

## اندازه‌گیری تغییرات دمایی پلی‌متیل متا‌آکریلات با استفاده از روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال

- امیرمحمد بیگزاده<sup>1\*</sup>، محمدرضا رشیدیان وزیری<sup>2</sup>، فرهود ضیائی<sup>3</sup>، مهدی جانبازی روزبالی<sup>4</sup>
1. دکتری، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران
  2. استادیار، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای
  3. استاد، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران
  4. دکتری، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: 1397/11/08 تاریخ پذیرش: 1398/07/02

### Measuring Temperature Changes in PMMA by Using Digital Holographic Interferometry

A.M. Beigzadeh<sup>1\*</sup>, M.R. Rashidian Vaziri<sup>2</sup>, F. Ziaie<sup>3</sup>, M. Janbazi Roudbali<sup>4</sup>

1. Ph.D., Radiation Application Research School, Nuclear Science & Amp, Technology Research Institute, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science & Technology Research Institute Tehran, Iran
3. Professor, Radiation Application Research School, Nuclear Science & Technology Research Institute, Tehran, Iran
4. Ph.D., Radiation Application Research School, Nuclear Science & Amp; Technology Research Institute, Tehran, Iran

Received: 2019/01/28 Accepted: 2019/08/24

#### Abstract

Holographic interferometry is one of the accurate methods of measuring physical quantities such as stress, pressure, vibration, and temperature and refractive index changes especially in transparent solid materials. In this study, a digital Mach-Zehnder holographic interferometry setup was used to measure the induced temperature changes by infrared laser irradiation in a polyethylmethacrylate cell. The obtained results from the interferometric method were in good agreement with the results of the measurement by a temperature sensor.

#### Keywords

Interferometry, Holography, Infrared Laser, Optical Measuring Methods.

#### چکیده

تداخل‌سنجی تمام‌نگاری یکی از روش‌های دقیق مورد استفاده برای اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی نظیر تنش، فشار، ارتعاش، و تغییرات ضریب شکست و دما به ویژه در مواد جامد شفاف است. در این مطالعه، از یک چیدمان تجربی تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال ماخ-زندر برای اندازه‌گیری میزان تغییرات دمایی ایجاد شده در یک سلول پلی‌متیل متا‌آکریلات تحت تابش لیزر مادون قرمز استفاده شد. نتایج حاصل از روش تداخل‌سنجی توافق خوبی با نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری با حسگر دمایی داشت.

#### واژگان کلیدی

نانوسیم چند لایه، ضریب جذب، ضریب شکست، پتانسیل تحدید کوانتومی، برهمکنش اسپین-مدار.

\*Corresponding Author: [beigzadeh\\_am@yahoo.com](mailto:beigzadeh_am@yahoo.com)

