکزی حفظ کرد. شکل ۱۱، نحوه‌ی عمل کرد حافظه فلش را به‌خوبی نشان می‌دهد. برخلاف حافظه رم که نیاز به اعمال مداوم سیگنال بایاس است، حافظه پیشنهادی در این مطالعه بعد از قطع نور ورودی و کنترلی (در صورت استفاده از مفهوم نور غیرخطی)، قابلیت نگهداری اطلاعات را خواهد داشت. فاکتور کیفیت کاواک نورکند در نظر گرفته‌شده برای حافظه پیشنهادی برابر با $3/4 \times 10^5$ بدست‌آمد که با افزایش اندازه ساختار قابل ارتقا است. درنهایت برای خواندن اطلاعات، مشابه روش اشاره‌شده برای نوشتن داده‌ها با تغییر ضریب شکست حفره‌های حلقوی، در خروجی می‌توان هم‌پوشانی بین مدهای موجبر خروجی و سلول حافظه را ایجاد کرد. فرایند خواندن اطلاعات زمانی که حفره‌های حلقوی با ماده‌ای با ضریب شکست ۱/۳۵ پر شده‌اند، در شکل ۱۲ نشان داده شده‌است.

به‌عنوان نمونه، با اضافه کردن مایعی با ضریب شکست ۱/۳۵ به ساختار حلقوی، به دلیل ایجاد هم‌پوشانی بین باندها امکان الحاق نور ورودی به موجبر ورودی فراهم شده و در واقع امکان نوشتن اطلاعات فراهم می‌گردد. نحوه‌ی انتشار میدان برای چنین حالتی در شکل ۹ نشان داده شده‌است که بیان‌گر این موضوع است که نور به‌راحتی به موجبر حلقوی الحاق شده و به سلول حافظه که محل نگهداری اطلاعات است، می‌رسد. مد هدایتی موجبر ورودی در این حالت نسبت به حالت قبل (حفره‌های حلقوی هوایی) به سمت فرکانس پایین‌تر جابه‌جا شده‌است.



شکل ۹: نحوه‌ی انتشار میدان مد هدایتی به‌ازای نفوذ مایعی با ضریب شکست ۱/۳۵ به داخل حلقه‌ها برای کنترل فرایند نوشتن اطلاعات.

ساختار حلقوی به‌ازای فرکانس مرکزی $a/\lambda = 0.2385$ ، خصوصیت نور کندی با ضریب شکست گروه ۶۲۳ را نشان می‌دهد که بسیار نزدیک به ضریب شکست گروه سلول حافظه ($n_g = 647$) است و باعث الحاق راحت‌تر نور به موجبر می‌شود. یکی از چالش‌های اساسی در حوزه نور کند، سختی الحاق نور در موجبر نور کند به دلیل عدم تطبیق ضریب شکست گروه است که با تدریجی کردن تغییرات ضریب شکست، این مشکل قابل رفع شدن است [۳۸]. در این مقاله، این تفاوت بین ضریب شکست مد ناراستی موجبر و سلول حافظه نیز ممکن بود ایجاد شود، درحالی‌که در الحاق نور با فرکانس مرکزی $a/\lambda = 0.2385$ از موجبر به سلول و برعکس، تطبیق ضریب شکست گروه بین این دو جزء ساختار ایجاد شده و تزویج به نحو بهتری بین این دو جزء صورت می‌پذیرد. نمودارهای ساختار باند مد ناراستی و ضریب شکست گروه برای سلول حافظه و موجبرهای ورودی و خروجی به‌ازای افزودن ضریب شکست حفره حلقوی به میزان $n=1.35$ در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است.



