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

تله اندازی نوری در عمق با تنظیم طوقی تصحیح عدسی شیئی خشک

حسین گرجی‌زاده علی‌نژاد[۱]، سیدنادر سیدریحانی[۱]

1- دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

چکیده - انبرک نوری بهینه شده ابزاری بسیار مهم برای میکرودستکاری سیستم‌های زیستی است. در این مقاله با استفاده از نظریه الکترومغناطیس برداری، توزیع فضایی شدت در کانون یک عدسی شیئی خشک مورد استفاده در انبرک نوری و همچنین ثابت فنر منتجه محاسبه شده است. به دلیل وجود محیط‌های متفاوت با ضریب شکست متفاوت در فضای پس از عدسی شیئی، مقدار قابل ملاحظه‌ای ابیراهی کروی به وجود می‌آید که باعث تضعیف شدید قدرت تله می‌شود. در اینجا نشان داده‌ایم که با تنظیم طوقی تصحیح عدسی شیئی بر مقادیر بیشتر از ضخامت لامل میکروسکوپ، می‌توان ابیراهی کروی موجود را جبران و مقدار ثابت فنر تله‌ی نوری را به بیشترین مقدار رساند. این تنظیم امکان به تله‌اندازی در عمق دلخواه نمونه مورد مطالعه توسط انبرک نوری را فراهم می‌سازد.

کلید واژه- ابیراهی کروی، انبرک نوری، طوقی تصحیح عدسی شیئی خشک، عمق بهینه

In-depth optical trapping by tuning correction collar of dry objective lens

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

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

Abstract- Optimized optical tweezers are indispensable tools for micromanipulation for biological tissues. Using electromagnetic theory the spatial intensity profile at the focus of a dry objective lens and its trapping stiffness are calculated. Presence of mediums with different refractive indices after the objective introduces significant amounts of spherical aberrations, which degrades the strength of the trap. Here we have shown, that tuning the correction collar of the objective on a value larger than the thickness of the coverslip can compensate for this aberration, which in turn maximizes the trapping stiffness. This tuning possibility allows for trapping at desired depth of the sample under investigation with optical tweezers.

Keywords: Spherical aberration, Optical tweezers, Correction collar value of dry objective lens, Optimal depth

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

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

مقدمه

انبرک نوری وسیله‌ای مناسب برای تله اندازی ذرات نانومتری تا میکرومتری است[1,2]. این ابزار یک باریکه‌ی لیزر گاوسی با مد حالت پایه است که توسط یک عدسی شیئی با گشودگی عددی بالا کانونی می‌شود. وقتی یک ذره با ضریب شکست بزرگ‌تر از محیط اطرافش در نزدیک محل کانون عدسی شیئی قرار گیرد، نیروی برگرداننده‌ی هوک $\vec{F}=-K\vec{r}$ از طرف باریکه‌ی لیزر کانونی شده به ذره وارد می‌شود که ذره را به سمت کانون هدایت می‌کند. K و $\vec{r}$ به ترتیب ثابت فنر و جابه‌جائی از محل کانون عدسی شیئی است. این نیروی تله اندازی از طریق انتقال تکانه‌ی خطی نور به جسم وارد می‌شود و به گرادیان توزیع شدت در محل کانون بستگی دارد. این ذره‌ی به دام افتاده در انبرک نوری به عنوان دستگیره برای نیروسنجی در محدوده‌ی نیروهای فمتونیوتونی تا نانونیوتونی و اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های نانومتری تا میکرومتری استفاده می‌شود. در بعضی از کاربردهای زیستی که شیئ مورد بررسی از مرتبه‌ی چند صد میکرون است، باید ذره (دستگیره) را در عمق‌های زیاد در داخل نمونه به دام انداخت [3] و روی شیئ مورد نظر به منظور هدف خاص دستکاری اجرایی انجام داد[4]. لازم به ذکر است که به دلیل اختلاف ضریب شکست محیط نمونه (آب) و غوطه‌وری عدسی شیئی (هوا)، ابیراهی کروی قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌شود که با تله اندازی ذره در عمق‌های زیاد، این ابیراهی کروی نیز افزایش می‌یابد. ابیراهی کروی، توزیع شدت در محل کانون را پهن می‌کند و در نتیجه باعث کاهش قدرت تله می‌شود.

