بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

# طراحی رزوناتورهای چندلایه با استفاده از GZO/ZnO برای تنظیم ویژگی‌های پلاسمونیکی در طیف مادون قرمز

زهرا سعیدی نیا، سعید گل محمدی هریس

دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه تبریز

**چکیده – در این مقاله به بررسی رزوناتور های چند لایه پلاسمونیکی با استفاده از نیمه هادی های زینک اکساید و زینک اکساید آلاییده شده با عنصر گالیوم پرداخته شده است و تاثیر پارامترهای ساختاری بر روی ویژگی های پلاسمونیکی ساختار بررسی شده است. نشان داده شده است که با تنظیم بهینه تعداد لایه ها و شکل نانو ذرات می توان تعداد، مکان و شدت رزونانس ها را در ساختار کنترل کرد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که می توان با افزودن یک لایه نازک طلا به ساختار تعداد فانو رزونانس ها را افزایش داد. این ساختار برای طراحی** دستگاه‌های پلاسمونیک در بازه مادون قرمز مانند **بیو سنسورهای چند طول موجی، سنسورهای بیو شیمیایی خیلی حساس و موجبرهای نوری مناسب می‌باشد.**

کلید واژه- پلاسمون رزونانس سطحی، فانو رزونانس، نانو ساختارهای چند لایه، اکسیدهای هادی شفاف

# Design of multilayer resonator using GZO/ZnO for plasmonic properties tuning in the Infrared specttrum

Zahra Saeidinia, Saeed Golmohammadi Heris

School of Engineering Emerging Technologies, University of Tabriz

Abstract- In this paper, plasmonic multilayer resonators using zinc oxide (ZnO) and Gallium doped ZnO are investigated and the effect of geometrical parameters on plasmonic properties of the structure has been studied. It has been shown that the intensity peak and number of resonances can be controlled by optimized number of layers and shape of nanoparticles. Our simulation results show that, we can increase the number of fano resonance with adding a thin Au layer on the substrate. This structure permits design of IR plasmonic devices such as multi-wavelength optical sensors, precise bio-chemical sensor and plasmonic waveguides.

Keywords: Surface Plasmon Resonance, Fano resonance, Multilayer nanostructure, transparency conducting oxide

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02 ]



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

## ۱- مقدمه

از اواخر دهه ۱۹۹۰، پلاسمونیک به عنوان یک حوزه توجهات زیادی را به خاطر توانایی فراهم سازی کاربردهای فوتونیک زیر طول موجی به دست آورده است. نوسان جمعی الکترون‌های هدایت در نانوساختارهای فلزی، رزونانس پلاسمون سطحی (SPR) نامیده می‌شود که شدت و مکان SPR به شدت به شکل، سایز، ترکیب ساختار و ویژگی‌های دی‌الکتریک محیط وابسته است[۳-۱]. این خصوصیات باعث شده است تا بتوان با استفاده از نانوساختارهای پلاسمونیک فلزی انواع سنسورهای نوری را طراحی و ساخت. رزونانس پلاسمون‌های سطحی جایگزیده (LSPR) در نانوساختارهایی رخ می‌دهند که ابعادشان از طول موج نور فرودی کمتر باشد. LSPR شدیدا به ضریب شکست محیط وابسته است که این یک مسیر دست‌یابی برای سنجش ضریب شکست را فراهم می‌کند که اساس سنسورهای پلاسمونیک است[۴].

