

Highly efficient SPR sensor based on Al metal and 2D materials

Mina Noori^{1,2,*}, Ali Tolouei^{1,2}

¹Department of Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, 51335-1996 Iran

²Nano-Optics and Photonics Research Lab (NOPRL), Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

E-mails: noori@sut.ac.ir

Short Abstract

In this article, the characteristics of the proposed surface plasmon resonance sensor with Kretschmann configuration is investigated. The proposed sensor consists of aluminum metal and two-dimensional materials for which the the number of layers and their thickness have been optimized to achieve the highest sensitivity. In the proposed sensor, the aluminum metal has been used due to its low cost and the two-dimensional materials and transition metal dichalcogenides are used due to their high surface to volume ratio which assist to obtain high sensitivity. The structure comprised of $\text{CaF}_2/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/2\text{L Graphene}/10\text{L Black Phosphorus}$ is the optimal structure. The presented sensor based on surface plasmon resonance, provides sensitivity of $S=304 \text{ deg/RIU}$, figure of merit of $\text{FOM}=194.871 \text{ RIU}^{-1}$, minimum reflectance of $R_{\min}=0.14$, and the full width at half maximum of $\text{FWHM}=1.56 \text{ deg}$ and it is usable as a biosensor. The optimization and the study of the proposed structure which is based on angular interrogation, has been carried out using the transfer matrix method and implementing Lumerical software.

Keywords

Surface plasmon resonance, Transition metal dichalcogenides, Kretschmann, Transfer matrix method.

1- Short Introduction

Surface plasmon resonance sensors are widely used in various applications due to their outstanding advantages, such as compactness, label-free detection, high sensitivity, low cost, and real-time sensing methods. In this article, a surface plasmon sensor based on the Kretschmann structure using aluminum metal and two-dimensional materials such as graphene and TMDs with an optimal number of layers and thicknesses is presented so that all sensing parameters, including sensitivity, figure of merit, full width at half maximum, and the minimum reflection are adjusted in a favorable way. The transfer matrix method (TMM) and Lumerical software have been used to study and check the desired structure.

2- Proposed Work and Methodology (including comprision, simulation/experimental results and discusion)

In this article, the study is theoretical and the transfer matrix method has been used to model the multi-layer structure of the Kretschmann SPR sensor. Additionally, the field profile curve of the field in different layers has been obtained with the help of Lumerical software. The reflection curve of the SPR sensor based on ATR, effectively models the performance of the multilayered sensors without any approximation.

First, a conventional Kretschmann structure with aluminum metal is studied for the visible wavelength of 633 nm, and the effect of changing the thickness of the metal layer on the characteristics of the sensor is investigated. The Kretschmann's structure to determine the type of prism, consists of the first layer of the prism, the second layer of aluminum metal, the third layer of aluminum oxide with a thickness of 3 nm, and the fourth layer of analyte. The changes of the refractive index in the range of 1.32 to 1.355 have been considered to check the final structure. However, the best range for optimizing sensor's characteristics is 1.33 to 1.335 with steps of 0.005. By evaluating the performance of common prisms, the CaF_2 prism with an aluminum thickness of 40 nm was selected for further investigation of the structure.

Subsequently, efforts were made to make a general improvement in the sensor evaluation parameters, including sensitivity, FOM, FWHM, and $R_{\min}$ in the presence of two-dimensional materials such as transition metal dichalcogenides such as WSe_2 , WS_2 , MoSe_2 , MoS_2 , black phosphorus, and graphene. First, the effect of adding graphene was investigated, and 2-layer graphene showed good performance. Then, the performance of the sensor in the presence of black phosphorus and WSe_2 , WS_2 , MoSe_2 , and MoS_2 was investigated. Finally, while evaluating the parameters of the sensor, the $\text{CaF}_2/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/2\text{L Gr}/10\text{L BP}$ structure was proposed as the optimal and final structure.

3- Conclusion

In this article, the optimization process of the proposed SPR sensor using aluminum metal and the two-dimensional materials such as transition metal chalcogenides, graphene, and black phosphorus has been carried out. The sensitivity of the proposed SPR sensor has been increased due to the high surface-to-volume ratio of the implemented 2D materials. The structure with the combination of $\text{CaF}_2/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/2\text{L Gr}/10\text{L BP}$ is introduced as the optimal sensor with sensitivity, FOM, $R_{\min}$, and FWHM of 304 deg/RIU, 463/194 RIU^{-1} , 0.14, and 1.56, respectively.

4- References

- [1] K. Bhishma, A. Uniyal, P. Sarkar, A. Pal, and R. B. Yadav, "Sensitivity improvement of surface plasmon resonance sensor for glucose detection in urine samples using heterogeneous layers: an analytical perspective", *Journal of Optics*, pp.1-11, 2023.
- [2] J. Chen, Z. Qian, P. Cheng, T. Chaojun, S. Xueyang, D. Licheng, and P. Gun-Sik, "Optical cavity-enhanced localized surface plasmon resonance for high-quality sensing", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 30, no. 8, pp. 728-731, 2018.
- [3] A. Srivastava, and Y. K. Prajapati, "Performance analysis of silicon and blue phosphorene/ MoS_2 hetero-structure based SPR sensor", *Photonic Sensors*, vol. 9, pp. 284-292, 2019.

حسگر پلاسمونی بسیار کارآمد مبتنی بر فلز آلومینیوم و مواد دو بعدی

مینا نوری

دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

علی طلوعی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، صنعتی سهند، تبریز، ایران

چکیده

در این مقاله، مشخصات حسگر تشدید پلاسمون سطحی با ساختار کرچمن مبتنی بر فلز آلومینیوم و لایه‌های مواد دو بعدی با تغییر و بهینه‌سازی تعداد لایه‌ها و ضخامت آنها مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. در راستای فرآیند بهینه‌سازی با تاکید بر استفاده از فلز آلومینیوم به عنوان فلز پایه به جهت صرفه اقتصادی حسگر و استفاده از مواد دو بعدی و فلزات واسطه دی‌کالکونید به خاطر نسبت سطح به حجم بالای این مواد در جهت کمک به بهبود حساسیت، ساختار با ترکیب $\text{CaF}_2/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/2\text{LGraphene}/10\text{L Black Phosphorous}$ به عنوان ساختار بهینه انتخاب شده است. حسگر ارائه شده مبتنی بر رزونانس پلاسمون سطحی، حساسیت $S=304 \text{ deg/RIU}$ ، عدد شایستگی $\text{RIU}^{-1}=194/871$ ، $\text{FOM}=194/871$ ، حداقل بازتاب $R_{\min}=0/14$ و پهنای باند در نصف بیشینه دامنه $\text{FWHM}=1/56 \text{ deg}$ را ارائه می‌دهد و پتانسیل بالایی برای استفاده در زیست حسگری دارد. بهینه‌سازی و مطالعه ساختار پیشنهادی که مبتنی بر جابجایی زاویه عمل می‌کند، با استفاده از روش ماتریس انتقال و نرم‌افزار لومریکال صورت گرفته است.

کلمات کلیدی

تشدید پلاسمون سطحی، فلزات واسطه دی‌کالکونید، کرچمن، روش ماتریس انتقال.

نام نویسنده مسئول: مینا نوری

ایمیل نویسنده مسئول: noori@sut.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۷

۱- مقدمه

اولین بار در سال ۱۹۰۲ یک پدیده غیر طبیعی در طیف نور پراش یافته توسط آقای وود (Wood) مشاهده گردید. این پدیده که در آن زمان به جامعه علمی گزارش شد، همان پدیده پلاسمون سطحی^۱ است که بعدها این پدیده که با تحریک امواج سطحی الکترومغناطیسی بر روی سطوح توری ارتباط دارد، توسط فانو (Fano) تأیید شد و علت افت موج برگشتی در بازتاب کلی تضعیف شده^۲ به سبب تحریک پلاسمون سطحی، در سال ۱۹۶۸ توسط اتو (Otto) توضیح داده شد. مشاهده پدیده تحریک پلاسمون‌های سطحی در همان سال توسط کرچمن^۳ در ساختار دیگری با استفاده از روش بازتاب کلی تضعیف شده^۴ انجام شد. سپس، روش مرسوم برای پدیده تحریک پلاسمون سطحی با کارهای اولیه اتو و کرچمن پایه گذاری شد و موضوع پلاسمون‌های سطحی به مباحث اپتیک مدرن راه پیدا کرد [۱].

حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی به دلیل مزایای برجسته‌شان، مانند فشرده‌گی، تشخیص انتخابی بدون برچسب، حساسیت بالا، هزینه کم و روش‌های سنجش بلادرنگ، در میان سایر حسگرهای نوری، به طور گسترده در کاربردهای مختلف استفاده می‌شوند [۴-۲]. مکانیسم عملکرد سنسور SPR بر اساس تشخیص تغییرات ضریب شکست ناشی از تعامل لایه شناسایی زیستی با آنالیت‌های هدف در محلول آبی است. روش بازتاب کلی تضعیف شده برای امواج

مغناطیسی عرضی^۴ یک موج پلاسمون سطحی را در مرز فلز-دی‌الکتریک تحریک می‌کند. اتصال مولکول‌های هدف در مجاورت لایه فلزی، ثابت انتشار حالت‌های پلاسمون سطحی را تغییر می‌دهد که در نهایت منجر به تغییر موقعیت پیک منحنی SPR می‌شود [۵]. برای تولید پلاسمون سطحی روی سطح فلز-دی‌الکتریک، استفاده از یک تزویج‌کننده نور مانند منشور، گریپینگ یا فیبر نوری برای تطبیق بردار موج ضروری است [۶]. به عبارت دیگر، شرط تشدید، زمانی برآورده می‌شود که بردار موج نور فرودی برابر با بردار موج پلاسمون سطح باشد. در دو دهه اخیر، سنسورهای SPR مبتنی بر منشور متنوعی ارائه شده است [۷-۱۱]. پیکربندی کرچمن مبتنی بر منشور در سال‌های اخیر به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است که تشخیص مواد و لیگاند‌های دو بعدی را تسهیل می‌کند و علاوه بر بهینه‌سازی ضخامت لایه‌های مختلف و نوع مواد به دلیل ساختار لایه‌ای آن، برای افزایش میدان مناسب است و می‌تواند منجر به حساسیت بالا و تشخیص دقیق و سهولت اتصال مولکول‌های هدف شود. عملکرد حسگر کرچمن SPR را می‌توان به دو دسته طیف بازتاب برحسب طول موج و زاویه تشدید طبقه‌بندی کرد [۱۲-۱۳]. فلز متصل به منشور نقش مهمی در بهینه‌سازی ویژگی‌های سنسورهای SPR ایفا می‌کند. تاکنون فلزات زیادی از جمله طلا، نقره و مس مورد توجه قرار گرفته‌اند. با این حال، استفاده از فلزات مختلف، بحث بده بستان بین بهبود و یا تضعیف پارامترهای حسگری در کنار خواص نوری و شیمیایی متفاوت آنها را نشان می‌دهد. به عنوان

¹ Surface plasmon resonance (SPR)

³ Attenuated total reflectance (ATR)

² Kretschmann

⁴ Transverse Magnetic (TM)

به عنوان یک محیط جذب نور استفاده شده است و حساسیت $182/5 \text{ deg/RIU}$ در بهینه‌ترین حالت بدست آمده است. شیانگ ژائو (Xiang Zhao)، یک بیوحسگر رزونانس پلاسمون سطحی مبتنی بر فلزات واسطه دی‌کالکونید دو بعدی برای بهبود حساسیت حسگر زیستی پیشنهاد داد [۳۳]. در این حسگر، انواع مختلف TMDCهای دو بعدی بر روی هر دو سطح لایه نازک فلزی پوشانده شد و با بهینه‌سازی پارامترهای ساختاری، حساسیت زاویه‌ای با تعداد ۷ لایه نازک WS_2 و لایه آلومینیوم با ضخامت ۳۶ نانومتر، به $315/5 \text{ deg/RIU}$ رسید. انواع دیگری از حسگرهای نوری با سایر روش‌ها نیز تاکنون گزارش شده‌اند [۳۴-۳۵]، هرچند در این مقاله، حسگر پلاسمون سطحی مبتنی بر ساختار کرچمن با استفاده از فلز آلومینیوم و مواد دوبعدی نظیر گرافن و فلزات واسطه دی‌کالکونید با تعداد لایه و ضخامتهای بهینه ارائه شده است تا بتوان تمام پارامترهای حسگری از جمله حساسیت، معیار شایستگی، پهنای باند در نصف بیشینه دامنه و بازتاب کمینه را به نحو مطلوبی تنظیم کرد. برای مطالعه و بررسی ساختار موردنظر از روش ماتریس انتقال^۶ و نرم افزار لومریکال^۷ استفاده شده است.

چینش مقاله به صورت زیر است، در بخش ۶، روش ماتریس انتقال و پارامترهای ارزیابی حسگر ارائه می‌شود. سپس در بخش ۷، ساختار مورد نظر معرفی شده و به بیان نتایج حاصل پرداخته خواهد شد و نهایتاً، بخش نتیجه-گیری ارائه خواهد شد.

۲- روش ماتریس انتقال و پارامترهای ارزیابی

برای مدل‌سازی ساختار چندلایه حسگر کرچمن SPR در این مقاله، از روش TMM استفاده شده است [۳۶] و منحنی پروفایل میدان با کمک نرم‌افزار لومریکال بدست آمده است. منحنی بازتاب سنسور SPR که بر اساس ATR کار می‌کند، به طور موثر عملکرد سنسورهای چند لایه را بدون هیچ گونه تقریبی مدل می‌کند. ضخامت‌ها، ثابت دی‌الکتریک و ضریب شکست لایه k در امتداد محور z ، به ترتیب با ϵ_k ، d_k و n_k نشان داده می‌شوند. با توجه به شرایط مرزی، میدان مماسی در $Z = Z_1$ می‌تواند به میدان مماسی در $Z = Z_{N-1}$ مرتبط شود و به صورت رابطه (۱) بیان گردد [۳۷]:

$$\begin{bmatrix} U_N \\ V_N \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن، مؤلفه‌های بردار سمت راست U_i و V_i ، مؤلفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی مماسی را به ترتیب در مرز لایه اول و U_N و V_N مؤلفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی مماسی در لایه N ام هستند. $\mathbf{M}$ یک ماتریس 2×2 از سنسور چند لایه است که به صورت رابطه (۲) نمایش داده می‌شود:

$$\mathbf{M} = \left(\prod_{k=1}^N \mathbf{M}_k \right)_{ij} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

بطوریکه،

$$M_k = \begin{bmatrix} \cos \beta_k & (-i \sin \beta_k) / q_k \\ -iq_k \sin \beta_k & \cos \beta_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$q_k = \left(\frac{M_k}{\epsilon_k} \right)^{1/2} \times \cos \theta_k = \frac{(\epsilon_k - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{1/2}}{\epsilon_k}$$

$$\beta_k = \frac{2\pi}{\lambda} n_k \cos \theta_k (Z_k - Z_{k-1}) = \frac{2\pi d_k}{\lambda} (\epsilon_k - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{1/2}$$

در نهایت، ضریب انعکاس و میزان بازتاب برای نور p-polarized با استفاده از رابطه‌های به ترتیب (۴) و (۵) به دست می‌آیند:

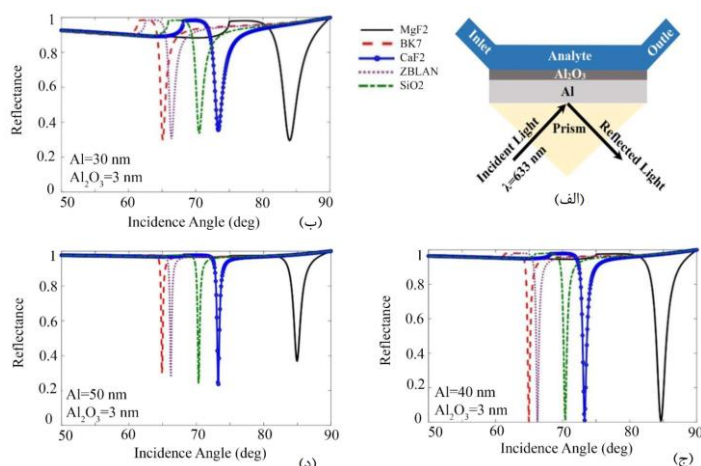
مثال، لایه نازک طلا علاوه بر حساسیت بالا، ثبات و زیست‌سازگاری بهتری را برای جذب آنالیت‌ها ارائه می‌دهد [۶]، اما وضوح و دقت به دلیل گستردگی پهنای باند در نصف بیشینه دامنه آن کاهش می‌یابد. لایه نازک نقره به دلیل دارا بودن پهنای باند در نصف بیشینه دامنه باریک‌تر، وضوح بالایی را نشان می‌دهد، هرچند حساسیت پایین‌تری داشته و مشکلاتی همچون پایداری شیمیایی پایین و اکسیداسیون و خوردگی را دارد. لایه‌های دو فلزی معمولاً برای جلوگیری از اکسید شدن و خوردگی لایه نقره استفاده می‌شوند که حساسیت سنسور را نیز افزایش می‌دهند [۱۴-۱۶]. از این رو، برخی از مطالعات، لایه‌های دو فلزی طلا-نقره را برای بهره‌مندی همزمان از مزایای این فلزات در نظر گرفتند و وضوح آن به بهای کاهش جزئی حساسیت بهبود یافته است [۱۷-۱۹]. یکی دیگر از مزایای استفاده از لایه‌های دو فلزی در حسگرهای SPR جلوگیری از اکسیداسیون است [۲۰-۲۲]. مطالعه‌ای عددی برای استفاده از طلا، آلومینیوم و نقره در حسگرهای SPR در [۲۳] گزارش شده است. روش دیگر برای حل چالش اکسیداسیون، استفاده از لایه‌های نازک مناسب از جنس اکسیدهای فلزی مانند SiO_2 و ZnO یا استفاده از نانولایه‌های دو بعدی مانند گرافن یا فلزات واسطه دی‌کالکونید^۵ است [۲۴]. همچنین، با ظهور مواد دو بعدی، حساسیت حسگرهای SPR به طور چشمگیری بهبود یافته است [۲۵]. به این دلیل که جذب لایه حسگر بر عملکرد حسگر تأثیر می‌گذارد [۲۶]، و قرارگیری لایه‌های دوبعدی روی سطح حسگر، جذب محیط شناسایی را افزایش می‌دهد [۲۷-۲۸].

از میان موارد گزارش شده در مورد زیست حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی که از نانو ساختار کرچمن استفاده می‌کنند، یک روش بهبود حساسیت با استفاده از ساختار تشدید پلاسمون سطحی مبتنی بر ساختار ساندویچی گرافن-آلومینیوم-گرافن توسط هیانگ خو (Hailin Xu) و همکارانش در سال ۲۰۱۶ ارائه شد [۲۹]. تاکید روش آنها بر مطالعه وابستگی عملکرد زیست حسگر خصوصاً حساسیت به پارامترهای ساختاری لایه‌ها همچون جنس و تعداد لایه‌ها بود. حسگر SPR پیشنهادی آن‌ها از بیش از شش لایه مختلف تشکیل شده است و طول موج نور تحریک ۶۳۳ نانومتر است. حساسیت پیک ساختار اشاره شده به‌ازای ضخامت بهینه ۱۷ نانومتر برای فلز آلومینیوم و بدون استفاده از گرافن حدوداً برابر با 270 RIU^{-1} و با گرافن 12 RIU^{-1} در بالا و پایین فلز آلومینیوم حدوداً برابر با 110 RIU^{-1} است. کینگ لینگ اوایانگ (Qingling Ouyang) در سال ۲۰۱۶ یک ساختار حسگر زیستی تشدید پلاسمون سطحی با حساسیت بالا براساس نانو ورق سیلیکونی و فلزات واسطه دی‌کالکونید دو بعدی طراحی کرد که این پیکربندی شامل شش جزء، منشور مثلی SF_{10} ، طلا، نانوصفحه سیلیکونی، لایه‌های دو بعدی WS_2 ، $MoSe_2$ ، MoS_2 (تعریف شده به عنوان MX_2)، لایه آنالیت بیومولکولی و محیط سنجش است. در این پژوهش، از طول‌موج‌های تحریک مختلف ۶۰۰ نانومتر، ۶۳۳ نانومتر، ۶۶۰ نانومتر، ۷۸۵ نانومتر و ۱۰۲۴ نانومتر استفاده شده است و بیشینه حساسیت $155/68 \text{ deg/RIU}$ به‌ازای طول‌موج تحریک ۶۰۰ نانومتر، ضخامت طلای 3.5 nm ، ضخامت سیلیکون 7 nm و یک لایه از WS_2 بدست آمده است [۳۰]. کومار میشر (Kumar Mishra) حسگری برای سنجش گاز طراحی کرد که از لایه دو فلزی رودیوم و نقره تشکیل شده و گرافن به عنوان لایه جاذب گاز درنظر گرفته شده است و حساسیت 220 nm/RIU را نتیجه داده است [۳۱]. مینگ هونگ وانگ (Minghong Wang) طی یک بررسی، حسگری طراحی کرد که در آن از نانو ساختار چند لایه طلا و نقره و همچنین لایه‌های مواد دو بعدی بهره گرفته شده است [۳۲]. در ساختار دو فلزی برای بهبود حساسیت و وضوح به ترتیب از طلا و نقره و از گرافن و WS_2

⁵ Transition metal dichalcogenides (TDMs)

⁷ Lumerical

⁶ Transfer Matrix Method (TMM)



شکل ۱- (الف) شماتیک ساختار مرسوم کرچمن. منحنی بازتاب برای پنج نوع منشور، با ضخامت آلومینیوم اکساید ۳ نانومتر و ضخامت آلومینیوم (ب) ۳۰ nm، (ج) ۴۰ nm و (د) ۵۰ nm.

جدول ۱- نتایج حداقل بازتاب و θ تشدید شبیه‌سازی شده ساختار با ۵ نوع منشور، $d_{Al_2O_3}=3nm$ ، $d_{Al}=40nm$ و آنالیت با ضریب شکست ۱/۳۳.

ساختار	nPrism	R_{min} (nI= ۱/۳۳)	θ (nI=۱/۳۳)
BK7-Al-Al ₂ O ₃	۱/۵۱۵۱	۰/۰۰۲	۶۴/۹۶
ZBLAN-Al- Al ₂ O ₃	۱/۴۹۹۶	۰/۰۰۳	۶۶/۲۴
SiO ₂ -Al- Al ₂ O ₃	۱/۴۵۷	۰/۰۱۰۴	۷۰/۴۰
CaF ₂ -Al- Al ₂ O ₃	۱/۴۳۲۹	۰/۰۰۱	۷۳/۲۸
MgF ₂ -Al- Al ₂ O ₃	۱/۳۳۷	۰/۰۰۶۳	۸۴/۶۴

