

حسگر ضریب شکست بسیار حساس جدید با استفاده از کوپلینگ عمودی قوی در نانوساختار پلاسمونیک دیسک بیضی شکل روی حلقه بیضی شکل

حمید بهادر^{۱*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۱ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۴	
واژگان کلیدی: پلاسمونیک، نانوساختار، دیسک بیضی شکل روی حلقه بیضی شکل، حساسیت، حسگر ضریب شکست.	در این کار تحقیقی، حسگر ضریب شکست بسیار حساس جدیدی با استفاده از نانوذرات طلا و نقره پیشنهاد شده است. ایده اصلی این کار، تفکیک نانوذره دیسک بیضی شکل به دو ذره در یک حجم ثابت است. تفکیکی که در آن یک دیسک بیضی شکل کوچک با فاصله کم روی حلقه بیضی شکل قرار می گیرد و با افزایش کوپلینگ عمودی در لبه های ساختار، حساسیت سیستم را بهبود می بخشد. ساختار پیشنهادی، خواص حسگری نوری بهتری نسبت به ساختارهای قبلی دارد. در این ساختار، نقطه اوج تشدید پلاسمونیک اتفاق می افتد. این ساختار حساسیت 440 nm بر واحد ضریب شکست و پهنای کامل در نصف بیشینه $55,3 \text{ nm}$ را دارد. برای مقایسه، ذکر این نکته مهم است که این مقادیر برای نانوذره دیسک بیضی شکل 320 nm بر واحد ضریب شکست و $66,5 \text{ nm}$ می باشد. با تفکیک نانوذرات دیسک بیضی شکل و شکل دهی دیسک بیضی شکل روی حلقه بیضی شکل، حساسیت به مقادیری بیشتر از 440 nm بر واحد ضریب شکست افزایش می یابد. چیدمان مناسب نانوذرات تفکیک شده موجب می شود میدان عمودی در لبه های کوپلینگ به طور قابل توجهی افزایش یابد.

۱- مقدمه

در دنیای امروز، توسعه حسگرهای نوری به عنوان بخش مهمی از سیستم های تشخیص بیماری ها، مواد غذایی و شناسایی عوامل بیولوژیکی محیط، ضرورتی اجتناب ناپذیر است [۱-۳]. حسگرهای نوری به عنوان نوعی از حسگرهای مجاورتی با سرعت پاسخ گویی بالا امکان عکس العمل سریع و بهنگام را در زمان تشخیص بیماری و شرایط محیطی فراهم می کنند. پلاسمونیک که به مطالعه پدیده های نوری ناشی از برهم کنش میدان های الکترومغناطیسی با الکترون های رسانش فلزات می پردازد، کاربرد وسیعی در ادوات حسگری یافته است. میدان هایی با محدوده کوچک تر از حد پراش و همچنین تقویت میدان پیامدهای برهم کنش الکترون-فوتون در سطح مشترک فلز-عایق یا در نانوساختارهای فلزی هستند. با تحقق شرایط معینی در یک

طول موج تشدید ویژه نور، انرژی حمل شده توسط فوتون ها به تحریک های جمعی الکترون های آزاد به نام پلاسمون های سطحی در سطح مشترک فلز-دی الکتریک منتقل می شود. وجود فلز به صورت نانوذراتی که ابعادی کوچک تر از طول موج نور تابشی دارد، موج پلاسمون سطحی را به صورت محلی متمرکز می کند که تشدید پلاسمون های سطحی محلی نامیده می شود. تأثیرات شکل، اندازه و جنس نانوذره فلزی روی طیف تشدید پلاسمون، برای نانوذرات فلزی که ابعادی در محدوده ۱۰ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر دارند، در مرجع [۴] تعیین شده است. مرجع [۵] طیف تشدید استوانه ها، دیسک ها و نانومثلث های ساخته شده از طلا، با نسبت های طول به عرض گوناگون را بررسی کرده است. در این مرجع حساسیت آشکار ساز ضریب شکست محیط، به عنوان تابعی از طول موج بیشینه تشدید به صورت تئوری و

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hamid.bahador@uma.ac.ir
۱. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه محقق اردبیلی

دایره‌ای شکل و بررسی ارتباط بین طیف خاموشی ذرات و نسبت طول و عرض، خواص ماده و طول موج تشدید آن‌ها نتایج جالب توجهی به دست آمده است. در ادامه، نانوذرات دیسک بیضی شکل به ذراتی کوچک‌تر که کوپلینگ قوی بین آن‌ها وجود دارد، تجزیه می‌شوند. در ساختار پیشنهادی در محل کوپلینگ بین ذره بالایی و پایینی تمرکز قوی از میدان الکتریکی وجود دارد. همچنین از آنجا که محل تشکیل میدان نسبت به بستر آشکارساز ارتفاع دارد، برهم‌کنش میدان با مایع افزایش یافته است. در این ساختار جدید، شاهد تشدید میدان و افزایش حساسیت آشکارساز هستیم.

رزولوشن و تفکیک طول موج بیشینه تشدید در ساختار پیشنهادی، عملکرد بهتری نسبت به مرجع [۱۵] دارد؛ اما مزیت اساسی ساختار پیشنهادی، امکان ساخت آسان‌تر و ساده‌تر نانو ساختار جدید است. تلورانس قابل تحمل در جابه‌جایی نانوذراتی که روی هم چیده می‌شوند، در ساختار جدید بیشتر از ساختارهای مشابه قبلی است. این مزیت‌ها در کنار رزولوشن بهتر می‌تواند ساختار پیشنهادی را نسبت به ساختارهای مشابه ارجحیت بخشد.

۲- تئوری روش

فرکانس تشدید پلاسمون‌های سطحی محلی با فرکانس نور اعمالی مطابقت ندارد و با عوامل زیادی از جمله تراکم الکترون، جرم مؤثر الکترون، اندازه و شکل ذره، اندرکنش بین ذرات و تأثیر محیط تعیین می‌شود. برای توصیف مقدماتی از تشدید نانوذرات فلزی می‌توان از تقریب دوقطبی [۲۵] و مدل درود^۱ استفاده کرد.

