بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

طراحی و شبیه سازی افزاره نوری با گذردهی نامتقارن به کمک بلورفوتونی غیرخطی

محسن زارعی محمودآبادی[۱]،محمد کاظم مروج فرشی[۱] و فخرالدین نظری [۲]

[۱]دانشگاه تربیت مدرس -دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر -گروه الکترونیک

[۲] دانشگاه تخصصی فناوری های نوین آمل، دانشکده مهندسی فناوری نوین

چکیده : روشی جدید برای طراحی و شبیه سازی یک افزاره نوری با گذردهی نامتقارن بر پایه بلور فوتونی غیرخطی از جنس سیلیکان ارائه می‌شود. یکی از روش‌های رایج برای ایجاد گذردهی نامتقارن نوری شکستن تقارن ساختار است. بدین منظور از یک موجبر بلورفوتونی، که در مسیرهای رفت و برگشت با یک کاواک جانبی به طور نامتقارن جفت شده، استفاده می‌شود. جفت شدگی نامتقارن همراه با اثر غیر خطی کر در ساختار امکان ایجاد دو طیف عبور رفت و برگشت با اختلاف db ۴۶ را میسر می‌سازد. این افزاره با استفاده از یک ساختار بلور فوتونی دو بعدی با شبکه شش ضلعی و ثابت شبکه‌ی a= ۴۴۷ nm متشکل از حفره‌های هوابه شعاع r=۱۳۰ nm دربستر سیلیکان طراحی می‌شود. قطبش موج ورودی از نوع TE فرض شده است.

کلید واژه- :بلورفوتونی، اثرغیرخطی کر، ایزولاتور نوری، طیف عبور، فانو.

Design And simulation of device with asymmetric Transmission Based on Nonlinear Photonic Crystal

M. Zarei-Mahmodabadi[1], M. K. Moravvej-Farshi[1], and F. Nazari[2]

[1]Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran 1411713116, Iran.

[2]Faculty of Engineering Modern Technologies, Amol University of Special Modern Technologies, Amol, Iran

Abstract- An optical device with asymmetric transmission based on nonlinear silicon photonic crystal is designed. A common approach for producing nonreciprocal (asymmetric) transmission is to break the structural symmetry. For this purpose we utilize a photonic crystal waveguide that is asymmetrically side coupled to a cavity in both forward and backward directions. This asymmetric coupling together with the Kerr nonlinearity can provide the nonrecieprocal Transmission Rate of 46db in forward and backward directions. The photonic crystal waveguide is created by a removal a row of air holes from a two-dimensional Si slab photonic crystal with hexagonal lattice of constant a=477 nm and air holes radii of r=130 nm. The polarization of input light is assumed to be TE.

Keywords: Photonic crystal, Kerr nonlinearity, Optical isolator, Transmission, Fano.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]

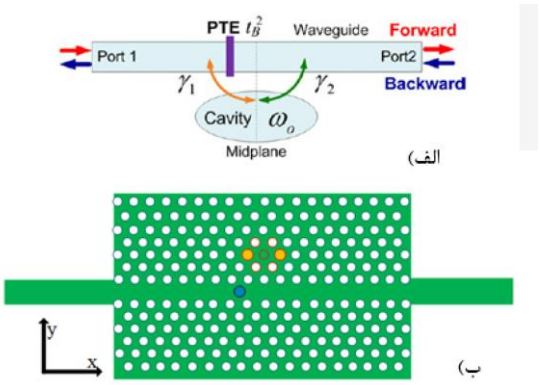
۱-مقدمه:

امروزه برای طراحی و ساخت کاواک‌ها و موجبرهای نوری به منظور تشدید و کنترل انتشار امواج نوری از طریق ایجاد نقص‌های نقطه‌ای و خطی در تیغه‌های بلور فوتونی استفاده می شود [۱]. دیودهای تمام نوری یا ایزولاتورهای نوری یکی از قطعه‌های مهم در اغلب مدارها مجتمع نوری و اتصال‌ها اپتیکی اند. درواقع نقش آن ها در مدارهای مجتمع نوری دوگان نقش دیودهای الکترونیکی در مدارهای الکترونیکی است اخیراً طراحی‌های مختلفی برای دیودهای تمام نوری ارائه شده است. بلورفوتونی غیرخطی دوبعدی شامل میکروکاواک‌ها با ساختار غیرمتقارن [۲, ۳] ، ساختارهایی برای بهره بردن از برهمکنش صوت ونور، بلورهای فوتونی مغناطیسی با تقارن پایین [۴]، استفاده از ماده‌های جاذب نامتقارن و غیرخطی به عنوان لایه جاذب[۵]، استفاده از پلاسمون‌های سطحی تنظیم پذیر و ساختارهای متقارن و غیرخطی PT [۶, ۷] از جمله این طرح‌ها هستند. هر یک از این ساختارها مزایا و معایب خاص خود را دارند. البته اکثر این ساختارها با یک چالش مهم روبرو هستند و آن عدم پایداری در ابعاد خیلی کوچک است. از طرف دیگر در بعضی از ساختارهای دیگر مشخصات سیگنال ورودی و خروجی یکسان نیست. به عنوان مثال مشخصه فرکانس در حین عبور از ساختار دست خوش تغییر می‌شود. همچنین مسئله جذب (تلفات) و بازتابش مستقیم در بعضی از این ساختارها دارای اثر بسیار مخرب روی عملکرد ساختاراست. به طوری که موجب شده است تا شدت سیگنال خروجی به شدت ضعیف شود و بی فایده باشد. در این مقاله قصد داریم دیودهای تمام نوری برپایه بلور فوتونی را مطالعه کنیم. عبوردهی نامتقارن درون ساختار فقط با تغییر سیگنال ورودی بدون هیچ دخالت دیگری بدست می‌آید. برای شبیه سازی ساختار مورد نظر از الگوریتم غیرخطی تفاضل متناهی در حوزه زمان استفاده می‌کنیم. در این طراحی پارامترهای مهم عملکرد دیودهای نوری نظیر عبوردهی بیشینه و کمینه ، اختلاف عبوردهی مستقیم و برگشت و آستانه توان بهینه می‌شود.

۲- ساختار پیشنهادی و نحوه عملکرد آن

شکل ۱(الف) شمای ساده‌ای از یک افزاره نوری با گذردهی نامتقارن را نمایش می‌دهد. این افزاره شامل یک موجبر، یک عنصر سدکننده و یک کاواک که از پهلو به موجبر کوپل شده است می‌باشد. شکل ۱(ب) نمای ازبالای این ایزولاتور را که در یک تیغه بلور فوتونی به ضخامت h = ۲۵۰ nm و با ثابت شبکه a=۴۴۷ nm و حفره‌های هوا با شعاع r=۱۳۰ nm تعبیه شده‌است نمایش می‌دهد. موجبر از یک نقص خطی به پهنای $w=a$ تشکیل شده‌است. کاواکی که از پهلو به موجبر بلور فوتونی جفت شده با تعبیه یک نقص نقطه‌ای (حذف حفره) و تغییر شعاع دو حفره مجاور آن (زرد رنگ) تشکیل شده‌است. شعاع این دو حفره و کاواک سد کننده برابر r_d= ۱۵۰ nm است. فاصله کاواک سد کننده از مرکز موجبر به سمت پورت 1 برابر با l=۶۷۰٫۵ nm است.

