

## طراحی و شبیه‌سازی فشارسنج و شتاب‌سنج مبتنی بر مدارات مجتمع نوری با استفاده از اثر فوتوالاستیسیته لیتیوم نیوبات

ندا جودی<sup>۱</sup>، رضا اسدی<sup>۱</sup>، پیام حیدری<sup>۲</sup> و مریم گنجی<sup>۱</sup>

۱. مجتمع برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۲. دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودهن

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۲/۱۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۹/۱۴)

### چکیده

در این مقاله فشارسنج و شتاب‌سنج نوری جدیدی مبتنی بر ادوات میکروالکترواپتومکانیک با استفاده از تداخل‌سنج ماخ-زندر مجتمع در درجه لیتیوم نیوبات طراحی شده است. در این حسگر با اعمال فشار و شتاب، درجه دچار کرنش می‌شود و به علت اثر فوتوالاستیسیته تغییرات ضریب شکست در موج‌بر نوری واقع در درجه ایجاد می‌شود. تغییر ضریب شکست، باعث تأخیر فاز نور منتشر شده در موج‌بر گردیده و این تغییر فاز توسط تداخل‌سنج ماخ-زندر، به تغییرات شدت نور تبدیل می‌شود، برای محاسبه تنش ایجاد شده در درجه از نرم‌افزار ANSYS ۱۴/۵ استفاده شد و حساسیت فشارسنج و شتاب‌سنج طراحی شده به ترتیب  $2,22 \times 10^5$  (rad/Pa) و  $2,16 \times 10^5$  (rad.s<sup>2</sup>/m) به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: اپتیک مجتمع، دستگاه‌های میکروالکترواپتومکانیک، فشارسنج، فوتوالاستیک

### ۱. مقدمه

می‌باشد. اولین شتاب‌سنج مبتنی بر این فناوری در سال ۱۹۷۹ ارائه شد [۲]. فشار و شتاب‌سنج‌هایی که در طی سال‌های گذشته با استفاده از میکروماشین‌کاری ساخته شده‌اند غالباً از نوع پیزو مقاومتی و یا خازنی هستند، فشارسنج‌های پیزو مقاومتی به جهت پاسخ خطی که دارند مشهورند، اما وابسته به دما هستند. حسگرهای فشار

امروزه کوچک‌سازی انواع حسگرها از جمله شتاب و فشارسنج‌ها به خصوص برای استفاده در صنایع هوافضا و ماهواره برای کاربرد هدایت و ناوبری بسیار حائز اهمیت است [۱]. برای این منظور استفاده از فناوری میکروماشینی و دستگاه‌های میکروالکترومکانیک (MEMS) بسیار مورد توجه

۱۹۸۲، اولین فشارسنج تار نوری را مبتنی بر اثر فوتوالاستیک ارائه داد [۵]. این روش با توجه به قابلیت تار نوری برای استفاده در درون ساختمان‌ها و پل‌ها برای اندازه‌گیری تنش و فشارهای داخلی ساختمان، بسیار مورد توجه قرار گرفت [۶]. در سال‌های اخیر با رشد فناوری میکروماشین‌کاری، استفاده از این اثر برای ساخت فشارسنج‌های مجتمع بسیار مورد توجه قرار گرفته شده است و تاکنون انواع مختلفی از فشارسنج‌ها و شتاب‌سنج‌های نوری مجتمع در بستر مواد نیم‌رسانا و دی‌الکتریک از جمله سیلیکون (Si) طراحی و ساخته شده‌اند [۷-۹]. مزیت این نوع مواد فرایند ساده میکروماشین‌کاری در آنها می‌باشد، که علت آن استفاده گسترده این مواد در صنایع میکروالکترونیک و توسعه فرایندهای میکرولیتوگرافی و سونش<sup>۴</sup> در آنها است. با این حال در این مواد لازم است موج‌بر به صورت پله‌ای و با استفاده از فرایندهای سونش انجام شود. این امر باعث ایجاد اختلاف ضریب شکست زیاد بین ناحیه هسته و پیرامون موج‌بر می‌شود. بنابراین برای جلوگیری از تلفات نور درون موج‌بر در اثر نواقص و ناصافی‌های سطحی، احتیاج به دستگاه‌های لیتوگرافی بسیار دقیق (بهتر از یک میکرومتر) می‌باشد، که بسیار پرهزینه است.

برای رفع مشکلات مورد اشاره در فشارسنج‌های نوری مبتنی بر موج‌برهای سیلیکونی، در این طرح یک نمونه فشار و شتاب‌سنج نوری مجتمع، مبتنی بر اثر فوتوالاستیک در درجه‌ای از بلور لیتیم نیوبات ( $\text{LiNbO}_3$ ) طراحی و حساسیت آن بررسی می‌شود. مزیت بلور لیتیم نیوبات، امکان ساخت موج‌بر و مدارات مجتمع نوری در آن با روش‌های بسیار ساده‌تر و کم‌هزینه می‌باشد، زیرا در این ماده امکان ایجاد موج‌بر نوری با استفاده از فرایند نفوذ مواد مختلف برای تغییر ضریب شکست ناحیه موج‌بر وجود دارد. از جمله روش‌های ساده مورد استفاده برای ساخت موج‌بر در این بلور، لایه‌نشانی فلز Ti و نفوذ آن توسط قرار دادن در کوره در دمای حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد است که این روش به صورت گسترده برای

خازنی حساسیت کمتری نسبت به دما دارند، اما پاسخ آنها به فشار غیرخطی است، با وجود مزایای حسگرهای MEMS از لحاظ کوچکی مشکل عمده در این نوع حسگرها، نیاز آنها به مدارات مجتمع الکترونیکی برای خواندن و پردازش اطلاعات حسگر در محل حسگر و به صورت مجتمع می‌باشد، که ضمن پیچیده کردن فرایند ساخت آنها باعث حساسیت زیاد آنها به تداخل‌های الکترومغناطیس می‌شود. علاوه بر این، افزایش دمای قطعات الکترونیکی ضمن ایجاد خطر اشتعال می‌تواند باعث افزایش خطا و نوفه حسگر شود.

