





# زیستحسگر LSPR با استفاده از نانوساختار پلاسمونی دمبلشکل

محبوبه هاشمی٬ ، محمدجواد باورصادیان خواه٬ ، دکتر مجید ابن علی حیدری٬ ، دکتر علیاکبر ابن علی حیدری٬

<sup>۱</sup> دانشگاه شهرکرد – دانشکده فنی و مهندسی – گروه برق

۲ دانشگاه فرهنگیان – گروه فیزیک

چکیده – در این مقاله، طراحی یک زیستحسگر بر اساس تشدید پلاسمون سطحی جایگزیده LSPR در نانو ساختار پلاسمونی ارائه شده است. تغییر ضریب شکست در محیط پیرامون نانوساختارهای پلاسمونی منجر به جابجایی طیف LSPR میشود. با افزایش ضریب شکست محیط، طیف تشدید LSPR این ساختارها جابجایی قرمز پیدا میکند. با استفاده از این ویژگی، میتوان اتصال ملکولها در سطح را بدون نیاز به برچسب گذاری قبلی شناسایی کرد. در این مقاله نانوساختار دمبل شکل جدیدی معرفی و امکان استفاده از آن در زیستحسگر نوری بررسی شده است. نتایج شبیهسازی عددی به روش *FDTD* دستیابی به حساسیت ۱۳۲۳*nm*/*RIU* با شاخص شایستگی ۵/۶ را نشان داده است.

حسگر پلاسمونی، تشدید پلاسمون سطحی جایگزیدہ، زیست حسگر، نانوساختار کلید واژه- زیست

# LSPR Biosensor Using a Dumbbell-Form Plasmonic Nanostructure

M.Hashemi1 , M.J.Bavarsadiankhah1 , M.Ebnali-heidari1 , A.A.Ebnali-heidari2

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, University of Shahrekord, Shahrekord

<sup>2</sup> Farhangian University

Abstract-In this paper, design of biosensor structure based on localized surface plasmon (LSPR) of plasmonic nanostructures is presented. Change in refrective index at boundary of metal-dielectric lead to a shift in resonance peak of LSPR structures. Plasmonic nanostructurs are very sensitive to changes of surrounding environment. Increasing refractive index of surrounding environment cause a red shift in LSPR spectrum of these structures. Thus with this feature we can distinguish absorption or connection of molecules to the surface without prelabeling (Label Free). In this article we introduced a new dumbbell shape nanoparticle and its ability in biosensing is investigated. Numerical simulations show that a high sensitivity of 1323nm/RIU for refractive index changes of surrounding the suspended gold nanostructure with a figure of merit (FOM) of 5.6.

Keywords:optical biosensing, localized surface plasmon resonance, biosensor, nono structure

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت <u>WWW.Opsi.ir</u>قابل دسترسی باشد

