

طراحی حسگر بلور فوتونی دو کاناله برای تشخیص مواد منفجره

سمیه علیزاده^۱، سمانه حامدی^{۲*}، احسان زارعیان جهرمی^۳

۱، دانشجوی کارشناسی ارشد-دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شیراز - فارس- ایران

alizadeh.somaye@yahoo.com

۲ - استادیار دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شیراز - فارس- ایران

hamedi@sutech.ac.ir

۳- استادیار دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شیراز - فارس- ایران

zareian@sutech.ac.ir

چکیده: در سال‌های اخیر با توجه به افزایش گسترده استفاده از مواد منفجره بوسیله سازمان‌های تروریستی، شناسایی مواد منفجره اهمیت زیادی دارد. حسگرهای نوری روش غیرمخرب و با حساسیت بالا برای شناسایی مواد منفجره هستند. در این مقاله، یک حسگر بلور فوتونی با استفاده از دو موجبر فرعی و نانوحفره‌ها در یک شبکه شش ضلعی از میله‌های سیلیکونی در بستر هوا پیشنهاد داده شده است. در نانوحفره‌ها ماده ارگانیکی با ضریب شکست ۱/۵۹ پر شده است. این حسگر بر پایه بلور فوتونی دوبعدی می‌تواند به طور همزمان دو ماده منفجره مختلف، RDX و HMX را تشخیص دهد. مساحت این ساختار شش ضلعی متقارن $19 \times 17 \mu\text{m}^2$ می‌باشد. برای شبیه‌سازی از روش FDTD با بسط موج صفحه‌ای استفاده شده و برای تجزیه و تحلیل حسگر، نمودار طیف انتقال رسم شده است. برای ساختار ارائه شده به ازای ورود مواد منفجره، بیشینه دامنه طیف انتقال دو کانال در طول موج ۱۵۹۰ نانومتر به دلیل تفاوت در جذب نور نسبت به قبل افزایش یافته است. همچنین به علت تفاوت ضریب شکست دو نانوحفره ناشی از دو ماده منفجره، اختلاف ۰/۰۳ در دامنه بیشینه نمودار انتقال در دو کانال رخ داده است و این مقدار تغییر دامنه ویژگی بسیار مفیدی برای کاربردهای سنجش و تشخیص همزمان دو ماده می‌باشد. پارامتر کیفیت (Q factor) به دست آمده برای حسگر طراحی شده ۱۲۲/۲۸ است.

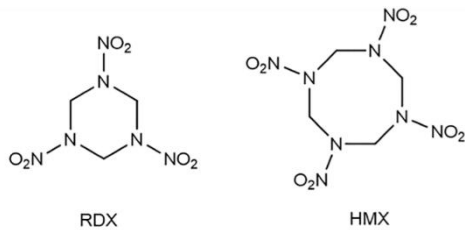
واژه‌های کلیدی: ماده منفجره، بلور فوتونی، FDTD، حسگر چندکاناله، حسگر

تاریخ ارسال مقاله: ۹۹/۰۶/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۸/۱۵

نام نویسنده مسئول: سمانه حامدی

۱- مقدمه



شکل (۱): ساختار شیمیایی مواد RDX و HMX [۸].

بسیاری از مواد منفجره پرکاربرد، ترکیبات آلی هستند که اخیراً تروریسم مبتنی بر این نوع مواد منفجره به دلیل سهولت ساخت، به شدت در حال گسترش است. در بین مواد منفجره توسعه یافته جدید مواد منفجره جامدی مانند پلاستیک هستند که نرم و انعطاف پذیر می باشند که در آنها از ترکیب مواد مختلف استفاده می شود که در برخی RDX به مقدار ۹۰٪ مقدار یا HMX استفاده شده است [۸]. بخار RDX منجر به تشنج، سرگیجه، استفراغ و قطع گردش خون و یا حتی مرگ می شود. یا بخار ناشی از HMX با چشم قابل رویت نیست. امروزه روشهای گوناگونی برای شناسایی مواد منفجره بخصوص TNT وجود دارد معمولترین این روشها، روشهای الکتروشیمیایی، فوتولومینانس (PL)، طیفسنجی رامان و طیفسنجی تحرک یونی است [۹-۱۵]. روشهای کروماتوگرافی گازی-طیفسنجی جرمی G C- MS [۱۶] و LC-MS [۱۷]، به طور دقیق می توانند مواد منفجره را تشخیص دهند، اما این روشها نیاز به تجهیزات گسترده و و عظیم آزمایشگاهی، گران قیمت و کارایی حرفه ای دارند. همچنین اغلب آنها سرعت پاسخ بسیار پایین در حدود ۳۰ دقیقه دارند. حسگرهای زیستی [۱۸] و حسگرهای فلورسنت [۱۹-۲۱] نیز برای تشخیص مواد منفجره با حساسیت بالا مورد استفاده قرار می گیرند. با توجه به اینکه بسیاری از این دستگاهها، بسیار حجیم، گران و دارای سرعت پاسخ پایین هستند و به دلیل همین محدودیتها، به ندرت از چنین سیستمهایی در محلهای استراتژیکی مانند فرودگاهها و ساختمانهای دولتی استفاده می شود. وقتی بخواهیم به غیر از فرودگاهها از چنین دستگاههایی در مبادی ورودی اماکن عمومی، شبکه حمل و نقل و شبکه های جاده ای و زیرساختها و در محلهای پرازدحام استفاده کنیم به کارگیری حسگرهای کوچک و قابل حمل در مقابله با تروریسم مبتنی بر مواد منفجره اهمیت می یابد. بیشتر مواد منفجره بخار بسیار کمی را آزاد می کند و در نتیجه کشف آنها بوسیله روشهای شیمیایی معمول، غیرممکن است. بنابراین شناسایی مواد منفجره به دلایل مختلفی مانند پایین بودن فشار بخار بسیاری از آنها و ارائه پی-درپی مواد منفجره جدید، کار حساس، دقیق و چالش برانگیزی است. مهمترین ویژگی مورد نیاز حسگرهای مواد منفجره عبارتند از حساسیت بالا، زمان پاسخ، گزینش پذیری خوب، و برگشت پذیری است. چالشهایی اساسی که بر سر راه دستیابی به حساسیت در شناسایی مواد منفجره

