

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فنی مهندسی

بخش مهندسی برق

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش الکترونیک

---

---

طراحی و تحلیل حسگر فشار مبتنی بر ساختار بلور نوری

---

---

مؤلف:

سعید شاکری نژاد

استاد راهنما:

دکتر مریم پورمحمی آبادی

استاد مشاور:

مهندس علیرضا انوری

بهمن ماه ۱۳۹۳



این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی برق

دانشکده فنی مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: سعید شاکری نژاد

استاد راهنما: دکتر مریم پورمحمی آبادی

استاد مشاور: مهندس علیرضا انوری

داور ۱: دکتر احمد حکیمی

داور ۲: دکتر جمیله سیدیزدی

نماینده تحصیلات تکمیلی در جلسه دفاع: دکتر محسن صانعی

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده: دکتر مرتضی زندرحیمی

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

تقدیم به :

پدر و مادر عزیزم که همواره در طول زندگی تکیه گاه، همراه و متحمل زحماتم بودید،  
هرچه دارم از وجود پر برکت شماست.

## تشکر و قدردانی :

سپاس خدای را، که نومید نیستم از رحمت او، تهیدست نیستم از نعمت او، و نه مأیوس از مغفرت او، و سر نیچیده از عبادت او، رحمت او پیوسته است و نعمت او ناگسسته... در طول دوران تحصیل در دانشگاه شهید باهنر کرمان، افتخار آشنایی و همکاری با اساتید و دانشجویان برجسته‌ای را داشتم. در اینجا بر خود لازم می‌دانم از استاد راهنمای خود، سرکار خانم دکتر مریم پورمحمی آبادی که صادقانه و بی‌منت، با صبر و حوصله فراوان، همیشه پاسخ‌گوی سوالات اینجانب بوده‌اند، تقدیر و تشکر نمایم که علاوه بر مطالب علمی، نکات ارزنده‌ای از تجربه و اخلاق حرفه‌ای ایشان آموختم و بدون راهنمایی، حمایت و تشویق‌هایشان، این مجموعه به انجام نمی‌رسید. همچنین از اساتید ارجمندم جناب آقایان دکتر حکیمی، دکتر صانعی، دکتر ماهانی و سرکار خانم دکتر مهران کمال تشکر و قدردانی را دارم.

## چکیده:

گونه جدیدی از حسگرهای فشار، حسگرهای فشار مبتنی بر بلور نوری می‌باشند. مشخصه مهم این بلورها شکاف باند نوری می‌باشد که استفاده از آن‌ها را به عنوان حسگر امکان‌پذیر ساخته است. در یک بلور نوری، شکاف باند نوری، به ضریب شکست، ثابت شبکه و نسبت شعاع به ثابت شبکه ( $t/a$ ) وابسته می‌باشد. با اعمال فشار به ساختار یک بلور نوری، ضریب شکست ماده و هندسه ساختار تغییر کرده و در نتیجه شکاف باند ساختار تغییر می‌کند، همچنین در یک حسگر فشار بلور نوری، با اعمال فشار، بر اثر تغییر ضریب شکست و هندسه ساختار، طول موج شدید کاواک تغییر کرده، در نتیجه می‌توان میزان تغییرات طول موج را به عنوان تابعی از فشار بدست آورد که این امر اساسی‌ترین ایده در مورد حسگرهای فشار بلور نوری می‌باشد. اولین چالشی که در زمینه این حسگرها وجود دارد، بهبود همزمان پارامترهایی از جمله حساسیت، ضریب کیفیت و محدوده دینامیکی می‌باشد. چالش دیگر، بررسی صحیح اثر فشار بر هندسه ساختار حسگر می‌باشد. در این پایان‌نامه سعی شده تا بررسی صحیح و کاملی از اثر فشار بر هندسه ساختار حسگر ارائه شود. همچنین، سه حسگر فشار، بر پایه بلور نوری دو بعدی با شبکه مثلثی، طراحی، شبیه‌سازی و تحلیل گردیده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ساختارهای پیشنهادی در مقایسه با طرح‌های پیشین، عملکرد بهتری از خود نشان داده و توانسته‌اند هر سه پارامتر ذکر شده را همزمان، به نحو مطلوبی بهبود بخشند.

