



Islamic Azad University , Shiraz Branch

نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis

sanad.iau.ir/journal/jcdsa



Numerical analysis of midinfrared dual-side polished and double elliptical cut PCF-based SPR sensor for broad-range refractive index sensing applications

Seyed Hossein Moayed¹, Mojtaba Sadeghi^{2*}, Zahra Adelpour³

¹ Department of Electrical Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

moayyed.electronic@gmail.com

² Department of Electrical Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

mojtaba.sadeghi@iau.ac.ir

³ Department of Electrical Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

zahra.adelpour@iau.ac.ir

Abstract: In this paper, a surface plasmon resonance nanosensor based on photonic crystal fiber is introduced, which is capable of detecting high refractive indices and at the same time has appropriate sensitivity. The proposed structure consists of an air hole ring and a hole ring made of gold and TiN. In order to increase the sensitivity and efficiency of the sensor, two elliptic-shaped grooves are created at the top and bottom of the structure and a thin layer of gold is placed on them. Also, the two sides of the structure are polished and a thin layer of ITO is placed on them. The combination of these materials and the designed geometry has caused the phase matching conditions to be established properly and to detect the desired refractive indices of the analyte. The finite element method has been used for numerical simulation, mode analysis, and investigation of the surface plasmon resonance characteristics of the photonic crystal fiber sensor. Numerical results show that the sensor has a very good wavelength sensitivity of 6000 nm/RIU, a resolution of 1.6×10^{-5} RIU, and a range sensitivity of 572 RIU⁻¹. The detectable refractive index range of the sensor is between 1.4 to 1.6, which is a high value. Based on the results obtained, the proposed sensor is an excellent option for medical and chemical diagnostic applications.

Keywords: nanosensor, photonic crystal fiber, surface plasmon resonance, finite element method.

JCDSA, Vol. 3, No. 1, Spring 2025

Received: 2025-03-02

Online ISSN: 2981-1295

Accepted: 2025-05-06

Journal Homepage: <https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcdsa>

Published: 2025-06-21

CITATION

Moayed, S.H., et. al., "Numerical analysis of midinfrared dual-side polished and double elliptical cut PCF-based SPR sensor for broad-range refractive index sensing applications", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 3, No. 1, pp. 32-43, 2025.
DOI: 10.82526/JCDSA.2025.1200948

COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

* Corresponding author

Extended Abstract

1- Introduction

The field of optical sensing has witnessed remarkable advancements in recent years, driven by the increasing demand for high-sensitivity, real-time, and label-free detection systems. Among the various optical sensing techniques, surface plasmon resonance (SPR)-based sensors have emerged as a powerful tool for refractive index (RI) sensing due to their exceptional sensitivity and ability to detect minute changes in the surrounding medium. SPR sensors leverage the excitation of surface plasmons—collective oscillations of free electrons at the interface between a metal and a dielectric—to achieve highly sensitive detection of analytes. The mid-infrared (mid-IR) region, spanning wavelengths from 2.5 to 25 μm , has garnered significant attention for SPR sensing applications due to its unique advantages, including deeper penetration depths, reduced scattering losses, and the presence of characteristic molecular absorption bands, which enable enhanced specificity in chemical and biological sensing. Photonic crystal fibers (PCFs) have revolutionized the design of SPR sensors by offering unparalleled flexibility in tailoring optical properties such as birefringence, dispersion, and mode confinement. The integration of SPR with PCFs has led to the development of compact, highly sensitive, and versatile sensing platforms. In particular, elliptical structures have gained prominence due to their ability to facilitate efficient coupling between the core-guided mode and the surface plasmon mode, thereby enhancing sensor performance. Additionally, the incorporation of dual-side polished in PCF designs has been shown to improve sensitivity and broaden the operational range of SPR sensors by optimizing the overlap between the evanescent field and the analyte. This paper presents a novel mid-IR dual-side polished and double elliptical cut PCF-based SPR sensor designed for broad-range refractive index sensing applications. The proposed sensor architecture leverages the unique properties of mid-IR light and the advanced structural features of PCFs to achieve high sensitivity and a wide detection range. The dual-side polishing technique ensures efficient light-matter interaction, while the double elliptical cut design enhances the sensor's ability to detect variations in the refractive index of the surrounding medium. By operating in the mid-IR region, the sensor capitalizes on the inherent advantages of this spectral range, including reduced background noise and enhanced molecular specificity. The primary objective of this study is to demonstrate the feasibility of the proposed sensor for broad-range RI sensing, with potential applications in environmental monitoring, biomedical diagnostics, and chemical analysis. Through numerical simulations and theoretical analysis, we evaluate the sensor's performance metrics, including sensitivity, resolution, and detection

range. The results highlight the potential of the proposed design to address the limitations of conventional SPR sensors and pave the way for the development of next-generation optical sensing platforms. This work contributes to the growing body of research on mid-IR SPR sensors and underscores the importance of innovative PCF designs in advancing the field of optical sensing.

2- Methodology

The proposed structure consists of two hexagonal rings, the outer ring containing a series of air holes and the inner ring containing four holes made of TiN and two holes made of gold. Also, in order to increase the efficiency of the sensor, two grooves coated with a thin layer of gold are created at the top and bottom of the structure. The two sides of the structure are polished and a thin layer of ITO is placed on them. The finite element method (FEM) has been used for numerical simulation, mode analysis, and investigation of the surface plasmon resonance characteristics of the photonic crystal fiber nano-sensor.

3- Results and discussion

In this study, we have investigated the effect of changing the structural parameters on the confinement loss step by step and have obtained the optimal values of the parameters according to the confinement loss. Numerical results show that the sensor has a very good wavelength sensitivity of 6000 nm/RIU, a resolution of 1.6×10^{-5} RIU, and a range sensitivity of 572 RIU^{-1} . The detectable refractive index range of the sensor is between 1.4 to 1.6, which is a broad range.

4- Conclusion

In this research, we present a refractive index sensor whose performance is enhanced by incorporating gold and TiN cavities, as well as two slits with thin gold layers, along with dual-side polishing of the structure and the deposition of an ITO layer. The primary advantage of our proposed sensor is its ability to detect a wide range of refractive indices (1.4 to 1.6) with suitable sensitivity. Another advantage of this sensor is its operation in the mid-infrared (MIR) wavelength range, which enhances its efficiency. To achieve an optimal and suitable structure, we systematically examined the key parameters of the design and analyzed the effects of their variations on the sensor's performance. Based on the calculated results, our proposed structure exhibits a high sensitivity of 6000 nm/RIU, a maximum figure of merit (FOM) of 67 RIU^{-1} , a resolution of 1.6×10^{-5} RIU, and an amplitude sensitivity of 572 RIU^{-1} . Given these parameters, our proposed sensor is highly suitable for diagnostic applications involving high-refractive-index chemical substances, such as industrial oils and petroleum products, as well as medical applications.





تجزیه و تحلیل عددی سنسور مادون قرمز تشدید پلاسمون سطحی مبتنی بر فیبر بلور فوتونی با برش طرفین و شکاف بیضوی برای تشخیص محدوده وسیع ضریب شکست

سید حسین مؤید^۱، مجتبی صادقی^۲، زهرا عادل پور^۳

۱- گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران (moayyed.electronic@gmail.com)

۲- گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران (mojtaba.adeghi@iau.ac.ir)

۳- گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران (zahra.adelpour@iau.ac.ir)

چکیده: در این مقاله یک نانوسنور تشدید پلاسمون سطحی مبتنی بر فیبر بلور فوتونی معرفی شده که قادر می باشد ضرایب شکست بالا را نیز تشخیص دهد و در عین حال دارای حساسیت مناسب باشد. ساختار پیشنهادی شامل یک حلقه حفره های هوا و یک حلقه حفره از جنس طلا و TiN می باشد. به منظور افزایش حساسیت و کارایی نانوسنور، دو شکاف بیضی شکل در بالا و پایین ساختار ایجاد شده و لایه نازکی از طلا بر روی آنها قرار گرفته است. همچنین دو طرف ساختار برش داده شده و لایه نازکی از ITO بر روی آنها قرار گرفته است. مجموعه این مواد و هندسه طراحی شده باعث شده است که شرایط تطبیق فاز به نحو مناسبی برقرار شده و ضرایب شکست دلخواه ماده آنالیت را تشخیص دهد. روش اجزای محدود به منظور شبیه سازی عددی، تجزیه و تحلیل مودی و بررسی ویژگی های تشدید پلاسمون سطحی نانوسنور فیبر بلور فوتونی استفاده شده است. نتایج عددی نشان می دهد که نانوسنور دارای حساسیت طول موج بسیار مناسب RIU / nm ۶۰۰۰، رزولوشن RIU $10^{-5} \times 1/6$ و حساسیت دامنه RIU^{-1} ۵۷۲ می باشد. محدوده ضریب شکست قابل تشخیص نانوسنور بین $1/4$ تا $1/6$ که مقدار بالایی است به دست آمده است. با توجه به نتایج به دست آمده، سنسور پیشنهادی یک گزینه بسیار عالی برای کاربردهای تشخیص پزشکی و مواد شیمیایی می باشد.

واژه های کلیدی: نانوسنور، فیبر بلور فوتونی، تشدید پلاسمون سطحی، روش اجزای محدود.

