بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

اثر گرانروی محیط بر روی چرخش نانو ذرات طلا در تله‌ی نوری

محسن صمدزاده، فائقه حاجی‌زاده

دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه‌ی زنجان، زنجان، ایران

چکیده - انبرک نوری ابزاری قدرتمند در تله‌اندازی و کنترل ذرات میکروسکوپی، بدون دستکاری‌های مکانیکی است. توسط انبرک نوری می‌توان تکانه‌ی زاویه‌ای مداری و اسپینی را به ذرات دوشکستی یا پلاسمونی اعمال نمود که باعث چرخش این ذرات میکروسکوپی می‌شود. در این گزارش با تله‌اندازی نوری نانو ذرات طلا با قطر ۴۰۰ نانومتر توسط لیزر با قطبش دایروی، سرعت چرخش آن‌ها تحت گشودگی عددی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که با استفاده از گشودگی عددی ۱ برای عدسی شیئی می‌توان این نانو ذرات فلزی را تا ۲/۴ کیلوهرتز چرخاند. همچنین بررسی اثر گرانروی محیط بر روی سرعت چرخش نشان می‌دهد با افزایش گرانروی محیط، سرعت چرخش به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

کلید واژه- انبرک نوری، تکانه زاویه‌ی اسپینی، خودهمبستگی، گشودگی عددی، گرانروی.

Effect of viscosity on rotation of gold nanoparticles in optical trap

Mohsen Samadzadeh, Faegheh Hajizadeh

Department Physics, Institute for advanced studies in basic sciences (IASBS), Zanjan, Iran

Abstract- Optical tweezers are powerful scientific instruments, which use a laser for trapping and controlling the motion of microscopic particles without any mechanical contact. A circularly polarized laser beam could apply orbital and spin angular momentums to trapped particles, which causes the particles to rotate. In this report, we optically trap gold nano spheres with 400 nm in diameter near the surface, and the effect of the numerical aperture and the viscosity of the surrounding medium on the rotation speed is investigated. The results show that with the numerical aperture of 1 for objective lens, it is possible to rotate a metallic nanoparticles up to 2.4 kHz, and the rotation speed is highly viscosity dependent.

Keywords: Optical tweezers, Spin angular momentum, Autocorrelation, Numerical aperture, Viscosity.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]

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

مقدمه

انبرک نوری در واقع باریکه‌ی لیزری با توزیع شدت گاوسی است که توسط یک عدسی شیئی با گشودگی عددی بالا کانونی شده است [۱]. گشودگی عددی برای عدسی شیئی به صورت $NA = n\sin\theta$ تعریف می‌شود که n ضریب شکست محیط تصویر برداری و θ زاویه‌ی جمع کننده‌ی پرتوی لیزر است. انبرک نوری ابزاری منحصربه‌فرد و ضروری برای تحقیقات کاربردی و بنیادی در زمینه‌های فیزیک، شیمی، بیوپزشکی و علم مواد است [۲].

استفاده از قطبش دایروی در انبرک نوری باعث چرخش سریع نانو ذرات فلزی می‌شود، که می‌تواند مانند یک نانو موتور چرخان عمل کند. نانوموتورهای چرخان می‌توانند انرژی الکترومغناطیسی را به حرکت مکانیکی نانومقیاس تبدیل کنند، که در کاربردهای مختلفی از جمله سیستم-های نانو الکترومکانیکی و نانو ربات‌ها در دستکاری DNA و کنترل جریان نانو-میکرو سیالات مورد استفاده قرار می-گیرند [۳].

برای چرخاندن ذرات در تله‌ی نوری می‌توان از باریکه‌ی گاوسی با قطبش دایروی بهره می‌گیرند. هر فوتون از این باریکه‌ها حاوی تکانه‌ی زاویه‌ای $\pm\hbar$ است. باریکه‌ای با توان P حامل شار تکانه‌ی زاویه‌ای اسپینی $S_z = \sigma_z P/\omega$ است، σ_z درجه‌ی قطبش و ω فرکانس زاویه‌ای نور را بیان می-کند [۴]. جذب تکانه‌ی زاویه‌ای توسط ذره در تله‌ی نوری منجر به چرخش ذره می‌شود. سرعت چرخش در سیال با جریان آرام به عوامل مختلفی از قبیل ضریب گرانروی محیط اطراف، اندازه و نوع ذره بستگی دارد [۵]. در آب بیشینه سرعت چرخش ذرات دوشکستی در عمق ۵ میکرومتری برابر ۵۶/۳ هرتز بوده است [۶]. دینامیک چرخشی نانو ذرات طلا به شدت به تشدید پلاسمونیک و توان لیزر بستگی دارد [۳].