کلید واژه: بلور نوری، حساسیت، حسگر فشار، شکاف باند نوری، ضریب کیفیت، کاواک، محدوده دینامیکی، موجبر.

## فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ ضرورت انجام تحقیق	۲
۳-۱ اهداف اساسی تحقیق	۴
۴-۱ ساختار پایان نامه	۴
فصل دوم: مروری بر تاریخچه و پژوهش‌های انجام شده	۵
۱-۲ مقدمه	۶
۲-۲ آشنایی مختصر با بلور نوری و انواع ساختارهای آن	۶
۱-۲-۲ انواع بلورهای نوری	۶
۲-۲-۲ دسته‌بندی بلورهای نوری دو بعدی	۹
۳-۲ بیان چند مفهوم	۱۰
۱-۳-۲ موجبر	۱۱
۲-۳-۲ کاواک تشدیدگر بلورنوری	۱۳
۳-۳-۲ موجبر و کاواک تشدید تزویج شده کناری	۱۳
۴-۳-۲ موجبر و کاواک تزویج شده مستقیم	۱۴
۴-۲ روند تحقیقات انجام شده	۱۵
۱-۴-۲ طراحی و شبیه‌سازی حسگر فشار مبتنی بر بلور نوری دو بعدی با آرایه‌های مربعی و کاواک تزویج کناری	۱۵
۲-۴-۲ شبیه‌سازی و ساخت حسگر نیروی مبتنی بر بلور نوری دو بعدی با آرایه‌های مثلثی و کاواک تزویج کناری	۱۶

۲-۴-۳ طراحی و شبیه سازی حسگر فشار مبتنی بر بلور نوری دو بعدی با آرایه‌های مربعی	۲۰
از استوانه‌های سیلیکن با حساسیت و محدوده دینامیکی بالا	۲۰
۲-۴-۴ طراحی و شبیه سازی حسگر فشار مبتنی بر بلور نوری دو بعدی با آرایه‌های مثلثی از	۲۲
حفره‌های هوا با قابلیت اندازه گیری کمینه نیرو در محدوده نانومتر	۲۲
۲-۴-۵ طراحی و شبیه‌سازی حسگر فشار مبتنی بر بلور نوری با آرایه‌های مثلثی و کاواک	۲۴
ترویج مستقیم	۲۴
۲-۴-۶ بررسی اثر فشار در یک نانو کاواک بلور نوری	۲۵
۲-۵ جمع‌بندی	۲۹
<b>فصل سوم: اصول، مفاهیم و تحلیل حسگرهای فشار بلور نوری</b>	۳۰
۳-۱ مقدمه	۳۱
۳-۲ تأثیر فشار بر مشخصات هندسی بلورهای نوری	۳۱
۳-۳ بررسی اثر فشار بر ضریب شکست بلور نوری	۳۲
۳-۴ روش‌های عددی در تحلیل بلور نوری	۳۴
۳-۴-۱ روش تفاضل‌های محدود در حوزه زمان	۳۵
۳-۵ روش بسط امواج تخت برای محاسبه بانده ممنوعه بلور نوری	۳۷
۳-۶ روش المان‌های محدود	۴۲
۳-۷ جمع‌بندی	۴۴
<b>فصل چهارم: طرح‌های پیشنهادی</b>	۴۵
۴-۱ مقدمه	۴۶
۴-۲ تعیین ساختار بلور نوری پایه	۴۶
۴-۲-۱ بررسی اثر فشار بر هندسه بلور نوری پایه	۴۷
۴-۲-۲ بررسی اثر فشار بر بانده ممنوعه بلور نوری	۵۱



- ۳-۴ اصول کلی در یک حسگر فشار ..... ۵۲
- ۴-۴ محدودیت‌های موجود در مورد محدوده دینامیکی ..... ۵۳
- ۵-۴ طراحی و شبیه‌سازی حسگر فشار، متشکل از یک کاواک و یک موجبر با تزویج مستقیم ..... ۵۴
- ۴-۵-۱ بهبود ضریب کیفیت و کمینه نیروی قابل اندازه‌گیری در طرح پیشنهادی اول ..... ۵۹
- ۴-۶ طراحی و شبیه‌سازی حسگر فشار، متشکل از دو کاواک تشدید و یک موجبر با تزویج مستقیم ..... ۶۳
- ۴-۷ طراحی و شبیه‌سازی حسگر فشار، متشکل از یک کاواک و یک موجبر با تزویج کناری ..... ۶۷
- ۴-۸ نتیجه‌گیری ..... ۷۱
- فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ..... ۷۳
- ۵-۱ مقدمه ..... ۷۴
- ۵-۲ نتیجه‌گیری ..... ۷۴
- ۵-۳ پیشنهادات ..... ۷۵
- منابع ..... ۷۶