در سیستم‌های پلاسمونیکی مبتنی بر فلزات، به سبب پشتیبانی از نوسانات جمعی الکترون‌های آزاد و توانایی تمرکز نور در مقیاس نانو، فلزات مواد انتخابی هستند اما این فلزات که مهم‌ترین آنها نقره و طلا هستند در نواحی مرئی و مادون قرمز نزدیک (NIR) به دلیل معایبی چون تلفات بالا، ضریب گذردهی حقیقی منفی خیلی بزرگ و عدم تنظیم پذیری ویژگی‌هایشان ساخت دستگاه‌های پلاسمونیک را دچار چالش کرده‌اند[۵, ۶]. نشان داده شده است که اکسیدهای هادی شفاف (TCO) به دلیل تلفات کمتر، ضریب گذردهی الکتریکی حقیقی منفی کوچک در NIR کاندیداهای خوبی برای مواد پلاسمونیک هستند[۷]. قابلیت آلایش بالا نسبت به دیگر نیمه‌هادی‌ها، پایداری شیمیایی و مکانیکی، ویژگی‌های نوری قابل تنظیم و تلفات نوری کم به دلیل گاف وسیع و نرخ واهلش پائین از دیگر مزایای TCOها هستند[۹-۷]. در این بین زینک اکساید (ZnO) به دلیل حلالیت جامد بالا برای ناخالصی مانند گالیوم می‌تواند یک گزینه مناسب باشد. نشان داده شده است که درصد بهینه Ga برای آلائیدن ZnO برای داشتن مناسب‌ترین خواص پلاسمونیکی در بازه NIR برابر ۶ درصد است[۱۰, ۱۱].

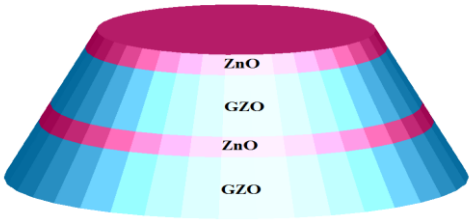
فانو رزونانس به طور مرسوم در سیستم‌های کوانتومی در نظر گرفته می‌شدند اما نانوساختارهایی مانند دایمرها، دایمرهای نا هم جنس، دایمرهای میله شکل، نانودیسک‌ها با شکست تقارنشان، هپتامرها، اوکتامرها و دیگر ساختارهای کلاستری پیچیده‌تر نیز فانو رزونانس‌ها را ارئه می‌دهند[۱۲]. با وجود بررسی ساختارهای پلاسمونیک متفاوت برای سنسورهای LSPR، ساختارهای شامل نانوذرات چندلایه و اثر تعداد لایه‌ها روی پاسخ نوری ساختار به طور جدی بررسی نشده‌اند. اخیرا یک ساختار چهار لایه شامل آرایه‌ای آز نانودیسک‌های چندلایه با لایه‌های متناوب GZO/ZnO مورد مطالعه قرار گرفته است و نشان داده شده است که با کنترل ضخامت لایه ZnO می‌توان مکان فانو رزونانس‌ها را کنترل کرد[۲]. در مقاله حاضر اثر شکل نانوذرات، تعداد لایه‌ها و افزدن یک لایه نازک طلا بررسی شده است. نشان می‌دهیم که با کنترل تعداد لایه‌ها می‌توان مکان و تعداد فانورزونانس‌ها را تنظیم کرد. ساختار رزوناتور شامل نانودیسک‌های چندلایه‌ی ارائه شده برای کاربردهای پلاسمونیک مانند بیو حسگرهای چندطول موجی، پراکندگی رامان سطح افزایشی و کاربردهای هدایت پرتو نور مانند موجبر پلاسمونیک مناسب می‌باشد[۲, ۱۲].

