همایش نانوفوتونیک ایران ۱۳۹۹- ۱ و ۲ آبان
Iranian Nano-Photonic Conference 2020
October 23 and 24

تعیین مرز دو ناحیه‌ی پاد- همبسته در توزیع شدت کانون پشتی انبرک نوری به وسیله‌ی فوتودیود چهارتایی

مرضیه جان‌نثاری[۱]، سیدنادر سیدریحانی[۲،*]، احسان احدی اخلاقی[۱]

[۱] دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان، ایران
[۲] دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده: یکی از روش‌های اندازه‌گیری مکان ذره‌ی تله شده در انبرک نوری، روش آشکارسازی با فوتودیود در صفحه‌ی همیوغ کانون پشتی عدسی چگالنده است. وجود دو ناحیه‌ی پاد- همبسته، آشکارسازی در راستای محوری را مختل می‌کند. در این مقاله، ابتدا وجود این دو ناحیه به صورت تجربی نشان داده شد و سپس سعی شده است تا مرز دقیق بین این دو ناحیه اندازه‌گیری شود. برای افزایش دقت اندازه‌گیری مکان محوری و داشتن بهترین پهنای ناحیه‌ی خطی در دو طرف محل تله، پیشنهاد می‌شود مجموع شدت ناحیه‌ی داخلی و خارجی در نظر گرفته شود و برای حذف اثر شدتی ناحیه‌ی دوم و بالا بردن میزان پهنای ناحیه‌ی خطی، از گشودگی عددی ۰/۶ عدسی چگالنده استفاده شود.

کلید واژگان: انبرک نوری؛ صفحه‌ی همیوغ کانون پشتی؛ راستای محوری؛ پاد- همبسته

Determination of the Boundary of Two Anti-correlated Regions in the Back Focal Intensity Distribution of Optical Tweezers by QPD

Marzieh Jannesari[1], S Nader S Reihani[2,*], Ehsan A. Akhlaghi[1]

[1] Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Science , Zanjan, Iran.
[2] Department of Physics, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract- One of the methods for measuring position of the trapped bead is detection by QPD in the Back Focal Plane of the condenser lens. Existence of two anti-correlated areas of intensity in the Fourier plane of the condenser lens, disrupts detection of trapped particles. In this paper, the presence of these two areas has been shown experimentally. To increase accuracy of measuring axial displacement, with considering total intensity of internal and external regions, we can have the best width of the linear region. We suggest using from Numerical Aperture equal to 0.6, to eliminate the effect of the second region.

Keywords: Optical Tweezers; Back Focal Plane; Axial Axis; Anti-Correlated

* sreihani@physics.sharif.edu

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-08-21]

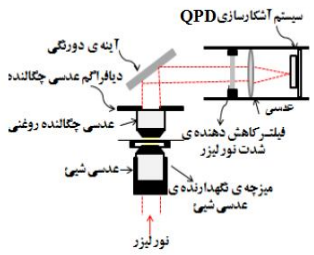
۱- مقدمه

انبرک نوری در سال ۱۹۸۶، توسط اشکین ابداع شد[۱]. اشکین باریکه‌ی گاؤسی لیزر با مد TEM_{00} را با استفاده از عدسی‌های با گشودگی عددی بالا، شدیداً کانونی کرد و علاوه بر گرادیان شدت عرضی که خاصیت ذاتی این نوع باریکه‌ی لیزر است، گرادیان شدت در راستای انتشار باریکه برای غلبه بر نیروی پراکندگی را هم ایجاد کرد و توانست ذره را در سه بعد تله اندازی کند.