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۴-۱: چند نمونه از ساختارهای شبیه سازی شده جهت تعیین بلور نوری پایه. ۴۷.....
- جدول ۴-۲: تغییرات باند ممنوعه بلور نوری به ازای تغییر فشار از ۱۰GPa-۱۰GPa. ۵۲.....
- جدول ۴-۳: مقایسه نتایج طرح پیشنهادی اول با طرح‌های پیشین. ۵۹.....
- جدول ۴-۴: مقایسه نتایج طرح بهبود یافته با طرح‌های پیشین. ۶۲.....
- جدول ۴-۵: مقایسه نتایج طرح پیشنهادی دوم با طرح‌های پیشین. ۶۷.....
- جدول ۴-۶: مقایسه نتایج طرح پیشنهادی سوم با طرح‌های پیشین. ۷۱.....
- جدول ۴-۷: مقایسه طرح‌های پیشین با طرح‌های پیشنهادی. ۷۱.....

## فهرست شکل ها

- شکل ۱-۲: بلور نوری یک بعدی .....  $\lambda = 0.2a$  ..... ۷
- شکل ۲-۲: بلور نوری دو بعدی ..... ۸
- شکل ۳-۲: ساختار باند نوری برای آرایه مربعی با  $\lambda = 0.2a$  ..... ۸
- شکل ۴-۲: ساختار یابلونویچ برای بلور سه بعدی ..... ۹
- شکل ۵-۲: ساختار یک بلور نوری (الف): با آرایه مثلثی و (ب): با آرایه مربعی ..... ۱۰
- شکل ۶-۲: عبور پرتو نوری از موجبر، (الف): یک موجبر دی الکتریک که با وجود زاویه کمتر از ۹۰ درجه در مسیر موجبر، تنها حدود ۳۰٪ از پرتوی ورودی به خروجی منتقل گردیده است. (ب): یک موجبر دی الکتریک که با وجود زاویه ۹۰ درجه در مسیر موجبر، بیش از ۹۰ درصد از پرتوی ورودی به خروجی منتقل گردیده است. .... ۱۱
- شکل ۷-۲: ایجاد موجبر از طریق حذف یک ردیف از میله ها. .... ۱۲
- شکل ۸-۲: ایجاد موجبر از طریق (الف): کاهش شعاع یک ردیف از میله ها، (ب): افزایش شعاع یک ردیف از میله ها ..... ۱۲
- شکل ۹-۲: یک بلور نوری دو بعدی با موجبر شیاردار. .... ۱۳
- شکل ۱۰-۲: موجبر و کاواک تشدید تزویج شده کناری. .... ۱۴
- شکل ۱۱-۲: موجبر و کاواک تزویج شده مستقیم. .... ۱۴
- شکل ۱۲-۲: ساختار حسگر متشکل از دو موجبر تزویج شده با سه نقص نقطه ای متوالی. .... ۱۵
- شکل ۱۳-۲: طیف انتقالی خروجی بر حسب فشارهای مختلف اعمالی. .... ۱۶
- شکل ۱۴-۲: میکرو کاواک تزویج شده با موجبر، شعاع حفره های قرمز رنگ  $\lambda = 0.35a$ ، شعاع حفره های فیروزه ای رنگ  $\lambda = 0.34a$  و شعاع حفره های آبی تیره  $\lambda = 0.38a$  ..... ۱۷
- شکل ۱۵-۲: انتشار نور در ساختار حسگر ..... ۱۸
- شکل ۱۶-۲: نمودار طیف انتقالی خروجی ..... ۱۹
- شکل ۱۷-۲: نمودار خطی طول موج تشدید بر حسب فشار اعمالی. .... ۱۹
- شکل ۱۸-۲: ساختار حسگر، شامل آرایه مربعی از استوانه های سیلیکن در زمینه هوا با ثابت شبکه  $a = 450 \text{ nm}$  و شعاع  $\lambda = 0.2a$  ..... ۲۰