DOI: 10.82526/JCDSA.2025.1200948

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲

۱- مقدمه

خونی، تشخیص ویروس، تشخیص سلول های سرطانی در بدن انسان، آزمایش دارو، کنترل کیفیت غذا به منظور ایمنی، پایش محیط زیست، تشخیص مواد شیمیایی را دارند [۱۴-۱۶]. تشدید پلاسمون سطحی نوسان جمعی الکترون های آزاد در سطح مشترک فلز-دی الکتریک است که توسط فوتون های یک میدان نوری محو شده^۷ تحریک می شوند. این پدیده زمانی اتفاق می افتد که طول موج الکترون های آزاد و طول موج فوتون ها در سطح مشترک فلز-دی الکتریک با یکدیگر در حالت تشدید قرار بگیرند. با این حال، اثر پلاسمونیک به برهمکنش بین الکترون های آزاد و فوتون های میدان نوری محو شونده در سطح مشترک فلز-دی الکتریک اشاره دارد. هسته PCF نسبت به روکش ضریب شکست

در دهه های اخیر، حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی^۲ مبتنی بر فیبر کریستال فوتونی^۳ (PCF-SPR) [۷-۱۱] به دلیل ویژگی های برجسته شان مانند پراکندگی قابل کنترل، شکست دوگانه^۴، تلفات کم، حساسیت بالا، وضوح بسیار خوب، زمان پاسخ سریع، تشخیص بدون برچسب^۵، پایش بلادرنگ^۶، انعطاف عملکرد، ساختار ساده و کوچک و پارامترهای ساختاری قابل تنظیم برای بسیاری از محققان جذاب بوده اند [۸-۱۳]. حسگرهای PCF-SPR پتانسیل استفاده در زمینه های مختلفی مثل تشخیص بایومولکولی، تشخیص پزشکی، تشخیص گروه

* نویسنده مسئول

² Surface plasmon resonance (SPR)

³ Photonic crystal fibers (PCF)

⁴ birefringence

⁵ label-free detection

⁶ real-time monitoring

⁷ evanescent optical field



بالا تری دارد که اجازه می‌دهد مقدار کمی نور به داخل ناحیه روکش نفوذ کند. این نور با ماده پلاسمونیک در سطح مشترک فلز-دی الکتریک برهمکنش می‌کند، الکترون‌های آزاد را تحریک و موج پلاسمون سطحی^۱ (SPW) را ایجاد می‌کند [۱۷]. SPW ها بیشترین شدت را در نقاط عبور فلز-دی الکتریک نشان می‌دهند و با عمق لایه دی الکتریک تخلیه می‌شوند.

امواج پلاسمون سطحی بیشترین شدت را در نقاط تلاقی فلز-دی الکتریک دارا هستند و با افزایش عمق لایه دی الکتریک به تدریج کاهش می‌یابند. وقتی طول موج میدان محو شونده با طول موج امواج پلاسمون سطحی مطابقت پیدا کند، پدیده‌ای به نام تشدید پلاسمون سطحی (SPR) رخ می‌دهد [۱۸]. این پدیده همچنین به عنوان شرایط تشدید یا شرایط تطابق فاز شناخته می‌شود، و طول موجی که در آن این اتفاق می‌افتد، طول موج تشدید نامیده می‌شود. در برخی موارد، یک پیک در منحنی تشدید مشاهده می‌شود که ناشی از انتقال بالاترین انرژی فوتون از مود هسته^۲ به مود پلاسمون پلاریتون سطحی^۳ است. این پیک برای هر آنالیت، منحصر به فرد است و برای تشخیص حضور و غلظت آنالیت استفاده می‌شود [۱۹]. بنابراین، با اندازه‌گیری پیک منحنی تلفات و طول موج تشدید، می‌توان نوع آنالیت موجود و یا غلظت آن را تعیین کرد. سه نوع اصلی از حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی وجود دارد: حسگرهای مبتنی بر منشور^۴ [۲۰]، حسگرهای مبتنی بر خراشیدگی فیبر نوری^۵ [۲۱]، و حسگرهای مبتنی بر فیبر بلور فوتونی. حسگرهای مبتنی بر منشور حجیم هستند و اجزای آنها شامل یک لایه دی الکتریک، زیرلایه فیلم فلزی، مایع و ماده پلاسمونیک می‌شود. حسگرهای مبتنی بر خراشیدگی فیبر نوری، یک گزینه میانی هستند که حساسیت کمتری ارائه می‌دهند و منحنی تلفات پهن تری دارند و این موضوع شناسایی آنالیت‌های ناشناخته را دشوار می‌کند. در مقابل، حسگرهای PCF-SPR دارای منحنی تلفات تیز، عملکرد حسگری بسیار خوب، ابعاد کوچک و قابلیت ساخت آسان هستند.

یکی از پارامترهای مهم در عملکرد حسگرهای PCF-SPR نوع ماده پلاسمونیک و جنس ماده پس زمینه است. معمولاً سیلیکای ذوب شده^۶ به عنوان ماده زمینه انتخاب می‌شود، زیرا مقرون به صرفه است و به فرآیندهای ساخت پیچیده نیاز ندارد. مس، نقره و طلا شناخته ترین مواد پلاسمونیک هستند که در این میان، طلا به دلیل پایداری شیمیایی و مقاومت در برابر اکسیداسیون در محیط‌های نامساعد و همچنین عملکرد حسگری پایدار و قابل اطمینان در طول زمان به ماده‌ای مطلوب برای حسگرهای پلاسمونیک تبدیل شده است. در مقابل، موادی مانند مس و نقره از نظر شیمیایی پایدار نیستند و به راحتی اکسید می‌شوند، که این امر منجر به کاهش عملکرد حسگری آن‌ها در طول زمان می‌شود. از طرفی فلزات معمولی دارای چالش‌های ساخت در ابعاد نانو می‌باشند.

سطحی که بصورت بسیار نازک پوشش داده شده باشد دارای مورفولوژی‌های متفاوتی نسبت به فلز حجیم است که بر پاسخ نوری تأثیر می‌گذارد. موضوع دیگر مرتبط با فلزات نجیب این است که این فلزات با فرآیند تولید سیلیکون استاندارد سازگار نیستند. اکسید رسانای شفاف^۷ (TCO) و فلز واسطه نیتريد^۸ (TMN) بهترین مواد پلاسمونیک هستند که خواص فلزی را نشان می‌دهند و ویژگی‌های منحصربه فردی برای تشکیل قطعات، ساخت گسترده، یکپارچه‌سازی و قابلیت تنظیم نوری دارند [۲۲]. دو نمونه از بهترین این مواد، TiN و ITO^۹ هستند. این مواد دارای ضریب شکست بالایی هستند که به محصور کردن کارآمد نور و هدایت آن در ساختار فیبر بلور فوتونی کمک می‌کند و در نتیجه باعث افزایش حساسیت سنسور می‌شود. از دیگر مزایای مواد فوق می‌توان به تلفات کم، پایداری شیمیایی و سازگاری با سیستم‌های بیولوژیکی اشاره نمود که باعث می‌شود برای کاربردهای زیست پزشکی که در آن تعامل بین سنسور و نمونه‌های بیولوژیکی ضروری است مناسب باشند.

دو رویکرد برای سیستم‌های حسگری مبتنی بر تشدید پلاسمون سطحی وجود دارد: تشخیص داخلی [۲۳] و تشخیص خارجی [۲۴]. در سیستم‌های تشخیص داخلی، ماده پلاسمونیک بر روی دیواره خارجی حفره‌های هوایی پوشش‌دهی می‌شود و آنالیت به داخل این حفره‌های هوا تزریق می‌شود. با این حال، این رویکرد با چالش‌های متعددی مواجه است، از جمله تلفات انتشار بالا، پیچیدگی در تزریق آنالیت به حفره‌های هوای کوچک، و پیچیدگی ساخت در ایجاد پوشش‌های فلزی یکسان بر روی دیواره خارجی حفره‌های هوایی کوچک. در مقابل، سیستم‌های تشخیصی خارجی مزایای متعددی نسبت به سیستم‌های تشخیصی داخلی ارائه می‌دهند. در این روش، ماده آنالیت در خارج از ساختار فیبر بلور فوتونی قرار می‌گیرد و آنالیت‌ها به راحتی می‌توانند با استفاده از یک پمپ برنامه‌پذیر در آن جریان یابند. این روش چالش‌های سیستم‌های تشخیص داخلی، مانند تزریق آنالیت به سوراخ‌های هوای کوچک و پیچیدگی ساخت، را از بین می‌برد. در اکثر تحقیقات گزارش شده سنسورهای PCF-SPR، محدوده تشخیص برای اندازه‌گیری ضریب شکست عموماً محدود است و معمولاً کمتر از ۱/۵ می‌باشد، که این امر امکان تشخیص ضریب شکست بالا را فراهم نمی‌کند. با این حال، برخی از محلول‌ها دارای ضریب شکست نسبتاً بالایی هستند، مانند بنزن، نیتروبنزن و فنیل آمین. بنابراین، افزایش حد بالایی تشخیص ضریب شکست ضروری است. علاوه بر این، محدوده کاری این حسگرها عمدتاً در محدوده نور مرئی یا باند مخابراتی است.

سنسورهای NIR^{۱۱} و MIR^{۱۲} می‌توانند از آسیب‌های نوری و تغییر ساختار مواد بیولوژیکی جلوگیری کنند [۲۵، ۲۶]. در طیف MIR در برخی طول موج‌ها برهمکنش قوی‌ای بین نور و ماده وجود دارد، که این

⁷ transparent conducting oxide

⁸ transition metal nitride

⁹ Titanium Nitride

¹⁰ Indium tin oxide

¹¹ Near-infrared

¹² Mid-infrared

¹ Surface plasmon wave

² core mode

³ SPP mode

⁴ prism-based

⁵ fiber grating-based

⁶ Fused silica



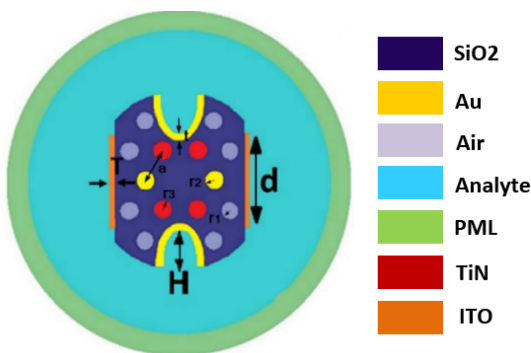
تشخیص آنالیت مورد نظر در محدوده مناسبی قرار گیرد. سپس اثر تغییرات پارامترهای هندسی بررسی و به طور جامع مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و در نهایت سنسوری که کارایی و حساسیت بالایی را در محدوده ضرایب شکست مورد نظر ارائه می‌دهد به عنوان ساختار بهینه معرفی می‌شود.

