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 برپایه تداخل‌سنج 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 کِر، 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 می تواند به راحتی، برحسب نیاز و مشخصات سیستم مد نظر، ابعاد و آستانه کلیدزنی کلید خود را تنظیم کند. ما در اینجا به‌دنبال کسب اطمینان از عملیاتی بودن ایده خود هستیم.

کلید واژه- کلیدتمام‌نوری، بلور فوتونی، تداخل‌سنج ماخ-زیندر.

Mach-Zehnder Interferometer based All-Optical Photonic Crystal Switch

Behdad Barahimi[1], 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.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

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 می تواند داخل بلور منتشر شود. در این زمان کلید نوری در حالت "روشن" است. حالت‌های انتشار نور سیگنال کاملا 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 تقویت کننده‌های نوری نیم‌رسانا (SOA[2]) به عنوان جابجا کننده 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 می کند. 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 ویژگی- های 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، بهره گیری از ساختار MZI در طراحی کلید تمام نوری، و ترکیب آن با نور آهسته، و با مدل‌سازی اثر غیرخطی کر به‌صورت تغییر ضریب‌شکست 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 کِر 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

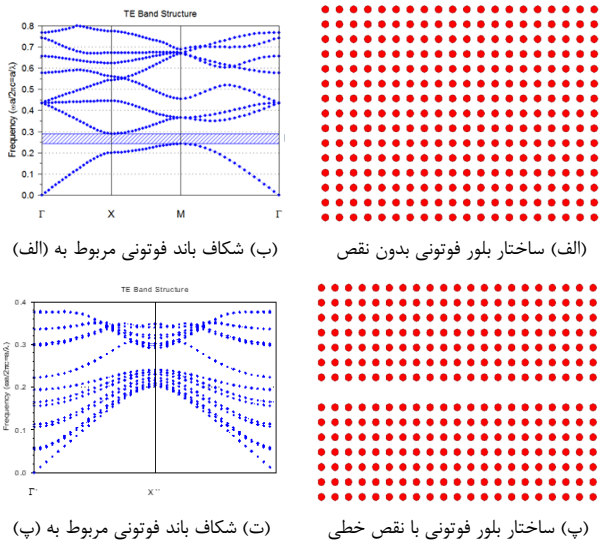
[2] Semiconductor Optical Amplifier

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

بازوی غیرخطی طراحی نشده است. آنچه می‌توان به عنوان علت عدم ارائه چنین ساختاری تاکنون بیان نمود دشواری طراحی ساختاری تماما 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 گرفته‌است. با توجه به [۳] ساختار بلور نوری دوبعدی با شبکه مربعی بصورت میله‌های دی‌الکتریک با ثابت دی الکتریک ۱۲/۲۵ در زیرلایه با ثابت دی‌الکتریک ۲/۲۵ در نظر میگیریم. شعاع میله‌ها برابر ۰/۲۵ ثابت شبکه ساختار نیز در نظر گرفته می‌شود. جهت پیاده‌سازی 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 می‌کنیم (شکل ۱).

پیاده‌سازی ساختار CCW به‌ازای Λ (فاصله میان دو کاواک نقطه‌ای متوالی) مختلف انجام شده و عدد گروه[۶] ($1/\frac{d\omega}{dk}$) به‌ازای Λ برابر ۲، ۳، و ۴ به‌ترتیب برابر ۳۴، ۵۳ و ۹۵ محاسبه شده است. برای افزایش سرعت محاسبات، ادامه روند طراحی را با Λ برابر ۲ پیش‌می‌بریم.