تروریسم مبتنی بر مواد منفجره به شدت در حال رشد است و تهدیدات تروریستی به یک مشکل جدی تبدیل شده است. زیرا جنگ افزارهای مبتنی بر مواد منفجره خیلی ساده هستند، به آسانی تولید می شوند و می توانند رعب و وحشت زیادی ایجاد کنند. در ضمن متاسفانه به سادگی قابل دسترس هستند. بخار ناشی از انفجار مواد بر روی پارامترهای خونی تاثیر می گذارد و حتی بعضاً سرطان را نیز هستند [۱]. شناسایی مواد منفجره، امری بسیار مهم در مبارزه با تهدیدات تروریستی است. فرایندهای شناسایی مواد منفجره به طور معمول در فرودگاهها، بندرها، جادهها، ایستگاههای قطار، مرزهای ورودی و خروجی، مراکز ویژه امنیتی، مراکز نظامی و حفاظتی بسیار پیشرفته، و همچنین در کنترل مرزها به کار برده می شوند. لذا شناسایی دقیق و حساس مواد منفجره، امری بسیار مهم در مبارزه با تهدیدات تروریستی است.

وقایع رخ داده در سالهای اخیر، موجب افزایش نیاز به بهبود روشهای شناسایی مواد منفجره شده است. بنابراین تلاشهای زیادی برای تشخیص سریع و دقیق مواد منفجره در محیطهای مختلف شده است. این روشها، با حساسیت زیاد، دقت مناسب و سرعت کافی می توانند فواید زیادی را برای امنیت ملی در داخل و خارج از مرزها، برای کاربردهای انتظامی داشته باشند. تشخیص مواد منفجره یک روش بازرسی غیرمخرب برای شناسایی مواد منفجره موجود در یک ایستگاه و یا محمولهها است. از آنجاییکه امروزه امنیت عمومی توجه بیشتری را به خود جلب کرده است، غربالگری انتخابی و حساس مواد منفجره اکنون موضوع مهمی برای تحقیقات است. تشخیص و شناسایی مواد منفجره به دلیل وجود عواملی چون تنوع و گوناگونی آنها، کمبود علایمی که به آسانی قابل شناسایی باشند، فشار بخار کم و کمبود حسگرهای با حساسیت بالا، مطمئن و ارزان قیمت و قابل حمل بسیار پیچیده و پرهزینه است [۲-۴].

مواد منفجره موادی هستند که می توانند به سرعت و راحتی منفجر شوند. انرژی احتمالی ذخیره شده در مواد منفجره به سه شکل انرژی شیمیایی، گاز تحت فشار و انرژی هسته ای است. این ترکیبات پراثری هم برای اهداف صلح آمیز و هم نظامی مورد نیاز است. اگرچه، واژه "مواد منفجره" یادآور خصومتها و بدبختیها است، با این حال، این عناصر پیامدهای قابل توجهی در زمینه های ساخت و ساز، مهندسی معدن، معدن سنگ، علوم فضایی (موشک های پیشران)، تولید ارز (برای اتصال فلزات مختلف) و غیره دارند [۵]. TNT یک ماده شیمیایی منفجره رایج است که برای کاربردهای تروریستی یا حتی کاربردهای صنعتی نیز به کار برده می شود. دو ماده منفجره جدید

RDX (hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine),

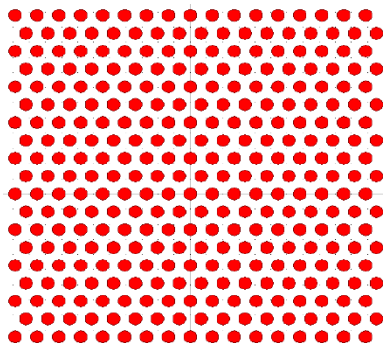
HMX (octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine)

با عملکرد فوق العاده خود در ارتش زیاد به کار برده می شوند [۵-۷]. ساختار شیمیایی دو ماده در شکل (۱) نشان داده شده است. تراکم و سرعت انفجار این مواد بسیار بیشتر از TNT است.

قابلیت تشخیص همزمان دو ماده منفجره، با استفاده از نانو حفره‌ها پیشنهاد شده است. با پرکردن نانوحفره‌ها با ضریب شکست‌های انتخابی از مواد منفجره دامنه طیف انتقال حسگر تغییر خواهد کرد. در تمام روش‌های ارائه شده، حسگر در یک لحظه فقط قابلیت تشخیص یک ماده را دارد اما ایده جدید در این روش قابلیت تشخیص سریع و همزمان دو ماده را دارد. در ضمن روش شناسایی مواد منفجره در این کار که استفاده از روش موجبری در ساختارهای بلور فوتونی است برای اولین بار ارائه شده است. ادامه مقاله در بخش ۲ تئوری بلورهای فوتونی و ساختار طراحی شده نوری بیان می‌شود. در بخش ۳ نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه خواهد شد و در نهایت نتیجه گیری طراحی انجام شده بیان خواهد شد.

۲- تئوری طراحی حسگر

بلورهای فوتونی آرایش منظمی از موادی با ضریب شکست متفاوت هستند. آنها دارای شبکه هندسی متفاوتی هستند که بلوک‌های سازنده شبکه با فاصله معینی به صورت متناوب تکرار می‌شوند. این فاصله ثابت شبکه نام دارد [۲۹ و ۳۴]. شکل (۲) ساختار تناوبی بلور فوتونی طراحی شده برای حسگر مواد منفجره را نشان می‌دهد. در این ساختار آرایه تناوبی از شش ضلعی در دو بعد است. قبل از هر چیز برای طراحی باید محدوده شکاف باند فوتونی (PBG) را بدست آورد. شکاف باند محدوده‌ی فرکانس ممنوعه می‌باشد. به عبارتی محدوده‌ای از طول موج نوری که عایق نوری می‌باشد. این محدوده با رسم نمودار پاشندگی یعنی رسم فرکانس یا طول موج بر حسب بردار موج بدست می‌آید. در این محدوده انتشار امواج الکترومغناطیسی در ساختار بلور فوتونی امکانپذیر نیست. اما با ایجاد نقص در ساختار، انتشار نور به ازای یک طول موج معین در محدوده شکاف باند ایجاد می‌شود. نقص در واقع تغییر یا دستکاری تناوب ساختار بلور فوتونی است که می‌توان با تغییر شعاع، جنس دی‌الکتریک، حذف یا جابجایی اتم‌ها ایجاد کرد. ساختار بدون نقص طراحی شده برای حسگر مورد نظر به صورت نشان داده شده در شکل (۲) می‌باشد.