## ۲- روش مدل سازی

در این مقاله یک ساختار پلاسمونیک شامل آرایه نانودیسک‌های چندلایه با ضخامت کلی ۳۲۰ نانومتر بررسی می‌شود. در اولین شبیه سازی نانودیسک‌های تک لایه GZO شبیه سازی شده و سپس مرحله به مرحله بر تعداد لایه‌ها افزوده شده است. در نانودیسک‌های چندلایه نسبت ضخامت لایه GZO به ZnO، ۳ به ۱ در نظر گرفته شده است. مثلا در یک نانودیسک چهار لایه ضخامت GZO و ZnO به ترتیب ۱۲۰ به ۴۰ نانومتر می‌باشد. در تمام مراحل شبیه سازی، فاصله بین نانودیسک‌ها ۱۰۰ نانومتر و شعاع بالایی و پایینی نانودیسک‌ها ۱۵۰ و ۲۵۰ نانومتر انتخاب شده‌اند و یک لایه سیلیکون به عنوان بستر استفاده شده است. شکل۱ ساختار یک نانودیسک چهار لایه را نشان می‌دهد. تابع دی‌الکتریک فیلم‌ها با منطبق سازی مدل درود-لورنتز با داده‌های الیپسومتری (Ellipsometry) بازیابی شده‌اند[۸, ۹]. در نیمه‌هادی‌ها الکترون‌های هدایت که مانند گازالکترونی رفتار می‌کنند با مدل درود توصیف می‌شوند. مدل لورنتز برای توصیف جذب فوتون‌ها با الکترون‌های ظرفیت استفاده می‌شود. رابطه زیر مدل درود-لورنتز را نشان می‌دهد.

$$\varepsilon(\omega)=\varepsilon_{\infty}-\frac{\omega_p^2}{\omega\left(\omega+i\Gamma_p\right)}+\frac{f_1\omega_1^2}{\omega_1^2-\omega^2-i\omega\Gamma_1} \quad (۱)$$

که $\varepsilon_{\infty}$ ضریب گذردهی زمینه، $\omega_p$ فرکانس پلاسما، $\Gamma_p$ نرخ آرام سازی حامل، نیروی اسیلاتور لورنتز با فرکانس مرکزی $\omega_1$ و میرایی $\Gamma_1$ است[۲, ۶].




شکل ۱: شماتیک یک نانودیسک چهار لایه متناوب

## ۳- نتایج وبحث

در ابتدا نمودار انتقال را برای آرایه ای از نانودیسک‌های تک لایه GZO در شکل ۲ رسم شده‌است. براساس این نمودار دو فانورزونانس قوی درطول موج‌های ۱۵۰۰ و ۴۲۰۰ نانومتر بوجود آماده است. اولین رزونانس به دلیل محلی شدن میدان الکتریکی در بالای سطح نانودیسک و گوشه‌های آن است اما دومین رزونانس به دلیل به دام افتادن نور در فصل مشترک نانودیسک و بستر می‌باشد.

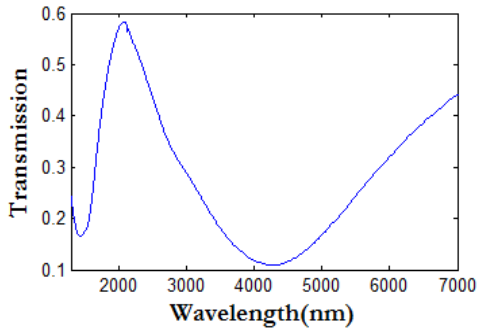
شکل‌های ۳ و ۴ و۵ نمودار عبور را به ترتیب برای آرایه نانودیسک‌های



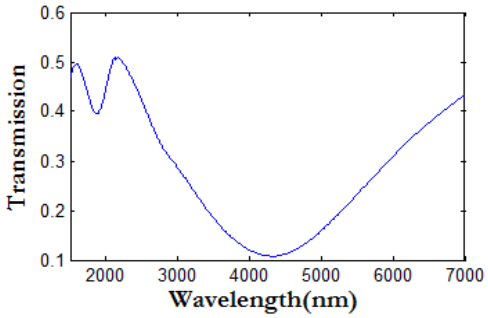
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02 ]