- شکل ۲-۱۹: نمودار طیف انتقالی خروجی بر حسب فشارهای مختلف اعمال شده. ۲۱.....
- شکل ۲-۲۰: منحنی تغییرات طول موج بر حسب فشار اعمال شده. ۲۱.....
- شکل ۲-۲۱: ساختار حسگر، متشکل از یک موجبر که به طور مستقیم با یک نانو کاواک تزویج شده است. ۲۲.....
- شکل ۲-۲۲: نمودار طیف انتقالی خروجی بر حسب فشارهای مختلف اعمال شده. ۲۳.....
- شکل ۲-۲۳: منحنی تغییرات طول موج تشدید یافته بر حسب فشار اعمال شده. ۲۳.....
- شکل ۲-۲۴: ساختار حسگر، متشکل از یک موجبر که به طور مستقیم با یک نانو کاواک تزویج شده است. ۲۴.....
- شکل ۲-۲۵: منحنی تغییرات طول موج تشدید یافته بر حسب فشار اعمالی. ۲۵.....
- شکل ۲-۲۶: طیف انتقالی خروجی بر حسب فشار اعمالی. ۲۵.....
- شکل ۲-۲۷: ساختار بلور نوری مورد استفاده جهت سنجش فشار. ۲۶.....
- شکل ۲-۲۸: ساختار کاواک بلور نوری با ثابت شبکه  $a=450\text{ nm}$  و  $(r/a)=0/333$ . ۲۷.....
- شکل ۲-۲۹: طیف انتقالی کاواک که دارای مودهای تشدید در  $(a/\lambda)=0/2573$ ،  $(a/\lambda)=0/2733$ ،  $(a/\lambda)=0/3037$  می باشد. ۲۷.....
- شکل ۲-۳۰: تغییر ساختار بلور نوری بر اثر فشار اعمالی. ۲۸.....
- شکل ۲-۳۱: نمودار طیف انتقالی خروجی بر اثر فشارهای اعمالی مختلف. ۲۹.....
- شکل ۲-۳۲: منحنی تغییرات طول موج تشدید یافته بر حسب فشار اعمال شده. ۲۹.....
- شکل ۳-۱: (الف): نمایش یک بلور نوری دو بعدی با ساختار مربعی. (ب): یک سلول واحد از بلور نوری به شکل مربع (ج): تغییر شکل هندسی سلول با اعمال فشار در جهت  $y$ . (د): تغییر شکل هندسی سلول با اعمال فشار در جهت  $x$ . ۳۱.....
- شکل ۳-۲: گسسته سازی فضای دوبعدی در روش تفاضل های محدود، در اینجا قطبش الکتریکی در نظر گرفته شده است. ۳۵.....
- شکل ۴-۱: ساختار بلور نوری پایه مورد استفاده در طرح های پیشنهادی. ۴۸.....
- شکل ۴-۲: تغییرات ساختار بلور نوری پایه تحت فشار  $1\text{ GPa}$  در جهت عمود بر محور حفره ها. ۴۸.....
- شکل ۴-۳: تغییرات ساختار بلور نوری پایه تحت فشار  $5\text{ GPa}$  در جهت عمود بر محور حفره ها. ۴۹.....
- شکل ۴-۴: تغییرات ساختار بلور نوری پایه تحت فشار  $10\text{ GPa}$  در جهت موازی محور حفره ها. ۵۰.....