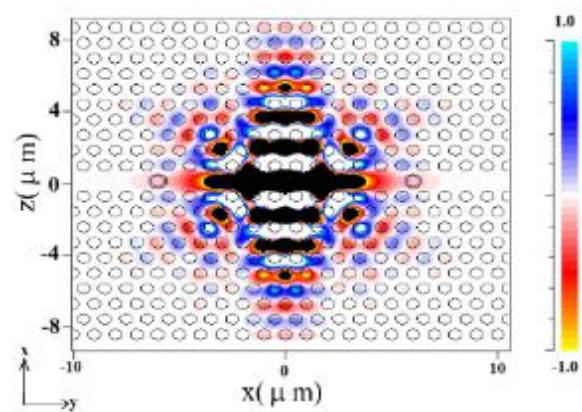
شکل ۱۳: اندازه‌گیری میزان تأخیر فرایند نوشتن/خواندن با شبیه‌سازی تفاضل‌های محدود حوزه زمانی. ثبت زمانی پالس در محل ورودی (آبی) و محل حافظه (سبز).

۴- نتیجه

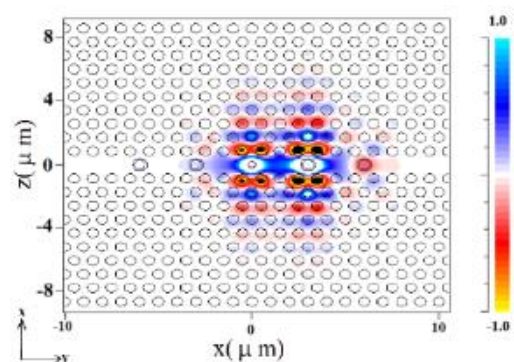
در این مقاله، به طراحی و بررسی نحوه‌ی عمل‌کرد حافظه نوری در بستر بلور فوتونی با استفاده از مفهوم نور کند پرداخته شد. حافظه نوری پیشنهادی از نوع فلش بوده و دارای کاواکی با ضریب کیفیت $3/4 \times 10^5$ است که طول عمر فوتون برابر با $0/6$ نانوثانیه را نتیجه می‌دهد. استفاده از مفهوم نور کند باعث شد تا با در نظر گرفتن محدوده هم‌پوشانی مدهای ناراستی سلول حافظه و درگاه‌های ورودی و خروجی که با تغییر ضریب شکست حفره‌ها صورت می‌گیرد، حافظه نوری نوع فلش تحقق یابد.

حافظه نوری پیشنهادی در این مقاله، نیازی به اعمال بایاس مداوم نداشته و قابلیت کارکرد به‌صورت موازی و براساس WDM را داراست. یکی از شباهت‌های ساختار پیشنهادی به حافظه‌های فلش مرسوم الکتریکی، قابلیت ذخیره و نگهداری داده بدون نیاز به بایاس خارجی است. این در حالیست که حافظه‌های نوری ارائه‌شده تاکنون در بستر بلور فوتونی و غیره نیاز به یک منبع نور مداوم بایاس برای حفظ داده دارند.

به‌علاوه، همان‌طور که حافظه‌های فلش الکتریکی با ترانزیستورهای از گیت شناور^{۱۴} ایزوله و بدون کانتکت الکتریکی بهره‌برده می‌توانند بار را تا زمانهای زیادی نگهداری کنند، ساختار ارائه‌شده از کاواک برای حبس قوی نور و جلوگیری از هدررفت آن بهره‌می‌برد هرچند در هر دو مورد به‌ترتیب نشت بار و نور به مرور زمان اتفاق خواهد افتاد. در حافظه نوری فلش نرخ هدررفت انرژی از کاواک با فاکتور کیفیت متناسب است و به‌ازای فاکتور کیفیت بالا، زمان نگهداری داده در سلول حافظه افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱: نحوه‌ی توزیع میدان در حالت ذخیره‌سازی اطلاعات. حلقه‌های موجبرهای ورودی و خروجی هوا هستند.



شکل ۱۲: نحوه‌ی توزیع میدان برای فرایند خواندن اطلاعات با نفوذ مایعی با ضریب شکست $1/35$ به داخل حفره‌های حلقوی.

