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 بهینه نوری با تنظیم دقیق گشودگی عددی عدسی شیئی

حسین گرجی‌زاده علی‌نژاد[1]، سیدنادر سیدریحانی[1]

1- دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

چکیده - انبرک نوری یک ابزار قدرتمند برای فهم فیزیک فرایندهای زیستی است. از این وسیله برای نیروسنجی در محدوده‌ی نیروهای فمتونیوتونی تا نانونیوتونی استفاده می‌شود. در بسیاری از کاربردهای زیستی انبرک نوری که نیاز به نیروهای زیاد دارد، افزایش توان لیزر باعث تولید گرما (از طریق جذب نور) و در نتیجه صدمه دیدن نمونه می‌شود. در چنین آزمایشهایی تله‌اندازی بهینه اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مقاله نشان می‌دهیم که برای میکروکره‌ی پلی‌استایرن با قطر مشخص، یک گشودگی عددی بهینه برای عدسی شیئی وجود دارد که می‌تواند راندمان تله‌ی نوری در راستای عرضی را به بیشترین مقدار ممکن برساند. این موضوع بصورت تجربی نیز مورد تایید قرار گرفته است. همچنین نشان داده شده است که در چنین شرایطی میکروکره‌ی پلی‌استایرین با قطر تقریبی ۴ میکرومتر بیشترین راندمان عرضی را تولید می‌کند. تطابق بسیار خوبی بین نتایج نظری و تجربی ارائه شده وجود دارد.

کلید واژه- انبرک نوری، راندمان تله‌ی نوری عرضی، گشودگی عددی عدسی شیئی

Optimal optical trapping by fine-tuning the numerical aperture of the objective lens

Hossein Gorjizadeh Alinezhad[1], Seyed Nader Seyed Reihani[1]

1- Department of Physics, Sharif University of Technology, Tehran

Abstract- Optical Tweezers (OT) are powerful tools for understanding the physics of biological processes. This device can be used for force spectroscopy in the force range of femto-Newton to nano-Newton. In the most of the biological applications of OT for which, large forces are on demand cranking up the laser power would damage the sample. In such applications optimal trapping is very crucial. In this Paper we show that for a given bead size there would be an optimal numerical aperture for the focusing objective, which maximizes the trapping efficiency in the transvers direction. We also show that a polystyrene bead with a diameter of about 4 micrometer provides the largest transverse trapping efficiency. There is a very good compatibility between our theoretical and experimental results.

Keywords: Optical tweezers, Radial optical trapping efficiency, Numerical aperture objective lens

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

۱- مقدمه

انبرک نوری در اصل یک باریکه‌ی لیزر با توزیع شدت گاوسی است که توسط یک عدسی شیئی با گشودگی عددی بالا کانونی شده است[1,2]. چنانچه ضریب شکست اپتیکی ذره بزرگتر از ضریب شکست اپتیکی محیط اطرافش باشد، در آن صورت ذره شرایط عمومی برای به دام افتادن را خواهد داشت. این نیروی تله اندازی از طریق انتقال تکانه‌ی خطی نور به جسم ایجاد می‌شود و به حجم برهم‌کنش نور با جسم و گرادیان توزیع شدت در محل کانون بستگی دارد. از این وسیله برای نیروسنجی در محدوده‌ی نیروهای فمتونیوتونی تا نانونیوتونی و اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های نانومتری تا میکرومتری استفاده می‌شود. از ذره‌ی به دام‌افتاده به عنوان دستگیره در زیست پلیمرها برای بررسی کشش DNA [3] و خواص مکانیکی غشای سلول [4] استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که در بسیاری از کاربرهای انبرک نوری که به نیروهای بیشتر نیاز دارند، با افزایش توان لیزر باعث تولید گرما (جذب نور) و خسارت های اپتیکی به نمونه شده است.