- شکل ۴-۵: تغییرات ارتفاع ساختار بلور نوری بر اثر اعمال فشار ۱۰GPa. ۵۰.....
- شکل ۴-۶: نمودار باند ممنوعه بلور نوری پایه انتخاب شده در حالت بدون فشار. ۵۱.....
- شکل ۴-۷: نمودار باند ممنوعه در فشار ۱۰GPa. ۵۳.....
- شکل ۴-۸: ساختار حسگر فشار با  $a=440\text{nm}$  و شعاع حفره‌های هوای  $r=158/4\text{nm}$ ، شعاع خارجی و داخلی میکروکاوآک به کار گرفته شده به ترتیب  $242\text{nm}$  و  $132\text{nm}$  می‌باشند. ۵۴.....
- شکل ۴-۹: پروفایل تشدید در کاواک. ۵۵.....
- شکل ۴-۱۰: طیف انتقالی در حالت بدون فشار با طول موج تشدید  $1776/79\text{nm}$ . ۵۶.....
- شکل ۴-۱۱: تغییرات هندسه ساختار حسگر بر اثر اعمال ۱۰GPa فشار. ۵۷.....
- شکل ۴-۱۲: نمودار طیف انتقالی خروجی به ازای تغییرات فشار از ۱۰GPa-۰GPa. ۵۷.....
- شکل ۴-۱۳: منحنی تغییرات خطی طول موج تشدید یافته بر حسب فشار اعمال شده. ۵۸.....
- شکل ۴-۱۴: ساختار بهبود یافته طرح پیشنهادی اول. ۵۹.....
- شکل ۴-۱۵: طیف انتقالی در حالت بدون فشار با طول موج تشدید  $1774/7\text{nm}$ . ۶۰.....
- شکل ۴-۱۶: تغییرات هندسه ساختار حسگر بر اثر اعمال ۱۰GPa فشار. ۶۱.....
- شکل ۴-۱۷: نمودار طیف انتقالی خروجی به ازای تغییرات فشار از ۱۰GPa-۰GPa. ۶۱.....
- شکل ۴-۱۸: منحنی تغییرات خطی طول موج تشدید یافته بر حسب فشار اعمال شده. ۶۲.....
- شکل ۴-۱۹: ساختار حسگر طرح پیشنهادی دوم با دو کاواک مجزا. ۶۳.....
- شکل ۴-۲۰: طیف انتقالی در حالت بدون فشار با طول موج تشدید  $1774/25\text{nm}$ . ۶۴.....
- شکل ۴-۲۱: تغییرات هندسه ساختار حسگر بر اثر اعمال ۷GPa فشار. ۶۵.....
- شکل ۴-۲۲: نمودار طیف انتقالی خروجی به ازای تغییرات فشار از ۷GPa-۰GPa. ۶۶.....
- شکل ۴-۲۳: منحنی تغییرات خطی طول موج تشدید یافته به ازای اعمال فشار ۷GPa-۰GPa. ۶۶.....
- شکل ۴-۲۴: ساختار طرح پیشنهادی سوم متشکل از یک کاواک که از طریق تزویج کناری با دو موجبر تزویج گردیده است. ۶۷.....
- شکل ۴-۲۵: طیف خروجی در حالت بدون فشار. ۶۸.....
- شکل ۴-۲۶: تغییرات هندسه ساختار حسگر بر اثر اعمال ۱۳GPa فشار. ۶۹.....
- شکل ۴-۲۷: نمودار طیف انتقالی خروجی به ازای تغییرات فشار از ۱۳GPa-۰GPa. ۷۰.....
- شکل ۴-۲۸: منحنی تغییرات خطی طول موج تشدید یافته به ازای اعمال فشار ۱۳GPa-۰GPa. ۷۰.....

## فصل اول: مقدمه

## ۱-۱ مقدمه

طی دهه‌های گذشته، الکترونیک در حوزه نور از اهمیت ویژه‌ای برای محققان برخوردار بوده است. بلورهای نوری<sup>۱</sup> یکی از بسترهای مناسب برای استفاده در الکترونیک نوری می‌باشند. این بلورها ساختارهای متناوبی هستند که می‌توانند نور را به وسیله کنترل مشخصه‌های انتقال و بازتاب در فرکانس و جهت مشخص، هدایت و کنترل نمایند. مشخصه مهم این ساختارها، شکاف باند نوری<sup>۲</sup> است که بر این اساس تاکنون کاربردهای متعددی از این بلورها مانند موجبرهای نوری، لیزرهایی با جریان راه‌انداز پایین، فیبرهای بلور نوری و انواع حسگرها معرفی شده است. دائماً کاربردهای جدیدی از این بلورها معرفی می‌شود و پیش‌بینی می‌شود این ساختارها در آینده به عنوان قطعات پایه در مدارات یکپارچه نوری مورد استفاده قرار گیرند. استفاده از این ساختارها به عنوان حسگر نوری یکی از آخرین تحقیقات در این زمینه است.

