



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



## اندازه گیری نمایه تغییر فاز به روش خود تصویر با نور ناهمدوس

خسرو حسنی، جواد عارفی تبار و سحر سهرابی

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

[hassanikh@ut.ac.ir](mailto:hassanikh@ut.ac.ir), [javad.arefi@ut.ac.ir](mailto:javad.arefi@ut.ac.ir), [srb.sahar@gmail.com](mailto:srb.sahar@gmail.com)

چکیده - تعیین نمایه تغییرات فاز در اجسام فازی که تغییر چندان در دامنه نور عبوری به وجود نمی آورند اهمیت کاربردی زیادی در اپتیک، سیالات و زیست شناسی دارد. پدیده خودتصویر با نور ناهمدوس در اصل یک پدیده پراش نور است که به تغییرات راه نوری بسیار حساس می باشد، بگونه ای که اگر یک جسم شفاف در مسیر عبور نور قرار گیرد، تغییر فاز ناشی از آن در خود تصویر تشکیل شده قابل آشکارسازی است. در این مقاله نتایج اندازه گیری نمایه تغییرات فاز برای نمونه های فازی با ترکیب روش خودتصویر با نور ناهمدوس و تکنیک ماره ارائه شده است. حساسیت بالا به تغییرات فاز، کارآمدی در مقابل تغییرات ناخواسته محیطی، غیر مخرب و بی نیاز بودن به اسکن نمونه از مزایای این روش در مقایسه با روشهای مشابه هستند.

کلیدواژه- اجسام فازی، خودتصویر، نمایه فاز

## Measurement of the phase profile using the incoherent self-imaging

Khosrow Hassani, Javad Arefi-tabar, Sahar Sohrabi

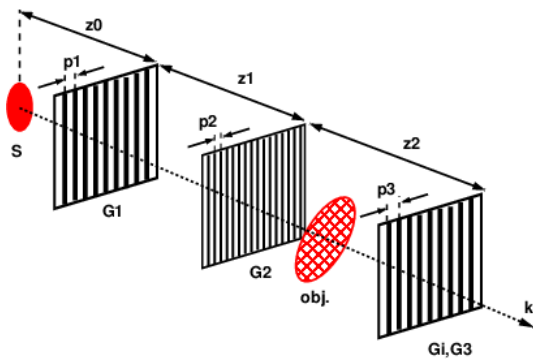
Dept. of Physics, University of Tehran, Kargar Sohmallly Ave., 1439955961, Tehran, Iran

[hassanikh@ut.ac.ir](mailto:hassanikh@ut.ac.ir), [javad.arefi@ut.ac.ir](mailto:javad.arefi@ut.ac.ir), [srb.sahar@gmail.com](mailto:srb.sahar@gmail.com)

Abstract- Measurement of phase variation profile in phase objects is of great importance in optics, fluids, and biology. The incoherent self-imaging phenomenon is based on diffraction of light which is very sensitive to variations in the optical path length, so that the self-image may be affected by phase variations due to the presence of a phase object inserted in the image path. In this work the results for the measurement of 2D phase profiles of phase objects using the combination of the incoherent self-imaging and the Moiré phenomena are presented. High phase sensitivity, resilience against unwanted disturbances, being a non-destructive and whole-field technique are the advantages of the proposed technique compared with other similar methods.

Keywords: phase objects, self-imaging, phase profile

## مقدمه



شکل ۱: چیدمان تشکیل خود تصویر با نور ناهمدوس

اول قرار می گیرد. تغییرات فاز ایجاد شده توسط جسم شکل خودتصویر را تغییر می دهد که از برهم نهی آن با توری سوم فریزهای ماره تشکیل می شوند. ویژگی بزرگنمایی فریزهای ماره به سادگی تغییرات کوچک در فاز نور هنگام رد شدن از جسم را آشکار می کند. برای اثبات کارآمد بودن این تکنیک از یک نمونه فازی به شکل پله دایره ای استفاده شد.