در این مقاله ما به صورت تئوری نشان داده‌ایم که با استفاده از طوقی تصحیح عدسی شیئی با محیط غوطه‌وری خشک، ابیراهی کروی در عمق‌های مختلف قابل کنترل و در نتیجه باعث تله اندازی قوی در عمق‌های زیاد شده است. برای انجام این کار، ضخامت لامل میکروسکوپ را ۱۱۰ میکرون (*Number* 0#) در نظر گرفتیم و طوقی تصحیح را از محدوده‌ی ۱۱۰ تا ۲۲۰ تغییر دادیم که باعث ایجاد ابیراهی کروی با علامت مخالف شده است. در اینجا ما نشان داده‌ایم که برای تله اندازی بهینه، بایستی به ازای هر مقدار که در نمونه (آب) حرکت کنیم، به همان میزان به عدد طوقی تصحیح متناسب با ضخامت لامل اضافه کنیم. در این شرایط می‌توان برای میکروکره‌ی پلی‌استایرن با ضخامت ۳٫۰۵ میکرون در عمق‌های زیاد (۱۱۰ میکرون)، تله اندازی بهینه ایجاد کرد.

تئوری

مطابق شکل ۱، دستگاه مختصات دکارتی با مرکز A (مرکز کانون اصلی باریکه) و محور اپتیکی Z در نظر گرفته شده است. توزیع میدان الکتریکی مستقل از زمان در هر نقطه‌ی اختیاری $\vec{r}$ نسبت به مرکز A 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].

$$\vec{E}(\vec{r})=E_0\left(\frac{iK_0\, f\, e^{-iK_0 f}}{2\pi}\right)\sqrt{\frac{n_o}{n_l}}\int_0^{2\pi}\int_0^{\theta_{\max}} d\theta_i\, d\varphi\sqrt{\cos\theta_i}\;\sin\theta_i\; e^{-\frac{\sin^2\theta_i}{f_0^2\sin^2\theta_{\max}}}\;\vec{E}_{sample}\;e^{iOPD}\;e^{i\vec{K}_s.\vec{r}} \quad (1)$$

OPD اختلاف راه نوری (بیانگر ابیراهی کروی) بین دو پرتوی PQRS (پرتویی که بر اساس مشخصات اپتیکی عدسی شیئی طراحی شده است) و ABCD (پرتویی که بر اساس مشخصات اپتیکی عدسی شیئی طراحی نشده است و آزمایشگر به صورت دلخواه پارامترهای اپتیکی را تغییر می‌دهد) می‌باشد که مطابق شکل ۱ نشان داده شده است و طبق رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود[6].

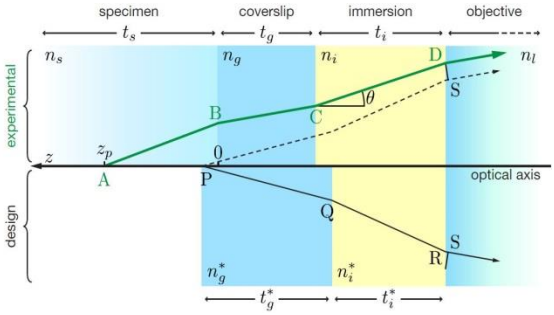
$$\begin{aligned} OPD &= k_o t_s n_s \cos(\theta_s)+k_o t_i n_i \cos(\theta_i) \\ &-k_o t^*_i n^*_i \cos(\theta^*_i)+k_o t_g n_g \cos(\theta_g) \\ &-k_o t^*_g n^*_g \cos(\theta^*_g) \end{aligned} \quad (2)$$

t_i (متغیر)، $t_g = ۱۱۰\,\mu m$، t_s (متغیر)، $n_i =$ ۱، ۱٫۵۱۸ $= n_g$، $n_s =$ ۱٫۳۳، $n_o =$ ۱ و $n_l =$ ۱٫۵۱۸ به ترتیب ضخامت محیط غوطه‌وری، ضخامت لام، فاصله‌ی بین کانون اصلی تا سطح دوم لام، ضریب شکست محیط غوطه‌وری، ضریب شکست لامل، محیط نمونه، فضای جسم و لنز عدسی شیئی است. پارامترهای دارای ستاره بر اساس عدس شیئی طراحی شده است ($t^*_i = ۱۱۰\,\mu m$، $t^*_g = -۲۲۰\,\mu m$، ۱۱۰ $= n^*_i$، ۱٫۵۱۸ $= n^*_g$ و ۱٫۳۳ $= n^*_s$). $\theta_{\max}$ بیشینه زاویه‌ی همگرایی عدسی شیئی است که به صورت $NA = n_i \sin\theta_{\max}$ تعریف می‌شود ($NA =$ ۰٫۹). $f_0 =$ ۱

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

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

ضریب پوشانندگی دهانه‌ی ورودی عدسی شیئی است. $\vec{E}sample$ بردار میدان الکتریکی داخل محیط نمونه است.



