بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه سیستان و بلوچستان،
زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹

کد مقاله : ۲-۱۵۹۴-۱۰-A

آشکارسازی مکان نانوذرات طلای به تله افتاده در انبرک نوری به روش ماره

علی اکبر خُرشاد[1*]، محمدرضا رحیمی تبار[1] و سیدنادر سیدریحانی[1]

[1]دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
***Khorshad@sharif.edu**

چکیده –تله اندازی نوری نانوذرات طلا با هدف نیروسنجی و آزمایش های زیستی حائز اهمیت است. روش مرسوم اندازه گیری مکان این نانوذرات استفاده از QPDدر صفحه کانون پشتی عدسی چگالنده میکروسکوپ طبق یک مدل تداخلی است. در این مقاله به صورت نظری و تجربی نشان داده ایم که با استفاده ازتکنیک ساده، ارزان و در عین حال دقیق ماره می توان مکان نانوذرات طلای به قطر چند ده تا چند صد نانومترِبه تله افتاده در انبرک نوری را با حساسیت به مراتب بیشتراز QPD آشکارسازی کرد. برای نمونه برای نانوذره طلا به قطر ۱۵۰ nm، حساسیت آشکارسازی ماره ۷۱ % بیشتر از QPD است. حساسیت آشکارسازی بیشتر افزایش حد تفکیک فضایی نانو ذره طلا و نهایتاً نیروسنجی اپتیکی دقیقتری را به همراه خواهد داشت.

کلید واژه- تله اندازی نوری، انبرک نوری، آشکارسازی مکان، نانوذرات طلا، تکنیک ماره

Position Detection of Optically Trapped Gold Nano-particles using Moiré Technique

Ali Akbar Khorshad[1*], Mohammad Reza Rahimi-tabar[1], and Seyed-Nader Seyed-Reihani[1]

[1]Sharif University of Technology, Tehran, Iran
Khorshad@sharif.edu

Abstract- Optical trapping of Gold Nano-Particles (GNP) is important due to their higher trap efficiencies and also single molecule biophysics experiments. The conventional method for position detection of GNP is QPD according to a back-focal-plane interferometry model. In this paper we show, both by theory and experiment, that simple,inexpensive and precise Moiré Technique (MT) is able to measure GNP position more sensitive than that of the QPD method for 20-250 nm range GNP. As an example, MT provides 71% higher detection sensitivity in compared to the QPD method for 150 nm diameter gold bead. However, larger detection sensitivity potentially increases spatial resolution of GNP, leads to measure optical forces more accurately.

Keywords: Optical trapping, Optical tweezers, Position detection, Gold Nano-particles, Moiré technique

