بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

به‌دام‌اندازی نوری غیرتماسی سلول مخمر توسط فیبر مخروطی و عدسی‌شده

نوید صالحی، آتوسا سادات عربانیان، رضا مسعودی*

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، تهران.(*R-massudi@sbu.ac.ir)

در این مقاله طراحی و ساخت سیستم به‌دام‌اندازی نوری غیر مخرب توسط فیبر مخروطی و عدسی شده برای به دام‌اندازی ذرات زیستی و دستکاری اپتیکی آنها در دوبعد و بدون تماس فیزیکی گزارش شده است. ابتدا شبیه سازی توزیع فضایی نور خروجی از فیبر مخروطی و عدسی شده ، با استفاده از روش محاسباتی تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) انجام شده و نیروی حاصل از این توزیع میدان بر روی سلول مخمر در دو راستای طولی و عرضی بطور عددی محاسبه شده است. سپس بصورت تجربی قابلیت به‌دام‌اندازی دوبعدی غیر تماسی و غیر مخرب توسط فیبر مخروطی مورد بررسی قرار گرفته است.

کلید واژه- فیبر مخروطی و عدسی‌شده ، به‌دام‌اندازی نوری غیرتماسی، انبرک نوری فیبری، سلول مخمر

Non-contact optical trapping of yeast cell using lensed-tapered fiber

Navid Salehi, Atoosa Sadat Arabanian, and Reza Massudi*

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Tehran. (*R-massudi@sbu.ac.ir)

In this paper, we have reported design and fabrication of a non-contact and non-destructive optical trapping system using a lensed-tapered optical fiber in order to trap and manipulate bio-particles. First, spatial distribution of lensed-tapered optical fiber output **is** simulated by finite difference time domain (FDTD) method and the optical forces resulted by this field distribution acting on yeast cell in two transversal and longitudinal directions are numerically calculated. Then, lensed-tapered optical fiber ability to create a non-contact and non-destructive optical trap is experimentally investigated.

Keywords: lensed-tapered optical fiber, non-contact optical trapping, Fiber optical tweezers, yeast cell.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-05]

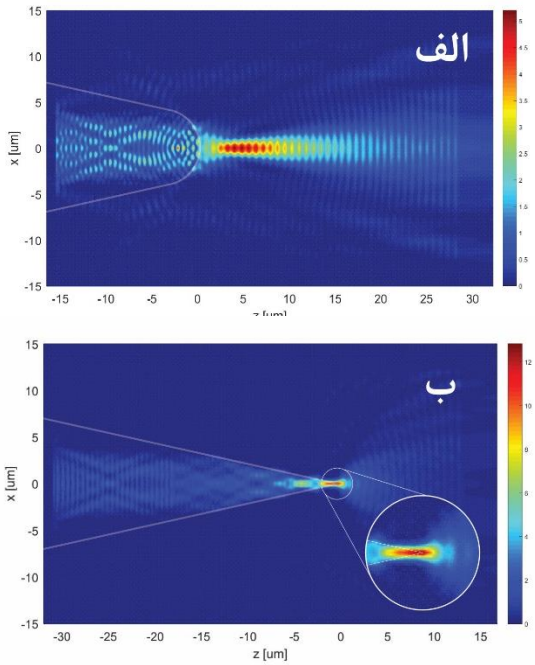
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

مقدمه

در میان روش های به‌دام‌اندازی ذرات زیستی، به‌دام‌اندازی نوری یک روش قدرتمند، غیر مخرب، با دقت بالا و برپایه باریکه لیزر به شدت کانونی شده، است. ذرات کوچک را میتوان به وسیله یک نیروی حاصل از گرادیان نوری به دام انداخت. پس از گزارش اولین دام‌نوری توسط اشکین در سال ۱۹۸۶، تاگوچی در سال ۱۹۹۷ با استفاده از نور خروجی از یک فیبر ذرات دی‌الکتریک را به‌دام انداخت [۱, ۲]. در طی سالهای بعد با مهندسی نوک فیبر روش به‌دام اندازی نوری به وسیله فیبر نوری بسیار بهبود یافت. در سالهای اخیر روش های متعددی برای به‌دام‌اندازی ذرات زیستی مورد استفاده قرار گرفته شده است اما استفاده از فیبر های مخروطی به دلیل ساخت آسان، قابلیت استفاده در مدار های مجتمع نوری و انعطاف پذیری بالا به سایر روش ها برتری دارد[۳]. نور خروجی از فیبر مخروط شده، در انتهای مخروط به شدت کانونی شده و یک گرادیان شدت مناسب برای به دام اندازی ذرات کوچک ایجاد میکند اما در این روش تماس فیزیکی ذرات به دام افتاده و نوک فیبر غیر قابل اجتناب بوده و میتواند موجب آسیب به نمونه مورد بررسی شود. در این پژوهش برای غلبه بر این مشکل و بهره گیری از مزایای فیبر مخروطی، از یک فیبر مخروطی و عدسی‌شده تک مد جهت به‌دام‌اندازی سلول مخمر استفاده شده و نتایج شبیه‌سازی و تجربی گزارش می‌شود.

