Nanomeghyas
www.nanomeghyas.ir
نانومقیاس

Original Article

Bloch Surface Waves in a One-Dimensional Photonic Crystal as Doping Agent Sensor: Furosemide

Arash Shirshahi , Danial Cheraghian, Fateme Negahdari, Seyedeh Mehri Hamidi *

Magneto-Plasmonic Laboratory, Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 2025-07-29 Revised: 2025-09-15 Accepted: 2025-11-06

Abstract: Application of Bloch Surface Waves (BSWs) for detection of Furosemide using nanostructure Photonic crystals has been introduced in this paper. BSWs, as an electromagnetic phenomenon in periodic dielectric structures, were employed to detect various concentrations of the drug furosemide in distilled water. 24 layers photonic crystal composed of alternating ZrO_2 and SiO_2 layers was fabricated as a dielectric sensing medium, allowing the evanescent field generated at the terminal surface to interact with furosemide molecules. To excite the BSWs, the Kretschmann-Raether configuration was used, incorporating a 635 nm red laser source and a semi-cylindrical BK7 prism. A precise volume of 20 µL of furosemide solution at concentrations of 1, 1.5, 2, and 3.5 mM was deposited onto the surface of the photonic crystal. The reflectance of TM-polarized light was recorded within the angular range of 40° to 70°. Experimental results showed that the resonance angle shifted significantly with increasing furosemide concentration, specifically, the resonance angle changed from 51.941° in pure water to 52.245° at 1 mM, 52.549° at 2 mM, and 52.853° at 3.5 mM. The system demonstrated an approximately linear sensitivity to concentration changes within this range. These results highlight the potential of BSW-based photonic crystal sensors for the detection of doping-related drugs such as furosemide in clinical and sports medicine applications.

Keywords: BSW; Kretschmann; Photonic Crystals; nanostructure; Furosemide

*Corresponding Author. Email: *m_hamidi@sbu.ac.ir*

How to Cite This Article:

Shirshahi A, Cheraghian D, Negahdari F, Mehri S. Bloch Surface Waves in a One-Dimensional Photonic Crystal as Doping Agent Sensor: Furosemide. Nanomeghyas. 2025; 12(2): 148-154. DOI: 10.22034/ns.2025.2067330.1401

©2025 The Author(s). Published by the Iranian Nanotechnology Society under the terms of the CC BY 4.0, Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this license, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0

نانومقیاس
Nanomeghyas
www.nanomeghyas.ir

مقاله پژوهشی

امواج سطحی بلاخ در نانوساختار بلور فوتونی یک بعدی به عنوان حسگر دوپینگ: فوروزماید

آرش شیرشاهی، دانیال چراغیان، فاطمه نگهداری، سیده مهری حمیدی*

آزمایشگاه مگنتوپلاسمونیک، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت : ۱۴۰۴/۰۵/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴ تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۸/۱۵

چکیده: امواج سطحی بلاخ، در نانوساختارهای بلور فوتونی برای شناسایی غلظت‌های مختلفی از داروی دوپینگ فوروزماید در آب مقطر مورد استفاده قرار گرفت. ساختار بلور فوتونی یک بعدی تمام دی الکتریک مشتمل بر 24 لایه از ZrO_2 و SiO_2 به‌عنوان محیط حساس با روش باریکه الکترونی ساخته شد تا میدان میرا ایجاد شده در سطح پایانی با مولکول‌های فوروزماید برهم‌کنش داشته باشد. برای تحریک امواج سطحی بلاخ، پیکربندی کرشمن-ریدر (Kretschmann-Raether) با منبع نور قرمز به طول موج ۶۳۵ نانومتر و در بازه زاویه ای 40 تا 70 درجه برپا شده است. مقدار دقیقی از محلول ۲۰ میکرولیتر فوروزماید در غلظت‌های ۱، ۱/۵، ۲ و ۳/۵ میلی‌مولار روی سطح بلور فوتونی قرار گرفت. تغییر زاویه تشدید به ازای غلظت های مختلف فوروزماید به ازای مدولاسیون زاویه ای، نشان دهنده تغییرات خطی نانوساختار بلور فوتونی به ازای غلظت های مختلف فوروزماید به عنوان ماده دوپینگ است که می تواند کمک کننده در کاربردهای بالینی و پزشکی ورزشی است.