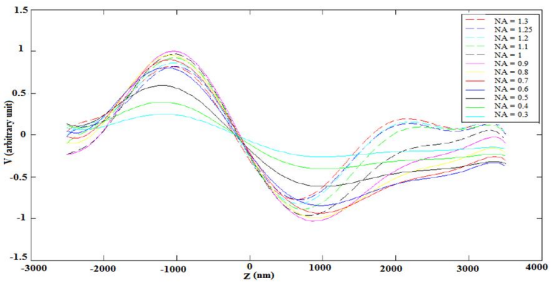
رایج‌ترین نوع آشکارسازی مکان ذره، استفاده از طرح تداخلی ایجاد شده بین نور پراکنده شده و نشده از نمونه در صفحه‌ی کانون پشتی عدسی چگالنده است. در صفحه‌ی همیوغ کانون پشتی، آشکارساز مکان مثل فوتودیود طرح تداخلی را ثبت می‌کند[۲]. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای درمورد نقش گشودگی عددی عدسی چگالنده بر آشکارسازی انجام شده است. در راستای عرضی با افزایش گشودگی عددی، حساسیت در اندازه‌گیری جابه‌جایی بیشتر می‌شود[۳]، درحالی‌که برای اندازه‌گیری در راستای محوری، با افزایش گشودگی عددی، حساسیت کم می‌شود. در پژوهشی نشان داده شده که طرح تداخلی در صفحه‌ی کانون پشتی عدسی چگالنده، از دو ناحیه‌ی پاد-همبسته تشکیل شده است و جمع‌آوری هم‌زمان سیگنال از این دو ناحیه برای حالتی که ذره جابه‌جایی محوری دارد، منجر به کاهش حساسیت می‌شود[۴]. در این مقاله ابتدا وجود این دو ناحیه به صورت تجربی نشان داده شد و سپس سعی شده تا مرز این دو ناحیه مشخص شود.

۲- شرح آزمایش

چیدمان مورد استفاده در شکل۱ نمایش داده شده است. باریکه‌ی لیزر پس از ورود به مسیر اپتیکی میکروسکوپ، به‌وسیله‌ی عدسی شیئی، در محل نمونه کانونی می‌شود و تله‌ی نوری ایجاد می‌شود. نور پراکنده شده و نشده از ذره، پس از عبور از عدسی چگالنده، توسط آیینه‌ی دورنگی و عدسی روی فوتودیود می‌افتد. برای جلوگیری از اشباع شدن فوتودیود از فیلتر کاهش‌دهنده‌ی نور استفاده شده است.



شکل ۱- چیدمان مورد استفاده در آزمایش.



شکل ۲- نمودار تغییرات مقدار ولتاژ برای گشودگی عددی ۰/۳ تا ۱/۳عدسی چگالنده، برحسب جابه‌جایی محوری ذره‌ی ۱/۰۱ میکرونی چسبیده به سطح.

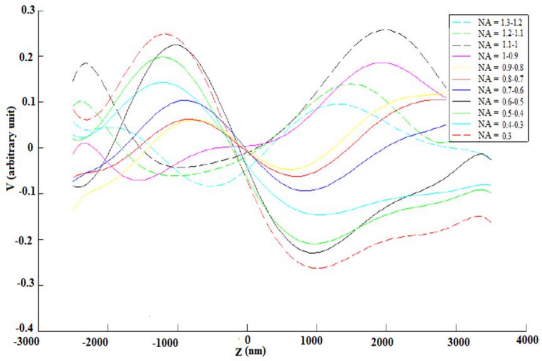
برای انجام آزمایش و داده‌گیری نیاز بود ذره چسبیده به سطح در راستای انتشار لیزر، از پایین محل تله تا بالای آن (به‌طوری که ذره محل تله را اسکن کند) با گام‌های ۵۰ نانومتری با استفاده از پیزوالکتریک z جابه‌جا شود و تغییرات ولتاژ ثبت شود. هربار این داده‌گیری برای گشودگی عددی ۰/۳ تا ۱/۳ عدسی چگالنده با گام ۰/۱ انجام شد. داده‌های ثبت شده توسط فوتودیود که معرف تغییرات ولتاژ نسبت به جابه‌جایی محوری بود، توسط برنامه‌ی MATLAB به صورت نمودار رسم شد (شکل ۲). برای مقایسه‌ی بهتر نمودار مربوط به هر گشودگی عددی با گشودگی عددی‌های بعدی، نمودارها هم‌مرکز و بهنجارشده به بیشترین مقدار ولتاژ رسم شده‌اند. با توجه به شکل ۲، با افزایش

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

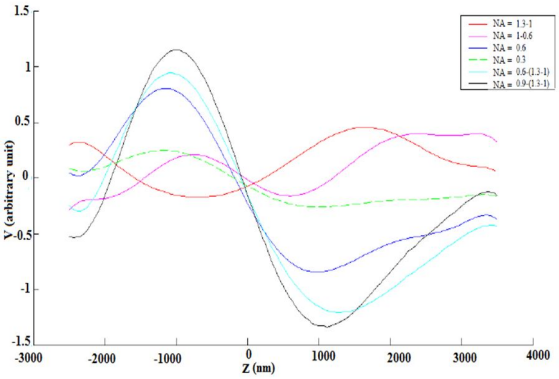
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-08-21]

گشودگی عددی از ۰/۳ تا ۰/۹، ولتاژ افزایش می‌یابد ولی از گشودگی عددی ۱ و بالاتر، مقدار ولتاژ کاهش می‌یابد. این مطلب تاییدی است بر این‌که طرح شدتی از دو ناحیه‌ی پاد- همبسته تشکیل شده است[۴] و با افزایش گشودگی، اثر ناحیه دوم ظاهر می‌شود.