شکل (۲): ساختار تناوبی بلور فوتونی بدون نقص حسگر

این ساختار دارای طرح شش ضلعی متقارن است که مساحت آن μm^2 17×19 می‌باشد، میله‌های دی‌الکتریک سیلیکونی با ضریب شکست

وجود دارند که مهم‌ترین آنها عبارتند از: تعداد بسیار کم مولکولهای مواد منفجره، کمبود گزینش پذیری در اثر مزاحمت ایجاد شده توسط سایر مولکولها و همچنین گستردگی ترکیبات شیمیایی که در ساخت انواع مواد منفجره استفاده خواهد شد. با توجه به برهمکنش نور و ماده منفجره و همچنین توسعه روز افزون فناوری‌های نوین نوری، روشهای نوری آشکارسازی مواد منفجره به دلیل حساسیت بالا و سرعت پاسخ زیاد از اهمیت خاصی برخوردار است [۲۲-۲۳]. اما در اغلب روشهای به کار گرفته شده مانند جابجایی طول موج در طیف جذب نور [۲۲] بر روی ساختار نیاز به تجهیزات پیچیده و گران برای مشاهده طیف جذب نور دارد. توسعه مدارهای مجتمع نوری در سالهای اخیر حسگرهای مبتنی بر روشهای نوری مانند موجبرهای نوری، میکرو-رینگ نوری، حسگرهای فیبر نوری و حسگرهای مبتنی بر بلور فوتونی (PHC) نیز حسگرهای حساسی هستند که در اثر برهم کنش ماده و نور توانایی تشخیص سریع و با حساسیت بالای بخار مواد منفجره را دارند. حسگرهای بلورهای فوتونی به دلیل غیر مخرب، حساسیت بالا، و تشخیص بصری آن محقق شده‌اند [۲۴-۲۷]. استفاده از ساختارهای بلور فوتونی منجر به مجتمع سازی قطعه حسگر با قطعات دیگر و همچنین حسگرهای بیولوژی خواهد شد. بنابراین حسگرهای بلور فوتونی به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند و فناوری‌های بیشتری با آن ترکیب می‌شوند تا حساسیت را بهبود بخشند. مجتمع سازی ساختار منجر بهبود میدان نوری و افزایش برهمکنش آنالیت با حساسیت بیشتر و زمان پاسخ کمتر می‌شود [۲۸]. بلورهای فوتونی دسته جدیدی از محیط‌های نوری هستند که مشخصه آنها چیدمان متناوب از مواد دی‌الکتریک با ضریب شکست متفاوت است. با توجه به ساختار متناوب، یک شکاف باند فوتونی (PBG) در بلورهای فوتونی وجود دارد که میزان پراش نور ساختار را تعیین می‌کند [۲۹]. در برخی کارها برای تشخیص مواد منفجره مانند DNT حدود ۱۸ ساعت طول میکشد که استفاده از نانوذرات منجر به دام انداختن بخار حاصله و افزایش سرعت پاسخ خواهد شد. روشهای تشخیص حساس بخار مواد منفجره منجر به تشخیص از راه دور نیز می‌شود. استفاده از نانو ذرات حساسیت ساختار را افزایش می‌دهد و همچنین قابلیت تشخیص حسگر از راه دور را افزایش می‌دهد [۳۰-۳۳]. در سال ۲۰۲۰ حسگر تشخیص مواد منفجره با استفاده از بلورهای فوتونی و نانو ذرات با قابلیت تشخیص در حد ۳ دقیقه برای ذرات بخار کم انجام شده است [۲۴]. اغلب روشهای تشخیص مواد منفجره بر روی مواد قدیمی مانند TNT است. اما همانطور که اشاره شد با توجه به توسعه مواد منفجره جدید و استفاده وسیع از مواد RDX و HMX در ترکیبات آنها در سالهای اخیر محققان در حال پژوهش بر روی طراحی حسگرهای حساس و سرعت پاسخ بالا بر روی این مواد هستند [۸، ۶]. زیرا تراکم و سرعت انفجار مواد RDX و HMX بسیار بیشتر از TNT است و قابلیت برهمکنش با نور و جذب نور دارند [۸]. بنابراین در این مقاله یک حسگر بلور فوتونی دوکاناله با

$$0.39 < a/\lambda_2 < 0.51$$

که a ثابت شبکه می‌باشد. با جایگذاری ثابت شبکه در رابطه (۶) بازه طول موج شکاف باند مانند رابطه (۷) خواهد شد. با توجه به رابطه (۷) بازه طول موج دوم (λ_2) در محدوده طول موجهای مخابراتی است که باتوجه به منابع لیزری تجاری موجود و امکان ساخت حسگر، از بازه طول موج دوم برای موجبری در حسگر استفاده شده است.

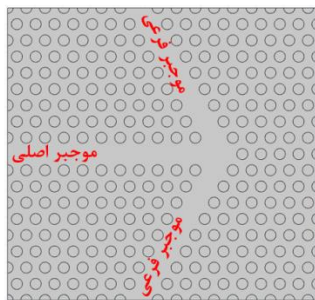
$$2.19 < \lambda_1 < 3.24$$

$$1.33 < \lambda_2 < 1.74$$

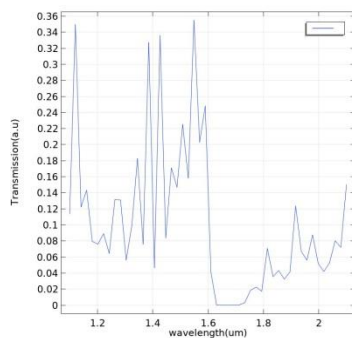
(۷)

