بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

اندازه گیری سختی تله و وابستگی آن به ضریب شکست محیط

فاطمه مهدی‌پور[۱] ، رضا ابراهیم نژاد درزی[۱]، حمیدرضا فلاح[۱،۲]، سید مهدی موسوی[۳] و میثم نوبخت[۴]

۱ گروه فیزیک دانشگاه اصفهان، اصفهان
۲ گروه پژوهشی اپتیک کوانتومی، دانشگاه اصفهان
۳ پژوهشکده اپتیک و لیزر اصفهان، اصفهان
۴ گروه شیمی دانشگاه اصفهان، اصفهان

چکیده –انبرک نوری برای اندازه گیری نیروهای چند پیکو نیوتون استفاده می شود. مانند یک فنر، نیرویی که باریکه لیزر بر ذره اعمال می کند متناسب با جا به جایی از مرکز باریکه است. سختی تله مشخص برای اندازه گیری نیروی معتبر لازم است. سختی تله را می توان با استفاده از چندین روش مانند روش های نیروی فرار، نیروی کششی، هم پاری، پاسخ پله ایی و طیف توانی بدست آورد. در این مقاله از روش نیروی کششی به طور تجربی برای اندازه گیری سختی تله ذره پلی متیل متا اکریلات در سه محیط با ضریب شکست مختلف استفاده شده است و تاثیر ضریب شکست بر سختی تله بررسی شده است.

کلید واژه- انبرک نوری، به دام اندازی، سختی تله، نیروی کششی

Measurement of trap stiffness and it’s dependence on refractive index of medium

Mahdipour Fateme 1, Ebrahimnezhad Darzi Reza 1, Fallah Hamidreza 1,2 , Seied Mahdi Mousavi 3, and Meysam Nobakht 4

1. Physic Department, University of Isfahan, Isfahan
2. Quantum Optic Research Group
3. Isfahan Optic & Laser research Center
4 chemistry Department, University of Isfahan, Isfahan

Abstract- Optical tweezers can be used to measure forces in the order of picoNewtons. Much like a spring, the approximate force that the laser beam applies to an object is proportional to the object’s displacement from the center of the beam. A known trap stiffness is often required to make reliable force measurements. The trap stiffness can be calculated using several experimental methods such as escape force, drag force, equipartition, step response and power spectrum methods. In this paper, drag force method was used experimentally to measure trap stiffness for polystyrene particle in three environments with different refractive index and report refractive index’ effect in trap stiffness.

Keywords: Optical tweezers, trapping, trap stiffness, drag force method

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

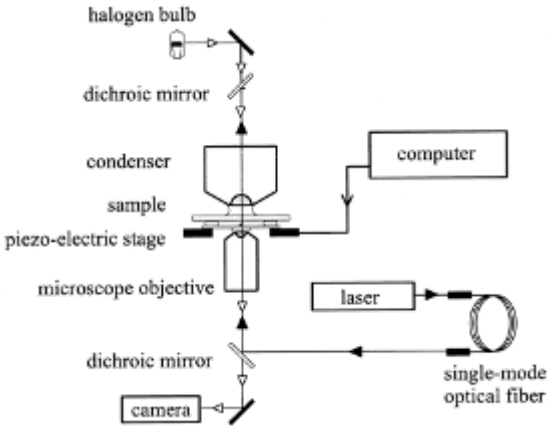
۱- مقدمه

یک ذره کوچک در نزدیکی مرکز یک دسته پرتو همگرا را به وسیله فشار پرتو لیزری با پیروی از قانون پایستگی تکانه می‌توان نگه داشت. فناوری نگه‌داری ذره توسط باریکه لیزری انبرک نوری نامید می‌شود که به عنوان روش دستکاری و به‌دام‌اندازی ذرات به قطر ۲۰ نانومتر تا ۵۰ میکرومتر استفاده می‌شود[۲و۱]. اولین بار این پدیده در سال ۱۹۷۲ توسط اشکین دیده شده است .او نشان داد که نیروهای اپتیکی می‌توانند میکرو ذرات دی الکتریک را در هوا و آب جابه جا و شناور کنند[۳]. محققان از روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری نیروهای به دام اندازی استفاده کرده‌اند. اولین روش، روش نیروی کششی است که با ایجاد یک شار با استفاده از پیزو، پایه موتوری یا یک اتاق شار می‌توان سختی و نیروی به دام اندازی را از نیروی کششی بدست آورد. دومین روش، روش طیف توان است. این روش از نوسان‌های حرارتی برای اندازه‌گیری سختی استفاده می‌کند. سومین روش، روش نیروی فرار است که در این روش سرعت تا زمانی که ذره از تله نوری خارج شود افزایش می‌یابد. با استفاده از سرعت فرار نیروی فرار بدست خواهد آمد. چهارمین روش، روش هم‌ارزی است که در این روش به دانستن ضریب کششی نیازی نیست. با مشخص بودن ثابت بولتزمن، دمای مطلق و داده مکانی از آشکارساز کالیبره شده می‌توان نیروی به‌دام‌اندازی را بدست آورد. آخرین روش پاسخ پله‌ای است. این روش پاسخ یک ذره به‌دام‌افتاده براساس حرکت مرکز تله را تخمین می‌زند[٤].

