# آشکارسازی محوری بر پایه انحراف سنج ماره برای انبرک نوری

علی اکبر خُرشاد[۱]، سیدنادر سیدریحانی[۱] و محمد تقی توسلی[۲]

[۱]دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
[۲]دانشگاه تهران، تهران، ایران

**چکیده – روش مرسوم آشکارسازی سه بعدی در انبرک نوری استفاده از *QPD* در *BFP* عدسی چگالنده میکروسکوپ طبق مدل تداخلی است که نهایتاً این ابزار را برای مقاصد نیروسنجی آماده می‌سازد. اخیراً به صورت نظری و تجربی نشان دادیم که با استفاده از انحراف سنج ماره یا تداخل سنج تالبوت که متشکل از دو توری پراش با گام یکسان است که یکی در فاصله تالبوت دیگری قرار گرفته، می‌توان طبق همان مدل تداخلی به آشکارسازی عرضی میکرو یا نانو ذره تله شده در انبرک نوری با حساسیت به مراتب بیشتری پرداخت. در این مقاله با تعمیم روش پیشنهادی، مبانی نظری آشکارسازی محوری ذره در تله انبرک نوری را که بر پایه مدل پراکندگی رایلی است استخراج و با آزمایش های انجام شده روی میکروکره پلی استایرین به قطر $۲/۱۷\mu m$، نشان می‌دهیم که نتایج تجربی حاصل با پیش بینی های حاصل از شبیه سازی سازگار بوده و مهمتر این که با روش پیشنهادی می‌توان حساسیت آشکارسازی محوری ذره در تله را تا ۱۵۰٪ نسبت به *QPD* افزایش داد.**

کلید واژه- آشکارسازی، انبرک نوری، تداخل سنج تالبوت، تکنیک ماره، تئوری پراش

# Moiré Deflectometry-based Axial Detection System for Optical Tweezers

Ali Akbar Khorshad1, Seyed-Nader Seyed-Reihani1, and Mohammad Taghi Tavassoly2

[1]Sharif University of Technology, Tehran, Iran
[2]University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract-Measuring force in optical tweezers is provided by using a QPD positioned at the back-focal-plane of the microscope's condenser based on interference model. Recently we showed, both theoretically and experimentally, that utilizing Talbot interferometer or moiré deflectometer in which the second grating is at one of the Talbot distances of the first one, we are able to detect Micro and/or Nano-particle displacements in optical traps with more sensitivity than the QPD detection method. In this paper, we extend the introduced detection method to 3 dimensions and drive the theoretical framework for detecting axial displacements of the trapped objects based on Rayleigh scattering description. Experimental results on 2.17 Micron bead approve the theoretical predictions and in addition we acquire a 150% improvement factor in detection sensitivity relative to the conventional QPD method.

Keywords: Detection, Optical Tweezers, Talbot Interferometer, Moiré Technique, Diffraction Theory.



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02 ]

## ۱- مقدمه

انبرک نوری ابتدا در سال ۱۹۸۶ توسط آرتور اشکین و همکارانش ابداع شد[۱]. این ابزار غیر مخرب برای میکرودستکاری نوری، اساساً یک باریکه لیزر است که توسط یک عدسی شیئی میکروسکوپ با روزنه عددی بالا شدیداً کانونی شده است. در فضای پیرامون کانون شاهد دو نوع نیروی پراکندگی ناشی از فشار تابشی لیزر و گرادیانی ناشی از گرادیان توزیع شدت هستیم که برای ذرات دی الکتریک با ضریب شکست بیشتر از محیط، شبیه تله عمل کرده و ذرات را به درون خود می کشاند. این تله اصطلاحاً اپتیکی شامل میکرو کره تله شده، مانند یک سیستم جرم و فنر رفتار کرده که نیروی آن از قانون هوک پیروی می کند ($F = kx$ که در اینجا $F$ نیرو، $k$ ثابت سختی تله و $x$ جابجایی ذره از مرکز تله است). به خاطر همپوشانی نیروهای پیکونیوتونی این تله با نیروی های موجود در اجزای زیستی، این ابزار نیروسنجی کاربردهای فراوانی در حوزه علوم زیستی یافته است[۲].