در تقریب دوقطبی، جذب و پراش نور توسط یک ذره کوچک به وسیله قطبش‌پذیری الکترواستاتیکی ذره، α_0 ، تعیین می‌شود که برای کره‌ای کوچک با حجم V و شعاع a با استفاده از گذردهی نوری فلز (ϵ_m)، ثابت دی‌الکتریک محیط (ϵ_d) و ابعاد هندسی ذره قابل محاسبه است [۲۶]:

$$\alpha_0 = \frac{3V}{4\pi} \left(\frac{\epsilon_m - \epsilon_d}{\epsilon_m + 2\epsilon_d} \right) = a^3 \left(\frac{\epsilon_m - \epsilon_d}{\epsilon_m + 2\epsilon_d} \right) \quad (1)$$

و سطح مقطع خاموشی نیز به کمک سطح مقطع‌های پراش (C_{sca}) و جذب تجمعی (C_{abs}) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

عددی تحلیل شده است. تنوع گسترده‌ای از اشکال نانوذره به‌عنوان یک حسگر تشدید پلاسمون‌های سطحی محلی، مانند کره‌ها، حلقه‌ها، ستاره‌ها، نانوبطری‌ها و مربع‌ها [۶-۱۳] پیشنهاد شده‌اند.

وابستگی تشدید پلاسمون سطحی نانوذره به اندرکنش بین نانوذرات مجاور نیز به صورت دقیق در مراجع [۱۴ و ۱۵] مطالعه شده‌اند. تأثیر شکل، اندازه و فاصله بین نانوذرات مجاور روی شدت و طول موج تشدید در مراجع [۱۶-۱۸] بررسی شده‌اند. در این مراجع، زوجی از نانوذرات بیضوی، نانو ساختار دی‌الکتریک با هسته فلزی و برشی از نانوکره‌ها به منظور بهینه‌سازی ابعاد و فاصله نانوذرات بررسی شده‌اند. یک جفت نانوکره طلایی کوپل شده برای بررسی اثر فاصله بین ذرات روی پاسخ تشدید پلاسمون‌های سطحی محلی در مرجع [۱۹] استفاده شده است. تأثیر انعکاس‌های چندگانه در سطح مشترک شیشه با نانوذرات، روی حساسیت فرایند آشکارسازی، در مرجع [۲۰] بررسی شده است.

در این مقاله، بیشتر نحوه توزیع میدان الکتریکی ناشی از پدیده پلاسمونیک در اطراف نانوذره و تأثیر آن بر حساسیت حسگر بررسی شده است. هرچند شدت میدان الکتریکی ناشی از تشدید میدان، پارامتر مهمی برای بهبود حساسیت آشکارساز است، اگر نحوه توزیع میدان به گونه‌ای مدیریت شود که تمرکز محلی و برهم‌کنش بیشتری با مایع داشته باشد، می‌تواند حساسیت حسگر به تغییر ضریب شکست را به طور قابل توجهی بهبود بخشد.

شکل مناسب نانوذرات و کوپلینگ قوی بین آن‌ها می‌تواند حساسیت آشکارساز را بهبود دهد. نانوذره بیضی شکل که با تقریب مناسبی می‌تواند برای تحلیل شکل‌های دیگر نیز استفاده شود [۲۱-۲۴]، گزینه‌ای مناسب برای بررسی تأثیر شکل در حساسیت آشکارسازی و طیف تشدید است. جنبه مهم در تعیین شکل، اندازه و کوپلینگ مناسب بین نانوذرات، تقویت میدان توسط آن‌هاست. بهبود حساسیت ساختار، به‌عنوان یک حسگر زیستی، ارتباط مستقیم با تقویت میدان در مجاورت نانوذره دارد. در بخش تئوری، روابطی که تأثیر شکل، اندازه و کوپلینگ نانوذرات روی حساسیت محیط تعیین می‌کنند، بررسی می‌شوند. در بخش بعد، با مقایسه نانوذرات دیسک بیضی شکل و دیسک

¹ Drude model

بخشید. برای ساختارهای هندسی پیچیده همانند ساختاری $C_{ext}^{abs} + C_{sea} = \frac{12\pi k \varepsilon_d \cdot \text{Im}(\varepsilon_m)}{a^3 |\varepsilon_m - \varepsilon_d|^2} \cdot |\alpha|^2 + \frac{8\pi}{3} k^4 \alpha^2 \cong 4\pi k \cdot \text{Im}(\alpha)$ که در این کار بررسی می‌شود، روش‌های عددی برای محاسبه ضرایب شکل مانند روش تقریبی دوقطبی مجزا و تفاضل محدود در زمان^۴ توسعه داده شده‌اند.

تشدید پلاسمون سطحی با یک میدان تقویت‌شده در ناحیه‌ای اطراف نانوذرات همراهی می‌شود. حساسیت سنسور برای یک آشفتگی در مایع، به‌وسیله توزیع میدان در این ناحیه تعیین می‌گردد. چنان‌که در مرجع [۲۸] نیز آمده است، شیفت در بردار موج، k ، متناسب با انتگرال هم‌پوشانی است که متناسب با حجم برهم‌کنش، V_{in} ، است:

$$\delta k \approx \frac{k_i \int_{V_{in}} \delta \varepsilon \cdot \vec{E}_i^* \cdot \vec{E}_f \cdot dr}{2 \int_V \varepsilon \cdot \vec{E}_i^* \cdot \vec{E}_f \cdot dr} \quad (7)$$

E_i و k_i میدان الکتریکی و بردار موج قبل از تغییر در ضریب شکست مایع هستند، در حالی که E_f میدان بعد از آشفتگی ضریب شکست و δk شیفت مربوط در بردار موج، به‌خاطر تغییر در ثابت دی‌الکتریک مایع از ε به $\varepsilon + \delta \varepsilon$ است. چون δk تغییر در طول موج را بیان می‌کند، $\delta k / \delta \varepsilon$ حساسیت سنسور را ارائه می‌دهد که متناسب با انتگرال هم‌پوشانی در صورت کسر معادله فوق است، به انرژی کل نرمالیزه شده است. بنابراین برای بیشینه کردن حساسیت، نیاز به بیشینه کردن این انتگرال است که می‌تواند با افزایش حجم برهم‌کنش در مایع تحقق یابد.