۲- طرح اپتیکی(چیدمان آزمایشگاهی)

چیدمان انبرک نوری شامل ابزار زیر است: منبع نوری، عدسی‌های پرتو گستر، عدسی شیء، صفحه نمونه با پایه متحرک، منبع نوری سفید، دوربین CCD و کامپیوتر برای پردازش داده‌ها.

طرح اپتیکی در شکل۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است باریکه لیزری با طول موج ۹۷۵ نانومتر از عدسی‌های پرتو گستر عبور کرده و اندازه لکه پرتو افزایش می‌یابد تا تمام عدسی شیء را بپوشاند و به بهترین شکل متمرکز شود. پرتو از عدسی شیء با دهانه عددی ۱/۲ عبور کرده و متمرکز می‌شود. پرتو متمرکز



شکل۱: چیدمان اپتیکی انبرک نوری

وارد صفحه نمونه شامل میکروکره‌های پلی‌متیل‌متا-اکریلات در محیط متانول که برروی پایه موتوری XY قرار دارد می‌شود. منبع نور سفید برای روشن کردن نمونه و CCD در جهت مخالف آینه دوفام برای دیدن تله نوری به کار می‌روند. **یک پایه برای بدست آوردن سختی تله با استفاده از روش نیرو کششی لازم است. برای این هدف، چیدمان اپتیکی به یک پایه موتوری مجهز شده است.این پایه اجازه می‌دهد که نمونه درون ناحیه نور متمرکز شده حرکت کند و ذرات به دام افتاده در طول محیط کشیده شوند. این پایه موتوری به وسیله رایانه با نرم افزار APT user کنترل می‌شود.** یک دوربین CCD برای ضبط تصویر ذرات به‌دام‌افتاده در زمان واقعی بکار می‌رود. CCD یک حسگر تصویر متشکل از یک مدار مجتمع شامل آرایه ای مرتبط از و یا همراه خازن است که نسبت به نور حساس است. مخصوصا در روش نیروی کششی جابه جایی ذره از مرکز تله با استفاده از CCD بدست می‌آید.

۳- سختی تله

دو نوع نیروی ناشی از برهمکنش ذره با نور وجود دارد: نیروی پراکندگی و نیروی گرادیانی. در سیستم انبرک نوری، باریکه نوری توسط عدسی شیء با دهانه عددی بالا متمرکز می‌شود. برای داشتن یک تله پایدار نیروی گرادیانی بر نیروی پراکندگی در نقطه کانونی غلبه می-کند[۵]. این نیروها به عمق تله بستگی دارند و عمق تله نیز به طور غیر مستقیم به ضریب شکست بستگی دارد که

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

با افزایش ضریب شکست عمق تله افزایش می‌یابد[۶]. کمیت دیگری که به ضریب شکست وابسته است سختی تله است. زمانی که ذره در تله قرار دارد اگر آن ذره در فاصله‌ای از مرکز نگه داشته شود نیروی جاذبه‌ای آن را به سمت تله باز می‌گرداند. این نیروی بازگرداننده متناسب با فاصله ذره با مرکز تله است. به عبارت دیگر نیروی انبرک نوری را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد[۷]:

$$F = kX \qquad (۱)$$

در اینجا k سختی تله معرفی می‌شود. اگر مقدار k مشخص باشد با اندازه‌گیری مکان ذره در تله می‌توان نیروی وارد شده به ذره در تله را بدست آورد. سختی تله به پارامترهای مختلفی نظیر بستگی دارد طول موج و توان لیزر، دهانه عددی عدسی شیء، اندازه و ضریب شکست ذره و ضریب شکست محیط بستگی دارد [۸]. در اینجا به بررسی وابستگی سختی تله به ضریب شکست محیط می‌پردازیم.

