بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

# تعیین مرز دو ناحیه‌ی پاد- همبسته در سیستم آشکارسازی انبرک نوری

مرضیه کریمی[۱]، احسان احدی اخلاقی[۱و۲]، سید نادر سید ریحانی[۲و۳]

[1] دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، [۲]مرکز پژوهشی اپتیک، [۳]دانشگاه صنعتی شریف تهران

**چکیده- روش آشکارسازی «صفحه‌ی فوریه» به صورت متداول در قسمت آشکارسازی انبرک نوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. وجود دو ناحیه‌ی شدتی پاد-همبسته در صفحه‌ی فوریه کاندنسور، آشکارسازی در مکان ذره‌ی به تله‌افتاده در راستای محوری را مختل می‌کند. در این مقاله ابتدا وجود این دو ناحیه به صورت تجربی بررسی شده و سپس سعی شده تا مرز دقیق بین این دو ناحیه اندازه‌گیری شود. استفاده از هرکدام از این نواحی (نه به‌طور هم زمان) می‌تواند دقت اندازه‌گیری مکان $Z$ ذره به تله‌افتاده را افزایش دهد. همچنین برای حصول بیشترین عرض ناحیه‌ی خطی، گشودگی عددی بهینه تعیین شده است.**

***کلید واژه- انبرک نوری، صفحه فوریه، راستای محوری، پاد همبسته.***

کد PACS - ۱-۶۱۸-۱۰-A

# Determination of Two Anti-Correlated Area in Optical Tweezers Detection system

**Marzie Karimi[۱], Ehsan Ahadi Akhlaghi[۱,۲] , S. Nader S. Reihani[۲,۳]**

[۱]Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS),

[۲]Optics Research Center, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS),

[۳]Sharif University of Technology

Abstract- Fourier plane detection scheme is commonly used in optical tweezers' detection system. We have recently shown that for axial movements of the bead, the back focal plane (BFP) intensity pattern contains two anti-correlated areas where collecting signal from both areas with degrade the quality of the positional signal. We have shown that collecting signal from either of the areas would benefit from either better sensitivity or wider linear detection range. We have also shown that there is no very sharp border between mentioned areas.

Keywords: Optical tweezers, Fourier plane, Anti-Correlated, Numerical Apperture.

PACS No: A-۱۰-۶۱۸-۱



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-08 ]

## ۱– مقدمه

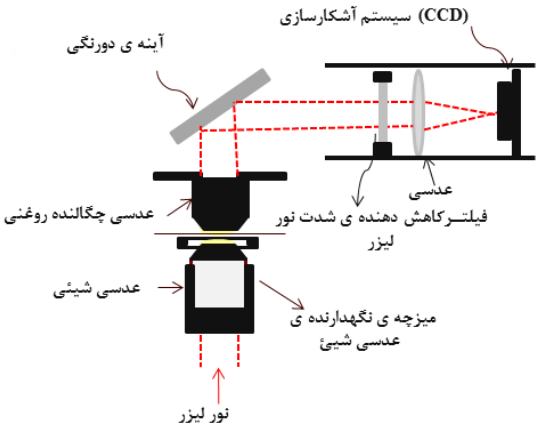
انبرک نوری یک باریکه‌ی لیزر با توزیع شدت گاوسی است که توسط یک عدسی با گشودگی عددی بالا کانونی می‌شود. با استفاده از این وسیله می‌توان نیروهایی از مرتبه‌ی چند صدم پیکونیوتون تا چند صد پیکونیوتون به اجسام میکرونی و زیر میکرونی اعمال نمود. هنگامی‌که ذره با ضریب‌شکست بزرگتر از محیط اطراف، به کانون نزدیک می‌شود نیرویی متناسب با گرادیان شدت بر آن وارد می شود که باعث تله افتادن ذره می‌شود[۱] با اندازه‌گیری دقیق مکان ذره‌ی به تله افتاده و میزان جابه‌جایی‌های آن می‌توان مقدار نیروی وارد بر ذره را در انبرک نوری محاسبه کرد، لذا آشکارسازی دقیق مکان در انبرک نوری از اهمیت بالایی برخوردار است.