## ۲-۱ ضرورت انجام تحقیق

یکی از نیازهای ضروری صنعت، امکان استفاده از حسگرهایی برای سنجش و نظارت بر بسیاری از پارامترها از قبیل فشار، دما، رطوبت، نوع و غلظت گاز، سرعت و جابجایی برای پیش‌بینی، کنترل، حفظ ایمنی، کاهش هزینه‌های مربوط به نگهداری و تعمیرات غیرضروری در زمینه‌هایی از جمله سلامت انسان‌ها، امور نظامی، امور امنیتی، صنعت فضاوردی و خودروسازی می‌باشد، به ویژه حسگرهایی با ابعاد کوچک که بتوان آن‌ها را در شرایط نامساعدی همچون دماهای بالا، محیط‌هایی با ولتاژهای بالا (تأثیرناپذیر بودن در برابر تداخل الکترومغناطیسی) و شرایط مکانیکی و شیمیایی نامساعد به کار گرفت [۷-۱].

به عنوان مثال، پایش دائم دو پارامتر مهم فشار و دما، نقش مهمی را در مهندسی مخازن برای افزایش نرخ بهره‌برداری چاه‌های نفت ایفا می‌کند، پیش‌بینی احتمال وقوع سونامی می‌تواند جان هزاران انسان را نجات دهد، و محاسبه فشار وارد بر دیواره سدها یکی از مهم‌ترین فاکتورهایی است که باید به طور دائم تحت نظارت باشد، یکی از کاربردهای مهم بلورهای نوری، ساخت اینگونه حسگرهاست [۸]. در پنجاه سال گذشته فناوری نیمه‌هادی نقش بزرگی در بسیاری از زمینه‌های زندگی بشر از جمله

---

<sup>۱</sup> Photonic Crystal

<sup>۲</sup> Photonic Bandgap

مخابرات، پزشکی، طیف‌نگاری و ساخت انواع حسگرها ایفا کرده است. عملکرد اینگونه سیستم‌ها معمولاً بر اساس تغییر ضریب شکست برای کنترل حرکت نور در دی‌الکتریک و نیمه‌هادی‌ها می‌باشد [۹-۱۰].

تلاش‌های بسیاری در جهت کاهش اندازه و افزایش سرعت عملکرد مدارهای مجتمع مبتنی بر نیمه‌هادی‌ها صورت گرفت، تا جایی که این زمینه به مرز محدودیت‌های خود نزدیک شد، به گونه‌ای که کوچک‌تر کردن ساختارها باعث افزایش مقاومت و هدررفت توان می‌شد. بنابراین دستیابی به ساختار و فن‌آوری که بتوان آن را جایگزین الکترون و نیمه‌هادی‌ها کرد مورد توجه قرار گرفت.

در زمینه حسگرها نیز قبل از توسعه دستگاه‌های میکرومکانیکی و دستیابی به فناوری MEMS، در ابزارها از حسگرهای ماکروسکوپیکی نیرو استفاده می‌شد. تکنولوژی MEMS با امکان کوچک‌سازی حسگرها، امکان استفاده از آن‌ها را در بسیاری از کاربردهای جدید فراهم کرد. اما به‌طور کلی کوچک کردن ابعاد یک حسگر نیرو باعث کاهش نیروی قابل سنجش می‌شود، بنابراین حسگرهای کوچک مبتنی بر این تکنولوژی توانایی آشکارسازی نیروهای کوچک‌تری نسبت به حسگرهای ماکروسکوپیکی را دارا بودند. علاوه بر این محدودیت، در یک حسگر ویژگی‌های دیگری از جمله سرعت پاسخگویی و حساسیت بالا مورد نیاز بود که فناوری MEMS پاسخگوی آن‌ها نبود، بنابراین در این زمینه نیز نیاز به جایگزین مناسبی احساس می‌شد [۱۱]. در این میان نور با توجه به برتری‌هایش نسبت به الکترون، همچون سرعت بالاتر حرکت در دی‌الکتریک، توانایی انتقال حجم بالاتری از اطلاعات در واحد زمان و پهنای باند بالاتر نور در دی‌الکتریک نسبت به الکترون، به عنوان بهترین جایگزین برای الکترون در نظر گرفته شد [۱۲]. بکارگیری، کنترل و هدایت فوتون‌ها درون موجرها و فیبرها، به‌طور کلی بر پایه مکانیزم بازتاب کلی داخلی<sup>۱</sup> استوار بود، اما این مکانیزم با چالش‌هایی همانند محدودیت در خمش فیبر و امکان خروج فوتون‌ها در طول مسیر انتقال مواجه بود. ساختارهایی که برای رفع این چالش به کار گرفته شدند، بلورهای نوری بودند. بلورهای نوری میکروساختارهایی متناوب در ابعاد طول موج اپتیکی در یک، دو یا سه بعد می‌باشند که از مواد دی‌الکتریک ساخته می‌شوند و با ایجاد تغییرات متناوب در ضریب شکست مواد دی‌الکتریک و یا با پر کردن مواد دی‌الکتریک بوسیله ردیف منظمی از حفره‌ها به وجود می‌آیند [۱۳-۱۵].