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

مقدمه

انبرک نوری که اولین بار توسط آرتور اشکین (برنده جایزه نوبل فیزیک ۲۰۱۸)معرفی شد[۱] یک باریکه لیزر گاوسی پیوسته با مد TEM_{00} است که توسط عدسی شیئی میکروسکوپ شدیداً کانونی شده است. این وسیله کاربردهای گسترده ای در شاخه های فیزیک، فنآوری نانو و علوم زیستی یافته است. ذرات با ابعاد نانومتر و میکرومتر، از جنس دی الکتریک یا فلز با ضریب شکست بیشتر از محیط اطراف، در کانون باریکه لیزر انبرک نوری به دام افتاده و به جهت خاصیت فنرگونهیِ نیروی خالص وارد بر آنها می توانند نقش نیروسنجی و اعمال نیرو در مقیاس فمتونیوتن تا پیکونیوتن را به عهده داشته باشند. به علت همپوشانی مقیاس این نیرو با نیروهای موجود در اجزای زیستی،انبرک نوری در شاخه علوم زیستی بسیار مورد توجه است. برای مقاصد نیروسنجی، مکان ذره به تله افتاده باید به صورت دقیق اندازه گیری شود که اصطلاحاً به آشکارسازی در انبرک نوری معروف است. روش مرسوم آشکارسازی استفاده از فوتودیود چهارتایی (QPD) در صفحه کانون پشتی عدسی چگالنده میکروسکوپ طبق یک مدل تداخلی است که توسط اشمیت و همکارانش معرفی شده است[۲]. در مدل پیشنهادی، با تغییر مکان ذره به دام افتاده، شدت باریکه لیزر عبوری از آن که به QPD می رسد افت و خیز کرده طوری که تفاضل شدت نیمه های راست و چپ و بالا و پایینQPD به ترتیب معادل با میزان جابجایی ذره در راستاهای افقی و عمودی خواهد بود. اخیراً گرایش به تله اندازی نانوذرات فلز طلا افزایش یافته است. علت آن از یک طرف قدرت تله ۷ برابری نانو ذرات طلا نسبت به نانو ذرات با اندازه مشابه و جنس دی الکتریک است، از طرف دیگر جذب بالای تابش الکترومغناطیس در طول موج تله اندازیnm ۱۰۶۴است که پتانسیل تخریب بافت های ناسالم در تحقیقات سرطان را دارد. تاکنون با تلاش های صورت گرفته امکان تله اندازی نانوذرات طلای با قطر nm ۲۵۴-۱۸ فرآهم شده است و اخیراً تله اندازی کوچکترین نانو ذره طلا به قطر nm ۹/۵ توسط دکتر سیدریحانی و همکارانش به ثبت رسیده است[۳]. علیرغم پژوهش های فراوان در زمینه تله اندازی، در راستای آشکارسازی نانوذرات طلا تنها یک پژوهش صورت گرفته و آن معرفی روش تمام نگاری دیجیتال با همدوسی پایین (Low coherence digital holography) توسط Yoshio Hayasaki است[۴] که عملاً برای نانوذرات چند ده نانومتری کارآمد نیست.

در پژوهش های قبلی به صورت تئوری و تجربی نشان داده‌ایم که با استفاده از انحراف سنج ماره می‌توان به آشکارسازی میکروکره دی الکتریک به دام افتاده در انبرک نوری با حساسیت آشکارسازی به مراتب بیشتر از روش مرسوم QPD پرداخت[۶-۵]. انحراف سنج ماره متشکل از دو توری پراش است که یکی در فاصله تالبوت دیگری قرار دارد. این آشکارساز طبق مدل پیشنهادی توسط اشمیت [۲] بکار گرفته می‌شود. تفاضل شدت دو نیمه متقارن نقش ماره و همچنین جفت فریزهای متقابل با جابجایی ذره در تله رابطه خطی دارد که این به عنوان معیار آشکارسازی عمل می کند. در این مقاله به صورت شبیه سازی و تجربی نشان می‌دهیم که ایده آشکارسازی در انبرک نوری با استفاده از تکنیک ماره را می‌توان به نانوذرات طلای به شعاعnm ۲۵۰- ۲۰ تعمیم داد که برتری آن حساسیت بیشتر در آشکارسازی و در نتیجه افزایش حد تفکیک فضایی جهت مقاصد نیروسنجی در نمونه های زیستی است.

شبیه سازی

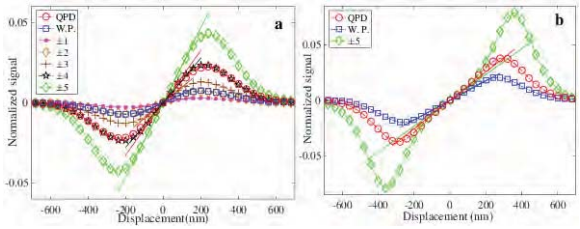
در پژوهش های قبلی به طور مفصل به فرمول بندی نظری آشکارسازی عرضی و محوری ذره‌یِ در تله با استفاده از تکنیک ماره پرداخته شده است[۶-۵]. حال برای تعمیم این تئوری به نانوذرات طلا باید کمیت قطبش

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

پذیری موجود در دامنه میدان پراکنده شده را به صورت رابطه Claussius-Mossotti یعنی

$$\alpha = \alpha' + i\alpha'' = 3V' \frac{\epsilon_g - \epsilon_w}{\epsilon_g + 2\epsilon_w} \qquad (1)$$

