بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه سیستان و بلوچستان،
زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹

کد مقاله: ۲- ۲۲۷۰- ۱۰-A

حسگر زیستی فتوولتایی پلاسمون سطحی با تشدید فانو در پیکربندی کریشمن

احمد لطفیانی[۱]، سید مجید محسنی ارمکی[۲] و مجید قناعت‌شعار[۱]

[۱] آزمایشگاه نانومغناطیس و نیم‌رساناهای مغناطیسی، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران
[۲]گروه فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

چکیده - در این نوشتار یک حسگر کوچک شده زیستی پلاسمون سطحی در ساختار کریشمن با خروجی مستقیم جریان الکتریکی پیشنهاد شده است که علاوه‌بر کوچک سازی چیدمان کریشمن، حساسیت آن نیز با ایجاد تشدید فانو در ساختار افزایش داده شده است.مد پلاسمون سطحی قطعه M-I-TCO که در نقش یک آشکارساز نوری نیز می‌باشد، سبب تولید جریان در خروجی حسگر می‌شود متناسب به ضریب شکست محلول زیستی تغییر می‌کند. نشان داده است که تزویج بین مدهای پلاسمون سطحی و موجبری سبب ظهور شکل خط تشدید فانو در نمودار جریان خروجی برحسب ضریب شکست می‌شود و حساسیت سطحی حسگر را تا mA/RIU ۶۶ افزایش می‌دهد

کلید واژه- الکترون داغ، حسگر زیستی، پلاسمون سطحی، تشدید فانو

Surface plasmon photovoltaic biosensor with Fano resonance in Krishmann configuration

Ahmad Lotfiani[1], S. Majid Mohseni Armaki[2] and Majid Ghanaatshoar[1]

[1]**Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, G.C., Evin, 1983969411Tehran, Iran**
[2] **Faculty of Physics, Shahid Beheshti University, G.C. Evin, 1983969411 Tehran, Iran**
[*] Corresponding author: m-ghanaat@sbu.ac.ir

Abstract- In this study, we propose a compact high-sensitivity surface plasmon biosensor with an electrical response based on Fano resonance in M-I-TCO junction integrated with the planar waveguide. The SPR excitation of the M-I-TCO junction enhances the photoabsorption and hot electrons generation, which can produce photocurrent. We demonstrate that the coupling between the MIM junction surface plasmon and wavegude modes can result in modulation of output photocurrent by variation of analyte refractive index. The response of this sensor was calculated in detail and the results showed that the Fano-like profile appears in the photocurrent curve as well as the reflectivity curve which have enhanced sensitivity of biosensors to66mA/RIU

Keywords: hot electron, bio sensor, surface plasmon, Fano resonance

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

مقدمه

تشدید پلاسمون سطحی (SPR) به عنوان یکی از برترین روش¬هابرای حسگرهای تحقیقاتی زیستی و شیمیایی حساس و دقیق مورد توجه بسیار قرار گرفته است. چیدمان تحریکی مختلفی برای حسگرهای SPR بکار می¬رود که معمولترین آن بر پایه تزویج نوری بوسیله منشور در چیدمان کریشمن است.در این روش موج میراشونده ناشی از بازتاب کلی نور فرودی سبب تحریک پلاسمون سطحی می¬شود که در فصل مشترک فلز انتشار می¬یابد و میدان میرای آن نسبت به تغییرات ضریب شکست محیط حساس است. با رصدکردن طیف نور بازتابی بر حسب شدت یا طول موج می‌توان تغییرات ضریب شکست محیط را پویش کرد[۱و۲]. با وجود حساسیت بالای این نوع حسگرها، کارایی آنها به علت حساس و حجیم بودن چیدمان اپتیکی اندازگیری نور بازتابی، محدود به محیط آزمایشگاه می‌شود[۳]. در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری برای کوچک‌سازی و حذف آشکارساز نوری خارجی در این نوع حسگرها انجام شده است که ازاین میان می‌توان به مجتمع سازی بر روی آشکارساز نوری سلیکونی، مجتمع سازی توری پراش بر روی سلیکون نوع P و استفاده از لایه‌های فتوولتایی آلی نام برد. اغلب این روش‌ها به علت نیاز به لیتوگرافی‌های در حد نانومتر روش‌های گرانی هستند و یا دارای پایداری کمی می‌باشند. علاوه بر این معمولا کوچک‌سازی حسگر *SPR* با کاهش دقت و حساسیت همراه می¬باشد[۴و۶]. از این رو یافتن راه‌حلی برای کوچک‌سازی این حسگرها بدون کاهش حساسیت آنها حائز اهمیت است.