پس زمینه ساختار از جنس سیلیکا می‌باشد. ضریب شکست سیلیکا با استفاده از معادله سلمیر قابل محاسبه است [۳۰]:

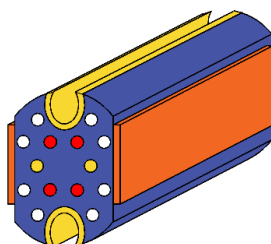
$$n^2 - 1 = \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - B_1^2} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - B_2^2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - B_3^2} \quad (1)$$

در (۱)، n ضریب شکست ماده و λ طول موج نور فرودی است. ضرایب $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ به ترتیب برابرند با $0.6991663, 0.9/896161, 0.1162414, 0.0684043, 0.897479, 0.4079426$. استفاده از طلا در سنسورهای ضریب شکستی مبتنی بر فوتونیک کریستال به دلیل ویژگی‌ها و مزایای منحصر به فرد آن صورت می‌گیرد. طلا دارای خواص نوری عالی در ناحیه قابل رؤیت و مادون قرمز طیف الکترومغناطیسی می‌باشد. ضریب خاموشی مولی بالای طلا باعث برهم کنش کارآمد با نور می‌شود. این ویژگی برای دستیابی به حساسیت بالا در سنسورهای فوتونیک کریستالی بسیار مهم است. همچنین طلا به عنوان فلزی شناخته می‌شود که قابلیت بالایی در پشتیبانی از SPR ها را دارد. تحریک SPR ها منجر به افزایش میدان‌های الکترومغناطیسی در نزدیکی سطح طلا می‌شود که در نتیجه حساسیت تشخیص در کاربردهای حسگری افزایش می‌یابد. رابطه پراکندگی برای طلا با استفاده از مدل درود-لورنتز به صورت زیر است [۳۱]:

$$\varepsilon_{Au} = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_D^2}{\omega(\omega + i\gamma_D)} - \frac{\Delta\varepsilon \cdot \Omega_L^2}{\omega^2 - \Omega_L^2 + i\Gamma_L \omega} \quad (2)$$



(الف)



(ب)

شکل (۱): (الف) سطح مقطع سنسور پیشنهادی (ب) شماتیک سه بعدی

امر امکان تشخیص با انتخاب‌پذیری و حساسیت بالا را فراهم می‌کند [۲۷، ۲۸]. در عین حال، عمق نفوذ موج محوشونده متناسب با طول موج کاری است. در مقایسه با نور مرئی، موج محوشونده در باندهای NIR و MIR دارای عمق نفوذ بیشتری است. بنابراین، تقاضا برای حسگرهایی که دارای محدوده تشخیص گسترده‌تری از ضریب شکست هستند و همچنین در باندهای MIR کار می‌کنند، به طور قابل توجهی افزایش یافته است [۲۹]. در این تحقیق ما یک سنسور پلاسمونیک مبتنی بر فیبر بلور فوتونی با ساختاری جدید معرفی نموده‌ایم که قادر است در محدوده MIR کار کرده و محدوده وسیعی از ضرایب شکست را تشخیص دهد (۱/۴ تا ۱/۶). به منظور افزایش حساسیت سنسور، از حفره‌هایی شامل طلا و TiN استفاده شده است. همچنین به منظور افزایش کارایی سنسور دو شکاف U شکل در بالا و پایین ساختار ایجاد شده و لایه‌های نازکی از طلا بر روی آنها قرار گرفته است. برای افزایش محدوده تشخیص ضریب شکست، دو طرف ساختار برش داده شده و لایه نازکی از ماده ITO بر روی آنها قرار داده شده است. ساختار به صورت عددی و به روش المان محدود^۱ توسط نرم افزار COMSOL Multiphysics تحلیل و شبیه‌سازی شده است. همچنین از یک لایه PML برای به حداقل رساندن بازتاب نور و کاهش تلفات پراکندگی در مرز ساختار استفاده شده است. در ادامه، ارزیابی پارامترهای هندسی ساختار انجام گردیده، تأثیر تغییرات این پارامترها بر کارایی سنسور بررسی شده است و در نهایت مقادیر بهینه ارائه شده‌اند.

۲- طراحی سنسور و تئوری

سطح مقطع سنسور SPR-PCF طراحی شده به همراه شماتیک سه بعدی آن در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. ساختار پیشنهادی از دو حلقه به صورت شش ضلعی تشکیل شده است که حلقه بیرونی شامل یک سری حفره‌های هوایی و حلقه درونی شامل چهار حفره از جنس TiN و دو حفره از جنس طلا می‌باشد. همچنین به منظور افزایش کارایی سنسور، دو شکاف با روکشی از لایه نازک طلا در بالا و پایین ساختار ایجاد شده است. در کنار این‌ها، دو طرف ساختار برش داده شده و لایه نازک ITO بر روی آنها قرار داده شده است. مقادیر پارامترهای هندسی ساختار که در ادامه آورده می‌شوند، اندازه‌های اولیه هستند که در قسمت بعدی، مرحله به مرحله مقدار بهینه و نهایی آنها به دست خواهد آمد. شعاع حفره‌های هوایی (r_1)، شعاع حفره‌های طلا (r_2) و شعاع حفره‌های TiN (r_3) برابر با 0.5 میکرومتر در نظر گرفته شده است. فاصله تناوبی بین حفره‌ها (a) برابر با 2.5 میکرومتر، عمق شکاف ایجاد شده (H) برابر با 2.5 میکرومتر و ضخامت لایه نازک طلا (t) برابر با 110 نانومتر انتخاب شده‌اند. همچنین مقادیر اولیه طول لایه ITO (d) و ضخامت آن (T) به ترتیب برابر با 4 میکرومتر و 50 نانومتر در نظر گرفته شده‌اند. پارامترهای هندسی و اجزای ساختار طول موج کاری و محدوده ضریب شکست قابل تشخیص آنالیت را تعیین می‌کنند. از این رو، مقادیر اولیه طراحی PCF به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که طول موج کاری و قابلیت

¹ Finite element method (FEM)



وجود می‌آید. بنابراین، برای طراحی سنسورهای SPR مبتنی بر فیبر بلور فوتون، می‌توان منشور را با هسته فیبر جایگزین کرد. میدان محوشونده، پلاسمون‌های سطحی را در سطح مشترک لایه فلز و ماده آنالیت تحریک می‌کند. کوپلینگ این میدان‌ها به شدت به طول موج، پارامترهای هندسی و مواد استفاده شده بستگی دارد. در سنسورهای پلاسمونیک مبتنی بر PCF، شرایط تطبیق فاز در نقطه تقاطع مودهای مؤثر هسته و SPP اتفاق می‌افتد. در طول موج تشدید، قسمت‌های حقیقی ضرایب شکست مؤثر هسته و SPP ها با هم برابر می‌شوند. علاوه بر این، منحنی تلفات محدودشوندگی^۱ به عنوان تابعی از قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر، در طول موج تشدید مربوط به تحریک پلاسمون‌های سطحی، به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد و یک پیک را نشان می‌دهد. به منظور بررسی کارایی سنسور، برخی از پارامترها باید محاسبه شوند. یکی از این پارامترها تلفات محدود شونده می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۴]:

$$\alpha \left(\text{dB/cm} \right) = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda (\mu\text{m})} \times \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (7)$$

$$\times 10^4$$

که در آن λ طول موج کاری و $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر مربوط به مود اصلی هسته است. با استفاده از روش بررسی طول موجی، یکی دیگر از پارامترهای مهم برای ارزیابی سنسور به نام حساسیت طول موج بصورت زیر تعریف می‌شود [۳۴]:

$$S_{\lambda} \left(\text{nm/RIU} \right) = \frac{\Delta \lambda_{\text{res}}}{\Delta n_a} \quad (8)$$

در (۸)، $\Delta \lambda_{\text{res}}$ تغییرات طول موج تشدید و Δn_a تغییرات ضریب شکست آنالیت‌های مجاور می‌باشند. وضوح سنسور به عنوان حداقل تغییر کمیتی که قابل شناسایی باشد از (۹) به دست می‌آید [۳۵]:

$$R(\text{RIU}) = \Delta n_a \times \frac{\Delta \lambda_{\text{min}}}{\Delta \lambda_{\text{res}}} \quad (9)$$

که $\Delta \lambda_{\text{min}}$ را معمولاً با توجه به قدرت تشخیص دستگاه تحلیلگر طیف نوری (OSA) برابر با ۰/۱ نانومتر در نظر می‌گیرند. از آنجایی که حساسیت طول موج و پهنای طیف هر دو نقش اساسی در بهبود محدودیت‌های تشخیص و افزایش عملکرد سنسور دارند، مفهوم عدد شایستگی (FOM) می‌تواند مفید باشد [۳۶]:

$$\text{FOM}(\text{RIU}^{-1}) = \frac{S_{\lambda}}{\text{FWHM}} \quad (10)$$

که FWHM مقدار پهنای در نصف ماکزیمم می‌باشد. پارامتر دیگری که در برخی موارد می‌تواند به عنوان یک معیار ارزیابی برای کارایی سنسور مورد توجه قرار گیرد، حساسیت دامنه است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۶]:

$$S_A(\text{RIU}^{-1}) = -\frac{1}{\alpha(\lambda, n_a)} \left(\frac{\partial \alpha(\lambda, n_a)}{\partial n_a} \right) \quad (11)$$

که در آن، α ثابت تضعیف بوده و به معنای تلفات در یک طول موج مشخص و به ازای ضریب شکست آنالیت n_a است. تغییرات بین دو طیف تلفات (معمولاً مجاور) با $\partial \alpha(\lambda, n_a)$ و تغییرات در ضریب شکست آنالیت با ∂n_a بیان شده‌اند.