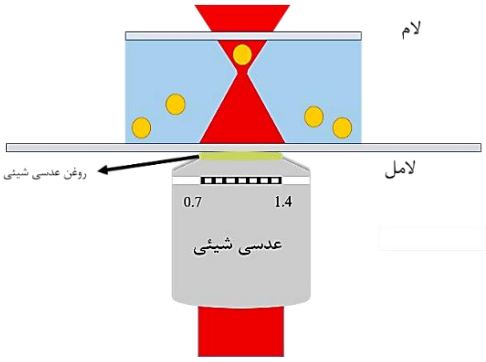
در این گزارش با تله‌اندازی نانو ذرات فلزی طلا با قطر ۴۰۰ نانومتر و چرخش آن‌ها با استفاده از قطبش دایروی، سرعت چرخش این ذرات را در گشودگی‌های عددی مختلف و همچنین در محیط‌هایی با گرانروی‌های مختلف بررسی می-کنیم.

مباحث نظری و کارهای تجربی

در چیدمان این آزمایش از لیزر (Nd-YAG) با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر، میکروسکوپ وارون (IX71 Olympus)، تیغه‌ی ربع موج، تیغه‌ی نیم موج، یک فوتودیود چهارتایی، کارت داده‌برداری (DAQ-SCB-68, NI) و یک کارت مبدل (PCI-6221, NI) برای انتقال اطلاعات به رایانه استفاده شده است که قادر است داده‌برداری را تا سرعت ۲۵۰ کیلوهرتز فراهم سازد. برای اطلاعات بیشتر در مورد چیدمان آزمایش می‌توان به مرجع [۷] رجوع کرد. با توجه به این که قطبش خروجی لیزر خطی است، بعد از این که نور لیزر توسط دو عدسی پهن شد، با اضافه کردن تیغه‌ی نیم‌موج و ربع‌موج قبل از میکروسکوپ قطبش دایروی ایجاد می‌شود. تیغه‌ی نیم‌موج برای جبران اختلاف فازی است که توسط آینه دورنگی در داخل میکروسکوپ استفاده شده است [۸]. قطبش دایروی نسبتاً ایده‌آل با خطای نسبی ۲ درصد توسط عدسی شیئی روغنی با بزرگنمایی ۶۳x و گشودگی عددی متغیر از ۰/۷ تا ۱/۴ کانونی شد. در این عدسی شیئی، گشودگی عددی توسط یک دیافراگم که در داخل عدسی قرار دارد، تنظیم می‌شود که به همین دلیل برای توان ورودی یکسان به عدسی شیئی، گشودگی عددی کمتر، توان کمتری را در داخل نمونه اعمال می‌کند. فشار تابشی لیزر بر روی ذره، باعث می‌شود که ذره به سمت سطح لام هل داده شود. همانند شکل (۱) در نزدیکی سطح لام تله-اندازی صورت می‌گیرد.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]



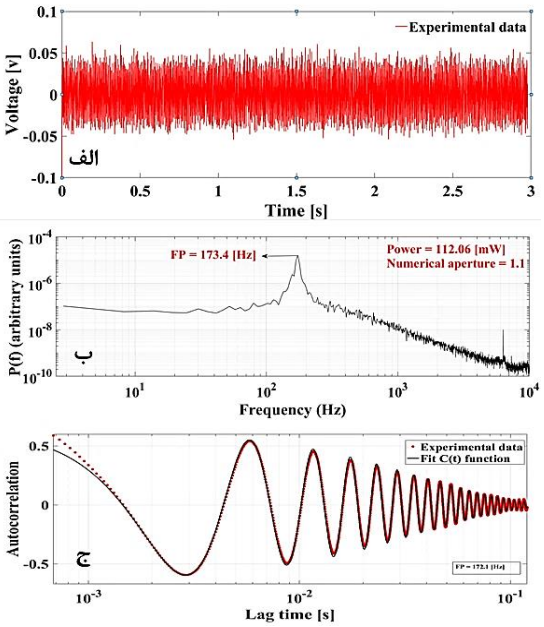
شکل ۱: تله‌اندازی دو بعدی نانو ذره طلا در نزدیکی سطح بالا.