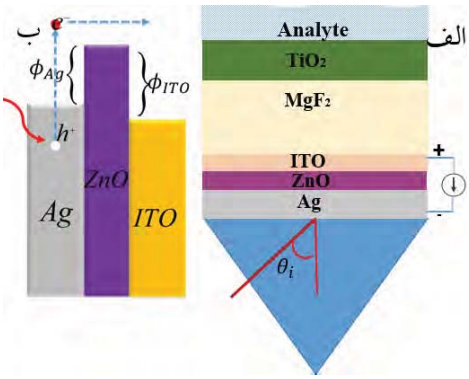
در این مقاله سعی شده است که با مجتمع سازی آشکارساز میدان نزدیک با زیر لایه¬های اپتیکی آشکارساز خارجی را حذف نموده و چیدمان کریشمن را علاوه بر کوچک‌سازی، حساس‌تر نماییم. برای این منظور از پیوند *M-I-ITO* به عنوان آشکارساز نوری مجتمع شده در این ساختار استفاده می گردد و همچنین با افزودن لایه اپتیکی دیگر ایجاد تشدید فانو در ساختار حساسیت الکتریکی حسگر بطور چشم گیری افزایش می¬یابد.

نتایج:

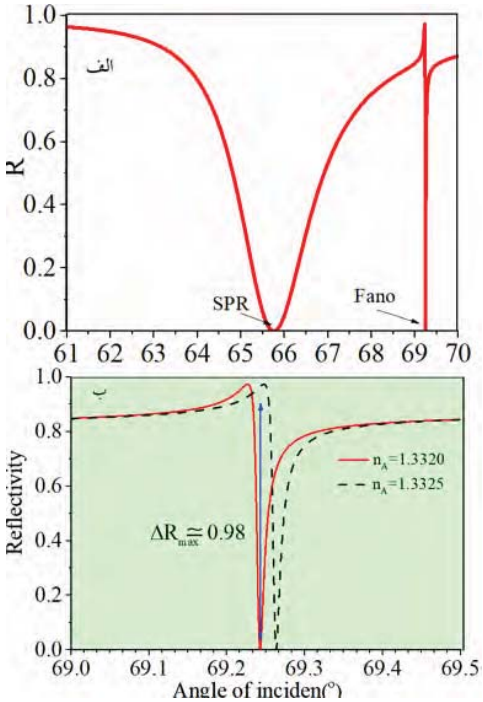
معماری حسگر الکترواپتیکی *SPR* پیشنهادی در شکل۱ (الف) نمایش داده شده است. در این معماری از پیوند *Ag/ZnO/ITO* برای آشکارسازی *SPR* استفاده شده است که بر روی منشوری از جنس *SF10* لایه‌نشانی شده است. همانطور که در بخش بعد خواهید دید جنس و ضخامت لایه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که اولا بهترین تشدید پلاسمون برای قطعه رخ دهد، ثانیا ترابرد الکترون های داغ تولید شده از لایه نقره به سمت لایه *ITO* را رخ دهد و ثالثا جذب نامتقارنی در قطعه حاکم باشد. ضخامت لایه‌های *Ag*، *ZnO* و *ITO* به ترتیب ۵۰، ۵، ۲۵ نانومتر در نظرگرفته شده است. بلوک دیاگرام انرژیقطعه*Ag/ZnO/ITO*در شکل۱(ب) آمده است. سد پتانسیل*ZnO/ITO* و*Ag/ZnO*برابر با $\varphi_{ITO}=0.9$و $\varphi_{Ag}=0.6$ در نظر گرفته شده است. لایه موجبر نوری با ضریب شکست نسبتا بالا بوسیله یک لایه تزویجگر با ضریب شکست نوری نسبتا پایین، به مد پلاسمونیک سطحی*Ag/ZnO/ITO* تزویج و همبسته می‌شود. اگر ضخامت لایه‌ها مناسب انتخاب شود می‌توان شاهد پدیده تشدید فانو در ساختار پیشنهادی بود[۷]. بدین‌منظور لایه موجبر از ماده‌ای با ضریب شکست بالا مانندTiO_2و به ضخامت ۱۰۰ نانومتر انتخاب شده است. ضریب شکست لایه تزویجگر بهتر است نسبتا کم باشد زیرا در نقش پوشش لایه موجبری نیز هست. به همین علت جنس آن ازMgF_2و ضخامت آن ۶۰۰ نانومتر در نظر گرفته شده است. لایه موجبر در تماس با آنالیت زیستی قرار می‌گیرد. حسگر توسط یک لیزر هلیوم نئون با قطبش *TM* تحریک می¬شود. در حسگر پیشنهادی، جابجایی در زاویه تشدید، به علت تغییرات ضریب شکست، بصورت تغییرات جریان خروجی پیوند *Ag/ZnO/ITO* ظاهر می¬شود. برای بدست آوردن مشخصه‌های اپتیکی حسگر از روش ماتریس انتقال با گام ۰.۰۶ نانومتر استفاده شده است.

