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, javad.arefi@ut.ac.ir, srb.sahar@gmail.com

چکیده – تعیین نمایه تغییرات فاز در اجسام فازی که تغییر چندانی 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.

کلید واژه- 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 Sohmally Ave., 1439955961, Tehran, Iran

hassanikh@ut.ac.ir, javad.arefi@ut.ac.ir, 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

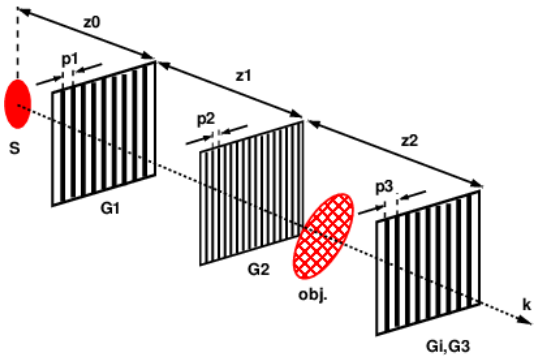
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

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

مقدمه

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[۱] گفته می شود. سامانه های تصویربرداری رایج (چشم، دوربین، میکروسکوپ) تنها تغییرت 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[۲] پیشنهاد شده است [۱].

پدیده خود تصویر با نور نا همدوس (اثر لاوه[۳]) تا حدی شبیه به پدیده بیشتر شناخته شده خود تصویر با نور همدوس (اثر تالبوت[۴]) 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[۵] 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[۶] 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



شکل1 : 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.

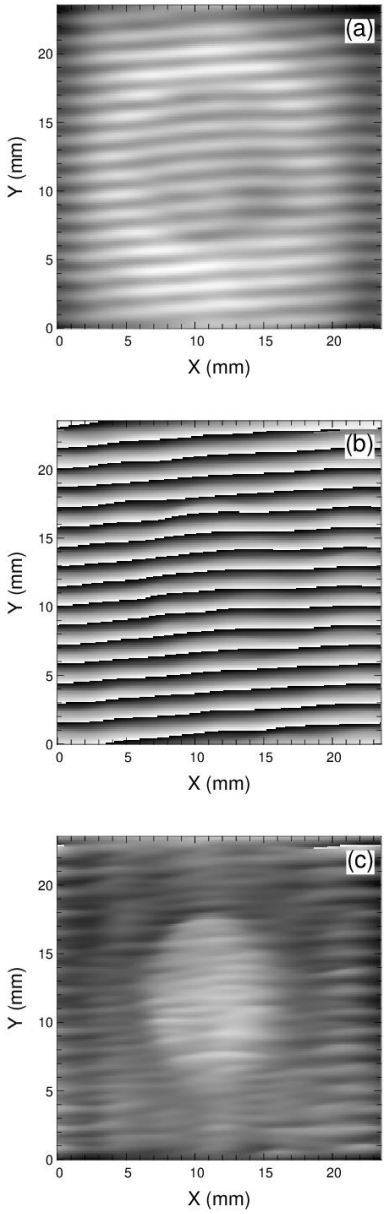
پدیده خودتصویر با نور ناهمدوس

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 λ 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[۷]) با گامهای p_1 و p_2

[۱] Phase objects
[۲] Phase contrast microscopy
[۳] Lau effect
[۴] Talbot effect
[۵] Self image
[۶] Moire deflectometry
[۷] Ronchi roling

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

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



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 لاوه[۸] 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 لاوه)، و ب) $p_2 = 2\,p_1$ ، که خودتصویر در فاصله $Z_2 = Z_1$ 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 θ بین خطوط خودتصویر و توری G_3 با رابطه $p = \frac{p_1}{2\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}$ 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 $\lambda = 590\ nm$ 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

[۸] Lau distance

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

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

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 $0.01\ mm$ و به اندازه $25\ mm$ 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 $120\ mm$ 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 θ روی مقدار مناسبی، مثلا ۲۰ درجه تنظیم می شود. نمونه فازی با قرار دادن شیشه لامل دایره شکل استاندارد با ضخامت $170\ \mu m$ 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[۹] استفاده می شود. گام توری های G_1 و G_3 همانطور که گفته شد برابر $100\ \mu m$ است. توری G_3 در راستای عمود بر خطوط خود با گامهای $20\ \mu m$ 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]:

$$\varphi = \tan^{-1}\left[\frac{I_2-I_4}{2I_3-I_5-I_1}\right] \quad (۱)$$

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 π تعریف شده که به آن فاز پیچیده[۱۰] گفته 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[۱۱] گردد [شکل ۲ (c)] که به معنی افزودن مضارب صحیح از 2π در محل گسستگی های نقشه فاز پیچیده می باشد [۶]. دراین 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.

مرجع‌ها

J. Mertz, *Introduction to Optical Microscopy*, 2nd ed., ch. 10, Cambridge University Press, 2019.

M. Mansuripur, *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

[۹] Phase shifting

[۱۰] Wrapped phsase

[۱۱] Unrapped

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

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