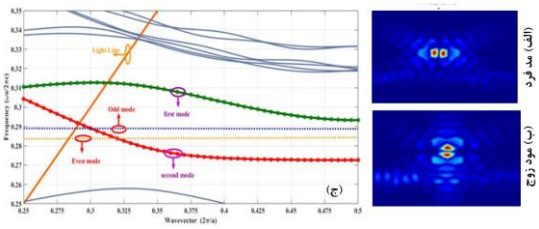
اساس عملکرد ساختار استفاده ازیک کاواک برای بالا بردن فعل و انفعالات بین نور و ماده غیرخطی به علاوه شکستن تقارن فضایی ساختار و همچنین تولید رزونانس فانو برای دستیابی به ساختار عبوردهنده یکطرفه نور است که از ویژگی¬های این ساختار مصرف توان بسیار پایین و قابلیت تنظیم پذیری طول موج است. همانطور که ذکر شد در ساختار دیود نوری جهت بهبود عملکرد غیر خطی از رزونانس فانو بهره گرفته شده است. رزونانس فانو در سیستم‌های کلاسیکی همانند سیستم‌های مکانیک کوانتومی ،از تداخل بین دو مسیر که یک مسیر شامل یک رزونانس گسسته و مسیر دیگر یک مسیر پیوسته است ظاهر می‌شود. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌کنید برای کنترل



شکل۱ (الف): شمای ساده از یک ایزولاتور نوری شامل یک موجبر و دو کاواک،(ب) نمای از بالای ایزولاتورتعبیه شده بر بستر بلور فوتونی.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]



شکل۲ (الف) مد فرد و (ب) مود زوج کاواک، (ج)ساختار نوار موجبر بلور فوتونی. خط سبز و قرمز نمایانگر مد های اول و دوم موجبر درون گاف فوتونی ساختار شکل ۱(ب) اند. خط زرد رنگ خط نوری ساختار را نشان می‌دهد که تعیین کننده‌ی طول موج حد پایین برای عدد موج است. خطوط نقطه چین آبی و زرد به ترتیب مدهای فرد و زوج کاواک را نشان می‌دهد.

مسیر پیوسته برای تولید رزونانس فانو از یک حفره در مسیر موجبر استفاده شده است که با تغییر شعاع این حفره که المان عبوردهنده جزئی نیز نامیده می‌شود می‌توان طیف موج فانو را برای بدست آوردن مشخصات مطلوب تغییر داد. چون که اساس کار ساختار در اینجا اندرکنش غیرخطی موج درون کاواک است و هرچقدر این اندرکنش در حالت بایاس رفت و برگشت با هم تفاوت بیشتری داشته باشد عملکرد افزاره نوری برای عبور نامتقارن نور در دو جهت رفت و برگشت بهینه‌تر است چون که مقدار شیفت طیف رزونانسی در دو حالت رفت و برگشت با هم اختلاف بیشتری پیدا می‌کند برای این منظور هر چقدر شعاع حفره سد کننده(R_B) افزایش یابد اختلاف بین دو نرخ واپاشی γ_2 و γ_1 بیشتر خواهد شد ولی در ضمن افزایش شعاع این حفره باعث کاهش میزان عبوردهی ساختار می‌شود. ثابت شده است که بهترین حالت طیف رزونانسی برای عملکرد ایزولاتوری در این ساختار حالتی است که شعاع سد حفره‌ای ۱۵۰nm باشد و سد حفره‌ای به اندازه یک یا دو ثابت شبکه از وسط ساختار به کناره‌ها شیفت پیدا کند.

۳- مدل‌سازی ضریب عبور

عبوردهی از ساختار ایزولاتور مورد نظر از رابطه زیر به دست می آید [۸, ۹]:

$$t(\omega)=\frac{t_B(\omega_0-\omega)\pm\sqrt{4\gamma_1\gamma_2-t_B^2(\gamma_1+\gamma_2)^2}-jt_B\gamma_v}{j(\omega_0-\omega)+\gamma_t} \quad (۱)$$

که در آن

$$t_B=\sqrt{1-r_B^2} \quad (۲)$$

ضریب عبور و r_B ضریب بازتاب میدان از حفره سد کننده،

$$\gamma_t=\gamma_1+\gamma_2+\gamma_v \quad (۳)$$

$$\gamma_v=\omega_0/2Q_v \quad (۴)$$

$$\gamma_t=\omega_0/2Q_t \quad (۵)$$

γ_1 و γ_2 ضریب تلفات مربوط به کوپلینگ موجبر و کاواک در دو مسیر رفت و برگشت، γ_v نرخ واپاشی ذاتی کاواک و γ_t نرخ واپاشی کل کاواک است.

