بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

اندازه‌گیری گرادیان دما در مایعات با استفاده از انحراف سنجی ماره

احد صابر[۱]، سمیرا رضایی[۱]، سحر گل‌محمدی[۱]

۱- دانشکده علوم پایه، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، کد پستی ۵۶۱۹۹-۱۱۳۶۷

در این مقاله روشی برای اندازه‌گیری گرادیان دما در مایعات شفاف ارائه شده است که بر اساس انحراف سنجی ماره کار می‌کند. اساس کار به این صورت است که مخزنی حاوی مایع روی یک جسم سرد که دمای آن ثابت و برابر T_0 است، قرار داده می‌شود تا سطح تحتانی مایع با جسم هم‌دما شود. سطح فوقانی مایع نیز با محیط هم‌دما است. با گذشت زمان دمای نقاط مختلف داخل مخزن تغییر می‌کند و در نهایت گرادیان دمای ثابت در داخل مخزن ایجاد می‌شود. گرادیان دما باعث ایجاد گرادیان ضریب شکست در طول مخزن می‌گردد که باعث انحراف فریزهای ماره می‌شود. فریزهای ماره که توسط دوربین ثبت می‌شوند، با استفاده از روش تبدیل فوریه تحلیل می‌شوند و از روی مقدار انحراف آنها، توزیع ضریب شکست و در نتیجه توزیع دما در طول مخزن محاسبه می‌گردد.

کلید واژه- انحراف‌سنجی ماره ، تحلیل فریزها، گرادیان دما.

Measuring the temperature gradient in liquids using moiré deflectometry

Ahad Saber, Samira Rezaei, Sahar Golmohamadi

Department of Basic Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, 56199-11367, Iran.

In this paper a new method for measuring the temperature gradient in liquids is introduced which is based on moiré deflectometry. A cell containing liquid is placed on top of a cold plate with temperature T_0 so that the bottom of liquid gets same temperature with the plate. The top of liquid is also isothermal with the environment. The temperature of different points inside the cell is varied with time until getting a stable temperature distribution. The temperature gradient causes a diffraction index gradient that makes the moiré fringes to deflect. The moiré fringes are recorded using a camera and is analyzed using Fourier transforming method. The deflection of moiré fringes is used to get the refractive index distribution inside the cell and then the temperature distribution is derived.

Keywords: Fringe analyzing, Moiré deflectometry, Temperature gradient.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

مطالعه گرادیان دما در سطح اجسام جامد در تماس با محیط‌های مایع اهمیت فراوانی در مطالعه پدیده‌هایی مانند انتقال گرما، حرکت آرام و متلاطم شاره‌ها، رشد بلورها و پخش گرمایی دارد. روش‌هایی که برای اندازه‌گیری دما و گرادیان دما وجود دارند، شامل روش‌های تماسی مانند ترموکوپل‌ها و دماسنج‌های الکتریکی و روش‌های غیر تماسی مانند روش‌های تصویربرداری، روش‌های اپتیکی و دماسنجی فروسرخ است [۵-۱]. در استفاده از روش‌های تماسی امکان تغییر پارامترهای فیزیکی نمونه مورد مطالعه بواسطه تماس دماسنج وجود دارد. همچنین بدست آوردن اطلاعات دقیق از توزیع فضایی دما زمانبر و در برخی موارد غیر ممکن است. بعلاوه بدست آوردن اطلاعات دمایی وقتی که تحول زمانی دما هم وجود دارد، برای همه نقاط شاره غیر ممکن است. به همین دلیل این روش‌ها بیشتر برای اندازه‌گیری مقدار مطلق دما مناسب هستند. از طرف دیگر روش‌های اپتیکی، مزایای زیادی از جمله دقت اندازه‌گیری بالا، تکرارپذیری و غیر مخرب بودن دارند. استفاده از این روش‌ها بیشتر برای بدست آوردن تغییرات دمایی و توزیع فضایی دما در محیط‌های شفاف مناسب است. انواع مختلف روش‌های تداخل سنجی اپتیکی و همچنین روش طیف سنجی و استفاده از دماسنج‌های تابش فروسرخ برای اندازه‌گیری گرادیان دما بکار برده شده‌اند [۱، ۴- ۵]. در روش‌های اپتیکی برای اندازه‌گیری گرادیان دما، نمایه ضریب شکست در ماده اندازه‌گیری می‌شود و از روی آن نمایه دما بدست می‌آید.

