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

تله‌اندازی نوری با استفاده از باریکه‌های قطبش شعاعی و سمتی

حبیب مرادی[۱]، ابراهیم کریمی[۱و۲]، فائقه حاجی‌زاده[۱]

دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان، زنجان، ایران.[۱]
دانشکده فیزیک، دانشگاه اوتاوا، اوتاوا، کانادا.[۲]

چکیده – استفاده از باریکه‌های مختلف برای تله‌اندازی نوری ذرات میکرونی و نانومتری می‌تواند باعث افزایش کاربردهای متنوع انبرک نوری شود. باریکه‌های بردار استوانه‌ای به دلیل خواص منحصر به فردی که دارند امروزه بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نوع باریکه‌ها در مقایسه با باریکه گاوسی با قطبش خطی، در محل کانون حجمی در حدود یک سوم کوچکتر از باریکه خطی به وجود می‌آورد. در مطالعه پیش‌رو به صورت تجربی تله‌اندازی ذرات میکرو و نانومتری به کمک قطبش شعاعی که نوع خاصی از باریکه‌های بردار استوانه‌ای هستند؛ بررسی می‌شود. نتایج برای ذرات ۲/۱ میکرونی نشان می‌دهد که استفاده از باریکه شعاعی قدرت تله را در راستای محوری در حدود ۳ برابر بهبود می‌بخشد. همچنین با تله‌اندازی ذرات نانومتری مشاهده شد که اندازه ذره نقش مؤثری در بهبود قدرت تله‌ی نوری با باریکه‌های برداری دارد.

کلید واژه- انبرک نوری، سختی تله‌ی نوری، باریکه بردار استوانه‌ای، قطبش شعاعی، قطبش سمتی.

Optical trapping by radially and azimuthally polarized beams

Habib Moradi[1], Ebrahim Karimi[1,2], Faegheh Hajizadeh[1]

Department Physics, Institute for advanced studies in basic sciences (IASBS), Zanjan, Iran.[1]
Department of Physics, University of Ottawa, 25 Templeton St., Ottawa, Ontario K1N 6N5, Canada.[2]

Abstract- Implementing laser beams possessing desired spatial structure can provide a potential to control optical forces of optical tweezers in the trapping of micro and nanoparticles. Cylindrical vector beams, in particular, are good candidates due to their exotic optical features. For instance, a radially polarized beam generates a focus volume about 30 percent smaller than that of a Gaussian beam. Here, we experimentally study the optical trapping stiffness for both cases of micro- and nanometer particles. The results for 2.1-micron polystyrene beads show that the trapping force in the axial direction is ~3 times stronger for the radial polarization than that of a linear polarized beam. Finally, we show that such improvement in trapping depends on the size of the trapped particle.

Keywords: Optical tweezers, trap stiffness, cylindrical vector beam, radial polarization, azimuthal polarization

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]

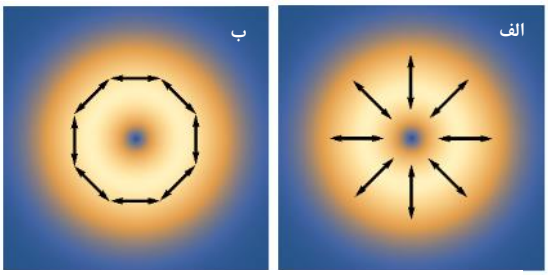
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

انبرک نوری با کانونی کردن یک باریکه لیزر، عموماً گاوسی، با انتقال اندازه حرکت از نور به ماده باعث تله‌اندازی نوری ذرات می‌شود. انبرک نوری با خواص منحصر به فردی که در اندازه‌گیری نیروهایی از مرتبه پیکو و فمتو نیوتن دارد به ابزار بسیار قدرت‌مندی در مطالعات زیستی مبدل شده است. در سال‌های اخیر، یکی از چالش‌های بزرگ در مطالعات سلول‌های زنده، کاهش آسیب ناشی از گرم شدن محیط توسط لیزر به بافت زنده است [۱].

