بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

اندازه‌گیری ضخامت تیغه شیشه‌ای با استفاده از تمام‌نگاری دیجیتالی محوری

مجید پناهی و احمد درودی

گروه فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان

***majidpanahi@znu.ac.ir**

چکیده - تمام‌نگاری رو شی برای ثبت و باز سازی همزمان دامنه و فاز جبهه‌موج ا ست و برای تعیین دقیق و کارآمد نمایه جبهه موج بسیار مناسب است. تمام‌نگاری دیجیتالی محوری به دلیل چیدمان ساده ابزاری ارزشمند برای اندازه‌گیری‌های مختلف است. در این مقاله با استفاده از تمام‌نگاری دیجیتالی ضخامت یک تیغه شیشه‌ای شفاف اندازه‌گیری شده است. در این بررسی نشان می‌دهیم که از ابیراهی ناکانونی که قرارگیری یک تیغه شیشه‌ای در مسیر جبهه‌موج ایجاد می‌کند، می‌توان جهت اندازه‌گیری ضخامت تیغه شیشه‌ای با دقت بالا بهره برد. همچنین انحراف ضخامت توسط ضریب شکست اندازه‌گیری شده است.

کلید واژه- تمام‌نگاری محوری، تمام‌نگاشت، تیغه شیشه‌ای، جبهه‌موج، ضخامت.

Thickness Measurement of the Glass Plate by In-Line Digital Holography

Majid Panahi and Ahmad Darudi

Department of Physics, University of Zanjan, Zanjan.

Emails: majidpanahi@znu.ac.ir

Abstract- Holography is a method to record and reconstruct the amplitude and the phase of a wavefront concurrently and is ideally suited for accurate and efficient determination of the wavefront profile. In-line digital holography is a valuable tool for various measurements due to its simple configuration. In this paper, the thickness of a glass plate is measured using the in-line digital holography. We show that defocus aberration, created by the placement of a glass plate in the path of the wavefront, can be used to measure the thickness of the glass plate with high accuracy. Also, the thickness deviation is measured by the refractive index.

Keywords: Hologram, In-line digital holography, Glass Plate, Thickness, Wavefront.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

تیغه‌های شیشه‌ای شفاف به دلیل استفاده فراوان در بخش-های مختلف به صورت انبوه تولید می‌شوند. با افزایش تقاضا و به منظور کاهش هزینه‌ها، تقاضا برای اندازه‌گیری دقیق خواص آن‌ها مانند ضخامت، ضریب شکست و صافی نیز افزایش می‌یابد. روش‌های زیادی برای اندازه‌گیری ضخامت مطلق یک تیغه شفاف توسعه داده شده است. یکی از این رویکردها، استفاده از تداخل‌سنج‌های نور سفید است. در این روش به دلیل افزایش طول همبستگی دو پرتو تداخلی، وضوح اندازه‌گیری کاهش می‌یابد. تداخل‌سنجی تنظیم طول موج (تداخل‌سنج برشی جانبی) و ترکیب تداخل سنجی با میکروسکوپ کانفوکال یکی دیگر از روش‌های اندازه‌گیری ضریب شکست یک تیغه شیشه‌ای است [۱]. تمام‌نگاری دیجیتالی اگرچه یک روش مبتنی بر تداخل-سنجی است، اما به دلیل چیدمان ساده‌تر و همچنین دقت اندازه‌گیری یک روش ارزشمند برای اندازه‌گیری ضخامت و ضریب شکست یک تیغه شیشه‌ای است.

