<del>ر</del>وهش فيري

مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۵، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۴



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

مطهر هالسادات حسينيان'، منيره سادات حسينيان'، سروش خوشنويس" و فائزه كاشانيان

۱.دانشکدهٔ فیزیک و فوتونیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، کرمان ۲. دانشکدهٔ علوم و فناوریهای نوین، دانشگاه آزاد واحد علوم دارویی تهران، تهران ۳. دانشکدهٔ علوم و فنون نوین، کرمان، کرمان ۴. دانشکدهٔ علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

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

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

### چکیدہ

از جمله عوامل اصلی در ایجاد حسگرهای تار نوری، خواص پلاسمونی فلزاتی نظیر طلا میباشد. بـا برانگیختـه شـدن پلاریتـونهـای پلاسـمون سطحی توسط تابش نور لیزر، خواص پلاسمونی ایجاد میشود که از این خاصیت بیشتر در تقویتکنندگی و حسگری اسـتفاده مـیشـود. در ایـن مقاله سعی شده است به بررسی و گردآوری اطلاعاتی از قبیل مقایسهٔ طول ناحیهٔ حسگری و میزان حساسیت انواع حسگرهای تار نوری از جملـه موجبر، توری برگ تار نوری، تار نوری چرخ واگن در سالهای اخیر پرداخته شود.

**واژەھاي كليدي:** پلاسمون، تار نوري، حسگر

#### ۱. مقدمه

حسگر اپتیکی، دستگاه حساسی است که کمیت ورودی تحت اندازه گیری را به کمیت دیگری از جمله مشخصه های نوری (تغییر زاویهٔ جفت شدگی، تغییر طول موج جفت شدگی، تغییر فاز، تغییر شدت و تغییر قطبش) در خروجی تبدیل میکند. در حسگر تشدید پلاسمون سطحی (SPR')، پلاریتون های

پلاسمون سطحی، در سطح مشترک یک فیلم نازک فلزی مانند طلا و یک دیالکتریک، برانگیخته می شوند. 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 پلاسمون های سطحی را تغییر داده و باعث تغییراتی در جفت شدگی بین نور و پلاسمون سطحی می شود، که به صورت مشخصه های نوری در خروجی

**<sup>\</sup>** Surface Plasmon Resonance



 $L_{SPR} = 100 mtext{ m}$   $t_{Au} = 00 mtext{ m}$   $t_{Au} = 00 mtext{ m}$ 

شده توسط آشکارسازها تعیین می شود. بنابراین محدودهٔ بسامد جذب، برای آنالیت مورد نظر تعیین می گردد و از این طریق هرگاه آشکارسازها این محدودهٔ 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 اندازهگیری قبل از ورود به حسگر و Y کمیت بعد از اندازهگیری 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 جـورمن و همکـارانش از مـوجبر مسطح بـرای ایجاد حسگری مبتنی بر خواص پلاسـمونی بـر اسـاس حسـگر تککاناله و دوکاناله استفاده نمودند [۱۱].

حسگر موجبر تککاناله در این نوع حسگر همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود، ضخامت هسته و پوسته به ترتیب ۱ و۲ میکرومتر، و جنس هسته از نوع سیلیکا با ضریب شکست معلوم *n*و طول موج { می باشد. در طراحی این حسگر، بخشی از پوسته را برداشته و لایهای از جنس طلا را بر روی آن می پوشانند. طول ناحیهای که در آن فرایند تشدید پلاسمون سطحی اتفاق می افتد، L<sub>SPR</sub> نامیده می شود. هنگامی که این حسگر در محلول آنالیت فرو رود، آنالیتهای مورد نظر به سطح طلا متصل می شوند و باعث افزایش ضریب شکست طلا می شوند. این تغییر در ضریب شکست، باعث تغییر در محدودهٔ قلهٔ نمودار پلاسمونی شده و سپس حساسیت حسگر مورد نظر