در (۲)، ε_{Au} ثابت دی الکتریک طلا، ε_{∞} ثابت دی الکتریک فرکانس بالا برابر با $\Delta \varepsilon$ ، $5/9673$ ، پارامتر وزنی معادله و برابر با $1/0.9$ ، ω فرکانس زاویه‌ای موج منتشره، ω_D و γ_D به ترتیب فرکانس پلازما و فرکانس میرایی و برابر با $2113/6 \text{ rad/s}$ و $15/92 \text{ rad/s}$ هستند. Γ_L و Ω_L به عنوان فرکانس و پهنای طیف اسپلاتور لورنتز شناخته می‌شوند که به ترتیب برابر با $650/0.7 \text{ rad/s}$ و $86/10.4 \text{ rad/s}$ می‌باشند. ماده دیگری که در ساختار پیشنهادی استفاده شده، TiN است که به واسطه خصوصیات مناسبی همچون ضریب شکست بالا، تلفات کم، پایداری شیمیایی، زیست سازگاری و فرآیند ساخت مناسب در سنسورهای پلاسمونیک مورد توجه قرار گرفته است. برای محاسبه ثابت دی الکتریک TiN از (۲) استفاده می‌کنیم. در این حالت مقادیر پارامترهای ε_{∞} ، $\Delta \varepsilon$ ، ω_D ، γ_D ، Γ_L و Ω_L به ترتیب عبارتند از [۳۲]: $2/485$ ، $2/0.376$ ، $5/953$ ، 0.5142 eV ، $3/9545 \text{ eV}$ و $2/4852 \text{ eV}$. نوسانات چگالی الکترون جمعی محدود شده در سطح مشترک فلز-دی الکتریک به عنوان پلاسمون‌های سطحی (SP) نامیده می‌شوند که به دلیل برهم کنش بین یک موج الکترومغناطیسی برخوردی و الکترون‌های آزاد فلز ایجاد می‌شوند. برای تحریک پلاسمون‌های سطحی، بردار موج نور فرودی باید با بردار موج پلاسمون‌های سطحی مطابقت داشته باشد. در این شرایط، تمام یا قسمتی از توان نور فرودی به پلاسمون‌ها منتقل می‌شود. ثابت انتشار امواج پلاسمون سطحی (K_{SP}) که در امتداد سطح مشترک فلز-دی الکتریک منتشر می‌شوند با معادله زیر بیان می‌شود [۳۳]:

$$K_{SP} = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\varepsilon_m \varepsilon_s}{\varepsilon_m + \varepsilon_s} \right)^{1/2} \quad (3)$$

که در آن ε_m و ε_s ، به ترتیب ثابت‌های دی الکتریک فلز و محیط دی الکتریک هستند. همچنین ω فرکانس نور فرودی و c سرعت نور در خلأ می‌باشد. ثابت انتشار نور فرودی برابر است با:

$$K_i = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_s} \quad (4)$$

معمولاً برای تحریک پلاسمون‌های سطحی از یک منشور با ثابت دی الکتریک بالا برای به دست آوردن موج محوشونده استفاده می‌شود. بردار موج این موج محوشونده را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$K_{ev} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_p} \sin \theta \quad (5)$$

که در آن، ε_p ثابت دی الکتریک منشور و θ زاویه برخورد نور است. تحریک زمانی اتفاق می‌افتد که بردار موج محوشونده با ثابت انتشار SPW مطابقت داشته باشد. بنابراین، شرط تشدید برای تشدید پلاسمون سطحی به شرح زیر می‌شود:

$$\frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_p} \sin \theta_{\text{res}} = \frac{\omega}{c} \left(\frac{\varepsilon_m \varepsilon_s}{\varepsilon_m + \varepsilon_s} \right)^{1/2} \quad (6)$$

برقراری این شرط تطبیق فاز منجر به انتقال انرژی از فوتون‌ها به SPW می‌شود که به شدت به ضریب شکست آنالیت وابسته است. علاوه بر این، در مورد سنسورهای SPR مبتنی بر فیبر نوری، به دلیل انعکاس کلی داخلی مود هسته، موج محوشونده در سطح مشترک روکش و هسته

¹ confinement loss

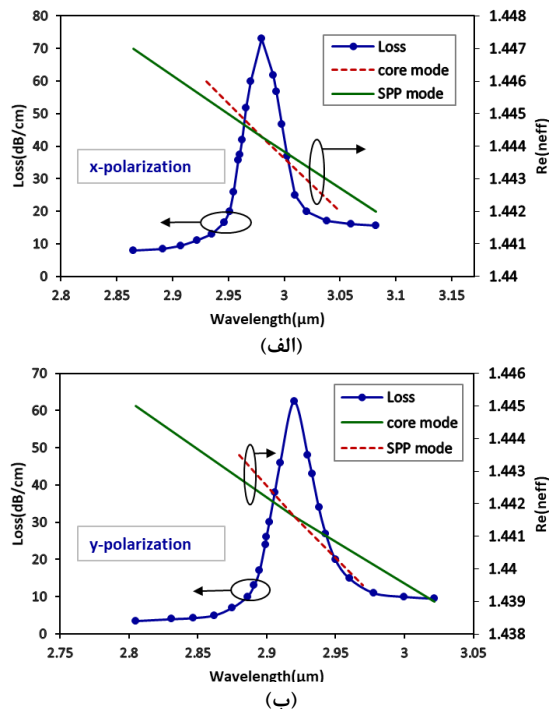
۳- نتایج و توضیحات

۳-۱- تحلیل فیزیکی

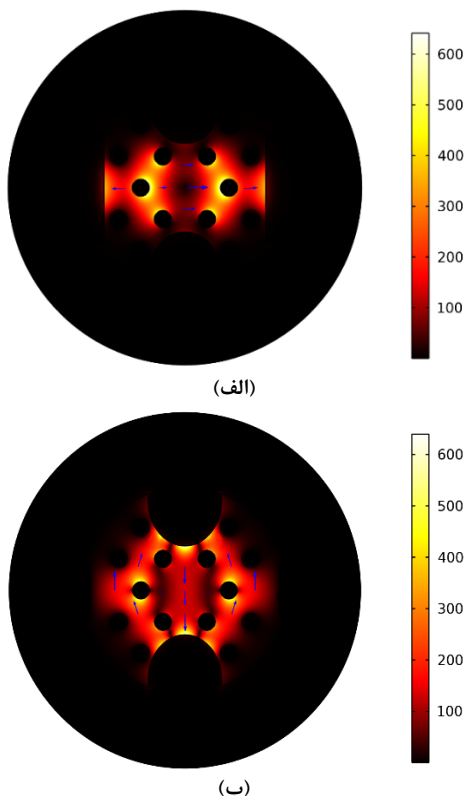
هنگامی که شرایط تطبیق فاز بین مود هسته و مود *SPP* برقرار شود، نور منتشر شده در هسته می تواند با پلاسمون های سطحی برهمکنش داشته باشند. در این حالت، ماکزیمم انرژی از مود هسته به مود *SPP* منتقل می شود و حالت تشدید بوجود می آید. شکل (۲) نمودار پراکندگی را به ازای ضریب شکست آنالیت ۱/۴ برای دو حالت قطبش در جهت *x* و جهت *y* نشان می دهد. خط سبز رنگ مربوط به قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر مود هسته و خط چین قرمز رنگ قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر مود *SPP* می باشد. منحنی آبی رنگ نیز نمودار تلفات محدود شونده است که رابطه مستقیم با قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر دارد. همانگونه که قابل مشاهده است شرط تطبیق فاز یا همان تشدید در نقطه تقاطع دو خط سبز و قرمز رنگ یعنی جایی که قسمت حقیقی ضرایب شکست مؤثر مود هسته و مود *SPP* با هم برابر می شوند، رخ می دهد. در این طول موج تشدید نمودار تلفات به مقدار ماکزیمم خود می رسد. در واقع در این طول موج، ماکزیمم انرژی از مود هسته به مود *SPP* منتقل شده و تشدید رخ خواهد داد. همانگونه که می بینیم، در حالت قطبش در جهت *x* ماکزیمم تلفات برابر با dB/cm در طول موج تشدید $2/98$ میکرومتر رخ داده است و در حالت قطبش *y*، این مقدار برابر با $62/4$ dB/cm با طول موج تشدید $2/92$ میکرومتر شده است. بنابراین ما در ادامه، بررسی ساختار را در حالت قطبش *x* در نظر خواهیم گرفت. همچنین توزیع میدان الکتریکی در حالت تشدید در دو حالت قطبش در جهت *x* و جهت *y* در شکل (۳) نمایش داده شده است.

۳-۲- تأثیر تغییر پارامترهای ساختار

در ابتدا اثر تغییر شعاع حفره های هوایی (r_1) را بررسی می کنیم و آن را از $0/4$ تا $0/5$ میکرومتر تغییر می دهیم. نمودار تلفات محدود شونده بر حسب طول موج به ازای مقادیر مختلف r_1 در شکل (۴) رسم شده است. مشاهده می کنیم که با افزایش شعاع، مقدار تلفات زیاد می شود و از 60 dB/cm به 73 dB/cm می رسد. همچنین طول موج تشدید از $2/9$ تا $2/98$ میکرومتر تغییر می کند. دلیل این اتفاق این است که با افزایش r_1 ضریب شکست مؤثر پوسته کاهش می یابد و در نتیجه تفاوت بین ضریب شکست هسته و پوسته افزایش یافته و پدیده بازتاب کلی داخلی، بهتر صورت می پذیرد که باعث کوپلینگ بهتر و افزایش تلفات خواهد شد. همچنین به دلیل تغییر شرایط تطبیق فاز، طول موج تشدید هم تغییر می کند. با توجه به نتایج به دست آمده مقدار بهینه r_1 را $0/5$ میکرومتر در نظر می گیریم. در مرحله بعد، اثر تغییر فاصله حفره ها از هم (a) را بررسی می کنیم. اثر تغییر a بر تلفات در شکل (۵) نشان داده شده است. قابل مشاهده است که با افزایش a از $2/5$ میکرومتر تا $3/5$ میکرومتر ابتدا تلفات افزایش یافته و سپس کم می شود.