واژگان کلیدی: امواج سطحی، بلاخ، فوروزماید،BSW ، دوپینگ

* نویسنده مسئول. ایمیل: m_hamidi@sbu.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله:
شیرشاهی آرش، چراغیان دانیال، نگهداری فاطمه، حمیدی سیده مهری. امواج سطحی بلاخ در نانوساختار بلور فوتونی یک بعدی به عنوان حسگر دوپینگ: فوروزماید. *نانو مقیاس*، ۲۰۲۵، ۱۲(۲)، ۱۵۴-۱۴۸.
DOI: 10.22034/ns.2025.2067330.1401

این مقاله تحت مجوز دسترسی آزاد CC-BY منتشر شده است. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

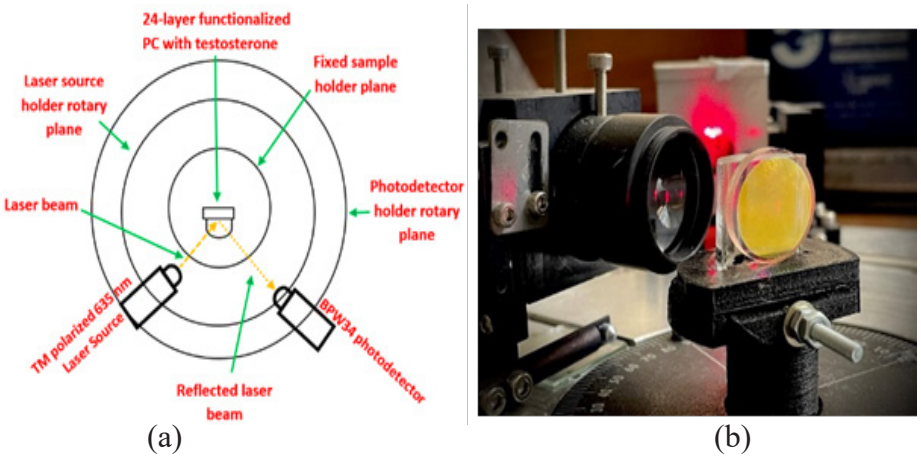
۱- مقدمه

فوروزمایـد یـک داروی ادرار آور قـوی و پرکاربـرد در درمـان بیماری‌هـای مختلـف از جملـه نارسـایی قلبـی، بیماری‌هـای کبـدی و سـندرم نفروتیـک اسـت. ایـن دارو بـا مهـار بازجـذب سـدیم و کلریـد در کلیه‌هـا عمـل کـرده و باعـث افزایـش دفـع ادرار و تخلیـه سـریع مایعـات از بـدن می‌شـود. بـا توجـه بـه اثـرات سـریع آن، فوروزمایـد اغلـب در شـرایط بحرانـی بـرای کنتـرل تعـادل الکترولیتـی تجویـز می‌شـود. بـا ایـن حـال، فراتـر از کاربردهـای درمانـی، فوروزمایـد در زمینـه ورزش رقابتـی نیـز به‌طـور غیرقانونـی اسـتفاده می‌شـود. ورزشـکاران ممکـن اسـت بـرای کاهـش سـریع وزن یـا پنهان‌سـازی مصـرف داروهـای ممنوعـه، از ایـن دارو اسـتفاده کننـد. ایـن موضـوع، تشـخیص فوروزمایـد در نمونه‌هـای زیسـتی را بـه یـک دغدغـه مهـم بـرای نهادهـای کنتـرل دوپینـگ تبدیـل کـرده اسـت. روش‌هـای رایـج بـرای سـنجش فوروزمایـد در پلاسـما یـا ادرار شـامل کروماتوگرافـی مایـع بـا عملکـرد بـالا(HPLC)، طیف‌سـنجی جرمـی (LC-MS/MS)و سـنجش ایمنـی آنزیمـی(ELISA) هسـتند[1,2]. بـا وجـود دقـت بـالا، ایـن روش‌هـا نیـاز بـه تجهیـزات گـران، حجـم نمونـه بـالا و زمـان طولانـی دارنـد