۳- شبیه سازی و نتایج

حسگر برای تشخیص همزمان دو ماده منفجره با ضریب شکستهای متفاوت طراحی شده است. بنابراین برای تشخیص همزمان دو ماده لازم است که دو مسیر موجبری در ساختار ایجاد شود. ساختار طراحی شده در شکل (۴) نشان داده شده است. برای ساختار پیشنهادی با ایجاد نقص در سه مرحله طراحی شده است. مرحله اول: با برداشتن یک ردیف از میله‌های سیلیکونی نقص خطی مورد نظر ایجاد شده و مسیر موجبر اصلی را برای اعمال نور ورودی ایجاد کرده است. مرحله دوم: دو موجبر فرعی برای تشخیص مودهای رزونانسی به دام افتاده ناشی از ورود مواد منفجره، به صورت شکل (۴) طراحی شده است. در شبیه سازی طرح پیشنهادی، منبع نور لیزر به عنوان موج صفحه ای به ساختار اعمال می‌گردد. در شکل (۵) طیف انتقال نور خروجی از دو موجبر فرعی را نشان می‌دهد. با توجه به تقارن ساختاری دو مسیر فرعی، طیف عبوری از هر دو خروجی یکسان است. همچنین بیشینه دامنه نور عبوری در طول موجهای نمودار نیز در بازه شکاف باند دوم نمودار پاشندگی قرار دارد. با توجه به نمودار رسم شده شدت دامنه بیشینه در طیف انتقال حد ۰/۳۵ است.



شکل (۴): ساختار پیشنهادی در حالت موجبری



شکل (۵): طیف انتقال برای حالت موجبری

۳/۶۷۳۰، بر روی بستر هوا قرار داده شده است، ثابت شبکه 680 nm و شعاع میله‌ها 200 nm است. برای شبیه‌سازی ساختار از روش FDTD با بسط موج صفحه‌ای استفاده شده است. در این روش با استفاده از ۴ معادله اول ماکسول مانند روابط زیر استفاده شده است.

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J} \quad (2)$$

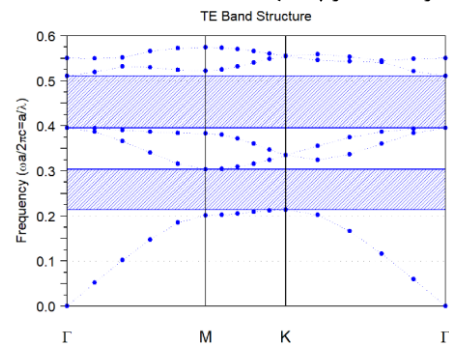
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (4)$$

که \mathbf{E} میدان الکتریکی بر حسب متر/ولت، \mathbf{H} میدان مغناطیسی بر حسب متر/آمپر، \mathbf{D} بردار جابجایی میدان الکتریکی، \square چگالی بار آزاد و \mathbf{J} چگالی جریان است. با در نظر گرفتن خواص غیرمغناطیسی محیط و اینکه هیچ منبع نوری در محیط وجود ندارد؛ بنابراین $\mathbf{J} = \square \square \square$ می‌شود. با بسط دادن میدانهای الکتریکی و مغناطیسی به مودهای هارمونی وابستگی زمانی از وابستگی مکانی حذف خواهد شد. در نتیجه میدان مغناطیسی در روابط بالا جایگذاری شده و با حذف میدان الکتریکی، معادله نهایی به صورت معادله موج مانند رابطه (۵) تبدیل خواهد شد [۳۴].

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \mathbf{H} \right] = \frac{\omega^2}{C^2} \mathbf{H} \quad (5)$$

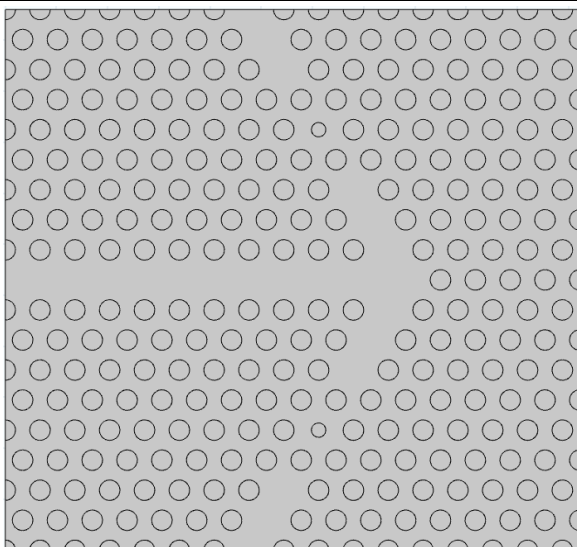
با توجه به رابطه (۵) رابطه معکوس بین فرکانس زاویه‌ای مود انتشاری (\square) و ثابت دی‌الکتریک محیط (\square) وجود دارد. برای محاسبه نمودار پاشندگی و ساختار باند بلور فوتونی طراحی شده از بسط موج صفحه‌ای میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در حوزه زمان (FDTD) استفاده شده است. با حل معادله موج و اعمال شرایط مرزی در مرز محیطهای با ضریب شکست متفاوت نمودار پاشندگی و پروفایل میدان الکتریکی در محیط به دست آمده است. نمودار پاشندگی برای مود TE در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکل (۳) می‌توان دو شکاف باند $1/0.5$ میکرومتری و $0/41$ میکرومتری را به ترتیب برای دو محدوده طول موجی متفاوت مشاهده کرد. در رابطه (۶) بازه طول موج شکاف باند برای ساختار پیشنهادی بدست آمده است.