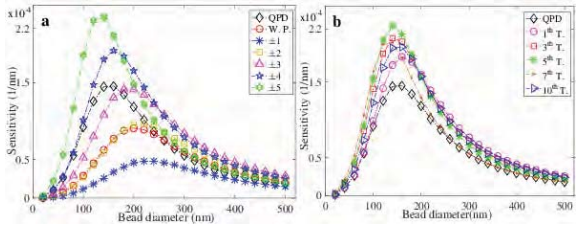
در نظر گرفت که در آن $\epsilon_g = -54 + i5.9$، ϵ_w و V' به ترتیب گذردهی طلا، گذردهی آب و حجم اصلاح یافته است. توجه کنید که بخش های حقیقی و موهومی گذردهی طلا به ترتیب شکست و جذب نور در فلز را توصیف می‌کنند. از آنجا که میدان الکترومغناطیس داخل یک حجم فلزی تضعیف می‌شود ذرات با شعاع $r \ll \delta$ (δ عمق پوسته است که برای فلز طلا در طول موج nm ۱۰۶۴برابر nm ۲۳است) توسط نور به صورت یکنواخت قطبیده می‌شوند. حال آن که برای ذرات با شعاع $r \simeq \delta$ میدان الکتریکی به صورت نسبی داخل ذره نفوذ کرده و از این رو به جای حجم اصلی باید حجم اصلاح شده $V' = 4\pi \int_0^a r^2 \exp[(r-a)/\delta] dr$ را در نظر گرفت که در آن a شعاع ذره است. جهت شبیه سازی، کدهایی را تحت نرم افزار متلب از روی تئوری پایه ریزی شده نوشته-ایم که به نتایج حاصل از آن می‌پردازیم. شکل ۱ منحنی آشکارسازی به روش ماره (کل نقش ماره و همچنین جفت فریزهای متقابل) و QPD را برای نانوذرات طلا به قطر nm(a)۱۵۰و nm (b) ۲۴۰ نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱(a) مشاهده می‌شود که در منحنی‌های آشکارسازی ماره همانند QPD یک بازه خطی آشکارسازی وجود دارد و علاوه بر آن بیرونی ترین جفت فریز متقابل بیشترین حساسیت آشکارسازی را داراست. بنابراین می-توان با تکنیک ماره به آشکارسازی نانوذرات طلا با حساسیت به مراتب بیشتر از روش مرسوم QPD پرداخت. با توجه به شکل ۱(b) خمشی در منحنی آشکارسازی ذره به قطر nm ۲۴۰ مشاهده می‌شود که در ذره به قطر nm ۱۵۰(شکل ۱(a)) وجود ندارد. این پدیده که کاهش حساسیت



شکل ۱ : سیگنال آشکارسازی بر حسب جابجایی نانو ذره طلا به قطر nm ۱۵۰ (a) و nm ۲۴۰ (b) به روش های ماره و QPD. اینست .W.P بیانگر کل نقش ماره و ±1، ±2 و ... معرف شماره جفت فریزهای متقابل است.

آشکارسازی را به همراه دارد به خاطر غلبه سهم جذب بر پراکندگی باریکه لیزر توسط اندازه های خاصی از نانو ذرات طلاست. چرا که پراکندگی بیشتر حساسیت آشکارسازی بیشتری را به همراه خواهد داشت.

در یک شبیه سازی دیگر با در نظر گرفتن قطر نانو ذره طلا و فاصله تالبوت به عنوان پارامتر، حساسیت آشکارسازی هر دو روش محاسبه شده که نتایج آن در شکل (۲) آمده است. با توجه به شکل ۲(a) مشاهده می-شود که بیرونی ترین جفت فریز متقابل و نانو ذره طلا به قطر nm ۱۵۰ بیشترین حساسیت آشکارسازی را داراست. همچنین با توجه به شکل ۲(b) برای طیف نانوذرات طلا نیز یک فاصله تالبوت بهینه وجود دارد که به ازای آن حساسیت آشکارسازی ماره بیشینه است.در این مورد فاصله تالبوت پنجم بهینه است که حساسیت آشکارسازی آن برای نانو ذره طلا به قطر nm ۱۵۰ حدود ۵۰ % بیشتر از QPD است.

