



طراحی و شبیه‌سازی حسگر گلوکز مبتنی بر رزونانس پلاسمون‌های سطحی با فیبر نوری

عبدالله علیزاده^{۱*}، رضا اعلائی قراوانلو^۲

^{۱,۲} گروه مهندسی برق، دانشگاه بناب، بناب، alizadeh@ubonab.ac.ir

چکیده - در این مقاله حسگر گلوکز مبتنی بر فیبر نوری طراحی و شبیه‌سازی شده است. ساختار حسگر متشکل از فیبر نوری تک مد بوده که قسمتی از آن صیقل داده شده است تا شکل سطح مقطع بصورت D دربیاید و با لایه فلزی پوشانده شده است. در نمونه‌هایی که از فلزات طلا یا نقره استفاده شده است، فرکانس رزونانس پلاسمون‌ها در ناحیه مرئی قرار می‌گیرد. اندازه‌گیری پروتئین‌ها و سایر مولکول‌های حیاتی اغلب در ناحیه IR انجام می‌شود. برای انتقال فرکانس رزونانس پلاسمون‌ها به ناحیه IR، از اکسید قلع-ایندیم یا ITO (Indium tin oxide) استفاده می‌شود. برای تحریک بهتر پلاسمون‌های سطحی از لایه گرافن نیز استفاده می‌شود که باعث افزایش حساسیت حسگر می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با روش FEM نشان می‌دهد که اگر در هر دو طرف لایه ITO، گرافن گذاشته شود، حساسیت حداکثر شده و مقدار 6500 nm/RIU بدست می‌آید.

کلید واژه- پلاسمون‌های سطحی، تلفات، حساسیت، حسگر، گرافن، گلوکز.

Design and simulation of glucose sensor based on SPR in optical fiber

Abdollah Alizade^{*۱}, Reza Alaie Qaravanlu^۲

^{۱,۲} گروه مهندسی برق، دانشگاه بناب، بناب، alizadeh@ubonab.ac.ir

^۱ alizadeh@ubonab.ac.ir، ^۲ reza13730906@gmail.com

Abstract- In this paper, a fiber optic based glucose sensor is designed and simulated. The structure of the biosensor consists of a single-mode optical fiber, with D shaped cross section, and coated by metal. When gold or silver used as metal layer, Plasmon resonant frequencies will be in the visible spectrum. Proteins and other biomolecules usually are measured in the IR region. To move plasmon resonant frequency to IR region, Indium Tin Oxide (ITO) is used such as metal layer. By introducing two graphene layer on the both side of ITO, performance of the sensor has been improved. The results of FEM simulation shows the sensitivity is 6500 nm / RIU .

Keywords: Biosensors, local surface plasmons, losses, sensitivity, graphene, glucose.

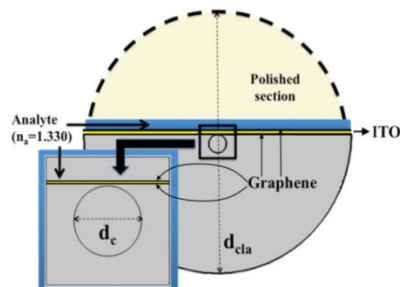
مقدمه

در طول دهه‌های گذشته، انواع مختلفی از حسگرهای مبتنی بر فیبر نوری بر اساس رزونانس پلاسمون‌های سطحی ارائه شده است [۱]. پلاسمون‌های سطحی، نوسان دسته جمعی الکترون‌های آزاد فلزات در مرز مشترک با عایق‌ها است که در اثر تحریک نوری بوجود می‌آیند [۲]. پلاسمون‌های سطحی باعث افزایش میدان‌های محلی در مرز شده که می‌توان از آن‌ها در کاربردهای مختلف از جمله: سلول‌های خورشیدی، فیلترها و سوئیچ‌های نوری [۳]، آشکارسازهای نوری، گیت‌های منطقی نوری و حسگرهای نوری بهره جست. همچنین از طریق اندازه‌گیری ضریب شکست، می‌توان مواد شیمیایی مختلف و همچنین چندین پارامتر مختلف فیزیکی و بیولوژیکی را تشخیص داد. طی سال‌های گذشته، حسگر مبتنی بر رزونانس پلاسمون‌های سطحی با فیبر چند مد، تک مد و قطبیده شده که با یک لایه فلزی نازک پوشش داده شده‌اند، ارائه شده است [۴].