تمام‌نگاری دیجیتالی

بازسازی فاز و همچنین شدت موج نوری با استفاده از تمام-نگاری در روش‌های اندازه‌شناسی و پردازش نوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. دنیس گابور برای اولین بار ایده استفاده از تمام‌نگاری را در سال ۱۹۴۸ ارائه کرد که به عنوان تمام‌نگاری کلاسیک شناخته می‌شود. در این روش، موج شیئی که موج پراکنده شده از جسم است با یک موج پس زمینه همدوس که موج مرجع نامیده می‌شود تداخل کرده و طرح تداخلی آن در یک فیلم حساس به نور ثبت می‌شود و پس از ظهور فیلم با روشن کردن تمام‌نگاشت ثبت شده موج شیئی بازسازی می‌شود [۲]. تمام‌نگاری دیجیتالی به عنوان نسل جدید روش تمام‌نگاری، به معنای ثبت تمام-نگاشت‌های نوری به صورت دیجیتال با استفاده از یک CCD و بازسازی عددی آن‌ها است [۳].

به طور کلی تمام‌نگاشت‌های دیجیتال را می‌توان با پیکربندی‌های خارج محور و محوری ثبت کرد. در تمام-نگاری دیجیتالی محوری، تداخل بین نور پراش‌شده از جسم و نور منبع (موج مرجع) توسط CCD ثبت می‌شود و تمام-نگاشت را تشکیل می‌دهد [۳و۴]. تمام‌نگاری دیجیتالی محوری روشی دقیق برای به دست آوردن موقعیت مکانی اجسام است.

در فرایندهای شبیه‌سازی و بازسازی تمام‌نگاشت‌های دیجیتال از تبدیلات فوریه سریع (FFT) استفاده می‌شود. تمام‌نگاشت دیجیتالی ثبت شده با امواج تخت، با انتشار مجدد به صفحه جسم بر اساس فرمول پراش فرنل-کیرشهوف بازسازی می‌شود [۵]:

$$U(x,y)=\frac{i}{\lambda}\iint H_0(X,Y)\frac{\exp(-ik\left|\vec{r}-\vec{R}\right|)}{\left|\vec{r}-\vec{R}\right|}\,dXdY \quad (۱)$$

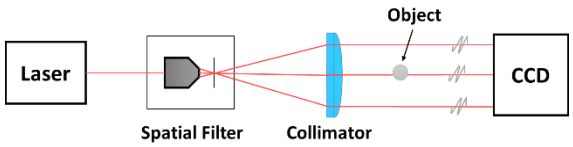
که در آن (x,y) مختصات صفحه شیئی، (X,Y) مختصات صفحه آشکار ساز، $H_0(X,Y)$ تابع عبور تمام‌نگاشت و $\left|\vec{r}-\vec{R}\right|=\sqrt{(x-X)^2+(y-Y)^2+z^2}$ است که z فاصله تا صفحه مشاهده است.

چیدمان آزمایش و نتایج تجربی

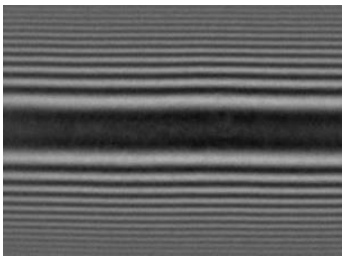
چیدمان مورد استفاده برای ثبت تمام‌نگاشت‌ها به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. منبع نور یک لیزر هلیوم نئون با طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر است. تمام-نگارها با استفاده از یک دوربین CCD با وضوح ۲۵۹۲ × ۳۸۸۸ پیکسل و اندازه پیکسل ۵/۷ میکرومتر ثبت می‌شوند. با قرار دادن یک جسم (سیم نازک) در مسیر نور موازی، موج پراش‌شده توسط سیم و موج پراش نشده بر روی

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

دوربین تداخل کرده و یک تمام‌نگاشت دیجیتال ایجاد می‌شود. به منظور کاهش اثر نوفه‌ها در موج مرجع، دو تمام‌نگاشت یکی در حضور جسم و دیگری بدون آن ثبت می‌شود و سپس از تفاوت آن‌ها برای بازسازی تمام‌نگاشت استفاده می‌شود. شکل ۲ تمام‌نگاشت دیجیتالی تصحیح‌شده را نشان می‌دهد.

