

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

باسمه تعالی



تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب **عالیه نراقی** متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه که حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مأخذ ذکر گردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارزیابی نشده است. در صورت اثبات تخلف (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو

عالیه نراقی

امضاء



دانشگاه سندھ

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

طراحی و شبیه‌سازی حسگر گاز با حساسیت بالا براساس ساختار کریستال فوتونی

نگارش

عالیه نراقی

استاد راهنما: دکتر سعید علیایی

استاد مشاور: دکتر وحید احمدی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق-الکترونیک

بهمن ماه ۱۳۹۱



صور تجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم عالیه نراقی رشته: مهندسی برق- الکترونیک با عنوان: طراحی و شبیه سازی حسگر گاز با حساسیت بالا بر اساس ساختار کریستال فوتونی، که در تاریخ ۹۱/۱۱/۱۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی برگزار گردید و نتیجه به شرح زیر اعلام گردید.

□ قبول (بدرجه عالی) امتیاز (۱۹/۱۸) □ دفاع مجدد □ مردود.

۱- عالی (۱۹-۲۰) ✓

۲- بسیار خوب (۱۸-۱۸/۹۹)

۳- خوب (۱۶-۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۴-۱۵/۹۹)

۵- غیر قابل قبول (کمتر از ۱۴)

اعضاء	نام و نام خانوادگی	مرتبۀ علمی	امضاء
استاد راهنما	دکتر سعید علیایی	استادیار	
استاد مشاور	دکتر وحید احمدی	استاد	
استاد داور داخلی	دکتر مصطفی شعبانی	استادیار	
استاد داور خارجی	دکتر ابوالفضل چمن مطلق	استادیار	
نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمود صیفوری	استادیار	

دکتر سعید علیایی

رئیس دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

انور سعید

تقدیم به پدر و مادر عزیز و همسر فداکارم

در این جا بر خود لازم می‌دانم از استاد گرامی جناب آقای دکتر سعید علیایی بخاطر تمام زحمتهای ایشان و همچنین حمایت‌هایی که از اینجانب در به ثمر رسیدن این پایان‌نامه داشته‌اند کمال سپاسگزاری و قدردانی را داشته باشم. همچنین از جناب آقای دکتر وحید احمدی به خاطر راهنمایی‌ها و کمک‌هایی که نسبت به من داشته‌اند کمال تشکر را دارم. از سرکار خانم مهندس فهیمه تقی‌پور و آقایان مهندس سیدرضی موسوی و مهندس محمد رشیدی و مهندس مجتبی صادقی نیز که از کمک‌های ایشان در طول انجام پایان‌نامه بهره بردم صمیمانه تشکر می‌نمایم.

چکیده

شناسایی و تعیین مقدار اتم‌ها، مولکول‌ها یا غلظت یون‌ها در نمونه‌های گازی برای کاربردهای پزشکی، صنعتی، زیست محیطی و کنترل آلودگی‌ها یک نیاز اساسی است. در دهه‌های اخیر توجه زیادی به حسگرهای گاز فیبر نوری برای کاربردهای اخیر شده است. در این کاربردها حسگرهای نوری برای گازهایی مانند متان، اسیتیلن، آمونیاک، دی‌اکسید سولفور، اکسیدهای نیتروژن و هیدروکربن‌ها و همچنین برای آشکارسازی مایعاتی همچون آب دریا، ایجاد شده‌اند. در زمینه حسگری فیبر نوری، فیبرهای کریستال فوتونی که دارای ساختاری متناوب از حفره‌های هوایی درون پوسته خود هستند درجه آزادی و انعطاف‌پذیری بالایی را در طراحی نشان داده‌اند. همچنین به‌علت وجود حفره‌های هوایی و امکان نفوذ نمونه‌های گازی یا مایع به درون حفره‌ها و برهم‌کنش آن‌ها با نور، طول برهم‌کنش افزایش می‌یابد و بدون نیاز به داشتن فیبرهای با طول زیاد حساسیت به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

این پایان‌نامه بر روی طراحی و شبیه‌سازی حسگرهای جدید بر مبنای فیبر کریستال فوتونی برای تحقق هم‌زمان حساسیت بیشتر و تلفات تعیین کم‌تر تمرکز می‌کند. روش المان محدود به‌علت دقت ثابت شده‌ی آن در تحلیل فیبرهای کریستال فوتونی، برای تحلیل پارامترهای حسگری استفاده شده‌است.