## پدیده خودتصویر با نور ناهمدوس

مبانی نظری پدیده خودتصویر با نور ناهمدوس در شکل ۱ نشان داده شده است. یک چشمه نور گسترده و ناهمدوس فضایی اما شبه تکفام به طول موج میانگین  $\lambda$  و اندازه  $S$  در فاصله  $Z_0$  از توری تراگسیلی  $G_1$  قرار دارد. در فاصله  $Z_1$  از توری اول توری متناوب دوم  $G_2$  به موازات آن قرار داده می شود. انتشار نور از چشمه به توری اول، از آنجا به توری دوم و سپس به فضای پس از توری دوم را با انتگرال پراش فرنل-کیرشهف و تاثیر هر توری بر میدان نوری را با تابع تراگسیل توری می توان توصیف کرد. این ساز و کار بطور کامل در مرجع [۵] تشریح و نشان داده شده اگر توری های اول و دوم از نوع مربعی (توری رانکی<sup>۷</sup>) با گامهای  $p_1$  و  $p_2$

بیشتر نمونه های زیستی (سلول، بافت)، سیالات و المانهای اپتیکی شفاف هستند. فاز نور در عبور از این اجسام، به دلیل ضریب شکست متفاوت آنها نسبت به محیط اطراف دچار تغییر می شود و از این رو به آنان اجسام فازی<sup>۱</sup> گفته می شود. سامانه های تصویربرداری رایج (چشم، دوربین، میکروسکوپ) تنها تغییرات شدت نور را ثبت می کنند و به تغییرات فاز حساس نیستند. از این رو ثبت تصویر با نمایانی کافی از اجسام فازی همواره چالش برانگیز بوده. برای حل این مشکل راه حل هایی همچون افزودن فاز ثابت به بخشی از نور و تبدیل تغییرات فاز به تغییرات شدت در روشهایی همچون میکروسکوپ تمایز فاز<sup>۲</sup> پیشنهاد شده است [۱].

پدیده خود تصویر با نور ناهمدوس (اثر لاوله<sup>۳</sup>) تا حدی شبیه به پدیده بیشتر شناخته شده خود تصویر با نور همدوس (اثر تالبوت<sup>۴</sup>) بوده و در هر دو نقش پراش فرنل یک آرایه با تابع تراگسیل تناوبی در فاصله های معینی از آن شبیه به خود توری می شود که از این رو به آن خودتصویر<sup>۵</sup> گفته می شود [۲]. این نقش به تغییرات راه نوری محیط بین جسم و خودتصویر بسیار حساس است و در تکنیک موسوم به انحراف سنجی ماره<sup>۶</sup> با برهم نهی خودتصویر و یک توری واقعی یک نقش ماره تشکیل داده شده که تغییرات فاز در محیط بین دو توری به شکل تغییر شکل فریزهای ماره مشاهده و اندازه گیری می شوند [۳]. پیشتر در همین گروه این روش در مد بازتابی برای به دست آوردن نمایه سطح به کار رفته است [۴]. در این مقاله از پدیده خودتصویر با نور ناهمدوس استفاده شده که در آن برای تشکیل خودتصویر به دو توری نیاز است. جسم آزمون پس از توری دوم قرار گرفته و در صفحه خودتصویر یک توری سوم مشابه توری

<sup>۵</sup> Self image

<sup>۶</sup> Moire deflectometry

<sup>۷</sup> Ronchi roling

<sup>۱</sup> Phase objects

<sup>۲</sup> Phase contrast microscopy

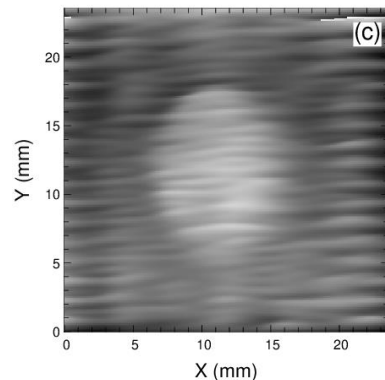
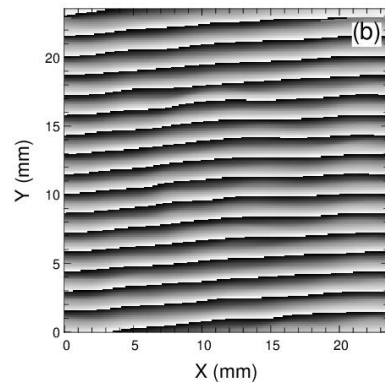
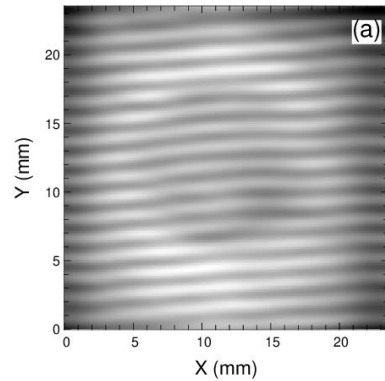
<sup>۳</sup> Lau effect