در این مقاله ما روشی برای اندازه‌گیری گرادیان دما در مایعات نورگذر ارائه می‌کنیم که بر اساس انحراف سنجی ماره است و علاوه بر دارا بودن مزیت‌های دیگر روش‌های اپتیکی، کاربری راحت و حساسیت پایین به ارتعاشات محیط نیز جزء مزایای آن محسوب می‌شود. از روش انحراف‌سنجی ماره قبلا برای اندازه‌گیری گرادیان دما در هوا استفاده شده است [۶، ۷]. همچنین شفیعی و همکاران برای اندازه‌گیری هدایت گرمایی سیالات از روش انحراف سنجی ماره استفاده کرده‌اند [۸]. بر خلاف کار ذکر شده که دمای صفحه حرارتی با زمان تغییر می‌کند، در این کار به کمک سیستم خنک کننده و الکترونیکی مناسب سطح پایین مخزن در دمای ثابت نگه داشته شده است تا تحول زمانی دما فقط در مایع اتفاق بیفتد که در پژوهش‌های کاربردی همانند بررسی اثر سره مهم است.

۲- انحراف‌سنجی ماره

نور در محیط‌های با گرادیان ضریب شکست منحرف می‌شود و مسیر حرکت آن طبق معادله مسیر بدست می‌آید:

$$\frac{d}{ds}\left(n(x,y,z)\frac{dr}{ds}\right)=\nabla n(x,y,z) \qquad (۱)$$

اگر گرادیان دما و در نتیجه گرادیان ضریب شکست در راستای محور zها باشد، آنگاه ضریب شکست فقط تابعی از z خواهد بود و با فرض اینکه راستای انتشار اولیه نور در جهت محور y باشد، آنگاه برای انحراف‌های کوچک نور می‌توان از تقریب $ds\cong dy$ استفاده کرد، در نتیجه رابطه (۱) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{d}{dy}\left(n(z)\frac{dz}{dy}\right)=\frac{dn(z)}{dz} \qquad (۲)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه (۲) نسبت به y به عبارت زیر خواهیم رسید.

$$\theta(y)=\frac{L}{n(z_0)}\frac{dn(z)}{dz} \qquad (۳)$$

که L طول مخزن حاوی مایع در راستای انتشار نور و z_0 نقطه فرود نور است. در اینجا ما برای اندازه‌گیری زاویه انحراف نور $\theta(y)$، از انحراف‌سنجی ماره استفاده می‌کنیم. برای اینکار فرض کنید که دو توری با گام یکسان d در فاصله t از همدیگر قرار طوری گرفته باشند، که خطوط‌شان نسبت به هم زاویه کوچک α داشته باشند. در این صورت فریزهای ماره با گام d_m تشکیل خواهند داد:

$$d_m=\frac{d}{\alpha} \qquad (۴)$$

دلیل تشکیل این فریزها قرار گرفتن خودتصویر توری اول روی توری دوم است. خود تصویر یک توری در فواصل تالبوت از آن تشکیل می‌شود که برای نور فرودی با طول موج λ به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$t_n=2n\frac{d^2}{\lambda} \qquad (۵)$$

که n شماره تالبوت مورد نظر هست. حال فرض کنید که نور فرودی بر توری اول به اندازه θ منحرف شود، در نتیجه خودتصویر توری اول روی توری دوم به اندازه $t\theta$ تغییر

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

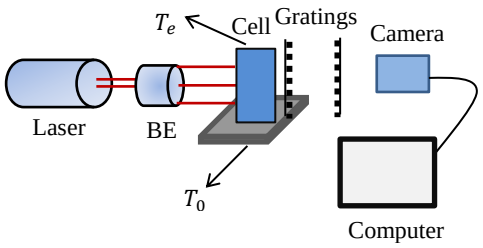
خواهد کرد و باعث جابجایی فریزهای ماره به اندازه h خواهد شد. با استفاده از رابطه (۲)، h تابعی از z است:

$$h(z) = \frac{tLd_m}{n(z_0)\mathrm{d}} \frac{dn(z)}{dz} \qquad (۶)$$

بنابراین با اندازه‌گیری مقدار انحراف فریزهای ماره گرادیان ضریب شکست $\frac{dn(z)}{dz}$، بدست می‌آید و با استفاده از آن می‌توان توزیع ضریب شکست را بدست آورد. رابطه بین ضریب شکست و دما برای آب غیر خطی است ولی در بازه‌های دمایی پایین می‌توان آن را خطی در نظر گرفت. بنابراین می‌توان توزیع دما را از نمایه ضریب شکست محاسبه کرد.

