

حسگرهای فوق حساس تار نوری بر اساس تشدید پلاسمون سطحی نانوذرات طلا

مطهره السادات حسینیان^۱، منیره سادات حسینیان^۲، سروش خوشنویس^۳ و فائزه کاشانیان^۴

۱. دانشکده فیزیک و فوتونیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، کرمان

۲. دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه آزاد واحد علوم دارویی تهران، تهران

۳. دانشکده علوم و فنون نوین، کرمان، کرمان

۴. دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

پست الکترونیکی: ms.hoseinian@student.kgut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۵/۱۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۵/۱۹)

چکیده

از جمله عوامل اصلی در ایجاد حسگرهای تار نوری، خواص پلاسمونی فلزاتی نظیر طلا می‌باشد. با برانگیخته شدن پلاریتون‌های پلاسمون سطحی توسط تابش نور لیزر، خواص پلاسمونی ایجاد می‌شود که از این خاصیت بیشتر در تقویت‌کنندگی و حسگری استفاده می‌شود. در این مقاله سعی شده است به بررسی و گردآوری اطلاعاتی از قبیل مقایسه طول ناحیه حسگری و میزان حساسیت انواع حسگرهای تار نوری از جمله موجبر، توری برگ تار نوری، تار نوری چرخ واگن در سال‌های اخیر پرداخته شود.

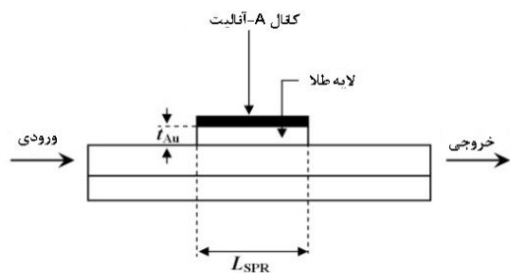
واژه‌های کلیدی: پلاسمون، تار نوری، حسگر

۱. مقدمه

پلاسمون سطحی، در سطح مشترک یک فیلم نازک فلزی مانند طلا و یک دی‌الکتریک، برانگیخته می‌شوند. از جمله عواملی که بر نوسان پلاسمون سطحی نانوذرات طلا اثرگذار است، تغییر ضریب شکست محیطی است که نانوذره در آن قرار دارد. تغییر ضریب شکست نانوذره، ثابت انتشار پلاسمون‌های سطحی را تغییر داده و باعث تغییراتی در جفت‌شدگی بین نور و پلاسمون سطحی می‌شود، که به صورت مشخصه‌های نوری در خروجی

حسگر اپتیکی، دستگاه حساسی است که کمیت ورودی تحت اندازه‌گیری را به کمیت دیگری از جمله مشخصه‌های نوری (تغییر زاویه جفت‌شدگی، تغییر طول موج جفت‌شدگی، تغییر فاز، تغییر شدت و تغییر قطبش) در خروجی تبدیل می‌کند. در حسگر تشدید پلاسمون سطحی (SPR)^۱، پلاریتون‌های

^۱ Surface Plasmon Resonance



شکل ۲. سطح مقطع حسگر موجبر پلاسمونی تک کاناله با ضخامت $t_{Au} = 50 \text{ nm}$ و $L_{SPR} = 100 \mu\text{m}$ [۱۱].

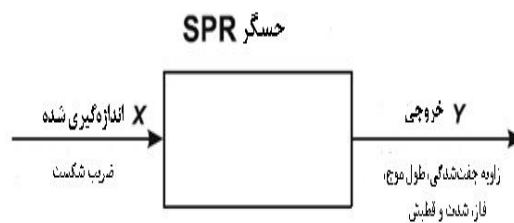
شده توسط آشکارسازها تعیین می شود. بنابراین محدوده بسامد جذب، برای آنالیت مورد نظر تعیین می گردد و از این طریق هرگاه آشکارسازها این محدوده بسامدی جدید را نشان دهند، آنالیت مورد نظر آشکارسازی خواهد شد. شکل ۱ مراحل حسگری پلاسمونی را نمایش می دهد.