اندازه گیری جابجایی میکروکره تله شده در انبرک نوری (اصطلاحاً آشکارسازی) دارای اهمیت زیادی است چرا که پس از آن با یافتن ثابت سختی تله به کمک یکی از روش های درجه بندی انبرک نوری که معمولاً روش طیف توانی است[۳]، این ابزار برای مقاصد نیروسنجی آماده خواهد بود. روش های آشکارسازی عبارت اند از: ویدئو میکروسکوپی، تداخل سنجی قطبشی، QPD (فوتودیود چهارتایی) و آشکارساز حساس به جابجایی که در روش مرسوم QPD، این آشکارساز طبق یک مدل تداخلی در صفحه کانون پشتی (BFP) عدسی چگالنده جایی که باریکه های لیزر پراکنده شده و پراکنده نشده تداخل می‌کنند، قرار می گیرد[۴]. در عمل برای مسدود نشدن مسیر روشنایی میکروسکوپ انبرک نوری، این صفحه توسط یک عدسی به صفحه مزدوج آن تصویر شده و آشکارساز در آنجا می‌نشیند. با جابجایی نانومتری ذره، الگوی تداخلی روی سطح آشکارساز جابجا شده و نهایتاً اندازه گیری تفاضل سیگنال های حاصل از نیمه های راست و چپ، و بالا و پایین به ترتیب معادل با جابجایی ذره در راستاهای $x$ و $y$، و مجموع سیگنال های حاصل از ۴ ربع QPD معادل با جابجایی ذره در راستای $z$ (محوری) خواهد بود.

اخیراً آشکارساز نوینی بر پایه تکنیک ماره برای اولین بار توسط نویسندگان مقاله برای انبرک نوری معرفی شده است[۵-۶]. این آشکارساز برخلاف QPD که از پدیده تداخل بهره می‌برد، در اصل دو توری پراش رانکی با گام یکسان است که توری اول در صفحه مزدوج BFP عدسی چگالنده و توری دوم در یکی از فواصل تالبوت متوالی توری اول قرار می‌گیرد. باریکه های لیزر پراکنده شده از ذره و پراکنده نشده، از توری اول پراش یافته و خود تصویر آن را در یکی از فواصل تالبوت ایجاد می‌کنند. سپس این باریکه ها از توری دوم نیز پراش یافته و پس از آن با یکدیگر تداخل می کنند. بعد از این مجموعه که به تداخل سنج تالبوت یا انحراف سنج ماره نیز مشهور است شاهد فریزهای ماره موازی‌ای خواهیم بود که تحلیل کل الگوی ماره یا جفت فریزهای ماره متقابل به تنهایی، امکان آشکارسازی حرکت-های نانومتری ذره در تله را با حساسیت بیشتری نسبت به QPD فرآهم می‌سازد. در پژوهش های قبلی به مبانی نظری و تجربی این روش آشکارسازی برای جابجایی های عرضی ذره در تله اشاره شد[۵-۶] که در این مقاله به تعمیم این روش برای اندازه گیری جابجایی های محوری ذره در تله خواهیم پرداخت.

## ۲- مبانی نظری آشکارسازی محوری

از نقطه نظر تئوری، تله اندازی نوری ذرات را می‌توان مسئله برهم‌کنش نور و ماده دانست که بسته به اندازه قطر ذرات ($d$) نسبت به طول موج لیزر ($\lambda$)، توصیف های متفاوت اپتیک هندسی ($d \gg \lambda$)، پراکندگی رایلی ($d \ll \lambda$) و اپتیک Mie ($d \approx \lambda$) را به دنبال خواهد داشت که در این مقاله از توصیف رایلی برای بیان چارچوب نظری بهره خواهیم برد. با تله شدن ذره در چاه پتانسیل سه بعدی انبرک نوری، بخشی از باریکه لیزر پراکنده شده و بخشی دیگر پراکنده نشده باقی می‌ماند. می‌توان نشان داد که میدان الکتریکی باریکه دوم در BFP عدسی چگالنده میکروسکوپ از رابطه (۱) بدست می‌آید: $E_{us}(v,v,z) \cong$

$$\frac{ikw_0 I_{tot}^{\frac{1}{2}}}{R(\pi\epsilon_s c_s)^{\frac{1}{2}}}\, e^{-\frac{v^2+v^2}{w^2}}\, e^{-i\vec{k}.\vec{R}} \qquad (1)$$