سه طرح فیبر کریستال فوتونی هدایت نمایی به‌منظور افزایش حساسیت نسبی و کاهش تلفات تعیین پیشنهاد شده‌است. در دو طرح اول حفره‌ها در آرایش شش ضلعی و در طرح سوم در آرایش هشت ضلعی قرار گرفته‌اند. در طرح اول در طول موج $1,55 \mu\text{m}$ به حساسیت 0.55% و تلفات $1.16 \times 10^{-3} \text{ dB/m}$ برای PCF پیشنهادی با فاصله میان حفره‌های $1,6 \mu\text{m}$ رسیده‌ایم. هرچند میزان حساسیت بالا است اما ناحیه مؤثر مودی به‌علت فاصله کوچک بین حفره‌های، کم می‌شود. در طرح دوم نقص حلقه‌ای با شاخص بالا برای تحقق هم‌زمان حساسیت بالا و تلفات تعیین اندک به مرکز فیبر اعمال می‌شود. همچنین برای افزایش بیشتر میزان حساسیت از حفره‌های شش ضلعی به‌جای حفره‌های دایره‌ای در درونی‌ترین حلقه استفاده می‌شود. در طول موج $1,33 \mu\text{m}$ که در خط جذب متان قرار دارد به حساسیت نسبی $13,23\%$ و تلفات $3,77 \times 10^{-6} \text{ dB/m}$ دست یافته‌ایم. همچنین در شبیه‌سازی این طرح پاشیدگی ماده سیلیکا و شیشه ژرمانوسیلیکات را برای محاسبه دقیق‌تر شاخص مؤثر مود در نظر گرفته‌ایم. در طرح سوم از آرایش هشت ضلعی حفره‌های هوایی استفاده کرده‌ایم و برای ساختار بهینه به حساسیت نسبی $9,33\%$ و تلفات $6,8 \times 10^{-4} \text{ dB/m}$ در طول موج $1,5 \mu\text{m}$ رسیده‌ایم. همچنین برای طرح سوم اثر نوسانات $\pm 0.5\%$ قطر حفره‌های درونی‌ترین حلقه و حفره‌های قرارگرفته در لبه هشت ضلعی‌ها که در فرآیند ساخت بیشترین احتمال خطا را دارند را بررسی کرده‌ایم. فیبر پیشنهادی به‌علت حساسیت نسبی زیاد و تلفات اندک برای کاربرد در حسگری گاز بسیار سودمند خواهد بود.

کلمات کلیدی: حسگر نوری غلظت گاز، تلفات تعیین، حساسیت نسبی، فیبر کریستال فوتونی.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه و تاریخچه

- ۱-۱- مقدمه..... ۲
- ۲-۱- اهمیت و جایگاه حسگرهای گاز..... ۲
- ۳-۱- معرفی فیبرهای کریستال فوتونی..... ۳
 - ۱-۳-۱- فیبر هسته هوا..... ۴
 - ۳-۱-۱- فیبرهای کریستال فوتونی هدایت کننده نور در هوا..... ۶
 - ۳-۱-۲- فیبر کریستال فوتونی دارای مغزی با ضریب شکست کم..... ۶
 - ۳-۱-۳- فیبر براگ..... ۷
 - ۳-۱-۲- فیبر کریستال فوتونی هدایت نمایه..... ۸
 - ۳-۱-۲-۱- فیبر کریستال فوتونی ناحیه مود بزرگ (LMA-PCF)..... ۹
 - ۳-۱-۲-۲- فیبر کریستال فوتونی نگهدارنده قطبش..... ۱۰
 - ۳-۱-۲-۳- فیبر کریستال فوتونی غیر خطی..... ۱۱
- ۳-۳-۱- مشخصات فیبرهای کریستال فوتونی..... ۱۲
 - ۳-۳-۱-۱- پاشیدگی در فیبرهای کریستال فوتونی..... ۱۲
 - ۳-۳-۱-۲- عملکرد تک مود در فیبر کریستال فوتونی مغزی جامد..... ۱۴
 - ۳-۳-۱-۳- تلفات تحدید..... ۱۶
 - ۳-۳-۱-۴- ناحیه موثر مودی..... ۱۷
- ۴-۳-۱- روشهای ساخت فیبرهای کریستال فوتونی..... ۱۷
- ۴-۱- انواع حسگرهای گاز کریستال فوتونی..... ۲۰
 - ۴-۱-۱- تاریخچه..... ۲۰
 - ۴-۱-۲- حسگر گاز بر مبنای طیف سنجی جذب با استفاده از فیبر گاف فوتونی..... ۲۱
 - ۴-۱-۳- حسگر گاز بر مبنای جابه‌جایی قله فرکانس..... ۲۲

- ۲۴-۴-۴-۱- حسگر گاز بر مبنای تغییر فرکانس قطع.....
- ۲۵-۵-۱- حسگرهای گاز با استفاده از فیبر کریستال فوتونی هدایت نمایه.....
- ۲۶-۱-۵-۱- فیبر کریستال فوتونی هسته جامد.....
- ۳۰-۲-۵-۱- فیبر کریستال فوتونی هدایت نمایه با حفره مرکزی کوچک.....
- ۳۵-۶-۱- نتیجه گیری.....

فصل دوم : روش تحلیل مشخصات نوری حسگر پیشنهادی

- ۳۷-۱-۲- مقدمه.....
- ۳۷-۲-۲- روش عددی تحلیل.....
- ۳۸-۱-۲-۲- روش المان محدود.....
- ۴۶-۳-۲- مبانی اندازه گیری جذب نوری.....
- ۴۷-۴-۲- مبانی حسگرهای جذب موج میراشونده.....
- ۵۰-۵-۲- نتیجه گیری.....

فصل سوم: شبیه سازی و تحلیل فیبر حسگر پیشنهادی

- ۵۲-۱-۳- مقدمه.....
- ۵۲-۲-۳- فرضیات.....
- ۵۴-۳-۳- فیبر کریستال فوتونی هدایت نمایه با حفره توخالی در وسط.....
- ۶۱-۴-۳- PCF با نقص حلقه‌ای شاخص بالا در مرکز.....
- ۷۰-۵-۳- فیبر کریستال فوتونی با ساختار هشت ضلعی.....
- ۷۸-۶-۳- نتیجه گیری.....

فصل چهارم: جمع‌بندی و پیشنهادها

- ۸۰-۱-۴- جمع‌بندی.....
- ۸۱-۲-۴- مسایل موجود در حسگری گاز کریستال فوتونی و پیشنهادات.....
- ۸۳-مراجع.....