اگر مقدار X کمیت قابل اندازه گیری قبل از ورود به حسگر و Y کمیت بعد از اندازه گیری و خروج از حسگر باشد، حساسیت حسگر از طریق نسبت Y به X تعیین می شود [۱۰]. بنابراین با توجه به کاربرد بسیار زیاد حسگرهای پلاسمونی، در این مقاله با سه نمونه از این نوع حسگرها آشنا خواهیم شد.

۲. حسگر موجبر

در سال ۲۰۱۰ جورمن و همکارانش از موجبر مسطح برای ایجاد حسگری مبتنی بر خواص پلاسمونی بر اساس حسگر تک کاناله و دوکاناله استفاده نمودند [۱۱].

حسگر موجبر تک کاناله در این نوع حسگر همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود، ضخامت هسته و پوسته به ترتیب ۱ و ۲ میکرومتر، و جنس هسته از نوع سیلیکا با ضریب شکست معلوم n و طول موج λ می باشد. در طراحی این حسگر، بخشی از پوسته را برداشته و لایه ای از جنس طلا را بر روی آن می پوشانند. طول ناحیه ای که در آن فرایند تشدید پلاسمون سطحی اتفاق می افتد، L_{SPR} نامیده می شود. هنگامی که این حسگر در محلول آنالیت فرو رود، آنالیت های مورد نظر به سطح طلا متصل می شوند و باعث افزایش ضریب شکست طلا می شوند. این تغییر در ضریب شکست، باعث تغییر در محدوده قله نمودار پلاسمونی شده و سپس حساسیت حسگر مورد نظر

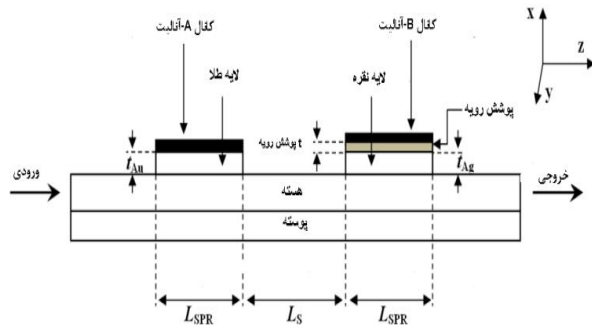


شکل ۱. نمایش مراحل حسگری پلاسمونی [۱۰].

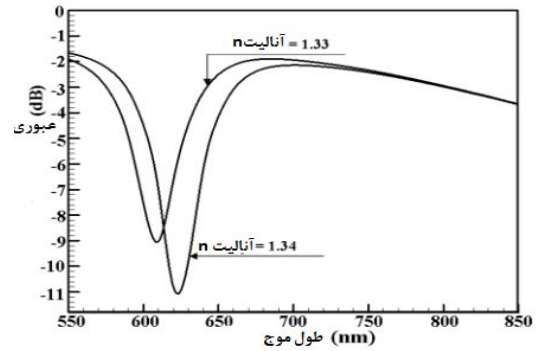
قابل مشاهده است [۱ و ۲]. از این خاصیت برای ساخت بسیاری از حسگرها در پزشکی و صنعت استفاده می شود.

اولین حسگر SPR با حساسیت بسیار بالا در سال ۱۹۹۹ توسط هومولا و همکارانش [۳] بدون استفاده از برجسب مولکولی ایجاد شد. بعد از آن حسگرهای زیستی SPR، کاربرد گسترده ای در تجزیه و تحلیل برهم کنش های بیومولکولی و آشکارسازی آنالیت های (ماده تحت حسگری) شیمیایی و بیولوژیکی پیدا کردند [۴-۶]. با پیشرفت صنعت، علاقه مندی ساخت حسگرها به سمت حسگرهایی متمایل شد که قادر بودند پاسخ های حسگری مشخص (ناشی از مولکول های آنالیت هدف مند شده) را از پاسخ های نامشخص، ناشی از نوسانات دما، ترکیب آنالیت ها و جذب مولکول های غیرهدف مند توسط سطح حسگر تشخیص دهند [۷ و ۸]. در سال های بعد ایجاد حسگرهای چندکاناله برای اندازه گیری هم زمان آنالیت های متفاوت، تحت بررسی قرار گرفت. از جمله این حسگرها، منشور جفت شده با ساختار SPR بود [۹]. سپس در سال های اخیر تمرکز بیشتر دانشمندان بر روی موجبرها و حسگرهای تار نوری قرار گرفت. در این مقاله به بررسی این نوع حسگرها از لحاظ کیفیت حسگری و طول ناحیه حسگری پرداخته خواهد شد.

