



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷



کلید تمام‌نوری بلور فوتونی بر پایه تداخل سنج ماخ-زیندر

بهداد براهیمی^۱، محمد دانایی^{۲*}

۱. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

۲. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان.

* danaie@semnan.ac.ir

چکیده - بلورهای فوتونی غیرخطی مرتبه سوم پایه اصلی تحقق افزاره‌های کلیدزنی تمام-نوری هستند. در این مقاله با بهره‌گیری از ساختار MZI در طراحی کلید تمام-نوری، و ترکیب آن با نور آهسته، و با مدل‌سازی اثر غیرخطی کر، ساختاری ارائه داده‌ایم که قابلیت عبور شدت مشخصی از نور را داشته و تحت تاثیر اثر غیرخطی از یک میزان مشخص شدت نور به بعد آن را عبور ندهد. امکان تغییر این آستانه شدت نور با تغییر ابعاد کلید وجود داشته و طراح می‌تواند به راحتی، برحسب نیاز و مشخصات سیستم مد نظر، ابعاد و آستانه کلیدزنی کلید خود را تنظیم کند. ما در اینجا به دنبال کسب اطمینان از عملیاتی بودن ایده خود هستیم. کلید واژه- کلید تمام‌نوری، بلور فوتونی، تداخل‌سنج ماخ-زیندر.

Mach-Zehnder Interferometer based All-Optical Photonic Crystal Switch

Behdad Barahimi¹, Mohammad Danaie^{2*}

1. Faculty of ECE, Tarbiat Modares University, Tehran.

2. Faculty of ECE, Semnan University, Semnan.

* danaie@semnan.ac.ir

Abstract- Third-order nonlinear Photonic Crystals are the most prominent all-optical switching devices. In this paper by implementing a MZI, slow light structure and making use of similar Kerr effect behavior, we have proposed an all-optical switch, capable of guiding light up to a certain intensity. The switch ceases on-state as further increase of intensity. Changing the device dimensions adjusts on/ off intensity threshold, making it possible for the designers to set dimensions and switching threshold of the switch according to the system configuration and demands. Here we would get assured of the practicality of our design.

Keywords: All-Optical Switch, Photonic Crystal, Mach-Zehnder Interferometer.

۱. مقدمه

مشابه معادل الکترونیکی آن، کلیدزنی تمام-نوری می تواند امکان (یا عدم امکان) انتشار نور سیگنال تحت تحریک یک نور کنترل برقرار کند. کلیدزنی تمام-نوری بلور نوری قابلیت مدوله کردن حالت‌های انتشار نور سیگنال مبتنی بر تعامل نور و ماده را دارد. در سال ۱۹۹۴، اسکالورا و همکارانش ایده کلیدزنی تمام-نوری بلور نوری را ارائه کرد [۱]. این موضوع به‌سادگی زیر می‌تواند بیان شود: در آغاز، نور سیگنال بطور کامل توسط بلور نوری بازتاب شده و نمی‌تواند درون آن منتشر شود؛ کلیدزنی نوری در حالت "خاموش" است. تحت تحریک نور کنترل، نور سیگنال می‌تواند داخل بلور منتشر شود. در این زمان کلید نوری در حالت "روشن" است. حالت‌های انتشار نور سیگنال کاملاً تحت تاثیر ظهور نور کنترل هستند. از جمله مکانیزم‌های متفاوت به‌کاررفته برای کلیدزنی تمام-نوری بلور نوری، بلورهای نوری غیرخطی مرتبه سوم هستند که پایه اصلی تحقق افزاره‌های کلیدزنی تمام-نوری هستند. تاجیما و همکارانش در سال ۲۰۰۱ کلید تمام نوری ماخ-زیندر متقارن (SMZ^1) متفاوتی با قابلیت تمایز قطبش همراه با یک مبدل تداخل تاخیری طول موج ارائه کردند [۲]. سپس با بررسی تقویت‌کننده‌های نوری نیم‌رسانا (SOA^2) به عنوان جایگزین فاز در این افزاره‌ها پرداخته‌اند. کلیدهای پیشنهادی آن‌ها قابلیت عملکرد فوق‌سریع با توان کنترلی پایین، فارق از آرامیدگی آهسته غیرخطی بودن غیرمتجانس را دارا بود. در سال ۲۰۰۲ سولجاکیچ و همکارانش با استفاده سرعت گروه نور آهسته در ساختار ماخ-زیندر قابلیت اعمال جابجایی زیاد فاز به ازای تغییر اندک ضریب شکست در طرح پیشنهادی خود