از روی تحلیل شکل ۱ می‌توان نتیجه گرفت که ضخامت ۴۰ نانومتری لایه آلومینیوم به دلیل حداقل بازتاب بهتر در مواجهه با منشورها و نیز ماده مصرفی کمتر و فراهم کردن حساسیت و FWHM مناسب دارای ارجحیت است. همچنین، با توجه به R_{min} کمینه، دو منشور BK₇، CaF₂ در ضخامت ۴۰ نانومتری لایه آلومینیوم انتخاب و در ادامه مقاله، دو ساختار دیگر با منشورهای (SiO₂ و ZBLAN) از روند بررسی کنار گذاشته می‌شوند. با این حال، منشور MgF₂ بدلیل فراهم کردن حساسیت بالا در ادامه کار، مورد بررسی بیشتر قرار گرفته است. در مرحله بعدی، حساسیت، FWHM و FOM برای سه ساختار با منشورهای BK₇، CaF₂ و MgF₂ برای انتخاب بهترین منشور مورد بررسی قرار گرفته است. علی‌رغم اینکه در بسیاری از مطالعات در زمینه حسگر SPR فقط به بهینه‌سازی یک یا دو مورد از شاخص‌های ارزیابی حسگر پرداخته می‌شود، اما در این مقاله جهت انتخاب بهترین ساختار با نتیجه مناسب، قدم به قدم R_{min} ، FWHM و FOM مقایسه شده و صرف بالا بودن تنها حساسیت مد نظر نبوده و حساسیت متناسب با بهبود بقیه موارد جهت حصول به نتیجه مطلوب در نظر گرفته شده است. در ادامه، رفتار سه منشور انتخاب شده از نقطه نظر شاخص‌های ارزیابی حسگری برای ضخامت‌های مختلف آلومینیوم و ضرایب شکست آنالیت برابر با ۱/۳۳ و ۱/۳۳۵ مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتایج حاصل در شکل ۲ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۲، نتایج بدست آمده نشان از برتری حساسیت و عدد شایستگی منشور MgF₂ دارد ولی علی‌رغم این برتری‌ها و با در نظر گرفتن R_{min} و نیز به دلیل محدودیت در رنج تشخیص در جارب زوایه تابش نور فرودی

$$r_p = \frac{(M_{11} + M_{12}q_N)q_1 - (M_{21} + M_{22}q_N)}{(M_{11} + M_{12}q_N)q_1 + (M_{21} + M_{22}q_N)} \quad (۴)$$

$$R_p = |r_p|^2 \quad (۵)$$

پارامترهای زیادی برای ارزیابی عملکرد سنسورهای نوری SPR و کیفیت تشخیص آنها وجود دارد. یکی از عوامل اصلی، حساسیت (S) است که نسبت تغییرات زاویه تشدید به تغییر در ضریب شکست آنالیت با واحد deg/RIU است. حساسیت به صورت رابطه (۶) توصیف می‌شود و هرچه حساسیت بالاتر باشد، تغییر زاویه تشدید بزرگتر خواهد بود که تشخیص دقیق را حتی در تغییرات ضریب شکست کمتر فراهم می‌کند.

$$S = \Delta \theta_{SPR} / \Delta RI_{analyte} \quad (۶)$$

پهنای باند در نصف بیشینه دامنه (FWHM)، که تیزی منحنی تشدید را در منحنی بازتاب مشخص می‌کند، پارامتر مهم دیگر در ارزیابی حسگر است. هرچه FWHM کمتر باشد، منحنی تیزتر است که دقت تشخیص را تسهیل می‌کند. پارامتر دیگر، معیار شایستگی (FOM) است که نسبت حساسیت به FWHM بوده و به صورت رابطه (۷) و با واحد RIU⁻¹ ارائه می‌شود. FOM بالاتر عملکرد کارآمد سنسور را نشان می‌دهد.

$$FOM = S / FWHM \quad (۷)$$

۳- ساختار پیشنهادی

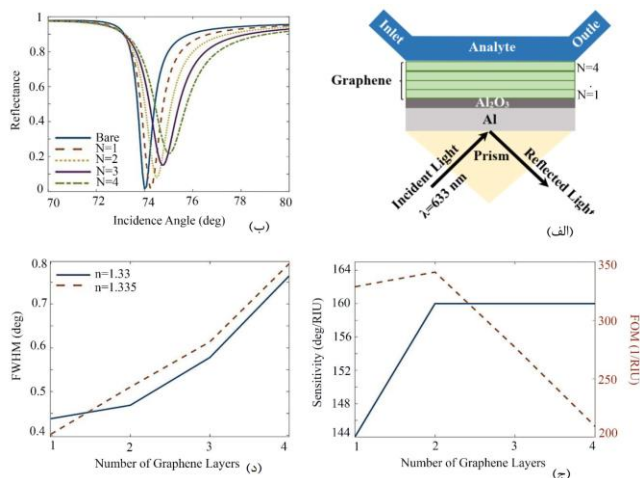
در این مقاله، ابتدا یک ساختار کرچمن مرسوم با فلز آلومینیوم برای طول موج مرئی ۶۳۳ نانومتر مورد مطالعه قرار گرفته و تاثیر تغییر ضخامت لایه فلزی و نوع منشور بر روی مشخصات حسگر، مورد بررسی قرار می‌گیرد. یک انتخاب بهینه برای ضخامت فلز وجود دارد که در آن حداکثر انتقال انرژی فوتون‌های تابشی به پلاسمون‌های سطحی صورت می‌گیرد. همچنین، عملکرد انواع منشورها برای انتخاب منشور پایه با هدف دستیابی به یک حسگر مناسب مورد مطالعه قرار گرفته و با علم به تاثیر ضخامت، تعداد لایه‌ها و همچنین نوع و ترتیب چینش لایه‌های فلزی و مواد دو بعدی، یک طرح منطقی برای ساختار پیشنهادی ارائه می‌شود.

ابتدا، ساختار کرچمن برای تعیین نوع منشور متشکل از لایه اول منشور، لایه دوم فلز آلومینیوم، لایه سوم اکسید آلومینیوم به ضخامت ۳ نانومتر و لایه چهارم آنالیت به عنوان ساختار پایه یک حسگر زیستی در نظر گرفته شده است. تغییرات ضریب شکست در محدوده ۱/۳۲ تا ۱/۳۵۵ جهت بررسی ساختار نهایی در نظر گرفته شده است. هرچند، بهترین بازه برای بهینه‌سازی مشخصات حسگر بازه ۱/۳۳ الی ۱/۳۳۵ با گام‌های ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شده است. قدم اول در این مطالعه، انتخاب منشور به عنوان یکی از مهم‌ترین اجزاء ساختار کرچمن است که باعث جمع‌آوری نور و متمرکز شدن آن و همچنین افزایش بردار موج نور فرودی می‌شود، بطوریکه که با بردار موج پلاسمون‌های سطح فلز مطابقت داشته و شرط تحریک برقرار شود. از این رو ساختار با لایه آلومینیوم به ضخامت‌های ۳۰، ۴۰ و ۵۰ نانومتر به‌زای منشورهای BK₇، MgF₂، CaF₂، ZBLAN، SiO₂ مورد استفاده قرار گرفته بودند به تفکیک شبیه‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفتند. منحنی‌های بازتاب برحسب زاویه تشدید به‌زای منشورهای مختلف برای ساختار مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. یک فاکتور مهم در بهینه‌سازی، انتخاب ساختاری است که منجر به کمترین R_{min} گردد، از اینرو عملکرد مناسب از نظر حداقل بازتاب با توجه به شکل ۱، در ضخامت ۴۰ نانومتر آلومینیوم محقق شده است.

نتایج نشان داده شده در شکل ۱، به صورت خلاصه در جدول ۱ آمده است.