برای رفع مشکلات مورد اشاره، استفاده از فناوری میکرواپتو الکترومکانیک (MOEMS) به جای MEMS و استفاده از سیگنال نوری به جای سیگنال الکترونیکی می‌تواند مؤثر باشد. به این ترتیب می‌توان با استفاده از مدارات مجتمع نوری ضمن کوچک‌سازی حسگر، از اثر نامطلوب تداخل‌های الکترومغناطیسی و افزایش دما مصون ماند، از طرفی در این دستگاه‌ها، اندازه‌گیری و تحلیل سیگنال حسگر در محل حسگر مورد نیاز نیست و سیگنال‌های نوری می‌توانند در تارهای نوری منتقل شوند، این ویژگی مخصوصاً در محیط حاوی مواد منفجره و یا در محیط‌های حساس الکترومغناطیسی بسیار مهم است.

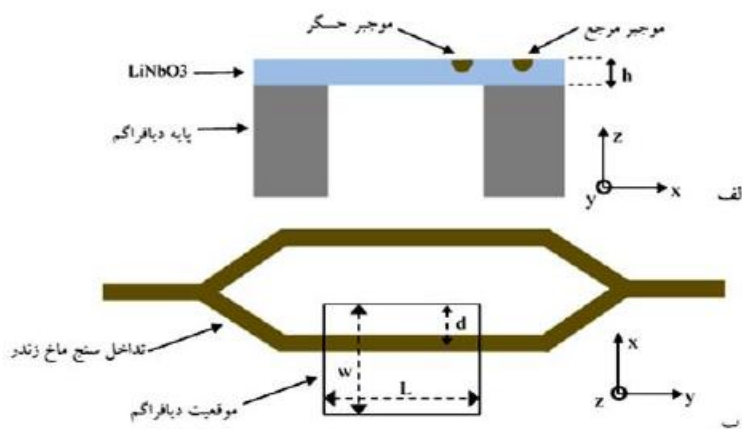
یکی از روش‌های مورد استفاده در فشارسنج‌های نوری، استفاده از اثر فوتوالاستیک است. در این اثر، که برای اولین بار توسط دیوید بروستر<sup>۱</sup> در سال ۱۸۱۵ کشف شد، دوشکستی<sup>۲</sup> مصنوعی در اثر تنش مکانیکی ایجاد می‌شود و ضریب شکست در ماده متناسب با تنش و فشار اعمالی تغییر می‌کند [۳]. این اثر عموماً برای اندازه‌گیری تنش‌های داخلی باقی مانده در مواد مختلف در فرایند تولید که تأثیر زیادی در کیفیت و استحکام محصولات دارد، مورد استفاده قرار گرفته می‌گیرد [۴]. با توسعه فناوری تار نوری، اسپیلمن<sup>۳</sup> در سال

۱. David Brewster

۲. Birefringence

۳. Spillman

۴. Etching



شکل ۱. طرح‌واره فشارسنج دریچه‌ای مبتنی بر اثر فوتوالاستیسیته با استفاده از تداخل‌سنج ماخ-زندر، (الف) نگاه از برش در صفحه  $XZ$  از محل دیافراگم و (ب) نگاه از بالای صفحه دریچه.

برای مدولاسیون با بسامد مورد نظر قرار گیرد. فاز نور در موجبر قرار داده شده بر روی دریچه، تحت کرنش ناشی از اعمال فشار تغییر می‌کند و سپس توسط تداخل‌سنج ماخ-زندر با نور مرجع تداخل داده می‌شود. اگر دو نور خروجی از هر یک از شاخه‌ها هم‌فاز باشند، تداخل از نوع سازنده و شدت خروجی بیشینه می‌شود، و زمانی که دو نور خروجی  $180^\circ$  درجه اختلاف فاز داشته باشند تداخل از نوع مخرب و شدت خروجی کمینه می‌شود. به این ترتیب با اندازه‌گیری شدت خروجی امکان اندازه‌گیری اختلاف فاز ایجاد شده، که متناسب با فشار اعمالی است، میسر می‌شود. طول ( $L$ )، عرض ( $w$ ) و ضخامت ( $h$ ) اولیه دریچه به ترتیب  $3\text{ mm}$ ،  $2\text{ mm}$  و  $20\ \mu\text{m}$  در نظر گرفته شده است. عرض و عمق موجبر برای تطبیق با اندازه تار  $10\ \mu\text{m}$  می‌باشد که در درون بلور  $\text{LiNbO}_3$  با روش نفوذ فلزات مختلف از جمله  $\text{Ti}$  قابل ساخت است. مکان موجبر برای دست‌یابی به بیشترین حساسیت انتخاب می‌شود و همان طور که در ادامه نشان داده خواهد شد این مکان مناسب با لبه دریچه می‌باشد. البته با توجه به محدودیت‌های ساخت فاصله موجبر تا لبه دریچه  $d=0.1\text{ mm}$  در نظر گرفته شده است.