برای محاسبه سرعت نوشتن و خواندن اطلاعات در حافظه پیشنهادی، با استفاده از روش تفاضل‌های محدود حوزه زمانی به بررسی تأخیر پالس انتشاری از ورودی موجبر تا سلول و از سلول تا خروجی موجبر پرداخته شد. به‌دلیل وجود تقارن در ساختار، زمان نوشتن و خواندن باهم برابرند و از این‌رو نتایج فقط برای یکی از فرایندها محاسبه می‌شود. برای شبیه‌سازی سرعت نوشتن و یا خواندن، از یک منبع پالسی در طول موج 1550 نانومتر و دو ناظر، یکی در ابتدای موجبر ورودی ($\Delta x = -6$) و دیگری در محل حافظه ($\Delta x = 0$) که به‌عنوان محل ذخیره‌سازی اطلاعات است، استفاده می‌شود. با ارسال نور منبع به‌ازای فرکانس مرکزی $a/\lambda = 0/2385$ و دانستن فاصله مکانی ناظرها^{۱۳} و اختلاف زمانی ثبت میدان برای هر ناظر می‌توان تأخیر بین ارسال و رسیدن پالس به محل نگهداری را محاسبه کرد. با توضیحات داده شده و لحاظ کردن نتیجه شبیه‌سازی که در شکل ۱۳ نشان داده شده‌است، زمان نوشتن و خواندن در اندازه $3/3$ ps بدست می‌آید.

[۱۴] اشکان قنبری، علی صدر، مهرا ن نیکو، « بیشینه سازی ضریب فشردگی و پهنای باند پالسهای نوری با استفاده از چرپ فرکانسی در فیبرهای فوتونیک کریستال»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۳، شماره ۲، ۱۳۹۲.

- [15] K. Patnaik, J. Q. Liang, and K. Hakea, "Slow light propagation in a thin optical fiber via electromagnetically induced transparency," *Physics Review A*, vol. 66, p. 063808, 2002.
- [16] M. R. Sprague, P. S. Michel Berger, T. F. M. Champion, D. G. England, J. Nunn, X.-M. Jin, W. S. Kolthammer, A. Absolved, P. St. J. Ruse and I. A. Wellesley "Broadband single-photon-level memory in a hollow-core photonic crystal fire," *Nature Photonics*, vol. 8, pp. 287-291, 2014.
- [17] M. Notomi, A. Shinya, S. Mitsugi, G. Kira, E. Kuramochi, and T. Tanabe, "Optical bistable switching action of Si high-Q photonic-crystal nanocavities," *Optics Express*, vol. 13, pp. 2678-2687, 2005.
- [18] T. Tanabe, M. Notomi, S. Mitsugi and Eiichi Kuramochi, "Fast bistable all-optical switch and memory on a silicon photonic crystal on-chip," *Optics Express*, vol. 30, pp. 2575-2577, 2005.
- [19] K. Nozaki, A. Shinya, S. Matsuo, Y. Suzuki, T. Segawa, T. Sato, Y. Kawaguchi, R. Takahashi and M. Notomi "Ultralow-power all-optical RAM based on nanocavities," *Nature Photonics*. vol. 6, pp. 248-252, 2012.
- [20] K. Nozaki, A. Shinya, S. Matsuo, Y. Suzuki, T. Segawa, T. Sato, Y. Kawaguchi, R. Takahashi and M. Notomi "All-optical on-chip bit memory based on ultra-high Q InGaAsP photonic crystal," *Optics Express*, vol. 23, pp. 19382-19387, 2008.