---

<sup>۱</sup> Total Internal Reflection



### ۳-۱ اهداف اساسی تحقیق

پارامترهای حساسیت، ضریب کیفیت، محدوده دینامیکی، کمینه فشار (نیرو) قابل اندازه‌گیری پارامترهایی هستند که در یک حسگر فشار بلور نوری مورد توجه قرار می‌گیرند. دستیابی همزمان به حالت بهینه برای همه پارامترهای فوق، به آسانی میسر نمی‌شود، به گونه‌ای که در برخی از طرح‌های پیشین بهبود یک پارامتر با افت پارامتر دیگری همراه بوده است. مسئله دیگری که در این زمینه وجود دارد، عدم بررسی کامل و صحیح اثر فشار اعمالی، بر هندسه ساختار حسگر در اکثر طرح‌های پیشین است. در این پایان‌نامه سعی شده تا با شبیه‌سازی کامل و صحیح اثر فشار بوسیله نرم‌افزار کامسول<sup>۱</sup>، نتایج واقعی‌تری از یک حسگر فشار بلور نوری ارائه شود. علاوه بر این سعی شده تا سه پارامتر حساسیت، ضریب کیفیت و محدوده دینامیکی به طور همزمان بهبود داده شوند.

### ۴-۱ ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم ابتدا انواع دسته‌بندی بلورهای نوری و سپس چند مفهوم اساسی مورد استفاده در حسگرهای فشار بلور نوری از جمله کاواک و موجبر، انواع روش‌های ایجاد آن‌ها و مزیت موجبرهای بلور نوری نسبت به موجبرهای معمولی بیان می‌شود، در ادامه چند نمونه از حسگرهای فشار مبتنی بر ساختار بلور نوری از سال ۲۰۰۸ الی ۲۰۱۴ مورد تحلیل و بررسی قرار خواهند گرفت. در فصل سوم، اثر فشار بر هندسه و ضریب شکست بلور نوری و روش‌های عددی و محاسبات تئوری به کار رفته در تحلیل بلور نوری و حسگر از جمله روش تفاضل محدود در زمان، و روش بسط امواج تخت، بیان خواهند شد. در فصل چهارم طراحی و شبیه‌سازی سه نمونه حسگر فشار بر اساس ساختار بلور نوری بیان می‌شود، در ابتدای فصل مراحل شبیه‌سازی و انتخاب و محاسبه شکاف باند بلور نوری پایه عنوان شده و در ادامه شبیه‌سازی‌هایی برای تعیین مناسب‌ترین وجه و راستا، برای اعمال فشار بر ساختار بلور نوری انجام می‌پذیرد، سپس ساختار حسگرهای پیشنهادی، بر اساس بلور نوری پایه، طراحی و شبیه‌سازی می‌شوند.

---

<sup>۱</sup> Comsol

# فصل دوم: مروری بر تاریخچه و پژوهش‌های انجام شده

## ۱-۲ مقدمه

بلورهای نوری دارای اهمیت تحقیقاتی فراوانی به علت ویژگی‌های منحصر به فرد فیزیکی شناخته شده مانند طیف بازتاب و انتقال هستند. از جمله موارد استفاده این ساختارها، حسگرهای بلورهای نوری هستند. حسگرهای بلورهای نوری دارای اندازه بسیار کوچک و زمان پاسخگویی کم بوده و می‌توانند در محیط‌های بسیار کوچک مورد استفاده قرار گیرند [۱۶-۱۷]. با تزویج نور به ساختار بلور نوری و در نتیجه بازتاب و انتقال نور توسط ساختار و تجزیه و تحلیل این طیف به وسیله تحلیل گره‌های بیرونی بسیاری از کمیت‌های فیزیکی مانند ضریب شکست، دما، رطوبت و ... قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

