بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

مطالعه عددی حساسیت یک نانو ساختار پلاسمونی فلز-عایق به ضریب شکست ماده پوشش دهنده برای کاربردهای حسگری

الهام شجاعی‌فرد، امیر علی‌اکبری[1]

[1] گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

eshojaeifard@yahoo.com , amiraliakbari1369@gmail.com

چکیده

با برانگیخته شدن پلاسمون‌های سطحی توسط تابش نور، خواص پلاسمونی ایجاد می‌شود که از این خاصیت بیشتر در کاربردهای حسگری استفاده می‌شود. ما در این مقاله برخی از عوامل تاثیر گذار بر حساسیت حسگرهای مبتنی بر تشدید پلاسمون سطحی جایگزیده را بررسی می‌کنیم. ساختار مورد بحث در این مقاله شامل زیرلایه‌ای از جنس شیشه، نیکل و دیسک طلا با ضخامت‌های متفاوت روی آن است. مطالعات در بازه طیفی مرئی-فروسرخ می‌باشد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با روش تفاضل دامنه زمان حساسیت ساختار را نسبت به ضریب شکست محیط زمینه، دوره تناوب و ضخامت لایه فلزی به خوبی نشان می‌دهد.

کلید واژه: پلاسمون سطحی، حسگر، دیسک طلا، روش تفاضل دامنه زمان(FDTD)

Numerical study of the sensitivity of a metal-insulated plasmonic nanostructure to the refractive index of the coating material for sensing applications

E. Shojaeifard, A. Aliakbari[1]

[1] Department of Physics, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

eshojaeifard@yahoo.com, amiraliakbari1369@gmail.com

Abstract

Plasmonic properties are created by the excitation of surface plasmons by light radiation, which is mostly used in sensing applications. We investigate some of the affecting factors on the sensitivity of these sensors based on localized surface plasmon resonance in this article. The structure discussed in this article includes a substrate of glass, nickel, and gold disk with different thicknesses on them. Studies are in the visible-infrared spectrum range and the results of simulation with the FDTD method show the sensitivity of the structure to the refractive index of the environment, period, and thickness of the metal layer.

Keywords: Surface Plasmon, sensor, gold disk, FDTD method

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

حسگر مبتنی بر تشدید پلاسمون سطحی به واسطه داشتن حساسیت طیفی بالا در میان سایر حسگرها مورد توجه قرار گرفته و از زمانی که برای مطالعهٔ فرآیندهای مختلف در سطح فلزات معرفی شده تبدیل به ابزاری مهم برای تعیین برهمکنش‌های زیستی، آشکارسازی مواد شیمیایی و همچنین تشخیص‌های پزشکی گشته است[۱].

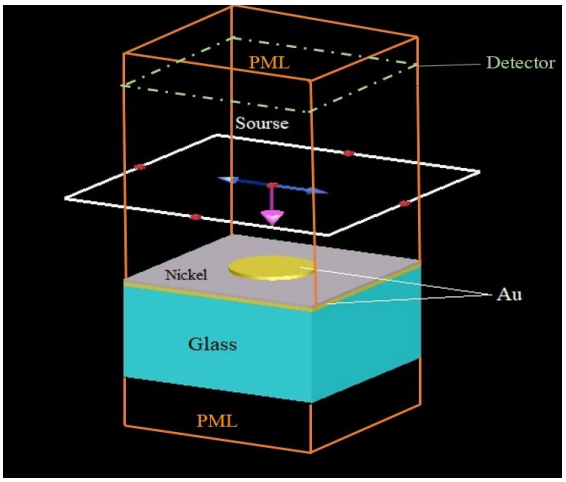
پلاسمون به عنوان یک شبه ذره تولید شده توسط نوسانات الکترون های جمعی در یک فلز تعریف می شود که معمولاً روی سطح فلز قرار دارد. بنابراین، پلاسمونی که روی یک سطح فلزی انتشار می‌یابد، پلاسمون سطحی نامیده می شود. هنگامی که نور در یک طول موج خاص به یک لایه فلزی با ضخامت خاصی تابیده می شود، یک برهمکنش بین پلاسمون سطح و یک فوتون رخ می دهد[۲]. تشدید پلاسمون سطحی جایگزیده[۱] پدیده اپتیکی است که توسط نوسانات جمعی الکترون آزاد در نانوساختارهای فلز-دی‌الکتریک ایجاد می-شود[۲] که با محبوس شدن در نانوذره یک میدان مغناطیسی قوی محلی ایجاد می‌کند[۳]. طیف‌های تشدید پلاسمونی جایگزیده به هندسه ذره، اندازه، مواد نانوذرات، ضخامت لایه‌ها و ضریب شکست محیط اطراف بستگی دارد[۴]. یکی از راه‌های پیشنهادی جهت افزایش حساسیت نانوحسگرها استفاده از ساختارهای چند لایه نانوپلاسمونی مبتنی بر پلاسمون سطحی جایگزیده است[۵] که در این مقاله یک ساختار متناوب شامل دیسک‌های طلا بر روی لایه‌های طلا و نیکل مورد بررسی قرار گرفته است(شکل ۱). نیکل ناهمسانگرد است و با توجه به خواص اپتیکی آن در طیف سنجی ناحیه مرئی-فروسرخ جذب بالایی دارد.[۶].همچنین به دلیل پایداری، دردسترس بودن و ارزانی گزینه مناسبی جهت استفاده در ساختار است.[۷].

