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

ساخت آینه پیزوالکتریک و استفاده از آن در انبرک نوری چندتله‌ای

میلاد ملک محمدی[۱]، احسان احدی اخلاقی[۱و۲] و فائقه حاجی زاده [۱و۲]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان کد پستی ۴۵۱۹۵-۶۶۷۳۱
[۲]مرکز پژوهشی اپتیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان کد پستی ۴۵۱۹۵-۶۶۷۳۱

چکیده- انبرک نوری یک باریکه‌ی لیزرگاوسی کانونی شده توسط یک عدسی شیئی با گشودگی عددی بالا است که می‌تواند ذرات با اندازه‌های میکرومتر و نانومتر را که در مجاورت کانون قرار دارند با اعمال نیروی بازگرداننده تله‌اندازی کند. به دلیل کاربردهای فراوان انبرک نوری جهت مطالعه و بررسی چندین ذره، این ابزار از یک تله‌ی نوری به چند تله‌ی نوری ارتقاء یافته است که در آن باریکه‌ی لیزر به جای کانونی شدن در یک نقطه می‌تواند در چند نقطه کانونی شود و الگوهای متفاوتی از تله‌های نوری به وجود آورد. استفاده از یک آینه نوسانی با سرعت بالا در چیدمان انبرک نوری قابلیت‌های بیشتری مانند ایجاد کانون خطی و یا چندتله‌ای را فراهم می‌آورد. بنابراین برای تله‌اندازی هم‌زمان چندین ذره، نرخ اسکن آینه پیزوالکتریک باید سریع‌تر از حرکت براونی ذرات باشد. هدف از این مقاله ساخت یک آینه پیزوالکتریک با کمترین هزینه و پیاده‌سازی آن بر روی چیدمان انبرک نوری است. در این پروژه ابتدا از اتصال یک آینه به دو بلور پیزوالکتریک استفاده می‌شود، سپس با طراحی مدار الکترونیکی مربوطه و تنظیمات اولیه آن، آینه‌ی پیزوالکتریک را برای جابه‌جایی‌های دلخواه تله‌ی نوری راه اندازی می‌کنیم.

کلید واژه-انبرک نوری، آینه پیزوالکتریک، حرکت براونی.

Fabrication of piezoelectric mirror for multiple-beam optical tweezers

Milad Malek Mohammadi[1], Ehsan Ahadi Akhlaghi[1,2], Faegheh Hajizadeh[1,2]

[1] Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan 45137-66731, Iran.
[2] Optics Research Center, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan 45137-66731, Iran.

Abstract- Optical tweezers are instrument that made by a tightly focused laser beam in which micro- and nanoparticles could be optically trapped by a restoring force toward the laser focus. Single beam optical tweezers have become powerful tools in different areas from biophysics to nanotechnology. However, when multi particles have to be trapped simultaneously and studied independently, multiple trapping beams needed. One of the simplest way aim is to use a piezoelectric mirror. The usage of a piezoelectric mirror with high oscillation frequency in optical tweezers could easily provide linear and multi traps. Here, for optical trapping applications, we calibrate the oscillation frequency and amplitude of a mirror mounted on two low cost piezoelectric stacks in which an electronic circuit optimizes the needed voltage. Our experiments show that, this simple configuration could provide optical trapping of 3 particles, simultaneously.

Keywords: Optical tweezers, Piezoelectric mirror, Brownian motion.

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

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

۱-مقدمه

زمانی که ذرات شفاف دی‌الکتریک نزدیکِ یک باریکه‌ی لیزر گاوسیِ کانونی شده قرار گیرند، نور به هنگام ورود به ذره دچار شکست یا بازتاب می‌شود. نیروی به وجود آمده به علت تغییر جهت نور، بر روی ذره تأثیر گذاشته و ذره به سمت کانون کشیده می‌شود یا در جهت انتشار باریکه‌ی لیزر هل داده می‌شود. این نیروها می‌توانند در سه بعد تله‌ای پایدار ایجاد کنند و با اعمال نیروهایی از مرتبه‌ی پیکونیوتن ذرات میکرومتری را در تله نگه دارند.