و بـرای آزمایش‌هـای سـریع یـا قابل‌حمـل مناسـب نیسـتند. در سـال‌های اخیـر، حسـگرهای نـوری به‌عنـوان گزینـه‌ای سـریع، ارزان و قابل‌حمـل در تشـخیص داروهـا مطـرح شـده‌اند. از جملـه آن‌هـا، امـواج سـطحی بـلاخ (BSWs) به‌دلیـل حساسـیت بـالا و قابلیـت برهم‌کنـش میـدان میـرا بـا سـطح حسـگر، توجـه زیـادی را جلـب کرده‌انـد[3-5]. هـدف ایـن مطالعـه، اسـتفاده از حسـگر نانوفوتونـی مبتنـی بـر BSW بـرای تشـخیص غلظت‌هـای مختلـف فوروزمایـد در آب مقطـر و ارزیابـی عملکـرد نـوری آن در شـرایط واقعـی اسـت.

بـرای انجـام اندازه‌گیـری زاویـه‌ای دقیـق در فرآینـد تحریـک امـواج سـطحی بـلاخ، از یـک سـامانه مکانیکـی بـا دو بـازوی متحـرک همزمـان اسـتفاده شـده اسـت. ایـن دو بـازو کـه به‌طـور هماهنـگ حرکـت می‌کننـد، بـه گونـه‌ای طراحـی شـده‌اند کـه هـر دو در واحـد درجـه و بـا دقـت بسـیار بـالا کنتـرل می‌شـوند.

دقـت حرکـت ایـن بازوهـا برابـر بـا ۰/۰۱ درجـه در هـر گام اسـت کـه از نظـر اپتیکـی در سیسـتم‌های سـنجش زاویـه‌ای، دقـت بـالا و قابل‌قبـول محسـوب می‌شـود. ایـن دقـت باعـث افزایـش وضـوح در ثبـت موقعیـت تشـدید زاویـه‌ای BSW در پاسـخ بـه تغییـرات غلظـت نمونـه می‌شـود.

هـر دو بـازو به‌گونـه‌ای قـرار گرفته‌انـد کـه حـول مرکـز سیسـتم نـوری می‌چرخنـد. در ایـن نقطـه مرکـزی، یـک هولـدر اپتیکـی دقیـق قـرار دارد کـه منشـورBK7 نیم‌اسـتوانه‌ای و بلـور فوتونـی چندلایـه بـه عنـوان حسـگر درون آن جای‌گـذاری شـده‌اند. جهـت تحریـک امـواج میرا در مرز مشـترک نانوسـاختار بلـور فوتونی و مـاده فوروزماید، شـرایط تطابـق فـاز بیـن مـوج میـرا و مـوج فـرودی



تصویر۱ : پیکربندی شماتیک کرچمن که شامل لیزر،فوتودیود،منشور و بلور(a) و تجربی (b)برای تحریک حسگر BSW و تشخیص نمونه فوروزماید.

