بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

آشکارسازی نانوذرات فلزی با استفاده از باریکه‌ی لیزر دوم در چیدمان انبرک نوری

جمال سلطانی[۱]، فائقه حاجی‌زاده[۱و۲]

دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران[۱]
مرکز پژوهشی اپتیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران[۲]

چکیده – نانوذرات فلزی به دلیل خواص زیست‌سازگاری که دارند کاربردهای فراوانی در مطالعات فیزیک زیستی و پژوهش‌های مرتبط با سلول های سرطانی پیدا کرده‌اند. تله‌اندازی نانوذرات فلزی به کمک انبرک نوری امکان مطالعات بیشتری را در این زمینه فراهم می‌کند. ذرات کوچکتر از ۲۰۰ نانومتر به دلیل محدودیت اپتیکی در میکروسکوپی نوری میدان روشن قابل مشاهده نیستند که این مسئله محدودیت‌هایی را در این نوع پژوهش‌ها ایجاد کرده است. با توجه به اینکه نانوذرات فلزی، خصوصاً طلا و نقره به دلیل خاصیت پلاسمونیکی که دارند، در ناحیه مرئی پراکنده کننده‌های خوبی هستند، در این بررسی با اضافه کردن یک باریکه‌ی لیزر دوم با توان در حد چند ده میکروواوت به چیدمان انبرک نوری، اثر آن را بر روی آشکارسازی نانوذرات فلزی و قدرت تله‌ی نوری بررسی نمودیم. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که نانوذرات طلای مورد بررسی، با اندازه‌های متفاوت تا قطر ۲۴ نانومتر با استفاده از نور پراکنده شده‌ی لیزر دوم قابل آشکارسازی هستند. علاوه بر آن، با توجه به اینکه توان لیزر دوم در مقایسه با توان لیزر تله‌اندازی بسیار ناچیز است، استفاده از این روش در بزرگی نیروی تله‌ی نوری تغییر چشم‌گیری ایجاد نمی‌کند.

کلید واژه- انبرک نوری، تله‌ی نوری، نانوذرات فلزی

Detection of Metallic Nanoparticles Using a Secondary Laser Beam in Optical Tweezers Setup

Jamal Soltani[1], Faegheh Hajizadeh[1,2]

Department of Physics, Institute of Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran[1]
Optics Research Center, Institute of Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran[2]

Abstract- Thanks to their biocompatibility property, metallic nanoparticles have found many applications in biophysics and they are a good candidate for cancer therapy. Trapping such particles by optical tweezers have led to a wide range of research in different areas from biophysics to biotechnology. The main issue is that the particles smaller than 200 nm are smaller than diffraction limit and cannot be observed by bright field microscope. However, novel metallic nanoparticles such as gold or silver are good scatterers of light in the visible range, because of their plasmonic properties. In this paper, we added an extra laser beam with power of a few tens of microwatts to the optical tweezers setup to study its ability for detection of an optically trapped particle. Our results show that gold nanospheres down to 24 nm can be detected by the back scattered light from the particle. The experimental results of trapping stiffness also show that the secondary laser beam's effect on the optical force is negligible.

Keywords: Optical tweezers, Optical trap, Gold nanoparticles

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

انبرک نوری ابزاری است که به کمک آن می‌توان با استفاده از یک باریکه‌ی لیزر که بوسیله‌ی یک عدسی با گشودگی عددی بالا به شدت کانونی شده است، اجسام میکروسکوپی را به دام انداخت. انبرک نوری با ایجاد یک تله‌ی نوری نیرویی از مرتبه‌ی فمتونیوتن تا پیکونیوتن به ذرات میکرومتری و نانومتری وارد می‌کند [۱و۲].