۳-۱- روش نیرو کششی استوکس

هنگامی‌که سختی تله اندازه‌گیری شده باشد، اندازه‌گیری مکان ذره مساوی با اندازه‌گیری نیروی وارد شده به ذره است. برای اندازه‌گیری سختی تله اگر با نیروی مشخص مکان اندازه‌گیری شود می‌توان با استفاده از شیب خط نمودار نیرو برحسب مکان سختی تله را بدست آورد. یک روش برای اعمال نیروی مشخص استفاده از نیروی کشش چسبندگی وارد بر ذره درون تله است. نیروی مربوط به کشش چسبندگی وارد به ذره با شعاع مشخص را با سرعت دادن به ذره می‌توان بدست آورد. اگر مایع با ویسکوزیته η جریان داشته باشد و ذره با شعاع مشخص را با سرعت v از تله خارج کند، نیروی مربوط به کشش چسبندگی به صورت زیر بدست خواهد آمد[۹]:

$$F_{vis} = \gamma v = 6\pi\eta r v \qquad (۲)$$

در این معادله γ ضریب کشش چسبندگی است. زمانی که چسبندگی محیط مشخص باشد و شعاع ذره پلی‌متیل متااکریلات داده شود، اگر سرعت محیط را بتوان اندازه‌گیری کرد، نیروی وارد شده به ذره را می‌توان اندازه‌گیری کرد. با برابر قرار دادن این نیروی مشخص با نیروی بازگرداننده سختی تله به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$k = \frac{6\pi\eta r v}{X} \qquad (۳)$$

۳-۲- نمونه آزمایشگاهی

نمونه آزمایشگاهی پلی متیل‌متااکریلات(PMMA) است که به دلیل خواص اپتیکی و نور مهمی که دارد در زمینه پزشکی مانند انتقال دارو استفاده می‌شود [۱۰]. به همین دلیل این پلیمر به عنوان نمونه انتخاب شده است ودر آزمایشگاه شیمی پلیمر سنتز شده است.

۳-۳- نتایج آزمایشگاهی

برای سرعت دادن به مایع از حرکت دادن پایه به کمک یک بلور پیزوالکتریک استفاده شده است. با اعمال ولتاژ به پیزو پایه متحرک جابه جا می‌شود و در نتیجه محیط به همراه ذره که در تله قرار دارد حرکت می‌کند. به وسیله CCD می‌توان جابه‌جایی ذره را ضبط کرد. جابه‌جایی ذره از مرکز تله ابتدا به صورت پیکسل اندازه‌گیری و سپس به میکرومتر با استفاده از تناسب تبدیل می‌شود. این آزمایش برای ذره پلی‌متیل‌متااکریلات با قطر ۱.۰۱میکرومتر در سه محیط با ضریب شکست‌های ۱.۳۲، ۱.۳۳و۱.۳۴که توسط دستگاه ABB Refractometer اندازه‌گیری شده‌اند،دارای ویسکوزیته‌های به ترتیب ۰.۵۴، ۱.۵و۲.۵ با واحد اندازه‌گیری cp انجام شده است. سه ولتاژ ۷، ۱۳ و ۲۰ ولت اعمال شده است که معادل سرعت های به ترتیب ۹۹.۶، ۹۹.۸ و ۱۰۰.۱ میکرومتر بر ثانیه هستند. جدول ۱ مقدارهای تجربی سختی تله را نشان می‌دهد.

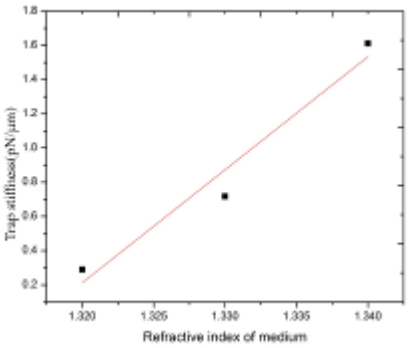
جدول۱: سختی تله به روش نیروی کششی چسبندگی

محیط با ضریب شکست ۱.۳۲	سرعت	µm/s	۹۹.۶	۹۹.۸	۱۰۰.۱
	جابه جایی	µm	۱.۰۲	۲.۲۸۵	۳.۱
	سختی تله	pN/µm	۰.۴۹۶	۰.۲۲۲	۰.۱۶۴
	متوسطk	pN/µm	۰.۲۹۴		
محیط با ضریب	سرعت	µm/s	۹۹.۶	۹۹.۸	۱۰۰.۱
	جابه جایی	µm	۱.۱۸	۲.۲۸	۴.۱۳