### ۳. نظریه

تغییر در ضریب شکست به علت تنش<sup>۵</sup> خارجی به عنوان اثر

ساخت مدارات مجتمع نوری مورد نیاز در صنایع مخابرات به صورت تجاری استفاده می‌شود [۱۰ و ۱۱]. علاوه بر این، استفاده از روش نفوذ، برخلاف استفاده از روش‌های سونش که در دیگر مواد (مثل  $\text{Si}$ ) متداول است، باعث ایجاد اختلاف ضریب شکست کم بین موجبر و محیط پیرامون و همین‌طور تغییرات تدریجی ضریب شکست در لبه موجبر و در نتیجه کاهش تلفات نور در موجبر می‌شود. از طرف دیگر ماده لیتیوم نیوبات (بر خلاف  $\text{Si}$  و  $\text{SiO}_2$ ) دارای خواص الکترواپتیک مناسبی است که از آن برای ساخت مدولاتورهای الکترواپتیک با بسامد بالا (بیش از یک گیگاهرتز) استفاده می‌شود. بنابراین با استفاده از این ماده این امکان فراهم می‌شود تا حساسیت حسگر را با استفاده از مدوله کردن سیگنال در بسامد مشخص و حذف بسامدهای دیگر توسط فیلترهای بسامدی مناسب، افزایش داد.

### ۲. ساختار طرح

شکل ۱ طرح‌واره حسگر طراحی شده با استفاده از تداخل‌سنج ماخ-زندر را نشان می‌دهد که متشکل از دو موجبر است و در آن نور از طریق تار نوری وارد می‌شود و به دو قسمت تقسیم شده و در دو مسیر مجزا درون دو موجبر انتشار می‌یابد، یک شاخه از موجبرها بر روی دریچه و تحت تأثیر اعمال فشار و یا شتاب قرار می‌گیرد، و شاخه دیگر خارج از دریچه به عنوان موجبر مرجع استفاده می‌شود که می‌تواند تحت میدان الکتریکی

با توجه به تقارن تانسور  $P$  ( $P_{ijk}=P_{jik}$  و  $P_{ijk}=P_{jki}$ )، رابطه (۲) را می‌توان با استفاده از نماد گذاری به صورت  $\alpha_1=1, \alpha_2=2, \alpha_3=3, \alpha_4=4, \alpha_5=5, \alpha_6=6$  به شکل ضرب ماتریسی مطابق رابطه (۳) بازنویسی کرد [۱۲]:

$$\Delta a_m = \sum_n P_{mn} \delta_n \quad (m, n) = 1, 2, \dots, 6 \quad (3)$$

بلور  $\text{LiNbO}_3$  در دمای اتاق به صورت شبکه‌ای با تقارن مثلثی ۳m است، که انواع تجاری آن عموماً به صورت متجانس<sup>۷</sup> رشد داده می‌شوند و دارای ماتریس  $P$  به صورت زیر می‌باشد [۱۳ و ۱۴]:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{11} & P_{13} & -P_{14} & 0 & 0 \\ P_{31} & P_{31} & P_{33} & 0 & 0 & 0 \\ P_{41} & -P_{41} & 0 & P_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} & P_{41} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{14} & (P_{11} - P_{12})/2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0261 & 0.0876 & 0.1335 & -0.0832 & 0 & 0 \\ 0.0876 & -0.0261 & 0.1335 & 0.0832 & 0 & 0 \\ 0.1767 & 0.1767 & 0.0702 & 0 & 0 & 0 \\ -0.1507 & 0.1507 & 0 & 0.1453 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1653 & -0.1507 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0832 & 0.0876 \end{bmatrix} \quad (4)$$

با محاسبه تغییر مؤلفه‌های ماتریس  $a$  توسط رابطه (۳)، امکان محاسبه تغییر ضریب شکست با توجه به جهت انتشار و قطبش نور به دست می‌آید. برای این منظور باید معادله بیضی (دوبعدی) ناشی از تقاطع صفحه عمود بر بردار موج نور ( $k$ ) را با بیضوی ضریب شکست به دست آورد، جهت قطرهای بزرگ و کوچک بیضی به دست آمده، جهت بردار جابه‌جایی الکتریکی ( $D$ ) نور و اندازه آنها، ضرایب شکست برای دو ویژه‌مد ماده (برای بردار موج  $k$ ) را مشخص می‌کنند. محاسبه ضریب شکست برای قطبش مورد نظر باید با توجه به سهم هر یک از ویژه‌مدها در قطبش اولیه محاسبه شود. به این ترتیب با محاسبه تغییر ضریب شکست برای قطبش مورد نظر، تغییر فاز نور درون موج‌بر و شدت نور خروجی تداخل‌سنج به صورت زیر به دست می‌آیند [۱۳]:

فوتوالاستیسیته شناخته می‌شود. مبنای عملکرد فشارسنج مجتمع نوری مبتنی بر اثر فوتوالاستیسیته به این ترتیب است که اعمال فشار بر روی دریچه که موج‌بر نوری در آن ایجاد شده است، باعث تغییر ضریب شکست و در نتیجه تغییر فاز نور درون موج‌بر متناسب با اعمال فشار می‌شود. بنابراین با اندازه‌گیری مقدار تغییر فاز نور، می‌توان فشار اعمالی به دریچه را اندازه‌گیری کرد.

