

طراحی و شبیه‌سازی حسگر میکرو- جابه‌جایی نوین مبتنی بر بلور فوتونی با ضریب شکست منفی

کیازند فصیحی

به دلیل وضعیت شکل خط ساختار^۱ در رژیم میدان- نزدیک، عملکرد این ساختار بیشتر مشابه یک سوئیچ بسیار حساس به جابه‌جایی است تا حسگری با قابلیت اندازه‌گیری دقیق مقدار جابه‌جایی [۱] و [۲]. لوی و همکاران با استفاده از موج‌برهای بلور فوتونی، حسگری با حساسیت $1 \mu\text{m}^{-1}$ برای اندازه‌گیری جابه‌جایی ارائه نمودند [۳]. در ساختار این حسگر از سه آشکارساز نوری استفاده شده که البته موجب افزایش پیچیدگی آن می‌شود. به علاوه، ایجاد خطا در نتایج هر یک از آشکارسازهای نوری، موجب ایجاد خطایی قابل ملاحظه در نتایج نهایی حسگر می‌شود. حسگر میکرو- جابه‌جایی دیگری توسط ژو و همکاران با استفاده از کاواک تشدید مبتنی بر نقص خط در بلورهای فوتونی ارائه شده است. کاواک تشدید در بین بخش‌های ثابت و متحرک با ساختار بلور فوتونی ایجاد شده است. با انتخاب مناسب فرکانس کار، اندازه‌گیری شبه‌خطی میکرو- جابه‌جایی در محدوده ۰ تا $0.2a$ با حساسیت $1/15 \mu\text{m}^{-1}$ قابل حصول است که در آن a ثابت شبکه بلور فوتونی است [۴]. ژو و همکاران حسگر میکرو- جابه‌جایی دیگری نیز با گستره عملکردی وسیع و حساسیتی در حدود $1 \mu\text{m}^{-1}$ ، مبتنی بر تزویج‌گرهای شبه‌جهتی بلور فوتونی ارائه نمودند. گستره کاری حسگر فوق به صورت جابه‌جایی‌هایی در بازه‌های متناوب (و برابر $0.25a$) بوده و گستره کلی عملکرد حسگر با طول آن محدود می‌شود [۵]. یانگ و همکاران بر اساس تزویج یک کاواک با ضریب کیفیت بسیار بالا با موج‌بر تیغه‌ای بلور فوتونی، حسگر میکرو- جابه‌جایی دیگری با گستره عملکرد $0.2a$ و حساسیت $1 \mu\text{m}^{-1}$ ارائه نمودند [۶]. باگ و همکاران یک حسگر جابه‌جایی مبتنی بر مقدار تزویج جهتی (که وابسته به موقعیت یک دوقطبی هویگنس نسبت به یک ساختار تقاطعی بلور فوتونی شش‌راهه است) پیشنهاد دادند. حسگر فوق به ازای یک بلور فوتونی با ثابت شبکه 424 nm ، در گستره‌ای $300 \text{ nm} \pm$ از دقتی برابر 6 nm برخوردار است [۷]. در این مقاله ما حسگر میکرو- جابه‌جایی جدیدی را که در بردارنده بخش‌های ثابت و متحرک مبتنی بر بلورهای فوتونی با ضرایب شکست منفی و مثبت است، ارائه می‌نماییم. حسگر پیشنهادی از گستره کاری و حساسیتی در حدود $0.35a$ و $1/1 \mu\text{m}^{-1}$ برخوردار است. در ادامه ابتدا مبانی تئوری برای تحلیل و طراحی حسگر میکرو- جابه‌جایی پیشنهادی ارائه شده و سپس ویژگی‌های عملکردی آن با استفاده از روش عددی تفاضل- محدود حوزه- زمان (FDTD) مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار می‌گیرد.

۲- مبانی تئوری و نحوه عملکرد حسگر میکرو- جابه‌جایی پیشنهادی

در شکل ۱ شمای کلی حسگر میکرو- جابه‌جایی پیشنهادی نشان داده

چکیده: در این مقاله طراحی و شبیه‌سازی یک حسگر میکرو- جابه‌جایی جدید با بخش‌های متحرک و ثابت مبتنی بر بلورهای فوتونی ارائه شده است. نشان داده می‌شود که استفاده از بلور فوتونی با ضریب شکست منفی در بخش ثابت حسگر، با متمرکز کردن توان نوری عبوری در قسمت ورودی موج‌بر تعبیه‌شده در بخش متحرک، منجر به بهبود ویژگی‌های عملکردی حسگر می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش FDTD مؤید آن است حسگر پیشنهادی با برخورداری از حساسیت $(a^{-1}) 1/1$ (که در آن a ثابت شبکه ساختار بلور فوتونی است)، گستره جابه‌جایی مجاز $0.35a$ و ضریب برازش 0.99848 از عملکردی مطلوب در مقایسه با سایر طرح‌های پیشنهادی برای حسگر میکرو- جابه‌جایی برخوردار است.