مـی بایسـت برقـرار شـود. یکـی از روش‌هـای رایـج و عملـی بـرای دسـتیابی بـه ایـن تطابـق، اسـتفاده از پیکربنـدی کرشـمن و افزایـش عـدد مـوج فـرودی بـا اسـتفاده از ضریـب شکسـت منشـور اسـت. ایـن مهـم بـا مدولاسـیون زاویـه ای قابـل دسـترس اسـت کـه در زاویـه‌ای مشـخص، نـور تابیده‌شـده به‌جـای بازتـاب کامـل، وارد مـد سـطحی بـلاخ شـده و باعـث ایجـاد یـک افـت شـدید در شـدت نـور بازتابـی می‌شـود کـه به‌عنـوان «تشـدید» شـناخته می‌شـود[۶]. نکتـه مهـم در ایـن تطبیـق فـاز، یافتـن مقـدار غیـر حقیقـی در عـدد مـوج اسـت کـه در محـدوده بانـد نـواری بلـور فوتونـی قابـل دسـتیابی و تحریـک مـی باشـد.

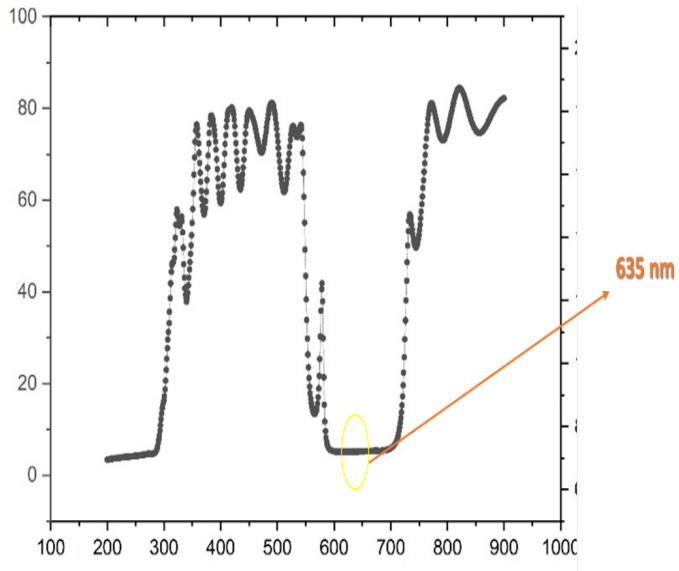
اگرچـه در سـال‌های اخیـر پژوهش‌هـای متعـددی در زمینـه طراحـی و شبیه‌سـازی حسـگرهای نـوری بـرای شناسـایی داروهـا و مـواد دوپینـگ انجـام شـده اسـت، امـا اغلـب ایـن سـامانه‌ها در مقیـاس آزمایشـگاهی و بـا تجهیـزات پرهزینـه و غیرقابـل حمـل پیاده‌سـازی شـده‌اند. تاکنـون گـزارش معتبـری از توسـعه یـک حسـگر قابـل حمـل و تجاری‌شـده بـرای شناسـایی داروی فوروزمایـد منتشـر نشـده اسـت و بیشـتر کارهـا در حـد آزمایـش روی سـاختارهای فوتونیکـی یـا سنسـورهای SPR باقـی مانده‌انـد. از ایـن رو، کار حاضـر می‌توانـد زمینه‌سـاز حرکـت بـه سـمت طراحـی سـامانه‌های سـاده‌تر، کم‌هزینه‌تـر و بالقـوه قابـل حمـل در ایـن حـوزه باشـد.