نانوذرات فلزی امروزه کاربردهای فراوانی در صنعت، پزشکی و دیگر زمینه‌ها پیدا کرده‌اند. به دلیل زیست‌سازگار بودن بعضی از نانوذرات فلزی مانند طلا، کاربردهای بسیاری در روش‌های تشخیصی و درمانی پزشکی برای آن‌ها معرفی شده است. از جمله این کاربردها تشخیص بافت‌های سرطانی از بافت سالم با استفاده از طیف جذبی نانوذرات فلزی است. نانوذرات طلا همچنین به عنوان جایگزین مناسبی برای دانه‌های رنگی فلئورسنت، به دلیل قابلیت آن‌ها در اتصال به مولکول‌های زیستی به شمار می‌روند [۳]. از طرف دیگر نانوذرات فلزی در پژوهش‌های مبنی بر دستکاری‌های اپتیکی و به ویژه کاربردهای بیوفیزیکی به کمک ابزارهایی مانند انبرک نوری مورد توجه ویژه هستند. نانوذرات طلا به دلیل اندازه‌ی کوچک آن‌ها در مقایسه با سلول‌های زیستی گزینه‌ای مناسب برای دستکاری زیستی در شرایط in-vivo با کمک انبرک نوری هستند [۴].

سیستم میکروسکوپی یکی از بخش‌های اصلی چیدمان انبرک نوری است و داشتن تصویر مناسب از نمونه‌ی حاوی ذرات مورد مطالعه دارای اهمیت فراوان است، چرا که می‌توان با مشاهده‌ی ذرات، آن‌ها را به سمت تله‌ی نوری هدایت کرده و به دام انداخت. تله‌اندازی نانوذرات فلزی با ابعاد حدود ۱۰۰ نانومتر و کوچکتر از آن، به دلیل ایجاد گرمای کمتر در تله‌ی نوری در مقایسه با نانوذرات فلزی بزرگ‌تر از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است و تله‌اندازی آن‌ها تا قطر ۱۰ نانومتر گزارش شده است [۵]. لذا بهینه‌سازی روش‌های تله‌اندازی و سهولت کار با نانوذرات با چنین ابعادی مورد توجه بسیار قرار دارد.

با توجه به کوچک بودن اندازه‌ی این ذرات نسبت به طول‌موج نور مرئی، مشاهده‌ی آن‌ها با استفاده از میکرو سکوپ نوری میدان روشن ممکن نیست. در نتیجه برای سهولت تله‌اندازی و آشکارسازی این ذرات در تله‌ی نوری می‌بایست از روش دیگری استفاده کرد. یکی از این روش‌ها که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است، مشاهده‌ی اثر پراکندگی نور یک باریکه‌ی لیزر دوم از سطح نانوذرات در سیستم تصویرساز میکروسکوپ نوری است. با این روش می‌توان از ورود بیش از یک ذره به تله‌ی نوری و ایجاد اختلال در دقت داده‌گیری جلوگیری کرد. برخلاف میکرو سکوپی میدان‌روشن که از نور عبوری از نمونه برای تشکیل تصویر استفاده می‌شود، در این روش از نور پس‌پراکنده شده استفاده می‌شود که مشابه میکروسکوپی میدان‌تاریک با حذف نور مستقیم است.

نیروی وارد شده به ذرات تله‌اندازی شده یک نیروی فنرگونه است که از رابطه‌ی

$$F = -\kappa \Delta x \qquad (۱)$$

بدست می‌آید. در این رابطه κ، سختی تله، معیاری برای سنجش قدرت تله‌ی نوری است. Δx جابه‌جایی محل ذره در تله‌ی نوری نسبت به مرکز کانون لیزر است. در این پژوهش تاثیر استفاده از لیزر دوم بر قدرت تله نیز بررسی شده است [۶].