در ادامه برای مشخص کردن مرز بین دو ناحیه، تفاضل مقدار ولتاژ مربوط به هر گشودگی عددی، از ولتاژ مربوط به گشودگی ۰/۱ بیشتر از آن محاسبه شد. نمودارهای تفاضلی به‌دست آمده در شکل ۳ رسم شده‌اند.



شکل ۳- نمودارهای مربوط به تفاضل ولتاژ دو گشودگی عددی متوالی عدسی چگالنده برحسب جابه‌جایی محوری ذره‌ی ۱/۰۱ میکرونی.



شکل ۴- میزان ولتاژ خروجی در نواحی مختلف فوتودیود هشتایی پیشنهاد شده برحسب جابه‌جایی محوری.

با توجه به شکل ۳ نتیجه گرفته می‌شود که تا گشودگی عددی ۰/۹ جهت تقعر نمودارها یکسان است. در نمودار بنفش که مربوط به تفاضل گشودگی عددی ۰/۹ از ۱ است، حول مرکز نمودار به شکل تقریبا تخت است و از آنجا به بعد جهت تقعرها یکسان می‌شود؛ به‌طوری که با جهت مجموعه قبلی کاملا معکوس است. روند افزایشی ولتاژ تا گشودگی عددی ۰/۶ ادامه دارد، ولی با افزایش آن تا مقدار ۰/۷ و محاسبه‌ی میزان تفاضل ولتاژ آن با گشودگی عددی ۰/۶، متوجه افت تغییر ولتاژ می‌شویم. برای نمودار بنفش، اثر مخرب ناحیه‌ی پاد- همبسته به بیشینه مقدار خود می‌رسد. بنابراین بین دو ناحیه مرز مشخصی وجود ندارد و یک ناحیه بین دو ناحیه‌ی داخلی و خارجی وجود دارد. پس نواحی شدتی به سه قسمت داخلی، میانی و خارجی تقسیم شد. سپس نمودارهای مربوط به گشودگی عددی ۰/۳، ۰/۶، $NA_{۰/۶}$ - $NA_{۱}$ (مربوط به تغییرات ولتاژ ناحیه‌ی میانی)، $NA_{۱/۳} - NA_{۱}$ (مربوط به سیگنال ناحیه‌ی خارجی) و $NA_{۰/۶}$ - $(NA_{۱/۳} - NA_{۱})$ (ولتاژ ناحیه‌ی داخلی به همراه ولتاژ ناحیه‌ی خارجی، که با علامت‌های یکسان برای افزایش ولتاژ جمع می‌شوند) و $NA_{۰/۹}$ - $(NA_{۱/۳} - NA_{۱})$ (که مجموع شدت ناحیه‌ی داخلی تا قبل از غالب شدن اثر ناحیه دوم و شدت ناحیه خارجی است) مطابق شکل ۴ رسم شدند و پهنای ناحیه‌ی خطی مربوط به فوتودیود که در آن جابجایی و ولتاژ به‌صورت خطی مربوط هستند، برای هر قسمت محاسبه شد که این نتایج به‌دست آمد: بیشترین پهنای ناحیه‌ی خطی در دوطرف محل تله مربوط به مجموع شدت ناحیه‌ی داخلی وشدت ناحیه‌ی خارجی است. وقتی ذره پایین‌تر از محل تله است، بیشترین پهنای ناحیه خطی مربوط به گشودگی عددی ۰/۶ است. در آزمایش‌هایی که انجام می‌شود، برای به‌دست آوردن نتایج بهتر در راستای محوری، دریچه‌ی عدسی چگالنده تا ۰/۳ بسته می‌شود که پیشنهاد می‌شود دریچه تا ۰/۶ بسته باشد.

مراجع

1. A. Ashkin *et. al.* **Opt. Lett 11**(5) 288-290, (1986).
2. F. Gittes *et. al.* **Opt. Lett 23,** 7-9 (1998).
3. A. Rohrbach *et. al.* **App. Phys 91**, 5474-5488, (2002).
4. A. Samadi *et. al.* **Opt.Let 36** 4056, (2011).

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-08-21]