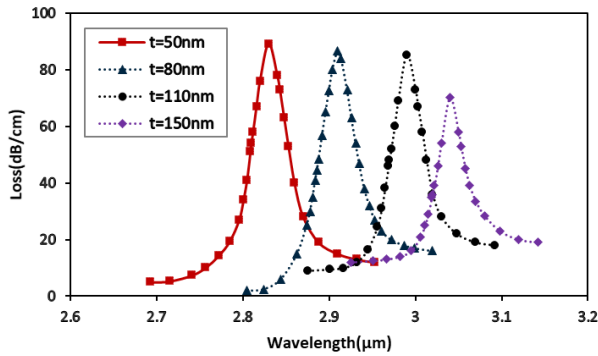


شکل (۲): نمودار پراکندگی در حالت (الف) قطبش *x* و (ب) قطبش *y*. منحنی آبی رنگ بیانگر تلفات محدود شونده، خط سبز رنگ قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر مود هسته و خط چین قرمز رنگ قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر مود *SPP* است. در این بررسی، $n_a = 1.4$ ، $r_3 = 0.5 \mu m$ ، $r_2 = 0.5 \mu m$ ، $r_1 = 0.5 \mu m$ ، $a = 2.5 \mu m$ ، $T = 50 nm$ و $d = 4 \mu m$ ، $H = 2.5 \mu m$ ، $t = 110 nm$ است.



شکل (۳): توزیع میدان الکتریکی در حالت تشدید برای (الف) قطبش *x* و (ب) قطبش *y*. در شکل (الف) طول موج تشدید برابر با $2/98$ میکرومتر و در شکل (ب) طول موج تشدید $2/92$ میکرومتر می باشد.

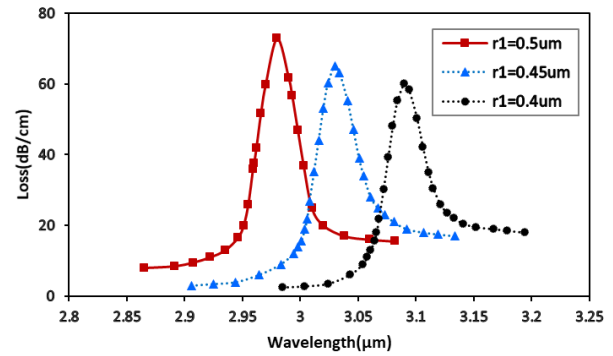




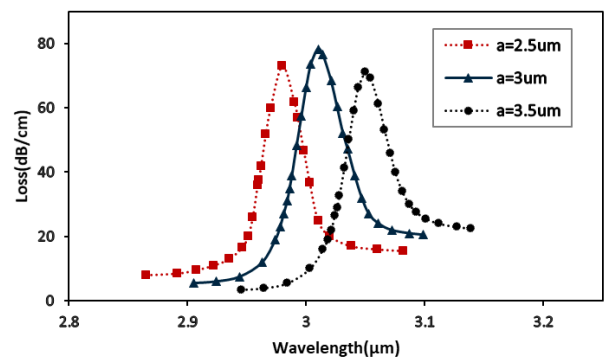
شکل (۷): نمودار تلفات محدود شوندگی به ازای تغییر ضخامت لایه طلا (t). برای بدست آوردن نمودارها، $r_1 = a = 3\mu\text{m}$ ، $n_a = 1.4$ ، $d = 4\mu\text{m}$ ، $H = 3\mu\text{m}$ ، $r_3 = 0.5\mu\text{m}$ ، $r_2 = 0.5\mu\text{m}$ و $T = 50\text{nm}$ در نظر گرفته شده اند.

با افزایش a فاصله بین حفره ها افزایش یافته و باعث می شود که انرژی مود هسته بهتر به مود SPP برسد و در نتیجه برهمکنش بین ماده آنالیت و لایه طلا بهتر انجام شده و تلفات افزایش یابد. اما با افزایش a از 3 به $3/5$ میکرومتر، قسمتی از انرژی مود هسته در ساختار به صورت نشتی تلف می شود و باعث کاهش تلفات خواهد شد. با توجه به نتایج به دست آمده مقدار بهینه a برابر با 3 میکرومتر در نظر گرفته می شود. در این حالت مقدار ماکزیمم تلفات 78 dB/cm و طول موج تشدید $3/01$ میکرومتر خواهد بود. شکل (۶) اثر تغییر عمق شکاف H را نشان می دهد. می بینیم که با افزایش H مقدار تلفات زیاد شده و سپس کم می شود. در واقع با افزایش H ، ماده آنالیت به هسته نزدیکتر شده و انرژی بیشتری از هسته می تواند به ماده آنالیت برسد و بر همکنش بهتری را پدید آورد و در نتیجه تلفات افزایش یابد. اما با افزایش بیشتر H از 3 میکرومتر، به دلیل تداخل با حفره های TiN انتقال انرژی به درستی صورت نگرفته و تلفات کاهش می یابد. با توجه به موارد گفته شده مقدار بهینه H برابر با 3 میکرومتر انتخاب می شود. تلفات ماکزیمم در این حالت 85 dB/cm و طول موج تشدید به دلیل اینکه شرایط تطبیق فاز تغییر کرده است $2/99$ میکرومتر شده است.

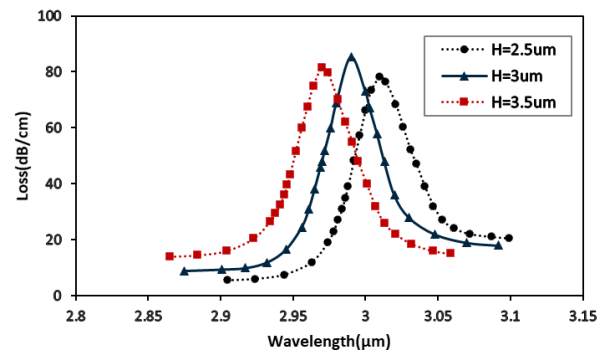
پارامتر مهم بعدی ضخامت لایه نازک طلا (t) است. شکل (۷) نتایج محاسبات مربوط به تغییر t را نمایش می دهد. ضخامت لایه طلا را از 50 نانومتر تا 150 نانومتر تغییر داده ایم و می بینیم که با افزایش ضخامت، تلفات محدود شوندگی کاهش می یابد و از 78 dB/cm به $3/04$ میکرومتر منتقل می شود. این اتفاق به این دلیل است که هرچه ضخامت لایه طلا بیشتر شود انرژی موج محو شونده که از مود هسته به لایه طلا می رسد به دلیل پدیده میرایی، کمتر شده و برهمکنش آن با آنالیت ضعیفتر خواهد شد [۳۷]. در نتیجه تلفات کاهش می یابد. همچنین با تغییر ضخامت لایه طلا، ضریب شکست مؤثر کلی تغییر می کند و در نتیجه شرایط تشدید عوض می شود (معادله ۶) و بنابراین طول موج تشدید هم جابجا خواهد شد. در نهایت مقدار بهینه t را برابر با 50 نانومتر در نظر می گیریم.



شکل (۴): نمودار تلفات محدود شوندگی به ازای تغییرات شعاع حفره های هوایی r_1 . برای بدست آوردن نمودار، $a = 2.5\mu\text{m}$ ، $n_a = 1.4$ ، $d = 4\mu\text{m}$ ، $H = 2.5\mu\text{m}$ ، $t = 110\text{nm}$ ، $r_3 = 0.5\mu\text{m}$ ، $r_2 = 0.5\mu\text{m}$ و $T = 50\text{nm}$ در نظر گرفته شده اند.

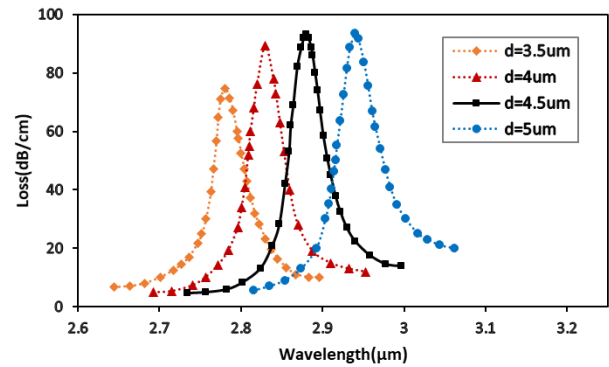


شکل (۵): نمودار تلفات محدود شوندگی به ازای تغییرات فاصله بین حفره ها (a). برای بدست آوردن نمودارها، $r_1 = a$ ، $n_a = 1.4$ ، $d = 4\mu\text{m}$ ، $H = 2.5\mu\text{m}$ ، $t = 110\text{nm}$ ، $r_3 = 0.5\mu\text{m}$ ، $r_2 = 0.5\mu\text{m}$ و $T = 50\text{nm}$ در نظر گرفته شده اند.

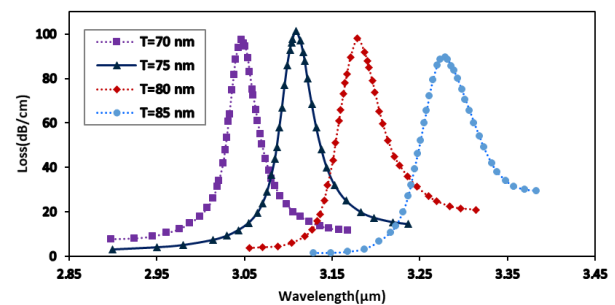


شکل (۶): نمودار تلفات محدود شوندگی به ازای تغییر عمق شکاف (H). برای بدست آوردن نمودارها، $r_1 = a = 3\mu\text{m}$ ، $n_a = 1.4$ ، $d = 4\mu\text{m}$ ، $t = 110\text{nm}$ ، $r_3 = 0.5\mu\text{m}$ ، $r_2 = 0.5\mu\text{m}$ و $T = 50\text{nm}$ در نظر گرفته شده اند.