۳- ساختار پیشنهادی

استفاده از آرایه‌ای از نانوذرات فلزی دیسک بیضی‌شکل در روی سطح شیشه می‌تواند حساسیت حسگر تشخیص ضریب شکست را بهبود بخشد (شکل (۱-الف)). هر دیسک دارای شعاع بزرگ ۹۵ نانومتر و شعاع کوچک ۴۷٫۵ نانومتر با ارتفاع ۳۰ نانومتر است. این آرایه بر روی بستری از شیشه که روی لایه‌ای از سیلیسیم شکل گرفته است، قرار دارد. آخرین لایه که نانوذرات را نیز احاطه کرده، مایعی با تغییرات ضریب شکست بین ۱٫۳۳۳ تا ۱٫۳۸۳ با گام‌های ۰٫۰۱ است. در صنایع نوشیدنی از مقدار ضریب شکست و تغییرات آن، برخی از اجزای اصلی موجود در مایع مانند اتانول و گلوکز را آشکارسازی و تعیین می‌کنند. به‌دلیل رزولوشن خوبی که سنسور پلاسمونیک دارد، می‌تواند برای تعیین غلظت گلوکز در مایع استفاده شود. تغییر چهار گرم در هر صد میلی‌لیتر می‌تواند با تغییر ضریب شکست

که $k = 2\pi \sqrt{\varepsilon_d} / \lambda$ عدد موج در محیط است و:

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + \Phi(ka) \cdot a^{-3} \cdot \alpha_0} \quad (3)$$

که تابع $\Phi(ka) \cong -(ka)^2 - i \frac{2}{3} (ka)^3$ میرایی تابشی را در نظر می‌گیرد.

فرکانس تشدید در طیف خاموشی به ضریب شکست محیط، n_d ، حساس است. تغییر در محیط، موجب یک شیفت مناسب در طول موج تشدید می‌شود. جابه‌جایی طول موج رزونانس، $\Delta \lambda_{res}$ ، در مقابل تغییر ضریب شکست محیط، Δn_d ، به‌صورت تابع حساسیت تعریف می‌شود [۲۷]:

$$S_\lambda = \frac{\Delta \lambda_{res}}{\Delta n_d} = S_{\lambda-bulk} \left(1 - \exp\left(-\frac{2h}{l_d}\right) \right) \quad (4)$$

$S_{\lambda-bulk}$ ، حساسیت به ضریب شکست بدنه است و نقش مهمی در تعیین پاسخ کلی تشدید پلاسمون‌های سطحی محلی دارد. این حساسیت به عوامل متعددی مثل اندازه و شکل نانوذرات بستگی دارد. h ضخامت مؤثر لایه جاذب و l_d طول میرایی میدان الکترومغناطیسی است.

تقویت بیشتر میدان با کوپلینگ بیشتر نانوذرات می‌تواند حساسیت آشکارساز را بهبود بخشد. حساسیت محیط ساختار دودره‌ای، بزرگ‌تر از ساختار تک‌دوره‌ای ایزوله‌شده است. در مرجع [۱۹] افزایش حساسیت سیستم دودره‌ای به افزایش ضریب شکل، L ، نسبت داده شده است. تأثیر L برای سیستم دودره‌ای به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$L_{two-particle} = \frac{8(s/D+1)^3 + 1}{4(s/D+1)^3 - 1} \quad (5)$$

که s فاصله سطح تا سطح بین نانوذرات و D قطر نانوذره است. با افزایش کوپلینگ (یا به عبارتی کاهش s/D) بین دو نانوذره، L افزایش می‌یابد. جابه‌جایی طول موج تشدید ناشی از کوپلینگ ذرات نیز با رابطه زیر قابل بیان است:

$$\Delta \lambda_{coupling} \propto \varepsilon_d \left(\frac{3}{4(s/D+1)^3 - 1} \right) \quad (6)$$

بنابراین براساس روابط (۴) و (۵) با انتخاب شکل و اندازه مناسب برای نانوذرات و ایجاد کوپلینگ قوی بین آن‌ها می‌توان حساسیت محیط به تغییر ضریب شکست را بهبود

تشخیص ضریب شکست با آرایه‌ای از نانوذرات فلزی دیسک دایره‌ای شکل و دیسک بیضی شکل اندازه‌گیری و مقایسه شده‌اند.

جدول ۱- اندازه‌های هندسی و پارامترهای فیزیکی حسگر نوری شکل (۱) با ساختار دیسک بیضی شکل روی حلقه

بیضی شکل

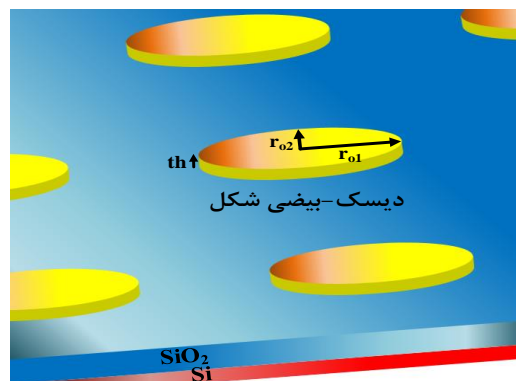
مقادیر	پارامترهای هندسی و فیزیکی
۹۵ نانومتر	شعاع بزرگ دیسک بیضی شکل اصلی (r _{o1})
۴۷,۵ نانومتر	شعاع کوچک دیسک بیضی شکل اصلی (r _{o2})
۷۵ نانومتر	شعاع بزرگ دیسک بیضی شکل بالایی (r _{o3})
۳۷,۵ نانومتر	شعاع کوچک دیسک بیضی شکل بالایی (r _{o4})
۳۰ نانومتر	ضخامت حلقه و دیسک بیضی شکل (th)
۱۰ نانومتر	فاصله بین حلقه و دیسک بیضی شکل (g)
۳۲۵ نانومتر	ضخامت بدنه (SiO ₂)
۱,۵۵	ضریب شکست SiO ₂
۳,۴۲	ضریب شکست Si