برای مطالعه‌ی تعداد زیادی از ذرات به طور هم‌زمان می‌توان سیستم انبرک نوری را به حالت چندتله‌ای ارتقاء داد. استفاده از مدولاتور فضایی نور (SLM) [۱]، AOD [۲]، دو باریکه‌ی موازی [۳]، آینه پیزوالکتریک [۴و۵] و آینه گالوانو [۶] از جمله روش‌های ارائه شده برای تله‌اندازی هم‌زمان ذرات است.

در این مقاله نتایج ساخت یک آینه پیزوالکتریک با هزینه کم ارائه شده است. ابتدا آینه بر روی دو بلور پیزوالکتریک نصب می‌شود، سپس با اعمال ولتاژ به بلور پیزوالکتریک، می‌توان باریکه‌ی منعکس شده از آینه را با سرعت و زاویه مختلف منحرف کرد. استفاده از این آینه در چیدمان انبرک نوری این امکان را فراهم می‌آورد که بتوان چندین ذره را در موقعیت‌های دلخواه به صورت هم‌زمان تله‌اندازی کرد.

۲-مباحث نظری

برای تله‌اندازی هم‌زمان چندین ذره کلوئیدی مدت زمان دوره تناوب آینه اسکن کننده باید طوری تنظیم شود که ذره فرصت دورشدن از محل تله را نداشته باشد. این زمان را می‌توان با زمان مشخصه حرکت براونی (τ) مشخص کرد که معکوس آن کمینه فرکانس اسکن آینه را تعیین می‌کند. تابع توزیع احتمال حضور ذره در مکان x و در زمان t با استفاده از معادله‌ی لانژون به صورت تابع زیر به‌دست می‌آید [۳]:

$$F(x,t)=\frac{e^{\frac{-x^2}{4D_0t}}}{\sqrt{4\pi D_0 t}} \quad \text{که} \qquad (۱)$$

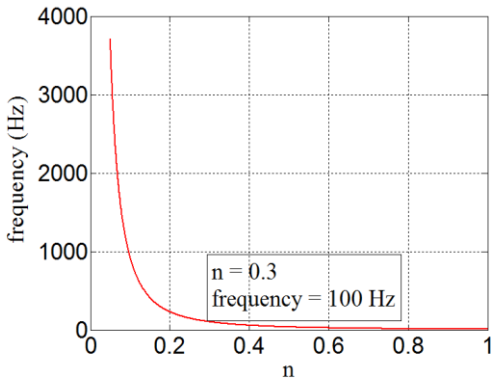
در آن D_0 ضریب پخش ذرات و t زمان است. γ، احتمال حضور ذره در مکان $-na$ تا na، از انتگرال تابع توزیع احتمال به‌دست می‌آید:

$$\int_{-na}^{na} F(x,\tau)dx=\gamma \qquad (۲)$$

که در این رابطه a شعاع ذره، n کسری از شعاع ذره که ذره می‌تواند حرکت پخشی انجام دهد. اگر n به اندازه‌ی کافی بزرگ انتخاب شود احتمال حضور ذره برابر $\gamma=1$ به‌دست می‌آید. سرعت نوسان آینه بر اساس حرکت پخشی ذرات از رابطه‌ی (۳) به‌دست می‌آید [۳]:

$$\upsilon=\frac{1}{\tau}=\frac{4D_0(\mathrm{erf}^{-1}(\gamma))^2}{n^2a^2} \quad \text{که} \qquad (۳)$$

در آن υ سرعت اسکن آینه پیزوالکتریک است. همان‌طور که این رابطه نشان می‌دهد نرخ اسکن تله‌ی نوری برای یک تله‌ی پایدار وابسته به مقدار وُشکسانی سیال و شعاع ذرات می‌تواند مقادیر مختلفی داشته باشد. شکل ۱ نتایج نظری سرعت اسکن آینه را برای تله‌اندازی هم‌زمان ذرات ۱ میکرونی در آب بر اساس رابطه (۳) و برحسب nهای مختلف نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است برای مقدار فرضی $\gamma=۰/۹$ سرعت اسکن برای ذرات پلی‌استایرن به شعاع ۰/۵ میکرومتر در آب و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد باید ۱۰۰ هرتز باشد و دامنه حرکت پخشی ذرات به طور متوسط ۳۰۰nm است.