اخیراً باریکه‌های غیرپراشی نظیر بسل[۱]، ایری[۲]، متیو[۳] و لاگرگاوسی[۴] توانسته‌اند کاربردهای جدیدی را در حوزه دست‌کاری‌های اپتیکی ایجاد نمایند. باریکه‌های غیر پراشی از خاصیت خودترمیمی قابل توجهی برخوردار هستند و می‌توانند برای انتقال ذرات تا فواصل چند صد میکرومتر مورد استفاده قرار گیرند [۲]. مدهای ایری‌ای که در یک مسیر منحنی منتشر می‌شوند در انتقال ذرات بین محفظه‌های میکروفلوئیدی [۳] و همچنین پاک‌سازی محیط از ذرات در محوطه‌ای که در مسیر نوری لیزر قرار گرفته [۴]، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از باریکه‌های متیو نیز می‌توان به عنوان یک قالب نوری برای مهندسی میکروساختارهایی که از ذرات ساخته‌شده‌اند، استفاده کرد [۵]. باریکه‌های لاگر گاوسی تکانه زاویه‌ای مداری دارند که می‌تواند ذرات میکرونی تله‌اندازی شده در انبرک نوری را تا چند صد هرتز بچرخاند [۶]. از آن‌جایی که سرعت چرخش ذرات به ویسکوزیته محیط شناوری بستگی دارد، با اندازه‌گیری نرخ چرخش ذرات می‌توان ویسکوزیته اطراف ذرات را به صورت موضعی اندازه‌گیری کرد.

بیشتر کارهای صورت گرفته برای تله‌اندازی نوری با استفاده از باریکه‌های نوینی که عنوان گردید، توسط تغییر شکل فاز و دامنه‌ی این‌گونه پرتوها صورت گرفته است. تغییر وضعیت قطبش میدان نوری فرودی می‌تواند درجه آزادی بیشتری را



شکل ۱. طرح شدت و جهت‌گیری قطبش باریکه‌های بردار استوانه‌ای. الف) باریکه با قطبش شعاعی، ب) باریکه با قطبش سمتی. پیکان‌های مشکی رنگ جهت قطبش را نمایش می‌دهند.

مهیا کند. این امر مبانی فیزیکی گسترده‌تری از پدیده‌ها را برای ما آشکار سازد و کاربردهای جدیدتری به وجود آورد. به عنوان مثال از باریکه‌های بردار استوانه‌ای می‌توان برای افزایش حجم انتقال اطلاعات در فضای آزاد استفاده کرد [۷]. خواص کانونی جالب این‌گونه باریکه‌ها سبب شده که یک گزینه مناسب برای آزمایشات انبرک نوری باشند. باریکه بردار استوانه‌ای با قطبش شعاعی نقطه کانون کوچکتری نسبت به باریکه گاوسی دارد و می‌تواند نیروی گرادیانی بزرگتری را ایجاد کند [۸].

تولید باریکه‌های بردار استوانه‌ای روش‌های متنوعی دارد [۸] که ما در اینجا از یک صفحه کریستال مایع دارای الگو به نام q-plate که در مرجع [۹] به تفصیل شرح داده شده است، استفاده کرده‌ایم. در این مطالعه قدرت تله‌ی نوری برای ذرات میکرومتری پلی‌استایرن و نانومتری طلا در قطبش خطی، شعاعی و سمتی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه گردید.

۲- مباحث نظری و کارهای تجربی

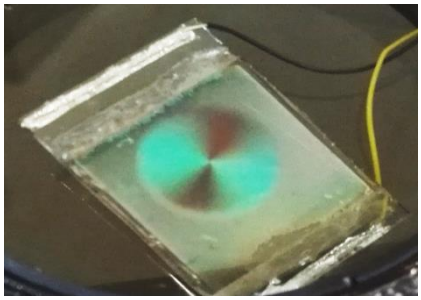
در چیدمان این آزمایش از یک لیزر (Nd:YAG,Coherent) با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و بیشینه توان خروجی ۲٫۲ وات، یک میکروسکوپ وارون (IX71,Olympus)، یک تیغه‌ی نیم‌موج و یک عدد q-plate با بار توپولوژیکی q=½ برای تولید باریکه بردار استوانه‌ای استفاده شد. q-plate یک تیغه‌ی شفاف است

[۱] Bessel
[۲] Airy
[۳] Mathieu
[۴] Laguerre Gaussian

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]