اعمال فشار باعث خمیدگی دریچه و ایجاد تنش و کرنش<sup>۸</sup> در آن خواهد شد. تنش نسبت نیروی اعمال شده به سطح است، که منجر به کرنش درون دریچه می‌شود و کرنش نسبت تغییرات طول (بر اثر تنش اعمال شده) به طول قبل از اعمال تنش است. تغییر طول ناشی از کرنش نیز باعث تغییر تانسور گذردهی و در نتیجه ضریب شکست ماده می‌شود. با توجه به جهت اعمال فشار، کرنش و تغییر طول ایجاد شده در جهات مختلف متفاوت است. این اثر باعث ایجاد ناهمسان‌گردی در ماده و تفاوت تغییر ضریب شکست برای نور با قطبش‌های مختلف و جهات انتشار مختلف می‌شود. بنابراین برای مشخص کردن ضریب شکست (قبل و بعد از اعمال فشار) لازم است از معادله بیضوی (سه‌بعدی) ضریب شکست رابطه (۱) استفاده شود. با استفاده از این بیضوی می‌توان ضریب شکست و راستای قطبش و ویژه‌مد نور مربوط به جهت نور انتشاری مورد نظر را مشخص کرد. معادله بیضوی در حالت کلی در دستگاه مختصات دکارتی  $(x, y, z)$  به صورت زیر است [۱۲]:

$$\sum_{ij} a_{ij} x_i x_j = 1 \quad i, j = x, y, z \quad (1)$$

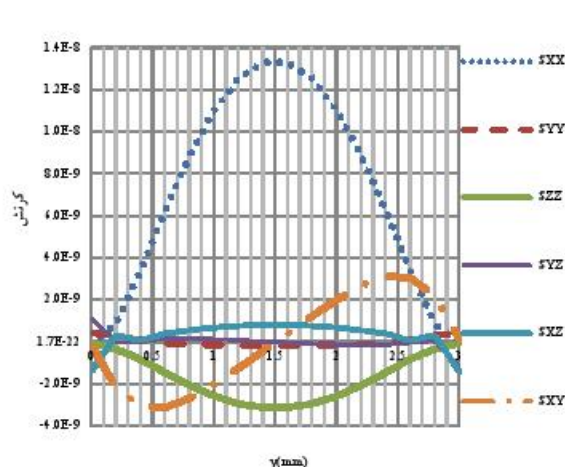
در اثر پدیده فوتوالاستیک، کرنش ایجاد شده در اثر فشار باعث تغییر ضرایب  $a$  به صورت زیر می‌شود [۱۲]:

$$\Delta a_{ij} = \sum_{kl} P_{ijkl} \delta_{kl} \quad (2)$$

که در آن تانسور فوتوالاستیک و  $\delta_{kl}$  تانسور کرنش می‌باشند. مؤلفه‌های قطری تانسور کرنش ( $\delta_{xx}, \delta_{yy}, \delta_{zz}$ ) کرنش اصلی و مؤلفه‌های غیر قطری آن ( $\delta_{xy}, \delta_{yz}, \delta_{xz}$ ) کرنش برشی هستند.

۷. Congruent

۸. Strain

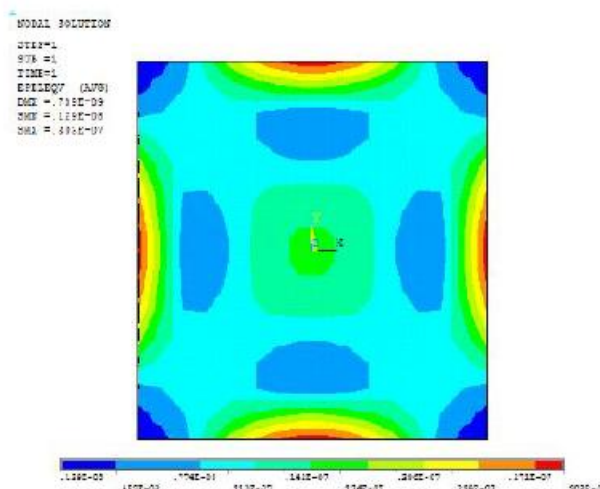


شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) کرنش در عمق ۵ میکرومتری در محل موج‌بر (با فاصله ۱۰۰ میکرومتر از لبه درجه) بر اثر اعمال فشار بکنواخت یک پاسکال.

نرم‌افزار از روش مدل‌سازی اجزای محدود برای حل معادلات دیفرانسیل استفاده می‌شود و در آن امکان محاسبه جابه‌جایی، تنش و کرنش ایجاد شده در اثر اعمال فشار میسر است [۱۵].

برای شبیه‌سازی، یک درجه مربعی به ضلع ۳ میلی‌متر و با ضخامت ۲۰ میکرومتر با لبه‌های محکم شده در صفحه  $xy$  در نظر می‌گیریم سپس مقدار کرنش ایجاد شده در اثر فشار بکنواخت یک پاسکال در راستای محور  $z$  در نقاط مختلف سطح درجه محاسبه می‌شود. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول ۱ ارائه شده است. برای اعمال شرایط مرزی، مقدار جابه‌جایی درجه در لبه‌ها صفر در نظر گرفته می‌شود.

در شکل ۲ نتایج شبیه‌سازی برای مقدار کرنش فون میزس<sup>۸</sup> (کرنش معادل) نشان داده شده است. مطابق انتظار و همین‌طور بر اساس شکل ۲ بیشترین تنش و کرنش در نزدیک لبه درجه ایجاد می‌شود. بنابراین مکان موج‌بر در نزدیک لبه درجه و با فاصله ۱۰۰ میکرومتر از لبه در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۳ مقدار مؤلفه‌های مختلف کرنش در لبه موج‌بر و در عمق ۵ میکرومتری نشان داده شده است. علت انتخاب عمق ۵



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) کرنش فون میزس درجه مربعی به ضلع ۳ mm و ضخامت ۲۰ μm با اعمال فشار بکنواخت یک پاسکال.