در این مقاله شرایط بهینه برای تله اندازی را در راستای عرضی مورد بررسی قرار می‌دهیم. منظور از شرایط بهینه، شرایطی است که با یک توان نوعی لیزر، بیشترین نیرو و کمترین خسارت اپتیکی از طرف باریکه‌ی لیزر به ذره درون تله وارد شود. این بهینه‌سازی توسط کنترل گشودگی عددی شیئی انجام یافته است. به این معنی که با تغییر گشودگی عددی شیئی، ابعاد لکه‌ی کانونی (حجم برهم‌کنش باریکه‌ی لیزر با ذره) و راندمان تله‌ی نوری عرضی (بیشینه نیرو بر واحد توان لیزر در محل کانون) وارد بر ذره از طرف انبرک نوری تغییر می‌کند. در اینجا نشان می‌دهیم که برای میکروکره‌ی پلی‌استایرن با ضخامت مشخص، یک گشودگی عددی بهینه (حجم برهم‌کنش بهینه) وجود دارد که در این گشودگی عددی بهینه، راندمان تله‌ی نوری عرضی بیشترین مقدار است. همچنین میکروکره‌ای با ضخامت تقریباً ۴ میکرون در گشودگی عددی بهینه، بیشترین راندمان تله‌ی عرضی را نسبت به سایر میکروکره‌های دیگر تولید می‌کند.

۲- تئوری

توزیع میدان الکتریکی مستقل زمان در محل کانون برای باریکه‌ی لیزر با قطبش خطی که توسط یک عدسی شیئی با گشودگی عددی بالا کانونی شده است را می‌توان بر حسب موج‌های تخت بسط داد[5].

$$\vec{E}(\vec{r}) = E_o \left(\frac{iK_o\, f\, e^{-iK_o f}}{2\pi} \right) \sqrt{\frac{n_o}{n_g}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{\max}} d\theta\, d\varphi \qquad (1)$$
$$\sqrt{\cos\theta}\, \sin\theta\; e^{-\frac{\sin^2\theta_i}{f_0{}^2 \sin^2\theta_{\max}}}\; \vec{E}_{sample}\, e^{i\vec{K}_s.\vec{r}}$$

$\theta_{\max}$ بیشینه زاویه‌ی همگرایی عدسی شیئی است که به صورت $NA = n_i \sin\theta_{\max}$ تعریف می‌شود. NA، $n_o =$ ۱، $n_g =$ ۱/۵۱۸، $n_s =$ ۱/۳۳، $n_i =$ ۱/۳۳، K_g و K_s به ترتیب گشودگی عددی شیئی، ضریب شکست فضای جسم، لنز عدسی شیئی، محیط نمونه، محیط غوطه‌وری، عدد موج در لنز عدسی شیئی و محیط نمونه است. $f_o =$ ۱ ضریب پوشانندگی دهانه‌ی ورودی عدسی شیئی و $\vec{E}_{Sample}$ بردار میدان الکتریکی داخل محیط نمونه را نشان می‌دهد.

نیروی اپتیکی وارد بر ذره از طریق انتقال تکانه‌ی خطی نور به ذره وارد می‌شود. ما انتقال تکانه‌ی خطی نور به ذره را با استفاده از تئوری لورنز-می تعمیم یافته محاسبه می‌کنیم[6]. برای این محاسبه لازم است که توزیع میدان الکتریکی کانونی شده طبق رابطه (۱) را بر حسب هماهنگ‌های کروی برداری بسط داد[7]، سپس با بسط میدان پراکنده شده بر حسب هماهنگ های کروی برداری، ارتباط خطی بین ضرایب میدان ورودی و پراکنده شده بدست می‌آید که این ارتباط توسط ضرایب می داده می‌شود، در نهایت نیروی اپتیکی بر واحد توان لیزر وارد بر ذره از طریق انتگرال شار تکانه خطی طبق رابطه (۲) داده می‌شود[8].