که از ۲ عدد لام میکروسکوپ لایه نشانی شده توسط ITO ساخته می‌شود. این دولام میکروسکوپ توسط یک فاصله‌انداز میکرومتری از یکدیگر جدا شده و میان آن‌ها با کریستال مایع دو شکستی پر شده است [۱۰]. قطبش خطی خارج شده از

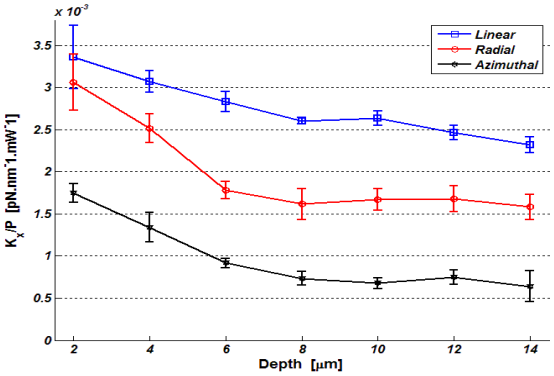


شکل ۲. تصویر صفحه q=½ میان دو قطبشگر عمود برهم.

لیزر پس از پهن‌شدن از یک تیغه‌ی نیم‌موج می‌گذرد که از این تیغه برای چرخش قطبش خطی و هم‌چنین تغییر قطبش بین شعاعی و سمتی استفاده می‌شود [۹]. نور لیزر پس از برخورد به یک آینه دو رنگی و عبور از q=½-plate وارد عدسی شیئی (Olympus,100x, oil,NA=1.3) شده و برای تله‌اندازی در نمونه کانونی می‌شود. با توجه به اینکه باریکه موازی است، q=½-plate برای تغییر قطبش در هر قسمتی از مسیر باریکه قبل از عدسی شیئی می‌تواند قرار گیرد. برای اطمینان از ایجاد قطبش مورد نظر در تله، قطبش نور لیزر دقیقاً قبل از عدسی شیئی با کمک یک قطبش‌گر اندازه‌گیری شد.

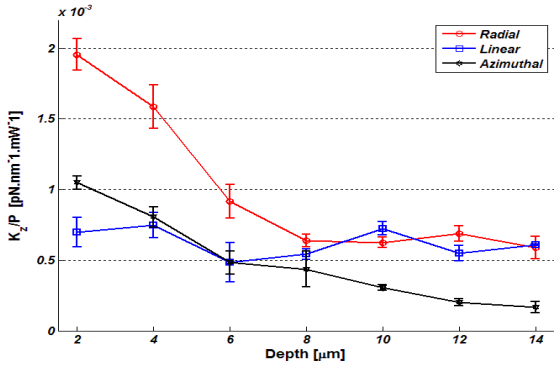
در مرحله اول ذرات کلوئیدی ۲/۱ میکرومتری پلی‌استایرن که در فضای بین یک لام و لامل میکروسکوپ که در فاصله‌ی حدود ۱۰۰ میکرومتری از هم قرار دارند، به کمک نور لیزر تله‌اندازی شدند. برای این منظور این ذرات در نزدیکی لامل میکروسکوپ و ابتدا در عمق ۲ میکرومتری نسبت به سطح لامل تله‌اندازی شده و نور پراکنده شده از ذره، توسط عدسی جمع و به فوتودیود چهارتایی برخورد می‌کند. با اندازه‌گیری و بررسی سیگنال نور پراکنده شده از ذره درون تله‌ی نوری می‌توان سختی تله‌ی نوری را اندازه‌گیری کرد. جزئیات این نوع اندازه‌گیری را می‌توان در مرجع [۱۱] دید. سپس این ذرات را با گام‌های ۰/۵±۲ میکرومتری دورن نمونه حرکت داده و در هر عمق داده‌برداری برای سه راستای x، y و z صورت گرفت.