مشخصه بازتابی حسگر در شکل۲الف نمایش داده شده است. مشخص است که در طیف بازتابی حسگر یک قعر پهن در زاویه¬ی$\theta_{SPR}=65.78^{o}$رخ می‌دهد که متناظر به تحریکمد پلاسمون سطحی در قطعه *Ag/ZnO/ITO*

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

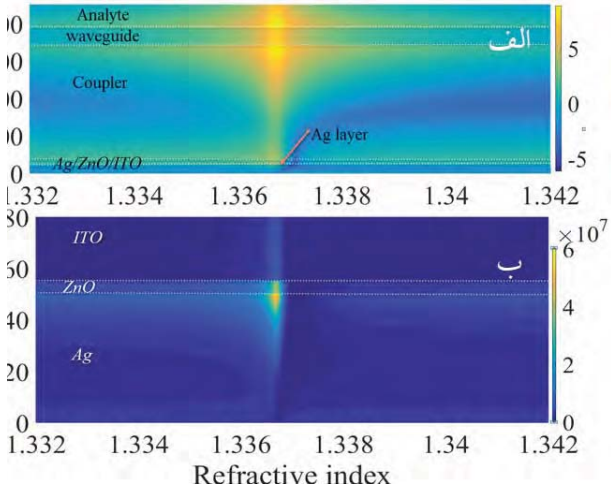


شکل۱.الف)طرحواره حسگر پیشنهادی. ب) دیاگرام گاف انرژی *Ag/ZnO/ITO*



۲.الف: نمودار بازتاب حسگر پیشنهادی. ب: جابجایی مشخصه بازتاب به ازای تغییر ضریب شکست آنالیت به اندازه ۰.۰۰۰۵*RIU*.

می‌باشد و همچنین یک قعر باریک در $\theta_{Fano}=69.24^o$پدیدار شده است که با توجه به شکل خط نامتقارنی که دارد می‌توان آن را به تشدید فانو در ساختار نسبت داد. در شکل ۲.ب جابجایی منحنی بازتاب مد تشدید فانو برحسب تغییرات ضریب شکسنت نمایش داده شده است. با توجه به تعریف حساسیت اپتیکی ($S_{optical} = \nabla\theta/RIU$) می‌توان از شکل۲ب حساسیت اپتیکی حسگر را تقریبا برابر باRIU^{-1} ۱۹۶۰ تخمین زد. پروفایل لگاریتم شدت میدان الکتریکی درون ساختار حسگر در محدوده تشدید فانو برای ضرایب شکست مختلف آنالیت در یک زاویه تابش ثابت($\theta_i = 69.45°$) در شکل ۳الف نمایش داده شده است. مشخص است یک میدان قوی در مرز آنالیت و موجبر شکل گرفته شده است که این میدان سبب حساسیت حسگر نسبت ضریب شکست آنالیت می‌شود. از طرفی دیگر بر روی لایه نقره نیز شاهد تقویت میدان الکتریکی هستیم که سبب افزایش جذب نور وتولید الکترون داغ در این لایه می‌شود[۸]. مشخص است تغییر ضریب شکست سبب تغییرات میدان الکتریکی بر روی سطح لایه نقره می‌گردد.