#### ۱– مقدمه

زیست حسگرها با قابلیت شناسایی سریع زیست ملکول ها در کاربردهای مختلف پزشکی مورد نیاز هستند[1]. زیست حسگرهای نوری به علت قدرت تشخیص و حساسیت بالا، اندازهی کوچک و صرفهی اقتصادی جایگزین مناسبی برای روشهای شناسایی سنتی هستند. یکی از زیست حسگرهای نوری که با پیشرفتهای روز کاملا سازگار بوده و میتواند گام بزرگی در توسعه شناسایی ملکولهای زیستی محسوب شود، زیست حسگر مبتنی بر تشدید پلاسمون سطحی است که طی سالهای اخیر توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است[۱و۲]. در حوزه نانو ساختار های های پلاسونی، برهم کنشهای نور و ماده در ساختارهای فلزی در ابعاد کمتر از طول موج نور بررسی می شود. برهم کنش موج الكترومغناطيسي با نانوساختار از طريق جفت شدكي با الكترون هاي آزاد سبب القا نوسانات جمعی میشود. هنگامی که بسامد تابش الكترومغناطيسي با بسامد نوسانهاي جمعي همخواني داشته باشد، منجر به ایجاد مدهای پلاسمون مقید سطحی موسوم به تشدید پلاسمون سطحی جایگزیده LSPR می شود. نانوساختارهای پلاسمونی شامل یک لایه فلز و یک لایه دیالکتریک پوشاننده هستند که در طیف خاموشی (پراکندگی و جذب) آنها قلههایی دیده می شود. قلههای تشدید LSPR به نوع فلز و دیالکتریک، شکل نانوساختار و به محیط پیرامون آن حساس هستند و تغییرات ضریب شکست ناشی از برهم کنشهای زیستملکولی در سطح حسگر را اندازه گیری می کنند [۲-۵]. تغییر ضریب شکست ناشی از برهم کنشهای زیستملکولی در سطح حسكر نانوساختار يلاسمونى باعث جابجايي طيف تشديد LSPR آن می شود، بنابراین اگر بتوان لایه ای جاذب بر سطح نانوساختار پلاسمونی نشاند که زیستملکولهای هدف در محلول را جذب کند، میتوان از میزان تغییر ضریب شکست در سطح که وابسته به غلظت زیست ملکول های هدف است برای شناسایی و تعیین میزان غلظت و حتی برهم کنشهای زیستملکولی در محلول استفاده کرد[۶]. در حوزهی رو به رشد پلاسمونیک، پژوهشهای گستردهای برای کاربردهای جدید در حوزه فناوری انجام شده است. از جمله این کاربردها، می توان به استفاده از نانوذرهها و نانو ساختارهای پلاسمونی در فناوری سلولهای خورشیدی، نانواپتیک، زیستحسگرها و بسیاری از کاربردهای دیگر اشاره کرد[۷-۹] .در این مقاله، با بررسی مشکلات پیش رو، نانوساختار دمبل شکل جدیدی معرفی و اثرات تقویت میدان نوری در حسگر نوری مبتنی بر تغییرات ضریب شکست محیط پیرامون آن بررسی شده است.

# ۲- ساختار نانوساختار پیشنهادی

شکل ۱، طرح وارهای از حسگر پلاسمونی مبتنی بر نانوساختار معلق در محلول را نشان می دهد. در این ساختار از طلا برای مدل سازی زیست-حسگر پلاسمونی استفاده شده است. با وجود این که نانوساختارها از جنس نقره حساسیت بهتری نسبت به تغییر ضریب شکست محیط نشان می دهند[۱۰] اما به علت این که این فلز در محلولهای آبی اکسید می شود و ترکیباتی ایجاد می کند که رفتار پلاسمونی قابل از نانوساختار از جنس طلا استفاده شده است.



شکل ۱: نمای سه بعدی مدل زیستحسگر مبتنی بر نانوذرات معلق در محلول.dl قطر نانوسیم مرکزی، Δα اختلاف شعاع نانو میله با نانودیسکهای موضعی، Llضخامت نانودیسکها و L2 فاصله بین آنها و dt ضخامت لایه اتصال زیستملکولی در سطح زیستحسگر است. ثابت دیالکتریک هر لایه در شکل مشخص شده است.