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۳: ثابت‌های فرض شده در شبیه‌سازی‌ها ۵۳
- جدول ۲-۳: خواص و طول موج جذب فرسرخ نزدیک گونه‌های مولکولی [۲۸] ۵۴

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱: فیبر کریستال فوتونی هسته هوا با عملکرد مبتنی بر اثر شکاف باند فوتونی [۲۰]..... ۵
- شکل ۱-۲: فیبر کریستال فوتونی هدایت کننده نور در هوا [۲۴]..... ۶
- شکل ۱-۳: PCF دارای هسته با ضریب شکست کم [۲۴]..... ۷
- شکل ۱-۴: فیبر براگ [۲۴]..... ۸
- شکل ۱-۵: فیبر کریستال فوتونی هدایت نمایه ۸
- شکل ۱-۶: نمایه ضریب شکست مقطع عرضی PCF. بازتاب داخلی کلی به وسیله ضریب شکست متوسط ناحیه پوسته [۲۶]..... ۹
- شکل ۱-۷: PCF با ناحیه مود بزرگ با هسته با قطر $10\ \mu\text{m}$ [۲۶]..... ۱۰
- شکل ۱-۸: PCF نگهدارنده قطبش [۲۶]..... ۱۱
- شکل ۱-۹: PCF با غیر خطسانی بالا دارای هسته با قطر $1,7\ \mu\text{m}$ [۲۶]..... ۱۱
- شکل ۱-۱۰: مقایسه‌ی پاشیدگی SIF با PCF هسته جامد [۳۸]..... ۱۳
- شکل ۱-۱۱: یک نمونه منحنی فاز تک مود / چند مود [۳۵]..... ۱۵
- شکل ۱-۱۲: ساخت فیبر کریستال فوتونی الف) ساخت هر لوله‌ی موئین مجزا، ب) شکل دادن به ساختار، ج) کشیدن پیش سازه و د) کشیدن فیبر نهایی [۳۸]..... ۱۸
- شکل ۱-۱۳: فیبرهای کریستال فوتونی که دارای نقص هستند، الف) فیبر با حفره‌های نامساوی ، ب) حفره‌های اضافی در ساختار و ج) تغییر مکان حفره‌ها [۳۸]..... ۱۹
- شکل ۱-۱۴: روش‌های مدولاسیون نور ۲۱
- شکل ۱-۱۵: سیستم آزمایشگاهی برای پر کردن PBF ها با گاز و اندازه‌گیری‌های جذبی [۴۳]..... ۲۲
- شکل ۱-۱۶: تصاویر میکروسکوپی از الف) PBF 1500 ب) PBF 1300 [۴۳]..... ۲۲
- شکل ۱-۱۷: تصویر میکروسکوپی اسکن الکترونی از کاواک. آینه‌ها با A ، قسمت باریک شونده با B، و کاواک با C نشان داده شده‌اند [۴۷]..... ۲۳
- شکل ۱-۱۸- الف): رفتار طول موج تشدید به ازای فشارهای مختلف SF_6 . فشار از 5×10^4 تا حدود $10^3\ \text{Pa}$ کاهش یافته است. اندازه‌گیری در گام‌های $5 \times 10^3\ \text{Pa}$ انجام گرفته است. خط ممتد یک تقریب خطی برای داده‌ها است. ب): جابه‌جایی طول موج تشدید برای محیط‌های گازی متفاوت (H_2 , N_2 , Ar ,) SF_6 . مربع‌های سیاه: مقادیر اندازه‌گیری شده؛ خط یا نقاط قرمز: مقادیر محاسبه شده و درون‌یابی خطی هستند. ضریب شکست‌های N_2 و Ar و جابه‌جایی طول موج‌های متناظر در نوار خطا یکسان هستند [۴۴]..... ۲۳
- شکل ۱-۱۹: مقطع عرضی PCF با هسته DI [۴۸]..... ۲۴

شکل ۱-۲۰: تغییرات طیف عبوری برای nm های مختلف برای نسبت d/Λ در (الف): برابر ۰,۶، (ب): برابر ۰,۷، (ج): برابر ۰,۴ و در (د): برابر ۰,۵ [۴۸].

شکل ۱-۲۱: سطح مقطع PCF هسته جامد [۴۲].

شکل ۱-۲۲: حساسیت نسبی PCF هسته جامد بر حسب طول موج برای $\Lambda = 1,33 \mu m$ و $d\Lambda$ متغیر از ۰,۶۹ تا ۰,۹۳ [۴۲].

شکل ۱-۲۳: تغییرات غلظت بهنجار شده با زمان برای طول های مختلفی از فیبر [۴۲].

شکل ۱-۲۴: سیستم تجربی اندازه گیری فشار داخل چمبره: فیبر تک مود. PD آشکارساز نوری. ASE Source: منبع انتشار خودبخودی تقویت شده. TOF: فیلتر نوری قابل تنظیم [۴۲].

شکل ۱-۲۵: PCF حسگر که در فاصله های مساوی به طور متناوب استفاده شده است [۴۲].

شکل ۱-۲۶ (الف): فیبر کریستال فوتونی به طول ۱۰ cm، (ب): کمترین عبور بهنجار شده گاز اندازه گیری شده بر حسب زمان برای یک فیبر کریستال فوتونی به طول ۲۵ cm [۴۲].

شکل ۱-۲۷ (الف): سطح مقطع PCF پیشنهادی، (ب): سطح مقطع PCF پیشین [۴۹].