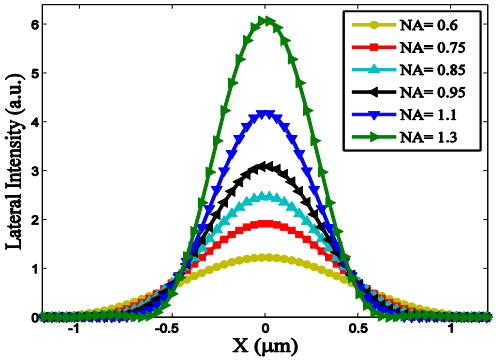
$$Q_z = \frac{2}{P} \sum_{l=0}^{l=\infty} \sum_{m=-l}^{m=l} \frac{m}{l(l+1)} \mathrm{Re}\Big(W_{lm}^{(1)*} W_{lm}^{(2)} - A_{lm}^{(1)*} \times A_{lm}^{(2)}\Big) - \frac{1}{l+1}\left[\frac{l(l+2)(l-m+1)(l+m+1)}{(2l+1)(2l+3)}\right]^{\frac{1}{2}} \Big(W_{lm}^{(2)} W_{l+1,m}^{(2)*} - A_{lm}^{(1)} A_{l+1,m}^{(1)*} - A_{lm}^{(2)} A_{l+1,m}^{(2)*}\Big) \qquad (۲)$$

$W_{lm}^{(1,2)}$ و $A_{lm}^{(1,2)}$ به ترتیب ضرایب بسط میدان الکتریکی ورودی و پراکنده شده است. P متناسب است با توان ورودی لیزر، که به صورت $P = \sum \left|W_{lm}{}^1\right|^2 + \left|W_{lm}{}^2\right|^2$ تعریف می‌شود.

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

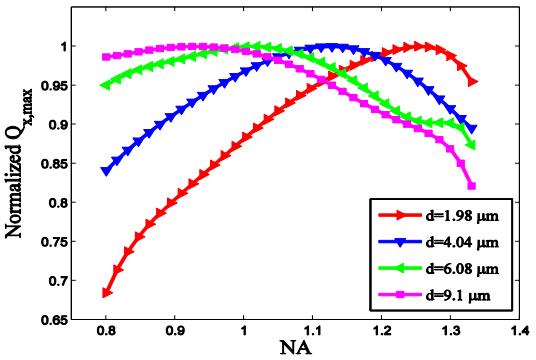
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

با استفاده از رابطه‌ی (۱) توزیع شدت میدان الکتریکی در راستای عرضی در محل کانون برای گشودگی‌های عددی شیئی مختلف در شکل ۱ رسم شده است. شکل ۱، نشان می‌دهد که عرض توزیع شدت در راستای عرضی با کاهش گشودگی عددی شیئی افزایش یافته است بنابراین راندمان تله‌ی نوری وارد بر یک ذره با ضخامت مشخص، تابعی از گشودگی عددی شیئی می‌باشد.



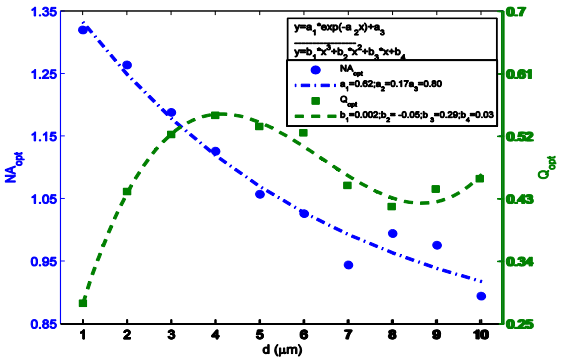
شکل ۱: توزیع شدت میدان الکتریکی در راستای عرضی به ازای گشودگی عددی شیئی مختلف.

برای محاسبه‌ی گشودگی عددی بهینه، ما راندمان تله‌ی نوری وارد بر ذره را بر حسب گشودگی عددی شیئی برای ذره‌هایی با ضخامت‌های مختلف در شکل ۲ رسم کرده‌ایم.



شکل ۲: راندمان تله‌ی نوری عرضی بهنجار شده بر حسب گشودگی عددی شیئی برای ۴ نوع سایز مختلف.