۲- عملیات تجربی و ویژگی‌های نوری

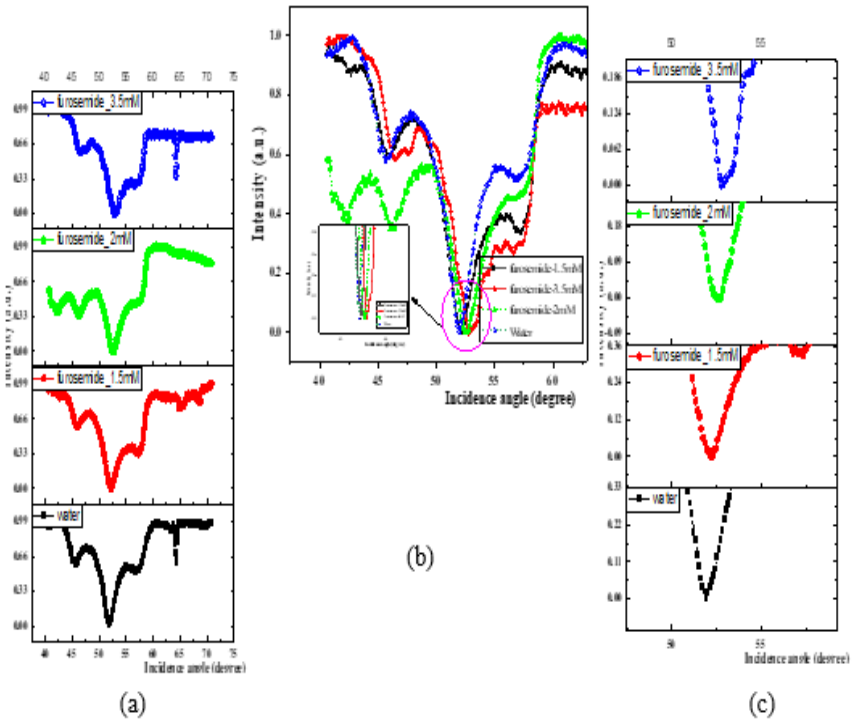
۲-۱- مواد و روش ها:

در ایـن پژوهـش، نـور لیـزر قرمـز ۶۳۵ نانومتـر بـا پلاریزاسـیون TM از طریـق منشـور $BK^{۷}$ بـه سـطح پاییـن کریسـتال ۲۴ لایـه‌ای تابانـده شـد. بـا توجـه بـه طراحـی دقیـق و مـواد کم‌اتـلاف ماننـد SiO_2 وZrO_2 ، سـاختار قـادر بـه ایجـاد BSW بـا اتـلاف کـم و پاسـخ نـوری قابل‌تشـخیص بود.بـا ریختـن ۲۰ میکرولیتـر محلـول فوروزمایـد بـا غلظت‌هـای مختلـف (۱/۵، ۲ و ۳/۵ میلی‌مـولار) بـر سـطح حسـگر، تغییـرات در زاویـه تشـدید به‌وضـوح ثبـت شـد. تغییـرات زاویـه‌ای، نشـان‌دهنده برهم‌کنـش بیـن مولکـول فوروزمایـد و میـدان میـرا اسـت.

طیـف بلـور سـاخته شـده در شـکل ۲ نشـان داده شـده اسـت کـه نشـان دهنـده تمرکـز ، قسـمت موهومـی بـردار مـوج در بـازه‌ای بیـن حـدود ۵۸۰تـا ۷۱۰ نانومتـر در ناحیـه مرئـی متمرکـز شـده اسـت. ایـن بـدان معناسـت کـه در ایـن بـازه طول‌موجـی، امـواج الکترومغناطیسـی نمی‌تواننـد به‌صـورت پیش‌رونـده در بلـور منتشـر شـوند، و در عـوض به‌صـورت امـواج سـطحی میـرا یـا امـواج بـلاخ سـطحی بـلاخ در مـرز فوقانـی بلـور، کـه در تمـاس بـا محیـط نمونـه (فوروزمایـد) اسـت، محـدود می‌شـوند.



تصویر۲ : نمودار اندازه گیری شده میزان عبور نمونه بلور فوتونی یک بعدی در بازه ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر.



تصویر۳ : بررسی پاسخ نوری سطحی برای غلظت‌های مختلف فوروزماید.

[7] بر این اساس، طول‌موج ۶۳۵ نانومتر را که دقیقاً در مرکز این بازه قرار دارد، به‌عنوان طول‌موج تابش لیزر انتخاب کردیم تا تشدید امواج سطحی بلاخ با بیشینه جفت شدگی انجام شود. استفاده از لیزر قرمز با این طول‌موج، مزیت هایی مانند هم‌پوشانی بهینه با ناحیه موهومی نمودار طیف عبور بلور و امکان تحریک پایدار امواج سطحی بلاخ دارد.