نتایج اندازه‌گیری سختی تله برای این ذرات در راستای عرضی (عمود بر جهت لیزر) در شکل ۳ آورده شده است. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد مقدار سختی تله در این اندازه‌گیری‌ها با انتقال ذره به عمق‌های بالاتر و افزایش مسیر



شکل ۳. نتایج سختی تله بهنجار شده به توان لیزر در عمق‌های مختلف نسبت به سطح لامل برای راستای عرضی. اندازه ذرات ۲/۱ میکرومتر و از جنس پلی‌استایرن است. هر نقطه، میانگین مقدار اندازه‌گیری برای چهار ذره است.

لیزر در محیط غوطه‌وری ذرات (آب) کوچکتر می‌شود که این مسئله ناشی از ابیراهی کروی است. عدسی‌های شیئی که در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته‌اند، برای استفاده در نزدیکی سطح لامل تصحیحات ابیراهی دارند. با افزایش فاصله از سطح لامل، ابیراهی کروی افزایش یافته که باعث پهن شدن لکه کانونی شده و قدرت تله کاهش می‌یابد. در شکل ۴ سختی تله برای راستای محوری نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای قطبش خطی نور لیزر، تغییر محسوسی در قدرت تله‌ی نوری، به ازای تغییرات عمق تله‌اندازی مشاهده نمی‌شود. در حالی که در قطبش شعاعی و سمتی با افزایش عمق تله‌اندازی از قدرت تله‌ی نوری کاسته می‌شود. این امر بیانگر اثر متفاوت ابیراهی بر روی این نوع قطبش‌هاست.



شکل ۴. نتایج سختی تله بهنجار شده به توان لیزر در عمق‌های مختلف نسبت به سطح لامل برای راستای محوری. اندازه ذرات ۲/۱ میکرومتر و از جنس پلی‌استایرن است. هر نقطه، میانگین مقدار اندازه‌گیری برای چهار ذره است.

همچنین مشاهده می‌شود که برای قطبش شعاعی قدرت تله نسبت به قطبش متداول خطی حدود سه برابر بزرگتر است. افزایش قدرت تله در راستای محوری در این قطبش به ما کمک خواهد کرد که با توان‌های کمتر نور لیزر بتوانیم تله‌ی

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]

نوری قوی‌تری داشته و از گرم‌تر شدن ذرات تله‌اندازی شده به واسطه توان بالای لیزر جلوگیری کنیم.

در مرحله بعدی نمونه‌ای کلوئیدی از ذرات ۷۴ نانومتری کروی شکل طلا مورد بررسی و مقایسه این سه قطبش در تله‌اندازی این ذرات صورت گرفت. برای این منظور در عمق ۴ میکرومتری از سطح لامل زیرین، برای هر قطبش ۵ ذره مختلف تله‌اندازی شد که نتایج آن در عمق یکسان با ذره ۲/۱ میکرومتری پلی‌استایرن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. سختی تله بهنجار شده به توان لیزر برای ذرات ۲/۱ میکرومتری پلی‌استایرن و ۷۴ نانومتری طلا [$fN \cdot nm^{-1} \cdot mW^{-1}$].

ذره		خطی	سمتی	شعاعی
پلی‌استایرن	X	۳/۰ ±۱/۲E-۰۱	۱/۱ ±۱/۱E-۰۱	۲/۳ ±۱/۴E-۰۱
	Y	۳/۰ ±۸/۸E-۰۲	۱/۳ ±۱/۷E-۰۱	۲/۵ ±۱/۷E-۰۱
	Z	۰/۷ ±۹/۰E-۰۲	۰/۸±۷/۱E-۰۲	۱/۶ ±۱/۵E-۰۱
طلا	X	(۱۹/۹±۲/۳)E-۰۳	(۳۹/۴±۷/۱)E-۰۴	(۱۰/۳±۱/۵)E-۰۳
	Y	(۱۱/۰±۱/۵)E-۰۳	(۳۸/۰ ±۶/۰)E-۰۴	(۱۰/۳±۱/۵)E-۰۳
	Z	(۴۴/۴±۹/۲)E-۰۴	(۳۰/۱ ±۶/۶)E-۰۴	(۳۱/۵±۵/۷)E-۰۴