متداول‌ترین روش اندازه‌گیری مکان ذره، تداخل‌سنجی در صفحه‌ی کانون پشتی عدسی چگالنده است. مبنای این آشکارسازی تداخل بین نور پراکنده‌شده از ذره‌ی تله‌شده و نور پراکنده‌نشده است؛ سیگنال تداخلی بر روی یک آشکارساز مکان که به‌طور معمول یک فوتودیود چهارتایی است و در صفحه‌ی همیوغ کانون پشتی عدسی چگالنده قرار گرفته است، تصویر می‌شود[۲]. فوتودیود چهارتایی واقع در صفحه‌ی کانون پشتی عدسی چگالنده، امکان اندازه‌گیری سه‌بعدی مکان ذره‌ی تله‌شده را با دقت نانومتری فراهم می‌کند. تاکنون کارهای گسترده‌ای در زمینه‌ی استفاده از روش تداخل‌سنجی در صفحه‌ی کانون پشتی انجام گرفته است. بخشی از این تحقیقات مربوط به تأثیر میزان بازبودن دیافراگم عدسی چگالنده بر کیفیت اندازه‌گیری نیرو بوده است. اثر این پارامتر در اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های محوری نتایج متفاوتی را نسبت به اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های عرضی نشان می‌دهد. در همه‌ی این اندازه‌گیری‌ها استفاده از بیشینه‌ی گشودگی عددی سیستم آشکارسازی بیشترین حساسیت را در زمینه‌ی اندازه‌گیری مربوط به جابجایی‌های عرضی در می‌دهد، ولی برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های محوری نتیجه متفاوت خواهد بود و استفاده از بیشینه گشودگی عددی منجر به کاهش حساسیت محوری خواهد شد. بنابراین برای دستیابی به حساسیت بالا باید گشودگی عددی عدسی چگالنده را کاهش دهیم که به‌دنبال آن حساسیت عرضی سیستم آشکارسازی کاهش می‌یابد. علت این اثر به طور کامل مشخص نشده است و گزارش‌های گوناگونی که صرفاً تجربی یا نظری هستند ارائه شده است[۳و۴]. در یکی از این گزارش‌ها، به دو طریقه‌ی تجربی و نظری نشان داده شده است که طرح تداخلی در صفحه‌ی کانون پشتی عدسی چگالنده متشکل از دو ناحیه پاد-همبسته است و جمع‌آوری همزمان سیگنال از این دو ناحیه ضمن جابه‌جایی محوری ذره منجر به کاهش حساسیت محوری می‌شود[۵].

در این مقاله با جایگزینی یک CCD به جای فوتودیود چهارتایی رفتار دو ناحیه‌ی پادهمبسته و تحلیل طرح تداخلی ثبت شده برای گشودگی‌های عددی مختلف عدسی چگالنده بررسی شده است.

## ۲–چیدمان آزمایش

شکل ۱ طرح کلی از چیدمان مورداستفاده را نشان می‌دهد.




شکل۱: چیدمان انبرک نوری مورد استفاده.

مطابق شکل ۱، باریکه لیزر پس از ورود به مسیر اپتیکی میکروسکوپ توسط عدسی شیئی در محل نمونه کانونی می‌شود و تله‌ی نوری ایجاد می‌شود. ذراتی که در نزدیکی کانون قراردارند به علت بر هم کنش با لیزر به سمت کانون جذب شده و به تله می‌افتند. قسمتی از نور لیزر که به سمت جلو پراکنده شده، پس از عبور از عدسی چگالنده به‌صورت موازی ادامه مسیر داده و توسط یک آینه‌ی دورنگی از مسیر اپتیکی میکروسکوپ خارج شده و



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-08 ]

با استفاده از یک عدسی بر روی صفحه‌ی حساس به نور دوربین، به منظور آشکارسازی طرح‌تداخلی در کانون‌پشتی عدسی چگالنده، تصویر می‌شود. همچنین برای جلوگیری از اشباع دوربین از فیلتر کاهش‌دهنده‌ی شدت نور استفاده شده است. به منظور جابه‌جایی ذره‌ی پلی‌استایرن در راستای محور، از میزچه‌ی پیزوالکتریک نگهدارنده‌ی عدسی شیئی استفاده شد. این میزچه امکان اعمال جابه‌جایی محل تله را با دقت نانومتری فراهم می‌کند و توسط برنامه‌ی نوشته شده در محیط Labview کنترل می‌شود.