جدول ۱. مقادیر مورد استفاده در طراحی و شبیه‌سازی [۱۶].

مادول یانگ	۱۸۰ Gpa
ضریب پواسن	۰٫۱۲۴
چگالی	۴٫۶۴۸ g/cm <sup>۳</sup>
فشار	۱ Pa

$$\Delta\phi = \frac{\gamma\pi}{\lambda} \Delta n, \quad (5)$$

$$I = \frac{I_0}{2} (1 + \cos(\Delta\phi + \phi_0)), \quad (6)$$

که در آن  $I_0$  و  $\phi_0$  به ترتیب شدت ورودی و اختلاف فاز دو شاخه موج‌بر بدون اعمال فشار است. مقدار  $\phi_0$  می‌تواند به علت اختلاف طول موج‌برهای دو شاخه ایجاد شود و یا در مورد مواد الکترواپتیکی مثل  $\text{LiNbO}_3$  این فاز می‌تواند توسط اعمال میدان الکتریکی، کنترل و همین‌طور در بسامد مشخصی مدوله شود، که باعث مدوله شدن شدت نور خروجی ماخ-زندر خواهد شد.

#### ۴. شبیه‌سازی کرنش

برای محاسبه مقدار کرنش اعمالی به درجه از شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS ۱۴٫۵ استفاده می‌شود، در این

۸. V on Mises

راستای محور  $y$  و جهت قطبش نور را در راستای  $z$  در نظر می‌گیریم. در این صورت عناصر غیر قطری ضرایب  $a$  صفر خواهند شد. با توجه به این که برای نور منتشر شده در راستای  $y$  مؤلفه قطبش نور نیز در راستای  $y$  صفر است، معادله بیضی ضریب شکست (ناشی از تقاطع صفحه عمود بر بردار موج با بیضوی سه بعدی ضریب شکست) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$a_1 x^2 + a_2 z^2 = 1 \quad (7)$$

که در آن  $a_1$  و  $a_2$  مؤلفه‌های ماتریس قطری شده  $a$  قبل از اعمال فشار است که مقادیر آن از ضرایب شکست اولیه ماده به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$a_1 = \frac{1}{n_o^2} = 0.7204 \quad (8)$$

$$a_2 = \frac{1}{n_e^2} = 0.718$$

$n_o = 2.14$  و  $n_e = 2.14$  [۱۸] به ترتیب ضرایب شکست بلور  $\text{LiNbO}_3$  برای قطبش‌های موازی محور  $x$  و  $z$  در طول موج نور عبوری  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  می‌باشند، که به ضرایب شکست عادی و غیر عادی معروف هستند.

بعد از اعمال فشار، معادله بیضوی ضریب شکست به صورت زیر خواهد بود.

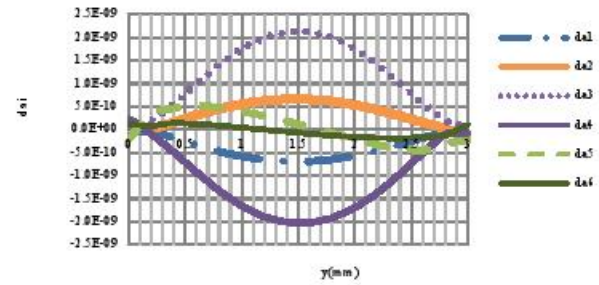
$$(a_1 + da_1)x^2 + da_2 y^2 + (a_2 + da_2)z^2 + da_3 yz + da_4 xz + da_5 xy = 1 \quad (9)$$

با توجه به این که جهت انتشار و بردار موج در راستای محور  $y$  است، معادله بیضی ضریب شکست (ناشی از تقاطع صفحه عمود بر بردار موج و معادله بیضوی ضریب شکست) با قرار دادن  $y = 0$  در رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$(a_1 + da_1)x^2 + (a_2 + da_2)z^2 + da_5 xz = 1 \quad (10)$$

وجود مؤلفه غیر قطری  $da_5$  در معادله بیضی ضریب شکست، باعث چرخش بیضی می‌شود. برای محاسبه ضرایب شکست جدید باید اندازه و جهت قطرهای بزرگ و کوچک بیضی ضریب شکست مشخص شوند. برای این منظور ابتدا مقدار چرخش بیضی را به صورت زیر به دست می‌آوریم:

$$\tan(\theta_p) \approx P(\text{pas}) \frac{da_5(\text{pas})}{a_1 - a_2} \approx P(\text{pas}) \times 10^{-12} (\text{rad}) \quad (11)$$



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تغییرات ضرایب بیضوی ضریب شکست  $(da_i)$  موج‌بر تحت اعمال فشار پکنواخت یک پاسکال در عمق ۵ میکرومتری موج‌بر.