# ۳- شبیه سازی نانوساختار پیشنهادی

برای تحلیل آثار میدان الکترومغناطیسی، از دادههای تجربی مدل جانسون و کریستی مربوط به بخشهای حقیقی و موهومی پذیرفتاری مختلط طلا در مدلسازی حسگر پلاسمونی به روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) استفاده شده است[۱۱-۱۳]. ضخامت لایهی اتصال زیستملکولی به طور یکنواخت در سطح زیستحسگر، tb=۱۰nm در نظر گرفته شده است که به طور تقریبی کمتر از طول محوشوندگی میدان LSPR نانوساختار است[۱۴]. محلولهای زیستی غیرجاذب و غیرمغناطیسی هستند در نتیجه برای شبیهسازی اثر تغییر ضریب شکست محیط در اثر برقراری اتصالات زیستملکولی سطحی، ضریب شکست کلی محیط پیرامون نانوساختار را در محدودهی ضریب شکست محلول های زیستی تغییر می دهیم. شبیه سازی با استفاده از نرم افزار lumerical، برای حل معادلات ماکسول به روشFDTD در حالت سه بعدی و با استفاده از یک منبع موج تخت در گستره طول موج ۲۲۰۰nm-۲۲۰۰ انجام شده است. برای محاسبهی طیف خاموشی، از نمایه میدان پراکنده شده و شدت میدان استفاده می کنیم [۱۵]. برای اینکه انرژی الکترومغناطیسی تابیده شده به مرز جذب شود و بازتاب مرز کاهش یابد، از شرایط مرزی PML استفاده شده است. نوسان الكترون هاى نوار رسانش با بسامدى برابر با بسامد موج الكترومغناطيسي تابشی منجر به ایجاد یک تشدید قوی LSPR در طیف نوری می گردد. طول موج این تشدید به شکل نانوساختار، محیط پیرامون آن و جنس فلز به کار رفته بستگی دارد[۱۶،۱۷]. تغییر ضریب شکست محلول پیرامون نانوساختار را میتوان معادل با جابجایی محل طول موج تشدید LSPR در نظر گرفت[۱۷]. شکل۲ مشخصه برانگیختگی نانوساختار با قطبش-TM موج تخت را نشان می دهد. در این شکل پیکان با رنگ ارغوانی، جهت تابش فرودی و پیکان با رنگ آبی، قطبش میدان را نشان مىدهد. شكل٣ طيف سطح مقطع خاموشى نانوساختار پيشنهاد شده را با مشخصاتd<sub>1</sub>=۴۰nm , ΔR=۶۰nm , L<sub>1</sub>=8۰nm , L<sub>1</sub>=۴۰ nm و همچنین برای یک نانوکره طلای منفرد با شعاع ۵۰nm در هوا (RI=۱) برای مقایسه را نشان میدهد. همانطور که در شکل مشاهده میشود، در طیف خاموشی نانوساختار طراحی شده یک قله در طولموج ۵۰۷nm و یک قلهی قویتر در طول موج ۸۵۶nm وجود دارد. درحالی که در شکل ۳-ب، وجود یک تشدید قابل توجه و غالب در محدودهی طول موجهای بلندتر، ۱۹۱۰nm کاملاً مشهود است. در شکل ۴-الف نتایج شبیهسازی جابجایی طیف خاموشی در نانوساختار پیشنهادی نسبت به

تغییر ضریب شکست محلول زیستی در محدوده ۱/۴۴ – ۱/۳۸۵ شامل جابجایی قلهی اول و دوم و در شکل۴-ب جابجایی قلهی تشدید سوم، نشان داده شده است. همان طور که جهت جابجایی طیف نشان میدهد، افزایش ضریب شکست محیط سبب جابجایی قلههای تشدید LSPR به سمت طول موجهای بلندتر (جابجایی قرمز) می شود.



شکل۲: مدل نانوساختار شبیهسازی شده در نرمافزار Lumerical همراه با نمایش جهت انتشار(X) و قطبش منبع نوری(E). الف) نمای دو بعدی ب)نمای سه بعدی



شکل۳: الف) نتایج شبیهسازی طیف سطح مقطع خاموشی نانوساختار پیشنهادی (آبی) و نانوکره با شعاع ۵۰nm (سبز)، در هوا(RI=۱) با ΔR=۶۰nm IL2=۵۰nm،L1=۴۰nm، ما۲=۵۰ و ب)۵۶-۵۵۶ و سومین قلهی تشدید LSPR غالب در ۱۴۶۰nm (۲۰۰۰ می دهد.