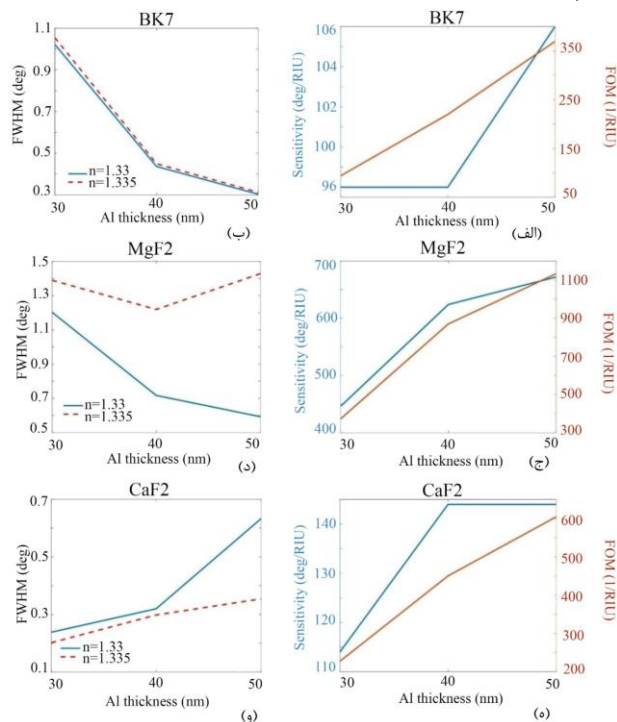
همانطور که اشاره شد، ابتدا مطالعه و شبیه‌سازی ساختار مرسوم کرچمن برای بدست آوردن نتایج حداقل بازتاب مورد مطالعه گرفته است. در این گام، با قرار دادن گرافن تک لایه تا چهار لایه روی ساختار (حرف N نشانگر تعداد لایه‌های مواد دو بعدی در ساختار است) و همچنین در گام بعدی، ضمن بررسی و مطالعه رفتار تک تک مواد دو بعدی منتخب در ساختار پایه، به بررسی مشخصه‌های حسگری پرداخته می‌شود. برای مقایسه نتایج، معیارهای چهارگانه (FOM، R_{min} ، S، FWHM) در انتخاب تعداد لایه مناسب گرافن و نوع و تعداد لایه مناسب مواد دو بعدی دیگر (WS_2 ، $MoSe_2$ ، MoS_2 ، BP ، WSe_2) بررسی خواهند شد. در گام دوم، گرافن با ضریب شکست $i + 2.1/3.4558$ در طول موج کاری 633 nm و ضخامت تک لایه 0.34 نانومتر در نظر گرفته شده است. لایه گرافن بین دی اکسید آلومینیوم و آنالیت به تناوب اضافه شده و شکل ۳، نتایج حاصل از این بررسی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۳، تعداد دو لایه به عنوان حالت بهینه برای تعداد لایه‌های گرافن در نظر گرفته شده است چراکه حساسیت به‌زای تعداد لایه‌های بیشتر مقدار ثابتی دارد و FOM در حالت بیشینه است. به علاوه مقدار FWHM نیز قابل قبول است. در ادامه، به بررسی اثر افزودن لایه‌های مختلف مواد دو بعدی و فلزات انتقالی دی‌کالکونید به ساختار پایه، ابتدا بدون حضور گرافن پرداخته می‌شود و سپس دو لایه گرافن بهینه به ساختار اضافه شده و مجدداً عملکرد حسگر در حضور مواد دو بعدی فلزات انتقالی دی‌کالکونید مورد بررسی قرار می‌گیرد. تعداد لایه‌های مواد دو بعدی تا حدی که رفتار مناسبی از حسگر مشاهده شود، افزایش داشته است.

ابتدا، فسفرسیاه به ضخامت 0.53 نانومتر و ضریب شکست $i + 5.0/3$ و تا تعداد ۱۰ لایه به ساختار پایه بر روی لایه دی‌اکسید آلومینیوم اضافه شده و پارامترهای مهم حسگری بررسی شده است که نتایج حاصل در شکل ۴، نشان داده شده است. طبق شکل ۴، با افزایش تعداد لایه‌های BP حداقل بازتاب، کاهشی و در تمامی لایه‌ها مقدار آن مطلوب است. همچنین، حساسیت هم به طور رضایت بخشی با افزایش تعداد لایه‌ها افزایشی است. اگرچه FWHM روندی افزایشی به‌زای افزایش تعداد لایه‌های فسفر سیاه را دارد ولی همچنان مقدار مناسبی داشته و محدوده آن کمتر از یک است. به‌علاوه، FOM با افزایش تعداد لایه‌ها روند کاهشی دارد. هرچند در این مقاله، بهبود برآیند شاخص‌ها مطرح است و حتی در تعداد لایه ۱۰ هم، مقدار FOM در محدوده قابل قبولی قرار دارد.



شکل ۳- (الف) شماتیک ساختار حسگر با ۴ لایه گرافن، (ب) حداقل بازتاب برای ۵ حالت (بدون گرافن و با ۴ لایه گرافن)، (ج) حساسیت و FOM برای تعداد لایه‌های مختلف گرافن، (د) FWHM به‌زای تعداد لایه‌های مختلف گرافن و ضرایب شکست آنالیت $1/3.35$ و $1/3.358$.

(وقوع تشدید در انتهای بازه زوایه)، از این مرحله به بعد، منشور MgF_2 از دایره انتخاب، حذف شد.



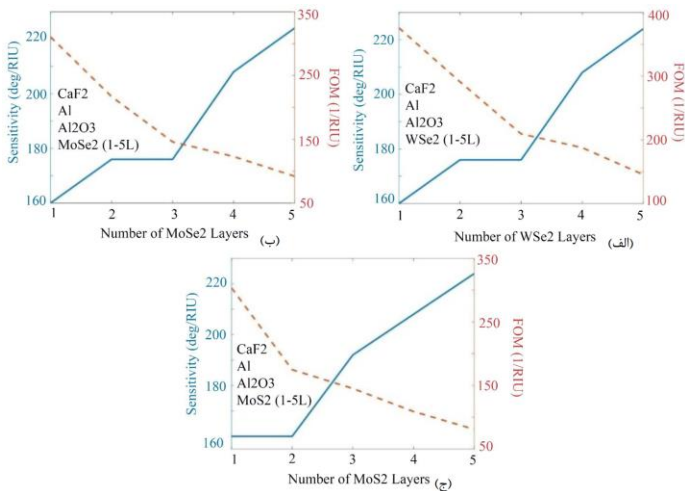
شکل ۲- حساسیت، FWHM و ساختار برای منشورهای به ترتیب (الف، ب) BK_7 ، (ج، د) MgF_2 و (ه، و) CaF_2 .

همچنین، منشور BK_7 بدلیل داشتن حساسیت و معیار شایستگی پایین و FWHM بالا در مقایسه با منشور CaF_2 حذف گردید و در ادامه منشور CaF_2 با ضخامت آلومینیوم 40 nm برای بررسی بیشتر ساختار انتخاب شده است. جزئیات نتایج بدست آمده از بررسی ساختار با سه نوع منشور BK_7 ، MgF_2 و CaF_2 به‌زای ضخامت آلومینیوم 40 nm و ضرایب شکست $1/3.35$ و $1/3.358$ در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- نتایج کلی شبیه‌سازی شده ساختار با ۳ نوع منشور، $d_{Al} = 40 \text{ nm}$ ، $d_{Al_2O_3} = 3 \text{ nm}$ و آنالیت با ضرایب شکست $1/3.35$ و $1/3.358$.