نحوه عملکرد حسگرهای پلاسمونی، به این ترتیب است که، در ابتدا بسامد جذب پلاسمونی معینی که نانو ذرات طلا دارند، به عنوان تنظیم دستگاه حسگری مورد استفاده قرار می گیرد. بعد از ترکیب شدن نانو ذرات طلا با آنالیت مورد نظر، ضریب شکست و در نتیجه بسامدی که به عنوان تنظیم دستگاه قرار داده شده بود، تغییر کرده و آنگاه مقدار تغییر بسامد ایجاد



شکل ۴. سطح مقطع حسگر موجبر پلاسمونی دوکاناله با $L_S = 45 \mu\text{m}$ [۱۱].



شکل ۳. نمودار میدان بر حسب طول موج عبوری حسگر تک کاناله برای $L_{SPR} = 100 \mu\text{m}$ و $t_{Au} = 50 \text{nm}$ [۱۱].

۴. حسگر توری برگ تار نوری (FBG)

در سال ۲۰۰۹ هومولا و همکارانش [۱۲] موفق به ساخت حسگر پلاسمونی بر اساس توری برگ شدند. همان طور که در شکل ۵ دیده می شود، این حسگر شامل یک تار نوری تک مدی است که درون هسته آن توری برگ قرار دارد. سطح داخلی پوست تار با فیلم نازکی از طلا لایه نشانی شده است. برای حسگری لازم است این تار درون محیط آبی قرار گیرد. قسمت آبی در شکل همان آنالیت های مورد نظر در محیط مایع، می باشند [۱۲].

هنگامی که فوتون های تابیده شده به درون هسته، با توری برگ برخورد می کنند، توری برگ، مدهای متفاوتی از نور ورودی را به سمت پوسته تار بازتاب می دهد. در اثر برخورد مدهای بازتابیده شده از توری با لایه نازک طلا، خاصیت پلاسمونی ایجاد می شود که شدیداً وابسته به تغییر ضریب شکست محیط آنالیت می باشد [۱۲]. مقدار حساسیت این حسگر از رابطه

$$S = \frac{U_{res}^-}{U n_{sur}} \quad (2)$$

تعیین می شود. مقدار $U n_{sur}$ مقدار تغییرات ضریب شکست آنالیت محیط بر تار و U_{res}^- مقدار تغییرات طول موج تشدید پلاسمونی است که به صورت زیر می باشد

$$U_{res}^{\mu} = \Re(n_{eff}^{\mu} + n_{eff}^{\mu}) \Lambda, \quad (3)$$

که در آن n_{eff}^{μ} ضریب شکست مؤثر مد اولیه و n_{eff}^- ضریب شکست مؤثر مد ناشی از ترکیب پلاسمون ها و مدهای بازتابیده

تعیین می گردد. در شکل ۳، تغییر ناحیه حسگری از طول موج ۶۰۹ تا ۶۲۴ نانومتر برای تغییر ضریب شکست $n = 1.33$ تا $n = 1.34$ نشان داده شده است [۱۱].

