

صلى الله عليه وسلم



دانشگاه اصفهان  
دانشکده علوم  
گروه فیزیک

## پایان نامه‌ی دکتری رشته‌ی فیزیک

### طراحی و شبیه‌سازی موجبرهای شیاردار موازی و موجبر بلور فوتونی شیاردار برای آشکارسازی

استادان راهنما:

دکتر فهیمه حسینی بالام  
دکتر اسماعیل حسن زاده

استاد مشاور:

پرفسور کریستین کارنوش

پژوهشگر:

علی‌اکبر ابن‌علی حیدری

آبان‌ماه ۱۳۹۱

کلیه حقوق مادی مرتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات  
و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه  
متعلق به دانشگاه اصفهان است.



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی دکتری رشته فیزیک آقای علی اکبر ابن علی حیدری

تحت عنوان

## طراحی و شبیه سازی موجبرهای شیاردار موازی و موجبر بلور فوتونی

### شیاردار برای آشکارسازی

در تاریخ ۹۱/۰۸/۲۸ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه .. عالی.. به تصویب نهایی رسید .

- |      |                        |                        |                                       |
|------|------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| امضا | دکتر فهیمه حسینی بالام | با مرتبه علمی استادیار | ۱- استاد/ استادان راهنمای پایان نامه  |
| امضا | دکتر اسماعیل حسن زاده  | با مرتبه علمی دانشیار  | ۲- استاد / استادان راهنمای پایان نامه |
| امضا | دکتر رسول رکنی زاده    | با مرتبه علمی دانشیار  | ۳- استاد / استادان داور داخل گروه     |
| امضا | دکتر حمیدرضا فلاح      | با مرتبه علمی دانشیار  | ۴- استاد / استادان داور داخل گروه     |
| امضا | دکتر حمید نادگران      | با مرتبه علمی استاد    | ۵- استاد / استادان داور خارج از گروه  |
- مدیر گروه دانشکده  
دکتر اسماعیل حسن زاده

## تشکر و قدردانی

خداوند متعال را سپاسگزارم که من را در کلیه مراحل زندگی به ویژه دوران تحصیل یاری نموده است. از اساتید ارجمندم سرکار خانم دکتر حسینی بالام و جناب آقای دکتر حسن زاده به خاطر زحمات و شکیبایی فراوان در راهنمایی اینجانب صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم. همچنین از استاد مشاورم جناب آقای پروفسور کریستین کارنوش از دانشگاه کارلس روچه آلمان به خاطر راهنمایی اینجانب صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم. از اساتید بزرگوار، جناب آقای دکتر نادگران از گروه فیزیک دانشگاه شیراز، جناب آقای دکتر رکنی زاده و جناب آقای دکتر فلاح از گروه فیزیک دانشگاه اصفهان که داوری پایان‌نامه را پذیرفتند، صمیمانه تشکر می‌نمایم. همچنین از جناب آقای دکتر داوری از گروه ریاضی و آمار که امر نظارت بر جلسه دفاع از پایان‌نامه را به عهده داشتند، صمیمانه تشکر می‌نمایم. از همسر فداکارم و فرزندان عزیزم که سختی‌های دوران تحصیل را به جان خریدند و پشتیبان من بودند، تشکر می‌نمایم. در پایان از همه اساتید و کارکنان گروه فیزیک و دانشکده علوم تشکر می‌نمایم.

تقدیم به همسر فداکارم و عزیزانم احسان و امیرحسین

## چکیده

در این پژوهش، ابتدا حسگرهای نوری به‌ویژه حسگرهای بدون بر چسب مرور شده‌اند. سپس مبانی فیزیکی و روش‌های محاسباتی بلورهای فوتونی بررسی شده‌اند. یک ساختار موجبر بلور فوتونی نورکند مبتنی بر رهیافت شاره‌های نوری برای حسگری بدون برچسب پیشنهاد شده‌است. موجبرهای بلور فوتونی دارای ویژگی‌های منحصر به‌فردی اند که می‌توان از مهندسی پاشندگی و وجود نورکند در این ساختارها نام برد. طراحی و شبیه‌سازی عملکرد زیست‌حسگر مبتنی بر شاره‌های نوری از طریق روش‌های محاسباتی حوزه زمانی تفاضل متناهی و حوزه فرکانس انجام شده است. برای محاسبات طیف‌های تراگسیل در موجبر بلور فوتونی از روش تفاضل متناهی در حوزه زمان استفاده شده است. زیرا در این روش وابستگی زمانی معادلات ماکسول در یک گره فضایی اعمال می‌شود و بنابراین همه ویژگی‌های فیزیکی در مدل شامل می‌شود. برای محاسبات ساختار نواری در موجبر بلور فوتونی از روش بسط موج تخت در حوزه فرکانس استفاده شده‌است. نورکند مبتنی پاشندگی ماده و نورکند ساختاری بررسی شد. ساختار حسگر پیشنهادی نورکند، شامل یک کاواک حلقه مانند است که به موجبر بلور فوتونی نورکند میکروشاره‌ای جفت شده است. حساسیت به تغییرات ضریب شکست این حسگر  $293 \text{ nm/RIU}$  محاسبه شده است. سپس پیکربندی ساختار حسگرهای موازی در یک بستر پیشنهاد شده‌است. این ساختار شامل موجبر بلور فوتونی و چند میکروکاواک تشدید جفت‌شده به موجبر بلور فوتونی است. هنگامی که نور به این ساختار جفت می‌شود در طیف نور تراگسیل، طول موج‌های متناظر با هر کدام از کاواک‌ها، به‌دام می‌افتند و منجر به ایجاد چندین چال در طیف تراگسیل می‌شود. عملکرد این ساختار به‌طور عددی بررسی شده است. در بخش نهایی این تحقیق، یک موجبر بلور فوتونی شیاردار میکروشاره‌ای، OS-PhCW، قابل تنظیم، بدون تغییر در پارامترهای ساختاری، با قابلیت کاربرد در بیناب‌نمایی جذبی پیشنهاد شده است. مشخصه اصلی ساختار پیشنهاد شده این است که به‌دلیل نورکند، میدان الکتریکی تقویت شده قویا در شیاردار جای‌گزیده می‌شود. بررسی‌های عددی نشان می‌دهد که می‌توان منحنی مد شیاردار را با استفاده از تزریق میکرو-شاره در حفره‌های انتخابی هوا در بلور فوتونی کنترل و تنظیم کرد. می‌توان با کنترل پاشندگی مد هدایت‌شده شیاردار، ناحیه نورکند مد شیاردار را به گونه‌ای تنظیم کرد که خط جذبی یک نمونه در این ناحیه قرار گیرد. ضریب تقویت،  $\gamma$  در این ناحیه به دلیل اثرات نورکند بزرگ است در نتیجه درآشامی می‌تواند در ناحیه شیاردار افزایش یابد.