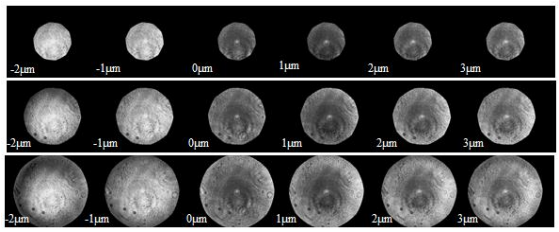
## ۲-۱- مراحل انجام آزمایش

ابتدا یک ذره تله کرده و تصویر آن را ثبت می‌کنیم، در قدم بعدی نمونه‌ی دیگر که در آن ذره‌ها به سطح محفظه چسبیده‌اند تهیه کرده و با تنظیم ارتفاع و یا عمق نمونه آن را در موقعیتی مشابه تصویر تله قرار دهیم، با این روش اطمینان حاصل می‌شود که ذره در امتداد محور نوری قرار دارد. در مرحله‌ی بعد با جابه‌جا کردن عدسی شیئی (راستای محوری) با گام‌های مشخصی (به گونه‌ای که ذره‌ی چسبیده به سطح، مرکز تله را اسکن می‌کند)، کانون لیزر را نسبت به تله جابه‌جا می‌کنیم به طوریکه حلقه‌های تداخلی ایجاد شده با تباین بالا توسط CCD قابل مشاهده باشند. با جابه‌جا شدن ذره در راستای محور نسبت به محل تعادل، شعاع حلقه‌ها تغییر می‌کند. با جابه‌جایی عدسی شیئی می‌توان کانون لیزر را با گام‌های مشخصی نسبت به محل تعادل ذره جابه‌جا کرد و در هر مرحله توسط دوربین CCD تصویر ذره ثبت شود.

یک ذره‌ی ۱/۰۱ میکرونی در عمق دو میکرومتری پایین‌تر از محل تعادل قرار داده شده و با گام‌های ۵۰ نانومتری تا عمق سه میکرومتری بالاتر از محل تعادل پیش رفته و در هر مرحله طرح تداخلی شکل گرفته در کانون پشتی ثبت شده است. برای تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

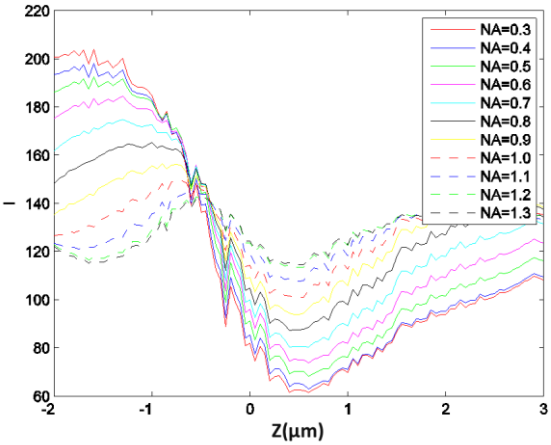
## ۲-۲- تحلیل داده‌ها

اندازه‌گیری‌ها را برای تمام مقادیر گشودگی عددی کاندنسور (از ۰/۳ تا ۱/۳) کالیبره شد تا اطلاعات مربوط به هر مقدار بررسی و در نهایت باهم مقایسه شود.




شکل۲: طرح تداخلی ثبت شده در راستای محوری برای گشودگی‌های عددی به ترتیب: ۰/۳، ۰/۸ و ۱ میکرومتر.

برای گشودگی‌های عددی فریم به فریم میانگین شدت برحسب مکان ذره در راستای محوری (در جهت باریکه‌ی لیزر) محاسبه شد (شکل ۳).