شکل۳.الف: توزیع لگاریتمی شدت میدان و ب: توزیع جذب درون لایه های مختلف حسگر برحسب ضریب شکست آنالیت.

توزیع جذب نوری در قطعه *Ag/ZnO/ITO*بوسیله معادله‌ی (۱) محاسبه شده است[۸]:

$$A(z) = \frac{1}{2}\omega Im(\varepsilon)|E^{SPR}(z)|^2 \quad (۱)$$

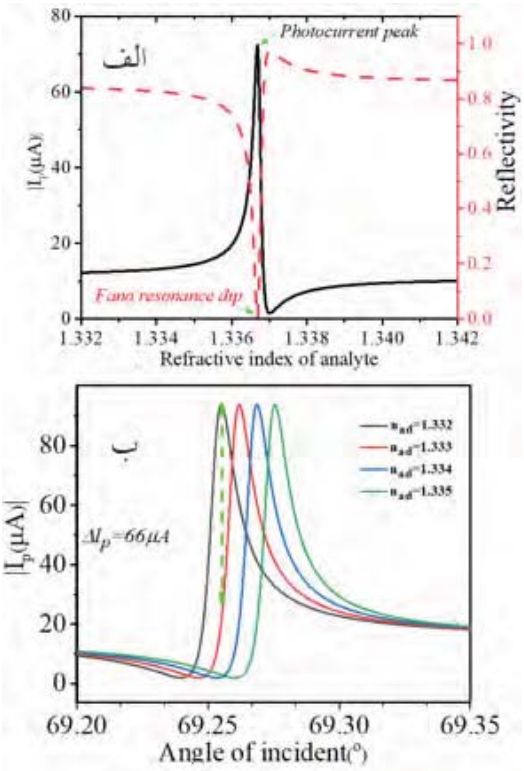
که در آن$E^{SPR}(z)$ توزیع میدان الکتریکی درون قطعه و ε ضریب دی‌الکتریک لایه‌های مختلف می‌باشد. در شکل ۳ب، توزیع جذب در قطعه *Ag/ZnO/ITO*متناظر با تغییر شکست شکل ۳الف، نمایش داده شده است. مشخص است که که توزیع جذب در قطعه نامتقارن است و جذب در هر لایه متناظر با ضریب شکست آنالیت تغییر می‌نماید.مجاورت قلعه و قعر جذب در شکل ۳ب، نتیجه‌ی تداخل سازنده و ویرانگر نور در تشدید فانو می‌باشد. مشخص است که فوتون‌های فرودی بطور عمده در لایه نقره جذب می‌شوند و سبب برانگیختن الکترون‌ها با انرژی بیشینه‌ای برابر با انرژی فوتون‌های ورودیE_{ph}می‌شوند. کسری از این الکترون‌های پر انرژی، که به آن‌ها الکترون‌های

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

داغ نیز می‌گویند، بصورت پرتابی خود را به فصل مشترک Ag/ZnO می‌رسانند که از رابطه (۲) بدست می‌آید[۹]:

$$P_{trans}(z) = \frac{1}{2} exp\left(-\frac{\Delta z}{l_e\, cos(\phi)}\right) \qquad (۲)$$