پارامترهای هندسی و فیزیکی ساختار حسگر نوری در جدول ۱ ذکر شده‌اند. برای ارزیابی و مقایسه عملکرد نانوساختارهای مختلف، از نرم‌افزار لومریکال^۱ و روش تفاضل محدود در زمان برای حل معادله ماکسول و محاسبه طیف‌های خاموشی آرایه‌هایی از نانوذرات استفاده می‌شود. در همه شبیه‌سازی‌ها اندازه ۱ نانومتر حول نانوذرات و ثابت‌های دی‌الکتریک فلزات مدل جانسون و کریستی استفاده می‌شود. شرایط مرزی لایه کاملاً جاذب^۲ برای جانب‌های بالا و پایین و شرایط مرزی پرودیگ برای سایر جانب‌ها استفاده می‌گردد. ضریب شکست محیط پیرامون ساختار ۱ (هوا) فرض شده، برای مایع مرجع هم از آب با ضریب شکست ۱,۳۳۳ استفاده می‌شود. همه شبیه‌سازی‌ها در محدوده طول موج ۶۰۰ نانومتر تا ۱۵۰۰ انجام می‌گیرد.

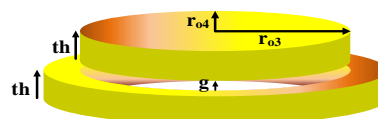
جدول ۲- مقایسه پارامترهای خروجی دیسک بیضی شکل و دیسک دایره‌ای شکل

اندازه (r[nm])	دیسک دایره‌ای شکل (r,h=30nm)				دیسک بیضی شکل (a=r, b=r/2, h=30nm)			
	λ _{res} [nm]	دامنه بیشینه نرمالیزه	حساسیت [nm/RIU]	FWHM [nm]	λ _{res} [nm]	دامنه بیشینه نرمالیزه	حساسیت [nm/RIU]	FWHM [nm]
۸۵	۹۰۰	۰,۵۳	۲۶۰	۵۷,۳	۹۳۱	۰,۴۴	۳۲۰	۶۶,۵
۹۰	۹۱۶	۰,۶۱			۹۵۵	۰,۴۹		
۹۵	۹۳۲	۰,۶۸			۹۷۲	۰,۵۴		
۱۰۰	۹۴۶	۰,۷۳			۹۹۳	۰,۵۶		
۱۰۵	۹۶۰	۰,۷۷			۱۰۱۱	۰,۵۷		
۱۱۰	۹۷۱	۰,۷۸			۱۰۲۵	۰,۵۵		
۱۱۵	۹۸۲	۰,۷۸			۱۰۳۸	۰,۵۱		

یک صدم در مایع مرجع با ضریب شکست ۱,۳۳۳ همراه باشد [۲۹]. در این مقاله نانوذره دیسک بیضی شکل پایه، به دو ذره تجزیه می‌شود و این دو ذره به گونه‌ای آرایش می‌یابند که کوپلینگ قوی داشته باشند (شکل (۱-ب)).



(الف)



دیسک بیضی شکل روی حلقه بیضی شکل

(ب)

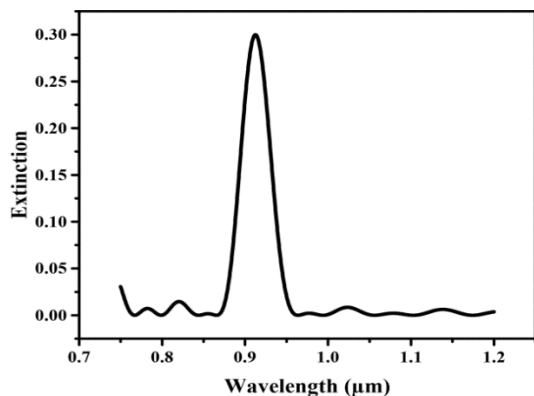
شکل (۱-الف) شمایی از آشکارساز برپایه دیسک بیضی شکل، (ب) نانوساختار پیشنهادی که با تفکیک دیسک بیضی شکل به صورت ساختاری که دیسک بیضی شکل کوچک روی حلقه بیضی شکل قرار دارد، حساسیت آشکارساز را بهبود می‌بخشد

مدیریت و مهندسی در انتخاب شکل، ابعاد و آرایش نانوذرات تجزیه شده، موجب تشدید میدان در محل کوپلینگ آن‌ها خواهد شد. تمرکز هرچه بیشتر میدان می‌تواند حساسیت حسگر را به تغییرات ضریب شکست مایع بهبود بخشد. جهت تحلیل بهتر موضوع و انتخاب ابعادی مناسب برای نانوذره پایه، پارامترهای حسگر

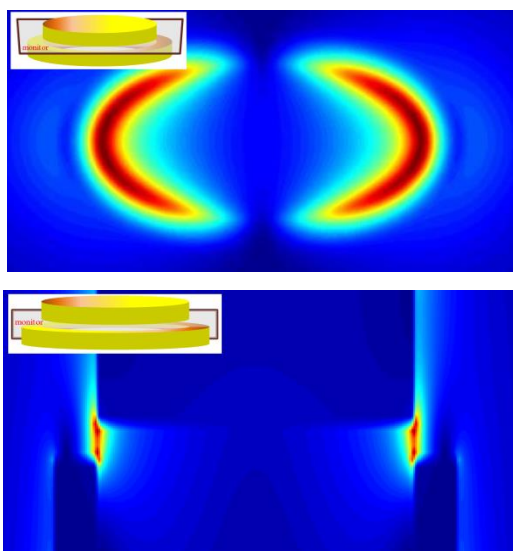
² Perfectly Matched Layer = PML

¹ Lumerical

مشخص می‌شود. شکل (۲) طیف خاموشی آشکارساز ضریب شکست را برای آرایه‌ای از نانوسازه‌های طلایی نشان می‌دهد. بیشینه طیف خاموشی در ۹۱۲,۵ نانومتر اتفاق می‌افتد و دارای بیشینه نرمالیزه شده ۰,۳ است.