**واژگان کلیدی:** حسگرهای نوری، شاره‌های نوری، موجبر بلور فوتونی، نورکند، موجبر بلور فوتونی شیاردار.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
<b>فصل اول: حسگرهای نوری</b>	
۱-۱	مقدمه
۲-۱	حسگرهای جذبی
۳-۱	حسگرهای نوری بدون برچسب
۱-۳-۱	حسگرهای نوری مبتنی بر میدان محوشونده
۲-۳-۱	حسگرهای مبتنی بر تداخل سنجی
۴-۱	حسگرهای با کاواک‌های تشدید
۵-۱	حسگرهای نوری تشدید پلاسمون سطحی
۶-۱	حسگرهای بلور فوتونی
<b>فصل دوم: بلورهای فوتونی</b>	
۱-۲	مقدمه
۲-۲	بلورهای فوتونی یک، دو و سه بعدی
۳-۲	بررسی نظری بلورهای فوتونی
۴-۲	ساختار هندسی دوره‌ای و فضای وارون
۵-۲	منطقه اول بریلوئن
۱-۵-۲	قضیه بلاخ
۶-۲	ناوردائی مقیاس در معادلات ماکسول
۷-۲	قطبش
۸-۲	ساختار نواری
۱-۸-۲	منشاء فیزیکی گاف نواری
۹-۲	تیغه‌های بلور فوتونی
۱-۹-۲	تیغه‌های بلور فوتونی دو بعدی
۲-۹-۲	پارامترهای بلورهای فوتونی
۳-۹-۲	نقص‌ها در بلورهای فوتونی دو بعدی
۴-۹-۲	موجبرهای بلور فوتونی



۲-۱۰ کاربردهای بلورهای فوتونی تیغه‌ای ..... ۴۳

۲-۱۰-۱ حسگرهای نوری مبتنی بر بلورهای فوتونی ..... ۴۳

### فصل سوم: مدل‌سازی شبکه‌های بلور فوتونی

۳-۱ مقدمه ..... ۴۵

۳-۲ روش بسط موج تخت ..... ۴۶

۳-۳ روش تفاضل متناهی در حوزه زمان ..... ۴۹

۳-۳-۱ اساس فیزیکی روش FDTD ..... ۵۰

۳-۴ شرایط مرزی ..... ۵۲

۳-۵ شبیه‌سازی تراگسیل در بلور فوتونی تیغه‌ای ..... ۵۳

### فصل چهارم: نورکند

۴-۱ مقدمه ..... ۵۴

۴-۲ نورکند مبتنی بر پاشندگی ماده و اثر EIT ..... ۵۵

۴-۳ نورکند ساختاری ..... ۵۸

۴-۳-۱ نورکند در بلورهای فوتونی یک بعدی ..... ۵۹

۴-۳-۲ نورکند در بلورهای فوتونی دو بعدی ..... ۶۰

۴-۴ میکروشاره‌ها ..... ۶۳

۴-۴-۱ تزریق میکروشاره‌ها ..... ۶۵

### فصل پنجم: طراحی زیست‌حسگر نوری موجبر بلور فوتونی

۵-۱ مقدمه ..... ۶۸

۵-۲ طراحی ساختار حسگر نورکند ..... ۶۹

۵-۲-۱ ساختار حسگر پیشنهادی ..... ۷۱

۵-۳ حساسیت ساختار حسگر نورکند ..... ۷۵

۵-۴ طراحی موجبر بلور فوتونی با کاواک‌های جفت‌شده موازی برای حسگری چندین ماده ..... ۸۲

### فصل ششم: طراحی ساختار بلور فوتونی برای بیناب‌نمایی تراشه‌ای

۶-۱ مقدمه ..... ۹۰

۶-۲ بیناب‌نمایی جذبی و قانون بیر-لمبرت ..... ۹۲

۶-۳ ساختار موجبر بلور فوتونی میکروشاره‌ای شیاردار برای بیناب‌نمایی روی تراشه ..... ۹۳

- ۱-۳-۶ ویژگی‌های موجبرهای پاشنده بلور فوتونی و موجبر شیاردار ..... ۹۵
- ۲-۳-۶ طراحی موجبر بلور فوتونی شیاردار میکروشاره‌ای قابل تنظیم ..... ۹۶
- ۴-۶ نتایج و بحث‌ها ..... ۹۶