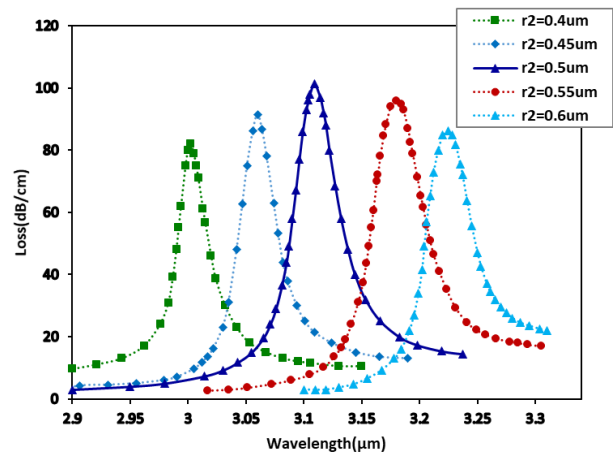
پلاسمونیک افزایش یافته و سطح برهمکنش بین نور و ماده *ITO* بیشتر خواهد شد و در نتیجه تلفات زیاد می‌شود. با افزایش بیشتر از مقدار ۴/۵ میکرومتر، به دلیل همپوشانی حفره‌ها با لایه *ITO*، نور کمتری به سطح آن خواهد رسید و تلفات تقریباً ثابت خواهد ماند. مقدار بهینه d را برابر با ۴/۵ میکرومتر در نظر می‌گیریم که در این حالت ماکزیمم تلفات و طول موج تشدید به ترتیب برابر با 93 dB/cm و $2/88$ میکرومتر هستند. شکل (۹) تغییرات تلفات را به ازای مقادیر مختلف ضخامت لایه *ITO* یعنی T نشان می‌دهد. در ابتدا با افزایش T تلفات زیاد شده و سپس کم می‌شود. دلیل این رفتار به ماهیت تشکیل میدان بر می‌گردد. در واقع در ابتدا به دلیل کم بودن ضخامت *ITO* میدان به درستی در آن تشکیل نمی‌شود، برهمکنش نور و ماده آنالیت به خوبی انجام نمی‌گیرد و در نتیجه تلفات کم می‌شود اما با افزایش ضخامت، میدان و موج محو شونده به خوبی تشکیل می‌شوند. با افزایش بیشتر ضخامت *ITO* از ۷۵ نانومتر، به دلیل پدیده میرایی مشابه آنچه برای لایه طلا ذکر شد، تلفات کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۹) مقدار بهینه برای T ، ۷۵ نانومتر در نظر گرفته شده که در این حالت ماکزیمم تلفات و طول موج تشدید به ترتیب برابر با $101/3 \text{ dB/cm}$ و $3/1$ میکرومتر خواهند شد. دو پارامتر دیگر، شعاع حفره‌های طلا (r_2) و شعاع حفره‌های *TiN* (r_3) است که اثر تغییرات آنها در شکل (۱۰-۱۱) نشان داده شده است. با افزایش r_2 به دلیل افزایش سطح مؤثر طلا، برهمکنش بین طلا و انرژی مود هسته زیاد و در نتیجه تلفات بیشتر خواهد شد. اما سپس با افزایش بیشتر شعاع، کاهش اندکی در تلفات مشاهده می‌شود که ناشی از ورود حفره طلا به ناحیه مودال هسته است و باعث می‌شود که انرژی مود هسته به خوبی به حفره طلا منتقل نشود. با توجه به شکل (۱۰)، مقدار بهینه r_2 را برابر با ۰/۵ میکرومتر در نظر می‌گیریم که معادل تلفات ماکزیمم $101/3 \text{ dB/cm}$ در طول موج تشدید $3/1$ میکرومتر است. همچنین از شکل (۱۱) قابل مشاهده است که با افزایش r_3 شاهد افزایش کمی در تلفات و سپس کاهش آن هستیم. این به این دلیل است که در ابتدا با افزایش r_3 سطح مؤثر پلاسمونیک افزایش یافته و برهمکنش نور و ماده *TiN* قویتر و در نتیجه تلفات بیشتر می‌شود. اما با افزایش شعاع r_3 از مقدار ۰/۴۵ میکرومتر، کانال ارتباطی که انرژی مود هسته از طریق آن به آنالیت می‌رسد تنگتر شده و انرژی کمتری به مود *SPP* مربوط به لایه‌های طلا و *ITO* رسیده و در نتیجه برهمکنش نور با آنها ضعیف‌تر شده و تلفات کم می‌شود. با توجه به شکل (۱۱)، برای r_3 مقدار ۰/۴۵ میکرومتر در نظر گرفته شده است. در این حالت مقدار ماکزیمم تلفات محدودشوندگی $103/6 \text{ dB/cm}$ و طول موج تشدید $3/05$ میکرومتر می‌شود. نمودار تلفات محدودشوندگی به ازای مقادیر مختلف ضریب شکست ماده آنالیت در شکل (۱۲) نشان داده شده است. محدوده قابل تشخیص سنسور پیشنهادی ضرایب شکست بین ۱/۴ تا ۱/۶ است. همچنین خطی بودن سنسور در شکل (۱۳) بررسی شده که گویای کارکرد مناسب و خطی ساختار پیشنهادی است.



شکل (۸): نمودار تلفات محدودشوندگی به ازای تغییر طول لایه *ITO* (d). برای بدست آوردن نمودارها، $r_1 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $a = 3 \mu\text{m}$ ، $n_a = 1.4$ ، $r_3 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $r_2 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $t = 50 \text{ nm}$ ، $H = 3 \mu\text{m}$ و $T = 50 \text{ nm}$ در نظر گرفته شده‌اند.



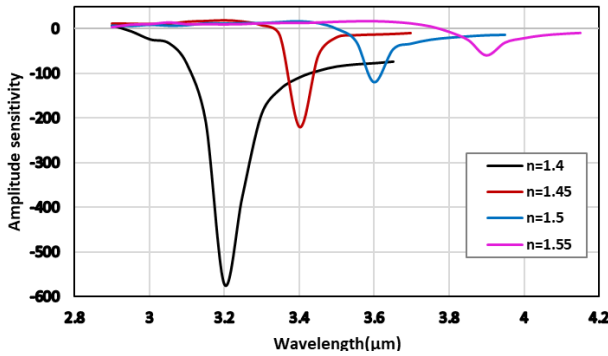
شکل (۹): نمودار تلفات محدودشوندگی به ازای تغییر ضخامت لایه *ITO* (T). برای بدست آوردن نمودارها، $a = 3 \mu\text{m}$ ، $n_a = 1.4$ ، $r_3 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $r_2 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $r_1 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $t = 50 \text{ nm}$ ، $H = 3 \mu\text{m}$ و $d = 4.5 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۱۰): نمودار تلفات محدودشوندگی به ازای تغییر شعاع حفره طلا (r_2). برای بدست آوردن نمودارها، $r_1 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $a = 3 \mu\text{m}$ ، $n_a = 1.4$ ، $r_3 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $r_2 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $t = 50 \text{ nm}$ ، $H = 3 \mu\text{m}$ و $d = 4.5 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده‌اند.

در مرحله بعد، اثر لایه *ITO* را با تغییر طول (d) و ضخامت (T) آن بررسی می‌کنیم. همانطور که در شکل (۸) می‌بینیم، با افزایش مقدار d از ۳/۵ تا ۵ میکرومتر ابتدا شاهد افزایش تلفات و سپس تقریباً ثابت بودن تلفات هستیم. دلیل این رفتار این است که با افزایش d سطح مؤثر



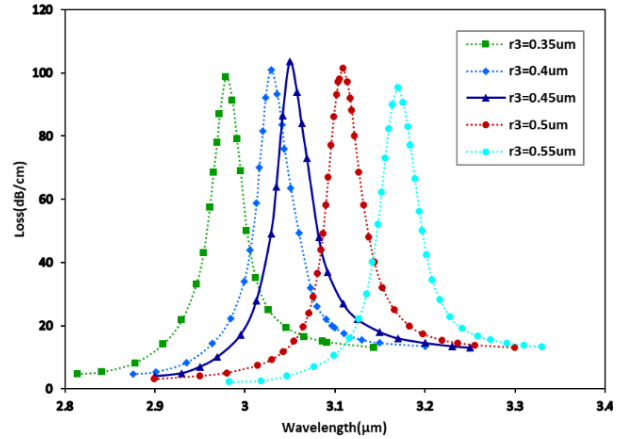


شکل (۱۴): نمودار حساسیت دامنه بر حسب طول موج به ازای ضرایب شکست متفاوت ماده آنالیت.

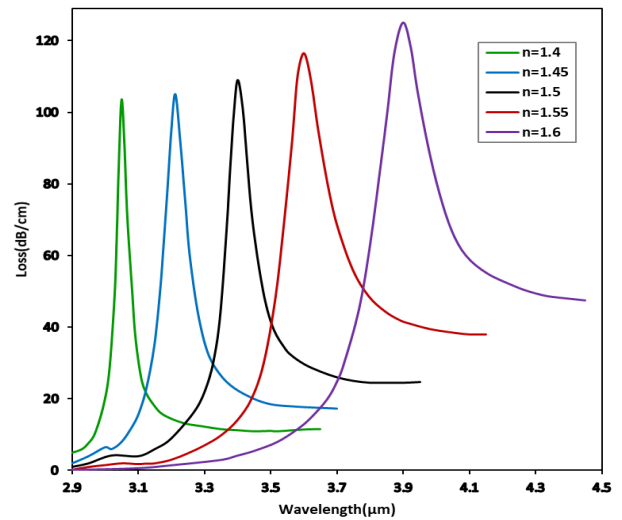
در جدول (۱) محاسبات مربوط به پارامترهای ارزیابی سنسور پیشنهادی آورده شده‌اند. محدوده تشخیص سنسور، ضرایب شکست $1/4$ تا $1/6$ می‌باشد که محدوده بسیار گسترده‌ای است. ماکزیمم حساسیت سنسور برابر با $6000 \text{ nm}/RIU$ ، مقدار ماکزیمم FOM ساختار برابر با 67 RIU^{-1} و رزولوشن آن برابر با $1.6 \times 10^{-5} \text{ RIU}$ شده است که همگی بیانگر کارایی بالای سنسور پیشنهادی و مناسب برای کاربردهای تشخیصی پزشکی و مواد شیمیایی می‌باشد. در انتها، مقایسه بین سنسور پیشنهاد شده در این تحقیق با برخی از کارهای مشابه انجام شده در جدول (۲) آورده شده است.