ساختار اصلی حسگر

شماتیک حسگر طراحی شده در شکل ۱، نشان داده شده است. ساختار نسور متشکل از فیبر نوری تک مد بوده که قسمتی از آن صیقل داده شده تا سطح مقطع آن به شکل D رو به پایین دربیاید. از دو لایه گرافن در زیر و روی ITO بعنوان لایه فلزی استفاده شده است و آنالیت مورد سنجش بر بالای این لایه‌ها قرار می‌گیرد. قطر مغزی فیبر که با (dc) نشان داده شده، ۸/۲ میکرومتر و قطر غلاف (clad)، ۱۲۵ میکرومتر در نظر گرفته شده است. سطح صیقل داده شده ۰/۲۵ میکرومتر از ناحیه مغزی فاصله دارد. عملکرد حسگر در محیط نرم‌افزار COMSOL شبیه سازی شده است. در این مقاله حالت‌های مختلف قرارگیری گرافن بر

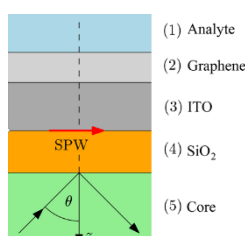
روی ITO، زیر ITO، و در هر دو طرف آن بررسی و نتایج مورد نظر ارائه می‌شود.



شکل ۱: شماتیک حسگر مبتنی بر فیبر نوری D-شکل [۱].

حالت اول: قرارگیری گرافن بر روی ITO

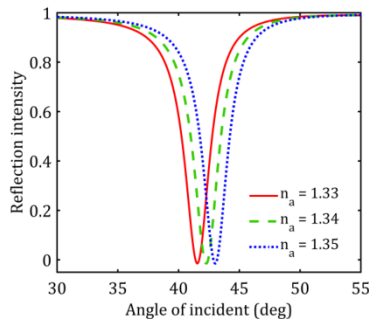
در شکل ۲، سطح مقطع حسگر نشان داده شده که در آن تمامی لایه‌های مورد استفاده مشهود است. در حسگر ۵ لایه تشکیل خواهد شد که به ترتیب از پایین به بالا، مغزی، اکسید سیلیکون، لایه ITO، گرافن و آنالیت هستند. اگر مطابق شکل ۲، یک لایه گرافن بر روی ITO، استفاده شود، تلفات و ضریب شکست موثر برای ساختار شکل ۲ مطابق نمودار شکل ۳ بدست می‌آید.



شکل ۲: شماتیک لایه‌های مختلف حسگر در حالت اول.

بالاترین میزان تلفات بدست آمده حدود (dB/cm) ۳۰۰ است که در طول موج ۱۶۵۰ نانومتر اتفاق افتاده است. در این طول موج شاهد برخورد دو ضریب شکست موثر مغزی و SPP هستیم. همان طور که از شکل ۳ معلوم می‌شود، در طول موج‌هایی پایین تر از رزونانس، ضریب شکست پلاسمونی (خط چین قرمز) بیشتر است و مد پلاسمونی حاکم می‌باشد. در طول موج‌های بزرگتر از طول موج رزونانس، ضریب شکست مغزی (خط سیاه ممتد) بیشتر

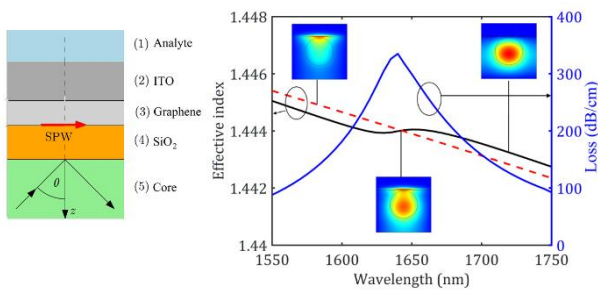
نداریم و تمام نور فرودی صرف تحریک پلاسمون‌های سطحی شده است. مطابق شکل ۴، با تغییر ضریب شکست، زاویه بروستر تغییر می‌کند. برای آنالیت با ضریب شکست ۱/۳۳، این زاویه برابر با ۴۱/۵ درجه، برای ضریب شکست ۱/۳۴، ۴۲/۲ درجه و برای ضریب شکست ۱/۳۵، ۴۳ درجه است.