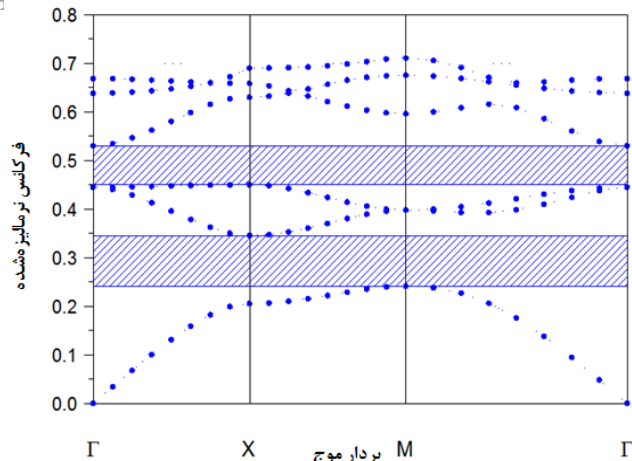
کلیدواژه: حسگر میکرو- جابه‌جایی، بلور فوتونی، شکست منفی، موج‌بر، حساسیت، ضریب برازش.

۱- مقدمه

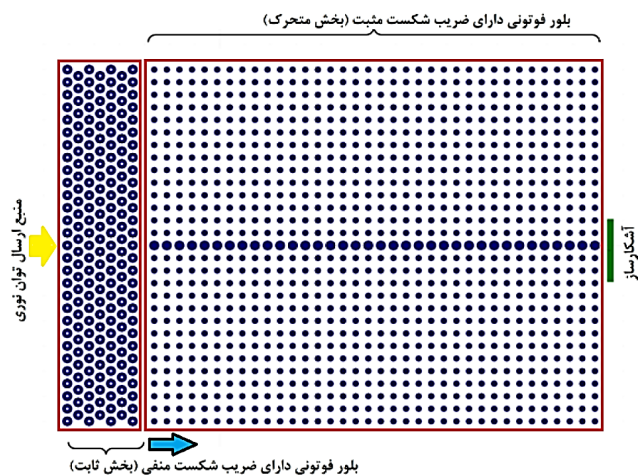
در دو دهه گذشته افزایش قابل ملاحظه‌ای در پژوهش‌های مرتبط با میکرو-حسگرها ایجاد شده است. حسگرهای میکرو- جابه‌جایی با برخورداری از ابعادی در مقیاس میکرو، از قابلیت اندازه‌گیری دقیق جابه‌جایی‌هایی در مقیاس میکرومتر برخوردار بوده و یکی از اجزای اساسی در سامانه‌های میکرو- الکترومکانیکی به شمار می‌روند. تاکنون تلاش‌های بسیار زیادی برای اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی با استفاده از فنون نوری انجام شده که از جمله آنها می‌توان به فنون مبتنی بر تغییر شدت نور، تغییر فرکانس تشدید، تداخل‌سنجی و اندازه‌گیری تزویج جهتی اشاره کرد [۱] تا [۷]. بلورهای فوتونی که ساختارهایی تناوبی از مواد الکترومغناطیسی هستند به واسطه برخورداری از شکاف باند نوری، کوچکی ابعاد، امکان مجتمع‌سازی با سایر ادوات و مدارهای مجتمع نوری و نیز گستره فرکانس کاری وسیع از قابلیت زیادی برای پیاده‌سازی حسگرهایی بسیار فشرده برخوردارند [۸] تا [۱۲]. با انتخاب دقیق پارامترهای ساختاری یک بلور فوتونی همچون مقدار ثابت شبکه، ابعاد حفره‌های هوایی و نیز نوع ماده زمینه می‌توان ویژگی‌های شکاف باند نوری را کنترل نمود. وونجو و همکاران ساختارهایی حساس به جابه‌جایی مبتنی بر تشدید هدایت‌شده در تیغه‌های از جنس بلور فوتونی ارائه نمودند. آنها نشان دادند که به ازای تغییر در مقیاس نانو در فاصله بین تیغه‌های از جنس بلور فوتونی حسگر، تغییراتی فوق‌العاده در ضرایب عبور و انعکاس ایجاد می‌شود. البته

این مقاله در تاریخ ۱۸ فروردین ماه ۱۳۹۷ دریافت و در تاریخ ۴ آذر ماه ۱۳۹۸ بازننگری شد.

کیازند فصیحی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران، (email: k.fasihi@gu.ac.ir).



شکل ۲: دیاگرام ساختار باند نوری بلور فوتونی بخش متحرک به ازای قطبش TM.



شکل ۱: شمای کلی حسگر میکرو-جابه‌جایی پیشنهادی.