شکل ۲ نشان می‌دهد که برای میکروکره‌ی پلی‌استایرن با ضخامت مشخص یک گشودگی عددی شیئی بهینه وجود دارد که راندمان تله‌ی نوری آن بیشنه است. برای مثال ذره‌ای با ضخامت ۹/۱ میکرون دارای گشودگی عددی شیئی بهینه‌ی تقریباً ۰/۹۵ است که نسبت به حالتی که گشودگی عددی شیئی ۱/۳۳ باشد در حدود ۲۵ درصد افزایش راندمان تله‌ی نوری داشته است. همچنین شکل ۲ نشان می‌دهد که برای ذره‌هایی با اندازه‌های بزرگتر، راندمان تله‌ی نوری در همسایگی‌های گشودگی عددی شیئی بهینه تغییر چندانی نمی‌کند و می‌توان از گشودگی عددی شیئی کوچکتر از عدسی شیئی بهینه، برای تله‌اندازی ذرات بزرگتر استفاده کرد. لازم به ذکر است که استفاده از گشودگی عددی شیئی کم باعث کاهش تخریب نمونه‌های زیستی، میدان دید بیشتر، ابیراهی کروی کمتر و عمق کاری بیشتر می‌شود. محاسبات گشودگی عددی و راندمان تله نوری عرضی بهینه برای ذره‌هایی با ضخامت مختلف تکرار شده است و در شکل ۳ نشان داده می‌شود. در شکل ۳ منحنی آبی و سبز به ترتیب گشودگی عددی و راندمان تله نوری عرضی بهینه را بر حسب ضخامت میکروکره نشان می‌دهد. نقاط آبی و سبز به ترتیب با تابع نمایی و درجه سه برازش شده است. شکل ۳ نشان می‌دهد که ذره‌ای با ضخامت تقریباً ۴ میکرون و گشودگی عددی بهینه‌ی تقریباً ۱/۱۵ بیشترین راندمان تله‌ی نوری عرضی را تولید می‌کند.



شکل ۳: منحنی آبی و منحنی سبز به ترتیب گشودگی عددی بهینه و بهینه راندمان تله‌ی نوری وارد شده بر حسب سایز میکروکره.

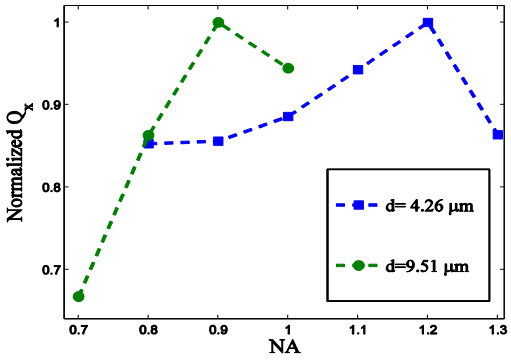
۳- اندازه‌گیری

چیدمان انبرک نوری ما بر اساس یک میکروسکوپی نوری وارون است. باریکه‌ی لیزر پهن شده (Specification λ= 1064 nm) توسط شکافنده‌ی پرتوی قطبنده به دو باریکه با قطبش‌های عمود بر هم تقسیم شده و وارد عدسی شیئی مکروسکوپ (Leica, 100×, Oil, NA= 0.6 – 1.3) می‌شود. اطلاعات بیشتر در مورد چیدمان آزمایشگاهی را می‌توان از مرجع ۷ یافت. ذره‌های پلی‌استایرن که در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته، شامل ذره‌هایی با ضخامت ۴/۲۶ و ۹/۵۱ میکرون است که از شرکت Bangs Lab خریداری شده است. لازم به ذکر است همه‌ی آزمایش در عمق بهینه ۱۸ میکرون که ابیراهی کروی در این عمق، کمینه‌ی مقدار را دارد تله اندازی شده است.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

برای اندازه‌گیری راندمان تله‌ی نوری عرضی، ما از دو باریکه‌ی لیزر با قطبش‌های عمود برهم که توسط شکافنده‌ی پرتوی قطبنده ایجاد شده، استفاده کرده‌ایم. موقعیت و شدت دو باریکه‌ی لیزر در محل کانون عدسی شیئی توسط آینه‌ی جابه‌جا شونده و مانع به ترتیب قابل کنترل است. با نگه داشتن تله‌ی قوی‌تر، ذره‌ی به دام افتاد توسط روش طیف توانی درجه‌بندی می‌شود [9] و تله‌ی ضعیف‌تر را در راستای عرضی اسکن می‌کنیم حال با جابه‌جا شدن ذره از محل کانون عدسی و اندازه‌گیری ثابت فنر تله‌ی قوی‌تر، نیروی وارد بر ذره از طرف تله‌ی ضعیف‌تر قابل اندازه‌گیری است[10]. شکل ۴ راندمان تله‌ی نوری عرضی بهنجار شده را بر حسب گشودگی عددی شیئی برای دو ذره‌ی پلی‌استایرن با ضخامت‌های ۴/۲۶ و ۹/۵۱ میکرون ارائه می‌دهد. شکل ۴ نشان می‌دهد که یک گشودگی عددی شیئی بهینه ۱/۱۵ و ۰/۹ برای ذره‌هایی با ضخامت ۴/۲۶ و ۹/۵۱ میکرون به ترتیب وجود دارد که با نتایج تئوری سازگار است.