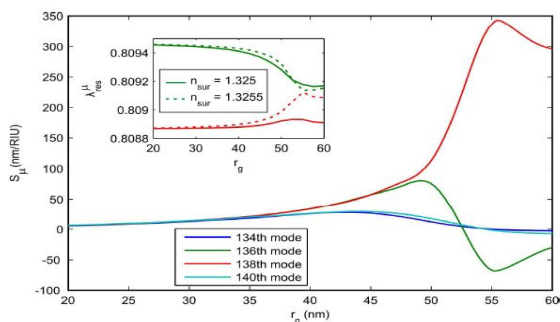
بنابراین میزان حساسیت این موجبر به صورت

$$S = \frac{U_{resonance}}{U n_{analyte}} \quad (1)$$

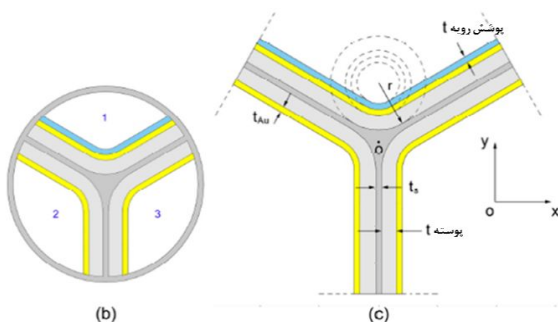
است که معادل است با تغییرات طول موج خروجی به تغییرات ضریب شکست.

۳. حسگر موجبر دوکاناله

از جمله معایب حسگرهای تک کاناله این است که مقدار نوفه در نتایج آنها زیاد است که این به دلیل مقاومت کم حسگرها، نوسانات دما و برهم کنش های مولکولی نامشخص می باشد. به همین دلیل برای به دست آوردن نتایج دقیق تر، از حسگرهای چندکاناله استفاده می کنند. در طراحی حسگر دوکاناله که در شکل ۴ نشان داده شده است، دو قسمت از پوسته یک تار را توسط طلا و نقره، لایه نشانی می کنیم. به هر کدام از این بخش های حسگری، کانال گفته می شود. اگر هر دو کانال با یک ماده فلزی مانند طلا لایه نشانی شود، نمودار پلاسمونی دو کانال، روی یکدیگر قرار می گیرد و مانند یک حسگر تک کاناله عمل می کند. بنابراین بهتر است برای رفع این مشکل از مواد فلزی متفاوتی برای لایه نشانی کانال ها استفاده کنیم. در این مطالعه، از نقره و طلا استفاده شده است. برای جلوگیری از اکسید شدن نقره روی آن پوششی قرار داده شده است [۱۱].



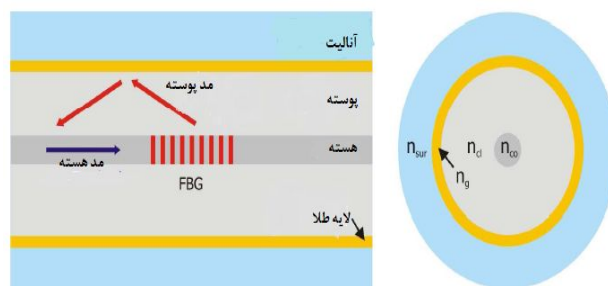
شکل ۶: (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار حساسیت بر حسب ضخامت لایه طلا برای ۱۳۴ امین تا ۱۴۰ امین مد توری برگ برای طول ناحیه حسگری ۲ mm [۱۲].



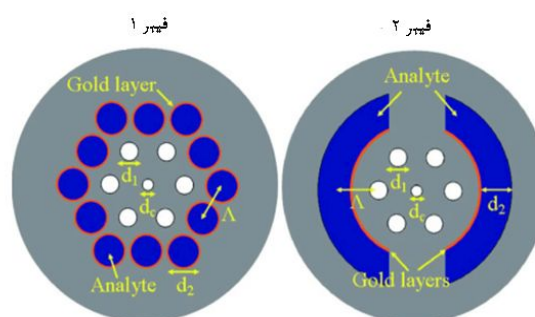
شکل ۸: (رنگی در نسخه الکترونیکی) سطح مقطع تار چرخ واگن [۱۴].

شکست دو حفره ۲ و ۳ یکسان در نظر گرفته می شود. هنگامی که نور لیزر به هسته این تار تابیده می شود، امواج نوری به نانوذرات طلا برخورد کرده و باعث ایجاد خاصیت پلاسمونی می شود. در این هنگام می توان حالت پایه حسگری را با آشکار سازی طول موج های عبوری از تار به دست آورد است و اطراف بیرونی بازوهای تار با طلا به ضخامت $t_{Au} = 40 \text{ nm}$ لایه نشانی شده است. ضریب شکست آن با استفاده از فرمول درود تعیین می شود. ضریب شکست هسته تار، $n = 1.44$ و ضریب شکست ماده و سپس با طول موج عبوری، هنگامی که آنالیت های مورد نظر در حفره قرار می گیرند، مقایسه می شود، تا ناحیه حسگری مربوطه مشخص شود [۱۴].