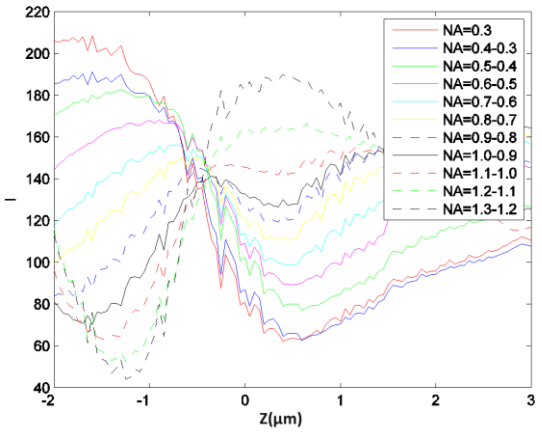



شکل ۳: نمودار شدت بر حسب جابه‌جایی ذره‌ی ۱/۰۱ میکرونی در راستای محوری

با توجه به شکل۳، برای هر مقدار از گشودگی عددی مقادیر شدت تغییر می‌کند ولی نمی‌توان مشخص کرد که رفتار ناحیه‌ی پاد-همبسته از چه گشودگی عددی به بعد ظاهر می‌شود؛ برای بررسی دقیق‌تر این‌بار از تفاضل مقادیر شدتی گشودگی عددی استفاده شد، یعنی شدت را برای حلقه‌هایی که از تفاضل گشودگی‌های عددی با اختلاف ۰/۱ به دست می‌آمدند محاسبه شدند.



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-08 ]




شکل۴: نمودار شدت بر حسب جابه‌جایی ذره ۱/۰۱ میکرونی در راستای محوری برای نواحی حلقوی از گشودگی‌های عددی مختلف در صفحه کانون پشتی عدسی چگالنده.

همانطور که در شکل ۴ مشخص است، وقتی مقدار گشودگی عددی به ۰/۸ می‌رسد، رفتار نمودار در مقایسه با نمودارهای متناظر با گشودگی‌های عددی پایین‌تر متفاوت می‌شود که برای گشودگی‌های عددی بالاتر این تغییرات واضح‌تر مشاهده می‌شود.

با توجه به رفتار نمودارها برای گشودگی‌های مختلف، این نواحی را می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی کرد: نواحی با گشودگی کمتر از ۰/۸، بین ۰/۸ تا ۱/۱ و گشودگی بیشتر از ۱/۱. یعنی ناحیه‌های اول و سوم شامل دو ناحیه خالص پاد همبسته نسبت به هم هستند و ناحیه دوم که دارای کمترین تغییرات شدت برای جابه‌جایی در راستای محوری است، شامل هر دو ناحیه است. این نتایج نشان می‌دهند که برای جابجایی محوری، تغییرات شدت در ناحیه مرکزی و قسمت حلقوی بیرونی با یکدیگر پادهمبسته بوده و جمع‌آوری همزمان سیگنال از این دو ناحیه حساسیت آشکارسازی را کاهش می‌هد.

## ۳- نتیجه‌گیری

طرح تداخلی در صفحه‌ی کانون پشتی عدسی چگالنده متشکل از دو ناحیه پاد-همبسته است و جمع‌آوری هم‌زمان سیگنال از این دو ناحیه ضمن جابه‌جایی محوری ذره منجر به کاهش حساسیت محوری می‌شود. در این مقاله سعی شد تا مرز میان دو ناحیه‌ی پاد-همبسته به‌طور دقیق مشخص شود ولی با آزمایش‌های انجام گرفته مشخص شد، بین این دو ناحیه مرز دقیقی وجود ندارد و حضور دو ناحیه‌ی پاد- همبسته به‌طور همزمان پهنای مشخصی دارد که اندازه‌گیری در این ناحیه نه تنها حساسیت محوری را کاهش می‌هد که موجب کاهش شدید پهنای ناحیه‌ی خطی نیز می‌شود. همچنین مشخص شد که برای حصول بیشترین عرض ناحیه‌ی خطی می‌توان از گشودگی عددی ۰/۳ استفاده کرد..

## مراجع.


[۱] A. Ashkin, J. m. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, S. Chu, *"Observation of the single-beam gradient force optical trap for dielectric particles"*. **Opt. Lett**, ۱۱, ۲۸۸-۲۹۰, (۱۹۸٦).

[۲] Gittes, Frederick and Schmidt, Christoph F. Interference model for back-focalplane displacement detection in optical tweezers. **Opt Lett**, ۲۳(۱):۷–۹, (۱۹۹۸).

[۳] JK Dreyer, K Berg-Sørensen, L Oddershede, "Improved axial position detection in optical tweezers measurements," **Appl. Opt**. ٤۳, (۱۹۹۱).

[٤] A. Rohrbach, E.Stelzer "Three-dimensional position detection of optically trapped dielectric particles", **Opt Lett** , ۹۱،۸, (۲۰۰۲).

[٥] A Samadi, SNS Reihani, Role of condenser iris in optical tweezer detection system, **Opt Lett**.m۳٦, ۲۰, (۲۰۱۱).




[ Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-08 ]