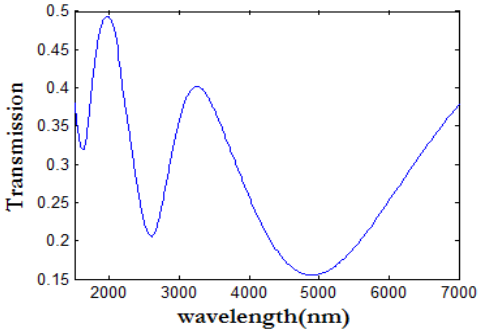
دو لایه و سه لایه و چهار لایه نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۳، افزودن یک لایه ZnO فقط باعث شیفت قرمز اولین فانو می‌شود. اما با افزودن یک لایه سوم به نانودیسک‌ها تعداد فانور رزونانس ها افزایش یافته و شیفت قرمز بزرگی در مکان آن‌ها مشاهده می‌شود. فانو رزونانس سوم در طول موج ۲۷۰۰ نانومتر به دلیل وجود LSPR حاصل از دولایه GZO جدا شده با لایه ZnO می‌باشد. در واقع میدان درون لایه دی‌الکتریک افزایش یافته است. مانند ساختار دولایه، در ساختار چهار لایه (شکل ۴) نسبت به ساختار سه لایه (شکل ۵) افزایش تعداد فانو مشاهده نشده است اما مکان و عمق فانوها تغییر کرده است. از مقایسه این شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت در صورتی افزایش تعداد لایه‌ها باعث افزایش تعداد فانورزونانس‌ها می‌شود که یک لایه اضافی دیگر ZnO بین لایه-های GZO وجود داشته باشد.



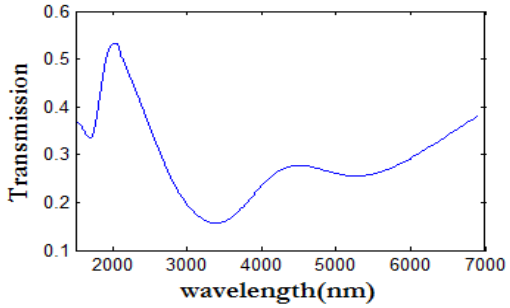

شکل ۲ : نمودار عبور برای رزوناتور نانودیسک‌های تک لایه GZO




شکل ۳ : نمودار عبور برای رزوناتور نانودیسک‌های دو لایه GZO/ZnO



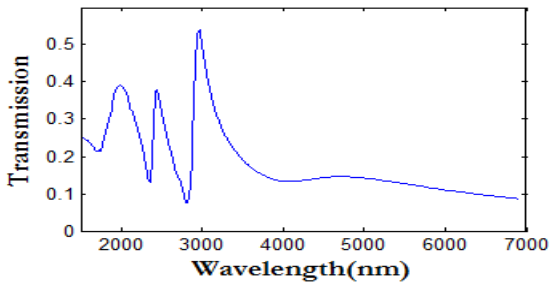

شکل ۴ : نمودار عبور برای رزوناتور نانودیسک‌های سه لایه GZO/ZnO




شکل ۵ : نمودار عبور برای رزوناتور نانودیسک‌های چهار لایه GZO/ZnO

در ادامه آرایه ای از نانودیسک‌های چهار لایه با همان ابعاد قبلی به همراه یک لایه طلا بین بستر و نانودیسک‌ها بررسی می‌شود. همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود حضور یک لایه بستر طلا نقش محسوسی درجایگزیدگی توان نوری در نانودیسک‌ها را بازی می‌کند و منجر به یک مینیمم فانو مشهود در بازه NIR در طول موج ۲۸۰۰ نانومتر می‌شود. همچنین تمامی رزونانس‌ها به طول موج‌های کوتاه‌تر شیفت می‌یابند. کیفیت فانو رزونانس با باریکتر شدن و افزایش عمق آن افزایش می‌یابد. با بهینه سازی ضخامت بستر می‌توان این حبس را به بهترین مقدار رساند. با استفاده از روش سعی و خطا، بهترین ضخامت برای لایه طلا برابر 20 nm به دست آمده است. از آنجا که ساختن نانوذرات چندلایه با تعداد لایه‌های زیاد از لحاظ ساخت امکان‌پذیر نمی‌باشد در کاربردهایی که به تعداد بیشتری فانورزونانس نیاز است می‌توان با افزودن یک لایه نازک طلا بر روی بستر بر این مشکل غلبه کرد.