نیمه‌هادی در ماده زمینه، می‌توان آن را از تغییر ضریب شکست میله‌های نیمه‌هادی، تغییر شعاع آنها و حتی برداشتن کامل یک ردیف کامل از میله‌ها ایجاد نمود [۸]. در تحقیق انجام‌شده از بلور فوتونی میله‌ای برای طراحی حسگر میکرو-جابه‌جایی پیشنهادی استفاده شده است. در کاربردهای حسگری، ساختارهای بلور فوتونی میله‌ای از مزایایی همچون برهم‌کنش بیشتر نور با ماده و نیز امکان نفوذ مناسب‌تر مایعات، در قیاس با ساختارهای بلور فوتونی حفره‌ای برخوردارند [۲۰] تا [۲۲]. از این رو پژوهش‌های زیادی برای توسعه فناوری‌های ساخت بلورهای فوتونی میله‌ای در حال انجام است. عمده فناوری‌های ارائه‌شده مبتنی بر لیتوگرافی باریکه الکترونی^۱ و نیز لیتوگرافی چاپ در مقیاس نانو^۲ هستند. به عنوان نمونه مراحل ساخت بلورهای فوتونی میله‌ای با مقاطع دلخواه برای میله‌های نیمه‌هادی (که برای بلورهای فوتونی نوع حفره‌ای نیز قابل استفاده است) بر روی ویفرهای سیلیکون بر روی عایق نانو (SOI)^۳ عبارت است از [۲۳] تا [۲۸]:

- ۱) اکسایش گرمایی به منظور ساخت لایه اکسید (SiO_2). لایه فوق به هنگام انتقال الگوه‌ها بر روی Si توسط فرایند زدایش یونی واکنش‌پذیر^۴ (RIE)، نقش ماسک سخت را ایفا می‌نماید.
- ۲) استفاده از لیتوگرافی باریکه الکترونی به منظور انتقال الگوه‌ها به ماده مقاوم به پرتو بسیار حساس (به عنوان مثال 520-ZEP).
- ۳) زدایش ماسک سخت توسط فرایند زدایش یونی واکنش‌پذیر (به وسیله پلاسمای CHF_3).
- ۴) فرایند زدایش پلاسمای تزویجی القایی^۵ که در آن SiO_2 رشد یافته به شیوه گرمایی نقش ماسک سخت را دارد و ایجاد میله‌های نیمه‌هادی.

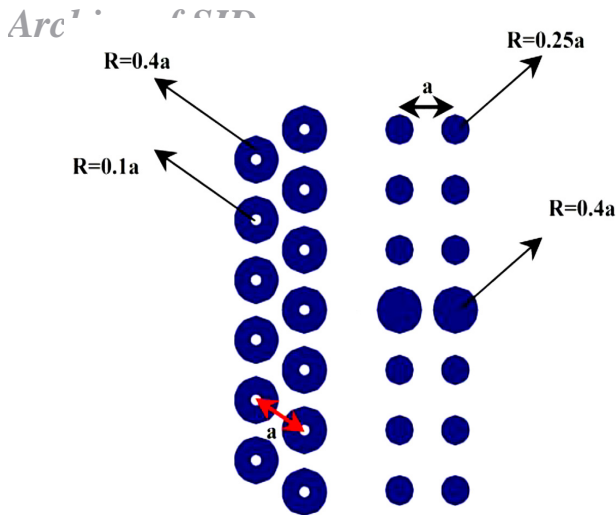
در ادامه جزئیات طراحی و نیز عملکرد حسگر میکرو-جابه‌جایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌طور که پیش از این اشاره شد حسگر پیشنهادی از ترکیب دو ساختار بلور فوتونی متفاوت ایجاد شده است. بخش متحرک با ضریب شکست مثبت که در بردارنده یک کانال موج‌بری است و بخش ثابت با ضریب شکست منفی. بخش متحرک حسگر از بلوری فوتونی با ساختار چهاروجهی، متشکل از میله‌های

شده است. مقدار توان اندازه‌گیری شده بر روی آشکارساز، حاصل از عبور امواج نوری منبع ارسال، به فاصله بین بخش‌های ثابت و متحرک حسگر وابسته است. نسبت تغییرات توان خروجی نرمالیزه‌شده به جابه‌جایی بخش متحرک معرف حساسیت حسگر است. گستره جابه‌جایی که به ازای آن شکل تغییرات توان اندازه‌گیری‌شده خروجی خطی است، معرف دامنه عملکرد حسگر است. به منظور تحقق یک حسگر میکرو-جابه‌جایی با حساسیت و گستره جابه‌جایی مجاز وسیع (دامنه عملکردی)، نیاز است تا امواج الکترومغناطیسی عبوری از بخش ثابت به بخش متحرک حسگر، از محدودشدگی مناسبی برخوردار باشند. استفاده از ساختار بلور فوتونی با ضریب شکست منفی در بخش ثابت حسگر باعث می‌شود تا امواج عبوری از آن، ابتدا در ورودی بخش متحرک (و در داخل موج‌بر تعبیه شده) متمرکز شده و سپس به سمت آشکارساز هدایت شوند. در یک حسگر معمولی (فاقد بخش دارای ضریب شکست منفی)، امواج عبوری به سمت بخش متحرک به شدت دچار کاهش دامنه شده و منجر به تضعیف ویژگی‌های عملکردی حسگر می‌شوند. همچنین یکی دیگر از مشکلات تزویج امواج نوری از بخش ثابت به بخش متحرک حسگر، دشواری تزویج امواج نوری با ماده تشکیل‌دهنده کانال (که از ضریب شکست پایینی برخوردار می‌باشد) است، زیرا نور همواره تمایل دارد تا انرژی خود را در مواد با ضریب شکست بالاتر توزیع نماید [۸]. استفاده از خاصیت لنزگونه حاصل از وجود ضریب شکست منفی در بخش ثابت و در نتیجه تمرکز امواج عبوری در داخل کانال، منجر به رفع مشکل فوق می‌شود. قابل ذکر است که در دهه گذشته استفاده از مواد دارای ضریب شکست منفی مبتنی بر بلورهای فوتونی، بسیار مورد توجه بوده است [۱۳] تا [۱۸]. بلورهای فوتونی به ازای ابعاد خاص ساختاری و به ازای گستره فرکانسی خاصی دارای رفتاری به مانند محیط‌های با ضریب شکست منفی هستند. در مواد دارای ضریب شکست منفی، ضریب گذردهی و نفوذپذیری هر دو منفی هستند [۱۹].