## ۴- حساسیت زیستحسگر طراحی شده

حساسیت زیستحسگر، نسبت جابجایی قلهی تشدید به میزان تغییر ضریب شکست محیط میباشد و طبق رابطه زیر تعریف میشود:

$$S = \frac{\Delta \lambda_{LSP}}{\Delta n} \tag{1}$$

در این رابطه، (mm) (Δλ<sub>LSP</sub> بابجایی قلهی تشدید LSPR ناشی از تغییر ضریب شکست محیط به اندازهی Δ است. بیشتر مطالعات در این زمینه، نشان دادهاند که جابجایی قلههای تشدید در طول موجهای مشابه منجر به حساسیت مشابه نسبت به تغییرات ضریب شکست محیط پیرامون نانوساختار میشوند [۱۸]. بنابراین پیشبینی میشد که حساسیت تشدید اول به علت نزدیکی طول موج تشدید آن به طول موج تشدید نانوکره، در حدود حساسیت نانوکره طلا با شعاع ۵۰nm خواهد بود و نتایج شبیه سازی نیز این موضوع را تایید کرد.



شکل ۴: جابجایی طیف خاموشی نانو ساختار پیشنهادی نسبت به تغییر ضریب شکست محیط در محدوده ۱/۳۳۵-۱/۴۴ الف)قلهی اول و دوم تشدید LSPR در محدوده طول موج ۴۰۰m - ۱۴۰۰ ب) تشدید سوم LSPR در محدوده طولموج ۲۲۰۰ مسان نشان داده شده است.

نمودار حساسیت زیستحسگر طراحی شده نسبت به تغییر ضریب شکست محلول زیستی پیرامون، در شکل۵ نشان داده شده است. برای قلهی اول تا سوم در طیف سطح مقطع خاموشی نانوساختار پیشنهادی، به ترتیب حساسیتهای ۱۳۴nm/RIU (خاکستری)، ۶۵۲ nm/RIU (آبی) و ۱۳۵۲ nm/RIU (قرمز) محاسبه شده است. برای نانوکره طلا با شعاع ۵۰nm حساسیت ۱۶۲nm/RIU (سبز) به دست آمده است که مطابق با نتايج تجربي مي باشد [١٧-٢٠]. بنابراين، مي توان نتيجه گرفت که هرچه طول موج تشدید بزرگتر باشد، حساسیت بهتری را نسبت به تغییر ضریب شکست محیط پیرامون از خود نشان میدهد. به این ترتیب نتایج بسیار بهتر در قسمت سوم طیف و در طول موجهای بلندتر دیده میشود. شکل۳-ب محل و شدت این تشدید را نشان میدهد. اختلاف دامنهى طيف سطح مقطع خاموشي سه قله به وضوح مشخص است و بهبود قابل توجه حساسیت شناسایی ملکولهای زیستی در قله-ی سوم طیف، مورد انتظار میباشد. قله ی تشدید سوم به علت دارا بودن طولموج بالا و FWHM اندک در طيف باعث شده است که اين نانوساختار به شاخص شایستگی (FOM) ۵/۶ دست یابد. شاخص شایستگی، نسبت حساسیت زیستحسگر به پهنای خط طیف تشدید (FWHM) است و از رابطه ی زیر حاسبه می شود [۲۱]:

$$FOM = \frac{\Delta \lambda_{LSP} / \Delta n}{FWHM}$$
(Y)



شکل ۵: نمودار جابجایی قلههای تشدید LSPR بر حسب تغییر ضریب شکست محلول زیستی پیرامون نانوساختار. طبق شکل به ترتیب برای قلهی اول تا سوم در طیف سطح مقطع خاموشی نانوساختار پیشنهادی حساسیتهای ۱۳۴nm/RIU (خاکستری)، ۶۵۲nm/RIU (آبی)، ۱۳۵۲nm/RIU (قرمز) و برای نانوکره طلا با شعاع ۵۰nm حساسیت ۱۶۲nm/RIU (سبز) به دست آمده است.

#### ۵-نتیجه گیری

در این مقاله زیستحسگری مبتنی بر تشدید پلاسمون سطحی جایگزیده با استفاده از نانوساختار دمبل شکلی از جنس طلا معرفی شد. نتایج نشان دادند که قلههای تشدید مرتبه بالاتر نانو ساختار پیشنهادی، دارای حساسیت بیشتری نسبت به تغییر ضریب شکست محیط پیرامون هستند. تشدید در طول موج ۱۸۷۴ منجر به حساسیت بالای ۱۳۲۳nm/RIU همراه با شاخص شایستگی بالای ۵/۶ شده است. با تغییر اندک ابعاد نانوساختار، طول موج تشدید سوم به طول موج بلند ۱۹۱۰nm با تغییر کرد و توانستیم به حساسیتی برابر با ۱۳۵۲nm/RIU با شاخص شایستگی ۵/۴ دست یابیم.