۲- مباحث نظری و کارهای تجربی

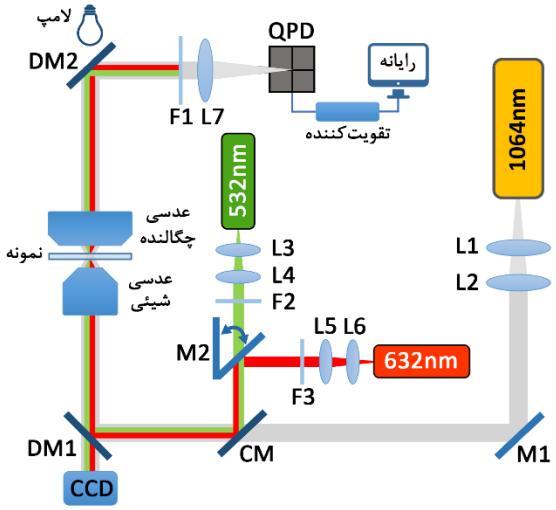
چیدمان انبرک نوری همان‌طور که شکل۱ نشان می‌دهد، شامل یک لیزر (Nd:YAG, Coherent) با طول‌موج ۱۰۶۴ نانومتر است که بوسیله‌ی آینه‌ی M1 به یک میکروسکوپ وارون (IX71, Olympus) وارد می شود. باریکه‌ی لیزر پس از بازتاب از آینه‌ی دورنگی DM1 با عبور از عدسی شیئی (Olympus,100x, oil,NA=1.3) داخل محفظه‌ی نمونه کانونی می‌شود. پس از اینکه یک ذره در تله‌ی نوری به دام افتاد، نور لیزر با گذر از عدسی چگالنده و بازتاب از آینه‌ی دورنگی DM2 به فوتودیود چهار تایی (QPD) می‌رسد. فوتودیود چهارتایی اطلاعات مربوط به افت‌وخیز محل ذره را ثبت نموده و از طریق تقویت‌کننده به رایانه انتقال می‌دهد. توضیحات بیشتر در مورد چیدمان انبرک نوری در مرجع [۷] آمده است.

باتوجه به اینکه بیشینه‌ی پراکندگی نانوذرات مورد مطالعه، در طول‌موج های متفاوتی است، در این چیدمان از دو باریکه‌ی لیزر ۵۳۲ و ۶۳۲/۸ نانومتر برای آشکارسازی نانوذرات فلزی استفاده کردیم. این باریکه‌ها بوسیله‌ی آینه‌ی سرد CM وارد چیدمان انبرک نوری می‌شوند و آینه‌ی متحرک M2 امکان تعویض این دو باریکه را فراهم می‌کند. محفظه‌ی نمونه از لام، لامل و چسب دوطرفه به ضخامت حدود ۱۰۰ میکرومتر به عنوان جداکننده، ساخته می‌شود.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

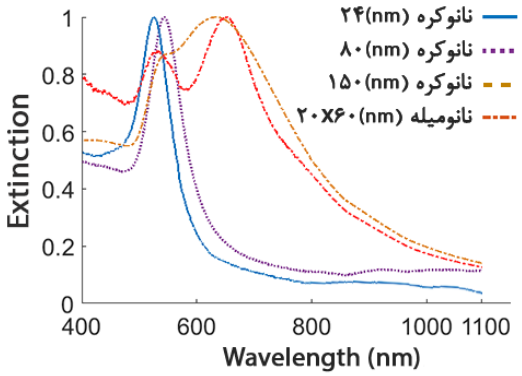
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

نانوذرات استفاده شده در این پژوهش نانوکره‌های طلا با قطر ۲۴، ۸۰ و ۱۵۰ نانومتر و نانومیله‌های طلا با قطر ۲۰ نانومتر و طول ۶۰ نانومتر به صورت محلول در آب مقطر بوده است.



