

# طراحی و شبیه‌سازی حسگر نانوجابه‌جایی بر اساس ساختار بلور فوتونی دو بعدی با ساختار مثلثی برای تغییرات جابه‌جایی تا ۲۰ نانومتر

سعید علیائی<sup>۱</sup>

مرتضی عزیزی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۴/۱۳

تاریخ تصویب: ۹۳/۴/۱۳

## چکیده

در این مقاله به ارائه یک حسگر نانوجابه‌جایی بر مبنای بلور فوتونی دو بعدی با ساختار مثلثی متشکل از حفره‌های هوا داخل ماده دی‌الکتریک می‌پردازیم. این حسگر از دو قطعه بلور فوتونی تشکیل شده که یکی از آن‌ها ثابت و قطعه دیگر در راستای افقی حرکت می‌کند. شدت نور آشکار شده توسط آشکارساز در این ساختار تابعی از جابه‌جایی بین دو قطعه است. در این حسگر ضریب کیفیت

---

<sup>۱</sup> دانشیار مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی؛ s\_olyaee@srttu.edu

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

کاواک برابر ۴۵۰۰۰ و حساسیت حسگر  $2/54 \mu\text{m}^{-1}$  در محدوده بین صفر تا  $20 \text{nm}$  می‌باشد. برای شیشه‌سازی این حسگر از روش تفاضل متناهی در حوزه زمان (FDTD) توسط نرم‌افزار Rsoft استفاده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** بلورهای فوتونی، حسگر نانو جابه‌جایی، موجبر، ضریب کیفیت، کاواک.

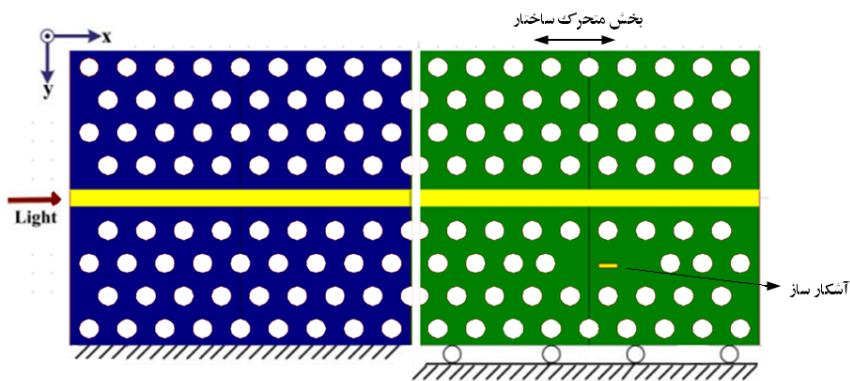
## ۱. مقدمه

حسگرهای جابه‌جایی یکی از مهم‌ترین قطعات مورد استفاده در سامانه‌های میکرو الکترومکانیکی<sup>۱</sup> (MEMS) و ردیابی کردن تخریب‌های احتمالی سازه‌ها برای اندازه‌گیری‌های بسیار دقیق با ابعاد میکرومتری هستند [۱-۲]. همچنین دارای توانایی زیادی به عنوان حسگرهای زیستی<sup>۲</sup> می‌باشند [۳]. حسگرهای جابه‌جایی در انواع گوناگونی وجود دارند که اساس کار هر یک متفاوت است. گونه‌ای از آن‌ها بر پایه روش‌های نوری هستند که به کمک تداخل سنج‌های لیزری ساخته می‌شوند [۴-۵]. از جمله افزاره‌هایی که به تازگی در این حیطه مورد استفاده قرار گرفته‌اند، قطعات مبتنی بر ساختارهای بلور فوتونی هستند. این حسگرها دارای خصوصیات بسیار زیادی از جمله حجم بسیار کم، حساسیت بالا و امکان استفاده در محدوده وسیعی از طول موج‌ها (در محدوده شکاف باند) هستند. طرح‌های زیادی برای این نوع حسگرها بر مبنای بلورهای فوتونی معرفی شده‌اند که هر یک دارای مزایا و معایبی می‌باشند [۳ و ۱]. از جمله می‌توان به حسگری که در سال ۲۰۰۵ توسط Levy و همکارانش معرفی شد اشاره کرد که دارای حساسیتی در حدود  $1 \mu\text{m}^{-1}$  و طول موج کاری  $9/02 \mu\text{m}$  بود [۶]. مشکل اساسی این حسگر داشتن سه آشکارساز بود که محاسبات پیچیده ریاضی را برای به دست آوردن مقدار جابه‌جایی می‌طلبد و احتمال