<sup>۴</sup> Talbot effect

$Z_2 = Z_1$  تشکیل می گردد. در این مقاله از چیدمان دوم استفاده شده است. اگر در محل خودتصویر یک توری  $G_3$  همانند توری اول قرار داده شود، از برهم نهی توزیع تابیدگی خودتصویر با این توری فریزهای ماره شکل خواهند گرفت که گام آنها بر حسب زاویه  $\theta$  بین خطوط خودتصویر و توری  $G_3$  با رابطه  $p = \frac{p_1}{2 \sin(\frac{\theta}{2})}$  داده می شود که برای زوایای کم بسیار بزرگتر از گام خودتصویر است. حال اگر یک جسم فازی در فضای بین دو توری  $G_2$  و  $G_3$  قرار گیرد، توزیع تابیدگی در خودتصویر تغییر خواهد کرد. این به نوبه خود به تغییر در فریزهای ماره می انجامد، و به دلیل ویژگی بزرگنمایی نقش ماره تغییرات کم در خودتصویر قابل آشکارسازی خواهند بود. استفاده از چشمه گسترده نور ناهمدوس فضایی باعث حساسیت بیشتر خودتصویر به تغییرات راه نوری در متغیر  $Z_2$  نسبت به روش مشابه انحراف سنجی ماره می گردد. با تحلیل تغییرات ثبت شده در نقش ماره در اثر وجود جسم فازی می توان نمایه دو بعدی تغییرات فاز (یا راه نوری) در جسم آزمون را به دست آورد.

### کارهای تجربی و نتایج آزمایش

در چیدمانی مانند شکل ۱ توریهای رانکی  $G_1$  و  $G_2$  به ترتیب با بسامدهای فضایی ۱۰ و ۲۰ خط بر میلیمتر با لایه نشانی فلز کروم در روی شیشه های تخت و سپس لیتوگرافی دقیق تهیه شدند. توری  $G_3$  همانند توری  $G_1$  است. همه توری ها روی قابهای چرخان با درجه بندی نصب می شوند. چشمه نور به کار رفته یک LED با توان یک وات و چگالی طیفی گاوسی شکل با طول موج مرکزی  $\lambda = 590 \text{ nm}$  و پهنای طیفی در حدود ۲۰ نانومتر است که در پشت یک صفحه شیشه ای مات قبل از توری اول قرار می گیرد. فاصله های  $Z_1$  و  $Z_2$  برابر هم و معادل با چندین



شکل ۲: نتایج تصویر برداری از یک پله فازی دایره شکل (a)؛ طرح ماره ثبت شده، (b) نقشه فاز پیچیده، (c) نقشه فاز بازگشایی شده.

باشند و  $Z_1$  مضرب درستی از طول  $L = \frac{p_1^2}{2\lambda}$ ، موسوم به فاصله لاه<sup>۱</sup> باشد، آنگاه در دو حالت توزیع تابیدگی در خودتصویر دارای همان گام توری اول اما با نمایه شدت مثلثی شکل در فاصله  $Z_2$  پس از توری  $G_2$  تشکیل خواهد شد: الف)  $p_2 = p_1$ ، که در این حالت  $Z_2 = \infty$  (خود تصویر لاه)، و ب)  $p_2 = 2p_1$ ، که خودتصویر در فاصله

<sup>۱</sup> Lau distance

می شود. نقشه فاز پیچیده که از فرایند انتقال فاز به دست آمده نیز در شکل ۲(b) دیده می شود. برای تعیین فاز به صورت یک تابع پیوسته لازم است نقشه فاز بازگشایی<sup>۱۱</sup> گردد [شکل ۲ (c)] که به معنی افزودن مضارب صحیح از  $2\pi$  در محل گسستگی های نقشه فاز پیچیده می باشد [۶]. در این نمودارها تیره گی و روشنی متناسب به مقدار متغیرهای نمایش داده شده هستند.