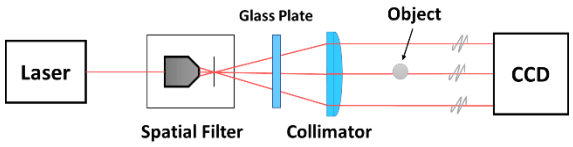


شکل ۱: چیدمان آزمایش برای ثبت تمام نگار دیجیتال.



شکل ۲: تمام‌نگاشت دیجیتالی اصلاح شده.

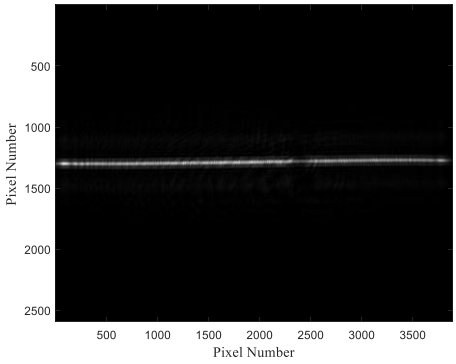
به منظور اندازه‌گیری ضخامت تیغه شیشه‌ای، مطابق با شکل ۳ یک تیغه شیشه‌ای با ضریب شکست مشخص بین منبع نقطه‌ای و عدسی موازی‌کننده قرار می‌گیرد و یک تمام‌نگاشت ثبت می‌شود.



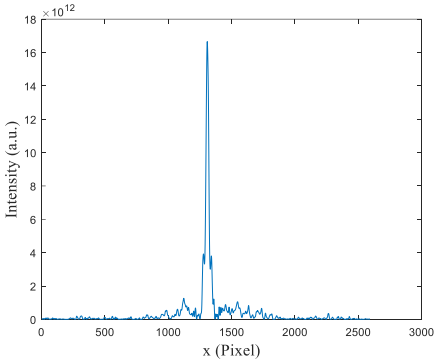
شکل ۳: چیدمان آزمایش برای ثبت تمام‌نگاشت دیجیتال در حضور نمونه

تمام‌نگاشت‌های ثبت‌شده با و بدون صفحه شیشه‌ای در چندین موقعیت z بازسازی می‌شوند. تصویر بازسازی‌شده با واضح‌ترین نمایه شدت جسم به عنوان بهترین تصویر از جسم استفاده می‌شود. در شکل ۴ و ۵ به ترتیب تمام‌نگاشت بازسازی شده در بهترین موقعیت z و نمایه تصویر بازسازی شده نشان داده شده است.

موقعیت جسم نسبت به صفحه تصویر (تمام‌نگاشت ثبت شده)، در حضور تیغه شیشه‌ای و در غیاب تیغه شیشه‌ای متفاوت خواهد بود و این به دلیل جابجایی طولی چشمه مجازی خواهد بود.



شکل ۴: تمام‌نگاشت بازسازی‌شده در بهترین موقعیت مکانی z.



شکل ۵: نمایه تصویر بازسازی شده.

طبق قانون اسنل، جابجایی طولی چشمه مجازی (Δz) که با قرار گرفتن تیغه شیشه‌ای در مسیر پرتو ایجاد می‌شود عبارت است از:

$$\Delta z = d(1-\frac{1}{n}) \qquad (۲)$$

که در آن d ضخامت تیغه شیشه‌ای و n ضریب شکست آن است. هنگامی که یک تیغه شیشه‌ای در مسیر یک پرتو واگرا قرار می‌گیرد، یک ابیراهی ناکانونی ایجاد می‌شود [۶]، و مقدار آن به صورت زیر خواهد بود:

$$\Delta w = \frac{\Delta z(D^2)}{2f^2} \qquad (۳)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

که در آن D قطر تمام‌نگار و f فاصله کانونی عدسی موازی‌ساز است.