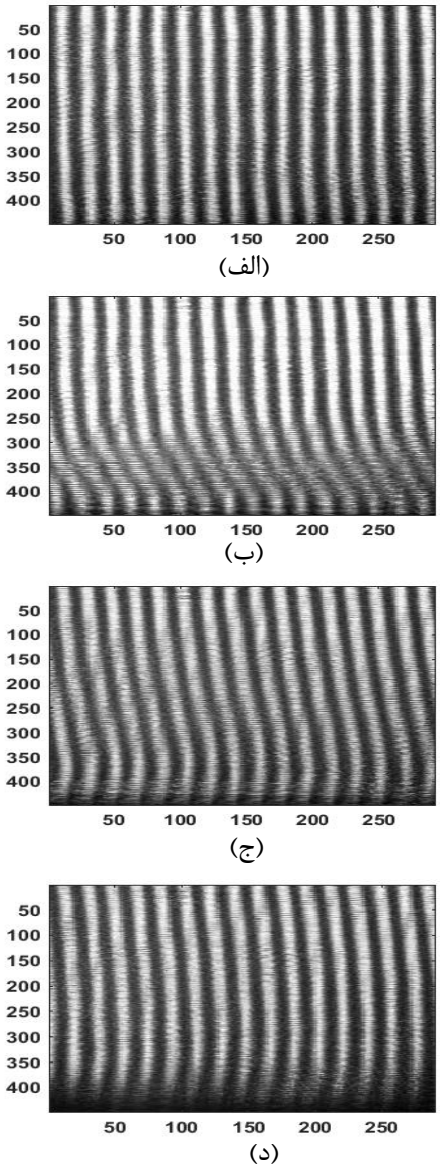
۳- روش انجام آزمایش

چیدمان آزمایش در شکل (۱) نشان داده شده است. برای انجام آزمایش از لیزر دیودی با طول موج $\lambda = 655nm$ استفاده شده است. ابتدا نور لیزر توسط پالایه فضایی مناسب باز می‌شود و با استفاده از یک عدسی همگرا موازی می‌شود. نور موازی شده از مخزن حاوی آب عبور داده می‌شود. مخزن آب روی یک صفحه سرد با دمای $T_0 = 0°C$ قرار گرفته شده است که دمای آن با اعمال اختلاف ولتاژ ثابت بین دو سمت المان خنک کننده ثابت نگه داشته شده است. با تغییر ولتاژ امکان تغییر دما وجود دارد. همچنین از یک سیستم خنک کننده جریان آب سرد برای سرد کردن المان استفاده می‌شود.



شکل ۱: چیدمان آزمایش

ارتفاع مخزن پخش حدود ۲,۲ سانتیمتر است و دمای محیط برابر با $T_e = 23°C$ است. پس از مخزن پخش دو توری با فرکانس فضایی ۵ خط بر میلیمتر در فاصله $t_n = 12.2cm$ از همدیگر قرار گرفته‌اند. فریزهای ماره تشکیل شده روی توری دوم توسط دوربین نیکون $D5200$ ثبت می‌شوند. در شکل (۲) فریزهای ماره قبل از برقراری اختلاف دما بین دو سطح (الف) و ۴۰ ثانیه (ب)، ۳ دقیقه (ج) و ۸ دقیقه (د) پس از ایجاد اختلاف دما بین دو سطح نشان داده شده است.



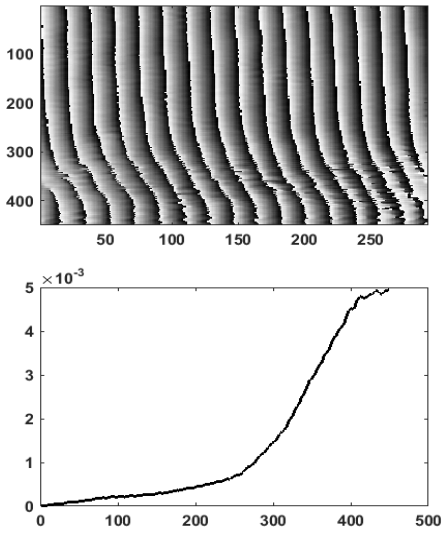
شکل ۲: فریزهای ماره (الف) قبل از برقراری اختلاف دمایی، (ب) ۴۰ ثانیه بعد از ایجاد اختلاف دما و (ج) ۳ دقیقه بعد از ایجاد اختلاف دما