### فصل هفتم: جمع بندی نتایج و پیشنهادهای

- ۱-۷ نتیجه‌گیری ..... ۱۰۴
- ۲-۷ پیشنهادهای ..... ۱۰۶
- منابع و مآخذ ..... ۱۰۷

## فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ : طرح واره‌ای از یک زیست حسگر نوری بدون برچسب [۱].....	۳
شکل ۲-۱ : طرح واره‌ای از یک اندازه‌گیری جذبی [۸].....	۴
شکل ۳-۱ : افزایش طول مسیر نوری در یک اندازه‌گیری جذبی در یک میکروسیستم [۸].....	۵
شکل ۴-۱ : سطح مقطع یک فیبر نوری و انتشار نور در آن [۹].....	۷
شکل ۵-۱ : حسگر نوری تداخل سنج ماخ-زندر [۱].....	۸
شکل ۶-۱ : نمونه‌هایی از کاواک‌های تشدید [۱۶،۱].....	۱۰
شکل ۷-۱ : جفت‌شدگی منشوری حسگر تشدید پلاسمون سطحی [۲۰].....	۱۲
شکل ۸-۱ : حسگرهای بلور فوتونی الف، حسگر موجبر بلور فوتونی ب، حسگر کاواک بلور فوتونی [۱].....	۱۴
شکل ۱-۲ : مقایسه بین موج‌های الکترونی در یک پتانسیل دوره‌ای و موج‌های نور در یک محیط دی‌الکتریک دوره‌ای در بلورهای فوتونی.....	۱۷
شکل ۲-۲ : بلورهای فوتونی طبیعی.....	۱۸
شکل ۳-۲ : طرح واره‌ای از بلورهای فوتونی یک، دو و سه بعدی [۱۵].....	۱۹
شکل ۴-۲ : طرح واره‌ای از بلور فوتونی یک بعدی.....	۲۰
شکل ۵-۲ : پیکربندی انتشار موج الکترومغناطیسی و در یک موجبر همگن. الف، مد TE ب، مد TM.....	۲۲
شکل ۶-۲ : الف، ساختار بلور فوتونی سه بعدی شامل پشته‌های یک در میان از تیغه‌های بلور فوتونی استوانه‌ای و حفره‌ای، ب، ساختار نواری ج، نمایشی از یک ساختار تجربی [۳۰].....	۲۳
شکل ۷-۲ : طرح واره‌ای از بلورهای فوتونی تیغه‌ای خطی، مربعی و مثلثی.....	۲۵
شکل ۸-۲ : شبکه مربعی دو بعدی، با انتخاب بردارهای پایه متفاوت.....	۲۹
شکل ۹-۲ : طرح واره‌ای از یاخته‌های بسیط متفاوت برای یک شبکه دو بعدی مربعی.....	۳۰
شکل ۱۰-۲ : منحنی‌های پاشندگی، ساختار نواری، برای مدهای با قطبش TM یک شبکه یک بعدی.....	۳۱
شکل ۱۱-۲ : منطقه اول بریلوئن بر شبکه‌های الف، شش گوش دو بعدی ب، شبکه مربعی دو بعدی.....	۳۲
شکل ۱۲-۲ : طرح واره‌ای از خط‌های میدان الکتریکی برای ساختار دی‌الکتریک با ضخامت محدود حول صفحه تقارن $z = 0$ . انحراف از صفحه تقارن جهت‌گیری میدان الکتریکی را تغییر می‌دهد. در نتیجه مدها به صورت شبه-TE و شبه-TM توصیف می‌شوند [۲۲].....	۳۵
شکل ۱۳-۲ : سطوح فرکانس یک شبکه مکعبی دو بعدی الف، قطبش TM ب، قطبش TE.....	۳۶
شکل ۱۴-۲ : ساختار نواری TE و TM برای شبکه مکعبی میله‌ها در هوا.....	۳۶

شکل ۲-۱۵ : طرح‌های میدان برای نوارهای هوا و دی‌الکتریک بلور فوتونی با شبکه مثلثی با حفره‌های هوا. ....۳۷

شکل ۲-۱۶ : نمونه‌ای از یک بلور فوتونی تیغه‌ای سیلکونی و توزیع ضریب شکست در آن. ....۳۹

شکل ۲-۱۷ : ساختار نواری بلور فوتونی تیغه‌ای نشان داده شده در شکل ۲-۱۶، مرجع شکل سمت راست [۲۲]. ....۴۰

شکل ۲-۱۸ : تصویری از کاواک‌های بلورهای فوتونی دو بعدی سیلکونی [۳۳]. یک نقص نقطه‌ای، سمت چپ، و یک نقص ردیف، سمت راست، .....۴۱

شکل ۲-۱۹ : کاواک تک‌مدی بلورهای فوتونی دو بعدی سیلکونی با شبکه مربعی میله‌های دی‌الکتریک در هوا [۳۶]. ....۴۲

شکل ۲-۲۰ : ساختار نواری با قطبش شبه TE برای موجبر بلور فوتونی با نقص خطی [۲۲]. ....۴۳

شکل ۳-۱ : آرایش مولفه‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در یک گره مکعبی با یاخته، ای. ....۵۱

شکل ۴-۱ : پنجره شفافیت در مرکز خط جذبی و نورکند در مرکز تشدید جذبی محیط اتمی سه ترازوی [۴۸]. ....۵۸

شکل ۴-۲ : نمودار پاشندگی انتشار موج در محیط عاری از پاشندگی و محیطی با ضریب شکست، سمت چپ، انتشار موج در محیط بلور فوتونی یک بعدی در منطقه اول بریلوئن، سمت راست [۳]. ....۶۰

شکل ۴-۳ : تشابه بین موجبر W1 و بلور فوتونی یک بعدی [۳]. ....۶۱

شکل ۴-۴ : فشردگی مکانی و افزایش شدت پالس نوری در ناحیه نورکند [۳]. ....۶۲

شکل ۴-۵ : الف، فشردگی مکانی پالس در یک ساختار نورکند با پاشندگی ناچیز و ب، نمودارهای ساختار نواری و طیف ضریب گروه [۵۰]. ....۶۲

شکل ۴-۶ : تصویر کلی از ابزار شاره نوری مجتمع [۶۲]. ....۶۴

شکل ۴-۷ : مدارهای بلور فوتونی بازنویس‌پذیر با استفاده از تزریق نقطه به نقطه شاره در حفره‌های شبکه [۷۱]. ....۶۵