دقت سنسور LSPR با حساسیت و کیفیت متناظر با آن ، FOM ، سنجیده می‌شود. حساسیت به صورت تغییرات مکان رزونانس پلاسمون بر تغییرات ضریب شکست محیط تعریف می‌شود [۱۳] که برای ساختار ارائه شده با لایه طلا برابر 530 nm/RIU به دست آمده است. شکل ۶ نمودار عبور از ساختار را برای تغییرات ضریب شکست محیط نشان می-دهد. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش ضریب شکست محیط باعث شیفت قرمز فرکانس رزونانس پلاسمون به طول موج‌های بلندتر می-شود. نمودار تغییرات مکان رزونانس پلاسمون بر حسب طول موج در شکل ۷ آمده است. FOM متناظر که از رابطه نسبت حساسیت به تغییرات طول موج به دست می‌آید برای ساختار پیشنهادی برابر ۹/۴۶ به دست آمده است. شکل ۸ نتایج عددی محاسبه شده از شکل ۷ برای تغییرات مکان پیک رزونانس پلاسمون سوم نسبت به تغییرات ضریب شکست محیط نشان می دهد.

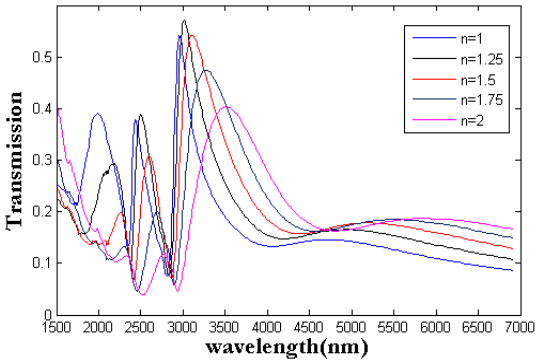




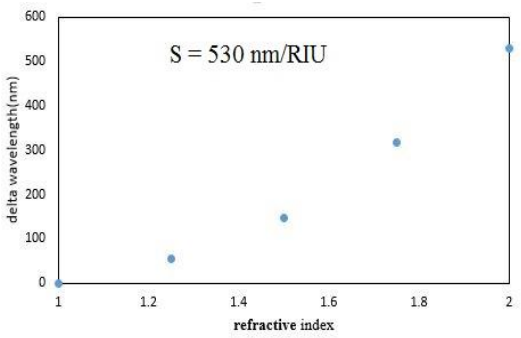

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02 ]

شکل ۶ : نمودار عبور برای رزوناتور نانودیسک‌های چهار لایه به همراه یک لایه نـازک طـلا بین دیسک و بستر




شکل ۷ : نمودار عبور برای رزوناتور نانودیسـک‌هـای چهـار لایـه بـه همـراه یـک لایـه ۲۰ نانومتری طلا بر روی بستر با تغییر ضریب شکست محیط




شکل ۸ : تغییرات مکان پیک رزونانس سوم نسبت به تغییرات ضریب شکست محاسبه شده از نمودار ۷

## ۴- نتیجه گیری

تغییر مولفه‌های ساختاری به ما این امکان را می‌دهد تا ویژگی‌های نوری را در نانوساختارهای پلاسمونیک تنظیم کنیم. به این ترتیب که شکل و هندسه نانو ذرات، تعداد لایه‌ها و همچنین افزودن یک لایه نازک به بستر بر مکان، شدت و تعداد رزونانس‌ها تاثیر می‌گذارند و با تنظیم مناسب این پارامترها می‌توان رزونانس‌ها را به طیف طول موج مطلوب انتقال داد. در این مقاله، پاسخ نوری رزوناتور ساختار شامل نانودیسک‌های چند لایه GZO/ZnO روی بستر Si بررسی شد و که ساختار پیشنهاد شده قادر به ارائه مدهای رزونانس قوی چدگانه در طیف IR می باشد. همچنین نشان داده شد که با افزودن یک لایه نازک طلا به بستر یک فانو رزونانس جدید در طول موج ۲۸۰۰ نانومتر به وجود می‌آید و همزمان رزونانس پلاسمون‌ها شیف آبی می‌یابند. درنتیجه می‌توان از این طریق فانو رزونانس‌ها را به طیف مورد نظر تنظیم کرد در حالی که کیفیت آن‌ها از طریق افزایش عمق و باریکتر شدن بهبود یافته است. حساسیت و FOM برای حالت ساختار با لایه نازک طلا به ترتیب برابر با مقادیر 530 nm/RIU و ۹/۴۶ به دست آمده اند.