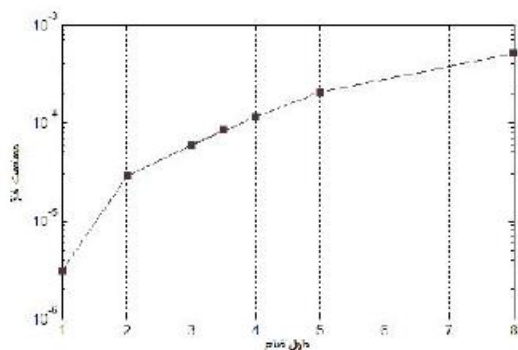
میکرومتر از این جهت است که عمق موج‌بر نوری برای تطبیق با تار ورودی  $10^\circ$  میکرومتر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین تمرکز نور منتشر شده در موج‌بر تقریباً در مرکز موج‌بر و عمق ۵ میکرومتری خواهد بود.

همین‌طور حداکثر شتاب قابل تحمل درپچه قبل از شکست با توجه به آستانه تحمل  $^9$  لیتیوم نیوبایت و چگالی آن که به ترتیب  $110 \text{ MPa}$  [۱۷] و  $4.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  است، با استفاده از شبیه‌سازی تنش فون می‌زس توسط نرم‌افزار برابر  $2.72 \times 10^3 \text{ m/s}^2$  است.

## ۵. محاسبه تغییر فاز نور خروجی از موج‌بر

برای محاسبه تغییر فاز نور خروجی از موج‌بر (در اثر فشار اعمالی)، ابتدا با استفاده از مقدار کرنش به دست آمده در شکل ۳ و رابطه ۳، مقدار تغییر در ضرایب بیضوی ضریب شکست محاسبه می‌شود، که نتایج آن در شکل ۴ ارائه شده است.

همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است از بین مؤلفه قطری، مؤلفه  $da_3$  بیشترین تغییرات را دارد. بنابراین برای داشتن بیشترین حساسیت همچنین برای جلوگیری از پیچیدگی محاسبات، دستگاه مختصات قبل از اعمال فشار را منطبق بر محورهای اصلی و محور  $z$  را منطبق بر محور اپتیکی بلور  $\text{LiNbO}_3$  در نظر می‌گیریم. همین‌طور جهت موج‌بر و جهت انتشار نور را در



شکل ۶. تغییر حساسیت حسگر با تغییرات ضلع درجه مربعی.

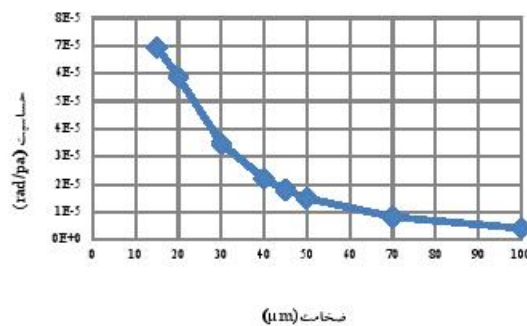
صورت زیر به دست می‌آید

$$S_p = \frac{d\phi}{dp} = \Delta\phi (1\text{pas}) \approx 5,787 \times 10^{-5} \frac{\text{rad}}{\text{pas}} \quad (14)$$

فشارسنج طراحی شده، امکان استفاده به عنوان شتاب‌سنج را نیز دارد که حساسیت آن با در نظر گرفتن چگالی و ضخامت درجه به صورت زیر به دست می‌آید

$$S_a = \frac{d\phi}{da} = S_p \frac{dP}{da} = S_p \rho h \approx 1,725 \times 10^{-6} \frac{\text{rad/s}^2}{\text{m}} \quad (15)$$

در شکل ۵ بستگی حساسیت حسگر به ضخامت‌های مختلف درجه در محدوده ۱۵ تا ۱۰۰ میکرومتر برای درجه مربعی با ابعاد ۲ میلی‌متر و در شکل ۶ تغییرات حساسیت با تغییر اندازه ضلع درجه مربعی نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است برای ضخامت‌های کمتر از ۵۰ میکرومتر، حساسیت با شیب زیادی افزایش می‌یابد. البته به علت افزایش تلفات توزیع نور بین تار و موج‌بر (ناشی از کاهش تطابق اندازه موج‌بر با تار نوری که معمولاً قطر هسته حدود ۹ میکرومتر دارند) در روش ساخت موج‌بر در  $\text{LiNbO}_3$  (با روش نفوذ فلز Ti تا عمق  $10 \mu\text{m}$ ) امکان کاهش ضخامت کمتر از  $10 \mu\text{m}$ ، به علت تلفات نور ممکن نیست. همین‌طور از شکل ۶ مشخص است که افزایش طول از ۳ mm تا ۵ mm بدون این‌که باعث افزایش زیادی در پیچیدگی‌های فرایند ساخت شود، حساسیت تا حدود ۴ برابر می‌شود. بنابراین انتخاب طول ۵ mm و ضخامت  $20 \mu\text{m}$  می‌تواند گزینه مناسبی برای ساخت نسبتاً ساده و حساسیت بالا باشد، که در این صورت مقدار حساسیت فشار و شتاب به ترتیب حدود  $2,733 \times 10^{-4} \frac{\text{rad}}{\text{pas}}$  و  $2,716 \times 10^{-5} \frac{\text{rad/s}^2}{\text{m}}$



شکل ۵. تغییر حساسیت حسگر با تغییرات ضخامت درجه.