شکل ۲- طیف خاموشی به صورت تابعی از طول موج برای نانوساختار دیسک بیضی شکل روی حلقه دایره‌ای شکل از جنس طلا



شکل ۳- توزیع میدان الکتریکی برای نانوساختار دیسک بیضی شکل روی حلقه بیضی شکل از زاویه‌های دید مختلف (زاویه دید در گوشه تصویر مشخص شده است). ضریب شکست مایع ۱,۳۳۳ و فاصله بین نانوذره بالایی و پایینی ۱۰ نانومتر و طول موج تشدید نیز ۹۱۲,۵ نانومتر است. در محل تشدید (از آبی روشن تا قهوه‌ای تیره) رنگ تیره تر متناظر با شدت بیشتر میدان الکتریکی است

پروفایل میدان الکتریکی در شکل (۳) تشدید قوی میدان در لبه و فاصله بین نانوذرات تجزیه شده را نشان می‌دهد. برای محاسبه حساسیت، جابه‌جایی بیشینه طیف خاموشی

۴- بحث و نتایج شبیه‌سازی

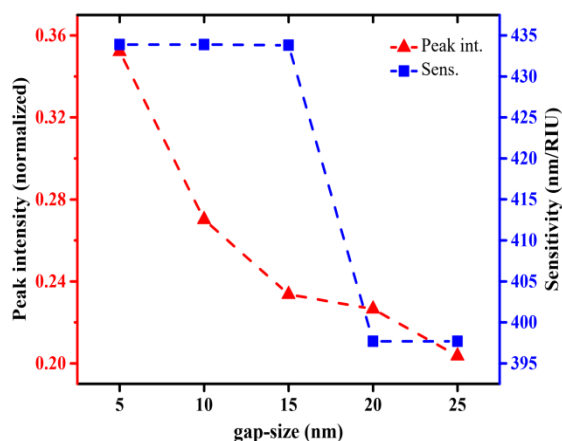
نتایج شبیه‌سازی برای آشکارساز نوری ضریب شکست، برای آرایه‌ای از ذرات دیسک دایره‌ای شکل و دیسک بیضی شکل در جدول ۲ آمده است. برای دیسک دایره‌ای شکل با تغییر شعاع ۸۵ نانومتر تا ۱۱۵ نانومتر با وجود اینکه طول موج تشدید از ۹۰۰ نانومتر تا ۹۸۲ نانومتر و شدت بیشینه نرمالیزه شده از ۰,۵۳ تا ۰,۷۸ تغییر می‌کند، حساسیت آشکارساز ($s = \Delta\lambda/\Delta n$) تقریباً ۲۶۰ و پهنای کامل در نصف بیشینه^۱ آن ۵۷,۳ نانومتر ثابت باقی می‌ماند. برای دیسک بیضی شکل که شعاع کوچک همیشه نصف شعاع بزرگ است، همین تغییر در مقدار شعاع بزرگ، حساسیتی معادل ۳۲۰ و FWHM معادل ۶۶,۵ را نتیجه می‌دهد. هرچند طول موج رزونانس از ۹۳۱ نانومتر تا ۱۰۳۸ نانومتر و دامنه بیشینه نرمالیزه شده از ۰,۴۴ تا ۰,۵۱ تغییر می‌یابد. به نظر می‌رسد با در نظر گرفتن ملاحظاتی مانند ابعاد ذره، دامنه بیشینه، حساسیت و FWHM، انتخاب دیسکی با شعاع ۹۵ نانومتر مناسب باشد.

مقایسه دو نانوذره دیسک دایره‌ای شکل و دیسک بیضی شکل هم نشان می‌دهد نانوذره دیسک بیضی شکل حساسیت بیشتر، اما در عین حال FWHM بیشتری نیز دارد. محاسبه ضریب شایستگی^۲ ($FOM = S/FWHM$) می‌تواند به مقایسه بهتر کمک کند. ضریب شایستگی برای نانوذره دیسک بیضی شکل ۴,۸ و برای نانوذره دیسک دایره‌ای شکل ۴,۵ است. این نتیجه تأیید می‌کند تمرکز بیشتر میدان که در نانوذره دیسک بیضی شکل اتفاق می‌افتد، حساسیت آشکارسازی را بهبود می‌بخشد. از این رو در ادامه مقاله از تغییر نانوذره بیضی شکل برای بهبود حساسیت آشکارساز استفاده خواهیم کرد.

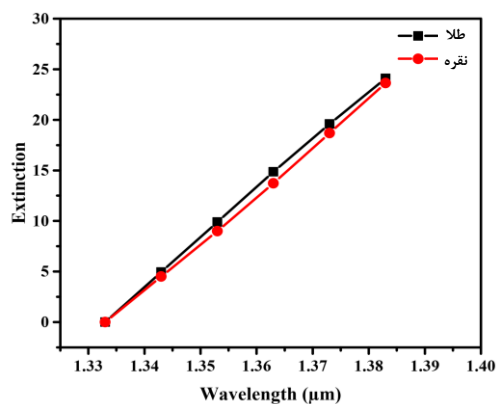
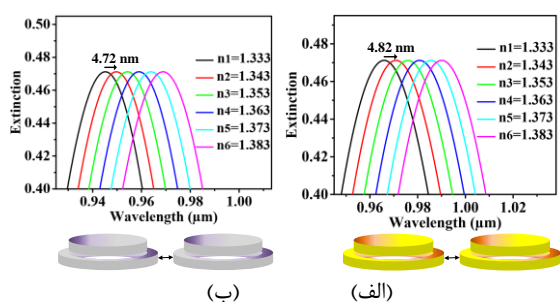
تجزیه نانوذره دیسک بیضی شکل به دو نانوذره کوچک تر و چیدمان مناسب آن‌ها برای داشتن کوپلینگ عمودی قوی، می‌تواند محل مناسبی برای تشدید بیشتر میدان ایجاد کند. در این کار، ذره‌ای بیضی شکل با شعاع بزرگ ۷۵ نانومتر و شعاع کوچک ۳۷,۵ نانومتر را از دیسک بیضی شکل پایه جدا می‌کنیم و در ارتفاعی با فاصله ۱۰ نانومتر از نانوذره اصلی قرار می‌دهیم (شکل (۱-ب)). تحقق شرایط تشدید پلاسمون سطحی در نانوساختار فلزی در ناحیه نور مرئی تا مادون قرمز نزدیک با محاسبه طیف خاموشی ساختار