۲-۲- تحلیل نتایج و بحث

پس از اعمال محلول فوروزماید با غلظت‌های مشخص بر سطح نانوساختار بلور فوتونی، پاسخ نوری حسگر با استفاده از سیستم اندازه‌گیری زاویه‌ای ثبت شد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، طیف بازتاب زاویه‌ای نشان‌دهنده‌ی تغییر زاویه تشدید با افزایش غلظت فوروزماید است. این پدیده به دلیل تغییرات موضعی در ضریب شکست محیط اطراف لایه حساس آخرین لایه‌ی بلور رخ می‌دهد. در غلظت‌های بالاتر فوروزماید، تمرکز مولکولی در مجاورت میدان میرا افزایش می‌یابد، که به‌نوبه‌ی خود موجب ایجاد اختلاف بیشتر در ضریب شکست و در نتیجه، جابجایی قرمز در زاویه‌ی تشدید می‌شود. به‌طور خاص، زاویه‌ی تشدید از ۵۱/۹۴۱ درجه برای آب خالص به ۵۲/۲۴۵ درجه برای ۱ میلی‌مولار، ۵۲/۵۴۹ درجه برای ۲ میلی‌مولار، و ۵۲/۸۵۳ درجه برای ۳/۵ میلی‌مولار افزایش یافت.

این افزایش زاویه به‌صورت تقریباً خطی با افزایش غلظت ماده دنبال می‌شود، که نشان‌دهنده‌ی پاسخ خطی سیستم به تغییرات غلظتی در این بازه است [8].

همچنین، تصویر ۳ نشان‌دهنده‌ی رفتار طیف‌های نرمال‌شده و تکرارپذیری سیگنال است. روند کلی جابجایی زاویه‌ای را با دقت بیشتری می توان در نمودار بزرگنمایی شده شکل نمایش می‌دهد. این داده‌ها با انجام هر اندازه‌گیری در سه نوبت برای هر غلظت، پایداری و تکرارپذیری تجربی سیستم را تأیید می‌کنند.

در مجموع، تحلیل‌های نوری نشان می‌دهند که

ساختار بلور فوتونی ۲۴ لایه‌ای با استفاده از امواج میرا، قادر به تمایز دقیق بین غلظت‌های مختلف فوروزماید حتی در بازه‌ی میلی‌مولار بدون نیاز به مواد نشاندار یا سامانه‌های پیچیده آنالیزی پایین است.

۳- نتیجه گیری

در این پژوهش، کارایی یک حسگر نوری مبتنی بر امواج سطحی بلاخ در ساختار بلور فوتونی چندلایه برای تشخیص غلظت‌های مختلف داروی فوروزماید مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از پیکربندی کرشمن و تحریک لایه حساسه با نور لیزر قرمز ۶۳۵ نانومتر، تغییرات زاویه تشدید به‌عنوان پاسخ حسگر نسبت به غلظت‌های متفاوت فوروزماید ثبت شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت دارو، زاویه تشدید به‌طور خطی افزایش می‌یابد که بیانگر حساسیت بالای سیستم به تغییرات اندک در ضریب شکست محیط اطراف است.[۹]

به‌منظور مقایسه عملکرد ساختار پیشنهادی با سایر حسگرهای نوری، شاخص FOM (Figure of Merit) به‌عنوان یک معیار کیفی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که حسگر مبتنی بر امواج سطحی بلاخ دارای FOM قابل مقایسه و در مواردی بالاتر از سنسورهای پلاسمون سطحی است. این موضوع نشان‌دهنده آن است که ساختار دی‌الکتریک چندلایه نه‌تنها از نظر حساسیت و خطی بودن پاسخ عملکرد مطلوبی دارد، بلکه از مشکل اتلاف زیاد و ناپایداری که معمولاً در حسگرهای SPR مشاهده می‌شود نیز رهاست. علاوه بر این، ماهیت دی‌الکتریک ساختار پیشنهادی امکان بهینه‌سازی بیشتر و یکپارچه‌سازی در قالب حسگرهای قابل حمل را فراهم می‌سازد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از امواج سطحی بلاخ در بلور فوتونی یک‌بعدی گزینه‌ای مؤثر و رقابتی در برابر سنسورهای SPR برای شناسایی داروها و کاربردهای زیستی محسوب می‌شود.[10]