همانطور که پیشتر نیز گفته شد اساس کارکرد این ساختار بر مبنای خاصیت غیر خطی سیلیکان با ضریب کر به عنوان بستر بلور فوتونی است. رابطه قطبیدگی در مواد را در حالت کلی میتوان به صورت زیر نوشت:

$$P=\varepsilon_0\left(\chi^{(1)}E+\chi^{(2)}E^2+\chi^{(3)}E^3+\ldots\right) \quad (۶)$$

ضریب شکست وابسته به شدت نور را با استفاده از رابطه ی (۶) می¬توان به صورت ذیل نوشت:

$$n=n_0+n_2I \quad (۷)$$

که درآنn_0 ضریب شکست خطی ماده و

$$n_2=\frac{3}{4\varepsilon_r\varepsilon_0c}\chi^{(3)} \quad (۸)$$

ضریب غیر خطی کر (برای Si n_2= ۳٫۸×۱۰^-۱۸ m^2w^{-1})،و شدت نور برابر است با:

$$I=2\varepsilon_r\varepsilon_0c\,|E(\omega)|^2 \quad (۹)$$

که در آن ε_0 و c به ترتیب ثابت دی الکتریک و سرعت نور درفضای آزاد است.

۴- نتایج شبیه سازی

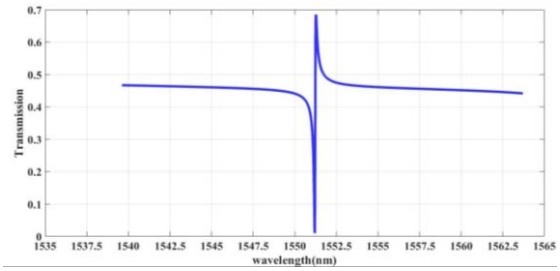
همانطور که در شکل ۲(الف) و (ب) مشاهده می‌کنید کاواک طراحی شده در ساختار دارای دو مد زوج و فرد در فرکانس‌های متفاوت بوده که ما از مد فرد کاواک به علت داشتن ضریب کیفیت بزرگتر ($Q=\omega_0/\Delta\omega$=۲۱۹۲۰) و همچنین طول موج کاری (طول موج رزونانس کاواک نزدیک به ۱/۵۵ میکرومتر است) استفاده می‌کنیم.

ضریب غیرخطی سیلیکان ۳٫۸×۱۰^-۱۸ $m^2{\cdot}w^{-1}$ است با برهم زدن تقارن فضایی ساختار (حفره سد کننده در مرکز خط

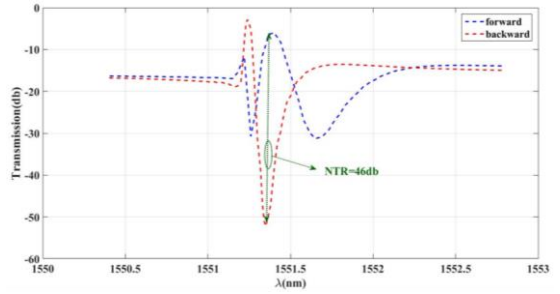
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]