که در آن $k = \frac{2\pi n_s}{\lambda}$، $n_s$، $w_0$، $I_{tot}$، $\epsilon_s$، $c_s$، $w$ و $R$ به ترتیب عدد موج، ضریب شکست محیط نمونه، کمر باریکه لیزر در صفحه کانون، شدت کل باریکه لیزر، ضریب گذردهی



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02 ]

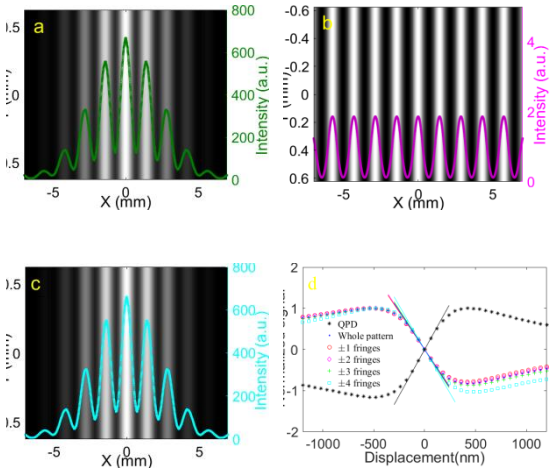
الکتریکی نمونه، سرعت نور در محیط نمونه، کمر باریکه لیزر در صفحه مشاهده و فاصله کانون لیزر از نقطه مشاهده $(\upsilon, \nu, z)$ است. با استفاده از قانون ABCD در اپتیک گوسی، می‌توان معادله میدان مختلط را در صفحه مزدوج BFP عدسی چگالنده جایی که توری اول انحراف سنج ماره قرار گرفته، بدست آورد. با بسط فوریه توری طبق رابطه (۲) ($q$ گام توری و $b_n = \frac{\sin(\frac{n\pi}{2})}{n\pi}$ دامنه هارمونیک $n$ ام توری است)

$$T(\nu) = \sum_{-\infty}^{+\infty} b_n \exp(i2\pi n \frac{\nu}{q}) \qquad (2)$$

و استفاده از انتگرال پراش فرنل-کیرشهف می‌توان اثر پراش این باریکه از توری اول را در یکی از فواصل تالبوت بدست آورده و با در نظر گرفتن توری دوم همانند رابطه (۲) و اعمال دوباره انتگرال پراش فرنل-کیرشهف، الگوی ماره این باریکه را پس از تداخل سنج تالبوت مشاهده کرد. دلیل تشکیل فریزهای ماره در این حالت، برهم‌نهی فیزیکی توری دوم و خود تصویر توری اول است که گام آن به خاطر کروی بودن جبهه موج فرودی تغییر کرده است. شکل ۱(a) شبیه سازی این الگوی ماره را برای یک جفت توری با گام یکسان $50\ \mu m$ نشان می‌دهد. می‌توان به سادگی ثابت کرد که در تقریب رایلی، میدان الکتریکی باریکه پراکنده شده از ذره در تله که در راستای محوری به اندازه $z_s$ از مرکز تله جابجا شده است در BFP عدسی چگالنده از رابطه (۳) بدست می‌آید:

$$E_s \cong \frac{E_{0s}(z_s)}{z_0} e^{-ikz_0} e^{ikz_s} e^{-\frac{ik}{2z_0}\left(1+\frac{z_s}{z_0}\right)(\upsilon^2+\nu^2)} \qquad (3)$$