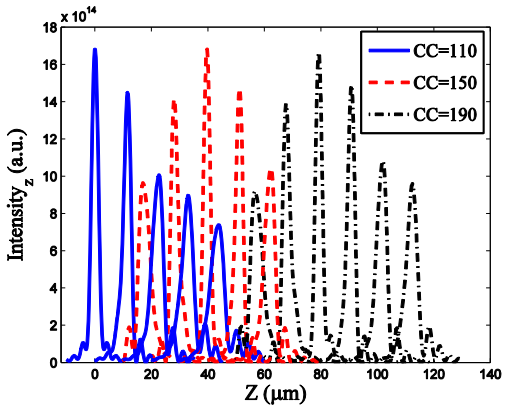
شکل ۱: نمایش هندسی بر اساس مشخصات طراحی شده (ستاره) و آزمایشی (بدون ستاره) در یک میکروسکوپ نوری[7].

نیروی اپتیکی وارد بر ذره از طریق انتقال تکانه‌ی خطی نور به ذره داده می‌شود. ما انتقال تکانه‌ی خطی نور به ذره را با استفاده از تئوری لورنز-می تعمیم یافته محاسبه می‌کنیم[8]. برای این محاسبه لازم است که توزیع میدان الکتریکی کانونی شده طبق رابطه (۱) را بر حسب هماهنگ‌های کروی برداری بسط داد[9]، 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 (۳) داده می‌شود[10].

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

$W_{lm}^{(1,2)}$ 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.

تله اندازی توسط انبرک نوری با استفاده از یک عدسی شیئی با محیط غوطه‌وری خشک و در داخل یک نمونه‌ی آبی، کاربردهای بسیاری در زمینه‌های زیستی و فیزیکی دارد. در استفاده از عدسی شیئی خشک به طور معمول، طوقی تصحیح عدسی شیئی بر اساس ضخامت لامل تنظیم می‌شود ($t_g{}^* \cong t_g$). شکل ۲ نشان می‌دهد که وقتی طوقی تصحیح عدسی شیئی (CC=110) با ضخامت لامل استفاده شده در آزمایشگاه برابر باشد، توزیع شدت روی مرز خارجی لامل ($t_s = ۰$) بدون ابیراهی کروی است، و با رفتن در عمق نمونه، توزیع شدت پهن می‌شود. با افزایش طوقی تصحیح عدسی شیئی، در یک عمق بهینه‌ای، ابیراهی کروی کمینه و تله اندازی نسبت به سایر عمق‌ها قوی‌تر می‌شود.

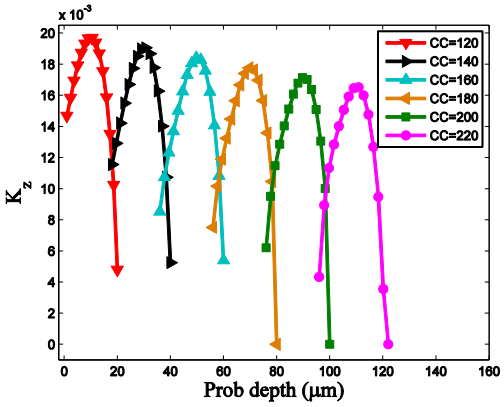


شکل ۲: توزیع شدت محوری در عمق‌های مختلف برای طوقی تصحیح عدسی شیئی خشک ۱۱۰، ۱۵۰ و ۱۹۰.

