بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

تعیین نمایه فاز در اجسام شفاف با روش پراش فرنل از پله فازی دایره‌ای

خسرو حسنی، سمانه خامی، محمدتقی توسلی

دانشگاه تهران، دانشکده فیزیک، تهران، خیابان کارگر شمالی، کد پستی ۱۴۳۹۹۵۵۹۶۱

hassanikh@ut.ac.ir, samaneh.khami@yahoo.com, tavasoli@iasbs.ac.ir

چکیده – در این مقاله روشی جدید بر پایه پراش فرنل از پله فازی دایره‌ای برای تعیین نمایه دو بعدی فاز در اجسام شفاف ارائه شده ا ست. کارامدی این روش با شبیه سازی رایانه‌ای و همچنین انجام آزمایش بر روی ذرات کروی شیشه‌ای به قطر چند ده میکرون تحقیق و نتایج هر دو آورده شده‌اند. این نتایج نشان می دهند که روش پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک روش نوین و ساده برای میکروسکوپی اجسام فازی که در علوم زیستی بسیار پرکاربرد است، به کار رود.

کلید واژه- پله فازی، پراش فرنل، میکروسکوپی فاز

Determination of the phase profile in transparent objects using Fresnel diffraction from a circular phase step

Samaneh Khami, Khosrow Hassani, Mohammad Taghi Tavassoly

Dept. of Physics, University of Tehran, Kargar Sohmally Ave., 1439955961, Tehran, Iran

hassanikh@ut.ac.ir, samaneh.khami@yahoo.com, tavasoli@iasbs.ac.ir

Abstract- **In this paper a novel method for determination of the two-dimensional phase profile of transparent objects based on Fresnel diffraction from a circular phase step is proposed. Evidence on the efficiency of this method is provided through computer simulations and experiments on 10-micron size glass beads. The results show that the proposed method can, in principle, be used as a novel phase microscopy technique to study phase objects with many applications in biology.**

Keywords: Phase step, Fresnel diffraction, phase microscopy

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

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

مقدمه

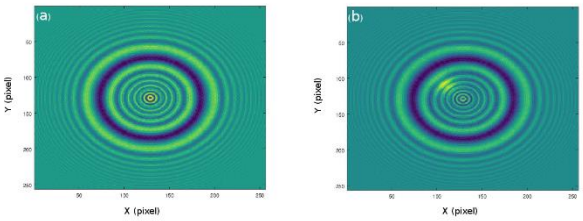
وقتی نور تکفام و شبه همدوس در مسیر حرکت به مانعی برخورد کند به دلیل تغییر ناپیوسته (یک پله) فاز، دامنه، قطبش و یا همدوسی نور فریزهای پراش فرنل پدیدار می‌شوند. این پدیده نگرشی جدید به پدیده‌های تداخل و پراش است که می‌توان به کاربردهای فراوانی همچون اندازه‌گیری جابجایی های نانومتری [۱]، اندازه گیری ضریب شکست و ضخامت تیغه [۲]، اندازه‌گیری ضخامت و ضریب شکست لایه‌های نازک [۳]، شکست سنجی [۴]، تعیین فاصله کانونی عدسی‌ها [۵]، اندازه‌گیری دقیق طول موج [۶] و طیف سنجی[۷] و میکروسکوپی نمونه‌های فازی در یک بعد [۸] اشاره کرد.

برخی از نمونه‌های زیستی مانند سلول های زنده، جذب یا پراکندگی اندکی برای نور مرئی دارند. این باعث می‌شود در میکروسکوپی معمولی تصویر آنها با نمایانی کمی ظاهر شود. اما به دلیل ضریب شکست متفاوت آنها با محیط اطراف فاز موج عبوری از آنها تغییر می‌کند و از این رو اجسام فازی نامیده می‌شوند. تاکنون روشهایی برای میکروسکوپی اجسام فازی ارائه شده است، اما بیشتر آنها مانند میکروسکوپی تباین فاز روشهای کیفی هستند و یا محدود به یک بعد می‌باشند [۹و۸].

در این مقاله به کمک چیدمانی ساده و با استفاده از پراش فرنل از یک پله دایره‌ای روشی برای تصویربرداری کمی از نمونه‌های فازی در دو بعد ارائه شده است. برتری دیگر این روش استفاده از روش فوریه برای محاسبه نقش پراش فرنل نور از پله‌های دوبعدی است که نسبت به روشهای محاسبه مستقیم انتگرال پراش فرنل-کیرشهف، باعث کاهش چشمگیر حجم محاسبات می‌گردد.