² Figure of merit

¹ Full Width at Half Maximum = FWHM



شکل ۵- تأثیر فاصله عمودی دو ذره روی دامنه بیشینه و حساسیت نانوساختار دیسک بیضی شکل روی حلقه بیضی شکل

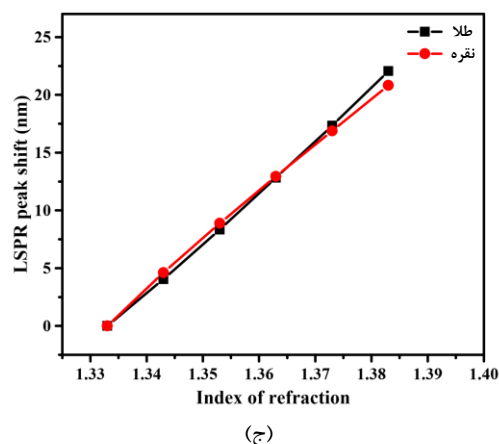
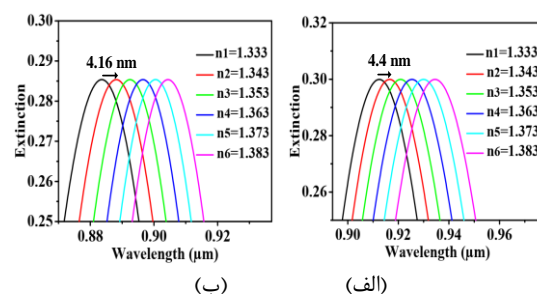


شکل ۶- جابه‌جایی بیشینه LSPR زوجی از نانوساختارهای دیسک بیضی شکل روی حلقه بیضی شکل: (الف) از جنس طلا، (ب) از جنس نقره، (ج) مقایسه جابه‌جایی بیشینه LSPR نانوساختار از جنس طلا و نقره

برای دسترسی به حساسیت بیشتر، دو نانوساختار از این نوع را با فاصله ۱۵ نانومتر نزدیک هم قرار می‌دهیم (شکل ۶). نتایج شبیه‌سازی برای آرایه‌ای از این نانوساختارهای طلائی، حساسیتی معادل 495.2 nm/RIU را نشان

آشکار ساز را با تغییر ضریب شکست مایع بررسی می‌کنیم. آنچه از شکل (۴) مشاهده می‌شود، جابه‌جایی بیشینه طیف خاموشی برای این ساختار 4.4 nm نانومتر به‌ازای هر 0.1 در تغییر ضریب شکست مایع است. از این رو حساسیت آشکار ساز با این نانوذرات 440 nm/RIU است. FWHM آشکار ساز 55.3 نانومتر و ضریب شایستگی آن نیز 7.95 می‌باشد. تکرار شبیه‌سازی برای نانوساختاری از جنس نقره، حساسیت آشکار ساز را 416.4 nm/RIU نشان می‌دهد (شکل ۴). پهنای کامل در نصف بیشینه و ضریب کیفیت آن نیز به ترتیب 51.1 نانومتر و 8.15 است.

با افزایش فاصله بین ذره بالایی نسبت به ذره پایینی، ضمن کاهش حساسیت حسگر، دامنه بیشینه نرمالیزه شده نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۴- جابه‌جایی بیشینه LSPR در نانوساختار دیسک بیضی شکل روی حلقه بیضی شکل: (الف) از جنس طلا، (ب) از جنس نقره، (ج) مقایسه جابه‌جایی بیشینه LSPR نانوساختار از جنس طلا و نقره

شکل (۵) اثر این تغییر فاصله را روی حساسیت و شدت پیک نرمالیزه در آشکار سازی با نانوذرات طلا نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن ملاحظاتی مانند حساسیت، دامنه بیشینه و امکان ساخت، فاصله 10 نانومتر مناسب است.

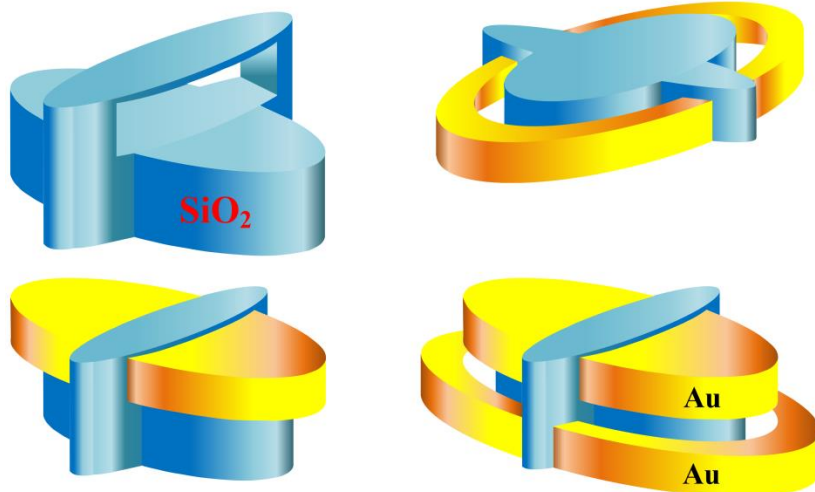
¹ Refractive index unit: واحد ضریب شکست

نتایج شبیه‌سازی، حساسیتی معادل 398.1 nm/RIU را نشان می‌دهد. $FWHM$ معادل 54.4 نانومتر و ضریب شایستگی معادل 7.3 ، حاکی از تأثیر اندک سازه بر عملکرد نانوساختار است.