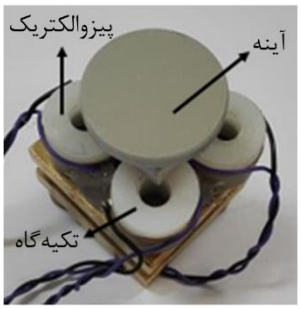
شکل ۱: نمودار وابستگی فرکانس نوسانات آینه پیزوالکتریک نسبت به متغیر n، برای تله‌اندازی پایدار ذره‌ای به شعاع ۰/۵ میکرومتر در آب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد.

۳-کارهای تجربی

چیدمان انبرک نوری چندتله‌ای در این بررسی شامل میکروسکوپ نوری، منبع لیزر با طول موج ۱۰۶۴ nm و آینه پیزوالکتریک به عنوان اجزای اصلی است.

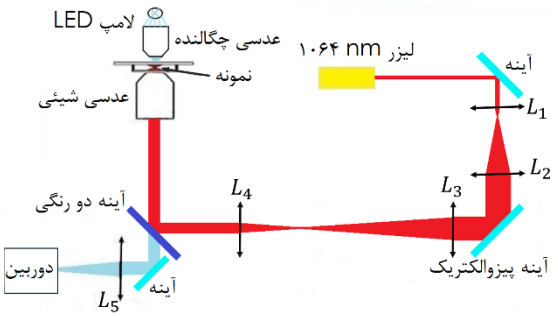
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

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



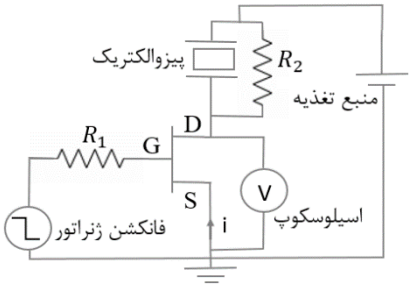
شکل ۲: تصویر مربوط به آینه پیزوالکتریک است.

آینه‌ی مورد استفاده بر روی ۲ بلور پیزوالکتریک به عنوان منحرف کننده نور انعکاسی از آینه در دو راستای عمود بر هم قرار دارد. بیشینه زاویه‌ای که آینه پیزوالکتریک باریکه‌ی لیزر را منحرف می‌کند ۵/۱ میلی‌رادیان است. در این چیدمان از یک میکروسکوپ نوری وارون که به صورت باز چیده شده است، برای مشاهده و تله‌اندازی ذرات استفاده شده است. مطابق شکل ۳ باریکه‌ی لیزر پس از بازتاب از سطح دو آینه اول و پهن شدن به اندازه‌ی مشخص توسط چهار عدسی، توسط آینه دورنگی به سمت عدسی شیئی (۱۰۰x و NA=۱/۳) هدایت و داخل نمونه کانونی می‌شود و ذراتی که در نزدیکی کانون قرار دارند را تله‌اندازی می‌کند. نوری که از لامپ LED تابش می‌شود پس از عبور از عدسی چگالنده نمونه را روشن می‌کند و تصویر نمونه توسط عدسی L_5 بر روی دوربین تشکیل می‌شود.



شکل ۳: چیدمان انبرک نوری چندتله‌ای.

زمانی که به دو سر یک بلور پیزوالکتریک یک سیگنال الکتریکی متناوب اعمال شود، آینه شروع به نوسان می‌کند. اعمال ولتاژ بالای متناوب نیازمند طراحی یک مدار الکتریکی است. این مدار مطابق شکل ۴، شامل دو مقاومت ۱ kΩ $= R_1$ با توان ۰/۲۵W، $R_2 = ۶۷۰\ \Omega$ با توان ۱۰۰W و یک ماسفت IRF840 است.