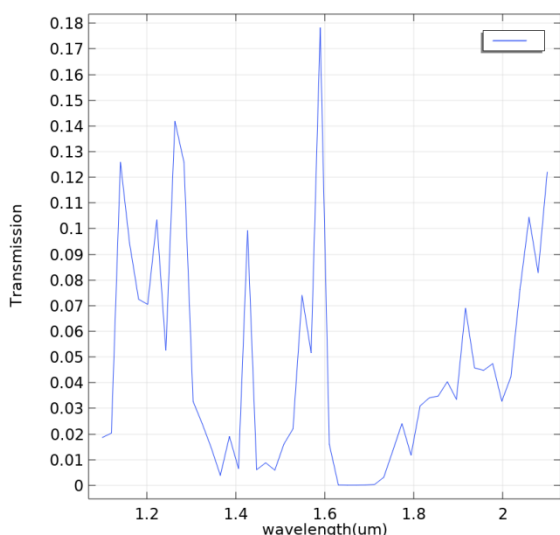
شکل (۳): نمودار پاشندگی مود TE

$$0.21 < a/\lambda_1 < 0.31$$

(۶)

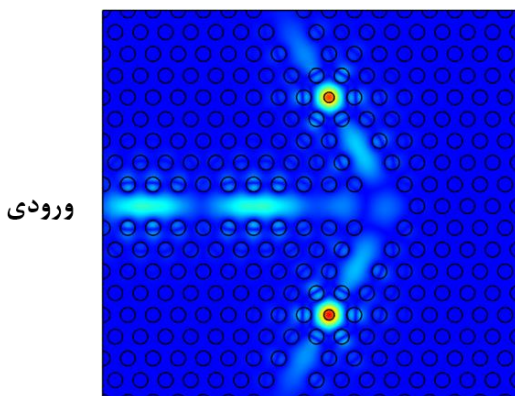


شکل (۷): ساختار حسگر پیشنهادی طراحی شده



شکل (۸): طیف انتقال موجبر با ایجاد نانوحفره و پرشده با ماده ارگانیک با ضریب شکست ۱/۵۹

خروجی (۱)

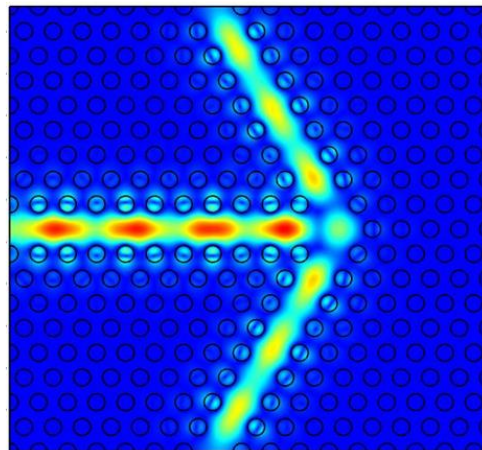


خروجی (۲)

شکل (۹): حرکت نور در موجبرهای ساختار حسگر بلور فوتونی

در شکل (۶) پروفایل میدان الکتریکی در طول موج ۱۵۹۰ نانومتر در دو مسیر موجبرهای فرعی را نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است نور وردی به موجبر اصلی در دو مسیر موجبرهای فرعی به خوبی هدایت یافته است.

خروجی (۱)



ورودی

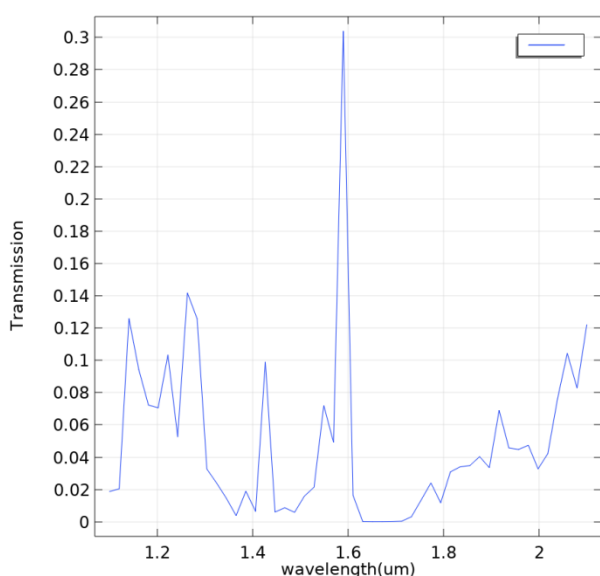
خروجی (۲)

شکل (۶): پروفایل میدان الکتریکی برای ساختار موجبری

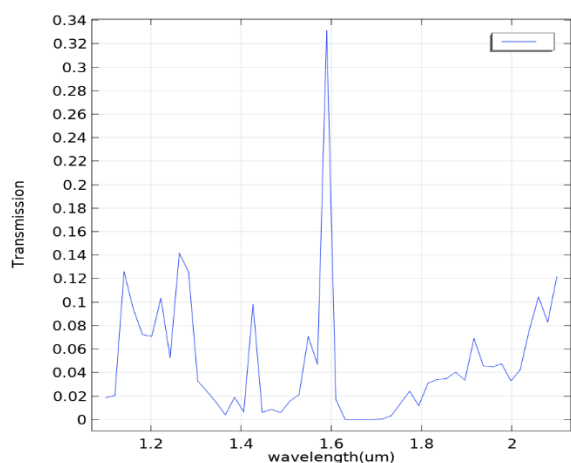
مرحله سوم: ایجاد نقص نقطه‌ای و دو نانوحفره با شعاع ۱۴۰ نانومتر و پرکردن آنها با یک ماده ارگانیکی با ضریب شکست ۱/۵۹ در دو موجبر فرعی به صورت شکل (۷) طراحی شده است. ماده ارگانیکی در واقع نقش آنالیت را در حسگر ایفا می‌کند. آنالیت بر روی زیرلایه منجر به جذب و نفوذ ماده منفجره به نانوحفره می‌شود. استفاده از نانوحفره منجر به دام انداختن بخار حاصله از مواد منفجره و افزایش سرعت پاسخ خواهد شد. شکل (۸) نمودار طیف انتقال نور در ساختار بدون حضور مواد منفجره را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار انتقال، نقص ایجاد شده و نانوحفره باعث به دام انداختن نور ورودی به موجبر در طول موج ۱۵۹۰ شده است. به نوعی بقیه طول موجها فیلتر شده‌اند و موجبرهای فرعی فقط یک طول موج و یا یک مود نور ورودی را عبور خواهند داد. بیشینه دامنه در طول موج ۱۵۹۰ نانومتر دارای مقدار ۰/۱۸ است که نسبت به حالت بدون نانو حفره دامنه به نسبت قابل توجهی کاهش یافته است. این نشان‌دهنده جذب نور توسط نانوحفره است. البته قابل ذکر است که به دلیل یکسان بودن ویژگی نقص در هر دو موجبر فرعی، ویژگی طیف نور عبوری و بیشینه دامنه در طول موج رزونانسی به دام افتاده برای هر دو مسیر یکسان است. پروفایل میدان الکتریکی و مسیر حرکت نور در موجبرها در طول موج ۱۵۹۰ نانومتر در شکل (۹) نشان داده شده است. همانگونه که نشان داده شده نانو حفره باعث جذب نور شده و تمرکز میدان الکتریکی بر روی نانوحفره ها است.