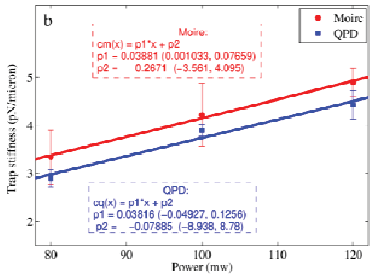


شکل ۲ : حساسیت آشکارسازی بر حسب قطر نانوذره طلا برای جفت فریزهای متقابل (a)و فواصل تالبوت متفاوت (b).

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

کارهای تجربی

همه آزمایش های این مقاله در آزمایشگاه "انبرک نوری و میکرودستکاری زیستی ۱" دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شریف انجام شده است. جزییات چیدمان به طور مفصل در مراجع [۶-۵] شرح داده شده است. غلظت محلول نانوذره های طلا به قدری کم بوده است که در ابتدای آزمایش پس از گذشت مدت زمانی تنها یک نانو ذره طلا به تله بیفتد. بعلاوه تعداد نانوذره ها به صورت برخط از روی منحنی طیف توانی یا واریانس داده های مکانی قابل ردیابی است. به عنوان یک آزمایش کنترلی جهت درجه بندی انبرک نوری به روش طیف توانی، یک نانو ذره طلا به قطر ۲۰۰ nm به تله افتاده و هر دو سیستم آشکارسازی، سیگنال مکانی ذره را با فرکانس ۵ KHz برای مدت زمان ۵s ثبت کرده اند. با تحلیل طیف توانی داده های مکانی، مقدار ثابت سختی تله میانگین برای هر دو روش آشکارسازی ماره و QPD به ترتیب $(2.60 \pm 0.05)\frac{pN}{\mu m}$ و $(2.60 \pm 0.08)\frac{pN}{\mu m}$ اندازه گیری می‌شود که اعتبار آشکارسازی نانوذرات طلا به روش ماره را تایید می‌کند. در پایان برای بررسی اثر خطی بودن ثابت سختی تله با توان لیزر ورودی که به هالمارک انبرک نوری معروف است آزمایشی شبیه آزمایش یاد شده با نانو ذره طلا به قطر ۱۵۰ nm انجام شده است که نتایج حاصل از



شکل ۳ : خطی بودن قدرت تله با توان برای نانو ذره طلا به قطر ۱۵۰ nm.

آن در شکل ۳ آورده شده است. مشاهده می‌شود که همچنان ثابت سختی تله در توان های مختلف برای هر دو روش آشکارسازی یکسان است. لازم به ذکراست که آزمایش های مربوط به بررسی اثر فاصله تالبوت در حساسیت آشکارسازی ماره که به نتایج شبیه سازی آن در شکل ۲ اشاره شد، در حال انجام است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان دادیم که ایده آشکارسازی در انبرک نوری با استفاده از انحراف سنج ماره برای نانوذرات فلزی از جمله طلا قابل تعمیم است. این روش حساسیت آشکارسازی بیشتر و در نتیجه حد تفکیک فضایی بهتری را به همراه دارد.

سپاسگزاری

از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور جهت گرنت به شماره ۱۳۶۲۰ ۹۸۰ سپاسگزاریم.

مرجع‌ها

[1] A. Ashkin, et al.,"Observation of a single-beam gradientforce optical trap for dielectric particles", Opt. Lett., Vol. 11,No. 5, pp. 288-290, 1986.

[2] F. Gittes, et al., "Interference model for back-focal-planedisplacement detection in optical tweezers", Opt. Lett., Vol. 23,No. 1, pp. 7-9 1998.

[3] F. Hajizadeh, et al., "Optimized optical trapping of gold nanoparticles," Opt. express, Vol.18, No. 2, pp. 551–559, 2010.

[4] T. Higuchi,et al., "Three-dimensional positioning of opticallytrapped nanoparticles," Appl. Optics,Vol. 50, No. 2, pp. 183–188, 2011.

[5] A. A. Khorshad, et al., "Moiré deflectometry-based positiondetection for optical tweezers", Opt. Lett., Vol. 42, No. 17, pp.3506-3509, 2017.

[6] A. A. Khorshad, et al., "Axial position detection for optical tweezers based on Moiré Deflectometry", Opt. Commun., Vol. 446, pp.33-38, 2019.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.