شکل ۴-۸ : الف، الگوی کلی تزریق شاره، از یک ریزقلم شیشه‌ای نوک تیز برای کشیدن شاره تزریقی روی بلور فوتونی استفاده می‌شود [۷۲] ب، نمایش پرتو نوری نیروی گرادیان [۷۳]. ....۶۶

شکل ۵-۱ : الف، نمایش دو بعدی ابریاخته موجبر بلور فوتونی میکرو شاره‌ای ب، ضریب گروه محاسبه شده برای هر دو موجبر معمولی و نورکند میکرو شاره‌ای ج، ساختار نواری مد اصلی با قطبش TE برای هر دو موجبر د، پاشندگی سرعت گروه و ضریب گروه مد اصلی هر دو موجبر. ....۷۱

شکل ۵-۲ : نمایشی از ساختار حسگرها الف، حسگر نورکند ب، حسگر معمولی ج، طیف‌های تراگسیل حسگر نورکند و حسگر معمولی د، توزیع شدت میدان الکتریکی در درون کاواک ساختار حسگر نورکند. ....۷۴

شکل ۵-۳ : طیف‌های تراگسیل الف، حسگر نورکند ب، حسگر معمولی. ....۷۶

شکل ۵-۴ : نمودار طول موج تشدید برای هر دو ساختار حسگر نورکند و حسگر معمولی به صورت تابعی از ضریب شکست نمونه. ....۷۷

شکل ۵-۵ : الف، نمایشی از ساختار حسگر نورکند هنگامی که فقط یک ردیف از حفره‌های اطراف کاواک با نمونه پر شده است. ب، طیف‌های تراگسیل با نمونه‌های مورد آزمایش با ضریب شکست  $n = 1/33$  تا  $n = 1/35$  ج، نمودار طول موج تشدید این ساختار حسگر نورکند تابعی از ضریب شکست نمونه. ....۷۹

شکل ۵-۶: الف، طیف‌های تراگسیل کاواک بدون موجبر با تزریق شاره‌هایی با ضریب شکست  $n = 1/33$  تا  $1/35$   $n = 81$ . ج، نمودار طول موج تشدید این ساختار به صورت تابعی از ضریب شکست نمونه. .... ۸۱

شکل ۵-۷: نمایشی از ساختار میکروکاواک‌های موازی جفت شده به موجبر بلور فوتونی. .... ۸۴

شکل ۵-۸: الف، ساختار نواری موجبر بلور فوتونی. ب، نمودار ساختار نواری مد زوج اصلی موجبر بلور فوتونی و ناحیه‌های متفاوت از لحاظ سرعت گروه. .... ۸۵

شکل ۵-۹: طیف تراگسیل ساختار کاواک‌های موازی. .... ۸۶

شکل ۵-۱۰: الف، نمایشی از ساختار میکروکاواک‌های موازی جفت شده به موجبر بلور فوتونی ب، جابه‌جایی طول موج‌های تشدید کاواک‌ها با تغییر در ساختار هندسی کاواک‌ها در طیف تراگسیل ساختار کاواک‌های موازی. .... ۸۷

شکل ۵-۱۱: الف، ساختار کاواک‌های موازی ب، جابه‌جایی طول موج‌های تشدید کاواک‌ها با تزریق شاره در کاواک‌ها در طیف تراگسیل ساختار کاواک‌های موازی. .... ۸۹

شکل ۶-۱: الف، نمایشی از ساختار بیناب‌سنج تراشه‌ای مبتنی بر موجبر بلور فوتونی میکروشاره‌ای شیاردار. نقاط آبی رنگ، شاره تزریق شده در موجبر بلور فوتونی برای دستیابی به اثر نور کند، ناحیه نشان داده شده با رنگ زرد، ناحیه حسگری، سلول جذبی، و نقاط قرمز رنگ، حفره‌های هوا را نشان می‌دهند. ب، ساختار موجبرهای بلور فوتونی شیاردار موازی. .... ۹۴

شکل ۶-۲: نمایش دو بعدی از ابریاخته موجبر بلور فوتونی میکرو شاره‌ای، سمت چپ. منحنی‌های پاشندگی موجبر بلور فوتونی شیاردار معمولی، سمت راست. .... ۹۷

شکل ۶-۳: وابستگی ساختار نواری مد شیار هوا به صورت تابعی از پهنای شیار، سمت چپ. ضریب گروه متناظر با این مدها به صورت تابعی از طول موج، سمت راست. .... ۹۸

شکل ۶-۴: منحنی‌های پاشندگی مد شیار در ساختار S-PhCW برای ضریب شکست‌های متفاوت در ناحیه شیار، سمت چپ. منحنی‌های پاشندگی مد شیار در ساختار OS-PhCW با ضریب شکست ثابت  $n_f = 1/5$ ، سمت راست. .... ۹۹

شکل ۶-۵: منحنی‌های پاشندگی مد شیار در ساختار OS-PhCW با تغییر ضریب شکست شاره تزریق شده در دو ردیف اول مجاور نقص خطی، سمت چپ. ضریب گروه متناظر با این مدها به صورت تابعی از طول، موج سمت راست. .... ۹۹

شکل ۶-۶: الف، منحنی‌های پاشندگی مد شیار در ساختار S-PhCW با پهنای متفاوت شیار. منحنی‌های نشان داده شده با رنگ‌های مشکی، قرمز و آبی، مدهای هدایت شده شیار به ازای پهنای متفاوت هستند و خط افقی متناظر با یک فرکانس جذبی یک نمونه است. ب، منحنی‌های پاشندگی مد شیار در ساختار OS-PhCW با پهنای ثابت به ازای ضریب شکست‌های متفاوت. .... ۱۰۲