## ۲-۲ آشنایی مختصر با بلور نوری و انواع ساختارهای آن

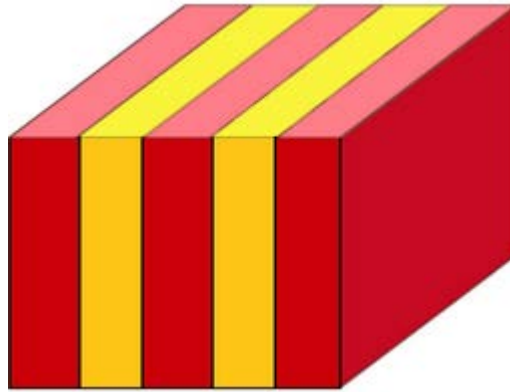
عملکرد بلورهای نوری در مقابل امواج نوری، شبیه به عملکرد نیمه رساناها در مقابل الکترون‌ها است. در ساختارهای نیمه رسانا، اتم‌ها و مولکول‌ها به طور متناوب در شبکه بلور قرار گرفته‌اند و این امر باعث ایجاد یک پتانسیل متناوب برای الکترون‌های موجود در ساختار بلور می‌شود. تحت تأثیر این پتانسیل متناوب، الکترون‌ها مجاز نیستند که با برخی از مقادیر خاص انرژی در ساختار انتشار یابند. به این محدوده انرژی، باند ممنوعه انرژی<sup>۱</sup> گفته می‌شود. در ساختار نیمه‌رساناها، این گاف انرژی یک شکاف باند کامل است، یعنی در همه جهات در داخل بلور وجود دارد. در ساختارهای بلور نوری نیز برای نور، با تغییر متناوب در مواد دی‌الکتریک به پتانسیل تناوبی مشابهی دست می‌یابیم. اگر تفاوت ضریب دی‌الکتریک مواد تشکیل دهنده بلور به قدر کافی زیاد باشد و جذب نور به وسیله این مواد کم باشد، در این صورت امواج نوری در برخورد با مواد دی‌الکتریک پدیده‌های مشابهی را برای فوتون‌ها ایجاد می‌کنند و باعث باز شدن شکاف باند نوری در این ساختارها می‌شوند [۱۲].

## ۱-۲-۲ انواع بلورهای نوری

بسته به اینکه تناوب محیط بلوری در چند بعد تکرار شود، بلورهای نوری به سه دسته یک، دو و سه بعدی تقسیم می‌شوند. همچنین اندازه تناوب محیط، محدوده باند فرکانسی ممنوعه را تعیین می‌کند.

---

<sup>۱</sup> Energy Band Gap



شکل ۱-۲: بلور نوری یک بعدی

### ۱-۱-۲-۲ بلورهای نوری یک بعدی<sup>۱</sup>

ساده‌ترین ساختار ممکن برای بلورهای نوری که در شکل نشان داده شده است، شامل لایه‌های متناوب مواد با ثابت دی‌الکتریک متفاوت است (فیلم چند لایه) که ضریب شکست آنها تنها در یک جهت تغییر می‌کند، اما در جهات دیگر همسانگرد است (شکل ۱-۲). لرد رایللی<sup>۲</sup> در سال ۱۸۸۷ اولین تحلیل مشخصه‌های نوری فیلم‌های چند لایه را منتشر کرد. این نوع از بلورهای نوری مانند آینه (آینه براگ) برای نور با فرکانس مشخص عمل می‌نمایند [۱۹].

### ۲-۱-۲-۲ بلورهای نوری دوبعدی<sup>۳</sup>

بلورهای نوری دو بعدی در دو محور خود متناوب بوده و در راستای محور سوم همجنس هستند. یک نمونه از این نوع بلور در شکل ۲-۲ نشان داده شده است که شامل ستون‌های دی‌الکتریک با شبکه مربعی هستند. برخلاف بلور یک بعدی این بلور می‌تواند در دو جهت از انتشار نور جلوگیری کند [۲۰].

<sup>۱</sup> One Dimensional Photonic Crystal

<sup>۲</sup> Lord Rayleigh

<sup>۳</sup> Two Dimensional Photonic Crystal