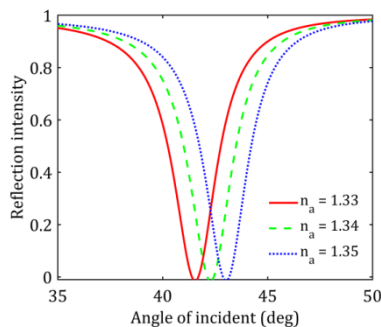
شکل ۴: نمودار میزان انعکاس بر حسب زاویه فرودی بر حسب درجه.

حالت دوم) قرارگیری لایه گرافن در زیر ITO

شکل ۵، شماتیک و تلفات و ضرایب شکست موثر، و شکل ۶ تغییرات زاویه بروستر را برای این حالت را نشان می‌دهند.

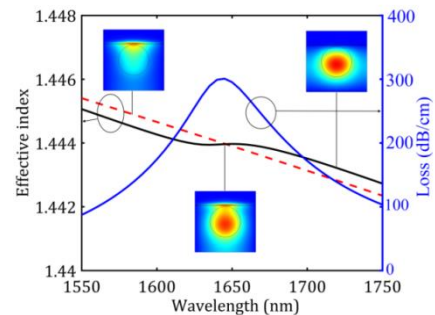


شکل ۵: شماتیک حالت دوم به همراه نمودار تلفات و ضریب شکست موثر برای مدهای مغزی و SPP به ازای ضریب شکست آنالیت ۱/۳۳.



شکل ۶: نمودار میزان انعکاس بر حسب زاویه فرودی بر حسب درجه.

از ضریب شکست موثر پلاسمونی است و مد انتشار حاکم، مد حبس شده در مغزی می‌باشد.



شکل ۳: میزان تلفات و ضریب شکست موثر بر حسب طول موج برای ضریب شکست آنالیت ۱/۳۳.

به منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد حسگر، از پارامتر حساسیت استفاده می‌کنند که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_{\lambda}(\lambda)(\text{nm/RIU}) = \partial \lambda_{\text{res}} / \partial n_a \quad (1)$$

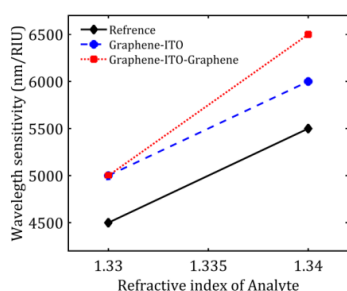
که S ، حساسیت، λ_{res} ، طول موج رزونانس، و n_a ، ضریب شکست آنالیت می‌باشند. ضریب شکست آنالیت (گلوکز حل شده در آب خالص) به غلظت گلوکز وابسته است، این وابستگی علاوه بر غلظت گلوکز به دما نیز وجود دارد. در این تحقیق دما را ثابت و وابستگی ضریب شکست آنالیت به غلظت گلوکز با رابطه ۲ در نظر گرفته شده است [۵].

$$n(p) = 1.3325 + 1.411e^{-2p} + 0.51088e^{-5p} \quad (2)$$

در رابطه ۲، p غلظت گلوکز و n ضریب شکست آنالیت می‌باشد. بیشترین حساسیت بدست آمده در آرایش فوق، برابر ۵۵۰۰ (nm/RIU) بدست آمد. در شکل ۴، نمودار انعکاس بر حسب زاویه فرودی به ازای آنالیت‌های مختلف، رسم شده است. طول موج نور تابشی ۱۵۵۰ نانومتر در نظر گرفته شده و همانطور که دیده می‌شود، میزان انعکاس با تغییر زاویه فرودی تغییر یافته و در یک زاویه‌ای خاص مقدار آن به صفر می‌رسد (زاویه بروستر). در این زاویه هیچ مولفه انعکاسی

مقایسه و نتیجه گیری

حساسیت محاسبه شده در فرمول ۱، برای همه حالت ها برای دو ضریب شکست متفاوت در شکل ۹، نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود، در صورتی که گرافن در زیر ITO و بر روی آن قرار گرفته باشد، بیشترین حساسیت را شاهد خواهیم بود که در ضریب شکست $1/34$ ، به مقدار 6500 (nm/RIU) رسیده است.