- [21] K. Nozaki, A. Shinya, S. Matsuo, Y. Suzuki, T. Segawa, T. Sato, Y. Kawaguchi, R. Takahashi and M. Notomi "Large-scale integration of wavelength addressable all-optical memories on a photonic crystal chip," *Nature Photonic*, vol. 8, pp. 474-481, 2014.
- [22] M. Notomi, T. Tanabe, A. Shinya, E. Kuramochi, and H. Taniyama "On-Chip All-Optical Switching and Memory by Silicon Photonic Crystal Nanocavities," *Optical Technologies*, pp. 1-10, 2008.
- [23] E. Kuramochi, K. Nozaki, A. Shinya, H. Taniyama, K. Takeda, M. Notom "Ultralow bias power all optical photonic crystal memory realized with systematically tuned L3 nanocavity," *Applied Physics Letters*, vol. 107, p. 221101, 2015.
- [24] A. Lima Jr. A.S.B. Sombra "Photonic crystal optical memory," *Applied Physics A*, vol. 103, pp. 521-524, 2011.
- [25] A. Geravand, M. Danaie, S. Mohammadi, "All-optical photonic crystal memory cells based on cavities with a dual-argument hysteresis feature", *Optics Communications*, vol. 430, pp. 323-335, 2019.
- [26] C. Ríos, M. Stegmaier, P. Hosseini, D. Wang, T. Scherer, C.D. Wright, H. Bhaskaran, W.H.P. Pernice, Integrated all-photonic non-volatile multi-level memory, *Nature Photonics*, vol. 9, pp. 725-732, 2015.
- [27] A. M. Morsy, R. Biswas, and M. L. Povinelli, "High temperature, experimental thermal memory based on optical resonances in photonic crystal slabs," *APL Photonics*, vol. 4, p. 010804, 2019.
- [28] Q. Zhang, Z. Xia, Y. B. Cheng, M. Gu, "High-capacity optical long data memory based on enhanced Young's modulus in nanoplasmonic hybrid glass composites," *Nature Communications*, vol. 9(1), p. 1183, 2018.
- [29] X. Li, N. Youngblood, C. Ríos, Z. Cheng, C. D. Wright, W. H. P. Pernice, H. Bhaskaran. "Fast and reliable storage using a 5-bit, non-volatile photonic memory cell," *Optica*, vol. 6(1), pp. 1-6, 2019.
- [30] A. Ebrahimi, M. Noori, Ultra-slow light with high NDBP achieved in a modified W1 photonic crystal waveguide with coupled cavities., *Optics Communications*, vol. 424, pp. 37-43, 2018.
- [31] T. Zijlstra, E. van der Drift, M.J.A. de Dood, E. Snoeks, A. Polman, Fabrication of two-dimensional photonic crystal waveguides for 1.5 mm in silicon by deep anisotropic dry etching, *J. Vac. Sci.* vol. 17(6), pp. 2734-2739, 1999.