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

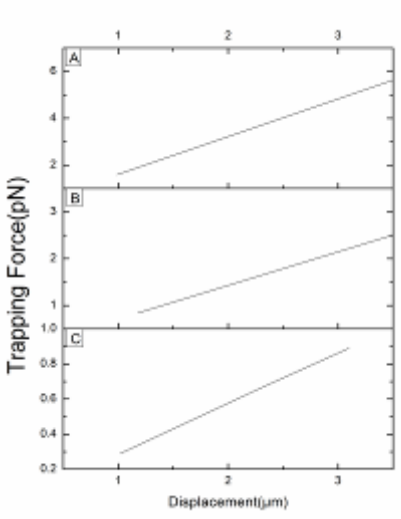
شکست ۱.۳۳	سختی تله	pN/µm	۱.۱۹۲	۰.۶۱۸	۰.۳۴۲
	متوسط k	pN/µm	۰.۷۱۷		
محیط با ضریب شکست ۱.۳۴	سرعت	µm/s	۹۹.۶	۹۹.۸	۱۰۰.۱
	جابه جایی	µm	۰.۹۹	۱.۲۸	۳.۷۵
	سختی تله	pN/µm	۲.۳۶۹	۱.۸۳۶	۰.۶۲۸
	متوسط k	pN/µm	۱.۶۱۱		

با توجه به جدول بالا می‌توان نمودارهای نیرو برحسب مکان و سختی تله برحسب ضریب شکست محیط رسم کرد.



شکل۲: نمودار سختی تله ذره پلی متیل متا اکریلات برحسب ضریب شکست محیط

با مشخص شدن تله سختی می‌توان با اعمال جابه‌جایی های مختلف مقدار نیروی به‌دام‌اندازی را بدست آورد. در شکل۳ نمودار نیروی به‌دام‌اندازی بر حسب مکان برای سه محیط نشان داده شده است.



شکل۳: نمودار نیرو بر حسب جابه‌جایی برای ذره پلی‌متیل‌متا اکریلات در سه محیط با ضریب شکست‌های ۱.۳۴(A ، ۱.۳۳(B و ۱.۳۲(C

۴- نتیجه گیری

بعد از ایجاد یک تله پایدار و جابه‌جایی به کمک پایه متحرک توانستیم سختی تله را به روش نیروی کششی استوکس و نیرو بر حسب جابه‌جایی برای ذره پلی متیل متااکریلات در سه محیط با ضریب شکست‌های مختلف بدست آوریم. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش با افزایش ضریب شکست محیط سختی تله نیز افزایش می یابد. بنابراین سختی تله با ضریب شکست محیط رابطه مستقیم دارد. با بدست آوردن سختی تله به روش نیروی کششی استوکس می‌توان نیروی به‌دام‌اندازی انبرک نوری را برای جابه‌جایی‌های مختلف بدست آورد.

مراجع

[1] Carnicer, *A. Calculation of optical forces on a dielectric bead in a gepmetrically aberrated trap*,Proc.of spie,Vol.7428, 2009.

[2] Koyanaka, S., Endoh, S., *The effect relative refractive index on monosized particle movement under laser radiation pressure,Advanced.*, powder technol,Vol.10, No.3, pp.205-221, 1999.

[3] Matthews, J.N.A., *Commercial optical traps emerge from biophysics labs*, Physics Today, Vol.26, 2009

[4] Baek, jong-ho, hwang, sun-uk, *Trap stiffness in optical tweezers*, gist, south korea, 2007.

[5] Neuman, K., Block, S., *Optical trapping*, Rev.Sci.Instrum., Vol. 75, pp. 2787-2807, 2004.

[6] Ali Mahmoudi, S. Nader S. Reihani, *The effect of immersion oil in optical tweezers*, Optics Express, Vol. 19, Issue 16, pp. 14794-14800, 2011

[7] Williams, M., Optical tweezers: *Measuring Piconewton Forces*, Biophysical Society, 2002.

[8] S. Nader S. Reihani and Lene B. Oddershede, *Optimizing immersion media refractive index improves optical trapping by compensating spherical aberrations*, Optics Letters, Vol. 32, Issue 14, pp. 1998-2000,2007

[9] Malagnino, N., Pesce, G., *Measurements of trapping efficiency and stiffness in optical tweezers*, Scincedirect, Vol.214, pp15–24, 2002.

[10] B. Zhang, F. D. Blum, *Polym. Preprints* 43 (2002).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]