مبانی نظری پراش فرنل از پله فازی

با توجه به اصل هویگنس-فرنل، اگر یک موج تکفام و همدوس فضایی E_i در سر راه خود از جسمی با تابع تراگسیلش $A(x_o, y_o)$ رد شود، میدان نور پراشیده در نقطه (x, y) روی صفحه‌ای به فاصله d از جسم با رابطه زیر داده می‌شود:



شکل ۱ : شبیه سازی نقش پراش فرنل از پله فازی دایره‌ای (a) بدون حضور جسم، و (b) با حضور جسم فازی.

$$E_R(x,y) = -\frac{i}{\lambda}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} E_i\,(x_0,y_0)\,A(x_0,y_0)\left(\frac{exp(ikr)}{r}\right)dx_0dy_0 \qquad (۱)$$

به سادگی می‌توان نشان داد [۱۰] که در تقریب فرنل این رابطه به تبدیل فوریه فضایی تابع تراگسیلش تعمیم یافته $M(x_0, y_0)$ در بسامدهای فضایی $\left(\frac{x}{\lambda d}, \frac{y}{\lambda d}\right)$ کاهش می‌یابد. این تابع به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$M(x_0,y_0) = A(x_0,y_0)\ exp\left[\left(\frac{ik}{2z_0}\right)\left(x_0{}^2 + y_0{}^2\right)\right] \qquad (۲)$$

شبیه سازی و چیدمان آزمایش

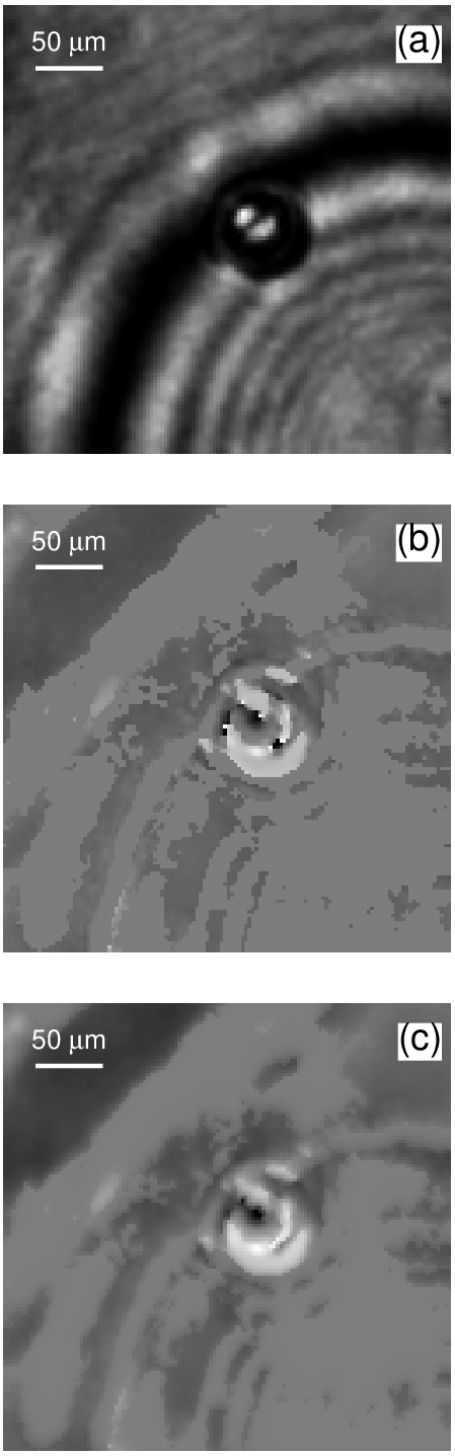
در شبیه سازی انجام شده تابع تراگسیلش $A(x_o, y_o)$ به شکل یک پله دایره‌ای با فاز ثابت (مثلا π) تعریف شده و نقش پراش فرنل آن با روش گفته شده به کمک تبدیل فوریه دوبعدی با الگوریتم *FFT* از تابع تعریف شده در رابطه (۲) در نرم افزار *Octave* به دست می‌آید. نمونه ای از این نقش در شکل *1(a)* نشان داده شده است. سپس فاز یک جسم کروی با چگالی یکنواخت را در نقطه ای دلخواه در روی پله به آن اضافه کرده و نقش پراش به همان روش محاسبه می‌شود که در شکل *1(b)* نمایش داده شده است. تاثیر فاز ذره کروی روی شدت نقش پراش فرنل بخوبی آشکار است. در آزمایشهای انجام شده از یک پله دایره‌ای شکل به قطر ۲ میلیمتر و ارتفاع حدود ۶۰۰ نانومتر که با روش لیتوگرافی نوری و سپس خوردگی در اسید *HF*