که در آن $E_{0s}(z_s) = \frac{k^2 \alpha E_0}{[1+(\frac{\lambda z_s}{\pi w_0^2})^2]^{1/2}} e^{-ikz_s + i\xi(z_s)}$، $E_0 = \frac{2I_{tot}}{w_0(\pi\epsilon_s c_s)}^{1/2}$ و $\xi(z_s) = \tan^{-1}(\frac{\lambda z_s}{\pi w_0^2})$ است (در این روابط $z_0$ و $\alpha$ به ترتیب فاصله صفحه مشاهده از کانون لیزر و قطبش پذیری ذره است). همانند آنچه که برای باریکه پراکنده نشده بیان شد، می‌توان با استفاده از قانون ABCD، بسط فوریه توری ها همانند رابطه (۲) و دو بار استفاده از انتگرال پراش فرنل-کیرشهف، میدان الکتریکی باریکه پراکنده شده از ذره را پس از تداخل سنج تالبوت و نهایتاً الگوی ماره ناشی از این باریکه را مشاهده کرد. شکل ۱(b) یک الگوی نوعی مربوط به این باریکه را برای همان جفت توری‌ها نشان می‌دهد. به دلیل




شکل ۱: الگوهای ماره حاصل از باریکه های پراکنده نشده (a)، پراکنده شده از ذره (b) و برهم نهی آنها پس از انحراف سنج ماره (c). منحنی های آشکارسازی QPD و تحلیل های مختلف الگوی ماره (d).

تفکیک نشدن الگوی های ماره پراکنده نشده و پراکنده شده از یکدیگر، برآیند میدان ها پس از جفت توری را در نظر گرفته و به الگوی ماره برآیند می‌پردازیم. شکل ۱(c) الگوی ماره برآیند حاصل از شبیه سازی را نشان می‌دهد. برای آشکارسازی محوری برخلاف آشکارسازی عرضی ذره، همانند QPD شدت های دو نیمه الگوی ماره یا جفت فریزهای متقابل را بر حسب جابجایی های مختلف ذره با یکدیگر جمع می‌کنیم. شکل ۱(d) منحنی های شبیه سازی آشکارسازی محوری ذره در تله را برای روش های QPD و ماره نشان می‌دهد. (لازم به ذکر است که شیب قسمت خطی منحنی آشکارسازی به عنوان حساسیت تعریف می-شود).

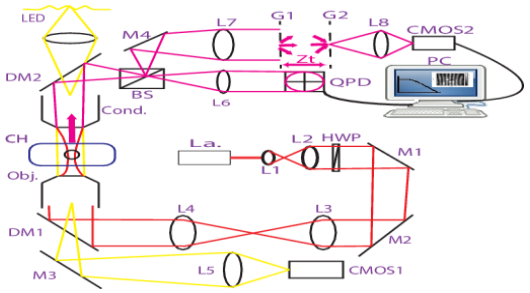
## ۳- کارهای تجربی

شکل ۲ چیدمان انبرک نوری بکار گرفته شده را به تصویر می‌کشد که به بخش آشکارسازی مرسوم آن (QPD)، آشکارساز انحراف سنج ماره نیز افزوده شده است. در صفحه مزدوج BFP عدسی چگالنده که توسط عدسی L7 ایجاد شده است توری رانکی اول با فرکانس $\frac{lp}{mm}$ ۲۰ و در فاصله $11mm$ از آن، توری دوم با همان فرکانس قرار گرفته و نگهدارنده توری ها امکان تنظیم زاویه تقریباً صفر

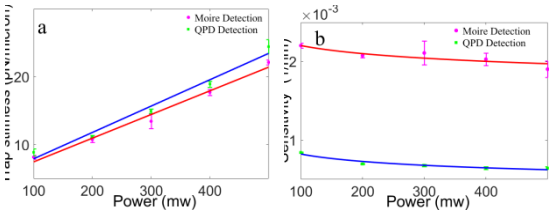


این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02 ]




شکل ۲: چیدمان تجربی انبرک نوری تلفیق شده با آشکارساز ماره. L، M ،D.M. ،G ،Obj. ،CH ،Cond. ،La ،HWP،BS و CMOS به ترتیب عدسی، آینه، آینه دو رنگی، توری، عدسی شیئی، محفظه آزمایش، عدسی چگالنده، لیزر، تیغه نیم موج، باریکه شکن و دوربین ثبت تصویر می‌باشند.




شکل ۳: مقایسه نتایج تجربی حاصل از آشکارسازهای ماره و QPD. (a) ثابت سختی تله و (b) حساسیت آشکارسازی بر حسب توان.