شکل ۱-۲۹ (الف): نمودار حساسیت نسبی بر حسب ضریب شکست n_1 برای $\lambda = 1,6 \mu m$ ، $\lambda = 1,4 \mu m$ ، $d = 2,3 \mu m$ و (ب): نمودار حساسیت نسبی بر حسب طول موج برای شکست $n_1 = 1,5$ ، $\lambda = 1,4 \mu m$ ، $d = 2,3 \mu m$ [۴۹].

شکل ۱-۳۰ (الف): نمودار حساسیت نسبی بر حسب طول موج برای شکست n_1 برای $\lambda = 1,6 \mu m$ ، $d = 1,4 \mu m$ ، $d_1 = 1 \mu m$ ، (ب): نمودار حساسیت نسبی بر حسب طول موج برای $n_1 = 1,5$ ، $d = 1,4 \mu m$ ، $d_1 = 1 \mu m$ [۴۹].

شکل ۱-۳۱ (الف): نمودار حساسیت نسبی بر حسب طول موج برای $n_1 = 1,5$ ، $d_1 = 1 \mu m$ ، $d = 2,3 \mu m$ ، (ب): نمودار حساسیت نسبی بر حسب طول موج برای $\lambda = 1,6 \mu m$ ، $d_1 = 1 \mu m$ ، $\Lambda = 2,3 \mu m$ [۴۹].

شکل ۱-۳۲: توزیع میدان مود در PCF با و برای $n_1 = 1,5$ ، $n_2 = 1,33$ ، $d = 1,4 \mu m$ و $d_1 = 1 \mu m$ [۴۹].

شکل ۱-۳۳: مقایسه حساسیت نسبی بر حسب طول موج برای ماده نمونه مایع و گاز [۴۹].

شکل ۲-۱: PML مستطیلی اعمال شده برای محاسبات فیبر نوری.

شکل ۲-۲: سطح مقطع فیبر با PML دایره ای [۴۹].

شکل ۲-۳: سطح مقطع فیبر کریستال فوتونی با PML دایره ای مش بندی شده [۴۹].

شکل ۲-۴: سلول جذب مستقیم [۲۶].

شکل ۲-۵: میدان میراشونده از بازتاب داخلی کلی در یک مرز و مسیر پرتو در موجبر با جاذب در هر طرف [۲۶].

شکل ۳-۱: الف: مقطع عرضی PCF پیشین با حفره هوایی کوچک در مرکز و با قطر حفره‌های هوایی پوسته یکسان، ب: مقطع عرضی PCF پیشنهادی با حفره هوایی کوچک در مرکز و حفره‌های هوایی دو حلقه بیرونی بزرگ. dc : قطر حفره مرکزی، $d1$: قطر حفره‌های پوسته، $d2$: قطر حفره‌های دو حلقه بیرونی. ۵۵

شکل ۳-۲: نمودار حساسیت نسبی بر حسب طول موج برای PCF با حفره کوچک در مرکز قطر حفره‌های پوسته یکسان در مرجع [۴۶]، $d1 = 1.4 \mu m$ و $dc = 1 \mu m$ و برای مقادیر $2.3, 2.2, 2, 1.8, 1.6, 1.4, 1.2, 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1 \mu m$. $a =$ ۵۵

شکل ۳-۳: نمودار حساسیت نسبی بر حسب طول موج برای PCF با حفره کوچک در مرکز قطر حفره‌های پوسته یکسان در مرجع [۴۶]. $a = 1.6 \mu m$ و $d1 = 1.4 \mu m$ و ابعاد هسته $2.3, 2.2, 2, 1.8, 1.6, 1.4, 1.2, 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1 \mu m$. $dc =$ ۵۶

شکل ۳-۴: نمودار حساسیت نسبی بر حسب طول موج برای PCF پیشنهادی با $d1 = 1.4 \mu m$ و $dc = 1$ و برای مقادیر $2.3, 2, 1.8, 1.6, 1.4, 1.2, 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1 \mu m$. $a =$ ۵۷

شکل ۳-۵: نمودار تلفات تحدید بر حسب طول موج برای PCF پیشنهادی با $a = 1.8 \mu m$ و $d1 = 1.4 \mu m$ و ابعاد هسته و $dc = 1.3, 1.2, 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1 \mu m$. ۵۷

شکل ۳-۶: مقایسه تلفات تحدید در PCF پیشین و PCF پیشنهادی با مشخصات $a = 1.6 \mu m$ و $d1 = 1$ و ابعاد هسته $dc = 1.2, 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1 \mu m$. ۵۸

شکل ۳-۷: مقایسه حساسیت نسبی در PCF پیشین و PCF پیشنهادی با مشخصات $a = 1.6 \mu m$ و $d1 = 1 \mu m$ و ابعاد هسته $dc = 1.2, 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1 \mu m$. ۵۸

شکل ۳-۸: نمودار توان نرمالیزه خروجی بدون حضور گاز. ۶۰

شکل ۳-۹: نمودار توان نرمالیزه خروجی بدون حضور گاز. ۶۰

شکل ۳-۱۰: مقطع عرضی PCF1. ۶۱

شکل ۳-۱۱: مقطع عرضی PCF2. ۶۲

شکل ۳-۱۲: مقطع عرضی PCF3. ۶۲

شکل ۳-۱۳: نمودار ضرایب شکست مؤثر مود هدایتی بر حسب طول موج در PCF1 و PCF2 و PCF3 با