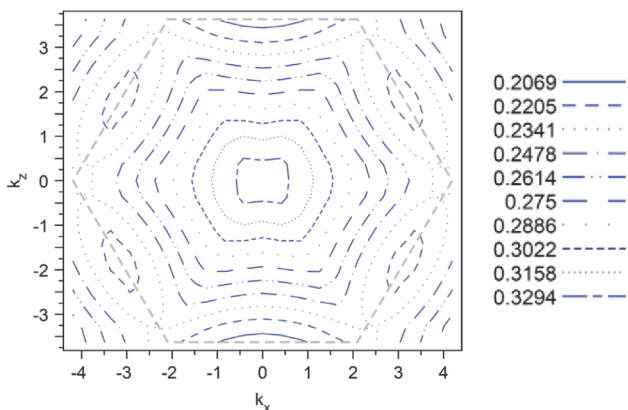
۳- طراحی و شبیه‌سازی

با ایجاد یک نقص خطی در ساختار بلور فوتونی، می‌توان یک موج‌بر ایجاد کرد که در آن نور به یک یا تعدادی از حالت‌های نقص موج‌بری محدود می‌شود. بسته به ویژگی‌های ساختار بلور فوتونی، این حالت‌ها یا مودهای نقص، تنها در یک گستره فرکانسی مشخص وجود خواهند داشت. در حالت کلی یک نقص خطی می‌تواند به روش‌های مختلفی ایجاد شود، به عنوان مثال در ساختار بلور فوتونی متشکل از میله‌های

1. Electron Beam Lithography
2. Nano Imprint Lithography
3. Silicon-on-Insulator
4. Reactive-Ion Etching
5. Inductively Coupled Plasma (ICP) Etching Process



شکل ۴: ساختار و ابعاد بلورهای فوتونی مورد استفاده در حسگر پیشنهادی.

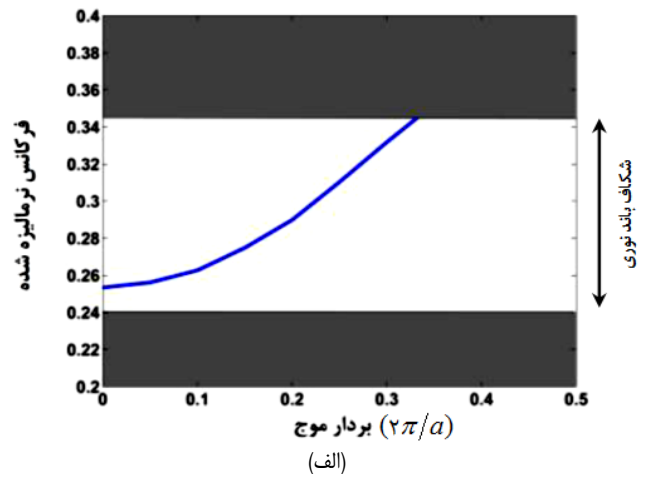


شکل ۵: منحنی کانتورهای فرکانسی به ازای قطبش TM در گستره فرکانسی نظیر باند دوم بلور فوتونی بخش ثابت حسگر.

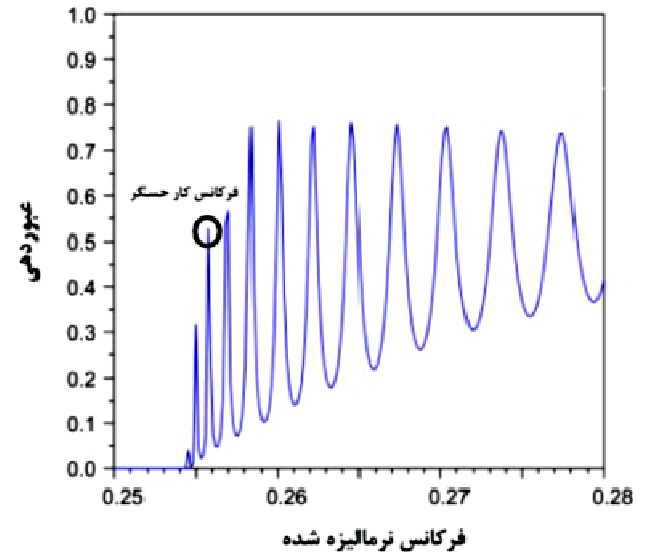
حاصل از شبیه‌سازی عددی ساختار نهایی)، می‌توان مقدار جابه‌جایی میکرومتری را محاسبه نمود. بخش ثابت حسگر مبتنی بر بلور فوتونی با ساختار مثلثی بوده و از استوانه‌هایی با مقطع حلقه‌ای در زمینه هوا ایجاد شده است. ضریب شکست ماده به کار گرفته شده در استوانه‌ها ۳/۵ و شعاع داخلی و خارجی مقطع حلقه‌ای به ترتیب $0.1a$ و $0.4a$ است. ساختار و ابعاد مورد استفاده در بلورهای فوتونی بخش ثابت و متحرک حسگر در شکل ۴ نشان داده شده است.