در نمودار شکل ۹، توان عبوری این حسگر بر حسب طول موج برای حالتی نشان داده شده است که نمونه آنالیت در کانال ۱ با ضریب شکست یکسان ۱.۳۳ و در کانال های ۲ و ۳ با



شکل ۵: (رنگی در نسخه الکترونیکی) طرحی از حسگر توری برگ تار نوری [۱۰].



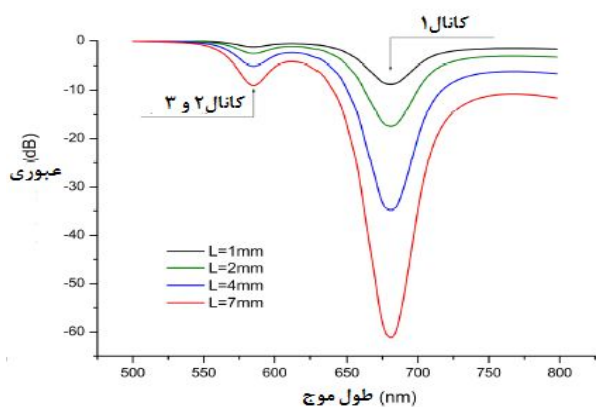
شکل ۷: (رنگی در نسخه الکترونیکی) سطح مقطع نمونه هایی از حسگرهای پلاسمونی تارهای حفره دار [۱۳].

شده از توری برگ می باشد. کمیت Δ نیز دوره توری را معین می کند. نمودار شکل ۶ حساسیت این حسگر توری تار نوری را نشان می دهد [۱۲].

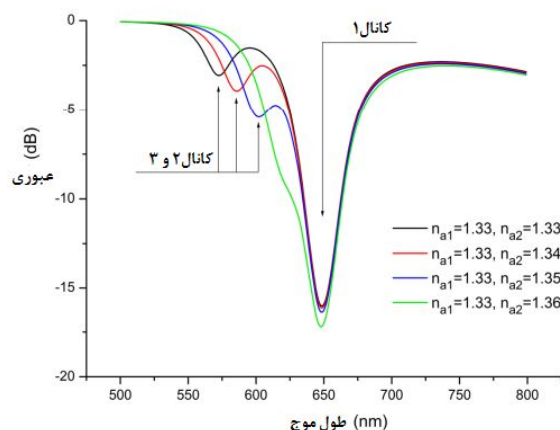
۵. حسگر تار نوری ۳ کاناله چرخ واگن

برای تارهای میکرو ساختار طراحی های بسیاری از حسگرهای پلاسمونی وجود دارد، شکل ۷ نمونه ای از این حسگرها است. در این نوع از حسگرهای تار نوری، همان طور که در شکل ۷ دیده می شود، محیط حفره های بزرگتر با طلا لایه نشانی شده است که شامل آنالیت، و حفره های کوچکتر شامل هوا است [۱۳].

نمونه دیگری از این طراحی، همان طور که در شکل ۸ دیده می شود، سه حفره بزرگ وجود دارد، که محل قرارگیری آنالیت اطراف هسته $n = 1.46$ می باشد. از آنجایی که این مسئله در حالت نظری به کمک روش عددی اجزای محدود حل می شود نیازمند تقارن در شکل است، بنابراین برای راحتی در محاسبات، ضریب



شکل ۱۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار طیف عبوری بر حسب طول‌های متفاوت.



شکل ۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار میدان بر حسب طول موج عبوری برای حسگر تار چرخ واگن با ضریب شکست آنالیت در حفره یک $n = 1/33$ و تغییر ضریب شکست آنالیت‌ها در حفره‌های دو و سه با $n = 1/36 - 1/33$ [۱۴].

جدول ۱. مقایسه ویژگی‌های حسگرهای SPR دوکاناله هستند.