مراجع


[1] [۱]M. Li, S. K. Cushing and N. Wu, "Plasmon-Enhanced Optical Sensors: A Review", **Analyst,** 140, 386-406, 2015.

[2] [۲]J. Kim, A. Dutta, B. Memarzadeh, A. V. Kildishev, H. Mosallaei and A. Boltasseva, "Zinc Oxide Based Plasmonic Multilayer Resonator: Localized and Gap Surface Plasmon in the Infrared", **ACS Photonics,** 2, 1224-1230, 2015.

[3] [۳]J. Becker, A. Trügler, A. Jakab, U. Hohenester and C. Sönnichsen, "The Optimal Aspect Ratio of Gold Nanorods for Plasmonic Bio-Sensing", **Plasmonics,** 5, 161-167, 2010.

[4] [۴]N. Liu, M. Mesch, T. Weiss, M. Hentschel and H. Giessen, "Infrared Perfect Absorber and Its Application as Plasmonic Sensor", **Nano letters,** 10, 2342-2348, 2010.

[5] [۵]G. V. Naik and A. Boltasseva, "A Comparative Study of Semiconductor-Based Plasmonic Metamaterials", **Metamaterials,** 5, 1-7, 2011.

[6] [۶]G. V. Naik, V. M. Shalaev and A. Boltasseva, "Alternative Plasmonic Materials: Beyond Gold and Silver", **Advanced Materials,** 25, 3264-3294, 2013.

[7] [۷]G. V. Naik, J. Liu, A. V. Kildishev, V. M. Shalaev and A .Boltasseva, "Demonstration of Al: Zno as a Plasmonic Component for near-Infrared Metamaterials", **Proceedings of the National Academy of Sciences,** 109, 8834-8838, 2012.

[8] [۸]T. Wang, M. Zalkovskij, K. Iwaszczuk, A. V. Lavrinenko, G. V. Naik, J. Kim, *et al*" ,.Ultrabroadband Terahertz Conductivity of Highly Doped Zno and Ito", **Optical Materials Express,** 5, 566-575, 2015.

[9] [۹]G. V. Naik, J. Kim and A. Boltasseva, "Oxides and Nitrides as Alternative Plasmonic Materials in the Optical Range [Invited]", **Optical Materials Express,** 1, 1090-1099, 2011.

[10] [۱۰]J. Kim, G. V. Naik, N. K. Emani, U. Guler and A. Boltasseva, "Plasmonic Resonances in Nanostructured Transparent Conducting Oxide Films", **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics,** 19, 4601907-46.۲۰۱۳ ,۰۱۹۰۷

[11] [۱۱]J. Kim, G. V. Naik, A. V. Gavrilenko, K. Dondapati, V. I. Gavrilenko, S. Prokes, *et al*., "Optical Properties of Gallium-Doped Zinc Oxide—a Low-Loss Plasmonic Material: First-Principles Theory and Experiment", **Physical Review X,** 3, 04103.۲۰۱۳ ,۷

[12] [۱۲]S.-D. Liu, Z. Yang, R.-P. Liu and X.-Y. Li, "Multiple Fano Resonances in Plasmonic Heptamer Clusters Composed of Split Nanorings", **Acs Nano,** 6, 6260-6271, 2012.

[13] [۱۳]F. Hao, P. Nordlander, Y. Sonnefraud, P. V. Dorpe and S. A. Maier, "Tunability of Subradiant Dipolar and Fano-Type Plasmon Resonances in Metallic Ring/Disk Cavities: Implications for Nanoscale Optical Sensing", **ACS nano,** 3, 643-652, 2009.




این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02 ]