شکل ۱: طرحواره‌ی چیدمان انبرک نوری. عدسی‌های L1 تا L6 برای پهن کردن باریکه‌های لیزر استفاده شده است. فیلتر F1 برای جلوگیری از رسیدن نور لیزر دوم به QPD، و F2 و F3 برای کاهش شدت نور لیزر دوم به کار رفته است. توان لیزر ۱۰۶۴ نانومتر در داخل نمونه ۵۲ میلی وات و توان لیزر دوم بین دو مقدار ۴۳ و ۸۷ میکروووات متغیر بوده است. آینه‌های M1، DM1، DM2 و CM باریکه‌های لیزر را به داخل نمونه و در نهایت به سمت QPD هدایت می‌کنند. آینه‌ی متحرک M2 برای تعویض باریکه‌ی دوم استفاده شده است.

شکل ۲ طیف خاموشی این نانوذرات را به صورت بهنجار شده به مقدار بیشینه‌ی هر طیف نشان می‌دهد که با استفاده از طیف‌سنج (Varian, Carry5) بدست آمده‌است.



شکل ۲: نمودار طیف خاموشی بهنجارشده برای نانوذرات مورد مطالعه.

با توجه به شکل ۲، طیف ذرات با توجه به شکل و اندازه‌ی آن‌ها متفاوت است و برای هر ذره یک یا دو بیشینه دیده می‌شود که نشان می‌دهد در آن طول‌موج خاص، جذب و پراکندگی نانوذرات بیشتر از سایر طول‌موج‌ها است. بدین ترتیب با تاباندن نور به آن‌ها با طول‌موجی نزدیک به این مقادیر، اثر پراکندگی قابل توجهی از آن‌ها انتظار می‌رود.

سطح مقطع جذب و پراکندگی برای نانوذرات از رابطه‌های

$$C_{scat} = k_m^{\,4}|\alpha|^2/4\pi \qquad (۲)$$

$$C_{abs} = k_m \,\mathrm{Im}(\alpha) \qquad (۳)$$

بدست می‌آید که در آن k_m عدد موج در محیط اطراف ذره (آب) و α قطبش پذیری ا ست. مقدار α، قطبش‌پذیری، از رابطه‌ی

$$\alpha = 3V\frac{\varepsilon-\varepsilon_m}{\varepsilon+2\varepsilon_m} \qquad (۴)$$

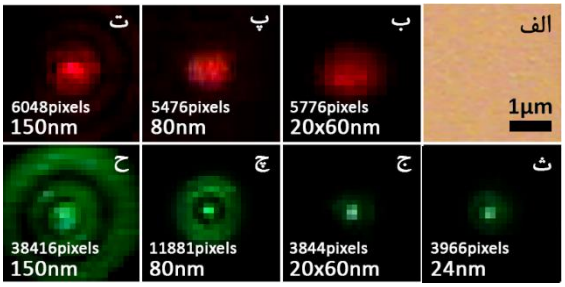
بدست می‌آید که در این رابطه V حجمی از ذره است که میدان الکترومغناطیسی در آن نفوذ کرده است. با توجه به مقادیر ε_m، ثابت دی‌الکتریک محیط اطراف ذره (آب) و ε، ثابت دی‌الکتریک طلا در دو طول‌موج ۵۳۲ و ۶۳۲/۸ نانومتر، مقدار α برای طول‌موج ۵۳۲ به طور قابل توجهی نسبت به طول‌موج ۶۳۲/۸ نانومتر بزرگتر است و نمودار تجربی شکل ۲ نیز این اختلاف مقادیر را به خوبی نشان می‌دهد[۶و۸]. به همین دلیل در این پژوهش از دو باریکه‌ی لیزر با طول‌موج ۵۳۲ و ۶۳۲/۸ نانومتر به منظور مشاهده‌ی نانوذرات استفاده کردیم.

قبل از آماده کردن نمونه، ابتدا محلول رقیقی از نانوذرات را در داخل حمام فراصوت به مدت ۱۰ دقیقه قرار دادیم. برای بررسی اثر لیزر دوم و مشاهده‌ی اثر پراکندگی نانوذرات، لامپ میکروسکوپ را خاموش نمودیم تا فقط نور پراکنده شده توسط نانوذرات در پس‌زمینه‌ای تاریک قابل آشکارسازی باشد و بوسیله‌ی CCD ثبت گردد.