تقارن کاواک نیست)که نتیجه آن کوپلینگ متفاوت موجبر و کاواک بلور تقارن فوتونی از هر دو جهت رفت و برگشت می¬باشد.وقتی که ضریب کوپلینگ موجبر و کاواک در دو طرف متفاوت باشد باعث می‌شود که توان متفاوتی در هر دو جهت در کاواک بلورفوتونی هنگام بایاس رفت و برگشت محبوس شود بنابراین اثر غیرخطی که متناسب با توان یا دامنه‌ی میدان الکتریکی است در جهت رفت و برگشت متفاوت بوده و مقدار شیفت طول موج رزونانسی با هم متفاوت است.مطلوب ما این است که این تفاوت به اندازه‌ای باشد که طول موجی که پیک منحنی عبوردهی مستقیم را دارد در منحنی عبوردهی برگشت دره‌ی منحنی باشد. در دامنه‌های کم میدان اعمالی،عبوردهی رفت و برگشت با هم یکسان است چون که ضریب شکست اطراف کاواک به علت پدیده ی غیر خطی کر تغییرات چندانی ندارد ولی هنگامی که دامنه ی میدان الکتریکی اعمالی زیاد باشد تغییر ضریب شکست حول کاواک مقدار محسوسی بوده و منحنی های عبوردهی رفت و برگشت برای وقتی که ورودی ما یک موج پیوسته با دامنه میدان الکتریکی $۱٫۱\times۱۰^{۸}$ ولت بر متر باشد ۴۶db اختلاف دارد و منحنی‌های عبوردهی رفت و برگشت مطابق شکل۳ است.



شکل۳. طیف عبور رفت و برگشت برای ساختار شکل ۱(ب)، هنگامی که دامنه ی نور ورودی کم باشد.



شکل۴. طیف عبور رفت و برگشت برای ساختار شکل ۱(ب) هنگامی که دامنه‌ی میدان الکتریکی ورودی $۱/۱\times۱۰^{۸}$ $V\cdot m^{-1}$ است.

۵-نتیجه‌گیری:

در این مقاله یک افزاره عبوردهنده‌ی نامتقارن نور مبتنی بر ساختار غیرخطی و نامتقارن بلورفوتونی معرفی و نتایج شبیه سازی آن بررسی شد مهمترین مزایای این ساختار عبارتند از: قابل مجتمع بودن به دلیل کوچکی مساحت ساختار، سادگی ساخت،پایین بودن هزینه ساخت، غیر فعال بودن افزاره و همچنین رسیدن به اختلاف نرخ گذردهی بسیارمطلوب db ۴۶. در مقایسه با کارهای قبلی انجام شده در این زمینه می‌توان گفت که ساختار ارائه شده در این مقاله از حیث داشتن اختلاف نرخ گذردهی بسیار مطلوب و همچنین تنظیم پذیری در باند C مخابرات نوری برتری دارد.

مراجع:

[1] Baba, T., *Remember the light.* Nature Photonics, 2007. **1**: p. 11-12.

[2] Zhao, N.-S., et al., *Design of highly efficient optical diodes based on the dynamics of nonlinear photonic crystal molecules.* JOSA B, 2006. **23**(11): p. 2434-2440.

[3].Nazari, F. and F. Samsami-Khodadad, *On chip optical isolator based on non-linear silicon photonic crystal by using asymmetric engineering waveguide.* Journal of Modern Optics, 2016: p. 1-6.

[4].Khanikaev, A.B. and M. Steel, *Low-symmetry magnetic photonic crystals for nonreciprocal and unidirectional devices.* Optics express, 2009. **17**(7): p. 5265-5272.

[5].Philip, R., et al., *Passive all-optical diode using asymmetric nonlinear absorption.* Applied Physics Letters, 2007. **91**(14): p. 141118.

[6].Nazari, F., et al., *Optical isolation via* Optics express, 2014. **22**(8): p. 9574-9584.

[7].Nazari, F., et al., *Asymmetric evolution of interacting solitons in parity time symmetric cells.* IEEE Journal of Quantum Electronics, 2013. **49**(11): p. 932-938.

[8].Fan, S., W. Suh, and J. Joannopoulos, *Temporal coupled-mode theory for the Fano resonance in optical resonators.* JOSA A, 2003. **20**(3): p. 569-572.

[9].Heuck, M., et al., *Improved switching using Fano resonances in photonic crystal structures.* Optics letters, 2013. **38**(14): p. 2466-2468.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]