برای محاسبه میزان بازتاب نور از این ساختار با استفاده از نرم-افزار لومریکال (مبتنی بر روش تفاضل متناهی دامنه زمان) برهمکنش نور با نانوساختار را مدلسازی می‌کنیم. با به دست آوردن طیف بازتاب، به بررسی تاثیر عواملی چون ضریب شکست محیط دیسک، ضخامت لایه فلزی، فاصله تناوبی و ... می‌پردازیم.

روش محاسبه

فضای محاسباتی در شکل ۱ نشان داده شده است. ساختار چندلایه ای شامل یک لایه از جنس شیشه، یک لایه نازک طلا که روی آن با یک لایه از جنس نیکل پوشانده شده است و یک دیسک طلا با ضخامت مشخص می‌باشد. در شکل ۱ المان‌های استفاده شده در روش FDTD[۲]نیز نشان داده شده است.

در بالا و پایین ساختار شرایط مرزی جاذب PML[۳]و در جهت-های دیگر شرایط مرزی دوره‌ای اعمال شده است. یک موج تخت از بالا به ساختار تابیده می‌شود و میزان نور بازتاب شده از یک صفحه مرزی که در پشت منبع نور قرار گرفته است اندازه گیری می‌شود. برای مشخص کردن محل تشدید پلاسمون سطحی کافی است میزان بازتاب را مورد بررسی قرار دهیم.



شکل۱: ساختار سه بعدی مدلسازی شده در نرم‌افزار لومریکال

با تغییر پارامترهای مختلف در مدل، میزان جابجایی تشدید پلاسمون سطحی جایگزیده نسبت به تغییرات ضریب شکست محیط بالای ساختار را اندازه گرفته و با کمک آن حساسیت آن را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

نتایج و بحث

به عنوان اولین آزمایش دوره تناوب را ۵۰۰ نانومتر، ضخامت لایه طلا ۴۰ نانومتر، ضخامت نیکل ۵۰ نانومتر، شعاع و

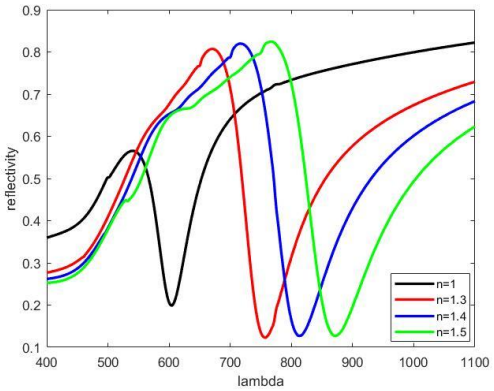
[۱] Localized Surface Plasmon Resonance

[۲] Finite Deference Time Domain

[۳] Perfectly Matched Layer

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

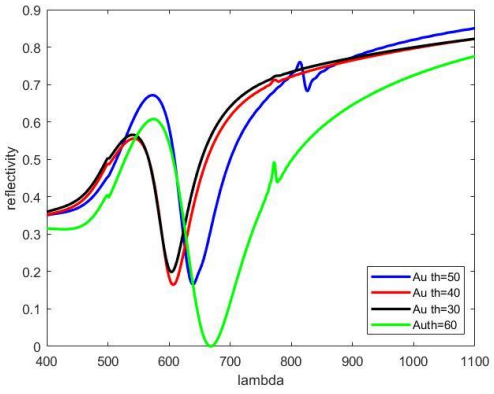
ضخامت دیسک طلا به ترتیب ۲۰۰ و ۴۰ نانومتر درنظر گرفته-ایم. سپس ضریب شکست محیط اطراف را از ۱ تا ۱٫۵ تغییر می‌دهیم. نمودار بازتاب را برحسب طول‌موج رسم می‌کنیم. حساسیت حسگرهای SPR با استفاده از پارامترهای زیر تعیین می‌شود: تیز بودن نمودار تشدید، جابجایی طیف تشدید[۸] که در این مقاله جابجایی طیف تشدید را ملاک قرار داده‌ایم. با توجه به نمودار به دست آمده(شکل۲) می‌بینیم که طول‌موج تشدید پلاسمون سطحی بین ۶۰۳٫۳ تا ۸۷۱٫۳ نانومتر تغییر می‌کند. می‌توان گفت ساختار از حساسیت بسیار بالایی نسبت به تغییر ضریب شکست محیط اطراف برخوردار است.