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

شکل ۲ : چیدمان میکروسکوپی فازی به روش پراش فرنل

روی یک قرص شیشه اپتیکی ساخته شده بود استفاده کردیم. این پله درون لوله یک میکروسکوپ نوری در محل صفحه کانون چشمی قرار داده می‌شود. اجسام فازی آزمون ذرات کروی شیشه‌ای با قطر تقریبی چند ده میکرون هستند که روی یک لامل در مکان جسم در صفحه کانون شیئی قرار می‌گیرند. تصویری از چیدمان آزمایش در شکل ۲ آورده شده است. میکروسکوپ دارای یک دوربین CCD دیجیتال برای ثبت تصاویر است که به رایانه وصل شده. نمونه‌هایی از نقشهای پراش ثبت شده با حضور ذره در شکلهای $3(a)$ نشان داده شده‌اند. برای به دست آوردن نمایه فاز از روی نقش شدت از روش استاندارد انتقال فاز چهار گام [۱۰] استفاده شد که در آن چهار نقش پراش پی در پی به اندازه $\frac{\pi}{2}$ ثبت شد. در عمل برای انجام این کار از ترکیب مناسب تیغه‌های ربع موج و نیم موج تاخیر انداز موج استفاده کردیم. فاز پیچیده شده را می‌توان از رابطه $\psi = tan^{-1}\frac{I_4-I_2}{I_1-I_3}$ محاسبه کرد [۱۰]. سپس این فاز با استفاده از تکنیکهای بازگشایی فاز به نمایه پیوسته و هموار فاز همانند آنچه در شکل $3(b)$ دیده می‌شود، تبدیل می‌گردد. نمودار سه بعدی فاز بر حسب مختصات نمونه نیز در شکل $3(c)$ آورده شده است. همانطور که دیده می‌شود نمایه کروی شکل فاز در این شکل کاملا نمایان است.



شکل ۳ : به ترتیب از بالا به پایین : نقش پراش از پله فازی با حضور جسم، نقشه فاز پیچیده، و نقشه فاز بازگشایی شده.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به کمک پراش فرنل از پله دایره‌ای به تعیین نمایه فاز نمونه‌های کروی شفاف پرداختیم. برتری این روش بر روش

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

های پیشین، سادگی چیدمان، کمی بودن نتایج، امکان اندازه‌گیری نمایه دوبعدی فاز و همچنین جایگزینی روش تبدیل فوریه به جای روش متدوال انتگرال های پراش فرنل-کیرشهف برای ساده سازی محاسبات است.

مرجع ها

[1] A. Khorshad, Kh. Hassani, and M. T. Tavassoly. "Nanometer displacement measurement using Fresnel diffraction." Appl. Opt. Vol. 51, No. 21, pp. 5066-5072, 2012.

[2] M.T Tavassoly, S.R. Hosseini, A.M. Fard, R. Rezvani Naraghi, "Applications of Fresnel diffraction from the edge of a transparent plate in transmission", Appl. Opt., Vol. 51, No. 30, pp. 7170-7175, 2012.

[3] M.T. Tavassoly, I. Moadel Haghighi, Kh. Hassani, "Application of Fresnel diffraction from a phase step to the measurement of film thickness", Appl. Opt., Vol. 48, No. 29, pp. 5497-5501, 2009.

[4] M.T Tavassoly, R. Rezvani Naraghi, A. Nahal, and Kh. Hassani, "High precision refractometry based on Fresnel diffraction from phase plates", Opt. Lett., Vol. 37, No. 9, pp. 1493-1495, 2012.

[5] M. Dashtdar, & Hosseini-Saber, S. M. A. "Focal length measurement based on Fresnel diffraction from a phase plate", Applied optics, 55(26), 7434-7437,2016.

[**6**] M.T. Tavassoly and S.R. Hosseini, "The application of a phse step diffratometer in wavemetry", J. Opt., Vol. 17, pp. 035605, 2015.

[**7**] A. Jabbari, Kh. Hassani, and M.T. Tavassoly, "Determination of the spectral line profile using a phase gradient step and stationary Fourier transform spectroscopy", Appl. Opt., Vol. 58, No. 19, pp. 5353-5359, 2019.

[8] S. Ebrahimi, Dashtdar, M., Sánchez-Ortiga, E., Martínez-Corral, M., & Javidi, B. "Stable and simple quantitative phase-contrast imaging by Fresnel biprism", Applied Physics Letters, 112(11), 113701, 2018.

[9] R. Barry, "Quantitative Phase Imaging of Cells and Tissues", J. Biomed. Opt., Vol. 17, No. 2, 029901, 2012.

[10] J. Goodman, *Introduction to Foureir Optics*, 4th ed., W. H. Freeman, 2017.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]