<sup>1</sup> Micro-Electro-Mechanical System (MEMS)

<sup>2</sup> Bio sensing

بروزِ خطا در این سیستم را افزایش می‌داد [۲]. حسگرِ بعدی که در سال ۲۰۰۶ معرفی شد، حسگرِ جابه‌جایی بر اساسِ تشدیدِ کاواکِ خطّیِ نقص در بلورِ فوتونی بود [۱]. این حسگرِ دارای حساسیتی برابر  $1/15 \mu\text{m}^{-1}$ ، محدودهٔ اندازه‌گیری بین  $-0.2a$  تا  $+0.2a$  و ضریبِ کیفیتِ کاواک برابر ۴۰ است و مشکلِ اصلی آن کم بودنِ ضریبِ کیفیتِ آن می‌باشد [۲]. حسگرِ بعدی در سال ۲۰۰۷ معرفی شد که یک حسگرِ جابه‌جایی با محدودهٔ وسیع اندازه‌گیری بر اساسِ بلورِ فوتونی تزویج شدهٔ هم جهت بود [۷]. این حسگرِ دارای محدودهٔ وسیع اندازه‌گیری بود و تنها عاملِ محدود کنندهٔ آن، طولِ دو موجبرِ تزویج شده بود. البته این حسگرِ زمانی به درستی کار می‌کند که تلفاتِ ساختارِ صفر باشد و همچنین تزویجِ کاملِ اتفاق بیافتد و حرکتی در راستای عمودی نیز نداشته باشد [۷]. در سال ۲۰۱۱ حسگرِ جابه‌جایی دیگری بر پایهٔ بلورِ فوتونی طراحا شد که دارای حساسیتی حدود  $1a \mu\text{m}^{-1}$  بود ( $a$  ثابتِ شبکهٔ ساختار است) و ضریبِ کیفیتِ کاواک این حسگر برابر ۶۰۰۰ به دست آمده است.



شکل ۱. ساختارِ حسگرِ جابه‌جایی بر پایهٔ بلورِ فوتونی دو بعدی با ساختارِ مثلثی و ثابت شبکه  $a=1 \mu\text{m}$  و شعاع حفره‌ها برابر با  $r=0.2 \mu\text{m}$

در این مقاله حسگرِ نانوجابه‌جایی بر مبنای بلورِ فوتونی دو بعدی متشکل از میله‌های هوا داخلِ دی‌الکتریک با ساختارِ مثلثی طراحا و ارائه شده است. این حسگرِ دارای کاواکی با ضریبِ کیفیتِ بالا حدود ۴۵۰۰۰ و حساسیتی برابر  $2/5 \mu\text{m}^{-1}$  در محدودهٔ

اندازه‌گیری صفر تا 20nm است. برای شبیه‌سازی این ساختار از روش<sup>۱</sup> FDTD به کمک نرم‌افزار Rsoft استفاده شده است.

## ۲. تحلیل نظری ساختار دستگاه

در دو بُعد، یک بلور فوتونی را می‌توان مانند یک آرایه‌ی متناوب از دو دی‌الکتریک فرض نمود. ساده‌ترین هندسه‌ها با این احتساب در دو بُعد همانند گروه‌های بلوری براوایس<sup>۲</sup> در فیزیک حالت جامد به پنج خانواده اصلی قابل تقسیم خواهند بود. اما به دلایل گوناگون، دو گروه ساختارهای مربعی و مثلثی بلوری در دو بُعد از اهمیت بیشتری برخوردارند که در این مقاله از ساختار مثلثی استفاده شده است. شکل ۱ ساختار طراحی شده در این مقاله را نشان می‌دهد. این حسگر از دو قطعه بلور فوتونی دو بعدی با ساختار مثلثی تشکیل شده است که قطعه سمت چپ ثابت و قطعه سمت راست در راستای محور افقی حرکت می‌کند. هر کدام از دو قطعه بلور فوتونی دو بعدی شامل شبکه‌ای با ۹ حفره در راستای افقی و ۹ حفره در راستای عمودی است. با توجه به این که ثابت شبکه ۱ میکرومتر و شعاع حفره‌ها برابر با  $0.2$  میکرومتر است، ابعاد کلی حسگر بدون در نظر گرفتن فاصله هوایی بین دو قطعه (که در بیشترین حالت برابر  $20\text{nm}$  است) برابر  $18 \times 9 \mu\text{m}$  خواهد بود. نور تولید شده توسط منبع، به وسیله موجبری که در وسط ساختار قرار دارد منتشر شده به آشکارساز می‌رسد. هنگامی که دو قطعه بلور فوتونی از یکدیگر دور می‌شوند، شدت نور آشکار شده توسط آشکارساز تغییر می‌کند. در جابه‌جایی‌های کوچک رابطه بین شدت آشکار شده و جابه‌جایی خطی خواهد بود. بنابراین با انتخاب فرکانس کاری مناسب از این ساختار می‌توان به عنوان حسگر جابه‌جایی استفاده نمود. مقدار شدت خروجی کاواک را می‌توان از رابطه (۱) به دست آورد [۸]:

$$T(\omega, \omega_0) = \frac{(\omega_0/2Q)^2}{(\omega - \omega_0)^2 + (\omega_0/2Q)^2} \quad (1)$$

<sup>1</sup> Finite Difference Time Domain

<sup>2</sup> Baravise

در این رابطه  $\omega_0$  فرکانسِ تشدید و  $Q$  ضریبِ کیفیتِ کاواک می‌باشد. هنگامی که دو قطعه نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند و جابه‌جایی رخ می‌دهد رابطه (۲) را خواهیم داشت [۲]:

$$\Delta T(\Delta x) = T(x + \Delta x) - T(x) \quad (۲)$$

بسطِ تیلور این رابطه چنین است [۲]:

$$\Delta T(\Delta x) = T'(x) \cdot \Delta x + \frac{T''(x)}{2} \cdot \Delta x^2 + O(\Delta x) \quad (۳)$$

با انتخابِ فرکانسِ کاری مناسب خواهیم داشت  $T''(x) \approx 0$  و بنابراین  $\Delta T(\Delta x)$  را می‌توانیم به عنوانِ تابعِ خطی داشته باشیم. از این رو حساسیت را که عبارت است از نسبت تغییرات شدت خروجی به جابه‌جایی می‌توان از رابطه (۴) به دست آورد [۲]:

$$S = \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (۴)$$

با توجه به روابط (۲) و (۳) می‌توان حساسیت را از رابطه (۵) به دست آورد [۱]:

$$\Delta T(\Delta L) = \frac{3\sqrt{3}QM_{L_0}}{4\omega_0} \cdot \Delta L \quad (۵)$$

که در آن ضریب  $M_{L_0}$  تابعی از فرکانس تشدید ساختار است. همان‌گونه که از معادله (۵) مشخص است بین ضریبِ کیفیتِ کاواک، حساسیت و محدوده اندازه‌گیری همخوانی وجود دارد [۱]. بنابراین با افزایش ضریبِ کیفیتِ کاواک، محدوده خطی اندازه‌گیری کاهش خواهد یافت. به این دلیل، با توجه به نوع کاربردِ حسگر یکی از پارامترهای حساسیت، ضریبِ کیفیت و یا محدوده خطی اندازه‌گیری بهینه‌سازی خواهند شد.

### ۳. ساختارِ حسگر

این حسگر از دو قطعه بلور فوتونی دو بعدی  $9 \times 9$  (تعدادِ حفره‌ها در طول و عرض ساختار هر قطعه برابر ۹ است) با ساختارِ مثلثی متشکل از حفره‌های هوا داخلِ ماده‌ی دی‌الکتریک تشکیل شده است. ثابتِ شبکه‌ی این ساختار برابر  $a = 1 \mu\text{m}$  و شعاعِ حفره‌ها برابر با  $r = 0.2 \mu\text{m}$  است. قطعه‌ی سمتِ چپ ثابت و قطعه‌ی سمتِ راست در راستای محورِ افقی جابه‌جا می‌شود. در وسطِ این قطعات بلور فوتونی موجبری قرار داده شده که نورِ ساطع شده از منبع در این موجبر منتشر شده بعد توسطِ آشکارسازی که داخلِ کاواک قرار دارد آشکار می‌شود. دی‌الکتریکِ مورد استفاده در این ساختار از جنسِ سیلیکان با نسبتِ ضریبِ دی‌الکتریک  $3/4$  است ( $\epsilon = 11/56$ ).