مراجع	حساسیت nm / RIU	محدوده ضریب تغییر شکست	طول ناحیه حسگری	ویژگی‌ها	ساختار نوری
[۱۱]	۱۵۰۰	۱/۳۳ - ۱/۳۶	۴۵ μm	کانال‌های متوالی، Au و Ag	موجبر
[۱۲]	۲۰۰	۱/۳۲ - ۱/۳۲۵	۲ mm	Au، تار تک مد، کانال‌های متوالی، توری برگ،	نوری تار نوری
[۱۴]	۱۵۳۵	۱/۳۳ - ۱/۳۶	۱ - ۷ mm	Au، میکرو ساختار با کانال‌های موازی،	تار چرخ واگن

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعه این سه نوع حسگر تار نوری، در جدول ۱، طول ناحیه حسگری و میزان حساسیت آنها طبق تغییرات ضریب شکست نشان داده شده است. حسگر موجبر، دارای طول ناحیه حسگری کمتری نسبت به بقیه تارها می‌باشد. با افزایش طول ناحیه حسگری، هم ساخت حسگر و هم نمونه بارگیری آنالیت، آسان‌تر می‌شود. همچنین در برهم‌کنش کافی با نمونه نیز مؤثر است. در این میان، حسگر تار چرخ واگن دارای حساسیت بیشتری نسبت به سایر حسگرها می‌باشد.

ضریب شکست متغیر $1/33$ تا $1/36$ در نظر گرفته شده است. از جمله عواملی که بر حساسیت حسگرها تأثیر به‌سزایی دارد، طول ناحیه حسگری می‌باشد، خانم لی و همکارانش [۱۴] طی آزمایشات تجربی به این نتیجه رسیدند که با افزایش طول ناحیه حسگری دامنه سیگنال تشدید، بیشتر و در نتیجه حساسیت حسگر افزایش خواهد یافت. این نتایج در شکل ۱۰ به خوبی نمایان است. حسگر، با ضخامت پوسته $1/5 \mu\text{m}$ ، پوشش رویه 80 nm و ضریب شکست پوشش رویه $1/44$ ، آنالیت کانال یک $1/33$ و آنالیت کانال دو $1/34$ [۱۴].

مراجع

1. T R Jensen, *J Phys. Chem. B* **17**, 23 (1999) 9846.
2. L Sunmook, "Surface Modification of Gold Nanoparticles and Their Application in Biomolecular Sensing", Institute of Technology, Chicago (2007).
3. J Homola, S Yee, and G Gauglitz, *Sens. Actuators B Chem.* **54**, 1-2 (1999) 3.
4. A Nooke, U Beck, A Hertwig, A Krause, H Kruger, V Lohse, D Negendank, and J Steinbach, *Sens. Actuators B Chem.* **149**, 1 (2010) 194.
5. J Homola, J Dostálek, S F Chen, A Rasooly, S Jiang, and S S Yee, *Int. J. Food Microbiol.* **75**, 1-2 (2002) 61.
6. V V Koubová, E Bryndaa, L Karasová, J Škvor, J

11. E K Akowuah, T Gorman, S Haxha, J V. Oliver, Dual channel planar waveguide surface Plasmon *Optics Express* **18**, 24 (2010) 24412.
12. Barbora Špačková and Jiří Homola, *Optics Express* **17**, 25 (2009) 23254.
13. A Hassani and M Skorobogatiy, *Optical Society of America* **24**, 6 (2007) 1423.
14. Yating Zhang, Chi Zhou, Li Xia, Xia Yu, and D Liu, *Optical Society of America* **19**, 23 (2011) 22863.
7. J Homola, H Vaisocherová, J Dostálek, and M Piliarik, *Methods* **37**, 1 (2005) 26.
8. S Patskovsky, M Meunier, P N Prasad, and A V Kabashin, *Opt. Express* **18**, 14 (2010) 14353.
9. X D Hoa, A G Kirk, and M Tabrizian, *Biosens. Bioelectron* **23**, 2 (2007) 151.
10. J Homola, "Surface Plasmon Resonance Based Sensors", Vol 4, Springer (2006).