را ارائه کردند [۳]. این افزایش حساسیت امکان کاهش سایز افزاره و همچنین میزان توان کاری مورد نیاز برای این افزاره‌ها را فراهم می‌سازد. در سال ۲۰۱۰ اسریواستاوا و همکارانش به بررسی دقیق رفتار کلیدزنی یک تداخل سنج ماخ-زیندر غیرخطی (NMZI) با استفاده از روش پرتو انتشاری پرداختند [۴] و دریافتند که ضریب انتقال NMZI با افزایش توان ورودی میان بیشینه و کمینه نوسان می‌کند. مهمترین یافته آن‌ها اصلاح توان روشن/خاموش کلید NMZI با جابجا کردن نقطه تعادل است.

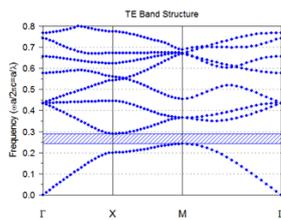
در سال ۲۰۱۴ گودپا و همکارش در بررسی رفتار کلیدزنی تداخل‌سنج ماخ-زیندر در ساختار بلور نوری مشخصات ورودی برحسب خروجی به‌ازای طول‌های متفاوت بازوی غیرخطی، ضرایب غیرخطی متفاوت بازوی غیرخطی، طول موج مختلف پرتو ورودی، ابعاد مختلف میله‌های نقص و آفست مختلف NMZI پرداخته‌اند [۵]. با توجه به ویژگی‌های بررسی شده، استفاده از ساختار MZI به سبب پهنای طول موج کاری این دسته از کلیدهای تمام نوری گزینه مناسبی برای طراحی پیش‌رو می‌تواند باشد. ما با استفاده از این ایده، بهره‌گیری از ساختار MZI در طراحی کلید تمام نوری، و ترکیب آن با نور آهسته، و با مدل‌سازی اثر غیرخطی کر به‌صورت تغییر ضریب شکست متناسب با شدت نور عبوری از هر قسمت، ساختاری ارائه خواهیم کرد که قابلیت عبور شدت مشخصی از نور را داشته و تحت تاثیر اثر غیرخطی کر از یک میزان مشخص شدت نور به بعد عبور نداشته باشد. نکته قابل توجه، امکان تغییر این آستانه شدت نور با تغییر ابعاد کلید تنظیم راحت ابعاد و آستانه کلیدزنی کلید خود برحسب نیاز و مشخصات سیستم مد نظر است.

۲. طراحی شبکه بلور فوتونی

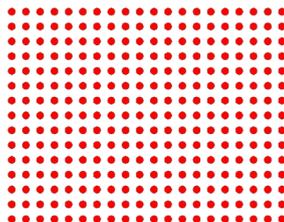
مطابق با مرور مقالات انجام شده، در هیچ یک از ساختارهای ارائه شده پیشین هرگز ساختار MZI با هردو

¹ Symmetric Mach-Zehnder

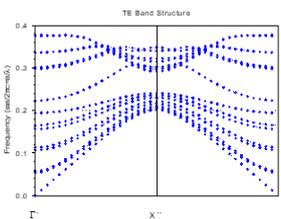
² Semiconductor Optical Amplifier



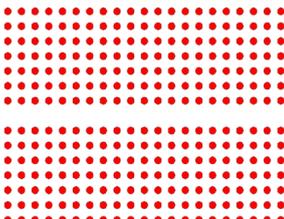
(ب) شکاف باند فوتونی مربوط به (الف)



(الف) ساختار بلور فوتونی بدون نقص



(ت) شکاف باند فوتونی مربوط به (پ)