مشخصات $\Lambda = 2.3$ و $dc = 1.4 \mu m$ برای PCF1 و $d1 = d2 = d3 = 1.4 \mu m$ و برای PCF2 و $d1 = d2 = d3 = 1.4 \mu m$ و $d2 = 1.8 \mu m$ و $d1 = 1.4 \mu m$ برای PCF3 در نظر گرفته شد. ۶۳

شکل ۳-۱۴: مقایسه حساسیت نسبی بر حسب طول موج در PCF1 و PCF2 و PCF3 با مشخصات $\Lambda = 2.3 \mu m$ و $dc = 1.4 \mu m$ برای PCF1 و $d1 = d2 = d3 = 1.4 \mu m$ و برای PCF2 و $d1 = 1.4 \mu m$

شکل ۳-۱۵: مقایسه تلفات تحدید بر حسب طول موج در PCF1 و PCF2 و PCF3 با مشخصات $d_1 = 1,4 \mu\text{m}$ و $d_2 = d_3 = 1,8 \mu\text{m}$ و برای PCF3 $d_1 = 1,4 \mu\text{m}$ و $d_2 = d_3 = 1,8 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شد. ۶۴

شکل ۳-۱۶: مقایسه حساسیت نسبی بر حسب طول موج در PCF3 با مشخصات $\Lambda = 2,3 \mu\text{m}$ ، $d_1 = 1,4 \mu\text{m}$ و $d_2 = 1,8 \mu\text{m}$ و $d_3 = 1,8 \mu\text{m}$ و $dc = 1,2 \mu\text{m}$ برای $W = 1,4, 1,2, 1 \mu\text{m}$ ۶۵

شکل ۳-۱۷: مقایسه تلفات تحدید بر حسب طول موج در PCF3 با مشخصات $\Lambda = 2,3 \mu\text{m}$ ، $d_1 = 1,4 \mu\text{m}$ و $d_2 = 1,8 \mu\text{m}$ و $d_3 = 1,8 \mu\text{m}$ و $dc = 1,2 \mu\text{m}$ برای $W = 1,4, 1,2, 1 \mu\text{m}$ ۶۶

شکل ۳-۱۸: مقایسه حساسیت نسبی بر حسب طول موج در PCF3 با مشخصات $\Lambda = 2,3 \mu\text{m}$ ، $d_1 = 1,4 \mu\text{m}$ و $d_2 = 1,8 \mu\text{m}$ و $dc = 1,2 \mu\text{m}$ برای $W = 1,2 \mu\text{m}$ و برای $d_3 = 1,6, 1,8, 2 \mu\text{m}$ ۶۶

شکل ۳-۱۹: تلفات تحدید بر حسب طول موج در PCF3 با مشخصات $\Lambda = 2,3 \mu\text{m}$ ، $d_1 = 1,4 \mu\text{m}$ و $d_2 = 1,8 \mu\text{m}$ و $dc = 1,2 \mu\text{m}$ و برای $W = 1,2 \mu\text{m}$ و برای $d_3 = 1,6, 1,8, 2 \mu\text{m}$ ۶۷

شکل ۳-۲۰ الف: مقطع عرضی PCF4 . ب: نمای بزرگتر از حلقه نقصی تو خالی و درونی ترین حلقه حفره‌های هوایی. dc : قطر حفره مرکزی، d_1 : قطر حفره‌های حلقه های وسط، d_2 : قطر حفره‌های دو حلقه بیرونی، d_4 : طول ضلع شش ضلعی، $wring$: قطر خارجی حلقه. ۶۷

شکل ۳-۲۱: مقایسه حساسیت نسبی بر حسب طول موج در فیبر نوع ۳ و ۴ با مشخصات $\Lambda = 2,3 \mu\text{m}$ ، $d_1 = 1,4 \mu\text{m}$ و $d_2 = 1,8 \mu\text{m}$ و $dc = 1,2 \mu\text{m}$ و برای $W = 0,6 \mu\text{m}$ و برای PCF3 $d_3 = 2 \mu\text{m}$ و در PCF4 $d_4 = 1,21 \mu\text{m}$ ۶۸

شکل ۳-۲۲: مقایسه تلفات تحدید بر حسب طول موج در فیبر نوع ۳ و ۴ با مشخصات $\Lambda = 2,3 \mu\text{m}$ ، $d_1 = 1,4 \mu\text{m}$ و $d_2 = 1,8 \mu\text{m}$ و $dc = 1,2 \mu\text{m}$ و برای $W = 0,6 \mu\text{m}$ و برای PCF3 $d_3 = 2 \mu\text{m}$ و در PCF4 $d_4 = 1,21 \mu\text{m}$ ۶۸

شکل ۳-۲۳ الف: مقطع عرضی PCF پیشنهادی با قطر حفره‌های یکسان؛ در این جا dc : نماد قطر هسته، d_1 : نماد قطر حفره‌های درونی ترین حلقه، d_2 : نماد قطر حفره‌های لبه‌های هشت ضلعی‌ها و Λ : نماد فاصله مرکز تا مرکز حفره‌های مجاور است، ب: مقطع عرضی PCF پیشین. ۷۰

شکل ۳-۲۴: نمودار ضریب شکست مود پایه بر حسب طول موج برای PCF پیشنهادی و پیشین با $d_1 = d_2 = d = 1,4 \mu\text{m}$ و $dc = 1,4 \mu\text{m}$ و $\Lambda = 2,3 \mu\text{m}$ ۷۱