#### مراجع

- Martin, J., et al. "Ultra-sensitive plasmonic nanosensors for biochemical detection. in SPIE BiOS", International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [2] Aydin, D., "Functionalization of Photonic Crystal Slab Biosensors", King's College, 2013.
- [3] Branton, D., et al., "The potential and challenges of nanopore sequencing". Nature biotechnology, 26(10): pp. 1146-1153, 2008.
- [4] Shendure, J.A., et al., "Overview of DNA sequencing strategies". Current Protocols in Molecular Biology, pp. 7.1. 1-7.1. 23, 2008.
- [5] Gramotnev ,D.K. and S.I. Bozhevolnyi, "Plasmonics beyond the diffraction limit". Nature Photonics, 4(2), pp. 83-91, 2010.
- [6] Lu, X., et al., "Chemical synthesis of novel plasmonic nanoparticles". Annual review of physical chemistry, 60, pp. 167-192, 2009.
- [7] S. A., Maier, "Plasmonics: fundamentals and applications". Springer, 2007.
- [8] C. Escobedo, "On-chip nanohole array based sensing: a review". Lab on a Chip, 13(13), pp 2445-2463, 2013.
- [9] M. Janipour, T. Pakizeh, and F. Hodjat-Kashani. "Strong optical interaction of two adjacent rectangular nanoholes in a gold film", Optics express, 21(26), pp31769-31781, 2013.
- [10] Haes, A.J., et al., "Nanoscale optical biosensor: short range distance dependence of the localized surface plasmon resonance of noble metal nanoparticles". The Journal of Physical Chemistry B, 108(22), pp. 6961-6968, 2004.
- [11] Rodríguez-Lorenzo, Laura, et al. "Plasmonic nanosensors with inverse sensitivity by means of enzyme-guided crystal growth." Nature materials, 11, pp 604-607, 2012.
- [12] Johnson, P.B. and R.-W. Christy, "Optical constants of the noble metals". Physical Review B, 6(12), pp. 4370-4379, 1972.
- [13] Palik, E.D., "Handbook of optical constants of solids." Academic press, Vol. 3. , 1998.
- [14] Hutter, E., et al., "Role of substrate metal in gold nanoparticle enhanced surface plasmon resonance imaging." The Journal of Physical Chemistry B, 105(1), pp .12-18, 2001.
- [15] J. Becker, "Plasmons as sensors", Springer Science & Business Media, 2012.
- [16] C. L. Nehl, H. Liao, and J. H. Hafner, "Optical properties of star-shaped gold nanoparticles", Nano letters, vol. 6, pp. 683-688, 2006.
- [17] A. Jakab, C. Rosman, Y. Khalavka, J. Becker, A. Trügler, U. Hohenester, et al., "Highly sensitive plasmonic silver nanorods", ACS nano, vol. 5, pp. 6880-6885, 2011.

- [18] Z. Yu and S. Fan, "Extraordinarily high spectral sensitivity in refractive index sensors using multiple optical modes", Optics express, vol. 19, pp. 10029-10040, 2011.
- [19] A. B. Evlyukhin, et al., "Collective resonances in metal nanoparticle arrays with
- dipole-quadrupole interactions", Physical Review B, vol. 85, pp. 245411, 2012.
  Z. Yong, D. Y. Lei, C. H. Lam, and Y. Wang, "Ultrahigh refractive index sensing performance of plasmonic quadrupole resonances in gold nanoparticles", Nanoscale research letters, vol. 9, pp. 1-6, 2014.
- [21] Sherry, L.J., et al., "Localized surface plasmon resonance spectroscopy of single silver nanocubes", Nanoletters, (10)5, pp. 2034-2038, 2005.