## فصل اول

### حسگرهای نوری

#### ۱-۱ مقدمه

امروزه حسگری ترکیبات مختلف شیمیایی از جمله عمده ترین تحقیقات در حال انجام است. روش های نوری یکی از مهمترین روش های حسگری به حساب می آیند. روش های متعددی برای حسگری بیومولکول ها، آلاینده های محیط زیست و غیره وجود دارند. از جمله این روش ها اندازه گیری در آشامی، فلورسانی، و تشدید پلاسمون های سطحی و غیره هستند. یکی از بدیع ترین روش های حسگری نوری، استفاده از بلورهای فوتونی است [۱]. در ابزارهای حسگری نوری مبتنی بر بلورهای فوتونی حسگری از طریق تغییر ضریب شکست انجام می شود. محققان در حال حاضر در کوچک سازی ابعاد این ابزارهای نوری جهت کاربرد در مدارهای مجتمع نوری تلاش می کنند [۲]. بلور فوتونی، محیطی با خواص نوری دوره ای است که حداقل دو ماده با ثابت دی الکتریک متفاوت به طور دوره ای در این محیط تکرار می شوند. در بلورهای فوتونی همانند مواد نیم رسانا، نوارهای ممنوعه ای وجود دارد که امکان انتشار امواج الکترومغناطیسی با هر بسامد در این نوارها وجود ندارد. بلورهای فوتونی به دلیل ساز و کار منحصر به فرد در کنترل انتشار نور در ابعاد هندسی قابل مقایسه با طول موج نور، به طور وسیعی مورد پژوهش و تحلیل قرار گرفته اند. یکی دیگر از کاربردهای بسیار مهم بلور فوتونی که از اهداف این پژوهش نیز است، ایجاد نور کند است [۳]. محققان نشان داده اند که یکی از راه کارهای کوچک سازی ابزارهای نوری، استفاده از نور کند است. انتشار نور در محیط ها و ساختارهای با سرعت نور کاهش یافته، نور کند نامیده می شود. با کند شدن سرعت نور، برهم کنش نور با ماده افزایش می یابد. همچنین پالس نوری از لحاظ مکانی فشرده و چگالی انرژی الکترومغناطیسی درون ساختار افزایش می یابد. بنابراین انتظار می رود که ابعاد و توان آستانه ساختار ابزار نوری کاهش یابد. ترکیب

بلورهای فوتونی با میکروشاره‌ها از جمله جدیدترین پژوهش‌هایی است که جهت ایجاد نورکند استفاده شده است [۲]. در این پایان‌نامه از موجبرهای بلور فوتونی و ترکیب آنها با میکروشاره‌ها و موجبرهای بلور فوتونی شیاردار برای کنترل سرعت نور جهت طراحی زیست‌حسگرهای نوری استفاده می‌شود.

زیست‌حسگرها ابزارهایی مجتمع<sup>۱</sup> هستند که تغییرات بیولوژیکی را از طریق یک سامانه وارسانی<sup>۲</sup> به تغییرات الکتریکی یا نوری تبدیل می‌کنند. حسگرهای نوری ابزارهایی توانمند برای حسگری و واکافت مواد شیمیایی، گازها و غیره هستند. این حسگرها در حوزه‌های وسیعی از قبیل پزشکی، میکروبیولوژی، فیزیک ذرات، امنیت محیط زیست و دفاع ملی و غیره کاربردهای فراوان دارند [۱، ۴، ۵].

زیست‌حسگرها شامل مولفه‌های وارسانی و شناساگرها هستند. شناساگرها در مرز بین حسگر و محلول شامل این شناساگر قرار می‌گیرند. سامانه وارسانی تغییرات بیولوژیکی ناشی از برهم‌کنش شناساگرها و نمونه را به یک سیگنال قابل اندازه‌گیری تبدیل می‌کند. از روش‌های متعددی مانند روش‌های نوری، الکتریکی، مغناطیسی، الکتروشیمیایی و غیره به عنوان سازوکار سیستم وارسانی استفاده می‌شود. این حسگرها باید مشخصه‌هایی نظیر پایداری محیطی، پاسخ-های دقیق و سریع، حساسیت‌های بالا، هزینه ساخت کم و قابلیت مجتمع‌سازی را داشته باشند.

به‌طور کلی دو روش حسگری نوری مبتنی بر فلورسانسی<sup>۳</sup> و حسگری بدون برچسب<sup>۴</sup> در زیست‌حسگرهای نوری استفاده می‌شوند. در حسگری مبتنی بر فلورسانسی، مولکولهای هدف برای حسگری با مواد فلورسانسی نظیر مولکول‌های رزینه‌ای برچسب زده می‌شوند. از شدت نور فلورسانسی می‌توان به حضور مولکول‌های هدف شناسایی پی‌برد. با وجود این که حسگری فلورسانسی بسیار حساس است و حتی با این روش تک مولکول حسگری می‌شود، در این روش حسگری، فرایندهای برچسب زنی مولکول‌ها زمان‌بر است و ممکن است در مراحل برچسب‌گذاری، مولکول‌ها از شکل طبیعی خارج شوند [۱].

در حسگری بدون برچسب، مولکول‌های هدف برچسب زده نمی‌شوند و مولکول‌ها در شکل طبیعی خودشان حسگری می‌شوند. این نوع حسگری نسبتاً ساده و کم‌هزینه است. علاوه بر آن در برخی از ساز و کارهای حسگری بدون برچسب، تغییرات ضریب شکست القا شده از برهم‌کنش مولکولی، اندازه‌گیری می‌شود. این تغییرات به غلظت نمونه مربوط می‌شود. سیگنال آشکار شده در این روش با کاهش حجم نمونه، کاهش نمی‌یابد. این مشخصه در مواردی که حجم نمونه در حد نانولیتتر یا فمتولیتتر است، حائز اهمیت می‌باشد. این نسبت به روش حسگری فلورسانسی یک مزیت است که در آن سیگنال به مقدار ماده در حجم یا سطح حسگر مربوط می‌شود. در شکل ۱-۱ پیکربندی یک حسگر نوری بدون برچسب نشان داده شده است. مولکول‌های شناساگر روی سطح حسگر نشان شده‌اند. در ابتدا محفظه حسگر با محلول بافر پر می‌شود. محلول بافر برای یکسان‌سازی تغییرات استفاده می‌شود. هنگامی که مولکول‌های هدف شناسایی به مولکول‌های شناساگر متصل می‌شوند، در ناحیه سطح حسگر در حدود چند نانومتر تا