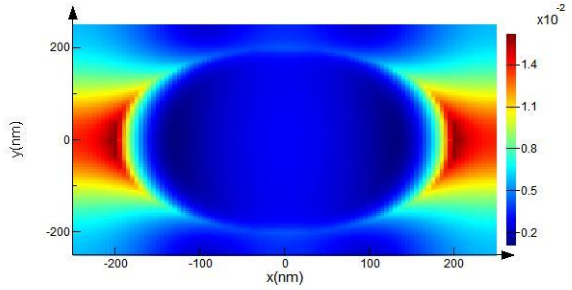
شکل۲: نمودار بازتاب بر حسب طول موج در دوره تناوب ۵۰۰ نانومتر

سپس به بررسی دیسک طلا با ضخامت‌های مختلف می‌پردازیم. شعاع دیسک را ۲۰۰ نانومتر و ضخامت آن را ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ نانومتر در نظر گرفته و نمودار بازتاب بر حسب طول‌موج را رسم می‌کنیم (شکل ۳).

علاوه بر اینکه با افزایش ضخامت دیسک طلا باعث افزایش طول‌موج تشدید پلاسمون سطحی می‌شود، میزان بازتاب نیز کاهش می‌یابد در نتیجه میدان مغناطیسی در کمینه، بیشترین مقدار را خواهد داشت (شکل ۴).



شکل۳: نمودار بازتاب نسبت به طول‌موج در ضخامت‌های مختلف دیسک از جنس طلا

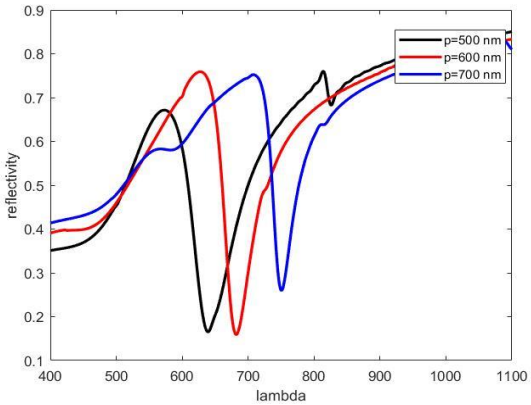


شکل۴: میدان مغناطیسی در کمینه نمودار بازتاب با ضخامت لایه طلا ۶۰ نانومتر (طول‌موج ۶۳۷/۶۸۱ نانومتر)

مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت دیسک طلا نمودار بازتاب به سمت طول‌موج‌های بالاتر شیفت پیدا می‌کند.

در مرحله بعدی تمامی شرایط را ثابت نگه داشته و دوره تناوب را ۱۰۰ نانومتر، ۱۰۰ نانومتر مطابق شکل۵ تغییر می‌دهیم (۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ نانومتر).

با افزایش دوره تناوب، مینیمم نمودارهای بازتاب به سمت طول موج‌های فروسرخ شیفت داده می‌شود.



شکل۵: نمودار بازتاب بر حسب طول‌موج برای دوره تناوب‌های متفاوت

سپس برای دو دوره تناوب ۵۰۰ و ۶۰۰ نانومتر نمودار بازتاب را برای ضریب شکست‌های مختلف بین ۱ تا ۱٫۵ نانومتر رسم می‌کنیم و مشاهده می‌کنیم برای دوره تناوب ۵۰۰ نانومتر طول‌موج تشدید پلاسمونی سطحی بین ۶۰۴٫۳۹۶ تا ۸۷۱٫۲۸۷ نانومتر و برای دوره تناوب ۶۰۰ نانومتر طول‌موج بین ۶۸۲٫۱۷۱ تا ۱۰۱۸٫۵۲ تغییر می‌کند. یعنی علاوه بر این‌که افزایش دوره تناوب خود باعث افزایش حساسیت بیوسنسور است، با تغییر ضریب شکست این حساسیت بیشتر می‌شود (شکل ۶). حساسیت که با پارامترS نشان داده می‌شود، به صورت