پایداری و تکرارپذیری سیگنال‌های نوری در آزمایش‌های انجام‌شده، نشان از عملکرد دقیق و قابل اعتماد این ساختار دارد. از آن‌جایی که روش ارائه‌شده نیاز به برچسب‌گذاری یا تجهیزات پیچیده ندارد و از دقت زاویه‌ای بالایی برخوردار است، می‌تواند به‌عنوان روشی سریع، کم‌هزینه و دقیق در شناسایی داروهای دوپینگ مانند فوروزماید در نمونه‌های زیستی مورد استفاده قرار گیرد. این دستاورد، گامی مؤثر در توسعه حسگرهای نوری پیشرفته برای کاربردهای پزشکی ورزشی و کنترل دارویی است.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله بدین‌وسیله اعلام می‌دارند که در ارتباط با انجام، تحلیل، نگارش و انتشار این پژوهش، هیچ‌گونه تعارض منافع مالی، شخصی، علمی یا سازمانی وجود ندارد.

منابع

[1] Rajiwate, Fahim LH. "Testosterone Assays: Current Techniques and Pitfalls." Men's Health (2025): 25-36. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76898-9_3

[2] Conklin, Steven E., and Claire E. Knezevic. "Advancements in the gold standard: Measuring steroid sex hormones by mass spectrometry." Clinical Biochemistry 82 (2020): 21-32. https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2020.03.008

[3] Goyal, Amit Kumar, and Suchandan Pal. "Design analysis of Bloch surface wave-based sensor for hemoglobin concentration measurement." Applied Nanoscience 10 (2020): 3639-3647. https://doi.org/10.1007/s13204-020-01437-4

[4] Goyal, A.K. and S. Pal, Design analysis of Bloch surface wave-based sensor for haemoglobin concentration measurement. Applied Nanoscience, 2020. 10: p. 3639-3647.

[5] Ghasemi, M. and P. Choudhury, Nanostructured concentric gold ring resonator-based metasurface filter device. Optik, 2016. 127(20): p. 9932-9936. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.07.048

[6] Pope, Christopher G. "X-ray diffraction and the Bragg equation." Journal of chemical education 74, no. 1 (1997): 129. https://doi.org/10.1021/ed074p129

[7] Mayonado, Gina, Shabbir M. Mian, Valentina Robbiano, and Franco Cacialli. "Investigation of

the Bragg-Snell law in photonic crystals." BFY Proceedings (2015): 60-63. the Bragg-Snell law in photonic crystals." BFY Proceedings (2015): 60-63 https://doi.org/10.1119/bfy.2015.pr.015

[8] Sadrolhosseini, Amir Reza, Seyedeh Mehri Hamidi, and Younes Mazhdi. "Detection of gentamicin in water and milk using chitosan-ZnS-Au nanocomposite based on surface plasmon resonance imaging sensor." Measurement 239 (2025): 115412. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115412

[9] Kretschmann, Erwin, and Heinz Raether. "Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light." Zeitschrift für Naturforschung A 23, no. 12 (1968): 2135-2136. https://doi.org/10.1515/zna-1968-1247

[10] Dias, Bernardo, José MM de Almeida, and Luís CC Coelho. "Figure of Merit Comparison Between Surface Plasmon Resonance and Bloch Surface Waves." In EPJ Web of Conferences, vol. 266, p. 05004. EDP Sciences, 2022. https://doi.org/10.1051/epjconf/202226605004