می‌توان نشان داد که که بلور فوتونی بخش ثابت حسگر پیشنهادی به ازای امواج با قطبش TM و در گستره فرکانسی $(0.2334 \pi c/a)$ تا $(0.3332 \pi c/a)$ دارای ضریب شکست منفی است. علت این امر با بررسی منحنی‌های کانتورهای فرکانسی مربوط به باند شماره دوم به ازای قطبش TM (شکل ۵) که اندازه منحنی آنها با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد قابل بررسی است [۲۹]. منحنی طیف عبوری بلور فوتونی بخش ثابت حسگر و نیز منحنی توزیع میدان مؤلفه E_y به ازای فرکانس کار $(0.25577 \pi c/a)$ به ترتیب در شکل ۶-الف و ۶-ب نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بخش ثابت حسگر از عبوردهی قابل قبولی در فرکانس کار، برخوردار است و در ضمن در فرکانس کار دارای عملکردی نلنزگونه است که حاصل وجود ضریب شکست منفی است.

پیکره‌بندی مورد استفاده برای شبیه‌سازی حسگر میکرو-جابه‌جایی و نتایج حاصل در شکل ۷-الف و ۷-ب نشان داده شده است. برای اتصال منبع و آشکارساز به بلور فوتونی می‌توان از ساختارهای بلور فوتونی



(الف)



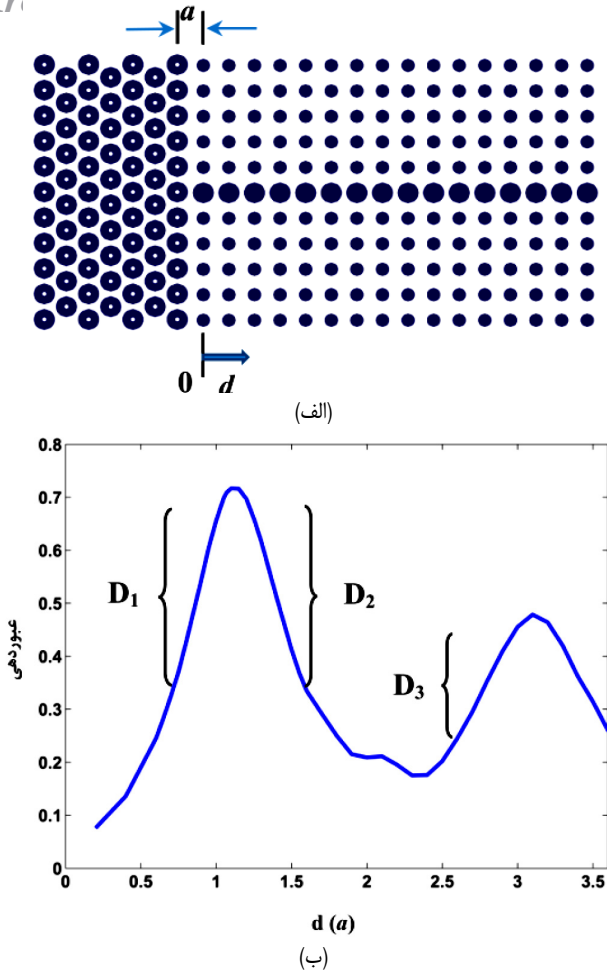
(ب)

شکل ۳: (الف) شکاف باند بلور فوتونی بخش متحرک به ازای مود TM و منحنی مود نقص کانال موج‌بری و (ب) منحنی طیف عبوری بخش متحرک حسگر پیشنهادی.

نیمه‌هادی با شعاع $0.25a$ و ضریب شکست ۳/۶، با ماده زمینه هوا ایجاد شده است. با توجه به شکل ۲ این ساختار از انتشار امواج نوری با قطبیدگی TM در گستره $(0.2422 \pi c/a)$ تا $(0.3336 \pi c/a)$ جلوگیری می‌کند (که در آن c معرف سرعت نور است).