توسعه روش‌های لیتوگرافی و شیمیایی پیچیده و تکنولوژی پیشرفته ساخت ادوات نیمه‌هادی (مانند تکنولوژی ساخت CMOS) اجازه تولید تنوع گسترده‌ای از نانوذرات پیچیده و توزیع مناسب آن‌ها را می‌دهد [۳۰ و ۳۱]. در این کار فرض بر این است که برای ساخت چنین سازه‌ای، از این تکنولوژی‌ها کمک گرفته و محل نانوذرات با ترتیب و نظم مشخص و به شکل اختیاری انتخاب می‌شود. عملکرد نانوساختار در صورت جابه‌جایی ذره بالایی در جهت افقی نیز مهم است. بررسی حساسیت نانوساختار در صورت جابه‌جایی ذره بالایی تا 5 نانومتر در جهت x و y در شکل (۸) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد جابه‌جایی ذره بالایی با تلورانس 8.3 درصد قابل تحمل است.

می‌دهد. 72.9 نانومتر و 6.79 به ترتیب $FWHM$ و ضریب شایستگی این آشکارساز ضریب شکست هستند. در صورت استفاده از نانوساختارهای نقره‌ای، حساسیتی معادل 472.7 nm/RIU حاصل می‌شود که $FWHM$ و ضریب شایستگی به ترتیب 60.7 نانومتر و 7.7 دارد.

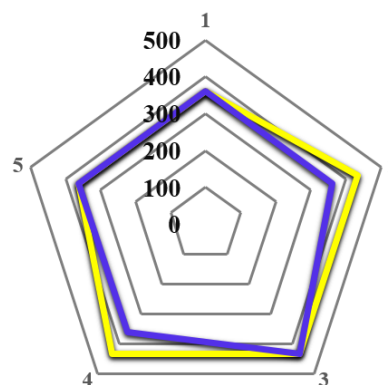
برای گردش مایع در نانوساختار عمودی و استحکام آن، سازه‌ای از SiO_2 پیشنهاد می‌شود (شکل ۷). در واقع در روش پیشنهادی، هدف استفاده حداکثری از میدان قوی ناشی از تشدید است تا تداخل بیشتری با مایع داشته باشد. در این شکل که ساختاری پیشنهادی است، سازه‌ای از SiO_2 در نظر گرفته شده که ضمن داشتن استحکام خوب، فاصله بین نانوذره بالایی و پایینی را برای داشتن کوپلینگ قوی تأمین می‌کند. همچنین ساختار پیشنهادی که در این شکل از زوایا و مراحل مختلف ساخت به آن نگاه شده است، امکان گردش مایع درون ساختار، به‌ویژه در محل تشدید را فراهم می‌کند.



شکل ۷- روشی ممکن برای فرایند ساخت که گردش مایع در اطراف نانوساختار آسان می‌شود

۵- نتیجه گیری

در این کار برای اولین بار نانوساختار پلاسمونیک جدیدی با تفکیک یک نانوذره دیسک بیضی شکل به دو نانوذره معرفی شد. چیدمان نانوذره دیسک بیضی شکل روی حلقه بیضی شکل، نانوساختار جدیدی را شکل می‌دهد که حساسیت حسگر ضریب شکست را بهبود می‌بخشد. پارامترهای ارزیابی مانند طیف‌های خاموشی و توزیع میدان الکتریکی، با استفاده از روش FDTD به دست آمدند. قبل از تفکیک، حساسیت‌های 260 nm/RIU و 260 nm/RIU



شکل ۸- تغییر حساسیت نانوساختار به علت جابه‌جایی ذره بالایی تا 5 نانومتر در جهت افقی

فاصله عمودی بین دیسک و حلقه برای دسترسی به بهترین حساسیت، ارزیابی و شبیه‌سازی شد. در نهایت، ساختاری از SiO_2 برای پایداری و قابل ساخت بودن نانو ساختار پیشنهاد شد که مایع به آسانی حول نانو ساختار گردش دارد. ساختار پیشنهادی و شبیه‌سازی‌های انجام شده می‌تواند به عنوان روشی جدید در کاربردهای حسگری زیستی برای تولید حسگر زیستی پلاسمونیک بسیار حساس استفاده شود.

۳۲۰ به ترتیب برای دیسک دایره‌ای شکل و دیسک بیضی-شکل محاسبه شدند. تفکیک نانوذره دیسک بیضی شکل به دو ذره به گونه‌ای که نانو ساختار دیسک بیضی شکل روی حلقه بیضی شکل تشکیل شود، حساسیت را به مقادیری بیشتر از 440 nm/RIU افزایش می‌دهد. ضمناً با تفکیک نانوذره، ضریب شایستگی نانو ساختار جدید از ۴٫۸ به مقادیر بیشتر از ۸ افزایش می‌یابد. همچنین تأثیر