شکل ۴: طرحواره‌ای از مدار تغذیه پیزوالکتریک توسط ماسفت.

برای نوسان آینه در دو بعد، لازم است دو سری از مدار کنترل کننده پیزوالکتریک استفاده شود، که با اتصال فانکشن ژنراتور به پایه G، و منبع تغذیه به پایه D جریان عبوری (i) از پایه S به D مرتباً سوئیچ می‌شود. با اعمال ولتاژ به قطعه‌های پیزوالکتریک آینه نوسان کرده و در نتیجه تله‌ی نوری بین دو نقطه با فرکانسی برابر با فرکانس نوسانات آینه جابه‌جا می‌شود. در فرکانس‌های بالا به عنوان مثال ۱۰۰ هرتز، مسیر حرکت تله‌ی نوری به شکل خط دیده می‌شود. در حالتی که باریکه‌ی لیزر توسط دو عدسی به شکل موازی به سمت عدسی شیئی انتشار می‌یابد، دامنه‌ی تله‌ی خطی در این چیدمان انبرک نوری ۹/۲ میکرومتر اندازه‌گیری شده است.

برای افزایش دامنه‌ی جابه‌جایی تله‌ی نوری، از یک سیستم نوری شامل عدسی‌های L_1، L_2، L_3 و L_4 به ترتیب با فاصله‌های کانونی f_1 ، f_2 ، f_3 و f_4 استفاده کردیم. دو عدسی L_1 و L_2 ارتفاع باریکه‌ی فرودی (d=۱mm) به عدسی L_1 را به اندازه‌ی $y_1 = \frac{f_2}{f_1} d$ افزایش می‌دهد که y_1 ارتفاع باریکه‌ی خروجی از عدسی L_2 است. باریکه‌ی لیزر پس از بازتاب از سطح آینه پیزوالکتریک و عبور از دو عدسی L_3 و L_4 با ارتفاع مشخص ($y_2 = \frac{f_4}{f_3} y_1$) توسط آینه دورنگی به سمت عدسی شیئی هدایت می‌شود، به گونه‌ای که تمام دهانه‌ی پشتی عدسی را بپوشاند. اندازه زاویه باریکه‌ی فرودی به عدسی شیئی از روابط (۳) و (۴) پیروی می‌کند:

$$\theta_2 = \frac{f_3}{f_4}\theta_1 \qquad (۴)$$

y_2 و θ_2 به ترتیب ارتفاع و زاویه باریکه‌ی خروجی از عدسی L_4 و θ_1 زاویه باریکه‌ی فرودی به عدسی L_3 است. دامنه‌ی جابه‌جایی تله‌ی نوری از رابطه‌ی (۵) پیروی می‌کند:

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

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

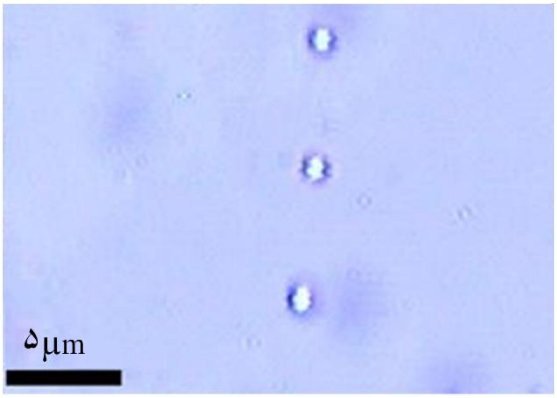
$$r = \frac{f_{obj} f_3}{f_4} \theta_1 \quad (۵)$$

که f_{obj} فاصله‌ی کانونی عدسی شیئی است.