کانال موج‌بری با تغییر شعاع و ضریب شکست میله‌های ردیف مرکزی (شعاع $0.4a$ و ضریب شکست ۱/۳۴۵) ایجاد شده است. انتخاب مقادیر فوق حاصل از انجام شبیه‌سازی‌های مختلف برای بهینه‌سازی پارامترهای ساختار و رسیدن به عملکردی مطلوب برای حسگر پیشنهادی است. در شکل ۳-الف منحنی مود نقص کانال موج‌بری قابل مشاهده است. همچنین منحنی طیف عبوری بخش متحرک حسگر نیز در شکل ۳-ب نشان داده شده است. از مقایسه شکل‌های ۳-الف و ۳-ب مشهود است فرکانس مربوط به لبه پایین منحنی مود نقص (نظیر مود هدایت‌شده داخل موج‌بر) منطبق بر فرکانس کمینه طیف عبوری (با مقدار عبور غیر صفر) است.

همان‌طور که در شکل ۳-ب مشاهده می‌شود در فرکانس $(0.25577 \pi c/a)$ یک قله تشدید وجود دارد که فرکانس کار حسگر پیشنهادی است. طیف عبوری حسگر در فرکانس کار، ضمن برخورداری از مقدار عبوردهی مناسب دارای تغییراتی قابل ملاحظه در مقدار دامنه عبوری به ازای جابه‌جایی بخش متحرک است. در واقع با اندازه‌گیری مقدار عبوردهی حسگر در فرکانس فوق و استفاده از جدول مراجعه



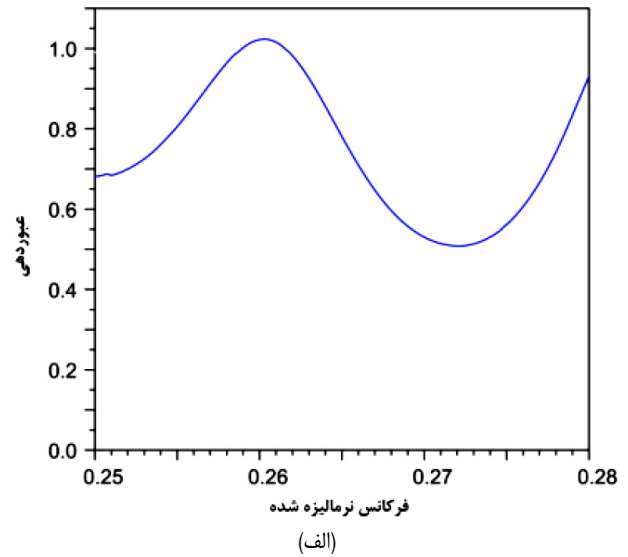
شکل ۷: (الف) پیکره‌بندی اجزای حسگر میکرو-جابه‌جایی برای به دست آوردن منحنی طیف عبوری و (ب) نواحی عملکردی حسگر پیشنهادی مشخص شده بر روی منحنی طیف عبوری.

جدول ۲: ویژگی‌های عملکردی حسگرهای مختلف میکرو-جابه‌جایی.

حساسیت (a^{-1})	گستره جابه‌جایی نرمالیزه‌شده: $d(a)$	حسگر میکرو-جابه‌جایی
۱	۰٫۲	حسگر [۳]
۱٫۱۵	۰٫۲	حسگر [۴]
۱	۰٫۲۵	حسگر [۵]
۱	۰٫۲	حسگر [۶]
۱٫۴۵	$\pm ۰٫۶۷$	حسگر [۷]
۱٫۱	۰٫۳۵	حسگر پیشنهادی به ازای گستره عملکرد D_1

گستره‌هایی قابل قبول نیز هستند، منحنی عبوردهی بر حسب مقدار جابه‌جایی، خطی است. در جدول ۱ گستره‌های جابه‌جایی مجاز و نیز مقادیر حساسیت نظیر که از رابطه $\Delta T_{norm} / \Delta d$ (شیب منحنی‌های عبوردهی بر حسب جابه‌جایی) قابل حصول است، نشان داده شده است. به منظور بیان میزان وابستگی خطی بین عبوردهی (در فرکانس کار) و مقدار جابه‌جایی، از فاکتور ضریب برازش^۳ استفاده می‌نماییم. مقدار این فاکتور برای هر یک از سه ناحیه کار در جدول ۱ نشان داده شده است. حسگر پیشنهادی از میان نواحی عملکرد مشخص شده، در ناحیه عملکرد D_1 ، ویژگی‌های مطلوب‌تری برخوردار است.

3. Regression Coefficient



شکل ۸: (الف) منحنی طیف عبوری بلور فوتونی بخش ثابت حسگر و (ب) منحنی توزیع توان مؤلفه میدان E_y به ازای فرکانس کار.

جدول ۱: گستره‌های عملکردی حسگر میکرو-جابه‌جایی و مشخصات آنها.