شکل ۴: راندمان تله‌ی نوری عرضی بهنجار شده بر حسب گشودگی عددی شیئی برای ذره‌هایی با سایزهای ۴/۲۶ و ۹/۵۱ میکرون.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله ما به صورت تئوری و تجربی نشان داده‌ایم که یک گشودگی عددی شیئی بهینه برای یک میکروکره‌ی پلی‌استایرن با ضخامت مشخص وجود دارد که در این گشودگی عددی بهینه، راندمان تله‌ی نوری عرضی بیشترین مقدار را دارد. به صورت تئوری نشان داده‌ایم که ذره‌ای با ضخامت ۹/۱ میکرون دارای گشودگی عددی شیئی بهینه‌ی تقریباً ۰/۹۵ است که نسبت به حالتی که گشودگی عددی شیئی ۱/۳۳ باشد در حدود ۲۵درصد افزایش راندمان تله‌ی نوری داشته است. همچنین ذره‌ای با ضخامت تقریباً ۴ میکرون و گشودگی عددی بهینه‌ی تقریباً ۱/۱۵ بیشترین راندمان تله‌ی نوری عرضی را نسبت به سایر میکروکره‌های دیگر تولید می‌کند. ایجاد شرایط بهینه باعث کاهش تخریب نمونه‌ی زیستی، ابیراهی کروی کمتر، عمق کاری بیشتر و همچنین تولید نیروی لازم برای کشیدن بیوپلیمرها را فراهم می‌کند.

مراجع

[1] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, S. Chu, "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles", Opt. Lett., Vol. 11, No. 5, PP. 288-290, 1986.

[2] A. Samadi, S. N. S. Reihani, "Optimal beam diameter for optical tweezers", Opt. Lett., Vol. 35, No. 10, PP. 1494-1496, 2010.

[3] A. Ahmadi, S. N. S. Reihani, "Axial potential mapping of optical tweezers for biopolymer stretching: the bead size matters", Opt. Lett., Vol. 38, No. 5, PP. 685-687,2013.

[4] P. Ramesh, Y. F. Baroji, S. N. S. Reihani, D. Stamou, L. B. Oddershede, P. M. Bendix, "FBAR Syndapin 1 recognizes and stabilizes highly curved tubular membranes in a concentration dependent manner", Scientific Reports, Vol. 3, No. 1565, 2013.

[5] B. Richards, E. Wolf, "Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system", Proc. R. Soc. London Ser A, Vol. 253, No. 1274, PP. 358-379, 1959.

[6] G. Gouesbet, G. Gréhan, "*Generalized Lorenz-Mie theories*", P. 76, Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.

[7] F. Borghese, P. Denti, R. Saija, M. A. Iatì, "Optical trapping of nonspherical particles in the T-matrix formalism", Opt. Exp., Vol. 15, No. 19, PP. 1984-11998, 2007.

[8] J. H. Crichton, P. L. Marston, "The measurable distinction between the spin and orbital angular momenta of electromagnetic radiation", Electronic Journal of Differential Equations, Vol. 4, PP. 37-50, 2000.

[9] K. Berg-Sørensen, H. Flyvbjerg, "Power spectrum analysis for optical tweezers", Review of Scientific Instruments,Vol. 75, No. 3, PP. 594-612, 2004.

[10] M. Jahnel, M. Behrndt, A. Jannasch, E. Schäffer, S. W. Grill, "Measuring the complete force field of an optical trap", Opt. Lett., Vol. 36, No. 7, PP. 1260-1262, 2011.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]