در این آزمایش از میکروسکوپی میدان تاریک برای دیدن پراکندگی نانو ذرات طلا استفاده شده است. ذرات مورد بررسی سطح مقطع جذب و پراکندگی قابل توجهی در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر دارند. نور لیزر که از ذره پراکنده می‌شود، برای بررسی سرعت چرخش مورد استفاده قرار می‌گیرد که برای این کار از یک فوتودیود چهارتایی برای ثبت سیگنال لیزر استفاده می‌شود. وقتی از سیگنال فوتودیود تبدیل فوریه‌ی زمانی گرفته شود به نموداری می‌رسیم که یک قله-ای نمایان می‌شود. مکان این قله بسامد چرخش را نشان می‌دهد. پرتوهای پراکنده شده از یک نانو ذره فلزی کاملاً کروی، یک طرح متقارن روی سطح فوتودیود می‌سازد که به این علت استفاده از فوتودیود برای آشکارسازی اسپینی این ذرات به راحتی امکان پذیر نیست. نانو ذرات فلزی مورد استفاده در این آزمایش کاملاً کروی نیستند، به همین دلیل در این بررسی می‌توان از فوتودیود برای آشکارسازی سرعت چرخش نانو ذرات استفاده کرد. نور پراکنده شده برای ذره-ای که حول محور z در حال چرخش است، طبق معادله‌ی $I(\tau) = I_0 + I_2\, cos(N\varphi\tau)$ با زاویه‌ی φ تغییر می‌کند. که در آن φ زاویه‌ی شدت پراکنده شده، τ زمان تأخیری، I_0 شدت میانگین، I_1 دامنه‌ی نوسان شدت و N درجه تقارن چرخشی ذرات کروی را بیان می‌کند که برای ذرات مورد استفاده شده در این آزمایش برابر ۱ است.

تابع خودهمبستگی برای شدت به صورت زیر محاسبه می-گردد [۳].

$$C(\tau) = I_0 + \frac{I_1^2}{2}\, exp[-\frac{\tau}{\tau_0}]\, cos(2N\pi f_{rot}\tau) \qquad (۱)$$

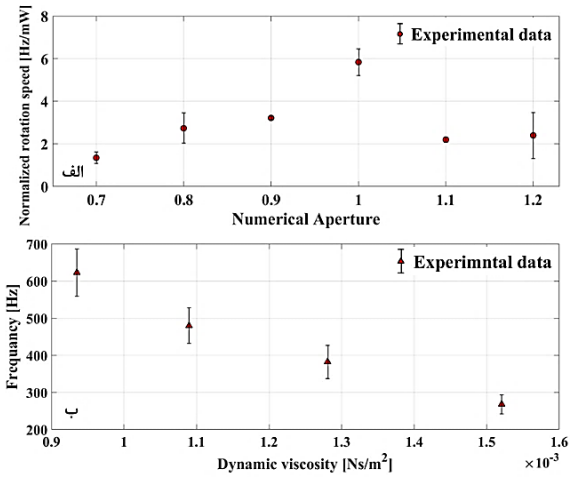
τ_0 افت زمانی سیگنال خودهمبستگی و f_{rot} بسامد چرخش ذره را بیان می‌کند. در شکل (۲-الف) نمونه‌ای از سیگنال اولیه و (۲-ب) فوریه زمانی سیگنال و (۲-ج) برازش معادله‌ی (۱) روی داده‌های تجربی را نشان می‌دهد که تابع خودهمبستگی به صورت کسینوسی با دامنه کاهشی نوسان می‌کند. بسامد قله‌ی حاصل از فوریه‌ی زمانی سیگنال ثبت شده (۱۷۳/۴ هرتز) با بسامد حاصل از برازش معادله روی داده‌های آزمایش (۱۷۲/۱ هرتز) مطابقت دارد. شکل (۳-الف) رفتار سرعت چرخش را برحسب گشودگی عددی‌های مختلف نشان می‌دهد که با توجه به این شکل سرعت چرخش در گشودگی عددی ۱ بهینه‌ترین حالت را برای چرخش مهیا می‌سازند. برای ایجاد سیال با گرانروی‌های مختلف از محلول گلیسرین و آب با درصد حجمی‌های متفاوت استفاده شد و سرعت چرخش نانوذرات طلا در این محیط‌ها را نیز بررسی کردیم.