**شکل۱**. نمایش مراحل حسگری پلاسمونی [۱۰].

قابل مشاهده است [۱و 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 همكارانش [٣] بدون استفاده از برچسب مولکولی ایجاد شد. بعد از آن حسگرهای زیستی SPR، کـاربرد گستردهای در تجزیه و تحلیل برهمکنشهای بیومولکولی و آشکارسازی آنالیت، ای (مادهٔ تحت حسگری) شیمیایی و بيولوژيكي پيدا كردند [۴-۴]. با پيشرفت صنعت، علاقمندي ساخت حسگرها به سمت حسگرهایی متمایل شد که قادر بودند پاسخ های حسگری مشخص (ناشی از مولکول های آنالیت هدفمند شده) را از پاسخ های نامشخص، ناشی از نوسانات دما، تركيب أناليت ها و جذب مولكول هاى غیرهدفمند توسط سطح حسگر تشخیص دهند [۷ و ۸]. در سالهای بعد ایجاد حسگرهای چندکاناله برای اندازه گیری همزمان آنالیت های متفاوت، تحت بررسی قرار گرفت. از جمله این حسگرها، منشور جفت شده با ساختار SPR بود [۹]. سپس در سالهای 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 ناحیهٔ حسگری ير داخته خواهد شد.

نحوهٔ 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 استفاه قرار می گیرد. بعد از ترکیب شدن نانوذرات 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<sub>s</sub> = ۴۵ μm[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 تکمدی است که درون هسته آن توری برگ قرار دارد. سطح داخلی پوست تار با فیلم نازکی از طلا لایهنشانی 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 میکنند، توری برگ، مدهای متفاوتی از نور ورودی را به سمت پوستهٔ تار بازتاب میدهد. در اثر برخورد مدهای بازتابیده شده از توری با لایهٔ نازک طلا، خاصیت پلاسمونی ایجاد می شود که شدیداً وابسته به تغییر ضریب شکست محیط آنالیت می باشد [۱۲]. مقدار حساسیت این حسگر از رابطهٔ

 $S = \frac{\mathsf{u}\}^{\tilde{}}_{res}}{\mathsf{u}\,n_{sur}} \tag{(Y)}$ 

تعیین می شود. مقدار un<sub>sur</sub> مقدار تغییرات ضریب شکست آنالیت محیط بر تار و es<sup>~</sup> (u مقدار تغییرات طول موج تشدید پلاسمونی است که به صورت زیر می باشد

 $\mu_{res} = \mathbb{R}(n_{eff}' + n_{eff}^{\mu})\Lambda,$  (۳) که در آن  $n_{eff}$  ضریب شکست مؤثر مد اولیه و  $n_{eff}$  ضریب شکست مؤثر مد ناشی از ترکیب پلاسمونها و مدهای بازتابیده



تعیین می گردد. در شکل ۵۳، تغییر ناحیهٔ حسگری از طول موج ۲۰۹۹ تــا ۶۲۴ نــانومتر بــرای تغییــر ضــریب شکســت ۱۹۳۹ تا ۱۹۳۴ نـانومتر بــرای تغییــر ضـریب شکســت ۱۹۳۹ بنابراین میزان حساسیت این موجبر به صورت بنابراین میزان حساسیت این موجبر به صورت (۱)  $S = \frac{U}{un_{analyte}}$ ۱۱ معادل است با تغییرات طول موج خروجی به تغییرات

ضريب شكست.

## ۳. حسگر موجبر دوکاناله

از جمله معایب حسگرهای تککاناله این است که مقدار نوف در نتایج آنها زیاد است که این به دلیل مقاومت کم حسگرها، نوسانات دما و برهم کنش های مولکولی نامشخص میباشد. 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 پوستهٔ یک تار را توسط طلا و نقره، لایهنشانی میکنیم. به هر کدام از این بخش های حسگری، کانال گفته میشود. اگر هر دو کانال با یک مادهٔ فلزی مانند طلا لایهنشانی شود، نمودار پلاسمونی دو عمل میکند. بنابراین بهتر است برای رفع این مشکل از مواد فلزی متفاوتی برای لایهنشانی کانالها 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 [11].