\* نویسنده مسئول: امیرمحمد بیگزاده

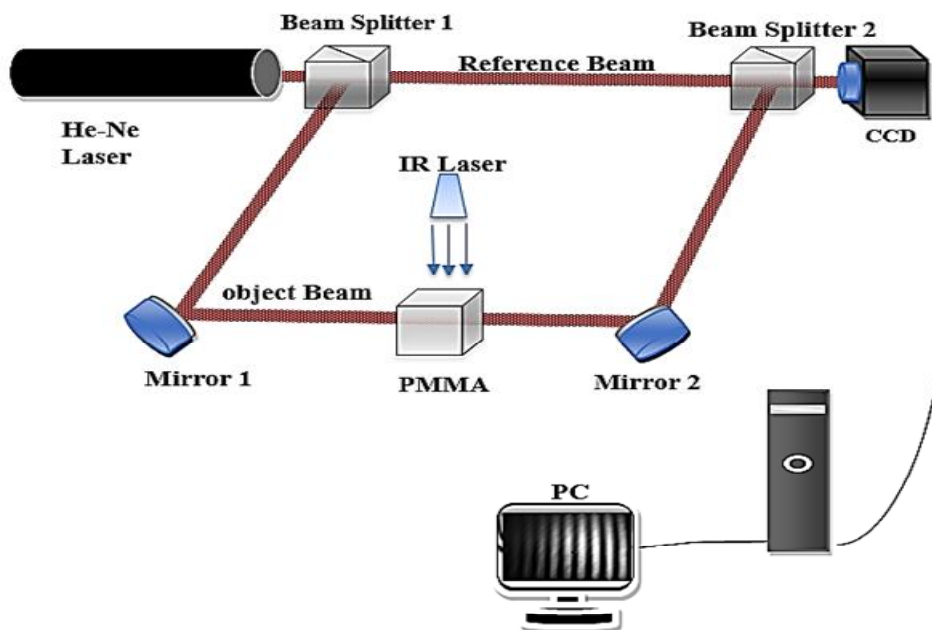
### مقدمه

تمام‌نگاری روشی برای ثبت سه بعدی جبهه موج‌های نوری از طریق سیستم‌های تصویربرداری است. دو نوع روش تمام‌نگاری به صورت کلاسیک و دیجیتال وجود دارد. تفاوت این دو در بخش ثبت جبهه موج نوری است که در روش اول بر روی فیلم‌های حساس به نور و در روش دوم بر روی دوربین‌های دیجیتال صورت می‌گیرد [1]. روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال برای اندازه‌گیری میزان تغییرات دمایی ایجاد شده ناشی از جذب تابش در مواد، ابتدا در سال 1970 توسط هاسمن [2 و 3] و سپس توسط میلر [4] به کار گرفته شد. آنها از روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری کلاسیک برای اندازه‌گیری تغییر محتوای انرژی ماده استفاده کردند. این کار با جایگزین شدن یک دایود نوری به

شد [6]. در این مطالعه با استفاده از روش تجربی تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال، میزان تغییرات دمایی ایجاد شده در پلیمر PMMA به سبب جذب تابش لیزر مادون قرمز اندازه‌گیری خواهد شد. اساس این روش بر پایه ردیابی یکی از نوارهای حاضر در طرح نوارهای تداخلی ایجاد شده توسط یک منبع تابشی از نوع لیزر مادون قرمز به ماده و تحلیل طیف استخراج شده است، از مزیت‌های این روش، غیر تماسی و غیر تزامنی بودن روش اندازه‌گیری را می‌توان بر شمرد.

### مواد و روش‌ها

از یک تداخل‌سنج ماخ زندر نشان داده شده در شکل 1، در کار تجربی استفاده شد. اساس عملکرد این نوع تداخل‌سنج



شکل 1. طرح چیدمان تجربی استفاده شده

در شکل 1، نشان داده شده است. در این چیدمان تداخل‌سنجی، ابتدا باریکه نوری پس از ورود به شکافنده باریکه به دو بخش تقسیم شده و در دو بازوی مختلف تداخل‌سنج انتشار می‌یابد.

جای فیلم حساس به نور توسط میلر و همکاران در سال 1975 [5] ادامه یافت. در سال 2017، با توجه به پیشرفت در فناوری دوربین‌های تصویربرداری، از سیستم تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال، به منظور اندازه‌گیری میزان تغییرات دمایی ناشی از جذب انرژی در ماده استفاده

$$n = n_0 + \frac{dn}{dT} DT \quad (1)$$

که در آن  $\frac{dn}{dT}$  ضریب نور گرمایی نمونه،  $DT$  تغییرات دمایی ایجاد شده و  $n_0$  ضریب شکست اولیه ماده است. تغییرات ضریب شکست باعث تغییر فاز باریکه لیزر هلیوم - نئون عبوری از داخل نمونه خواهد شد:

$$Dj = \frac{2pL}{l} \frac{dn}{dT} DT \quad (2)$$

که در آن  $l$  طول موج لیزر مورد استفاده در دستگاه تداخل‌سنج و  $L$  طول مسیر نوری است که باریکه شیئی در داخل نمونه طی می‌کند. جذب انرژی در ماده سبب جابه‌جا شدن طرح تداخلی ایجاد شده در دوربین می‌شود. اگر تعداد نوارهای تداخلی جابه‌جا شده بر اثر اعمال گرما به نمونه جاذب را  $Dm$  فرض کنیم، در این صورت رابطه نهایی میزان تغییرات دمایی  $DT$  ایجاد شده در نمونه مورد بررسی با  $Dm$  با معادله 3 بیان می‌شود.