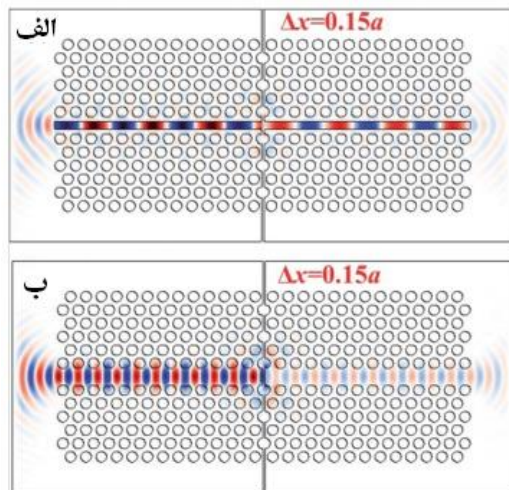
ساختارِ متشکل از حفره‌های هوا داخلِ دی‌الکتریک دارای مزایای بیشتری نسبت به ساختارهای متشکل از میله‌های دی‌الکتریک داخلِ هوا می‌باشند که از آن جمله می‌توان به فناوری ساختِ ساده‌تر و همچنین تلفاتِ کمتر آن اشاره کرد [۲]. موجبری که در این حسگر مورد استفاده قرار گرفته از نوعِ موجبرِ تیغه‌ای است. در این نوع موجبر بر خلافِ موجبرهای مرسوم  $W1$  که از حذفِ یک ردیف از حفره‌ها ساخته می‌شود، یک ماده با ضریب شکستِ بالا توسطِ ماده‌ای با ضریب شکستِ پایین‌تر از یکدیگر جدا می‌شوند (که در این حسگر از هوا استفاده شده است). موجبرِ شکاف دارای مزایای زیادی نسبت به موجبرهای معمولی است که از جمله می‌توان از تلفاتِ کمتر ناشی از انتشار در زیرساختار و همچنین افزایشِ ضریبِ ترویج بین دو قطعه نام برد [۲]. شکل ۲ که توسطِ Yang و همکارانش در سال ۲۰۱۱ ارائه گردیده است [۲]، مقایسه‌ای بین این دو نوع موجبر را نشان می‌دهد. مزیتِ دیگرِ این نوع موجبر در تنظیمِ ضریبِ کیفیتِ موجبر است که به راحتی با کمکِ عرضِ موجبر قابلِ تنظیم است.

کاواکی که در این ساختار استفاده شده، از حذفِ سه حفره به وجود آمده که باعثِ افزایشِ ضریبِ کیفیتِ کاواک شده است. این کاواک در سال ۲۰۰۳ توسطِ Akahane و همکارانش معرفی شد که ساختارِ آن در شکل ۳ نشان داده شده است [۹]. همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است با انتقالِ دو حفره کناری کاواک ضریبِ کیفیتِ کاواک افزایش

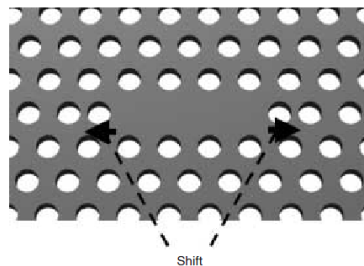
می‌یابد و کاواکی با ضریب کیفیت ۴۵۰۰۰ خواهیم داشت. ضریب کیفیت این کاواک توسط نرم افزار meep محاسبه شده است.