۴- نتیجه

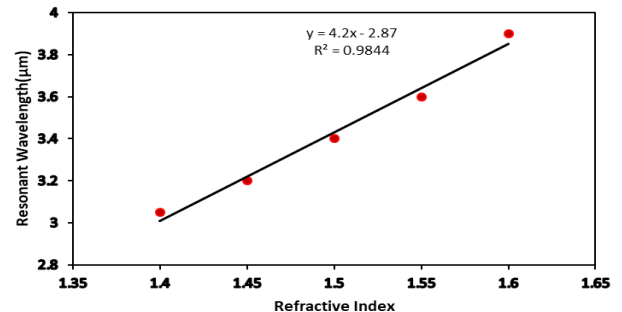
سنسورهای پلاسمونیک مبتنی بر فیبر بلور فوتونی به دلیل خصوصیات منحصر به فردی که دارند نقش بسیار مهمی در نانو فوتونیک و کاربردهای تشخیصی پیدا کرده‌اند. ما در این تحقیق یک سنسور تشخیص ضریب شکست ارائه دادیم که برای بهبود عملکرد آن از حفره‌های طلا و TiN و همچنین دو شکاف با لایه‌های نازک طلا، به اضافه برش دو طرف ساختار و نشان دادن لایه ITO استفاده نمودیم. مزیت اصلی سنسور پیشنهادی ما قابلیت تشخیص محدوده گسترده‌ای از ضرایب شکست ($1/4$ تا $1/6$) می‌باشد که با حساسیت مناسبی همراه شده است. یکی دیگر از مزیت‌های این سنسور، کار در محدوده طول موجی MIR است که کارایی سنسور را بالا می‌برد. ویژگی‌های تشخیصی سنسور پیشنهادی با استفاده از روش المان محدود بررسی شدند. به منظور رسیدن به یک ساختار بهینه و مناسب، مرحله به مرحله پارامترهای مهم ساختار را بررسی و اثر تغییرات آنها بر عملکرد سنسور را آنالیز نمودیم. با توجه به نتایج محاسبه شده، ساختار پیشنهادی ما دارای حساسیت زیاد $6000 \text{ nm}/RIU$ ، مقدار ماکزیمم FOM برابر با 67 RIU^{-1} ، رزولوشن $1.6 \times 10^{-5} \text{ RIU}$ و حساسیت دامنه 572 RIU^{-1} می‌باشد. با توجه به این پارامترها، سنسور پیشنهادی ما برای کاربردهای تشخیصی مواد شیمیایی با ضریب شکست بالا مثل روغن‌های صنعتی و مواد نفتی و همچنین کاربردهای پزشکی بسیار مناسب می‌باشد.



شکل (۱۱): نمودار تلفات محدودشوندگی به ازای تغییر شعاع حفره TiN (r_3) برای بدست آوردن نمودارها، $n_a = 1.4$ ، $a = 3 \mu\text{m}$ ، $r_1 =$ و $d = 4.5 \mu\text{m}$ ، $t = 50 \text{ nm}$ ، $H = 3 \mu\text{m}$ ، $r_2 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $0.5 \mu\text{m}$ و $T = 75 \text{ nm}$ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۱۲): نمودار تلفات محدودشوندگی به ازای ضرایب شکست مختلف ماده آنالیت. برای بدست آوردن نمودارها، $r_1 =$ ، $a = 3 \mu\text{m}$ ، $r_3 = 0.45 \mu\text{m}$ ، $H = 3 \mu\text{m}$ ، $r_2 = 0.5 \mu\text{m}$ ، $0.5 \mu\text{m}$ و $d = 4.5 \mu\text{m}$ ، $T = 75 \text{ nm}$ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۱۳): بررسی خطی بودن سنسور پیشنهادی. نمودار ضرایب شکست مختلف ماده آنالیت بر حسب طول موج های تشدید.

نمودار حساسیت دامنه به ازای ضرایب شکست مختلف در شکل (۱۴) رسم شده است و طبق این شکل می‌بینیم که حداکثر حساسیت دامنه برابر با 572 RIU^{-1} بدست آمده است.

جدول (۱): پارامترهای ارزیابی سنسور پیشنهادی

ضریب شکست RI	فرکانس تشدید (μm)	پیک تلفات (dB/cm)	جابجایی پیک (μm)	FWHM (nm)	S_A (nm/RIU)	FOM (RIU^{-1})	Resolution (RIU)	S_A (RIU^{-1})
1.4	3.05	103.6	0.15	45	3000	67	3.3×10^{-5}	572
1.45	3.2	105	0.2	100	4000	40	2.5×10^{-5}	220
1.5	3.4	109	0.2	110	4000	37	2.5×10^{-5}	120
1.55	3.6	116.5	0.3	210	6000	29	1.6×10^{-5}	62
1.6	3.9	125	N/A	270	N/A	N/A	N/A	N/A

جدول (۲): مقایسه سنسور پیشنهادی با برخی از کارهای مشابه گزارش شده

ساختار سنسور	محدوده ضریب شکست	حساسیت (nm/RIU)	Resolution (RIU)	مرجع/سال
PCF based plasmonic (silver)	1.38-1.41	4100	2.44×10^{-5}	2022/[38]
D-type PCF-based plasmonic (gold)	1.35-1.40	5100	—	2022/[39]
D-type PCF-based plasmonic (graphene-TiO ₂ -silver)	1.34-1.348	4250	2.35×10^{-5}	2022[40]
Optical fiber SPR sensor(Hematite)	1.33-1.38	4800	—	2023[41]
dual D-type PCF (gold)	1.31-1.41	6000	5×10^{-5}	2024/[42]
PCF-based plasmonic (u-groove gold- TiO ₂)	1.39-1.44	2000	5×10^{-5}	2024[43]
Our work	1.4-1.6	6000	1.6×10^{-5}	

مراجع

- [8] Tong L, Wei H, Zhang S, Xu H. "Recent advances in plasmonic sensors. Sensors", vol. 14, no. 5, pp. 7959-73, May 2014. <https://doi.org/10.3390/s140507959>
- [9] Kaur V, Singh S. "Design approach of solid-core photonic crystal fiber sensor with sensing ring for blood component detection", *Journal of Nanophotonics*. vol 13, no. 2, pp. 026011, Apr 2019. <https://doi.org/10.1117/1.JNP.13.026011>
- [10] Akter S, Abdullah H. "High sensitivity gold-coated photonic crystal fiber sensor for blood component detection", *Plasmonics*, vol. 1, pp. 1-12, Oct 2024. <https://doi.org/10.1007/s11468-024-02599-5>
- [11] Yadav S, Singh S, Lohia P, Umar A, Dwivedi DK. "Delineation of profoundly birefringent nonlinear photonic crystal fiber in terahertz frequency regime", *Journal of Optical Communications*, vol. 46, no. 1, pp. 41-9, Jan 2025. <https://doi.org/10.1515/joc-2022-0143>
- [12] Li Z, Qu Y, Wang X, Wang Y, Wang D, Guo X, Xin C, Qiu Q, Rao L, Yuan J. "Simultaneous measurement of liquid refractive index and temperature based on the birefringence response of a water-filled D-shaped photonic crystal fiber", *Measurement*. vol. 242, pp. 116217, Jan 2025. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116217>
- [13] Yadav S, Lohia P, Dwivedi DK. "Numerical modelling of highly efficient PCF based sensor for edible oil detection", *Journal of Optics*, pp. 1-7, Jan 2025. <https://doi.org/10.1007/s12596-025-02458-4>
- [14] Ashrafi TM, Mohanty G. "Surface Plasmon Resonance Sensors: A Critical Review of Recent Advances, Market Analysis, and Future Directions". *Plasmonics*, pp. 1-21, Jan 2025. <https://doi.org/10.1007/s11468-024-02740-4>
- [15] Han B, Zhang YN, Siyu E, Wang X, Yang D, Wang T, Lu K, Wang F. "Simultaneous measurement of temperature and strain based on dual SPR effect in PCF", *Optics & Laser Technology*, vol. 113, pp. 46-51, May 2019. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.12.010>
- [16] Zhang H, Chen Y, Feng X, Xiong X, Hu S, Jiang Z, Dong J, Zhu W, Qiu W, Guan H, Lu H. "Long-range surface plasmon resonance sensor based on side-polished fiber for biosensing applications", *IEEE Journal of*
- [1] Chau YF, Yeh HH, Tsai DP. "Surface plasmon resonances effects on different patterns of solid-silver and silver-shell nanocylindrical pairs", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. vol. 24, no. 8, pp. 1005-14, Jan 2010. <https://doi.org/10.1163/156939310791586098>
- [2] Kaziz S, Echouchene F, Gazzah MH. "Optimizing PCF-SPR sensor design through Taguchi approach, machine learning, and genetic algorithms", *Scientific reports*, vol. 14, no. 1, pp. 7837, Apr 2024, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55817-9>
- [3] Das S, Sen R. "Design and numerical analysis of a pcf-spr sensor for early-stage malaria detection. Plasmonics", vol. 19, no. 5, pp. 2565-80, Oct 2024. <https://doi.org/10.1007/s11468-024-02193-9>
- [4] Liu J, Dong J, Liu Q, "Hou S, Wu G, Yan Z. High-performance gold-nanowires-coated PCF-SPR sensor for refractive index detection", *Plasmonics*, vol. 1, pp. 1-10, Oct 2024. <https://doi.org/10.1007/s11468-024-02582-0>
- [5] Malakar T, Nurain Amina MN, Hassan MF. "Performance Analysis of a D-Shaped Butterfly-Core PCF-SPR Sensor for Dual Polarization Guided by Optimal Au-Ta₂O₅ Coating", *Plasmonics*, vol. 1, pp. 1-8, Feb 2025. <https://doi.org/10.1007/s11468-025-02817-8>
- [6] Jiao S, Gao Z. "Analysis of a photonic crystal fiber SPR sensor based on dual polarization direction and two different metal layers", *Optical Materials Express*, vol. 15, no. 3, pp. 541-54, Feb 2025. <https://doi.org/10.1364/OME.554436>
- [7] Romeiro AF, Cardoso MP, Miranda CC, Silva AO, Costa JC, Giraldo MT, Santos JL, Baptista JM, Guerreiro A. "Analysis of a D-Shaped Photonic Crystal Fiber Sensor with Multiple Conducting Layers", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 24, no. 1, pp. 2025288716, Feb 2025. <https://doi.org/10.1590/2179-10742025v24i1288716>