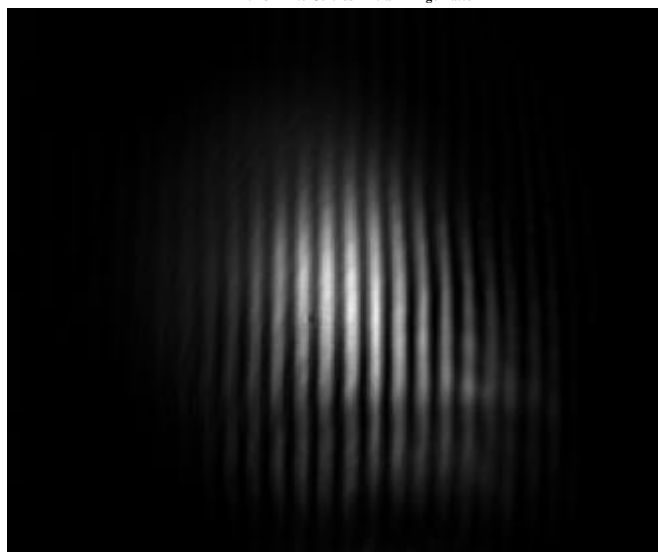
$$DT = \frac{l Dm}{L} \frac{dn}{dT} \quad (3)$$

ضریب نور گرمایی PMMA برابر با  $4 \times 10^{-4}$   $\frac{dn}{dT}$  است. این رابطه با در نظر گرفتن این نکته نوشته شده است که نوارهای تداخلی روشن و تاریک مکان هندسی نقاطی هستند که در آنها اختلاف فاز به ترتیب ضرایب زوج و فردی از  $\pi$  رادیان باشد. نمایی از طرح نوارهای تداخلی ثبت شده توسط چیدمان شکل 1، در شکل 2 نشان داده شده است.

از یک لیزر هلیوم - نئون (طول موج 632,8 نانومتر)، با توان 5 میلی‌وات مدل Melles Griot 098DPP به عنوان منبع نور همدوس تداخل‌سنج استفاده شد. این نوع تداخل‌سنج با بهره‌گیری از دو بازوی مرجع و شیئی عمل می‌کند. جبهه موج بازوی مرجع ( $E_1$ ) پس از عبور از قطعات به سمت دوربین هدایت شده و جبهه موج بازوی شیئی ( $E_2$ ) پس از عبور از جسم مورد بررسی و تحت بار (تنش)، کرنش، ارتعاش، گرما و...) به دوربین رسیده و پس از ترکیب با جبهه موج مرجع یک طرح تداخلی قابل ثبت به صورت طرح شدت (I) در رایانه را ایجاد خواهد کرد. دوربین مورد استفاده با مدل DMK 23G445، ساخت کشور آلمان، با قدرت تفکیک 1280×960 و اندازه پیکسل 3,75 میکرومتر بوده است. در این کار، از یک سلول مکعبی شکل از جنس پلی - متیل - متا - آکریلات و ابعاد 1×1 سانتیمتر به عنوان جسم استفاده شد. این مکعب ابتدا با استفاده از دستگاه لیزری و با دقت بالا از قطعه مادر بزرگ‌تر برش داده شد؛ سپس این مکعب پلیمری با استفاده از الکل به دقت تمیز شد تا هیچ‌گونه اثر چربی و آلودگی بر روی آن باقی نماند. در نهایت مکعب آماده شده به عنوان جسم مورد نظر برای بررسی اثر گرمایش لیزر مادون قرمز در چیدمان قرار داده شد. در این چیدمان حسگر دماسنج دیجیتال مماس بر بدنه مکعب قرار داده شد تا تغییرات دمایی آن به صورت بر خط اندازه‌گیری شود.

برای درک چگونگی شکل‌گیری طرح نوارهای تداخلی، در روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال، ابتدا باید روابط فیزیکی مربوط به انتشار نور، تغییر فاز جبهه موج لیزری و تداخل امواج و ارتباط بین روابط گرمایی و نوری را برای شرایط مورد استفاده در این روش بررسی کرد که به طور مفصل در کارهای قبلی [6] و [7] شرح داده شده است. به طور خلاصه، با گرم شدن نمونه، ضریب شکست آن مطابق با رابطه زیر تغییر خواهد کرد:

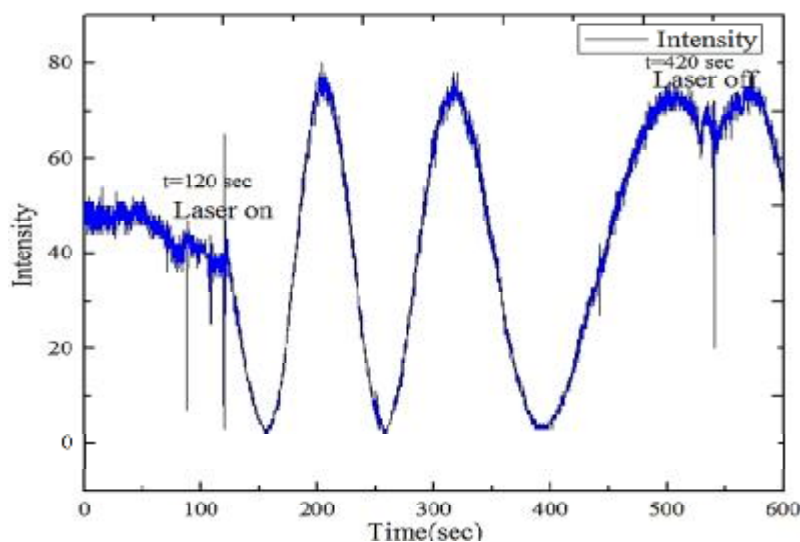
PMMA 1 cm3 22.8 Celcius-Initial Fringe Pattern



شکل 2. طرح نوار تداخلی برای مکعب پلیمری روی دوربین

اندازه‌گیری شد. پس از 2 دقیقه، لیزر مادون قرمز روشن شده و شروع به تابش بر جسم از وجه بالا و عمود بر جهت عبور لیزر هلیوم- نئون (مطابق با شکل 1) کرد. برای کاهش اثر لیزر مادون قرمز در تغییر ابعاد مکعب پلیمری، هرچند ناچیز، باریکه لیزر به صورت مستقیم و بدون باز

گرمایش نمونه PMMA با استفاده از یک لیزر مادون قرمز 980 نانومتر موج پیوسته با توان 200 میلی‌وات انجام شد. برای اندازه‌گیری هم‌زمان دما، از یک دماسنج دیجیتال با دقت 0,1 درجه سلسیوس مدل SAMWON استفاده شد. دمای اولیه پلی‌متیل متا‌آکریلات 22 درجه سلسیوس



شکل 3. نمودار تغییرات شدت بر حسب زمان برای PMMA تحت تابش لیزر مادون قرمز

نوارهای تداخلی مورد استفاده در این کار بیشتر از  $3 \times 3$  انتخاب نشده است.

از الگوریتم هوشمند نوشته شده در محیط نرم‌افزار برنامه MATLAB، برای ردیابی جابه‌جایی طرح تداخلی استفاده شد، این الگوریتم مشتمل بر بخش‌های حذف نوفه و ارتقای کیفیت تصاویر ثبت شده روی دوربین نیز بود.

برای به دست آوردن مقدار  $D_m$ ، تعداد کمینه‌های عبوری از روی موقعیت ناحیه  $3 \times 3$  در نظر گرفته شد. دمای اولیه مکعب PMMA مورد استفاده، 22 درجه سلسیوس بود. دمای نهایی سلول آن پس از خاموش کردن لیزر مادون‌قرمز، با استفاده از دماسنج دیجیتال اندازه‌گیری شد تا با مقدار به دست آمده از رابطه 3 مقایسه شود. آزمایش‌ها ده مرتبه تکرار شده‌اند تا مقادیر دقیق تغییرات دمایی قابل استخراج باشند.

مقدار  $D_m$ ، طبق نمودار به دست آمده حدود 2,8 است. اختلاف دمای استخراج شده از روی نمودار شکل 3 با استفاده از رابطه 1 حدود 0,44 درجه سلسیوس است که این میزان با استفاده از ترمیستور حدود 0,5 درجه سلسیوس اندازه‌گیری شد. نتایج نشان‌دهنده هم‌خوانی مطلوب بین نتایج حاصل از چیدمان تمام‌نگاری دیجیتال با نتایج به دست آمده از دماسنج است.

### بحث و نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده در این کار نشان‌دهنده آن است که سیستم تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال می‌تواند ابزار مناسبی برای اندازه‌گیری غیرتماسی و غیرمخرب تغییر دمایی ایجاد شده در سلول‌های پلیمری شفاف بر اثر جذب پرتو باشد. برخلاف دماسنج‌های دیجیتال معمولی که برای اندازه‌گیری تغییر دما استفاده می‌شوند و حسگر آنها باید در تماس مستقیم با ماده باشد، غیرتماسی بودن روش تداخل‌سنجی تمام‌نگاری دیجیتال برخلاف، دماسنج‌های معمول که توزیع میدان دمایی را در درون ماده جاذب تحت تأثیر قرار می‌دهند و اندازه‌گیری را با خطا مواجه می‌سازند، بسیار سودمند خواهد بود.