ناحیه عملکرد	گستره جابه‌جایی نرمالیزه‌شده $d(a)$	حساسیت ضریب برازش (a^{-1})	عمیقاً زوده‌شده و عریض ^۲ که به شکل یکپارچه با ساختار بوده و طی فرایند لیتوگرافی ساخته می‌شوند استفاده نمود [۲۵].
D_1	۱٫۰۵ - ۰٫۷	۱٫۱	۰٫۹۹۸۴۸
D_2	۱٫۶ - ۱٫۲۵	۱٫۰	۰٫۹۹۷۶۹
D_3	۳٫۰ - ۲٫۶	۰٫۵۳	۰٫۹۹۸۴۶

تدریجاً باریک‌شونده^۱ [۲۳] و [۲۴] و یا از شیارهای عمیقاً زوده‌شده و عریض^۲ که به شکل یکپارچه با ساختار بوده و طی فرایند لیتوگرافی ساخته می‌شوند استفاده نمود [۲۵]. مقدار فاصله پیش‌فرض (اولیه) بین بخش‌های ثابت و متحرک برابر a و پارامتر $d(a)$ نیز معرف مقدار جابه‌جایی میکرومتری مورد سنجش است. جهت جابه‌جایی از موقعیت پیش‌فرض ($d=0$) به سمت راست (افزایش فاصله بین بخش‌های ثابت و متحرک) است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در نواحی کار مشخص شده که دارای

1. Photonic Crystal (PC) Taper
2. Grooves

Archiving of SID

- [12] R. Paghousi and K. Fasihi, "High-contrast controllable switching based on polystyrene nonlinear cavities in 2D hole-type photonic crystals," *Opt. Commun.*, vol. 415, no. 15, pp. 101-106, Jan. 2018.
- [13] W. Aroua, S. Haxha, and F. Abdelmalek, "Nano-optic label-free biosensors based on photonic crystal platform with negative refraction," *Opt. Commun.*, vol. 285, no. 7, pp. 1970-1975, Apr. 2012.
- [14] J. Derbali, F. Abdelmalek, S. S. B. Obayya, H. Bouchriha, and R. Letizia, "Design of a compact photonic crystal sensor," *Opt. Quant. Electron.*, vol. 42, no. 8, pp. 463-472, Oct. 2011.
- [15] F. Ouerghi, F. Abdelmalek, S. Haxha, R. Abid, H. Mejatty, and I. Dayoub, "Nanophotonic sensor based on photonic crystal structure using negative refraction for effective light coupling," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 27, no. 15, pp. 3269-3274, May 2009.
- [16] J. Derbali, F. Abdelmalek, and H. Bouchriha, "A novel design of a photonic crystal sensor with improved sensitivity," *Optik.*, vol. 124, no. 19, pp. 3936-3939, 2013.
- [17] W. Belhadj, D. Gama, F. Abdelmalek, and H. Bouchriha, "Design of photonic crystal superlens with improved image resolution," *Opt. Quant. Electron.*, vol. 37, no. 37, pp. 575-586, May 2005.
- [18] F. Abdelmalek, "Design of a novel left-handed photonic crystal sensor operating in aqueous environment," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 23, no. 3, pp. 188-190, Feb. 2011.
- [19] V. G. Veselago, "The electrodynamic of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ," *Sov. Phys.*, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, Jan. 1968.
- [20] D. Dovzhenko, V. Terekhin, K. Vokhminev, A. Sukhanova, and I. Nabiev, "Improvement of antigen detection efficiency with the use of two-dimensional photonic crystal as a substrate," in *IOP Conf. Series: J. of Physics: Conf.*, Series 784, 4 pp., 2017.
- [21] A. Saynatjoki, M. Mulo, K. Vynck, D. Cassagne, J. Ahopelto, and H. Lipsanen, "Properties, applications and fabrication of photonic crystals with ring-shaped holes in silicon-on-insulator," *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, vol. 6, no. 1, pp. 42-46, Apr. 2008.
- [22] K. Satoh and Y. Tsuji, "A study on photonic crystal slab waveguide with absolute photonic band gap," *AIMS Materials Science*, vol. 5, no. 1, pp. 116-126, Feb. 2018.
- [23] C. Y. Liu, "Fabrication and optical characteristics of silicon-based two-dimensional photonic crystal Mach-Zehnder interferometers," *Physica E*, vol. 40, no. 8, pp. 2800-2804, Jun. 2008.
- [24] C. Y. Liu, "Fabrication and optical characteristics of silicon-based two-dimensional wavelength division multiplexing splitter with photonic crystal directional waveguide couplers," *Physics Letters A*, vol. 375, no. 28, pp. 2754-2758, Jul. 2011.
- [25] S. H. G. Teo, A. Q. Liu, M. B. Yu, and J. Singh, "Fabrication and demonstration of square lattice two-dimensional rod-type photonic bandgap crystal optical intersections," *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, vol. 4, no. 2, pp. 103-115, May 2006.
- [26] O. E. Orsel, M. Erdil, C. Yanik, and S. Kocaman, "Tuning of 2D rod-type photonic crystal cavity for optical modulation and impact sensing," in *Proc. of SPIE. 10931*, p. 109310E, 2019.
- [27] H. Li et al., "Millimeter-scale and large-angle self-collimation in a photonic crystal composed of silicon nanorods," *IEEE Photonics J.*, vol. 5, no. 2, p. 2201306, Apr. 2013.
- [28] C. Kraeh, A. Popsecu, M. Schieber, H. Hedler, T. Bieniek, G. Wielgoszewski, M. Moczala, and J. Finley, "Fabrication of high aspect ratio microtube arrays for 2D photonic crystals," *Materials Research Express*, vol. 1, p. 026201, 2014.
- [29] N. Malmir and K. Fasihi, "A highly-sensitive label-free biosensor based on two dimensional photonic crystals with negative refraction," *J. Mod. Opt.*, vol. 64, no. 20, pp. 2195-2200, Jan. 2017.