شکل ۳-۲۵: نمودار حساسیت نسبی برای PCF پیشنهادی و پیشین با $\Lambda = 2,3 \mu\text{m}$ و $dc = 1,4 \mu\text{m}$ و $d_1 = d_2 = d = 1,4 \mu\text{m}$ ۷۲

شکل ۳-۲۶: نمودار تلفات تحدید برای PCF پیشنهادی و پیشین با $\Lambda = 2,3\mu\text{m}$ و $dc = 1,4\mu\text{m}$ و $d1 = d2 = d = 1,4\mu\text{m}$ ۷۲

شکل ۳-۲۷: نمودار حساسیت نسبی برای PCF پیشنهادی با مشخصات $\Lambda = 2,3\mu\text{m}$ و $dc = 1,4\mu\text{m}$ و $d1 = 1,4,1,6,1,74\mu\text{m}$ و $d = d2 = 1,4\mu\text{m}$ ۷۳

شکل ۳-۲۸: نمودار حساسیت نسبی بر حسب طول موج برای PCF پیشنهادی با مشخصات $\Lambda = 2,3\mu\text{m}$ و $dc = 1,4\mu\text{m}$ و $d = 1,4\mu\text{m}$ و $d1 = 1,74\mu\text{m}$ و $d2 = 2,1,4\mu\text{m}$ ۷۴

شکل ۳-۲۹: نمودار تلفات تحدید بر حسب طول موج برای PCF پیشنهادی با مشخصات $\Lambda = 2,3\mu\text{m}$ و $dc = 1,4\mu\text{m}$ و $d = 1,4\mu\text{m}$ و $d1 = 1,74\mu\text{m}$ و $d2 = 1,4,2\mu\text{m}$ ۷۴

شکل ۳-۳۰- (الف) و (ب): توزیع مود پایه در PCF پیشنهادی با مشخصات $\Lambda = 2,3\mu\text{m}$ ، $dc = 1,4\mu\text{m}$ ، $d = 1,4\mu\text{m}$ برای (الف) $d1 = 1,74\mu\text{m}$ ، $d2 = 2\mu\text{m}$ و برای (ب) $d1 = d2 = d = 1,4\mu\text{m}$ و (ج) توزیع مود پایه برای PCF پیشین. ۷۵

شکل ۳-۳۱: نمودار تغییرات حساسیت نسبی با تغییر $d1 \pm 5\%$ برای PCF پیشنهادی با مشخصات $\Lambda = 2,3\mu\text{m}$ و $dc = 1,4\mu\text{m}$ و $d = 1,4\mu\text{m}$ و $d1 = 1,74\mu\text{m}$ و $d2 = 1,4\mu\text{m}$ ۷۶

شکل ۳-۳۲: نمودار تغییرات تلفات تحدید با تغییر $d1 \pm 5\%$ برای PCF پیشنهادی با مشخصات $\Lambda = 2,3\mu\text{m}$ و $dc = 1,4\mu\text{m}$ و $d = 1,4\mu\text{m}$ و $d1 = 1,74\mu\text{m}$ و $d2 = 1,4\mu\text{m}$ ۷۶

شکل ۳-۳۳: نمودار تغییرات حساسیت نسبی با تغییر $d2 \pm 5\%$ برای PCF پیشنهادی با مشخصات $\Lambda = 2,3\mu\text{m}$ و $dc = 1,4\mu\text{m}$ و $d = 1,4\mu\text{m}$ و $d1 = 1,74\mu\text{m}$ و $d2 = 1,4\mu\text{m}$ ۷۷

شکل ۳-۳۴: نمودار تغییرات تلفات تحدید با تغییر $d2 \pm 5\%$ برای PCF پیشنهادی با مشخصات $\Lambda = 2,3\mu\text{m}$ و $dc = 1,4\mu\text{m}$ و $d = 1,4\mu\text{m}$ و $d1 = 1,74\mu\text{m}$ و $d2 = 1,4\mu\text{m}$ ۷۷

فصل اول

مقدمه و تاریخچه

۱-۱ مقدمه

در این فصل به اهمیت و جایگاه حسگرهای گاز و مزیت استفاده از فیبرهای نوری به خصوص فیبرهای کریستال فوتونی پرداخته شده است. سپس انواع فیبرهای کریستال فوتونی و مشخصات نوری آنها را به اختصار توضیح داده می شود و سپس برخی از انواع حسگرهای گاز با استفاده از ساختارهای کریستال فوتونی را معرفی می شود از آنجا که هدف، استفاده از فیبر کریستال فوتونی هدایت نمایه است در پایان فصل حسگرهای گاز با استفاده از فیبرهای هدایت نمایه که تاکنون گزارش شده اند معرفی می شوند.