شباهت دیگر، قابلیت نوشتن، نگهداری و خواندن و یا پاک کردن داده به طور مستقل در ساختار پیشنهادی است که این کار با ایجاد یا عدم ایجاد شرایط هم‌پوشانی بین مد ناراستی سلول حافظه و موجبرهای ورودی-خروجی به ترتیب برای اهداف نوشتن/خواندن و نگهداری داده صورت می‌گیرد.

استفاده از مفهوم نور کند که متناظر با مدهای ناراستی تخت است باعث می‌شود تا با صرف کمترین توان برای سیگنال کنترلی و یا به عبارتی به‌ازای کوچک‌ترین تغییرات ضریب شکست، هم‌پوشانی و یا عدم هم‌پوشانی بین مدهای ناراستی موجبرهای ورودی-خروجی و سلول حافظه به راحتی محقق شود.

مراجع

- [1] D. A. Miller, "Device requirements for optical interconnects to silicon chips," *Proc. IEEE*, vol. 97, pp. 1166-1185, 2009.
- [2] J. B. Kurgan, "Optical buffers based on slow light in electromagnetically induced transparent media and coupled resonator structures: comparative analysis", *Journal of Optical Society of America B*, vol. 22, pp. 1062-1074, 2005.
- [3] C. Liu, Z. Dutton, C. H. Behrouz, and L. V. Hua, "Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses", *Nature*, vol. 409, pp. 490-493, 2001.
- [4] I. Novikova, R. L. Walworth, and Y. Xiao, "Electromagnetically induced transparency-based slow and stored light in warm atoms", *Laser Photon. Rev.* vol. 6, p. 333, 2012.
- [5] Y. Chen, Z. Bai, and G. Huang, "Ultraslow optical solitons and their storage and retrieval in an ultra-cold ladder-type atomic system", *Phys. Rev. A*, vol. 89, p. 023835, 2014.
- [6] H. H. Jen, Bo Xiong, Ite A. Yu, Daw-Wei Wang, "Electromagnetic induced transparency and slow light in interacting quantum degenerate atomic gases", *Journal of Optical Society of America B*, vol. 30, p. 2855, 2013.
- [7] R. Ilia, C. Erich, T. Petrich, and F. Leader, "Slow-light enhanced collinear second-harmonic generation in two-dimensional photonic crystals," *Phys. Rev. B*, vol. 77, p. 115124, 2008.
- [8] B. Corcoran, C. Monet, C. Grilled, D. J. Moss, B. J. Eagleton, T. P. White, L. O'Faolain, and T. F. Krauss, "Green light emission in silicon through slow-light enhanced third-harmonic generation in photonic crystal waveguides," *Nature Photonics*, vol. 3, pp. 206-210, 2009.
- [9] R. S. Tucker, P.-C. Ku, and C. J. Chang-Husain, "Slow light optical buffers-capabilities and fundamental limitations," *J. Light. Technol.*, vol. 23, pp. 4046-4066, 2005.
- [10] M. Fleischhauer, A. Imamoglu, and J. P. Maragos, Electromagnetically induced transparency: Optics in coherent media, *Rev. Mod. Phys.* vol. 77, pp. 1-40, 2005.
- [11] C. Simon, M. Afzelius, J. Ape, A. B. Girodat, S. J. Dewhurst, N. Gisin, C. Hu, F. Jerebko, S. Kriol, J. Mauler, J. Nunn, E. Poliak, J. Rarity, H. Riedmatten, W. Rosenfeld, A. J. Shields, N. Scold, R. M. Stevenson, R. Threw, I. Malmsey, M. Weber, H. Weinfurter, J. Wrachtrup, R. J. Young, "Quantum memories: a review based on European integrated projects qubit applications", *Euro. Phys. J. D*. vol. 58, pp. 1-22, 2010.
- [12] N. Vanguard, C. Simon, H. de Riedmatten, and N. Gisin, Quantum repeaters based on atomic Ensembles and linear optics, *Rev. Mod. Phys.* vol. 83, pp. 33-80, 2011.

[۱۳] سعید سیدطهری، علیرضا عندلیب، «طراحی و اتانفترهای مبتنی بر بلورهای فوتونی با قابلیت تواناسازی مناسب برای سامانه‌های مخابرات نوری»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۲، ۱۳۹۶.

- [36] C. W. Chen, J. L. Tang, K. H. Chung, T. H. Wei, T. H. Huang, "Negative nonlinear refraction obtained with ultrashort laser pulses," *Optics Express*, vol. 15(11), pp. 7006-18, 2007.
- [37] Cássio E. A. Santos, Márcio A. R. C. Alencar, Pedro Migowski, Jairton Dupont, and Jandir M. Hickmann, "Nonlocal Nonlinear Optical Response of Ionic Liquids under Violet Excitation," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2013, pp. 1-6, 2013.
- [38] T. Baba, "Slow light in photonic crystals," *Nature Photonics*, vol. 2, pp. 465-473, 2008.
- [32] H. M. Nguyen, M. A. Dunder, R. W. van der Heijden, E. W. van der Drift, H. W. Salemink, S. Rogge, et al., "Compact Mach-Zehnder interferometer based on self-collimation of light in a silicon photonic crystal," *Optics Express*, vol. 18, pp. 6437-46, 2010.
- [33] R. Gamernyk, M. Periv., S. Malynych, "Nonlinear-optical refraction of silver nanoparticle composites," *Optica Applicata*, vol. 44, pp. 89-398, 2014.
- [34] M. Trejo-Duran, et al, "Nonlinear optical properties of Au-nanoparticles conjugated with lipoic acid in water," *Journal of the European Optical Society - Rapid publications, Europe*, vol. 9, pp. 14030(1-7), 2014.
- [35] Y. X. Zhang, and Y. H. Wang, "Nonlinear optical properties of metal nanoparticles: a review," *RSC Adv*, vol. 7(71), pp. 45129-45144, 2017.

زیر نویس ها

¹ Electromagnetically induced transparency (EIT)

² Coherent Population Oscillation (CPO)

³ Taper

⁴ Bistability

⁵ Opto- electric

⁶ Degenerate

⁷ Phase change material

⁸ Rsoft

⁹ Lumerical

¹⁰ Polarization

¹¹ Normalized

¹² Opto-fluidic

¹³ Monitors

¹⁴ Floating gates