شکل ۲: نمونه‌ای از داده‌ی اندازه‌گیری شده برای چرخش یک ذره طلا با قطر ۴۰۰ نانومتر در تله‌ی نوری. الف) ولتاژ ثبت شده توسط فوتودیود برحسب زمان، افت و خیز حرکت ذره در تله‌ی نوری را نشان می‌دهد، ب) طیف توانی داده در قسمت قبلی و ج) تابع خودهمبستگی سیگنال گرفته شده از ذره طلای ۴۰۰ نانومتری.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]



شکل ۳: الف) تغییرات چرخش در گشودگی عددی‌های متفاوت که در توان یکسان به توان داخل نمونه نرمالیزه شده‌اند و ب) تغییرات چرخش بر حسب گرانروی‌های دینامیکی متفاوت در گشودگی عددی ۰/۹ که هر نقطه میانگین سرعت چرخش برای ۳ ذره و سه بار داده‌گیری برای هر ذره است که سیر نزولی چرخش در گرانروی-های بیشتر را نشان می‌دهد.

برای ایجاد مخلوطی از نانوذرات طلا با محلولی از گلیسرین و آب، نانوذرات طلای ۴۰۰ نانومتری محلول در آب سانتریفوژ شدند و محلولی از گلیسرول و آب در غلظت‌های ۰٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ ایجاد کردیم. طبق مرجع [۹] ضریب گرانروی دینامیکی این غلظت‌ها از محلول گلیسرین و آب به ترتیب ۹۳۵/۰۵، ۱۰۸۹/۵، ۱۲۸۰/۸ و ۱۵۲۰/۵ ($[\mu Pa.s]$) بدست آمد. شکل (۳-ب) رفتار چرخش در گرانروی‌های متفاوت را نشان می‌دهد که سرعت چرخش با گرانرو شدن محیط به تدریج کاهش می‌یابد که از این خاصیت می‌توان برای اندازه‌گیری گرانروی موضعی محیط یک سیال یا یک نمونه زیستی استفاده کرد. خطاهایی که در داده‌گیری‌ها مشاهده می‌شود ناشی از تغییر در شکل نانو ذرات است که اگر از ذرات با اندازه و شکل کاملاً یکسان استفاده شود این خطاها کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این گزارش اثر گشودگی عددی و گرانروی محیط را برای برای چرخش نانو ذرات طلا ۴۰۰ نانومتری مورد بررسی قرار دادیم. با توجه به این که سرعت چرخش نانو ذره در تله‌ی نوری وابسته به گرانروی محیط است، می‌توان از سرعت چرخش به عنوان یک حسگر گرانروی استفاده کرد.

سپاسگزاری

از دکتر جعفر مصطفوی امجد و دکتر داریوش عبدالله‌پور بابت راهنمایی‌های مفید و سازنده‌شان تشکر می‌نماییم.

مرجع‌ها

[1] Ashkin, A., Dziedzic, J. M., Bjorkholm, J. E., & Chu, S. (1986). Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. *Optics letters*, 11.5 (1986): 288-290.

[2] Zhao, C. (2017). Practical guide to the realization of a convertible optical trapping system. *Optics express*, *25*(3), 2496-2510.

[3] Shao, L., Yang, Z. J., Andren, D., Johansson, P., & Kall, M. (2015). Gold nanorod rotary motors driven by resonant light scattering. *ACS nano*, *9*(12), 12542-12551.

[4] Nieminen, T. A., Asavei, T., Loke, V. L., Heckenberg, N. R., & Rubinsztein-Dunlop, H. (2009). Symmetry and the generation and measurement of optical torque. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, *110*(14-16), 1472-1482.

[5] Alignment, Rotation. "Spinning of Single Plasmonic Nanoparticles and Nanowires using Polarization Dependent Optical Forces Tong, Lianming; Miljkovic, Vladimir D.; Kaell, Mikael." *Nano Letters 10.1 (2010)*: 268-273

[6] Zhong, M. C., Zhou, J. H., Ren, Y. X., Li, Y. M., & Wang, Z. Q. (2009). Rotation of birefringent particles in optical tweezers with spherical aberration. *Applied optics*, *48*(22), 4397-4402.

[7] Samadi, A., & Reihani, N. S. (2010). Optimal beam diameter for optical tweezers. *Optics letters*, *35*(10), 1494-1496.

[8] Chou, Chen-Kuan, et al. "Polarization ellipticity compensation in polarization second-harmonic generation microscopy without specimen rotation." *Journal of biomedical optics 13.1 (2008)*: 014005.

[9] Cheng, N. S. (2008). Formula for the viscosity of a glycerol− water mixture. *Industrial & engineering chemistry research*, *47*(9), 3285-3288.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]