دست آمده است که در مقایسه با ساختار حسگرهای های نوری مقدار بالاتری می‌باشد [۳۵ و ۸]. البته قابل ذکر است که حسگر طراحی شده با ساختار بلور فوتونی دو کاناله در این مقاله به نوعی اولین بار است و نمونه مشابهی برای قیاس ندارد. مقدار بالای ضریب کیفیت در واقع بیان کننده مقدار حبس نور در ساختار می‌باشد که دلیل آن ساختار بلور فوتونی و نانوحفره است.

$$Q = \lambda_{res} / FWHM \quad (8)$$



شکل (۱۰): طیف انتقال برای ماده منفجره HMX



شکل (۱۱): طیف انتقال برای ماده منفجره RDX

که λ_{res} طول موج تشدید و FWHM پهنای باند نیم توان می‌باشد. یکی از کمیت‌های مهم در حسگر رابطه خطی پاسخ حسگر به ازای تغییرات پارامتر فیزیکی است. در حسگر طراحی شده در هر بازوی موجبر فرعی به ازای تغییر ضریب شکست از ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۸ پاسخ بیشینه شدت نور طیف خروجی اندازه‌گیری شده و نمودار شدت نور برحسب تغییرات ضریب شکست در شکل (۱۲) رسم شده است. یک تابع خط با رابطه $(23/98 \times n + 0/1762)$ به داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی تطبیق داده شده است. با توجه مقدار ضریب همبستگی

مواد منفجره می‌توانند به صورت بخار یا محلول بر روی آنالیت قرار گیرند. ماده ارگانیکی وارد شده به نانوحفره به عنوان آنالیت منجر به جذب مواد منفجره می‌شود. حضور مواد منفجره باعث تغییر ضریب شکست در دو بازو می‌شود و دامنه شدت نور عبوری تغییر می‌کند. چون دوماه منفجره (HMX, RDX) اثر متفاوتی بروی تغییر ضریب شکست دارند بنابراین مقدار جذب نور در دوبازوی موجبر فرعی متفاوت است. دامنه بیشینه انتقال به ازای ورود هر دو ماده منفجره در جدول (۱) لیست شده است. با پرکردن نانوحفره‌ها با ضریب شکست‌های انتخابی از مواد منفجره دامنه طیف انتقال حسگر تغییر خواهد کرد.

جدول (۱): ضریب شکست‌های ورودی و بیشینه دامنه طیف انتقال در خروجی

ماده منفجره	ضریب شکست انتقال	دامنه اوج انتقال
بدون حضور ماده منفجره	۱.۵۹	۰.۱۸
HMX	۱.۵۹۴	۰.۳
RDX	۱.۵۹۷	۰.۳۳

نمودار طیف انتقال خروجی (۱ و ۲) در موجبر برای هر دو ماده منفجره HMX و RDX در شکل (۱۰ و ۱۱) به ترتیب رسم شده و مورد مقایسه قرار گرفته است.

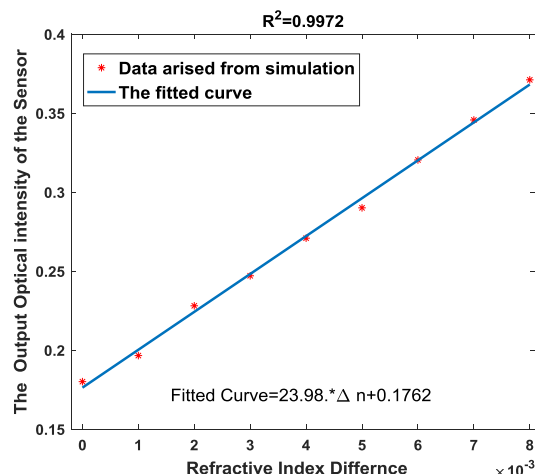
با توجه به طیف‌های انتقالی رسم شده دامنه بیشینه انتقالی در طول موج ۱۵۹۰ میکرون برای ماده منفجره HMX حدود ۰/۳ است و برای RDX حدود ۰/۳۳ است. تغییر شدت نور به دلیل تفاوت جذب نور در هر دو بازو است. بنابراین شدت دامنه در طیف انتقالی تغییر می‌کند. برای مقایسه یکسان دوبازو و بررسی اثر مقدار جذب متفاوت نور به ازای غلظت برابر در هر دو ماده فرض شده است. اثر تغییر در میدان الکتریکی نور در اثر تغییر ضریب شکست نور در سطح ماده رخ می‌دهد. همانطور که در هر دو طیف انتقال ملاحظه می‌شود، با حضور مواد منفجره در هر دو کانال بیشینه دامنه انتقال خروجی در فرکانس یکسان است و شدت نور خروجی در مقایسه با حالتی که ماده منفجره وجود ندارد افزایش یافته است. همچنین با تغییر ضریب شکست دو ماده منفجره اختلاف ۰/۰۳ برای دامنه بیشینه انتقال هر دو ماده در طول موج ۱۵۹۰ نانومتر مشاهده می‌شود، و این به دلیل جذب نور متفاوت توسط مواد منفجره و در نتیجه تشخیص همزمان دو ماده منفجره به وسیله حسگر دو کاناله پیشنهادی است. با توجه به اینکه اختلاف ضریب شکست دو ماده بسیار نزدیک به هم و حدود ۰/۰۰۳ است اما در شدت دامنه سیگنال خروجی تفاوت دیده می‌شود که نشاندهنده حساسیت حسگر نسبت به مواد با ویژگی نزدیک به هم است.