۴- تحلیل داده‌ها

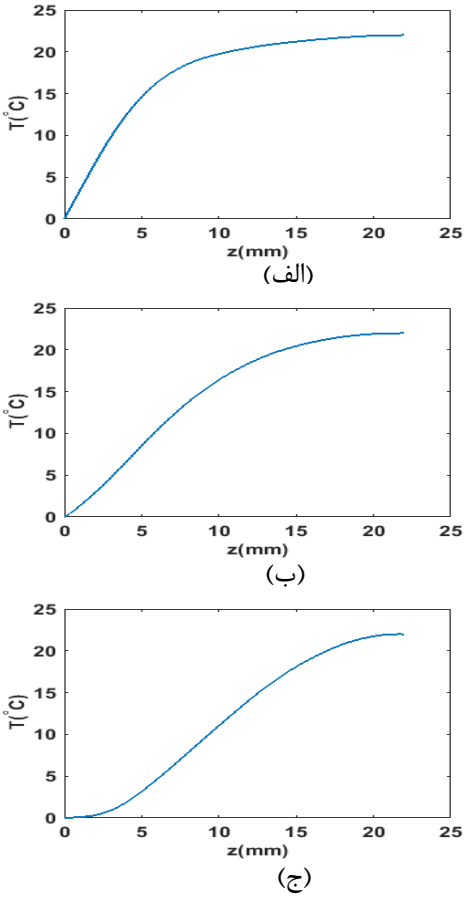
برای تحلیل فریزها مقدار انحراف فریز ماره را نسبت به حالت قبل از برقراری گرادیان دما اندازه می‌گیریم. برای اینکار از روش تبدیل فوریه ابتدا فاز فریزهای ماره را حساب می‌کنیم. بعد با استفاده از رابطه (۶) توزیع گرادیان ضریب شکست بدست می‌آید.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]



شکل ۳: توزیع فاز فریزهای ماره و توزیع گرادیان ضریب شکست در زمان ۴۰ ثانیه پس از برقراری اختلاف دما



شکل ۴: توزیع دما در زمان‌های مختلف پس از برقراری اختلاف دمای $\Delta T = 23°C$

در شکل (۳) توزیع فاز دوبعدی فریزهای ماره و توزیع گرادیان ضریب شکست برای زمان ۴۰ ثانیه پس از برقراری اختلاف دما بین دو سطح نشان داده شده است. با انتگرال‌گیری از گرادیان ضریب شکست، توزیع ضریب شکست و در نهایت از رابطه بین ضریب شکست و دمای آب نمایه دما در داخل آب بدست می‌آید. در شکل (۴) توزیع دما در زمان‌های ۴۰ ثانیه، ۳ دقیقه و ۸ دقیقه بعد از برقراری اختلاف دما نشان داده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی مبتنی بر انحراف‌سنجی ماره برای اندازه‌گیری توزیع دما در سطح جسم سرد ارائه شد. توزیع دمای آب زمانی که بین دو سطح با اختلاف دمایی $\Delta T = 23°C$ قرار می‌گیرد، بدست آمد و تحول زمانی آن بررسی شد.

مراجع

[1] Born. M and Wolf. E, Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. CUP Archive, 2000.

[2] Crespy, C., Gervais, P. and Varieras, D., “An iterative method for temperature gradient measurements in two-dimensional thermal boundary layer flows by speckle photography.” Experiments in fluids, Vol. 48, No. 2, pp.345-354. 2010

[3] Loening, N. M. and Keeler. J, “Measurement of convection and temperature profiles in liquid samples.” Journal of Magnetic Resonance, Vol. 139, No. 2, pp, 334-341, 1999.

[4] Song, F., Xu, C., Wang, S. and Li, Z., “Measurement of temperature gradient in a heated liquid cylinder using rainbow refractometry assisted with infrared thermometry.” Optics Communications, 380, pp.179-185, 2016.

[5] Duarte, D. Naylor, N. "Direct temperature gradient measurement using interferometry.", Experimental heat transfer, Vol. 12, No. 4, pp. 279-294, 1999.

[۶] توسلی، م. ت.، رسولی، س.، "اندازه‌گیری گرادیان دما در هوا با استفاده از پدیده تالبوت و تکنیک ماره"، کنفرانس فیزیک ایران و پنجمین همایش دانشجویی فیزیک، ۴۰-۳۹، (۱۳۷۹).

[۷] سیف اله رسولی، پایان نامه کارشناسی ارشد، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان، ۱۳۷۶

[۸] مریم السادات شفیعی، مجید رشیدی هویه، مهدی شفیعی آفارانی، اندازه گیری هدایت گرمایی سیالات با کمک روش انحراف سنجی ماره، مقاله نامه کنفرانس سال ۹۴ اپتیک و فوتونیک ایران

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]