**شکل ۵.** (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) طرحی از حسـگرتوری بـرگ تار نوری [۱۰].



**شکل۷.** (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) سطح مقطع نمونههایی از حسگرهای پلاسمونی تارهای حفرهدار [۱۳].

شده از توری برگ میباشد. کمیت ۸ نیز دورهٔ توری را معین میکند. نمودار شکل ۶ حساسیت این حسگر توری تار نوری را نشان میدهد [۱۲].

## ۵. حسگر تار نوری۳ کانالهٔ 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].

نمونهٔ دیگری از این طراحی، همان طور که در شکل ۸ دیده می شود، سه حفرهٔ بزرگ وجود دارد، که محل قرارگیری آنالیت اطراف هسته ۱/۴۶ = n 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 ۶**. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) نمودار حساسیت بر حسب ضخامت لایهٔ طلا برای ۱۳۴امین تا ۱۴۰ امین مد توری برگ برای طول ناحیهٔ حسگری **۲ mm [۱۲**].



**شکل۸** (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) سطح مقطع تار چرخ واگـن [۱۴].

شکست دو حفرهٔ ۲ و ۳ یکسان در نظر گرفته می شود. هنگامی که نور لیزر به هستهٔ 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 پایهٔ حسگری را با آشکار سازی طول موج های عبوری از تار به دست آورد است و اطراف بیرونی بازوهای تار با طلا به ضخامت ۲۵ ۳۰ ۲۵ لایه نشانی شده است. ضریب شکست آن با استفاده از فرمول درود<sup>۱</sup> تعیین می شود. ضریب شکست هستهٔ تار، ۱/۴۴ ۳ و ضریب شکست ماده و سپس با طول موج عبوری، هنگامی که آنالیت های مورد نظر در مشخص شود [۱۴].

در نمودار شکل ۹، توان عبوری این حسگر بر حسب طول موج برای حالتی نشان داده شده است که نمونهٔ آنالیت در کانال ۱ با ضریب شکست یکسان ۱٬۳۳ و در کانالهای ۲ و ۳ با

1. Drude formula





مراجع	مساسيت nm/RIU	محدودۂ ضریب تغییر شکست	طول ناحیهٔ حسگری	و يژگى ھا	ساختار نوري
[11]	1000	1/22 - 1/28	۴۵ µm	کانال،های متوالی، Au و Ag	موجبر
[17]	۲۰۰	1/37-1/870	۲mm	تار تک مد، کانالہای متوالی،توری برگ، Au	نوری تار نوری
[14]	١٥٣٥	1/22 -1/28	v-v mm	میکرو ساختار با کانالهای موازی، Au	تار چرخ واگن

نتيجه گيري

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

- 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.
- 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

ضریب شکست متغیر ۱/۳۳ تا ۱/۳۶ در نظر گرفته شده است. از جمله عواملی که بر حساسیت حسگرها تأثیر به سزایی دارد، طول ناحیهٔ حسگری می باشد، خانم لی و همکارانش [۱۴] طی آزمایشات تجربی به این نتیجه رسیدند که با افزایش طول ناحیهٔ حسگری دامنهٔ سیگنال تشدید، بیشتر و در نتیجه حساسیت حسگر افزایش خواهد یافت. این نتایج در شکل ۱۰ به خوبی نمایان است. حسگر، با ضخامت پوستهٔ <sup>mμ Δ/۱</sup>، پوشش رویهٔ <sup>۸</sup> nm یک ۱/۳۴ و آنالیت کانال دو ۱/۳۴ [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.



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

- 11. E K Akowuah, T Gorman, S Haxha, J V. Oliver, Dual channel planar waveguide surface Plasmon *Optics Express* **18**, 24 (2010) 24412.
- 12. BarboraŠpa ková and Ji íHomola, *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.

Homola, J Dostálek, P Tobiška, and J Rošický, *Sens. Actuators* B *Chem.* **74** (2001) 100.

- 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).