جدول ۱: مقدار هریک از پارامترهای تعریف شده و محاسبه شده در روابط (۳) تا (۵) را نمایش می‌دهد.

y_1	$10mm$	y_2	$5mm$
θ_1	$0.0051\ rad$	θ_2	$0.01rad$
f_1	$30mm$	f_3	$100mm$
f_2	$300mm$	f_4	$50mm$
$d_{1,2}$	$330mm$	f_{obj}	$1.8mm$
$d_{3,4}$	$150mm$	r	$18.4\mu m$

مطابق جدول شماره ۱ دامنه‌ی جابه‌جایی برای حالتی که از یک سیستم نوری شامل ۴ عدسی با نسبت فواصل کانونی ۲ $= \frac{f_3}{f_4}$ استفاده شود، دامنه‌ی جابه‌جایی تله‌ی نوری دو برابر می‌شود. در آزمایش نیز مشاهده شد، دامنه‌ی جابه‌جایی تله‌ی نوری در عدم حضور و حضور سیستم چهار عدسی از ۹/۲ میکرومتر به ۱۸/۶ میکرومتر افزایش می‌یابد.



شکل ۵: تصویری از تله‌اندازی ۳ ذره پلی‌استایرن ۱ میکرومتری در راستای یک خط با استفاده از آینه پیزوالکتریک در فرکانس ۹۲ هرتز.

برای ایجاد تله‌های نوری متعدد، با استفاده از خاموش و روشن کردن لیزر به روش سنکرون‌سازی توانستیم تله‌های نوریِ جدا از هم در راستای تله‌ی خطی ایجاد کنیم که قادر است ذرات پلی استایرن ۱ میکرومتری را در الگوی نوری ایجاد شده مطابق شکل ۵ تله‌اندازی کند. به این معنی که لیزر چند برابر فرکانس نوسان پیزوالکتریک خاموش و روشن می‌شود، که با تنظیم این نسبت می‌توان تعداد تله‌های ایجاد شده را کنترل کرد.

۴-نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان دادیم استفاده از یک آینه نوسانی با سرعت بالا در چیدمان انبرک نوری قابلیت‌های بیشتری مانند ایجاد تله‌ی خطی و یا چندتله‌ای را فراهم می‌آورد. هم‌چنین برای افزایش دامنه‌ی جابه‌جایی تله‌ی نوری از چهار عدسی استفاده کردیم که می‌تواند دامنه‌ی جابه‌جایی تله‌ی نوری را به مقدار دلخواه و مورد نیاز افزایش دهد. نتایج این بررسی می‌تواند برای تله‌اندازی نمونه‌های بزرگ مانند سلول‌های زیستی، بررسی حرکت ذره در چاه پتانسیل‌های مجاور و یا هدایت و چاپ نانوذرات فلزی بر روی سطح استفاده کرد. در مورد چاپ نانوذرات فلزی و یا حتی ایجاد رسانایی الکتریکی در ابعاد نانومتری فقط لازم است که یک تله‌ی نوری متحرک در مجاورت سطح ایجاد شود و سرعت اسکن تله‌ی نوری با توجه به حرکت براونی ذرات و اندازه آن‌ها تنظیم شود.

مراجع

[1] S. Nedev, A. S. Urban, A. A. Lutich, and J. Feldmann, Optical force stamping lithography. *Nano letters*, *11*(2011) 5066 - 5070.

[2] K. C. Vermeulen, j. van Mameren, G. J. Stienen, E. J. Peterman, G. J. Wuite, & C. F. Schmidt. Calibrating bead displacements in optical tweezers using acousto-optic deflecto. *Review of Scientific Instruments*, 77.1 (2006) 013704.

[3] C. J. Firby, Firby, K. N. Smith, S. R. Gilroy, A. Porisky, and A. Y. Elezzabi, Design of a simple, low-cost, computer-controlled, dual-beam optical tweezer system. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, *1*(2016) 440-446.

[4] C. Mio, and D. W. M. Marr. Tailored surfaces using optically manipulated colloidal particles. *Langmuir* 15, no. 25 (1999) 8565-8568.

[5] C. Mio, T. Gong, A. Terray, and D. W. M. Marr, Design of a scanning laser optical trap for multiparticle manipulation. *Review of Scientific Instruments* 71, no. 5 (2000) 2196-2200.

[6] K. Sasaki, M. Koshioka, H. Misawa, N. Kitamura, and H. Masuhara, Pattern formation and flow control of fine particles by laser-scanning micromanipulation. *Optics letters*, *16*(1991) 1463-1465.

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

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