<sup>1</sup> Integrated

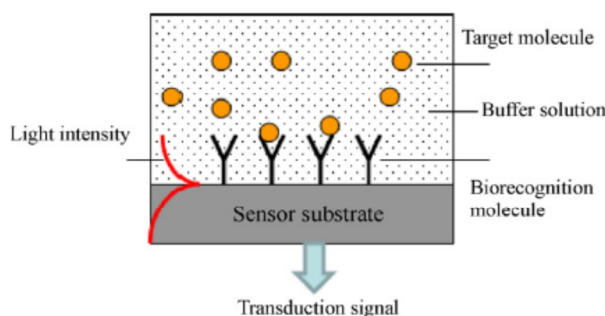
<sup>2</sup> Transducer

<sup>3</sup> Fluorescence-based detection

<sup>4</sup> Label-free detection

چند صد نانومتر، این مولکول‌ها جایگزین مولکول‌های محلول بافر می‌شوند. از آنجا که ضریب شکست ماده هدف با ضریب شکست محلول بافر متفاوت است، در سطح حسگر تغییر ضریب شکست رخ می‌دهد. این تغییر در ضریب شکست با سیگنال وارسانی در اغلب حسگرهای بدون برچسب حسگری می‌شود. حسگرهای مبتنی بر میکرو و نانو فناوری مزایایی از قبیل قابلیت مجتمع‌سازی، نمونه‌هایی با حجم‌های کوچک برای اندازه‌گیری، قابلیت حسگری توسط آرایشی از سیستم‌های وارسانی کوچک برای حسگری موازی چندین نمونه، هستند [۴-۶]. روش‌های حسگری مرسوم مانند سامانه‌های واکافت بزرگ مقیاس آزمایشگاهی علاوه بر هزینه زیاد، زمان بر هستند. از حسگرهای نوری مبتنی بر فیبرهای نوری، تشدید پلاسمون سطحی، موجبرهای تخت و بلورهای فوتونی به دلیل حساسیت‌های زیاد آن‌ها برای حسگری استفاده می‌شود. در حسگرهای نوری بدون برچسب از تغییرات ضریب شکست برای حسگری استفاده می‌شود.

سیگنال وارسانی در حسگرهای نوری شامل تغییرات در شدت نور، طول موج، فاز یا قطبش است. مولفه‌های نوعی یک حسگر نوری شامل چشمه نور، ابزارهایی برای جفت‌شدگی نور با یک نمایه مد خاص به حسگر و یک آشکارساز هستند.



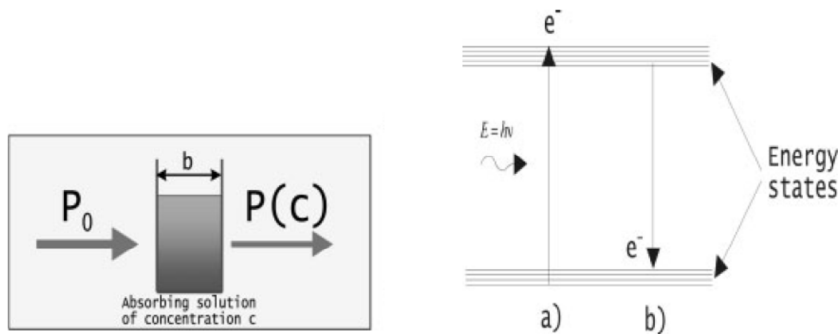
شکل ۱-۱ : طرح واره‌ای از یک زیست حسگر نوری بدون برچسب [۱].

حسگرهای نوری نقش اساسی در میکروسیستم‌ها دارند. می‌توان در زندگی روزمره از رنگ مایع‌ها به غلظت آن‌ها پی برد. هنگامی که قهوه تیره‌تر به نظر می‌رسد یعنی نور توسط مایع جذب شده است بنابراین رنگ تیره متناظر با غلظت مولکول‌های جذبی است، بنابراین حسگری جذبی به‌عنوان یکی از روش‌های واکافت در میکروسیستم‌ها به کار گرفته می‌شود. می‌توان گستره وسیعی از پدیده‌های نوری که به غلظت ماده مربوط می‌شود را از سیگنال نوری استخراج کرد. از روش فلورسانسی نیز می‌توان برای حسگری استفاده کرد. در این روش یک مولکول به حالت انرژی بالاتر برانگیخته می‌شود و در فروافت به حالت زمینه نشر انرژی نور اتفاق می‌افتد. توان نوری تابشی گسیل شده می‌تواند به غلظت نمونه مربوط شود، و به‌عنوان مبنای حسگری قرار گیرد. در ادامه به اختصار به بررسی روش‌های متفاوت برای اندازه‌گیری نوری در سیستم‌های واکافت شیمیایی پرداخته می‌شود.



## ۲-۱ حسگری جذبی

جذب نور یکی از جنبه های مهم برای استفاده در حسگری نوری است. در اندازه گیری جذبی، فوتون به نوع دیگری از انرژی مثلا به انرژی گرمایی در محلول جذبی تبدیل می شود. در گستره طول موج های فرا بنفش و مرئی، جذب نور ناشی از یک گذار الکترونی به حالت انرژی بالاتر است [۸،۷]. در شکل ۲-۱، طرح واره ای از یک اندازه گیری جذبی نشان داده شده است.



شکل ۲-۱ : طرح واره ای از یک اندازه گیری جذبی [۸].