مراجع

- [۱] سعید علیائی و احمد محب‌زاده، «نویزها طراحی و مدل‌سازی حسگر زیستی مبتنی بر نانو تشدیدگر کریستال فوتونی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۱، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۳۵۱-۳۵۸.
- [۲] سعید رحیمی، سهیل رضازاده مفردنیا، بهنام راسخ و سید عباس شجاع‌الساداتی، «شبیه‌سازی و بررسی عملکرد پارامترهای مختلف حسگر مبتنی بر غشای سیلیکونی جهت تشخیص متان محلول در فرایند تخمیر»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۸، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۳۲۹-۳۳۶.
- [۳] بهرام عزیزالله گنجی و صدیقه بابایی صداقت، «بهینه‌سازی ساختار میکروفن خازنی جدید با دیافراگم قورباغه‌ای جهت افزایش حساسیت و کاهش ولتاژ تغذیه»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۹، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۱۴۱-۱۵۱.
- [4] G. Qiu, Y. Yue, J. Tang, Y.-B. Zhao and J. Wang, "Total Bioaerosols Detection by a Succinimidyl-Ester-Functionalized Plasmonic Biosensor to Reveal Different Characteristics at Three Locations in Switzerland", *Environmental Science & Technology*, Vol. 8, No. 4, 2020, 117-131.
- [5] H. Heidarzadeh, "Analysis and simulation of a plasmonic biosensor for hemoglobin concentration detection using noble metal nano-particles resonances", *Optics Communications*, Vol. 459, 2020 p. 124940.
- [6] J. Liu, M. Jalali, S. Mahshid and S. Wachsmann-Hogiu, "Are plasmonic optical biosensors ready for use in point-of-need applications?", *Analyst*, 2020.
- [7] H. Heidarzadeh, "Comprehensive investigation of core-shell dimer nanoparticles size, distance and thicknesses on performance of a hybrid organic-inorganic halide perovskite solar cell", *Materials Research Express*, Vol. 5, No. 3, 2018, p. 036208.
- [8] A. Jangjoy, H. Bahador and H. Heidarzadeh, "Design of an ultra-thin silicon solar cell using Localized Surface Plasmonic effects of embedded paired nanoparticles", *Optics Communications*, Vol. 450, 2019, pp. 216-221.
- [9] G. Mokari and H. Heidarzadeh, "Efficiency enhancement of an ultra-thin silicon solar cell using Plasmonic coupled Core-Shell nanoparticles", *Plasmonics*, Vol. 14, No. 5, 2019, pp. 1041-1049.
- [10] H. Heidarzadeh and F. Mehrfar, "Effect of size non-uniformity on performance of a plasmonic perovskite solar cell: an array of embedded plasmonic nanoparticles with the Gaussian distribution radiuses", *Plasmonics*, Vol. 13, No. 6, 2018, pp. 2305-2312.
- [11] A. Agrawal, S. H. Cho, O. Zandi, S. Ghosh, R.W. Johns and D.J. Milliron, "Localized surface plasmon resonance in semiconductor nanocrystals", *Chemical reviews*, Vol. 118, No. 6, 2018, pp. 3121-3207.
- [12] S. Link and M.A. El-Sayed, "Spectral properties and relaxation dynamics of surface plasmon electronic oscillations in gold and silver nanodots and nanorods", ed: ACS Publications, 1999.
- [13] T. Sannomiya, C. Hafner and J. Vörös, "Shape-dependent sensitivity of single plasmonic nanoparticles for biosensing", *Journal of biomedical optics*, Vol. 14, No. 6, 2009, p. 064027.
- [14] M.M. Miller and A.A. Lazarides, "Sensitivity of metal nanoparticle plasmon resonance band position to the dielectric environment as observed in scattering", *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, Vol. 8, No. 4, 2006, p. S239.
- [15] H. Bahador and H. Heidarzadeh, "Analysis and Simulation of a Novel Localized Surface Plasmonic Highly Sensitive Refractive Index Sensor", *Plasmonics*, 2020, pp. 1-7.

- [16] S. Zou, "Light-driven circular plasmon current in a silver nanoring", *Optics letters*, Vol. 33, No. 18, 2008, pp. 2113-2115.
- [17] S. Barbosa et al., "Tuning size and sensing properties in colloidal gold nanostars", *Langmuir*, Vol. 26, No. 18, 2010, pp. 14943-14950.
- [18] S. Kim, J.-M. Jung, D.-G. Choi, H.-T. Jung and S.-M. Yang, "Patterned arrays of Au rings for localized surface plasmon resonance", *Langmuir*, Vol. 22, No. 17, 2006, pp. 7109-7112.
- [19] B. Nikoobakht and M.A. El-Sayed, "Preparation and growth mechanism of gold nanorods (NRs) using seed-mediated growth method", *Chemistry of Materials*, Vol. 15, No. 10, 2003, pp. 1957-1962.
- [20] Y. Sun and Y. Xia, "Shape-controlled synthesis of gold and silver nanoparticles", *science*, Vol. 298, No. 5601, 2002, pp. 2176-2179.
- [21] H. Iu, J. Li, H. Ong and J.T. Wan, "Surface plasmon resonance in two-dimensional nanobottle arrays", *Optics express*, Vol. 16, No. 14, 2008, pp. 10294-10302.
- [22] K.-H. Su, Q.-H. Wei, X. Zhang, J. Mock, D.R. Smith and S. Schultz, "Interparticle coupling effects on plasmon resonances of nanogold particles", *Nano letters*, Vol. 3, No. 8, 2003, pp. 1087-1090.
- [23] X. Huang, I.H. El-Sayed, W. Qian and M.A. El-Sayed, "Cancer cells assemble and align gold nanorods conjugated to antibodies to produce highly enhanced, sharp, and polarized surface Raman spectra: a potential cancer diagnostic marker", *Nano letters*, Vol. 7, No. 6, 2007, pp. 1591-1597.
- [24] N.J. Halas, S. Lal, W.-S. Chang, S. Link and P. Nordlander, "Plasmons in strongly coupled metallic nanostructures", *Chemical reviews*, Vol. 111, No. 6, 2011, pp. 3913-3961.
- [25] P.K. Jain and M.A. El-Sayed, "Surface plasmon coupling and its universal size scaling in metal nanostructures of complex geometry: elongated particle pairs and nanosphere trimers", *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 112, No. 13, 2008, pp. 4954-4960.
- [26] P.K. Jain and M.A. El-Sayed, "Universal scaling of plasmon coupling in metal nanostructures: extension from particle pairs to nanoshells", *Nano letters*, Vol. 7, No. 9, 2007, pp. 2854-2858.
- [27] S. Zhang et al., "Enhancing Plasmonic-Photonic Hybrid Cavity Modes by Coupling of Individual Plasmonic Nanoparticles", *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 123, No. 39, 2019, pp. 24255-24262.
- [28] I. Abdulhalim, "Biosensing configurations using guided wave resonant structures", In *Optical Waveguide Sensing and Imaging*, Springer, Dordrecht, 2008. pp. 211-228.
- [29] A. Shehadeh, A. Evangelou, D. Kechagia, P. Tataridis, A. Chatzilazarou and F. Shehadeh, "Effect of ethanol, glycerol, glucose/fructose and tartaric acid on the refractive index of model aqueous solutions and wine samples", *Food Chemistry*, 2020, p. 127085.
- [30] M. Pelton, A. Javier and B. Garnett, "Metal-nanoparticle plasmonics", *Laser & Photonics Reviews* 2, No. 3, 2008, pp. 136-159.
- [31] A.J. Haes and R.P. Van Duyne, "Nanoscale optical biosensors based on localized surface plasmon resonance spectroscopy", In *Plasmonics: Metallic Nanostructures and Their Optical Properties*, International Society for Optics and Photonics, Vol. 5221, 2003, pp. 47-58.