۲-۱ اهمیت و جایگاه حسگرهای گاز

در دهه های اخیر توجه زیادی به حسگرهای شیمیایی با استفاده از فیبر نوری برای کاربردهای گوناگون از جمله زمینه های پزشکی، فرآیند صنعتی، کنترل آلودگی شده است. در این کاربردها حسگرهای با فیبر نوری برای گازهایی مانند اسیتیلن، آمونیاک، دی اکسید سولفور، اکسیدهای نیتروژن و هیدروکربن ها و همچنین برای آشکارسازی مایعاتی همچون آب دریا، ایجاد شده اند. آشکارسازهای گاز می توانند برای تشخیص گازهای قابل احتراق و سمی و قابل اشتعال و تخلیه اکسیژن مورد استفاده قرار گیرند. این حسگرها به طور گسترده ای در صنعت استفاده می شود به عنوان مثال می تواند در بسیاری نقاط مانند سکوی نفتی برای نظارت بر فرآیند ساخت و تشخیص نشت گازهای سمی و قابل اشتعال، استفاده شوند [۱]. همچنین آنها می توانند در آتش نشانی نیز استفاده شوند. مواد برودتی مانند نیتروژن مایع، هلیوم مایع و آرگون مایع، اگر در یک فضای محدود نفوذ کنند جایگزین اکسیژن می شوند. کاهش سریع اکسیژن، یک محیط بسیار خطرناک برای کارکنان ایجاد می کند. با این ذهنیت وجود سیستم حسگری برای تشخیص گاز اکسیژن هنگام حضور مواد برودتی ضروری است. آزمایشگاه ها، اتاق MRI، شرکت های ساخت دارو و مواد نیمه هادی و مواد برودتی از جمله استفاده کنندگان حسگرهای گاز اکسیژن هستند [۲]. همچنین حسگرهای اکسیژن می توانند برای تشخیص میزان اکسیژن موجود در مخلوط نیتروکس مورد

استفاده در غواصی یا به‌عنوان بخشی از حلقه بازخورد در سیستم اکسیژن مدار بسته برای ثابت نگه‌داشتن فشار ثابتی از اکسیژن در فضاوردی مورد استفاده قرار گیرند [۳].

به‌طور خاص ابزارهای حسگری که از اپتیک و فوتونیک استفاده می‌کنند موضوع تحقیقات گسترده‌ای در طول دو دهه گذشته بوده‌اند. که این به‌علت طیف گسترده پدیده‌های نوری است که می‌توان از هر کدام از آن‌ها برای سازوکار حسگری استفاده کرد. لومینسانس^۱، فلورسانس^۲، تابندگی فسفری^۳، جذب^۴، پراکندگی الاستیک^۵، پراکندگی رامان^۶، تشدید پلاسمای سطحی^۷، تشدید موج هدایتی^۸، تداخل^۹ و بازتاب / عبور میکروسکوپی، نمونه‌هایی از این پدیده‌های نوری هستند. در سال‌های گذشته افزایش تلاش‌های تحقیقاتی در فن‌آوری‌های فیبر نوری و مدار مجتمع نوری، که عمدتاً برای صنعت مخابرات بود به تحقیقات مربوط به حسگرهای نوری اعمال شده‌است. بر خلاف فیبرهای استاندارد مخابراتی که به‌عنوان محیط غیر فعال عمل می‌کنند، وظیفه فیبر حسگر ایجاد پاسخ‌های حساس به تغییرات شیمیایی و فیزیکی مختلف که در اطراف و محدوده فیبر روی می‌دهد است. این ابزارهای حسگری جدید برای کاربرد در حسگری شیمیایی [۴-۷]، زیستی [۸-۱۰]، پزشکی و زیست محیطی [۱۱-۱۴]، استفاده می‌شود. ویژگی منحصر به فرد حسگرهای فیبر نوری بی‌شک ایمنی ذاتی آن‌ها نسبت به تداخل‌های الکترومغناطیسی و عدم وجود خطرات الکتریکی که برای ایمنی در محیط‌های قابل انفجار ضروری است، می‌باشد.

۳-۱ معرفی فیبرهای کریستال فوتونی

ابداع فیبرهای کریستال فوتونی (PCF)^{۱۰} با مشخصات نوری منحصر به فردی که در فیبرهای تک‌مود (SMF)^{۱۱} پیشین قابل دست‌یابی نبود مانند همیشه تک‌مادی^{۱۲}، غیرخطی بودن بالا، دوشکستی بالا، پاشیدگی رنگی انعطاف‌پذیر [۱۵] و همچنین انعطاف‌پذیری زیاد در طراحی به‌علت دارا بودن خواص فیزیکی منحصر بفرد، موجب جلب توجه محققان در زمینه استفاده از فیبر نوری در حسگری شد. وجود حفره‌های هوایی در امتداد طول PCF، قابلیت جدیدی برای افزایش برهم‌کنش نور و گاز یا مایع درون

1- Luminescence

2- Fluorescence

3- Phosphorescence

4- Absorbance

5- Elastic scattering

6- Raman scattering

7-Surface Plasmon Resonance,

8- Guided-wave resonance

9- Interference

10- Photonic Crystal Fiber

11 - Single Mode Fiber

12 - Endlessly single mode

حفره‌ها از طریق میدان میراثونده^۱ ایجاد می‌کند. همچنین حفره‌های بسیار ریز و میکرونی در PCF ریز ساختار، به شدت میزان نمونه مورد نیاز برای حسگری را کاهش می‌دهد [۱۹-۱۵].

فیبرهای کریستال فوتونی شامل پوسته‌ای متشکل از حفره‌های هوایی است که در تمام طول فیبر امتداد یافته‌اند. در PCF ها نور می‌تواند به وسیله گاف فوتونی^۲ که در ساختاری با تغییرات متناوب ضریب شکست ایجاد می‌شود [۲۰] و یا از طریق بازتاب داخلی کلی (TIR) بهبود یافته^۳ شبیه به فیبرهای شاخص پله‌ای استاندارد، هدایت شود. PCF دسته اول را فیبرهای گاف فوتونی می‌نامند و به‌طور معمول ناحیه هسته با ضریب شکست کوچکتر دارند مانند فیبرهای هسته توخالی (HC-PCF)^۴. دسته دوم شامل PCF هدایت نمایه^۵ است که به‌طور معمول یک هسته جامد دارد که شاخص (ضریب شکست) بزرگ‌تری نسبت به شاخص متوسط پوسته دارد. وجود حفره‌های هوایی باعث داشتن آزادی بیشتری در طراحی هندسه فیبر برای تغییر خصوصیات انتشاری نور می‌شود.