یک محلول جذبی با غلظت،  $c$ ، در یک محفظه شفاف قرار می گیرد و نور با طول موج ثابت از آن عبور می کند. یک رابطه بسیار مهم در اندازه گیری های جذبی، قانون بیر-لمبرت<sup>۱</sup> است. بر اساس این قانون میرایی نور در یک محیط جذبی با رابطه زیر توصیف می شود [۸،۷].

$$I = I_0 e^{-\varepsilon(\lambda)Lc} \quad 1-1$$

برای بیناب نمایی جذبی به منظور حسگری مواد شیمیایی و زیست مولکول ها، تراکسیلندگی و در آشامندگی بر حسب شدت نور زمینه و شدت نور تراکسیل شده از محیط جذبی تعریف می شوند. در آشامندگی جذبی،  $A$ ، از محاسبه تراکسیل،  $T(c)$ ، مشخص می شود. مقدار در آشامندگی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$T \equiv \frac{I}{I_0}$$

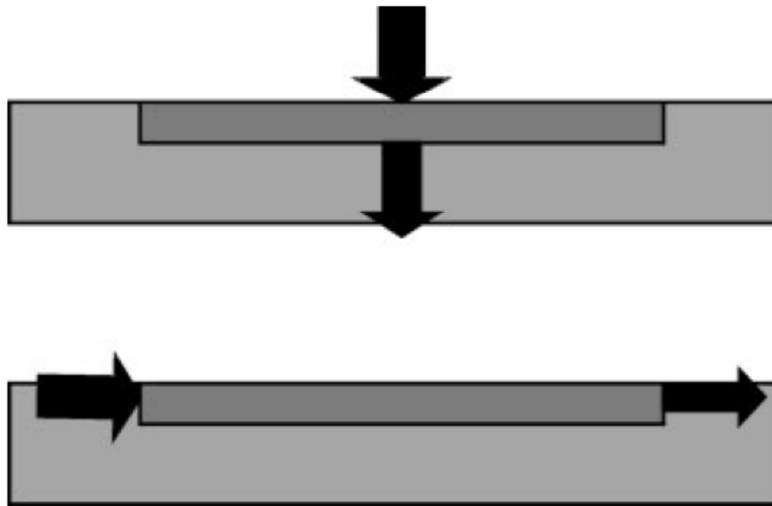
$$A \equiv -\log[T(c)] = \varepsilon(\lambda)Lc \quad 2-1$$

بر اساس قانون بیر-لمبرت در آشامندگی متناسب با غلظت محلول جذبی و طول مسیر نور  $L$  در خلال اندازه-

<sup>1</sup> Beer-Lambert's law

گیری های جذبی می باشد.

که  $\varepsilon(\lambda)$  یک ثابت تناسب است و به نمونه شیمیایی و طول موج بستگی دارد. بنابراین طول موج باید طوری انتخاب شود که دارای مقدار  $\varepsilon(\lambda)$  بزرگ باشد تا برای یک غلظت و طول مسیر نوری مشخص، بزرگترین سیگنال به دست آید. قانون بیر-لمبرت به طور کلی برای غلظت های کم و نور تکفام معتبر است. بایستی در محیطی که در آن جذب رخ می دهد، طول مسیر نور زیاد باشد تا باعث افزایش درآشامندگی شود و امکان اندازه گیری در غلظت های کم فراهم شود. حساسیت اندازه گیری های جذبی با کاهش ابعاد سلول جذبی کاهش می یابد. این پدیده به دلیل کاهش طول مسیر نوری است. در شکل ۱-۳ امکان غلبه بر مشکلات ناشی از طول مسیر نوری کوتاه نشان داده شده است. در این شکل، در شکل بالا نور در عرض موجبر با موجبر جفت شده است چون طول مسیر نوری سلول جذبی کوتاه است و درآشامی نمونه جذبی با غلظت کم کاهش می یابد. در حالی که در شکل پایین نور در طول موجبر به موجبر جفت شده است بنابراین طول مسیر نوری نسبت حالت قبل افزایش می یابد و جذب نمونه حتی برای غلظت های کم می تواند افزایش یابد.



شکل ۱-۳: افزایش طول مسیر نوری در یک اندازه گیری جذبی در یک میکروسیستم [۸].

### ۱-۳ حسگرهای نوری بدون برچسب

در دهه های گذشته برای حسگری بدون برچسب ساختارهای نوری متعددی بررسی شده اند. در این جا روش های حسگری مبتنی بر حسگری تغییرات ضریب شکست مورد بررسی قرار خواهند گرفت. ابتدا حسگری تغییرات ضریب شکست توسط ابزارهایی مبتنی بر میدان محوشونده بررسی می شوند. سپس روش حسگری بیومولکول ها توسط تشدید پلاسمون سطحی و کاواک های تشدید بررسی می شوند، و سپس نگاهی گذرا به ابزارهای مبتنی بر بلور فوتونی و استفاده آن ها در حسگری خواهیم داشت.

### ۱-۳-۱ حسگرهای نوری مبتنی بر میدان محوشونده

با وجودی که در موجبرهای دی‌الکتریک یا فیبر نوری بیشتر انرژی در داخل لایه هسته محصور می‌شود، کسری از میدان الکترومغناطیسی مد نور هدایت شده به‌طور نمایی به‌قسمت خارج از هسته موجبر نشت می‌کند، این میدان، میدان محوشونده<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. در اغلب حسگرهای نوری برای واکافت شیمیایی از میدان محوشونده استفاده می‌شود [۹]. اتصال یک مولکول هدف در ناحیه‌ای از سطح حسگر سبب تغییر در ضریب شکست موضعی آن ناحیه می‌شود، این تغییر موضعی ضریب شکست باعث جابه‌جایی فاز مد نور در حال انتشار می‌شود. این پدیده ساده با روش‌های متفاوتی در حسگری بدون برچسب به کار بسته می‌شود. عمق نفوذ میدان محوشونده، بسته به ضریب شکست لایه‌های متفاوت و طول موج نور، می‌تواند تا چند صد نانومتر باشد در حالت معمولی لایه غلاف موجبر با ضریب شکست کمتر از لایه هسته موجبر برای جلوگیری از تداخل با محیط خارجی استفاده می‌شود. اما در میکروسیستم‌ها از این تداخل به‌عنوان ابزاری برای حسگری استفاده می‌شود.