(الف) ساختار بلور فوتونی بدون نقص

(ب) شکاف باند فوتونی مربوط به (الف)

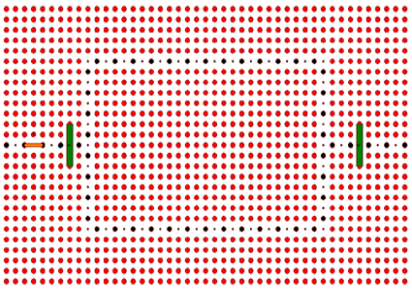
(پ) ساختار بلور فوتونی با نقص خطی

(ت) شکاف باند فوتونی مربوط به (پ)

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 تداخل‌سنج ماخ-زیندر پیاده-سازی شده با استفاده از CCWهای با Λ برابر ۲ نشان داده شده‌است. همانطور که در شکل ۲ (ب) ملاحظه می‌شود شدت نور ورودی و خروجی ساختار[۷] در این حالت که بازوها کاملا مشابه هستند برابر است. در شکل ۲(پ) ضریب شکست بازو بالایی را تغییر داده و به‌ازای δn برابر ۰/۰۳ اختلاف فاز پرتو دو بازو به π نزدیک شده و خروجی شدیدا کاهش می‌یابد.



(الف) ساختار MZI اولیه با دو بازو

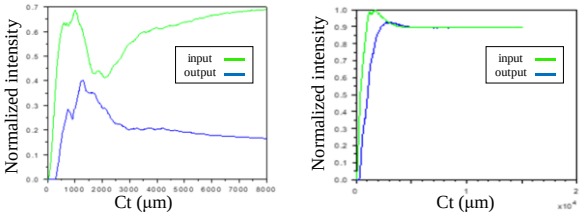
[3] Coupled Cavity Waveguide
[4] Plane Wave Expansion
[5] Photonic Band Gap

۶برابر معکوس سرعت گروه v_g(مشتق فرکانس زاویه‌ای 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

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]



(پ) مقدار نرمالیزه شدت نور ورودی و خروجی بر حسب Ct (میکرومتر) با ضریب شکست متفاوت دو بازو

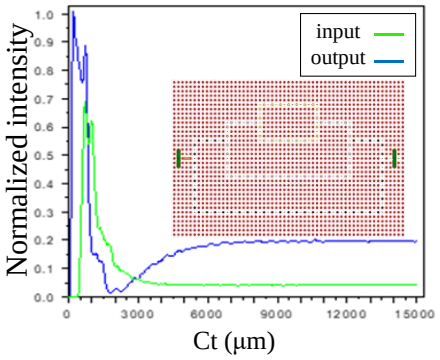
(ب) مقدار نرمالیزه شدت نور ورودی و خروجی بر حسب Ct (میکرومتر)در شرایط یکسان بازوهای بالا و پایین

شکل ۲. (الف) ساختار اولیه تداخل‌سنج 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 ضریب‌شکست متفاوت دو بازو و میل شدت خروجی به صفر

حال با درنظرگرفتن کل ساختار MZI از نوع غیرخطی و در نظرداشتن این موضوع که $\delta n \propto I$، ساختار را به‌گونه-ای طراحی می‌کنیم (ساختار درونی شکل ۳) که طول کلی هر دو بازوی تداخل‌سنج برابر بوده و در یکی با تقسیم‌های مکرر شدت نور بازوهای جزء کم و کم‌تر شده و در نتیجه آن δn کمتر شود. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌کنیم خروجی به‌ازای δn برابر ۰/۰۳ خروجی حدود ۰/۰۴ است. یعنی به‌ازای 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.

نتیجه‌گیری

در این مقاله برای نخستین بار پیاده سازی کلید تمام نوری با استفاده از تداخل‌سنج ماخ-زیندر کاملا غیرخطی با استفاده از بلور نوری طراحی و نتایج شبیه‌سازی آن ارائه شد. آنچه در اینجا اهمیت داشت بدست آوردن قابلیت کلیدزنی برحسب 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 کاملا نشان داده‌شد. ابعاد کلی ساختار ارائه شده برابر $46a \times 24a$، که با $a = 412nm$ فرض شده جهت کارایی در طول موج ۱۵۵۰نانومتر، مساحتی برابر ۱۸۷/۴ میکرومتر مربع اشغال خواهد کرد. در نتیجه می توان ازین ساختار به عنوان کلید تمام نوری در ساختارهای متنوع بهره جست. همچنین با استفاده از ساختارهای CCW با Λ بزرگتر می توان به‌ازای شدت نور ثابت، طول بازوهای ساختار NMZI را به‌میزان $(v_g/C)^2$ کاهش داد.



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

مرجع‌ها

[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.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]