شکل ۳ تصاویر ثبت شده از پراکندگی نور لیزر دوم توسط نانوذرات طلا را نشان می‌دهد. از آنجایی که تصاویر مربوط به پراکندگی نور لیزر از ذرات کوچک‌تر از طول‌موج هستند، با توجه به حد پراش، نمی‌توان در مورد اندازه‌ی آن‌ها بحث کرد و شدت بیشتر، فقط نشان دهنده‌ی سطح مقطع پراکندگی بزرگتر است. همانطور که در شکل ۳(الف) دیده می‌شود، با میکروسکوپی میدان روشن ذره‌ای در نمونه قابل مشاهده نیست. شکل ۳(ث) مربوط به نانوکره‌ی ۲۴ نانومتری، شکل ۳(ب و ج) نانومیله‌ی ۲۰ در ۶۰ نانومتر، شکل ۳ (پ و چ) نانوکره‌ی ۸۰ نانومتری و ۳(ت و ح) نانوکره‌ی ۱۵۰ نانومتری می‌باشد.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]



شکل۳: تصاویر ثبت شده از نمونه‌های حاوی نانوذرات با استفاده از پراکندگی دو طول موج ۵۳۲ و ۶۳۲/۸ نانومتر. الف) تصویر میکروسکوپی میدان روشن از نمونه حاوی نانوذرات طلا. قسمت‌های ب، پ و ت تصاویر ثبت شده از نمونه‌ها با استفاده از پراکندگی نور لیزر ۶۳۲/۸ نانومتر و قسمت‌های ث، ج، چ و ح با استفاده از لیزر ۵۳۲ نانومتر می‌باشند. محل نانوذرات نسبت به کانون متفاوت بوده است. پهنای نور لیزر پراکنده شده از ذره بر حسب تعداد پیکسل‌ها در هر شکل مشخص شده است که میزان پراکندگی نور توسط ذرات را نشان می‌دهد و با استفاده از نرم افزار Matlab بدست آمده است.

همان‌طور که انتظار داشتیم، در محدوده‌ی نزدیک به طول‌موج‌هایی که نمودار شکل۲ مقادیر بیشینه‌ی خود را داشته است، نانوذرات مورد نظر پراکندگی بیشتری داشته‌اند و تصویر واضح‌تری ثبت گردیده است. نانوکره‌ی ۲۴ نانومتری نیز برای طول‌موج ۶۳۲/۸ نانومتر پراکندگی بسیار کمی داشته و تصویری قابل ثبت نبوده است، که با توجه به نتایج طیف خاموشی آن مورد انتظار است.

در ادامه تاثیر استفاده از لیزر دوم بر قدرت تله‌ی نوری را بررسی کردیم. نیروی کل وارد بر ذره در تله‌ی نوری به صورت

$$\vec{F}_{trap} = \vec{F}_{grad} + \vec{F}_{abs} + \vec{F}_{scat} \qquad (۵)$$

می‌باشد که نیروهای پراکندگی و جذب نیروهای مخالف جهت و نیروی گرادیانی هم‌جهت با نیروی تله‌ی نوری است [۶]. از آن‌جایی که لیزر دوم با طول‌موجی استفاده شده‌است که مقدار قابل توجه جذب و پراکندگی ذرات را داشته باشیم، امکان تغییر در بزرگی نیروی تله وجود دارد.