- with metal wires into cladding air holes”, *Optics express*, vol. 19, no. 4, pp.3799-3808, Feb. 2011. <https://doi.org/10.1364/OE.19.003799>
- [32] Khalil AE, El-Saeed AH, Farag MA, Hashish ME, Roshdi M, Hameed MF, Azab MY, Obayya SS. “Highly sensitive photonic crystal fiber biosensor based on alternative plasmonic material”, *In Nanophotonics VII*, . vol. 10672, pp. 102-108, SPIE. May 2018. <https://doi.org/10.1117/12.2306300>
- [33] Gupta, B.D. and Verma, R.K., “Surface plasmon resonance-based fiber optic sensors: principle, probe designs, and some applications”, *Journal of sensors*, p. 979761, Aug. 2009. <https://doi.org/10.1155/2009/979761>
- [34] Das A, Huraiya MA, Tabata H, Ramaraj SG. “Ultra-sensitive refractive index detection with gold-coated PCF-based SPR sensor”, *Talanta Open*. vol. 10, pp. 100384, 2024 Dec 2024. <https://doi.org/10.1016/j.talo.2024.100384>
- [35] Majeed MF, Ahmad AK. “Design and analysis of a high sensitivity open microchannel PCF-based surface plasmon resonance refractometric sensor”, *Optical Materials*. vol. 147, pp. 147:114617, Jan 2024. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114617>
- [36] Hassan AA, Nafiz AA, Mahmud RR, Nayan MF, Salimullah SM. “Investigation of dual plasmonic material integrated wrench-shaped PCF sensor with broadband resonance for cancer cell & chemical detection”, *Optik*. vol. 318, pp. 318:172092, Dec 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jileo.2024.172092>
- [37] Gangwar, R. K., & Singh, V. K. “Highly sensitive surface plasmon resonance based D-shaped photonic crystal fiber refractive index sensor”, *Plasmonics*. vol. 12, pp. 1367-1372, Oct. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11468-016-0395-y>
- [38] Bahloul, L., Ferhat, M. L., Haddouche, I., & Cherbi, L. “A high-resolution refractive index sensor of partially cleaved PCF based on surface plasmon resonance”. *Journal of Optics*. pp. 1-9, Jun. 2022. <https://doi.org/10.1007/s12596-021-00795-8>
- [39] Meng, F., Wang, H., & Fang, D. “Research on D-shape open-loop PCF temperature refractive index sensor based on SPR effect”. *IEEE Photonics Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 1-5, Apr. 2022. [doi: 10.1109/JPHOT.2022.3166822](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2022.3166822)
- [40] Sorathiya, V., Lavadiya, S., Faragallah, O. S., Eid, M. M., & Rashed, A. N. Z. “D shaped dual core photonics crystal based refractive index sensor using graphene-titanium-silver materials for infrared frequency spectrum”, *Optical and Quantum Electronics*, vol. 54, no. 5, pp. 290, May 2022. <https://doi.org/10.1007/s11082-022-03700-0>
- [41] Zhang KK, Wang YY, Wang Q, Wang HY, Qian YZ, Zhang DY, Xue YY, Li S, Zhang L. “Sensitive monitoring of refractive index by surface plasmon resonance (SPR) with a gold α -iron (III) oxide thin film. Instrumentation Science & Technology”, vol. 51, no. 5, pp. 558-573, Sep 2023. <https://doi.org/10.1080/10739149.2023.2180030>
- [42] Divya J, Selvendran S, Raja AS, Borra V. “A Novel Plasmonic Sensor Based on Dual-Channel D-Shaped Photonic Crystal Fiber for Enhanced Sensitivity in Simultaneous Detection of Different Analytes”, *IEEE Transactions on NanoBioscience*. vol. 23, no. 1, pp. 127-139, Jul 2023. [doi: 10.1109/TNB.2023.3294330](https://doi.org/10.1109/TNB.2023.3294330)
- [43] Mittal S, Saharia A, Ismail Y, Petruccione F, Bourdine AV, Morozov OG, Demidov VV, Yin J, Singh G, Tiwari M, Kumar S. “Design and performance analysis of a novel hoop-cut SPR-PCF sensor for high sensitivity and broad range sensing applications”, *IEEE Sensors Journal*. vol. 24, no. 3, pp. 2697-2704, Feb. 2024. [doi: 10.1109/JSEN.2023.3339813](https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3339813)
- Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 25, no. 2, pp. 1-9, Sep 2018. [doi: 10.1109/JSTOE.2018.2868159](https://doi.org/10.1109/JSTOE.2018.2868159)
- [17] Yasli A, Ademgil H, Haxha S, Aggoun A. “Multi-channel photonic crystal fiber based surface plasmon resonance sensor for multi-analyte sensing”, *IEEE Photonics Journal*. vol. 12, no. 1, pp. 1-5, Dec 2019. [doi: 10.1109/JPHOT.2019.2961110](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2019.2961110)
- [18] Peng TC, Lin WC, Chen CW, Tsai DP, Chiang HP. “Enhanced sensitivity of surface plasmon resonance phase-interrogation biosensor by using silver nanoparticles”, *Plasmonics*, vol. 6, pp. 29-34, Mar 2011. <https://doi.org/10.1007/s11468-010-9165-4>
- [19] Xie Q, Chen Y, Li X, Yin Z, Wang L, Geng Y, Hong X. “Characteristics of D-shaped photonic crystal fiber surface plasmon resonance sensors with different side-polished lengths”, *Applied Optics*. Vol. 56, no. 5, pp. 1550-5, Feb 2017. <https://doi.org/10.1364/AO.56.001550>
- [20] Hossain B, Paul AK, Islam MA, Hossain MF, Rahman MM. “Design and analysis of highly sensitive prism based surface plasmon resonance optical salinity sensor”, *Results in Optics*. vol. 7, pp. 100217, May 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2022.100217>
- [21] Francesco C, Francesco B, Sara T, Cosimo T, Ambra G. “Biosensing with optical fiber gratings”, *Nanophotonics*. vol. 6, no. 4, pp. 663-79, Jul 2017. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2016-0178>
- [22] Naik, G. V., Kim, J., & Boltasseva, A. “Oxides and nitrides as alternative plasmonic materials in the optical range”, *Optical materials express*, vol. 1 no. 6, pp. 1090-1099, Sep. 2011. <https://doi.org/10.1364/OME.1.001090>
- [23] Yan X, Wang Y, Cheng T, Li S. “Photonic crystal fiber SPR liquid sensor based on elliptical detective channel. Micromachines”, vol. 12, no. 4, pp. 408, Apr 2021. <https://doi.org/10.3390/mi12040408>
- [24] Liu C, Su W, Liu Q, Lu X, Wang F, Sun T, Chu PK. “Symmetrical dual D-shape photonic crystal fibers for surface plasmon resonance sensing”, *Optics express*, vol. 26, no. 7, pp. 9039-49, Mar 2018. <https://doi.org/10.1364/OE.26.009039>
- [25] Golosovsky M, Lirtsman V, Yashunsky V, Davidov D, Aroeti B. “Midinfrared surface-plasmon resonance: A novel biophysical tool for studying living cells”, *Journal of Applied Physics*. vol. 107, no. 2, pp. 029901, Jan. 2010. <https://doi.org/10.1063/1.3284955>
- [26] Bai Y, Wang B, Ma X. “Versatile infrared refractive-index sensor based on surface plasmon resonance in graphene sheet”, *Optical Engineering*, vol. 57, no. 3, pp. 037107, Mar 2018. <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.3.037107>
- [27] Sachet E, Losego MD, Guske J, Franzen S, Maria JP. “Mid-infrared surface plasmon resonance in zinc oxide semiconductor thin films”, *Applied Physics Letters*, vol. 102, no. 5, Feb 2013. <https://doi.org/10.1063/1.4791700>
- [28] Homola J. “Present and future of surface plasmon resonance biosensors”, *Analytical and bioanalytical chemistry*, vol. 377, no. 3, pp. 528-39, Oct 2003. <https://doi.org/10.1007/s00216-003-2101-0>
- [29] Wang F, Wei Y, Han Y. “High sensitivity and wide range refractive index sensor based on surface plasmon resonance photonic crystal fiber”, *Sensors*. vol. 23, no. 14, pp. 6617, Jul 2023. <https://doi.org/10.3390/s23146617>
- [30] Mukhopadhyay AK, Sarkar S, Mukherjee S, Das NR. “Optimization and characterization of a PCF-based SPR sensor for enhanced sensitivity and reliability in diverse chemical and biological applications”, *Journal of the Optical Society of America B*. vol. 42, no. 1, pp. 97-104, Dec 2024. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.537519>
- [31] Nagasaki, A., Saitoh, K. and Koshiba, M., “Polarization characteristics of photonic crystal fibers selectively filled