که $\Delta z = z - z_0$ فاصله عمودی از محل تولید الکترون‌های داغ (z) تا فصل مشترک فلز- اکسیدz_0 می‌باشد و زاویه ϕ جهت حرکت الکترون‌ها را مشخص می‌کند که در اینجا برابر با صفر فرض شده است. l_e فاصله آزاد میانگین الکترون‌های داغ در رسانا می‌باشد که برای نقره و ITO به‌ترتیب برابر با nm ۵۰و nm ۲ می‌باشد. اگر انرژی الکترون‌های در بیشتر از ارتفاع سد پتانسیل باشد، به تراز هدایت اکسید تزریق می‌شوند و با احتمالی تقریبا برابر با ۱ از آن عبور می‌نمایند[۹]. در غیر این صورت با احتمال کمی با فرآیند تونل زدن از آن عبور می‌کند که از آن صرف‌نظر می‌شود. الکترون‌های داغ عبوری از سد پتانسیل توسط الکترود نقره ای دیگر جمع‌آوری شده که منجر به تولید جریان نوری در خروجی قطعه $Ag/ZnO/ITO$می-شوند. در شکل ۴الف مشخصه‌ی الکتریکی و اپتیکی حسگر پیشنهادی که بوسیله چیدمان کریشمن تحریک می‌شود، نمایش داده شده است. نمایان است طیف بازتابی و جریان نوری حسگر با تغییرات ضریب شکست آنالیت تغییر می‌کنند. نمودار پاسخ الکتریکی حسگر همانند نمودار بازتاب آن، دارای شکل خط نامتقارن و تیز فانو می‌باشد اما با رفتاری که برخلاف آن است.برای بررسی حساسیت سطحی حسگر، جابجایی منحنی جریان خروجی را در اثر تشکیل nm ۱۰ لایه زیستی بر روی سطح لایه موجبر، بدست آورده‌ایم. بدین منظور ضریب شکست لایه زیستی n_{ad} تغییر داده می‌شود در حالی که ضریب شکست حجم آنالیت n_A روی آن، ثابت ۱.۳۳۲ در نظر گرفته شده است. این لایه باریک زیستی می‌تواند شبیه سازی از ملکول‌های آنتی ژن ثابت شده بر سطح حسگر باشدکه مطالعه رفتاری ملکول‌خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتیجه در شکل ۴ب نمایش داده شده است .با توجه به تعریف حساسیت الکتریکی بصورت $S_e = \nabla I/RIU$، می‌توان، حساسیت سطحی برابر با mA/RIU ۶۶ تخمین زده می‌شود که بیانگر حساسیت بسیار بالای این حسگر برای بررسی تک لایه‌های ملکول زیستی می‌باشدو در مقایسه با حسگر¬های بدون تشدید فانو چندین مرتبه بالاتر است[۲و۳].جدول ۱ مقایسه¬ی عملکرد حسگرهای الکترواپتیکی مختلف پلاسمون سطحی را نشان می¬دهد. مشخص است که حساسیت حسگر پیشنهادی در مقایسه با حسگرهای دیگر بطور چشمگیری بهتر



شکل۴. الف: مشخصه بازتابی و الکتریکی حسگر الکترواپتیکی پیشنهادی. ب: جریان نوری حسگر برحسب زاویه نور فرودیبرای ضریب شکست¬های مختلف لایه سطحی

است. علاوه بر این با توجه به اینکه معادلات ترابرد الکترون تقریبا مستقل از دما می‌باشد، تغییرات دمایی در محدوده دمای اتاق اختلال چندانی بر عملکرد این حسگر نمی‌گذارد که این تاییدی بر پتانسیل بالای طراحی ما برای استفاده در حسگرهای زیستی قابل همراه پیشرفته است.

SPR sensor structure	***sensitivity*** *mA/RIU*	***Ref***
Ag/ZnO/ITO/MgF₂/TiO₂	*66*	*this work*
Au/silicon nano-trench	*18*	*[4]*
Au/Photovoltaic/AU[1]	*1*	*[5]*
Au/Si nanochannel	*14.5*	*[6]*

جدول۱. مقایسه حساسیت حسگرهای مختلف گزارش شده

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

مرجع‌ها

[1] Maier, Stefan Alexander. Springer Science & Business Media, 2007.
[2]Farmani, Ali, and Ali Mir. *IEEE Photonics Technology Letters* 31.8 (2019): 643-646.
[3]Hoa, Xuyen D., A. G. Kirk, and M. Tabrizian. *Biosensors and bioelectronics* 23.2 (2007): 151-160.
[4] Wen, Long, et al. "Multiband and ultrahigh figure-of-merit nanoplasmonic sensing with direct electrical readout in Au-Si nanojunctions." *ACS nano* 13.6 (2019): 6963-6972.
[5] A. Shakoor et al., ACS Photonics, vol. 3, no. 10, pp. 1926-1933, 2016.
[6] Sui B, Xu Y, Wang Z, Zhang C, Qin L, Li X, Wu S. Optics Express. 2019 Dec 23;27(26):38382-90..
[7] S. Hayashi, D. V. Nesterenko, and Z. Sekkat, " Applied Physics Express, vol. 8, no. 2, p. 022201, 2015.
[8]C. Zhang, K. Wu, V. Giannini, and X. Li, ACS nano, vol. 11, no. 2, pp. 1719-1727, 2017.
[9] Wang, Fuming, and Nicholas A. Melosh. *Nano letters* 11.12 (2011): 5426-5430

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.