بین آنها برای ایجاد فریزهای ماره موازی را فراهم می‌کند. نهایتاً پس از توری دوم عدسی تصویرساز L8 و دوربین CMOS2 قابلیت ثبت تصویرهای ماره با ابعاد ۶ × ۸۰۰ پیکسل با فرکانس ۵ KHz را مهیا می‌سازد. در مراجع [۶-۵] ثبت تصاویر با ابعاد ۶۰۰ × ۸۰۰ پیکسل و با فرکانس ۴۰۰Hz گزارش شده بود که روش درجه بندی نیروی کشش سیال بکار گرفته شد ولی در اینجا به راحتی می‌توان از روش طیف توانی برای یافتن ثابت سختی تله و ضریب تبدیل بهره برد. در یک آزمایش نوعی برای اثبات تجربی آشکارسازی محوری انبرک نوری با استفاده از انحراف سنج ماره و مقایسه نتایج حاصل با روش استاندارد QPD، یک ذره پلی استایرین با قطر $2/17\ \mu m$ تله شد و در توان های مختلف لیزر، سری های زمانی آن به روش QPD و الگوهای ماره حاصل برای مدت ۳s ثبت شدند. در ادامه با استفاده از کدهای پردازش تصویر تحت متلب که بدین منظور توسط نویسندگان این مقاله نوشته شده اند، سری های زمانی مربوط به کل الگوی ماره استخراج شدند. از آنجا که بنا داریم در نهایت حساسیت این دو روش را با یکدیگر مقایسه کنیم لازم است داده های تله خالی را نیز ثبت کرده و سری های زمانی نرمالیزه شده را حساب کنیم. با در اختیار داشتن سیگنال های نرمالیزه شده هر روش و استفاده از یک بسته نرم افزاری استاندارد تحت متلب که کار برازش منحنی های طیف توانی با تابع لورنتزی و استخراج ضرایب درجه بندی را انجام می‌دهد، این ضرایب به ازای هر توان برای هر دو روش مشخص شدند. شکل ۳(a) رفتار خطی ثابت سختی محوری تله بر حسب توان را برای هر دو روش آشکارسازی نشان می‌دهد که از توافق خوب روش ماره با QPD حکایت دارد (ثابت سختی برای جفت فریزهای متقابل همانند مقدار حاصل از کل الگوی ماره است) و شکل ۳(b) میزان حساسیت (عکس ضریب تبدیل نرمالیزه شده) آشکارسازی با QPD و تحلیل الگوهای ماره حاصل از آشکارساز معرفی شده را نشان می‌دهد.

## ۴-نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب نظری و تجربی ارائه شده در این مقاله می‌توان نتیجه گرفت که انحراف سنج ماره علاوه بر آشکارسازی عرضی، قادر است جابجایی های نانومتری محوری ذره در تله را با حساسیتی حدود ۱/۵ برابر بیشتر از QPD اندازه گیری کند.

## ۵-سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف، صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور و ستاد توسعه فناوری نانو به خاطر حمایت های مالی سپاسگزاریم.

## مراجع

[1] A. Ashkin, et al.,“Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles”, Opt. Lett., Vol. 11, No. 5, pp. 288-290, 1986.

[2] K. Svoboda, et al.,“ Direct observation of kinesin stepping by optical trapping interferometry”, Nature, Vol. 365, No. 6448 , pp. 721-727 1993.

[3] P. M. Hansen, et al., “Tweezercalib 2.0:Faster version of MatLab package for precise calibration of optical tweezers”, Comp. Phys. Commu., Vol. 174, No. 6, pp. 518-520, 2006.

[4] F. Gittes, et al., “Interference model for back-focal-plane displacement detection in optical tweezers”, Opt. Lett., Vol. 23, No. 1, pp. 7-9 1998.

[5] A. A. Khorshad, et al., “Moiré deflectometry-based position detection for optical tweezers”, Opt. Lett., Vol. 42, No. 17, pp. 3506-3509 2017.

[6] علی اکبر خُرشاد، سیدنادر سید ریحانی، محمد تقی توسلی، آشکارسازی انبرک نوری بر پایه تکنیک ماره، کنفرانس انجمن فیزیک ایران، ۱۳۹۶.



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02 ]