ساختار	حساسیت (Deg/RIU)	FOM
BK_7 -Al- Al_2O_3	۹۶	۲۲۰
CaF_2 -Al- Al_2O_3	۱۴۴	۴۵۰
MgF_2 -Al- Al_2O_3	۶۲۴	۸۷۰

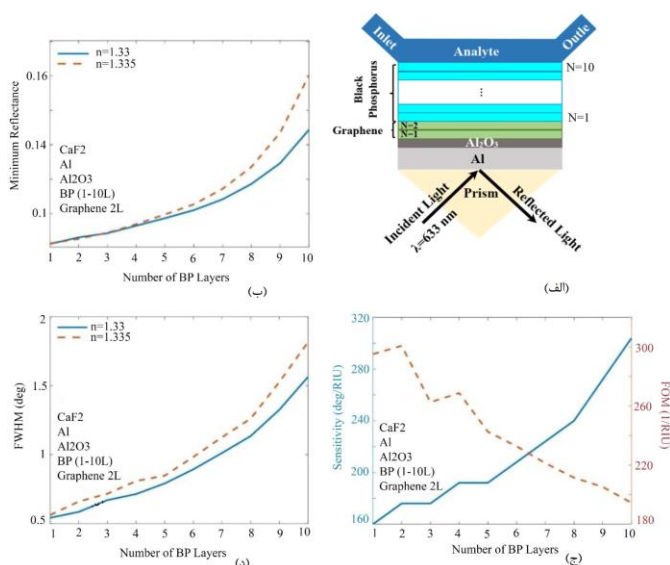
پس از انتخاب ساختار اولیه (CaF_2 -Al- Al_2O_3)، در ادامه سعی شده است تا بهبود کلی در پارامترهای ارزیابی حسگر از جمله حساسیت، FOM، R_{min} و حضور مواد دو بعدی مانند فلزات انتقالی دی‌کالکونید به عنوان مثال WS_2 ، $MoSe_2$ ، WS_2 ، MoS_2 ، فسفر سیاه (BP) و گرافن صورت پذیرد. اگرچه تحت بعضی شرایط، بهبود همزمان شاخص‌ها ممکن نیست ولی سعی در بهبود نسبی حسگر صورت پذیرفته است. نسبت سطح به حجم بالای این مواد دو بعدی، به بهبود حساسیت، فاکتور کیفیت و دقت تشخیص سنسورهای SPR کمک می‌کند [۲۹]. همچنین، این مواد می‌توانند در برابر اکسیداسیون فلز مقاومت کنند. در این مرحله، افزودن یک لایه نانومواد دو بعدی می‌تواند میدان الکتریکی را در سطح مشترک افزایش داده و به دلیل تحرک بالای حامل‌ها، انتقال بارها بین فلز پلاسمونیک و مولکول‌های محلول مورد بررسی را تسریع کند و در نتیجه حساسیت سنسورهای پلاسمونی را بهبود بخشد.



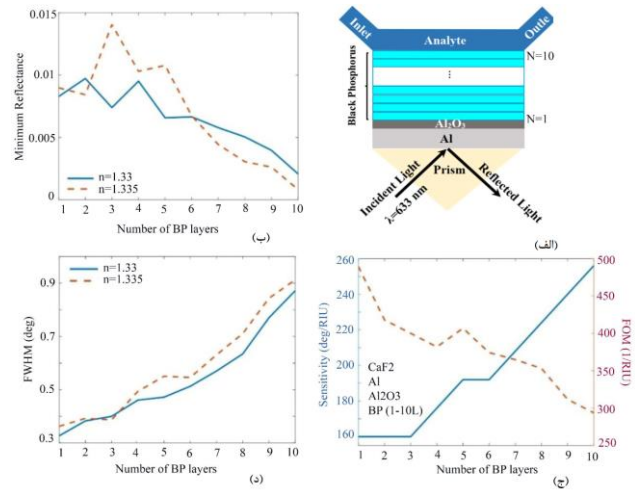
شکل ۶- حساسیت و FOM ساختار پایه با ۵ لایه (الف) WS_2 ، (ب) $MoSe_2$ و (ج) $MoSe_2$ و (د) WS_2 .

با توجه به نتیجه شکل ۳، دو لایه گرافن در ساختار در نظر گرفته شده و نسبت به بررسی رفتار مواد BP ، WS_2 ، WS_2 ، $MoSe_2$ و $MoSe_2$ در حسگر پیشنهادی پرداخته می‌شود. ابتدا طبق شکل ۷، ساختار مورد نظر برای ۱۰ لایه BP مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، نتایج حاصل از لایه‌گذاری مواد دوبعدی WS_2 ، $MoSe_2$ و $MoSe_2$ ، در حضور دو لایه گرافن به‌ازای ۵ لایه، در جدول ۳، خلاصه شده است.

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۷ و جدول ۳، می‌توان دریافت که اگرچه حساسیت 304 deg/RIU در تعداد لایه ۵، برای WS_2 بدست آمده ولی با توجه به عدد پایین FOM آن در مقایسه با ساختار حسگری مبتنی بر BP ده لایه، ساختار بهینه همان ساختار پایه با دو لایه گرافن و ۱۰ لایه فسفر سیاه است که به عنوان ساختار نهایی انتخاب می‌شود. معیارهای ارزیابی برای ساختار بهینه نهایی به‌ازای تغییرات 0.005 در ضریب شکست مرجع ($n=1/33$) به صورت $S=304$ ، $R_{min}=0.146$ ، $FOM=194/463 \text{ RIU}^{-1}$ ، $FWHM=1/5632 \text{ deg}$ ، $\%RIU$ است.



شکل ۷- ساختار با گرافن و BP (الف) شماتیک ساختار با گرافن و BP ، (ب) R_{min} ، (ج) S و FOM ، (د) $FWHM$ به‌ازای تعداد لایه‌های مختلف BP .



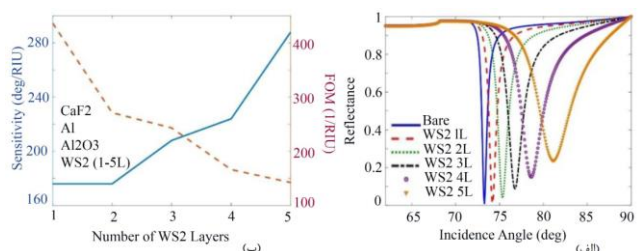
شکل ۸- (الف) شماتیک ساختار پایه با ۱۰ لایه BP ، (ب) حداقل بازتاب، (ج) حساسیت و FOM و (د) $FWHM$ به‌ازای تعداد لایه‌های BP .

در ادامه، به بررسی تاثیر افزودن دی‌سولفید تنگستن (WS_2) با ضخامت 0.8 نانومتر و ضریب شکست $4.0 + 8.937i/3123i$ بر روی لایه‌ی اکسید آلومینیوم در ساختار پایه پرداخته می‌شود. تعداد لایه‌های WS_2 تا ۵ لایه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل در شکل ۵ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۵، حساسیت با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابد و حداقل بازتاب FOM در مقایسه با نتایج مواد دو بعدی دیگر در مراحل بعدی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا ساختار نهایی بهینه، معرفی گردد. در ادامه، لایه‌های WS_2 ، $MoSe_2$ و $MoSe_2$ به ساختار پایه اضافه شده است. این شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن حداکثر ۵ لایه برای WS_2 ، $MoSe_2$ و $MoSe_2$ به ترتیب با ضرایب شکست و ضخامت‌های تک لایه ($d=0.7 \text{ nm}$ و $n=4.0 + 8.937i/3123i$)، ($d=0.7 \text{ nm}$ و $n=5.1 + 8.05i/1724i$) و ($d=0.7 \text{ nm}$ و $n=4.1 + 6.226i/0.62i$) انجام شده و نتایج حاصل در شکل ۶ نشان داده شده است.

طبق نتایج بدست آمده از بررسی چهار ماده WS_2 ، WS_2 ، $MoSe_2$ و $MoSe_2$ ، شرایط تقریباً یکسانی در رفتار و عملکرد ساختار بدست آمده است. افزایش و بهبود حساسیت و FOM با افزایش تعداد لایه‌ها در هر ۴ ساختار با روند مشابهی رقم خورده است و همچنین بعد از لایه پنجم، شرایط یا روند ثابت یا اکثراً روند نزولی پیدا کرده است. در مورد ماده WS_2 ، حساسیت بالاتری نسبت به بقیه موارد در لایه پنجم بدست آمده است که بعد از ماده BP انتخاب مناسبی جهت ادامه فرآیند بهینه‌سازی به نظر می‌رسد.

در گام بعد، تاثیر افزودن مواد دو بعدی مطالعه شده در حضور لایه جاذب گرافن مورد بررسی قرار می‌گیرد. طبق مراجع [۲۶-۲۸]، افزودن تعدادی لایه گرافن به حسگرهای SPR، حساسیت آن را افزایش می‌دهد و حساسیت بهبود یافته، ناشی از افزایش جذب مولکول‌های زیستی در لایه گرافن است.