#### ۴. نتایج شبیه‌سازی ساختار

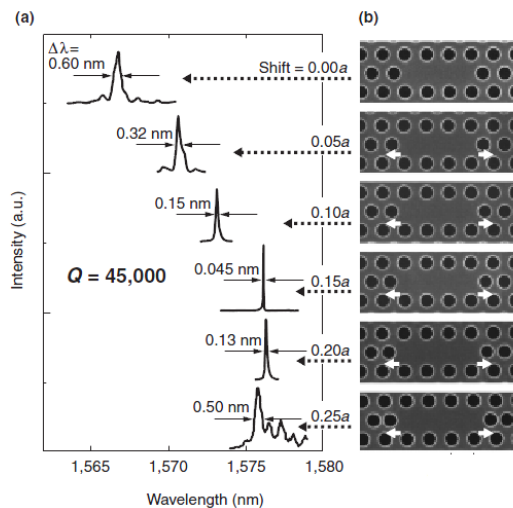
برای شبیه‌سازی ساختار ابتدا لازم است فرکانس کاری مناسب را به دست آوریم. بنابراین ابتدا شکاف باند ساختار را به دست می‌آوریم که در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به این که ساختار بلور فوتونی متشکل از حفره‌های هوا داخل دی‌الکتریک است، این ساختار فقط دارای مود TE می‌باشد [۱۱].



شکل ۲. مقایسه دو حسگر با ساختار موجبر (الف) شکاف و (ب) W1 [۲]

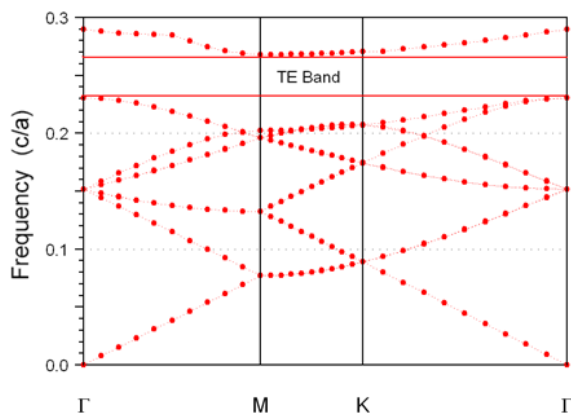


شکل ۳. ساختار میکروکاواک حاصل از حذف سه میله [۹]



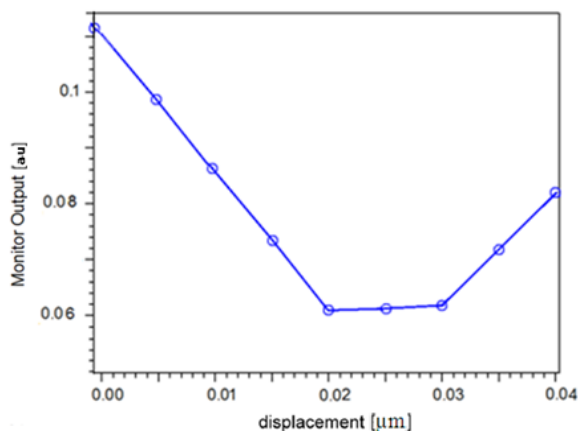
شکل ۴. نسبت تغییرات ضریب کیفیت به مقدار انتقال میله‌ها [۹]

این ساختار دارای شکاف باند فوتونی با طول موج در محدوده بین  $3/7\mu\text{m}$  تا  $4/34\mu\text{m}$  است. در مرحله اول برای به دست آوردن نسبت تغییرات شدت آشکار شده به جابه‌جایی، از طول موج  $4\mu\text{m}$  استفاده شده است که این فرکانس در گاف نوری ساختار قرار دارد. نمودار تغییرات شدت خروجی نسبت به جابه‌جایی در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، محدوده خطی اندازه‌گیری در این حسگر بین صفر تا  $20\text{ nm}$  است.



شکل ۵. منحنی شکاف باند بلور فوتونی





شکل ۶. منحنی تغییرات دامنه شدت خروجی نسبت به جابه‌جایی

ضریب رگرسیون (Regression) که یک عملگر ریاضی و نشان دهنده میزان خطی بودن تابع می‌باشد در محدوده صفر تا  $0.02$  میکرومتر برابر  $0.90878$  به دست آمده است. این عدد نشان دهنده خطی بودن عملکرد حسگر در این محدوده است. بر طبق شکل ۶ تغییرات شدت خروجی برابر  $0.05 = 0.06 - 0.11$  است. بنابراین مقدار حساسیت این حسگر از رابطه (۴) به دست می‌آید:

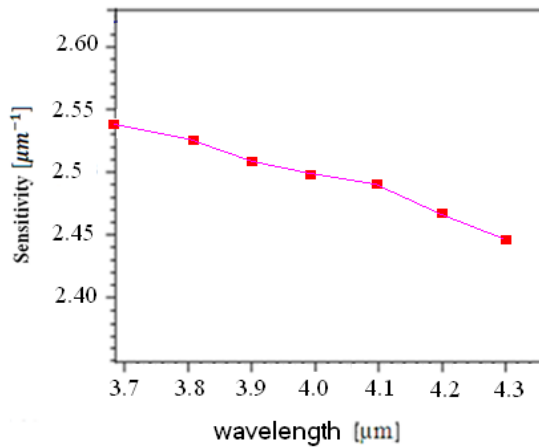
(۶)

$$\text{تغییرات شدت آشکار شده} \\ \text{تغییرات جابه‌جایی} = \text{حساسیت} \\ = \frac{0.050}{0.02\mu\text{m}} = 2.5 \mu\text{m}^{-1}$$

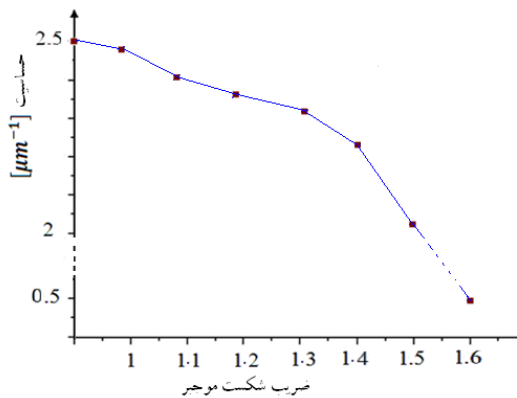
در مرحله بعد تأثیر تغییرات طول موج بر روی حساسیت بررسی شده است. با افزایش فرکانس و کاهش طول موج، حساسیت ساختار بیشتر خواهد شد [۱۰]. شکل ۷ میزان تغییرات حساسیت را نسبت به کاهش طول موج نشان می‌دهد. با تغییر طول موج از  $3.7\mu\text{m}$  تا  $4.34\mu\text{m}$  حساسیت بین  $2.54 \mu\text{m}^{-1}$  تا  $2.4 \mu\text{m}^{-1}$  تغییر می‌کند.

#### ۴-۱. تأثیر ماده داخل موجبر بر روی حساسیت

با افزایش ضریب شکست موجبر، ضریب شکست کلی ساختار نیز افزایش می‌یابد. این پدیده موجب حرکت نوارهای فوتونی ساختار باند به فرکانس‌های پایین‌تر شده در نتیجه باعث کاهش حساسیت ساختار خواهد شد [۱۰]. شکل ۸ نمودار تغییرات حساسیت را نسبت به تغییرات ضریب شکست ساختار نشان می‌دهد. با افزایش ضریب شکست ماده موجود در موجبر، حساسیت حسگر کاهش می‌یابد و با افزایش ضریب شکست به بیش از ۱/۵، حساسیت به شدت کاهش می‌یابد.



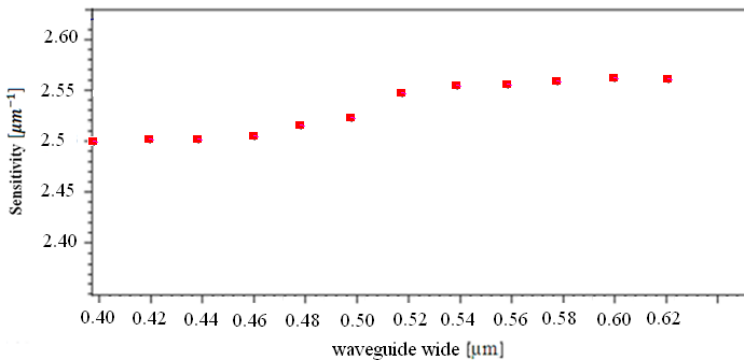
شکل ۷. تأثیر افزایش طول موج بر روی حساسیت حسگر جابه‌جایی



شکل ۸. نمودار تغییرات حساسیت با افزایش ضریب شکست موجبر

#### ۴-۲. افزایش حساسیت

یکی از روش‌های افزایش حساسیت ساختار، کاهش ضریب شکست نسبی ساختار است. با کاهش این ضریب نوارهای فوتونی ساختار باند به فرکانس‌های بالاتر حرکت می‌کنند. بنابراین مود نقص از لبه پایین گاف (نقطه M در بلور فوتونی) جدا شده و از نوع مود نقص پذیرنده خواهد شد [۱۰]. برای کاهش ضریب شکست نسبی ساختار راهکارهای مختلفی وجود دارد از جمله: استفاده از ماده‌ای به عنوان دی‌الکتریک با ضریب شکست نسبی کمتر، افزایش شعاع حفره‌های موجود در ساختار و افزایش پهناي موجبر. شکل ۹ نمودار نسبت حساسیت را به تغییرات عرض موجبر نشان می‌دهد. موجبر استفاده شده از نوع موجبر تیغه‌ای است و در این شکل، ماده استفاده شده در موجبر دارای ضریب شکست یک است.