برای اندازه‌گیری قدرت تله‌ی نوری یکی از دقیق‌ترین روش‌ها، استفاده از طیف توانی افت و خیز مکان ذره در تله‌ی نوری است. در این بررسی از روش طیف توانی استفاده کرده‌ایم که جزئیات آن در مرجع [۹] توضیح داده شده است. بررسی تاثیر استفاده از لیزر دوم در بزرگی نیروی تله را با تله‌اندازی نانوکره‌های طلا با قطر ۸۰ نانومتر با حضور لیزر دوم با طول‌موج ۵۳۲ نانومتر، با توان‌های ۴۳ میکروووات و ۸۷ میکروووات و همچنین در شرایط خاموش بودن لیزر دوم انجام دادیم. نتایج مربوط به تعیین سختی تله برای این سه حالت در جدول۱ آورده شده است. توان لیزر ۱۰۶۴ نانومتر در داخل نمونه حدود ۵۲ میلی‌وات بوده است.

جدول۱: مقادیر سختی تله بر حسب ($pN \cdot nm^{-1} \cdot mW^{-1}$) بدست آمده با دو توان متفاوت (P_s) و در حالت خاموش بودن لیزر دوم برای تله‌اندازی نانوکره‌های با قطر ۸۰ نانومتر

راستا	$P_s = ۰$ (μW)	$P_s = ۴۳/۳ \pm ۲/۹$ (μW)	$P_s = ۸۷/۳ \pm ۴/۳$ (μW)
X	۵/۰±۶۱/۱۵	۵/۰±۹۳/۶۰	۵/۰±۹۹/۷۲
Y	۳/۰±۲۹/۲۴	۳/۰±۴۰/۳۱	۳/۰±۲۸/۱۶

با توجه به اینکه توان لیزر دوم (P_s) در داخل نمونه در مقایسه با توان لیزر تله‌اندازی (۵۲ mW) بسیار کمتر بوده، همان‌طور که انتظار داشتیم تغییر قابل توجهی در سختی تله با حضور لیزر دوم مشاهده نشد.

۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش امکان استفاده از یک لیزر دوم در چیدمان انبرک نوری، به منظور آسان‌تر نمودن تله‌اندازی نانوذرات فلزی مختلف نشان داده شد و با توجه به اینکه وجود این باریکه‌ی لیزر با توان بسیار کم تغییر قابل توجهی در بزرگی سختی تله‌ی نوری ایجاد نکرده است، می‌توان گفت روش ارائه شده، روش مناسبی برای آشکارسازی نانوذرات فلزی و تله-اندازی نوری آن‌ها است.

سپاس‌گزاری

از دکتر لی شاو برای ساخت نانوذرات سپاسگزاریم.

مراجع

[1] Williams, Mark C. "Optical tweezers: measuring piconewton forces." Biophysics Textbook Online: http://www. biophysics. org/btol (2002).
[2] Marago, O. M., et al. "Femtonewton force sensing with optically trapped nanotubes." Nano Letters 8.10 (2008): 3211-3216.
[3] Jain, Prashant K., Ivan H. El-Sayed, and Mostafa A. El-Sayed. "Au nanoparticles target cancer." nano today 2.1 (2007): 18-29.
[4] Qian, Ximei, et al. "In vivo tumor targeting and spectroscopic detection with surface-enhanced Raman nanoparticle tags." Nature biotechnology 26.1 (2008): 83-90.
[5] Hajizadeh, Faegheh, and S. Nader S. Reihani. "Optimized optical trapping of gold nanoparticles." *Optics express* 18.2 (2010): 551-559.
[6] Svoboda, Karel, and Steven M. Block. "Optical trapping of metallic Rayleigh particles." Optics letters 19.13 (1994): 930-932.
[7] Samadi, Akbar, and Nader S. Reihani. "Optimal beam diameter for optical tweezers." Optics letters 35.10 (2010):
[8] Olmon, Robert L., et al. "Optical dielectric function of gold." Physical Review B 86.23 (2012): 235147.
[9] Berg-Sørensen, Kirstine, and Henrik Flyvbjerg. "Power spectrum analysis for optical tweezers." Review of Scientific Instruments 75.3 (2004): 594-612.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]