شکل ۹- (الف) حداقل بازتاب ساختار پایه با ۵ لایه WS_2 ، (ب) حساسیت و FOM .

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، در راستای فرآیند بهینه‌سازی حسگر پیشنهادی با استفاده از فلز آلومینیوم به عنوان فلز پایه به جهت صرفه اقتصادی حسگر، از مواد دو بعدی فلزات واسطه کالکونژید، گرافن و فسفر سیاه برای بهینه‌سازی ساختار استفاده شد. به خاطر نسبت سطح به حجم بالای این مواد و در جهت بهبود حساسیت حسگر SPR پیشنهادی، ساختار با ترکیب deg/RIU به عنوان ساختار نهایی بهینه با deg/RIU $S=30.4$ ، عدد شایستگی $\text{FOM}=194/463$ ، حداقل بازتاب $R_{\min}=0.14$ و پهنای باند $\text{FWHM}=1/56$ معرفی شده است.

مراجع

- [1] J. Homola, "Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species", Chemical reviews, vol. 108, no. 2, pp. 462-493, 2008.
- [2] E. Ozbay, "Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions", science, vol. 311, no. 5758, pp. 189-193, 2006.
- [3] A. Srivastava, and Y. K. Prajapati, "Performance analysis of silicon and blue phosphorene/MoS2 hetero-structure based SPR sensor", Photonic Sensors, vol. 9, pp. 284-292, 2019.
- [4] S. E. H. Yousuf, M. A. Sakib, and M. Z. Islam, "A high-performance plasmonic nanosensor based on an elliptical nanorod in an MIM configuration", IEEE Sensors Journal, vol. 18, no.15, pp. 6145-6153, 2018.
- [5] P. Sarika, N. Pal, Y. K. Prajapati, and J. P. Saini, "Performance evaluation of SPR biosensor using metamaterial over conventional SPR and graphene based SPR biosensor", In 2018 5th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), pp. 696-701. IEEE, 2018.
- [6] J. Homola, S. Y. Sinclair, and G. Günter, "Surface plasmon resonance sensors", Sensors and actuators B: Chemical, vol. 54, no.1-2, pp. 3-15, 1999.
- [7] S.A. Zynio, V. S. Anton, R. S. Elena, M. M. Vladimir, and M. S. Yuri, "Bimetallic layers increase sensitivity of affinity sensors based on surface plasmon resonance", Sensors, vol. 2, no. 2 pp. 62-70, 2002.
- [8] F. C. Chien, and S. J. Chen, "A sensitivity comparison of optical biosensors based on four different surface plasmon resonance modes", Biosensors and bioelectronics, vol. 20, no.3, pp. 633-642, 2004.
- [9] J. Dostálek, K. Amal, and K. Wolfgang, "Long range surface plasmons for observation of biomolecular binding events at metallic surfaces", Plasmonics, vol. 2, pp. 97-106, 2007.
- [10] G. G. Nenninger, P. Tobiška, J. Homola, and S. S. Yee, "Long-range surface plasmons for high-resolution surface plasmon resonance sensors", Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 74, no. 1-3, pp. 145-151, 2001.
- [11] B. H. Ong, Y. Xiaocong, C. T. Swee, Z. Jingwen, and M. N. Hui, "Optimised film thickness for maximum evanescent field enhancement of a bimetallic film surface plasmon resonance biosensor", Sensors and Actuators B: Chemical, vol.114, no. 2, pp. 1028-1034, 2006.
- [12] J. Chen, Z. Qian, P. Cheng, T. Chaojun, S. Xueyang, D. Licheng, and P. Gun-Sik, "Optical cavity-enhanced localized surface plasmon resonance for high-quality sensing", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 30, no. 8, pp. 728-731, 2018.
- [13] D. Melo, A. Aprígio, T. B. D. Silva, M. F. D. S. Santiago, C. D. S. Moreira, and R. M. S. Cruz, "Theoretical analysis of sensitivity enhancement by graphene usage in optical fiber surface plasmon resonance sensors", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 68, no. 5, pp. 1554-1560, 2018.
- [14] Shivangani, M. F. Alotaibi, Y. Al-Hadeethi, P.Lohia, S. Singh, D. K. Dwivedi, A. Umar, H. M. Alzayed, H. Algadi, and S. Baskoutas, "Numerical study to enhance the sensitivity of a surface plasmon resonance sensor with BlueP/WS2-covered Al2O3-nickel nanofilms", Nanomaterials, vol. 12, no. 13, p.2205, 2022.
- [15] S. Sachin, P. K. Singh, A. Umar, P. Lohia, H. Albargi, L. Castañeda, and D. K. Dwivedi, "2D nanomaterial-based surface plasmon

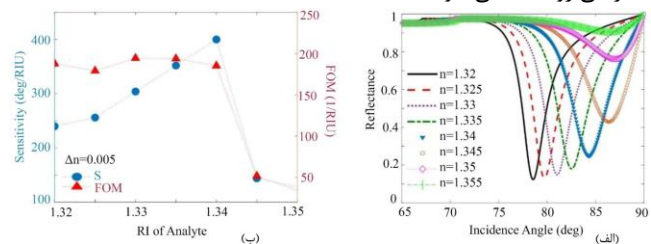
جدول ۳- نتایج ساختار با دولایه گرافن و انواع مواد دوبعدی و تعداد لایه‌های مختلف. واحد حساسیت و FOM به ترتیب برابر با deg/RIU و RIU^{-1} است.

لایه‌های MX_2		۱	۲	۳	۴	۵
WS_2	S	۱۷۶	۱۹۲	۲۰۸	۲۶۵	۳۰۴
	FOM	۲۵۷/۸۴	۲۱۲/۸۷	۱۵۸/۱۸	۱۳۷/۶۲	۱۰۴/۷۴
WSe_2	S	۱۷۶	۱۷۶	۱۹۲	۲۰۸	۲۴۰
	FOM	۲۷۸/۳۹	۲۰۲/۲۶	۱۶۵/۲۶	۱۳۲/۶۳	۱۱۱/۷۵
MoS_2	S	۱۶۰	۱۷۶	۱۹۲	۲۲۴	۲۲۴
	FOM	۱۹۶/۷۴	۱۴۸/۵	۱۱۰/۳۷	۹۳/۶۵	۶۶/۶۲
MoSe_2	S	۱۶۰	۱۷۶	۱۹۲	۲۰۸	۲۴۰
	FOM	۱۹۹/۲۱	۱۶۲/۵۷	۱۲۴/۶	۹۵/۵	۷۹/۵۸

در نهایت، عملکرد ساختار بهینه پیشنهادی به‌ازای تغییرات ضریب شکست آنالیت در بازه $1/32$ تا $1/355$ با گام تغییر 0.005 مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتایج آن در شکل ۸، نشان داده شده است.

همچنین، پروفایل میدان نیز در لایه‌های مختلف حسگر نهایی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در شکل ۹، نشان داده شده است. در حسگر SPR، عمق نفوذ فاکتور مهمی است که به صورت چگونگی نفوذ نور یا هر تشعشع الکترومغناطیسی به عمق ماده تعریف می‌شود. در لایه آخر شدت میدان الکتریکی به دلیل وجود ماده دو بعدی فسفر سیاه و گرافن افزایش می‌یابد. در این مرحله، پلاسمون‌های سطحی بیشتری تولید می‌شوند. همچنین با توجه به شکل ۹، عمق نفوذ سنسور پیشنهادی در حدود 50 تا 100 نانومتر است. با توجه به این مورد، پرتو نور تابشی بیشتری توسط ساختار جذب می‌شود که تعداد SPها را افزایش می‌دهد و بازتاب به حداقل مقدار کاهش یافته و بیشترین عمق نفوذ به دست می‌آید.