همان‌طور که از رابطه فوق مشخص است مقدار چرخش متناسب با مقدار مؤلفه غیرقطری است. همین‌طور هر چه اختلاف اولیه قطره‌های بیضی (مخرج کسر) کمتر باشد، یا به عبارتی بیضی به شکل دایره نزدیک‌تر باشد، مقدار چرخش بیشتر خواهد بود. همین‌طور در رابطه فوق از این ویژگی که مقدار کرنش و در نتیجه مقادیر مؤلفه‌های  $da$ ، رابطه خطی با فشار دارند استفاده شده است. به این ترتیب می‌توان مشاهده کرد که حتی برای فشار ۱ MPa، مقدار چرخش بیضی کمتر از یک میکرورادیان است که قابل صرف‌نظر می‌باشد. بنابراین با صرف نظر کردن از چرخش بیضی، جهت قطبش دو ویژه‌مد تغییر نمی‌کند. با توجه به این‌که قطبش اولیه در راستای یکی از ویژه‌مدها (محور z) در نظر گرفته شده است، تغییر ضریب شکست مشاهده شده توسط نور درون موج‌بر برابر با تغییر ضریب شکست ویژه‌مد قطبش می‌باشد، و به صورت زیر خواهد بود:

$$\Delta n = \frac{1}{\sqrt{a_{\tau_0} + da_{\tau}}} - \frac{1}{\sqrt{a_{\tau_0}}} \approx -0,5 n_0^3 da_{\tau} \quad (12)$$

در رابطه فوق از تقریب  $da_{\tau} \gg a_{\tau_0}$  استفاده شده است. با توجه به این‌که  $da_{\tau}$  در طول موج‌بر متغیر است، تغییر فاز نور به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{\lambda} \int_{y=0}^{y=l} \Delta n(y) dy = -\frac{\pi n_0^3}{\lambda} L \langle da_{\tau} \rangle \quad (13)$$

که در آن  $\langle da_{\tau} \rangle$  میانگین  $da_{\tau}$  در طول موج‌بر در روی درجه ( $3 \text{ mm}$ ) می‌باشد و  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$  در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب با در نظر گرفتن  $da_{\tau}$  در شکل ۵ اختلاف فاز برای فشار یک پاسکال که معادل حساسیت فاز حسگر است، به

خواهد بود.

برای مقایسه مقدار حساسیت به دست آمده نسبت به نتایج روش‌های دیگر، می‌توان به موارد مبتنی بر موج‌برهای نوری در دریچه سیلیکونی در مراجع ۸ و ۹ اشاره کرد، که در آنها حساسیت به ترتیب  $\frac{rad}{pas} \times 10^{-6} \times 2/6$  و  $\frac{rad}{pas} \times 10^{-5} \times 9$  به دست آمده است که کمتر از حساسیت به دست آمده در این طراحی است. همین‌طور در خصوص حساسه‌های مبتنی بر موج‌برهای نوری در ماده  $LiNbO_3$  تنها مورد گزارش شده، مربوط به شتاب‌سنج طراحی شده در مرجع [۱۹] در سال ۲۰۱۲ است، که در آن با استفاده از روش جرم آزمون حساسیت شتاب  $rad/m/s^2 \times 10^{-7} \times 3/22$  به دست آمده است. در روش جرم آزمون، کرنش درون موج‌بر به علت فشار ناشی از وزن جرم آزمون اعمال می‌شود، مزیت این روش پیچیدگی کمتر فرایند ساخت ناشی از عدم نیاز به ساخت دریچه است. با این حال همان‌طور که در این مقاله نشان داده شد، استفاده از دریچه امکان افزایش حساسیت شتاب تا حدود ۲ مرتبه را فراهم می‌کند.

علاوه بر این، باید توجه داشت که حداقل مقدار فشار و شتاب قابل اندازه‌گیری، علاوه بر حساسیت حسگر به مقدار نوفه دستگاه اندازه‌گیری و همچنین نوسانات شدت نور ورودی وابسته خواهد بود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مزیت عمده استفاده از ماده  $LiNbO_3$  علاوه بر افزایش حساسیت، امکان استفاده از خاصیت الکترواپتیک آن برای ایجاد اختلاف فاز اولیه و مدوله کردن شدت نور با استفاده از اعمال میدان الکتریکی است. این نکته از این جهت حائز اهمیت است که برای اندازه‌گیری اختلاف فاز و تبدیل آن به اختلاف شدت نور قابل اندازه‌گیری توسط آشکارساز، لازم است از یک تداخل‌سنج ماخ-زندر استفاده شود. این روش باعث می‌شود تا مطابق رابطه (۶) حساسیت حسگر، برای شرایطی که اختلاف فاز اولیه‌ای در دو شاخه ماخ-زندر نباشد، صفر شود. بنابراین لازم است برای دستیابی به بیشترین حساسیت اختلاف فاز اولیه دو شاخه موج‌بر برابر با  $\frac{\pi}{4}$  باشد که این امر معمولاً با تغییر طول

یکی از دو شاخه انجام می‌شود، که برای دستیابی به آن نیاز به تجهیزات لیتوگرافی با دقت زیاد (حدود ۱۰۰ nm) می‌باشد. اما در صورت استفاده از بلور  $LiNbO_3$  با توجه به خاصیت الکترواپتیک مناسب آن، می‌توان از اعمال میدان الکتریکی بر روی یکی از شاخه‌های ماخ-زندر برای ایجاد اختلاف فاز اولیه دلخواه استفاده کرد. در این روش اعمال میدان الکتریکی باعث تغییر ضریب شکست در اثر خاصیت الکترواپتیک می‌شود. بنابراین این روش که با استفاده از قراردادن الکترودهایی در مجاورت موج‌بر میسر می‌شود و روشی متداول برای ساخت مدولاتورهای الکترواپتیک مجتمع است، می‌تواند باعث کاهش هزینه تولید و هزینه تجهیزات مورد نیاز برای ساخت حسگر شود.