ضریب کیفیت ساختار پیشنهادی با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شده و در طول موج تشدید ۱۵۹۰ نانومتر برای هر دو کانال ۱۲۲/۲۸ -

مراجعه

- https://science.jrank.org/pages/2640/Explosives-Current-use-development-explosives.html, 2020.
- Gulati, K. K., Gulia, S., Kumar, N., Kumar, A., Kumari, S., Gambhir, V., & Reddy, M. N. "Real-time stand-off detection of improvised explosive materials using time-gated UV-Raman spectroscopy", *Pramana-J. Phys.* Vol. 92, no. 2, 2019.
- Peter, X. K., Jiba, Z., Schmitz, P., Ramaloko, P., & Stipinovich, J. "Effects of TNT contaminated soil on vegetation at an explosive range by probing UPLC-qTOF MS profiling method", *Ecotoxicol. Environ. Saf.* Vol. 167 pp. 324–330, 2019.
- Wu, W., Shi, N., Zhang, J., Wu, X., Wang, T., Yang, L., Yang, R., Ou, C., Xue, W., Feng, X. and Xie, L. "Electrospun fluorescent sensors for the selective detection of nitro explosive vapors and trace water", *J. Mater. Chem. A* Vol. 6, No. 38. Pp. 18543–18550, 2018.
- Pichtel, J., "Distribution and fate of military explosives and propellants in soil: a review," *Applied and Environmental Soil Science*, 2012.
- Chatterjee, S., Deb, U., Datta, S., Walther, C. and Gupta, D.K., "Common explosives (TNT, RDX, HMX) and their fate in the environment: Emphasizin bioremediation," *Chemosphere*, Vol. 184, pp.438-451, 2017.
- Tang, Y., Zhang, J., Mitchell, L.A., Parrish, D.A. and Shreeve, J.N.M, "Taming of 3,4-Di (nitramino)furazan," *J. Am. Chem. Soc.* Vol. 137, No. 51, pp. 15984–15987, 2015.
- Fan, J., Meng, Z., Dong, X., Xue, M., Qiu, L., Liu, X., Zhong, F. and He, X., "Colorimetric screening of nitramine explosives by molecularly imprinted photonic crystal array", *Microchemical Journal*, pp. 105143, 2020.
- Kong, X., Xi, Y., Le Duff, P., Chong, X., Li, E., Ren, F., Rorrer, G.L. and Wang, A.X., "Detecting explosive molecules from nanoliter solution: A new paradigm of SERS sensing on hydrophilic photonic crystal biosilica," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 88, pp.63-70, 2017.
- Squire, K.J., Sivashanmugan, K., Zhang, B., Kraai, J., Rorrer, G. and Wang, A.X., "Multiscale Photonic Crystal Enhanced Core-Shell Plasmonic Nanomaterial for Rapid Vapor-Phase Detection of Explosives," *ACS Applied Nano Materials*, vol. 3, No. 2, pp.1656-1665, 2020.
- Idros, N., Ho, M.Y., Kamboj, V.S., Xu, H., Gu, Z., Beere, H.E., Ritchie, D.A. and Chu, D., "Using Transmissive Photonic Band Edge Shift to Detect Explosives: A Study with 2, 4, 6-Trinitrotoluene (TNT)," *Acs Photonics*, Vol. 4, No. 2, pp.384-395, 2017.
- Yang, C., Cai, W., Zhang, X., Gao, L., Lu, Q., Chen, Y., Zhang, Z., Zhao, P., Niu, H. and Wang, W., "Multifunctional conjugated oligomers containing novel triarylamine and fluorene units with electrochromic, electrofluorochromic, photoelectron conversion, explosive detection and memory properties", *Dyes Pigm.* Vol. 160, pp. 99–108, 2019.
- J Wang, J., Du, S., Onodera, T., Yatabe, R., Tanaka, M., Okochi, M. and Toko, K., "An SPR sensor chip based on peptide-modified single-walled carbon nanotubes with enhanced sensitivity and selectivity in the detection of 2,4,6-trinitrotoluene explosives", *Sensors*, Vol. 18, No. 12, pp. 4461, 2018.
- Champagne, P.L., Kumar, R. and Ling, C.C, "Multi-responsive self-assembled pyrene-appended beta-cyclodextrin nanoaggregates: Discriminative and selective ratiometric detection of pirimicarb pesticide and

R^2 که حدود ۰/۹۹۷۲ به دست آمده است تطبیق خطی مناسبی در بین داده‌ها برقرار است.



شکل (۱۲): رابطه شدت نور خروجی موجبر فرعی به ازای تغییرات ضریب شکست

از مزایای حسگر طراحی شده این است که محدودیت ساختاری ندارد و قابلیت افزایش تعداد کانال‌ها برای شناسایی تعداد بیشتر مواد منفجره را دارد. همچنین روش نوری قابلیت ساخت در مدارهای مجتمع نوری و فشرده سازی دارد. در اغلب حسگرهای نوری بررسی جابجایی طیفی مد نظر است که نیازمند تجهیزات پیچیده تر و چیدمان اندازه‌گیری گران قیمت دارد. از آنجاییکه در روش پیشنهادی فقط نیاز به اندازه‌گیری شدت نور خروجی موجبرها دارد نیاز به تجهیزات گران قیمت نیست. فقط نیاز به یک منبع نور ورودی موجبر اصلی و دو آشکارساز در خروجی (۱ و ۲) موجبرهای فرعی است. بدین ترتیب حسگر به یک قطعه بسیار کوچک و قابل حمل خواهد شد که در مکان‌های پرتردد و اماکن عمومی نیز قابل استفاده است. از دیگر مزایای این روش پاسخ سریع، همزمان و روش غیرتماسی است.

۴- نتیجه

در این کار یک حسگر بلور فوتونی چندکاناله برای تشخیص همزمان دو ماده منفجره با تاثیر ضریب شکست‌های متفاوت پیشنهاد شده است. با توجه به نتایج به دست آمده ورود مواد منفجره منجر به تغییر جذب نور در نانو حفره‌های هر کانال شده است. در نتیجه شدت نور خروجی هر کانال دارای مقدار متفاوت در بیشینه دامنه طیف انتقال در فرکانس ۱۵۹۰ نانومتر در مقایسه با حالتی که ماده منفجره وجود ندارد شده است. با تغییر ضریب شکست دو ماده اختلاف ۰/۰۳ در بیشینه دامنه طیف انتقال در فرکانس ۱۵۹۰ نانومتر رخ داده است و این مقدار تغییر شدت نور ویژگی بسیار مفیدی برای شناسایی همزمان دو ماده می‌باشد.