کیازند فسیحی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک سال ۱۳۷۸ از دانشگاه رازی کرمانشاه و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق- الکترونیک به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۸ از دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رسانده‌است و هم‌اکنون دانشیار دانشکده فنی و مهندسی گرگان- دانشگاه گلستان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: فوتونیک، مدارهای مجتمع نوری (بلورهای فوتونی، پلاسمونیک و گرافین)، و اپتوالکترونیک.

در جدول ۲ مشخصه‌های حسگرهای میکرو- جابه‌جایی پیشین که در مقدمه به اختصار تشریح شدند، با مشخصه‌های حسگر پیشنهادی مقایسه شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، این حسگر ضمن برخورداری از حساسیت مناسب از گستره عملکرد مناسبی در مقایسه با سایر حسگرهای میکرو- جابه‌جایی ارائه‌شده برخوردار است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی و شبیه‌سازی یک حسگر میکرو- جابه‌جایی جدید مبتنی بر بلورهای فوتونی با مشخصات مطلوب ارائه گردید. بخش ثابت حسگر پیشنهادی از بلور فوتونی با ضریب شکست منفی و بخش متحرک آن از بلور فوتونی با ضریب شکست مثبت تشکیل شده است. استفاده از بلور فوتونی با ضریب شکست منفی باعث تمرکز توان تابشی در کانال موج‌بری واقع در بخش متحرک شده و در نتیجه موجب بهبود ویژگی‌های عملکردی حسگر می‌شود. مقادیر حاصل از شبیه‌سازی عددی مؤید وجود سه ناحیه کار با مشخصه وابستگی خطی بین مقدار عبوردهی و مقدار جابه‌جایی است. در مناسب‌ترین ناحیه کار، حسگر پیشنهادی از حساسیت (a^{-1}) ۱/۱، گستره جابه‌جایی مجاز نرمالیزه‌شده $0.35a$ و ضریب برازش 0.99848 برخوردار بوده که مؤید عملکرد مطلوب این حسگر در مقایسه با حسگرهای پیشین است.

مراجع

- [1] W. Suh, M. F. Yanik, O. Solgaard, and S. Fan, "Displacement-sensitive photonic crystal structures based on guided resonance in photonic crystal slabs," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 82, no. 13, pp. 1999-2001, Feb. 2003.
- [2] W. Suh, O. Solgaard, and S. Fan, "Displacement sensing using evanescent tunneling between guided resonances in photonic crystal slabs," *J. Appl. Phys.*, vol. 98, no. 3, pp. 033102-033104, Jun. 2005.
- [3] O. Levy, B. Z. Steinberg, M. Nathan, and A. Boag, "Ultrasensitive displacement sensing using photonic crystal waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 10, pp. 104102-104104, Jan. 2005.
- [4] Z. Xu, L. Cao, C. Gu, Q. He, and G. Jin, "Micro-displacement sensor based on line-defect resonant cavity in photonic crystal," *Opt. Express*, vol. 14, no. 1, pp. 298-305, 2006.
- [5] Z. Xu, L. Cao, P. Su, Q. He, G. Jin, and G. Gu, "Micro-displacement sensor with large dynamic range based on photonic crystal co-directional coupler," *IEEE J. Quantum. Electron.*, vol. 43, no. 2, pp. 182-187, Feb. 2007.
- [6] D. Yang, H. Tian, and Y. Ji, "Micro-displacement sensor based on high-Q nanocavity in slot photonic crystal," *Optical Engineering*, vol. 50, no. 5, pp. 544021-544026, May 2011.
- [7] A. Bag, M. Neugebauer, U. Mick, S. Christiansen, S. A. Schulz, and P. Banzer, *Towards Fully Integrated Photonic Displacement Sensors*, arXiv: 1909.04478v1, 2019.
- [8] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, and R. D. Meade, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, 2nd Edition, Princeton Univ. Press, 2008.
- [9] K. Fasihi and S. Mohammadnejad, "Orthogonal hybrid waveguides: an approach to low crosstalk and wideband photonic crystal intersections design," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 27, no. 6, pp. 799-805, Mar. 2009.
- [10] K. Fasihi and S. Mohammadnejad, "Highly efficient channel-drop filter with a coupled cavity-based wavelength-selective reflection feedback," *Opt. Express*, vol. 173, no. 11, pp. 8983-8997, 2009.
- [11] K. Fasihi, "High-contrast all-optical controllable switching and routing in nonlinear photonic crystals," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 18, p. 3126-3131, Sept. 2014.