کردن توسط عدسی و یا موازی ساز به مکعب تابانده شد. بدین طریق و با توجه به قطر کوچک باریکه لیزری، حدود 1 میلی‌متر، می‌توان از اثر آن در تغییر ابعاد حجمی نمونه صرف نظر کرد. پس از گذشت 9 دقیقه، لیزر خاموش و به سیستم اجازه داده شد که به تدریج به دمای اتاق بازگردد (کل زمان تابش لیزر 7 دقیقه). کل مدت زمان آزمایش، 23 دقیقه و چهل ثانیه بود. طرح نوارهای تداخلی اولیه در شکل 3 و تغییرات شدت طرح نوارهای تداخلی با گذشت زمان و سرد شدن تدریجی سیستم در شکل 3 نشان داده شده‌اند. برای محاسبه تغییرات دمایی، از رابطه 3 استفاده شد.

### نتایج

شدت میانگین یک ناحیه  $3 \times 3$  از پیکسل‌های دوربین با گذشت زمان و سرد شدن تدریجی سیستم در شکل 3، نشان داده شده است. اندازه‌گیری شدت میانگین با هدف کاهش خطا در اندازه‌گیری شدت انجام شد؛ به همین منظور، در محیط MATLAB کدی نوشته شد تا شدت میانگین را اندازه‌گیری کند. برای تشخیص حرکت طرح نوارهای تداخلی، می‌توان نقطه‌ای را روی یکی از نوارهای تداخلی روشن و یا تاریک انتخاب کرده و تغییرات شدتی آن را برحسب زمان رسم کرد. با این وجود اتکا به داده‌های مربوط به یک پیکسل، در تصاویر طرح نوارهای تداخلی ارسالی توسط دوربین، به علت آنکه این نقطه می‌تواند آلوده به نوفه، نظیر نوفه مربوط به ارتعاش سیستم تداخل‌سنجی باشد، چندان مطمئن نیست و خطای اندازه‌گیری را افزایش می‌دهد؛ به همین دلیل و برای کاهش خطا، به جای اتکا به داده‌های مربوط به یک تک پیکسل، یک همسایگی  $3 \times 3$  در اطراف این پیکسل انتخاب شده و با میانگین‌گیری داده‌ها سعی شده است تا اثر نوفه کاهش یابد. با انتخاب همسایگی‌های بزرگ‌تر از  $3 \times 3$  می‌توان مقدار خطا را به شکل مطمئن‌تری کاهش داد؛ اما با افزایش همسایگی، ماتریس پیکسل‌ها از ابعاد طرح نوار تداخلی روشن‌گزی‌شده فزونی می‌یابد؛ به این دلیل حد همسایگی برای طرح

### References

- [1] Goodman JW, Lawrence RW. Digital image formation from electronically detected holograms. *Applied physics letters*. 1967 Aug 1;11(3):77-9.
- [2] Hussmann EK. A holographic interferometer for measuring radiation energy deposition profiles in transparent liquids. *Applied optics*. 1971 Jan 1; 10(1):182-6.
- [3] Hussmann EK, McLaughlin WL. Dose-distribution measurement of high-intensity pulsed radiation by means of holographic interferometry. *Radiation research*. 1971 Jul 1; 47(1):1-4.
- [4] Miller A. Holography and interferometry in dosimetry. *Nukleonika*. 1979; 24(9):907-25.
- [5] Miller A, Hussmann EK, McLaughlin WL. Interferometer for measuring fast changes of refractive index and temperature in transparent liquids. *Review of Scientific instruments*. 1975 Dec; 46(12):1635-8.
- [6] Beigzadeh AM, Vaziri MR, Ziaie F. Modelling of a holographic interferometry based calorimeter for radiation dosimetry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2017 Aug 21;864:40-9.
- [7] Beigzadeh AM, Vaziri MR, Ziaie F, Soltani Z. Double-exposure holographic interferometry for radiation dosimetry: A new developed model. *Radiation Measurements*. 2018 Dec 1; 119:132-9.