در حسگرهای فیبر نوری، از فیبر نوری به عنوان یک سازوکار و ارسانی برای حسگری موج محوشونده استفاده می‌شود. فیبر نوری از یک هسته استوانه‌ای به ضریب شکست بالاتر و یک لایه غلاف با ضریب شکست کمتر تشکیل شده است. انتشار نور توسط بازتاب داخلی کلی درون هسته بر اساس قانون اسنل توصیف می‌شود و برای زاویه‌های بزرگتر از زاویه حد رخ می‌دهد.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)$$

۳-۱

برای بازتاب کلی لازم است  $n_1 > n_2$  باشد،  $n_1$  ضریب شکست هسته و  $n_2$  ضریب شکست غلاف است. در زاویه‌های بزرگتر از زاویه حد، نور در مرز بین هسته و غلاف بازتاب می‌شود، اما موج رونده در هسته میدان محوشونده‌ای در درون غلاف ایجاد می‌کند، میدان محوشونده به‌طور نمایی در درون غلاف افت می‌کند. در حسگرهای فیبر نوری این میدان محوشونده در غلاف با محیط برهم‌کنش می‌کند و سازوکار حسگری را فراهم می‌کند. میدان محوشونده با روابط زیر توصیف می‌شود [۹].

$$E(x) = E_0 \cdot \exp\left(\frac{-x}{d}\right)$$

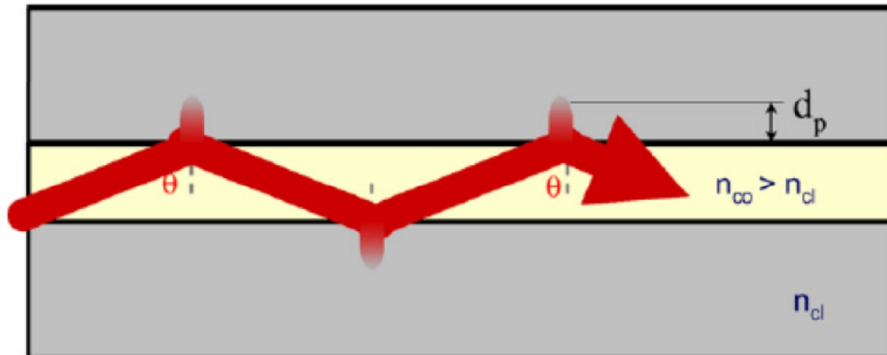
$$d = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}}$$

۴-۱

در این روابط،  $d$ ، عمق نفوذ است که بیانگر فاصله‌ای است که شدت نور به  $1/e$  مقدار بیشینه شدت نور در مرز هسته و غلاف افت می‌کند و  $x$  فاصله از مرز هسته فیبر است و  $E_0$  دامنه میدان محوشونده در مرز هسته و غلاف  $\lambda$ ، طول

<sup>۱</sup> Evanescent -wave

موج نور و  $\theta_1$ ، زاویه تابش نور در مرز هسته و غلاف است. در شکل ۴-۱ طرح واره‌ای از سطح مقطع یک فیبر و نمایش انتشار پرتو نور در هسته نشان داده شده است.



شکل ۴-۱: سطح مقطع یک فیبر نوری و انتشار نور در آن [۹].

اگر بخشی از ماده غلاف فیبر جدا شود، و با نمونه مورد نظر در آن قرار گیرد، میدان محوشونده با ماده نمونه بر-هم کنش می‌کند. سیگنال خروجی از فیبر، تغییرات اندازه میدان محوشونده ناشی از تغییرات ضریب شکست محیط را اندازه می‌گیرد. ساختار هندسی فیبر نوری نسبت به فناوری‌های حسگرهای دیگر قابلیت مجتمع‌سازی کمتری دارد.

### ۲-۳-۱ حسگری مبتنی بر تداخل سنجی

یکی از روش‌هایی که برای وارسانی سیگنال استفاده می‌شود، روش تداخل سنجی است که حساسیت و دقت زیادی دارد. در تداخل سنجی از اختلاف فاز بین دو باریکه موازی از یک چشمه همدوس برای حسگری استفاده می‌شود [۱۰]. ساده‌ترین پیکربندی عملی برای حسگرهای نوری تداخل سنج ماخ-زئر<sup>۱</sup>، MZI، است که در شکل ۱-۵ نشان داده شده است. در تداخل سنج ماخ-زئر موجبر نوری ورودی به دو بازو با طول یکسان تقسیم می‌شود و سپس با هم ترکیب می‌شوند و یک موجبر خروجی را شکل می‌دهند. یکی از بازوها به‌عنوان بازوی مرجع و بازوی دیگر بازوی حسگر است. در بازوی حسگر ناحیه‌ای وجود دارد که میدان محوشونده نور هدایت شده می‌تواند با محیط سطح حسگر برهم کنش کند. هر گونه تغییر در ویژگی‌های نور ناشی از محیط خارجی مثلاً ضریب شکست در خلال یک فاصله معین،  $L$ ، طول برهم کنش، توسط بازوی حسگر مشخص می‌شود. تغییرات ضریب شکست موضعی در سطح حسگر باعث القاء یک اختلاف فاز در دو باریکه می‌شود. در غیاب هر گونه تغییر در سطح بازوی حسگر تداخل-سنج، نور باز ترکیب شده در بخش خروجی هم‌فاز باقی می‌ماند و باعث ایجاد تداخل سازنده و بیشینه شدت نور در بخش خروجی نور می‌شود. هنگامی که در بازوی حسگر، اتصال مولکول‌ها روی سطح حسگر رخ بدهد، ضریب

<sup>۱</sup> Mach-Zehnder Interferometer