۱-۳-۱- فیبر هسته هوا

در دهه گذشته تحقیقاتی انجام شد که نشان داد نور می‌تواند درون حفره‌ها و موجبرها به وسیله یک سازوکار جدید که اثر شکاف باند فوتونی نامیده می‌شود، هدایت شود.

اثر شکاف باند فوتونی می‌تواند در ساختارهای تکرار شونده موادی که دوره تناوبی قابل مقایسه با مرتبه طول موج دارند، مشاهده شود. به این‌گونه ساختارها کریستال‌های فوتونی گفته می‌شود. این توانایی کریستال‌های فوتونی در جلوگیری کردن از انتشار نور در فرکانس‌های کاملاً مشخص، شباهت بسیار زیادی به ویژگی‌های الکترونیکی نیمه‌هادی‌ها دارد. این حقیقت باعث ایجاد تمایل بسیار نسبت به کریستال‌های فوتونی و استفاده‌های گوناگون از آن‌ها شده‌است. همان‌گونه که در شکل ۱-۱ مشاهده می‌شود، در این نوع از فیبرها، حفره هوایی (به‌عنوان نقص در شبکه) جایگزین مغزی شده‌است [۲۰]. با توجه به این‌که در این حالت ضریب شکست مغزی از غلاف کمتر است، در نتیجه هدایت نور با استفاده از بازتاب داخلی کلی امکان‌پذیر نیست. عاملی که در این حالت باعث هدایت نور می‌شود اثر شکاف باند فوتونی است.

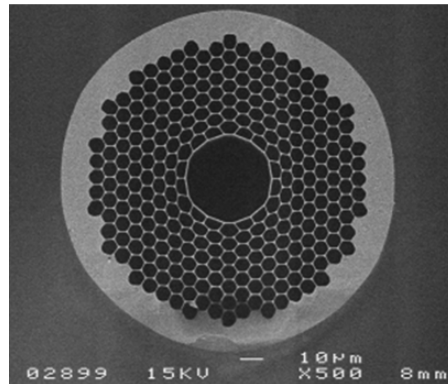
1 - Evanescent field

2 - Photonic Band Gap

3 - Modified Total Internal Reflection

4 - Hollow Core Photonic Crystal Fiber

5 - Index-Guiding Photonic Crystal Fiber



شکل ۱-۱: فیبر کریستال فوتونی هسته هوا با عملکرد مبتنی بر اثر شکاف باند فوتونی [۲۰]

نقص را می‌توان طوری طراحی کرد که نور با فرکانس‌های واقع در شکاف باند فوتونی کریستال بتواند در آن منتشر شود. در چنین وضعیتی نور نمی‌تواند به درون کریستال رخنه کند زیرا در شکاف باند فوتونی آن قرار گرفته است. بنابراین نوری انتشار می‌یابد که در داخل نقص به دام افتاده است. در این فیبرها از آنجایی که نور در هوا منتشر می‌شود، همه‌ی اثراتی که ناشی از انتشار نور در شیشه، مثل پاشیدگی و خواص غیرخطی است، به‌طور موثری کاهش می‌یابند. یک هسته بزرگ، ۹۹ درصد انرژی را در داخل هوا منتقل می‌کند. بنابراین بیشتر عوامل فیزیکی تضعیف موجود در فیبر کاهش می‌یابند. در فیبرهای معمولی سیلیکایی تضعیف در طول موج‌های کوتاه به علت پراکندگی رایلی^۱ و در طول موج‌های بلند به علت جذب چند فوتونی^۲ حادث می‌شود، که تضعیف کمینه در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر است. در مورد کاربردهای حسگری، وجود هسته بزرگ که نمونه‌ی گاز یا مایع درون آن قرار می‌گیرد از آنجا که بیشتر از ۹۰ درصد توان نور از درون هسته عبور می‌کند بنابراین برهم‌کنش نور و ماده بسیار زیاد است و حساسیت این‌گونه فیبرها بسیار بالاست [۲۵-۲۰].

در فیبرهای هسته هوا سطح بین هسته و غلاف، غیر یکنواختی آن و تغییرات اندازه‌ی هسته در طول مسیر، عوامل اصلی تضعیف هستند. بنابراین به‌علت مشکلات ساخت، تضعیف در این نوع فیبرها هنوز بسیار بالا است. این فیبرها در حوزه‌های دیگری نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. چون اثرات غیر خطی در هسته قابل چشم‌پوشی است، این فیبرها گزینه‌ی مناسبی برای انتقال توان بالا به‌صورت پالسی و موج پیوسته است [۲۵-۲۰].

طول موج‌های نامتعارف که افت بسیار شدیدی در شیشه دارند را می‌توان به وسیله این نوع فیبرهای کریستال فوتونی انتقال داد. در زمینه‌های دارویی، زیست‌شناختی و طیف‌نگاری که یک باند پهن از طیف نور و یا طول موج‌های خاصی از نور را باید انتقال داد، این فیبرها مناسب هستند. همچنین هسته هوا را

1- Rayleigh scattering

2- Multi-photon absorption