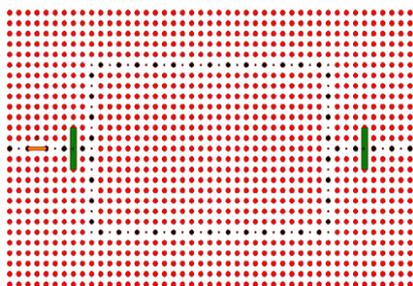


(پ) ساختار بلور فوتونی با نقص خطی

شکل ۱. الف) ساختار شبکه بلور فوتونی بدون نقص، ب) شکاف باند فوتونی ساختار (الف)، پ) ساختار شبکه بلور فوتونی با نقص خطی، ت) شکاف باند فوتونی ساختار (پ)

۳. طراحی کلید تمام-نوری با ترکیب تداخل-سنج ماخ-زیندر و نور آهسته

در شکل ۲ (الف) طرح اولیه تداخل سنج ماخ-زیندر پیاده سازی شده با استفاده از CCWهای با Λ برابر ۲ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲ (ب) ملاحظه می شود شدت نور ورودی و خروجی ساختار^۷ در این حالت که بازوها کاملاً مشابه هستند برابر است. در شکل ۲ (پ) ضریب شکست بازو بالایی را تغییر داده و به ازای δn برابر 0.03 اختلاف فاز پرتو دو بازو به π نزدیک شده و خروجی شدیداً کاهش می یابد.



(الف) ساختار MZI اولیه با دو بازو

بازوی غیرخطی طراحی نشده است. آنچه می توان به عنوان علت عدم ارائه چنین ساختاری تاکنون بیان نمود دشواری طراحی ساختاری تماماً غیرخطی از حیث ایجاد اختلاف فاز میان دو بازو و دستیابی به تداخل سازنده و مخرب برحسب شدت نور تابشی است؛ اقدامی که پیش از این با تغییر طول، تغییر ساختار، انتخاب مواد سازنده صورت گرفته است. با توجه به [۳] ساختار بلور نوری دوبعدی با شبکه مربعی بصورت میله های دی الکتریک با ثابت دی الکتریک $12/25$ در زیرلایه با ثابت دی الکتریک $2/25$ در نظر میگیریم. شعاع میله ها برابر 0.25 ثابت شبکه ساختار نیز در نظر گرفته می شود. جهت پیاده سازی نور آهسته در ساختار بلور نوری از تکنیک موجبر کوپل-شده با کاواک (CCW)^۳ استفاده می کنیم. با استفاده از روش بسط موج تخت (PWE)^۴ شکاف باند نوری (PBG)^۵ و مد عبوری ساختار بدون نقص و دارای نقص خطی را محاسبه می کنیم (شکل ۱).

پیاده سازی ساختار CCW به ازای Λ (فاصله میان دو کاواک نقطه ای متوالی) مختلف انجام شده و عدد گروه^۶ $(1/\frac{d\omega}{dk})$ به ازای Λ برابر ۲، ۳، ۴ به ترتیب برابر ۳۴، ۵۳ و ۹۵ محاسبه شده است. برای افزایش سرعت محاسبات، ادامه روند طراحی را با Λ برابر ۲ پیش می بریم.

³ Coupled Cavity Waveguide

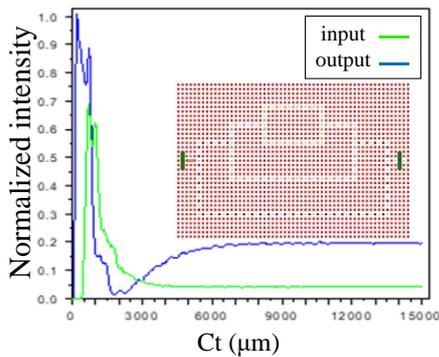
⁴ Plane Wave Expansion

⁵ Photonic Band Gap

^۶ برابر معکوس سرعت گروه v_g (مشتق فرکانس زاویه ای ω نسبت به عدد موج k)، نشان دهنده میزان کاهش سرعت نور در محیط مد نظر نسبت به سرعت نور در خلأ است.