مشاهده می‌شود که برای ذرات ۷۴ نانومتری طلا برخلاف ذرات ۲/۱ میکرومتری پلی‌استایرن، سختی تله برای راستای z (محوری) در قطبش شعاعی مقدار کمتری از قطبش خطی دارد. دلیل این امر می‌تواند نیروی پراکندگی بیشتر برای ذرات جاذب باشد. همان‌گونه که در مرجع [۱۲] توضیح داده شده است؛ نیروی وارد بر ذرات کوچک ناشی از میدان الکترومغناطیسی به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$\boldsymbol{F} = \frac{n^2}{2}\left(-\alpha' \frac{\varepsilon_0}{2}\nabla|\boldsymbol{E}|^2 + \alpha'' \frac{k_0}{c_0}\Re\{\boldsymbol{E} \times H^*\} + \alpha''\varepsilon_0 \nabla \times \Im\{\boldsymbol{E} \times \boldsymbol{E}^*\}\right) \quad (۱)$$

که در آن $\alpha = \alpha' + i\alpha''$ قطبش‌پذیری مختلط ذره، ε_0 ثابت دی‌الکتریک، k_0 عدد موج، c_0 سرعت نور در خلاء و n ضریب شکست محیط است. عبارت اول بیانگر نیروی تله‌اندازی (گرادیانی)، عبارت سوم فشار تابشی ناشی از میانگین زمانی بردار پوئینتینگ و عبارت سوم نیروی پراکندگی ناشی از کرل میانگین زمانی میدان الکتریکی است. با توجه به این‌که α'' در نانوذرات فلزی مقدار بزرگی است به نظر می‌رسد علت کاهش قدرت تله برای این ذرات ناشی از این امر باشد.

۳- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به صورت تجربی نشان داده شد که تغییر قطبش لیزر مورد استفاده در تله‌اندازی می‌تواند به بهبود قدرت تله‌ی نوری کمک کند. همچنین مشاهده شد که اندازه ذرات و قطبش مورد استفاده لیزر می‌توانند در تعیین قدرت تله‌ی نوری مؤثر واقع شوند. بدین معنا که در یک آزمایش مشخص و یک اندازه ذره معین برای مطالعه، باید قطبش و اندازه ذرات را به گونه‌ای انتخاب کرد که قدرت تله‌ی نور در حالت بهینه‌ی خود قرار گیرد.

سپاسگزاری

از هیوگو لاروک برای تهیه و ساخت q-plate مورد استفاده در این آزمایش صمیمانه سپاسگزاریم.

مراجع

[1] Li, M., et al. "Optical injection of gold nanoparticles into living cells." **Nano Letters** 15.1 (2014): 770-775.

[2] Čižmár, T., et al. "Optical conveyor belt for delivery of submicron objects." **Applied Physics Letters** 86.17 (2005): 174101.

[3] Baumgartl, J., et al. "Optical redistribution of microparticles and cells between microwells." **Lab on a Chip** 9.10 (2009): 1334-1336.

[4] Baumgartl, J., et al. "Optical path clearing and enhanced transmission through colloidal suspensions." **Optics Express** 18.16 (2010): 17130-17140.

[5] Alpmann, C., et al. "Mathieu beams as versatile light moulds for 3D micro particle assemblies." **Optics Express** 18.25 (2010): 26084-26091.

[6] Friese, M. E. J., et al. "Optical alignment and spinning of laser-trapped microscopic particles." **Nature** 394.6691 (1998): 348-350.

[7] Milione, G., et al. "4× 20 Gbit/s mode division multiplexing over free space using vector modes and a q-plate mode (de) multiplexer." **Optics letters** 40.9 (2015): 1980-1983.

[8] Zhan, Q., "Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications." **Advances in Optics and Photonics** 1.1 (2009): 1-57.

[9] Cardano, F., et al. "Polarization pattern of vector vortex beams generated by q-plates with different topological charges." **Applied Optics** 51.10 (2012): C1-C6.

[10] Slussarenko, S., et al. "Tunable liquid crystal q-plates with arbitrary topological charge." **Optics Express** 19.5 (2011): 4085-4090.

[11] Hajizadeh, F., et al. "Optimized optical trapping of gold nanoparticles." **Optics Express** 18.2 (2010): 551-559.

[12] Iglesias, I., et al. "Light spin forces in optical traps: comment on "Trapping metallic Rayleigh particles with radial polarization"." **Optics Express** 20.3 (2012): 2832-2834.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]