### نتیجه گیری

در این مقاله روشی برای تعیین نمایه فاز در اجسام شفاف با کمک پدیده خودتصویر با نور ناهمدوس معرفی و نتایج اندازه گیری ارائه شدند.

### مرجع ها

- J. Mertz, *Introduction to Optical Microscopy*, 2<sup>nd</sup> ed., ch. 10, Cambridge University Press, 2019.
- M. Mansuriput, *Classical Optics and its Applications*, ch. 18, Cambridge University Press, 2009.
- M. Thakur et al, "Surface profiling of a transparent object by use of phase-shifting Talbot interferometry", *Apl. Opt.*, Vol. 44, No. 13, pp. 2541-3545, 2005.
- Kh. Hassani, A. Nahal, N. Tirandazi, "Surface profilometry using the incoherent self-imaging technique in reflection mode", *J. Apl. Phys.*, Vol. 123, pp. 035302, 2018.
- D. Crespo et al., "Generalized grating imaging using an extended monochromatic light source", *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 17, No. 7, pp. 1231-1240, 2000.
- M. Servin, A. Quiroga, and J. M. Padilla, *Fring Pattern Analysis for Optical Metrology*, ch. 6, Wiley-VCH, 2014

فاصله لاوه تنظیم می شوند. برای تنظیم دقیق فاصله  $Z_2$  توری  $G_3$  روی یک جابجا گر دو محوری که می تواند در راستای محور نوری و عمود بر آن با گامهای  $0.01\text{ mm}$  و به اندازه  $25\text{ mm}$  حرکت کند نصب شده است. نخست هر سه توری تا جای ممکن هم خط و هم راستا می شوند. برای دیدن و ثبت نقشهای ماره از یک دوربین CCD که به رایانه وصل است و یک عدسی زوم با فاصله کانونی  $120\text{ mm}$  استفاده می شود. پس از مشاهده نقشهای ماره حاصل از برهم نهی خودتصویر با توری  $G_3$  میتوان تنظیم دقیق تر فاصله ها و راستای توری ها را انجام داد تا بهترین نمایانی در فریزهای ماره مشاهده گردد. سپس زاویه  $\theta$  روی مقدار مناسبی، مثلا  $20^\circ$  درجه تنظیم می شود. نمونه فازی با قرار دادن شیشه لامل دایره شکل استاندارد با ضخامت  $170\text{ }\mu\text{m}$  در روی لام میکروسکوپ درست شده اند. شکل ۲(a) یک نمونه از نقشهای ماره که با قرار دادن پله دایره ای در چیدمان به دست آمده است را نشان می دهد. برای به دست آوردن اختلاف فاز ناشی از پله از روش استاندارد جابجایی فاز<sup>۹</sup> استفاده می شود. گام توری های  $G_1$  و  $G_3$  همانطور که گفته شد برابر  $100\text{ }\mu\text{m}$  است. توری  $G_3$  در راستای عمود بر خطوط خود با گامهای  $20\text{ }\mu\text{m}$  جابجا شده و به این ترتیب چهار تصویر (علاوه بر تصویر اول) که هر یک نسبت به دیگری اختلاف فاز مکانی به اندازه  $\frac{\pi}{2}$  دارند ثبت می شوند. با استفاده از الگوریتم جابجایی فاز پنج گام [۴] می توان با استفاده از رابطه (۱) نقشه دوبعدی فاز را از روی پنج نقشه شدت حساب کرد [۶]:

$$\varphi = \tan^{-1} \left[ \frac{I_2 - I_4}{2I_3 - I_5 - I_1} \right] \quad (1)$$

که در آن  $I_n$  نقش شدت ثبت شده در گام  $n$  ام انتقال فاز است. این نقشه فاز به دلیل استفاده از تابع  $\tan^{-1}(\ )$  بین مقادیر صفر تا  $\pi$  تعریف شده که به آن فاز پیچیده<sup>۱۰</sup> گفته

<sup>۱۱</sup> Unrapped

<sup>۹</sup> Phase shifting

<sup>۱۰</sup> Wrapped phsase