- [29]. Sibilia, C., Benson, T.M., Marciniak, M. and Szoplik, T. eds., *Photonic crystals: physics and technology*. Springer Milan, 2008.
- [30]. Snapp, P., Kang, P., Leem, J. and Nam, S., "Colloidal photonic crystal strain sensor integrated with deformable graphene phototransducer," *Adv. Funct. Mater.*, Vol. 29, No. 33, pp. p.1902216. 2019.
- [31]. Diaz Aguilar, A., Forzani, E.S., Leright, M., Tsow, F., Cagan, A., Iglesias, R.A., Nagahara, L.A., Amlani, I., Tsui, R. and Tao, N.J., "A hybrid nanosensor for TNT vapor detection," *Nano letters*, vol. 10, No. 2, pp.380-384, 2010.
- [32]. Gillanders, R.N., Samuel, I.D. and Turnbull, G.A., "A low-cost, portable optical explosive-vapour sensor," *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 245, pp.334-340, 2017.
- [33]. Walker, N.R., Linman, M.J., Timmers, M.M., Dean, S.L., Burkett, C.M., Lloyd, J.A., Keelor, J.D., Baughman, B.M. and Edmiston, P.L., "Selective detection of gas-phase TNT by integrated optical waveguide spectrometry using molecularly imprinted sol-gel sensing films," *Analytica chimica acta*, Vol, 593, No. 1, pp.82-91, 2007.
- [34]. Dennis W Prather, Ahmed Sharkawy, Shouyuan Shi, *Photonic Crystals, Theory, Applications and Fabrication*, Wiley, 2009.
- [35]. Zhang, Y., Li, T., Zeng, B., Zhang, H., Lv, H., Huang, X., Zhang, W. and Azad, A.K., "A graphene based tunable terahertz sensor with double Fano resonances," *Nanoscale*, Vol. 7, No. 29, pp.12682-12688, 2015.
- trinitroaromatic explosives", *Sensors and Actuators B-Chemical*, Vol. 281, pp. 229-238, 2019.
- [15]. Shahraiki, H., Tabrizchi, M. and Farrokhpor, H., "Detection of explosives using negative ion mobility spectrometry in air based on dopant-assisted thermal ionization," *J. Hazard. Mater.* Vol. 357, pp. 1-9, 2018.
- [16]. Chajistamatiou, A.S. and Bakeas, E.B., "Identification of thiocyanates by Gas Chromatography - Mass Spectrometry in explosive residues used as a possible marker to indicate black powder usage," *Talanta* Vol. 195, pp. 456-462, 2019.
- [17]. Voloshenko Rossin, A., Sladkevich, S., Gasser, G., Melman, A. and Lev, "Sensitive analysis of nitroguanidine in aqueous and soil matrices by LC-MS," *Anal. Chem.* Vol. 89, No. 18, pp. 9990-9996, 2017.
- [18]. Liu, R., Li, Z., Huang, Z., Li, K. and Lv, Y., "Biosensors for explosives: state of art and future trends," *Trac-Trends Anal. Chem.* 118, pp. 123-137, 2019.
- [19]. Qiao, X., Han, Y., Tian, D., Yang, Z., Li, J. and Zhao, S., "MOF matrix doped with rare earth ions to realize ratiometric fluorescent sensing of 2,4,6-trinitrophenol: synthesis, characterization and performance," *Sensors and Actuators B-Chemical*, Vol. 286, pp. 1-8, 2019.
- [20]. Du, J., Liu, J., Ren, Y., Wang, C., Bai, F. and Hao, H., "Rapid detection of TNP based on a commercial fluorescent probe, *Spectrochimica Acta Part a-Molecular and Biomolecular*," , Vol. 211, pp. 287-290, 2019.
- [21]. Ding, H.L., Chen, L.D., Wang, N., Li, K., An, Y. and Lü, C.W., "Two highly selective and sensitive fluorescent imidazole derivatives design and application for 2,4,6-trinitrophenol detection," *Talanta*, Vol. 195, pp. 345-353, 2019.
- [22]. Niu, J., Chi, H., Gao, P., Liu, Z., Yin, X. and Gu, Z., "Optical sensing of explosives in wastewater by competitive complexation," *Progress in Natural Science: Materials International*, vol. 29, No. 6, pp.655-659, 2019.
- [23]. Walker, N.R., Linman, M.J., Timmers, M.M., Dean, S.L., Burkett, C.M., Lloyd, J.A., Keelor, J.D., Baughman, B.M. and Edmiston, P.L., "Selective detection of gas-phase TNT by integrated optical waveguide spectrometry using molecularly imprinted sol-gel sensing films," *Analytica chimica acta*, Vol, 593, No. 1, pp.82-91, 2007.
- [24]. Squire, K.J., Sivashanmugan, K., Zhang, B., Kraai, J., Rorrer, G. and Wang, A.X., "Multiscale Photonic Crystal Enhanced Core-Shell Plasmonic Nanomaterial for Rapid Vapor-Phase Detection of Explosives," *ACS Applied Nano Materials*, vol. 3, No. 2, pp.1656-1665, 2020.
- [25]. Kong, X., Xi, Y., Le Duff, P., Chong, X., Li, E., Ren, F., Rorrer, G.L. and Wang, A.X., "Detecting explosive molecules from nanoliter solution: A new paradigm of SERS sensing on hydrophilic photonic crystal biosilica," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 88, pp.63-70, 2017.
- [26]. Chen, J., Xu, L., Yang, M., Chen, X., Chen, X. and Hong, W., "Highly stretchable photonic crystal hydrogels for a sensitive mechanochromic sensor and direct ink writing," *Chem. Mater.* Vol. 31, No. 21, pp. 8918-8926, 2019.
- [27]. Kou, D., Zhang, Y., Zhang, S., Wu, S. and Ma, W., "High-sensitive and stable photonic crystal sensors for visual detection and discrimination of volatile aromatic hydrocarbon vapors," *Chem. Eng. J.*, Vol. 375 pp. 121987, 2019.
- [28]. Squire, K., Kong, X., LeDuff, P., Rorrer, G.L. and Wang, A.X., "Photonic crystal enhanced fluorescence immunoassay on diatom biosilica." *Journal of Biophotonics*, Vol. 11, No. 10, p.e201800009, 2018.