شکل ۹. نمودار تغییرات حساسیت با افزایش عرض موجبر

با افزایش عرض موجبر حساسیت ساختار افزایش می‌یابد ولی این افزایش باعث افزایش تلفات ساختار و کاهش ضریب کیفیت کلی ساختار می‌شود. بیشترین مقدار ضریب کیفیت کاواک در این ساختار زمانی است که عرض موجبر برابر  $0.54 \mu\text{m}$  باشد. با افزایش عرض موجبر ضریب کیفیت کاواک نیز کاهش می‌یابد.

## ۵. نتیجه گیری

در این مقاله حسگر جابه‌جایی بر مبنای بلور فوتونی دو بعدی با ساختار مثلی متشکل از حفره‌های هوا داخل ماده‌ی الکترونیک ارائه شد. این حسگر دارای ضریب کیفیت کاواکی برابر ۴۵۰۰۰ و حساسیت  $2.54 \mu\text{m}^{-1}$  در محدوده‌ی بین صفر تا ۲۰ nm می‌باشد. بیشترین مقدار حساسیت زمانی است که عرض موجبر برابر  $0.54 \mu\text{m}$  و ضریب شکست ماده‌ی موجود در موجبر برابر یک و طول موج مورد استفاده برابر با  $3.7 \mu\text{m}$  باشد. در این حالت حساسیت حسگر برابر  $2.54 \mu\text{m}^{-1}$  خواهد بود. این حسگر نسبت به حسگرهای موجود در محدوده‌ی نانومتری دارای ضریب کیفیت بالاتر و حساسیت بیشتر است.

## منابع

1. Z. Xu, L. Cao, C. Gu, Q. He, and G. Jin; "Micro-displacement sensor based on line-defect resonant cavity in photonic crystal"; *Opt. Exp.* **14** (2006) 298–305.
2. D. Yang, H. Tian, and Y. Ji; "Micro-displacement sensor based on high-Q nanocavity in slot photonic crystal"; *Optical Engineering* **50**, No. 5 (2011) 544021-544026.
3. O. Levy, B.Z. Steinberg, M. Nathan, and A. Boag; "Ultrasensitive displacement sensing using photonic crystal waveguides"; *Applied Physics Letters* **86**, No. 10 (2005) 104102.
4. S. Olyaei, S. Hamedi, and Z. Dashtban; "Design of electronic sections for nano-displacement measuring system"; *Frontiers of Optoelectronics in China* **3**, No.4 (2010) 376-381.
5. S. Olyaei and S. Mohammad Nejad; "Design and simulation of velocity and displacement measurement system with subnanometer uncertainty based on a new stabilized laser Doppler-interferometer"; *The Arabian Journal for Science and Engineering* **32**, No. 2C (2007) 89-99.
6. B.Z. Steinberg; "Rotating photonic crystals: A medium for compact optical gyroscopes"; *Physical Review E* **71**, No. 1 (2005) 056621.
7. 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 Journal of Quantum Electronics* **43**, No. 2 (2007) 182-187.

8. H. A. Haus; “*Wave and fields in Optoelectronics*”, Prentice-Hall series in Solid State Physical Electronics, Englewood Cliffs, USA (1985).
9. Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, and S. Noda; “High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal”; *Nature* **425**, No. 30 (2003) 944-947.
10. S. C. Buswell, V.A. Wright, J.M. Buriak, V. Van, and S. Evoy; “Specific detection of proteins using photonic crystal waveguides”; *Optics Express* **16**, No. 20 (2008) 15949-15957.
11. S.G. Johnson and J.D. Joannopoulos; “*Introduction to Photonic Crystals, Bloch’s Theorem, Band Diagrams, and Gaps (But no Defects)*”; Lecture note of MIT (2003).