طراحی و شبیه‌سازی عددی فیبر مخروطی و عدسی‌شده

برای دستیابی به دام نوری غیرمخرب و غیرتماسی، ابتدا یک فیبر مخروطی و عدسی‌شده با زاویه مخروط ۲۵ درجه و شعاع عدسی انتهای مخروط ۲۳ میکرومتر، بر پایه فیبر HI-1060 XP [۴] با روزنه عددی ۰,۱۴ و قطر میدان مودی ۵,۹ میکرومتر، طراحی و ساخته شده است تا باریکه خروجی فیبر را با فاصله از نوک فیبر کانونی کند. برای نشان دادن توانایی فیبر مخروطی و عدسی‌شده فوق در کانونی کردن باریکه، دور از نوک فیبر، از روش محاسباتی تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) جهت شبیه سازی توزیع فضایی نور خروجی از فیبر استفاده شده و نتیجه مطابق شکل ۱ گزارش می‌شود.



شکل۱- توزیع فضایی نور خروجی از الف) فیبر مخروطی و عدسی‌شده و ب) فیبر مخروطی

در اینجا نور انتشاری داخل فیبر با توان ورودی بهنجارشده و مطابق مد پایه فیبر می‌باشد. همانطور که در شکل۱ مشخص است، بر خلاف فیبرهای مخروطی که در آنها کانون در نوک فیبر مخروطی مشاهده می‌شود، برای فیبر مخروطی و عدسی‌شده ، کانون باریکه خروجی از نوک فیبر به مقدار ۵,۱ میکرومتر فاصله دارد و امکان به دام اندازی غیر مخرب را فراهم می‌سازد.

سپس برای بررسی عددی قابلیت به‌دام‌اندازی نوری توسط فیبر مخروطی و عدسی‌شده ، نیروی اپتیکی وارد بر سلول مخمر به ازای باریکه خروجی فیبر بررسی شده است. با توجه به نسبت اندازه نمونه (کروی‌شکل و با شعاع ۲,۵ میکرومتر[۵])و طول‌موج انتشاری داخل فیبر (۹۸۰ نانومتر)

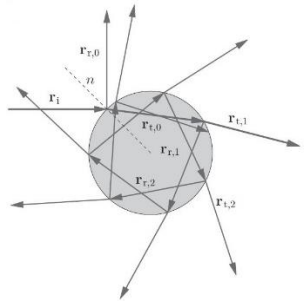
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-05]

میتوان از تقریب اپتیک هندسی برای محاسبه نیروهای وارد بر سلول استفاده نمود. در این تقریب برای توصیف باریکه نور و توضیح چگونگی انتقال انرژی از یک مجموعه پرتو نور استفاده می‌شود که این پرتوها، بردارهایی عمود بر جبهه موج و در جهت شارش انرژی الکترومغناطیسی هستند. نیروی وارد بر یک کره با ضریب شکست n_t در محیطی به ضریب شکست n_i مطابق رابطه ۱ است.

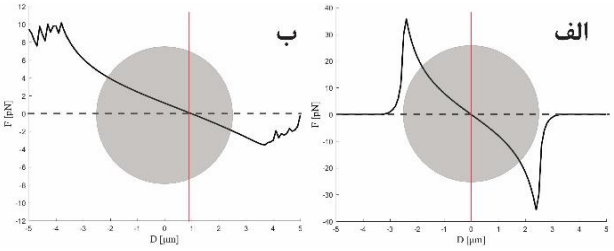
$$\mathbf{F}_{GO} = \sum_m \mathbf{F}_{ray}^{(m)} \qquad (۱)$$
$$= \sum_m \left[\frac{n_i P_i^{(m)}}{c}\hat{\mathbf{r}}_i^{(m)} - \frac{n_i P_r^{(m)}}{c}\hat{\mathbf{r}}_{r,0}^{(m)} - \sum_{n=1}^{+\infty}\frac{n_i P_{t,n}^{(m)}}{c}\hat{\mathbf{r}}_{t,n}^{(m)}\right]$$