شکل ۹: مقایسه میزان حساسیت حسگر در سه حالت

نتایج حاصل از شبیه سازی حسگر آشکارساز سطح گلوکز مبتنی بر فیبر نوری D- شکل، نشان می دهد که در صورت استفاده از گرافن در هر دو طرف ITO به دلیل تحریک پلاسمون های سطحی و تقویت میدان الکتریکی، عملکرد حسگر بهبود یافته و حساسیت آن افزایش می یابد.

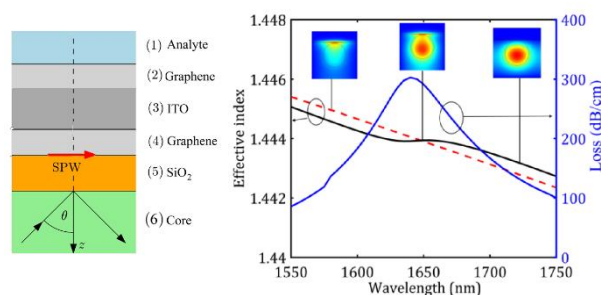
مرجع ها

- [۱] Kim, H. et all. "Localized surface plasmon resonance biosensor using nanopatterned gold particles on the surface of an optical fiber", Sensors and Actuators B: Chemical, ۲۸۰, ۱۸۳-۱۹۱, ۲۰۱۹
- [۲] Nicoletti, O et all. "Three-dimensional imaging of localized surface plasmon resonances of metal nanoparticles." Nature, ۵۰۲(۷۴۶۹), ۸۰-۸۴, ۲۰۱۳.
- [۳] Wang, A. "Mid-infrared plasmonic multispectral filters", Scientific reports, ۸(۱), ۱-۷, ۲۰۱۸
- [۴] Nasirifar, R., et all. "Dual channel optical fiber refractive index sensor based on surface plasmon resonance. Optik, ۱۸۶, ۱۹۴-۲۰۴, ۲۰۱۹
- [۵] Carl F. et all. "Refractive Indices and Densities of Aqueous Solutions of Invert Sugar", National Bureau of Standards Monograph ۶۴, June ۷, ۱۹۶۳

برای آنالیت با ضریب شکست $1/33$ ، مقدار تلفات بدست آمده حدود 350 (dB/cm) بوده که در طول موج 1645 nm نانومتر اتفاق افتاده است. بالاترین حسایت بدست آمده 6000 (nm/RIU) است که نسبت به حالتی که گرافن بر روی ITO قرار داشت 500 (nm/RIU) افزایش داشته است.

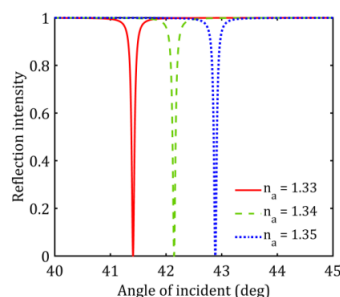
حالت سوم) گرافن در دو طرف ITO

موقعی که گرافن در زیر و بر روی ITO قرار گرفته باشد، نتایج با دو حالت قبلی متفاوت خواهد بود. در شکل ۷، ساختار لایه ها، نمودار تلفات، ضرایب شکست موثر و پروفایل توزیع میدان نشان داده شده است.



شکل ۷: شماتیک حالت سوم به همراه نمودار تلفات و ضریب شکست موثر برای مدهای مغزی و SPP به ازای ضریب شکست آنالیت $1/33$.

در ضریب شکست آنالیت برابر با $1/33$ ، مقدار تلفات بدست آمده حدود 300 (dB/cm) بوده که در طول موج 1645 nm نانومتر اتفاق افتاده است. در شکل ۸، نمودار انعکاس برحسب زاویه فرودی به ازای آنالیت های مختلف، برای حالت سوم رسم شده است.



شکل ۸: نمودار میزان انعکاس به ازای ضرایب شکست مختلف آنالیت برحسب زاویه تابش