چناچه بیان شد با حضور تیغه شیشه‌ای در مسیر پرتو، موقعیت جسم نسبت به صفحه تمام‌نگاشت پس از بازسازی تمام‌نگاشت متفاوت خواهد بود. این تفاوت در واقع به دلیل ابیراهی ناکانونی است که با حضور تیغه شیشه‌ای در مسیر پرتوی واگرا ایجاد می‌شود. مقدار ابیراهی ناکانونی را می‌توان از تغییر موقعیت جسم ناشی از قرار گیری تیغه شیشه‌ای به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\Delta w = \frac{D^2}{2}\left(\frac{1}{z_1}-\frac{1}{z_2}\right) \qquad (۴)$$

که در آن z_1 موقعیت بازسازی شده جسم نسبت به صفحه تمام‌نگاشت بدون حضور تیغه شیشه‌ای و z_2 موقعیت بازسازی شده جسم در حضور تیغه شیشه‌ای است.

بنابراین، تغییر طولی Δz با استفاده از معادله (۳) و (۴) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta z = f^2\left(\frac{1}{z_1}-\frac{1}{z_2}\right) \qquad (۵)$$

موقعیت جسم نسبت به صفحه تمام‌نگاشت، در حضور تیغه شیشه‌ای $z_1 = 1038.3 \pm 0.1\ mm$ و در غیاب تیغه شیشه‌ای $z_2 = 1042.5 \pm 0.1\ mm$ به دست می‌آید. با قرار دادن z_1، z_2 و $f = 350\ mm$ در رابطه (۵)، تغییر طول $\Delta z = 0.475 \pm 0.002\ mm$ برای تیغه شیشه‌ای به دست می‌آید.

ضریب شکست تیغه شیشه‌ای مورد استفاده در این آزمایش توسط شرکت سازنده n=۱،۵۰۵±۰،۰۰۲ بیان شده است. با قرار دادن Δz و n در رابطه (۲)، ضخامت تیغه شیشه‌ای $n = 1.416 \pm 0.002\ mm$ به دست می‌آید.

نتیجه‌گیری

در این مقاله روش تمام‌نگاری دیجیتالی محوری برای اندازه-گیری ضخامت یک تیغه شیشه‌ای استفاده شد. با توجه به نتایج حاصل از اندازه‌گیری، نتایج تجربی ضخامت یک تیغه شیشه‌ای با استفاده از روش پیشنهادی با آنچه اعلام شده است، مطابقت دارد. در اندازه‌گیری به روش تمام‌نگاری محوری دقت اندازه‌گیری ضخامت ۰/۰۰۲ میلیمتر به دست آمده است. با توجه به تطابق نتایج می‌توان این روش را روشی مفید برای اندازه‌گیری ضخامت یک تیغه شیشه‌ای دانست. قابل ذکر است با استفاده از این روش می‌توان یک توزیع اندازه‌گیری ضخامت از کل یک تیغه شفاف را بررسی کرد.

مرجع‌ها

[۱] Y. Kim, Hibino, K. Sugita, M. Mitsuishi, "Optical thickness measurement of mask blank glass plate by the excess fraction method using a wavelength-tuning interferometer", *Optics and Lasers in Engineering*, ۵۱(۱۰), pp. ۱۱۷۳-۱۱۷۸, ۲۰۱۳.

[۲] D. Gabor, "Apparatus for producing images of small objects by photographic means", *Patent*, ۱۹٤۷.

[۳] U. Schnars, and W. Jüptner, "Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction", *Applied optics*, ۳۳(۲), pp. ۱۷۹-۱۸۱, ۱۹۹۴.

[٤] [۱] Xu, Wenbo, M. H. Jericho, I. A. Meinertzhagen, and H. J. Kreuzer, "Digital in-line holography for biological applications", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, no. ۲۰, ۲۰۰۱.

[۵] Latychevskaia, T. and H.-W. Fink, "Practical algorithms for simulation and reconstruction of digital in-line holograms", *Applied optics*, ٥٤(۹), pp. ۲٤۲٤-۲٤۳٤, ۲۰۱۵.

[٦] J. C. Wyant, and K. Creath, "Basic wavefront aberration theory for optical metrology", *Applied optics and optical engineering*, no. ۱۱, part ۲, ۱۹۹۲.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]