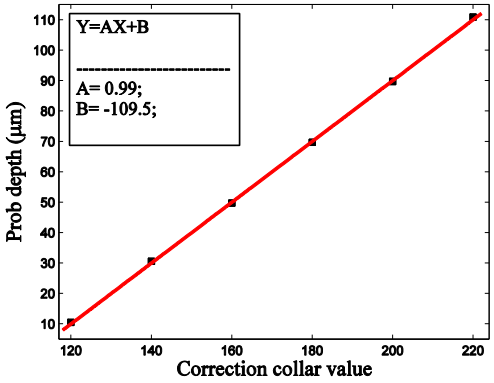
برای تله اندازی بهینه‌ی میکروکره‌ی پلی‌استایرن با ضخامت ۳،۰۵ میکرون در عمق‌های مختلف در نمونه، ثابت تله نوری را بر حسب عمق به ازای طوقی تصحیح عدسی شیئی مختلف، در شکل ۳ رسم کرده‌ایم. شکل ۳ نشان می‌دهد که اگر طوقی تصحیح نسبت به ضخامت لامل ($۱۱۰\ \mu m$) بیشتر درنظر گرفته شود، یک عمق بهینه وجود دارد که در این عمق بهینه، ابیراهی کروی کمینه و در نتیجه ثابت فنر و قدرت تله اندازی نسبت به سایر عمق‌ها قوی‌تر می‌شود. با افزایش پیوسته‌ی طوقی تصحیح نسبت ضخامت لامل، عمق بهینه (تله اندازی بهینه) نیز به صورت پیوسته افزایش می‌یابد. برای مثال با تنظیم مقدار طوقی تصحیح روی ۲۲۰ و استفاده از لامل با ضخامت ۱۱۰ میکرون، عمق بهینه برای میکروکره‌ی پلی‌استایرن با ضخامت ۳،۰۵ میکرون، در محل ۱۱۰ میکرون بالاتر از سطح پایینی نمونه ایجاد می‌شود. با در نظر گرفتن تصحیحات انجام شده، عمق بهینه بر حسب مقادیر طوقی تصحیح در شکل ۴ رسم شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود عمق بهینه به‌دست آمده با مقدار طوقی تصحیح رابطه‌ی خطی (با شیب تقریباً ۱) دارد.

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

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



شکل ۳: ثابت فنر در راستای محوری بر حسب عمق برای مقادیر مختلف طوقی تصحیح عدسی شیئی خشک.



شکل ۴: عمق بهینه بر حسب مقدار طوقی تصحیح عدسی شیئی خشک.

نتیجه‌گیری

در این مقاله ما برای اولین بار اثرات طوقی تصحیح عدسی شیئی (ابیراهی کروی ناشی از طوقی تصحیح) را در تئوری لورنز-می تعمیم‌یافته وارد کرده‌ایم. ما به صورت تئوری نشان داده‌ایم که با استفاده از طوقی تصحیح عدسی شیئی با محیط غوطه‌وری خشک، ابیراهی کروی در عمق‌های مختلف قابل کنترل و در نتیجه امکان تله اندازی قوی در عمق‌های زیاد فراهم می‌شود. در اینجا نشان داده شده است که برای تله اندازی بهینه، بایستی به ازای هر مقدار که در نمونه (آب) حرکت کنیم، به همان میزان به مقدار طوقی تصحیح متناسب با ضخامت لامل اضافه کنیم. در این شرایط با تنظیم مقدار طوقی تصحیح روی ۲۲۰ و استفاده از لامل با ضخامت ۱۱۰ میکرون، عمق بهینه برای میکروکره‌ی پلی‌استایرن با ضخامت ۳٫۰۵ میکرون، برابر با ۱۱۰ میکرون می‌شود. این امر به تله اندازی بهینه در عمق‌های زیاد کمک بسیاری می‌کند که در مطالعه‌ی نمونه‌های زیستی با ابعاد چند صد میکرونی، بسیار مهم و کاربردی است.

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] F. Hajizadeh, S. N. S. Reihani, “Optimized Optical Trapping of gold nanoparticles ”, Opt. Lett., Vol. 18, No. 2, PP. 551-559, 2010.

[3] S. N. S. Reihani, L. B. Oddershede, “Optimizing immersion media refractive index improves optical trapping by compensating spherical aberrations”, Opt. Lett., Vol. 32, No.14 , PP. 1998-2000,2007.

[4] R. Dimova, B. Pouligny, C. Dietrich “Pretransitional effects in dimyristoylphosphatidylcholine vesicle membranes: optical dynamometry study”, Biophysical Journal, Vol. 79, No. 1, PP. 340-356, 2000.

[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. 253, PP. 358-379, 1959.

[6] S. F. Gibson, F. Lanni, “Experimental test of an analytical model of aberration in an oil-immersion objective lens used in three-dimensional light microscopy”, JOSA. A, Vol. 8, No. 10, PP. 1601-1613, 1991.

[۷] F. Aguet, “*Super-resolution fluorescence microscopy based on physical models*”, P. 66, (Doctoral dissertation, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne), 2009.

[۸] G. Gouesbet, G. Gréhan, “*Generalized Lorenz-Mie theories*”, P. 76, Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.

[۹] 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.

[۱۰] 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.

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

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