که درآن $\hat{r}_i$، $\hat{r}_{r,n}$، $\hat{r}_{t,n}$ به ترتیب بردارهای یکه در راستای فرود و n امین پرتو بازتابی و عبوری و $P_i^{(m)}$، $P_r^{(m)}$ و $P_{t,n}^{(m)}$ به ترتیب توان منسوب به پرتو فرودی m، اولین بازتاب و nامین پرتو عبوری آن و c سرعت نور در خلاء است[۶].



شکل۲- بازتاب‌های متوالی تک پرتو داخل کره دی‌الکتریک

پس از تقریب باریکه خروجی فیبر به‌وسیله یک مجموعه پرتو مناسب و استفاده از رابطه (۱) نیروی وارد شده به نمونه در فواصل مختلف نسبت به کانون مطابق شکل۳ بدست آمده است.

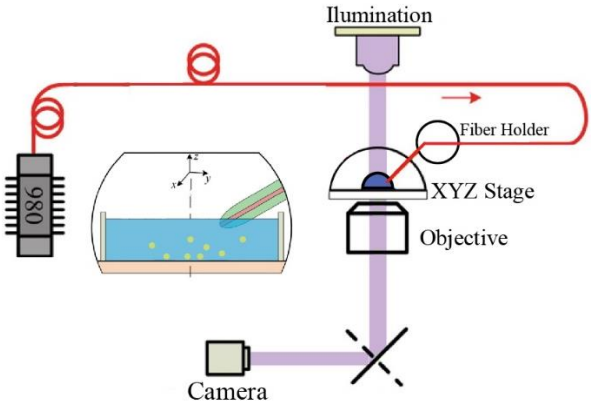


شکل۳- الف) نیروی وارد بر ذره در فواصل مختلف از کانون در راستای x در $z = 5.1\mu m$
ب) نیروی وارد بر ذره در فواصل مختلف از کانون در راستای z و در $x = 0$.

در شکل ۳ مقدار مثبت و منفی نیرو به ترتیب معادل اعمال نیرو در جهت و خلاف جهت انتشار باریکه می‌باشد. در شکل۳ الف نیروی وارد بر ذره در راستای عرضی و ابعاد ذره نشان داده شده است که مطابق شکل وقتی کانون روی مرز ذره قرار گیرد، ذره بیشینه نیرو را حس خواهد کرد و روی نقطه کانون نیروی وارد بر ذره در راستای عرضی برابر صفر است. نیروی پراکندگی در راستای طولی مقداری همواره مثبت بوده و با افزایش فاصله از نوک فیبر کاهش می‌یابد در حالی‌که نیروی گرادیان در راستای طولی رفتاری همانند فنر داشته و قبل از کانون مقداری مثبت، روی کانون مقدار صفر و پس از کانون مقداری منفی دارد. بنابراین انتظار داریم در راستای طولی ذره اندکی جلوتر از محل کانون به دام بیفتد (شکل۳ب).

بررسی تجربی

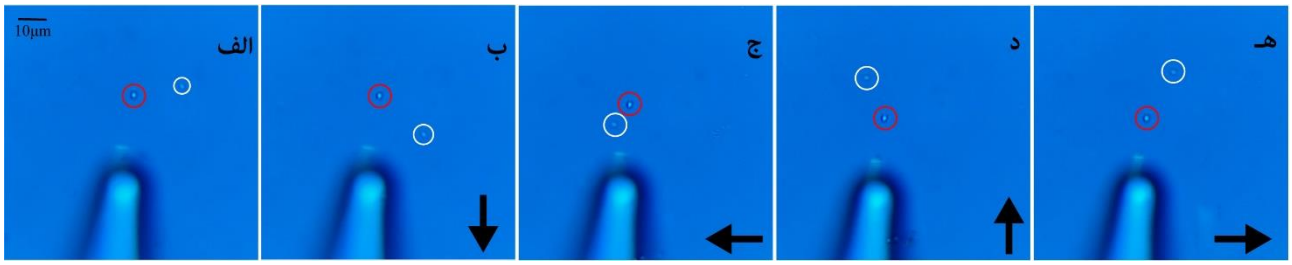
با توجه به محاسبات عددی و شبیه‌سازی های صورت‌گرفته در بخش قبل یک چیدمان تجربی مطابق شکل ۴ طراحی و برپا شده است.