^۷ برحسب Ct (میکرومتر)، حاصلضرب زمان در سرعت نور در خلأ

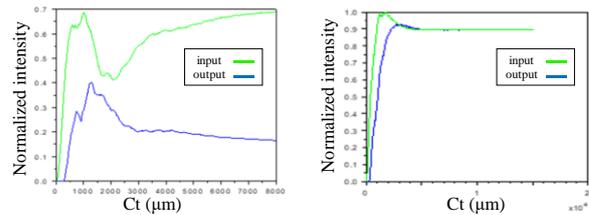
میکرومتر مربع اشغال خواهد کرد. در نتیجه می توان از این ساختار به عنوان کلید تمام نوری در ساختارهای متنوع بهره جست. همچنین با استفاده از ساختارهای CCW با Λ بزرگتر می توان به ازای شدت نور ثابت، طول بازوهای ساختار NMZI را به میزان $(v_g/C)^2$ کاهش داد.



شکل ۳. شدت ورودی/خروجی ساختار NMZI طراحی شده نهایی

مرجع ها

- [1] M. Scalora, J. P. Dowling, C. M. Bowden, and M. J. Bloemer, "Optical Limiting and Switching of Ultrashort Pulses in Nonlinear Photonic Band Gap Materials," *Physical Review Letters*, vol. 73, pp. 1368-1371, 09/05/1994.
- [2] K. Tajima, S. Nakamura, and Y. Ueno, "Ultrafast all-optical signal processing with Symmetric Mach-Zehnder type all-optical switches," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 33, pp. 875-897, July 01 2001.
- [3] M. Soljačić, S. G. Johnson, S. Fan, M. Ibanescu, E. Ippen, and J. D. Joannopoulos, "Photonic-crystal slow-light enhancement of nonlinear phase sensitivity," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 19, pp. 2052-2059, 2002/09/01 2002.
- [4] A. Srivastava, P. P. Paltani, and S. Medhekar, "Switching behaviour of a nonlinear Mach-Zehnder interferometer," *Pramana*, vol. 74, pp. 575-590, April 01 2010.
- [5] M. M. a. M. GUPTA, S., "Switching behavior of nonlinear Mach-Zehnder interferometer based on photonic crystal geometry," *PRAMANA – JOURNAL OF PHYSICS*, vol. 91, p. 14, 2014.



(پ) مقدار نرمالیزه شدت نور ورودی و خروجی بر حسب Ct (میکرومتر) با ضریب شکست متفاوت دو بازو
(ب) مقدار نرمالیزه شدت نور ورودی و خروجی بر حسب Ct (میکرومتر) در شرایط یکسان بازوهای بالا و پایین

شکل ۲. الف) ساختار اولیه تداخل سنج ماخ-زیندر با دو بازو به طول یکسان، ب) شدت ورودی-خروجی طرح اولیه با ضریب شکست یکسان بازوها، پ) شدت ورودی-خروجی طرح اولیه با ضریب شکست متفاوت دو بازو و میل شدت خروجی به صفر

حال با در نظر گرفتن کل ساختار MZI از نوع غیرخطی و در نظر داشتن این موضوع که $\delta n \propto I$ ساختار را به گونه ای طراحی می کنیم (ساختار درونی شکل ۳) که طول کلی هر دو بازوی تداخل سنج برابر بوده و در یکی با تقسیم های مکرر شدت نور بازوهای جزء کم و کم تر شده و در نتیجه آن δn کمتر شود. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می کنیم خروجی به ازای δn برابر 0.03 خروجی حدود 0.04 است. یعنی به ازای تغییر $\frac{0.03}{2} \times 100 = 1.5\%$ ی ضریب شکست، خروجی ساختار نسبت به خروجی حالتی که δn برابر صفر است، به $\frac{0.04}{0.9} \times 100 = 4.4\%$ آن رسیده است.

نتیجه گیری

در این مقاله برای نخستین بار پیاده سازی کلید تمام نوری با استفاده از تداخل سنج ماخ-زیندر کاملاً غیرخطی با استفاده از بلور نوری طراحی و نتایج شبیه سازی آن ارائه شد. آنچه در اینجا اهمیت داشت بدست آوردن قابلیت کلیدزنی بر حسب شدت نور تابشی و تاثیر آن بر ضریب شکست مواد غیرخطی سازنده ساختار است که با جاروب کردن دستی تغییرات ضریب شکست عملی بودن آن کاملاً نشان داده شد. ابعاد کلی ساختار ارائه شده برابر $46a \times 24a$ ، که با $a = 412nm$ فرض شده جهت کارایی در طول موج 1550 نانومتر، مساحتی برابر $187/4$