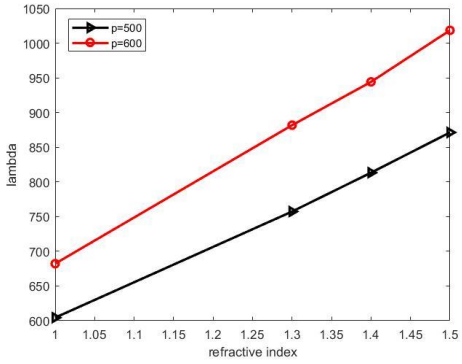
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

$S = \frac{\Delta\lambda_{max}}{\Delta n}$ تعریف می‌شود که واحد آن nm/RIU می‌باشد. $\Delta\lambda$ تغییرات طول‌موج و Δn تغییرات ضریب شکست محیط اطراف می‌باشد[۹]. در نتیجه

S(P=500nm)=533.782nm/RIU و

S(P=600 nm) =672.698nm/RIU

پس با افزایش دوره تناوب حساسیت در حسگر در حدود ۱۳۹ nm/RIU افزایش می‌یابد.



شکل۶: مقایسه شیب خط حاصل از بیشنه قله‌های تشدید پلاسمون سطحی برای دو دوره تناوب ۵۰۰ و ۶۰۰ نانومتر

نتیجه‌گیری

در این مقاله با بررسی تاثیر عوامل مختلف بر روی عملکرد نانوحسگرهای مبتنی بر بلورهای نانوپلاسمونیک نشان دادیم که می‌توان با انتخاب مناسب پارامترهای بلور، حساسیت نانوحسگر و ناحیه طیفی قابل استفاده را به‌طور دلخواه تغییر داد. محدوده طیفی مورد بررسی در ناحیه مرئی-فروسرخ نزدیک انتخاب شد. پارامترهای گوناگون شامل دوره تناوب، ضخامت لایه طلا و ضریب شکست محیط اطراف مورد مطالعه قرار گرفت. افزایش ضخامت دیسک طلا باعث افزایش طول‌موج تشدید پلاسمون سطحی می‌شود، میزان بازتاب نیز کاهش می‌یابد در نتیجه میدان مغناطیسی در دره بیشینه حالت را خواهد داشت. همچنین افزایش دوره تناوب باعث افزایش حساسیت نانوحسگر است که با تغییر ضریب شکست این حساسیت بیشتر می‌شود. لازم به ذکر است که با افزایش ضخامت دیسک طلا بازتاب به سمت طول‌موج‌های بالاتر شیفت پیدا می‌کند.

مرجع‌ها

[1] White, I. M., & Fan, X. (2008). On the performance quantification of resonant refractive index sensors. Optics express, 16(2), 1020-1028.

[2] Ahn, H., Song, H., Choi, J. R., & Kim, K. (2018). A localized surface plasmon resonance sensor using double-metal-complex nanostructures and a review of recent approaches. Sensors, 18(1), 98.

[3] F. Cui, and H. S. Zhou, “Diagnostic methods and potential portable biosensors for coronavirus disease 2019”, Biosensors and bioelectronics, Vol. 165, pp. 1-9, 2020.

[4] T. Lai, Q, Hou, H. Yang, X. Luo, and M. Xi, “Clinical application of a novel sliver nanoparticles biosensor based on localized surface plasmon resonance for detecting the microalbuminuria”, Acta Biochim Biophys Sin, Vol. 42, No. 11, pp. 787-792, 2010.

[5] S. Zhu, H. Li, M. Yang, and SW. Pang, “High sensitivity plasmonic biosensor based on nanoimprinted quasi 3D nanosquares for cell detection”, Nanotechnology, Vol. 27, No. 29, pp.1-13, 2016.

[6] Himstedt, R., Rusch, P., Hinrichs, D., Kodanek, T., Lauth, J., Kinge, S., ... & Dorfs, D. (2017). Localized surface plasmon resonances of various nickel sulfide nanostructures and Au–Ni3S2 core–shell nanoparticles. Chemistry of Materials, 29(17), 7371-7377.

[7] Pawar, G. S., Elikkottil, A., Pesala, B., Tahir, A. A., & Mallick, T. K. (2019). Plasmonic nickel nanoparticles decorated on to LaFeO3 photocathode for enhanced solar hydrogen generation. International Journal of Hydrogen Energy, 44(2), 578-586.

[8] Ahn, H., Song, H., Choi, J. R., & Kim, K. (2018). A localized surface plasmon resonance sensor using double-metal-complex nanostructures and a review of recent approaches. Sensors, 18(1), 98.

[9] Li, M., Cushing, S. K., & Wu, N. (2015). Plasmon-enhanced optical sensors: a review. *Analyst*, *140*(2), 386-406.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]