شکل۴- چیدمان تجربی به‌دام‌اندازی سلول مخمر توسط فیبر مخروطی و عدسی‌شده

برای این چیدمان از یک لیزر دیودی با طول موج ۹۸۰ نانومتر که جذب بسیار پایینی در برهمکنش با اکثر ذرات زیستی دارد[۷]، جفت شده در فیبر مخروطی و عدسی‌شده قرار گرفته و لامل توسط یک جابجاگر شش‌محوره کنترل

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-05]



شکل۵- تصویر سلول مخمر به دام افتاده (قرمز)و سلول مخمر شاهد(سفید) . پیکان زیر شکل ها نشان‌گر جهت حرکت لامل قبل از ثبت تصویر می‌باشد.

می‌شود. با استفاده از یک چرخاننده مکانیکی، نگه‌دارنده فیبر تحت زاویه مناسب (۵۰ درجه نسبت به محور قائم) و در فاصله مناسب از نمونه قرار گرفته است[۸]. یک سیستم تصویربرداری بر پایه میکروسکوپ وارون و با بزرگنمایی ۴۰۰ برابر جهت مشاهده به‌دام‌اندازی سلول‌های مخمر استفاده شده است. شکل ۵ به‌دام‌اندازی نوری سلول مخمر را نمایش میدهد. برای تصویر برداری از فرآیند به‌دام‌اندازی و حذف نور پراکنده شده از نمونه، قبل از دوربین یک فیلتر برای حذف طول موج ۹۸۰ نانومتر مورد استفاده قرار گرفته است. توان خروجی از فیبر مخروطی و عدسی‌شده برای به‌دام‌اندازی برابر ۲۰ mW می‌باشد. برای بررسی دام‌اپتیکی مطابق شکل۵ از یک سلول شاهد که در دام قرار نداشته و به صورت ثابت ته‌نشین شده است، استفاده میشود. با توجه به موقعیت سلول به‌دام‌افتاده و سلول شاهد، بدون تغییر مکان فیبر، لامل را توسط جابجاگر سه‌بعدی ابتدا در راستای y- جابجا میکنیم (شکل۵ ب) و مشاهده میکنیم که با تغییر مکان سلول شاهد، جابجایی در سلول به‌دام‌افتاده مشاهده نشد. برای بررسی دام اپتیکی در دو بعد در مرحله‌های بعد به ترتیب لامل را در راستای x-، y+ و x+ جابجا کرده و مطابق شکل۵ (ج تا هـ) مشاهده می‌شود که تغییری در مکان سلول مخمر به دام افتاده مشاهده نشد و اثبات می‌شود که سلول مخمر توسط این سیستم به خوبی به دام افتاده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از محاسبات عددی و آزمایشات تجربی امکان ایجاد دام اپتیکی توسط فیبر مخروطی و عدسی‌شده مورد بررسی و تایید قرار گرفت. نیروی وارد بر سلول مخمر در فواصل مختلف از کانون بصورت عددی محاسبه شده و در بخش تجربی یک سلول مخمر توسط باریکه خروجی فیبر با طول موج ۹۸۰ نانومتر، بصورت غیرتماسی و غیرمخرب به‌دام انداخته شد. بنابراین توانایی فیبر مخروطی و عدسی‌شده جهت به‌دام‌اندازی ذرات زیستی اثبات شد.

مرجع ها

1. Ashkin, A., et al., *Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles.* Optics letters, 1986. **11**(5): p. 288-290.
2. Taguchi, K., et al., *Single laser beam fiber optic trap.* electronics, 2001. **33**(1): p. 99-106.
3. Polimeno, P., et al., *Optical tweezers* Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018. **218**: p. 131-150.
4. ThorLabs. *HI-1060XP*. 2019; Available from: https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=1060XP.
5. Mortimer, R.K. and J.R. Johnston, *Life span of individual yeast cells.* Nature, 1959. **183**(4677): p. 1751-1752.
6. Jones, P., O. Marago, and G. Volpe, *Ray optics*, in *Optical Tweezers*. 2015. p. 19-41.
7. Xin, H., Q. Liu, and B. Li, *Non-contact fiber-optical trapping of motile bacteria.* Scientific reports, 2014. **4**: p. 6576.
8. Liu, Y., *Fiber Optical Tweezers For Microscale and Nanoscale Particle Manipulation and Force Sensing*. 2011.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-05]