علاوه بر این موارد، مشکل دیگر این نوع حسگرها، وابستگی حساسیت به مقدار تغییر فاز ناشی از فشار رابطه (۳) است. بنابراین حتی در صورت تنظیم فاز اولیه برای دستیابی به بیشترین حساسیت، با افزایش فشار حساسیت کاهش می‌یابد. از این جهت نیز استفاده از بلور  $LiNbO_3$  این مشکل را با امکان تغییر فاز اولیه با تغییر ولتاژ اعمالی به راحتی رفع می‌کند. به این ترتیب با استفاده از یک مدار الکترونیکی حلقه بسته می‌توان همواره نقطه کار حسگر را در بیشترین حساسیت تنظیم کرد. در این صورت اختلاف فاز ایجاد شده در اثر اعمال ولتاژ الکتریکی دقیقاً عکس اختلاف فاز ایجاد شده توسط اعمال فشار است. بنابراین مقدار فشار مستقیماً از مقدار ولتاژ اعمالی برای ثابت نگه داشتن شدت خروجی ماخ-زندر در نقطه کار با بیشترین حساسیت مشخص خواهد شد.

در خصوص تفاوت نوع مدار الکترونیکی مورد نیاز برای طرح ارائه شده در این تحقیق نسبت به مدارات الکترونیکی حسگرهای مبتنی بر MEMS این توضیح لازم است که در مدار الکترونیک حسگرهای مبتنی بر MEMS، مدار الکترونیک علاوه بر تأمین ولتاژ کار حسگر، وظیفه خواندن و اندازه‌گیری سیگنال را نیز به عهده دارد و عمده پیچیدگی این نوع مدارات نیز مربوط به بخش خواندن آن است، زیرا برای کاهش نوفه لازم است به صورت مجتمع در کنار حسگر و به صورت همزمان با



دریچه با توجه به محدودیت‌های ساخت انتخاب شد. حساسیت به دست آمده بیشتر از حساسیت حسگرهای مشابه مبتنی بر موج‌برهای نوری مجتمع است و با توجه به سادگی ساخت موج‌بر در ماده‌ی انتخابی، همین طور امکان استفاده توأم خواص الکترواپتیکی و الاستواپتیکی برای مدولاسیون و کنترل فاز (برای کاهش نوفه و تنظیم نقطه کار سنسور در بیشترین حساسیت) می‌تواند مزیت خوبی برای ساخت حسگرهای فشار و شتاب باشد.

استفاده از فناوری میکروالکترونیک ساخته شود. در حالی که در روش پیشنهادی در این طرح مدار الکترونیک فقط برای اعمال ولتاژ و تعیین نقطه کار حسگر مورد نیاز است و نیازی به مجتمع‌سازی آن در کنار حسگر نیست.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، حسگر فشار و شتاب مبتنی بر یک تداخل‌سنج ماخ-زندر بر روی دریچه قابل انعطاف  $\text{LiNbO}_3$  طراحی شد و اثر ضخامت و طول دریچه بر حساسیت بررسی و ابعاد مناسب

## مراجع

1. K Zandi et al., *J. MEMS Sys.* **21** (2012) 1464.
2. N Maluf, K Williams, "An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering", Artech House Inc, Boston London (2004).
3. N Di, "Photoelastic and Electro-Optic Effects: Study of PMN-29%PT Single Crystals", Rochester, New York (2009).
4. C P Fernandes, P O J Glantz, S A Svensson, A Bergmark, *Dental Materials* **19** (2003) 106.
5. W B Spillman, *Opt. Lett.* **7** (1982) 388.
6. A Wang, S He, X Fang, X Jin, and J Lin, *J. Lightwave Tech.* **10** (1992) 1466.
7. H Porte, V Gorel, S Kiryenko, J P Goedgebuer, W Daniau, and P Blind, *J. Lightwave Technol.* **17** (1999) 229.
8. R Ambrosio, G Lara, A Jimenez, J Mireles, J Ibarra, and A Heredia, "IEEE, International conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices", (2012) 324.
9. P K Pattnaik, A Selvarajan, T Badrinarayana and T Srinivas, "Guided Wave Optical MEMS Pressure Sensors", Proc. of ISA/IEEE Conference on Sensors for Industry (2005) 122.
10. J Noda, *Opt. Comm.* **1** (1980) 64.
11. M Valli, A Floretti, and M N Armenise, *J. Modern Optics* **35** (1988) 885.
12. B E A Saleh and M C Teich, "Fundamentals of Photonics", John Willey (2006).
13. M Jazbinšek and M Zgonik, *Appl. Phys. B* **74** (2002) 407.
14. K Iizuka, "Elements of Photonics", Wiley (2002).
15. ح وهابی، «طراحی مکانیزم‌های صنعتی با استفاده از روش المان محدود در نرم‌افزار ANSYS»، اندیشه‌سرا (۱۳۹۱).
16. R Riveria, G Garcia, J Olivares, M L Crespillo, *Journal of Physics Applied Physics D* **44** (2011) 11.
17. M Domenjoud, M Lematre, M Gratton, M Lethiecq, and L P Tran-Huu-Hue, *IEEE Trans. Ultr. Ferr. Contr.* **60** (2013) 2219.
18. K K Wong, "Properties of Lithium Niobate", INSPEC/Institution of Electrical Engineers (2002).
19. T Dong-Lin, D Bing, H Shan, X Kun-Qing, Z LIANG, and W PENG, *Optica Applicata* **42** (2012) 121.