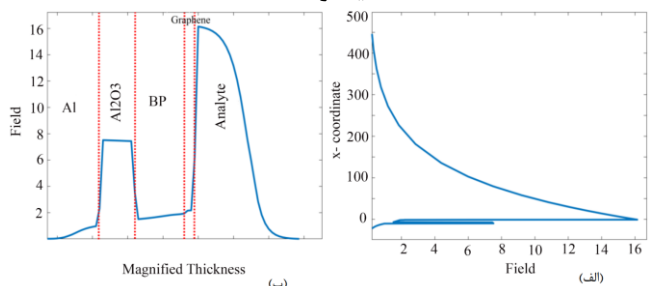
شدت میدان در مرز لایه گرافن و محیط حسگری حداکثر بوده و پس پلاسمون‌های سطحی تولید شده قدرت خود را به دلیل واپاشی این میدان الکتریکی در لایه محیط حسگری به صورت تصاعدی از دست می‌دهند و میدان الکتریکی روند کاهشی خواهد داشت [۳۸].



شکل ۸- بررسی عملکرد ساختار نهایی به‌ازای تغییرات ضریب

شکست آنالیت $1/33 - 1/355$ ، n_i (الف) حداقل بازتاب به همراه (ب)

حساسیت و FOM



شکل ۹- (الف) پروفایل میدان ساختار و (ب) پروفایل شدت میدان در

لایه های مختلف ساختار پیشنهادی.

- detection of specific biological samples", *Optical and Quantum Electronics*, vol. 54, no.10, p. 612, 2022.
- [29] H. Xu, W. Leiming, D. Xiaoyu, G. Yanxia, and X. Yuanjiang, "An ultra-high sensitivity surface plasmon resonance sensor based on graphene-aluminum-graphene sandwich-like structure", *Journal of Applied Physics*, vol. 120, no. 5, 2016.
- [30] Q. Ouyang, S. Zeng, L. Jiang, L. Hong, G. Xu, X. Q. Dinh, J. Qian, S. He, J. Qu, P. Coquet, and K. T. Yong, "Sensitivity enhancement of transition metal dichalcogenides/silicon nanostructure-based surface plasmon resonance biosensor", *Scientific reports*, vol. 6, no. 1 p. 28190, 2016.
- [31] A. K. Mishra, and K. M. Satyendra, "Gas sensing in Kretschmann configuration utilizing bi-metallic layer of Rhodium-Silver in visible region", *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 237, pp. 969-973, 2016.
- [32] M. Wang, H. Yanyan, J. Shouzen, Z. Chao, Y. Cheng, N. Tingyin, L. Xiaoyun, L. Chonghui, Z. Wenyuan, and M. Baoyuan, "Theoretical design of a surface plasmon resonance sensor with high sensitivity and high resolution based on graphene-WS 2 hybrid nanostructures and Au-Ag bimetallic film", *RSC advances*, vol. 7, no. 75, pp. 47177-47182, 2017.
- [33] X. Zhao, H. Tianye, S. P. Perry, W. Xu, H. Pan, P. Jianxing, W. Yiheng, and C. Zhuo, "Sensitivity enhancement in surface plasmon resonance biochemical sensor based on transition metal dichalcogenides/graphene heterostructure", *Sensors*, vol.18, no. 7, p. 2056, 2018.
- [۳۴] ک. کهیایی، ع. پورمند، ف. عباسی، "تراشه ریزسیالاتی برای اندازه‌گیری گلوکز با استفاده از تشخیص نوری با روش مادون قرمز نزدیک"، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۵۴، بهار ۱۴۰۳، صفحات ۶۷-۷۱.
- [۳۵] ا. امینی، س. محمودی، "اندازه‌گیری میزان جذب نور با آنالیزکننده جذبی به روش نوری چند طول‌موجی"، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۵۰، ۱۳۹۹، صفحات ۵۵۵-۵۶۳.
- [36] S. Pal, A. Verma, J. P. Saini, and Y. K. Prajapati, "Sensitivity enhancement using silicon-black phosphorus-TDMC coated surface plasmon resonance biosensor", *Iet Optoelectronics*, vol. 13, no. 4, pp. 196-201, 2019.
- [37] J. B. Maurya, Y. K. Prajapati, V. Singh, J. P. Saini, and R. Tripathi, "Performance of graphene-MoS 2 based surface plasmon resonance sensor using silicon layer", *Optical and Quantum Electronics*, vol. 47, pp. 3599-3611, 2015.
- [38] B. Karki, J. Ankit, P. Amrindra, and V. Srivastava, "Sensitivity enhancement of refractive index-based surface plasmon resonance sensor for glucose detection," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 54, no. 9, pp. 595, 2022.
- resonance sensors for biosensing applications", *Micromachines*, vol. 11, no. 8, p.779, 2020..
- [16] A. Umar, H. Mazharul, G. A. Shafeeqe, H. K. Seo, A. I. Ahmed, M. A. Alhamami, H. Algadi, and Z. A. Ansari, "Label-free myoglobin biosensor based on pure and copper-doped titanium dioxide nanomaterials", *Biosensors*, vol. 12, no. 12 , p.1151, 2022.
- [17] W. M. Mullett, P. L. Edward, and M. Y. Jupiter, "Surface plasmon resonance-based immunoassays", *Methods*, vol. 22, no.1, pp.77-91, 2000.
- [18] Homola, Jiří. "Present and future of surface plasmon resonance biosensors." *Analytical and bioanalytical chemistry*, vol. 377, pp. 528-539, 2003.
- [19] R. C. Jorgenson, and S. Y. Sinclair, "A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance", *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 12, no. 3, pp. 213-220, 1993.
- [20] G. Dyankov, Z. Mohssin, E. H. Saidi, and M. Bousmina, "Long-range surface plasmon supported by asymmetric bimetallic structure", *Plasmonics*, vol. 7, no. 3, 479-485, 2012.
- [21] J. Rajan, and A. K. Sharma, "Chalcogenide glass prism based SPR sensor with Ag-Au bimetallic nanoparticle alloy in infrared wavelength region", *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, vol. 11, no.4, p. 045502, 2009.
- [22] G. Dyankov, M. Zekriti, and M. Bousmina, "Dual-mode surface-plasmon sensor based on bimetallic film", *Applied Optics*, vol. 51, no.13, pp. 2451-2456, 2012.
- [23] S. Singh, S. Pandey, S. Yadav, R. K. Yadav, P. K. Singh, P. Lohia, and D. K. Dwivedi, "Numerical study among Au, Al, and Ag metal-based surface plasmon resonance sensor", *Journal of Optics*, pp. 1-11, 2023.
- [24] P. Narendra, S. Pal, Y. K. Prajapati, and J. P. Saini, "A Comparative Performance Analysis of SPR Biosensor Using Metamaterial and Different Metal Oxides", In *Advances in VLSI, Communication, and Signal Processing: Select Proceedings of VCAS 2021*, pp. 11-23. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022.
- [25] K. Bhishma, A. Uniyal, P. Sarkar, A. Pal, and R. B. Yadav, "Sensitivity improvement of surface plasmon resonance sensor for glucose detection in urine samples using heterogeneous layers: an analytical perspective", *Journal of Optics*, pp.1-11, 2023.
- [26] M. Shahriar, A. K. Paul, and K. Chakrabarti, "Detection of hemoglobin in blood and urine glucose level samples using a graphene-coated SPR based biosensor", *OSA Continuum*, vol. 4, no.8, pp. 2164-2176, 2021.
- [27] F. B. Edin, Y. W. Fen, N. A. Omar, J. Y. Liew, W. M. Daniyal, "Femtomolar detection of dopamine using surface plasmon resonance sensor based on chitosan/graphene quantum dots thin film", *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 263, p. 120202, 2021.
- [28] Y. Vasmilla, and H. S. Pradhan, "Modeling of a novel SCHOTT B270 prism based SPR sensor using Ag-Si-BP/MXene structure for