

بررسی تغییرات فازی بین یک سیم عمودی داغ و صفحه سرد با روش تداخل امواج پراشیده از سیم

فاطمه جعفریانی^{۱*}، احسان احدی اخلاقی^۱، محمد اولین چهارسوقی^۱، محمدتقی توسلی^۳

- ۱- دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، کد پستی ۴۵۱۹۵-۶۶۷۳۱.
- ۲- مرکز پژوهشی اپتیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، کد پستی ۴۵۱۹۵-۶۶۷۳۱.
- ۳- دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران، تهران.

چکیده - در این مقاله انتقال گرما بین یک سیم داغ و یک صفحه سرد در مجاورت آن بررسی شده است. با استفاده از روش برهم‌نهی امواج پراشیده از دو سیم مشابه در تداخل‌سنج ماخ-زندر، تغییرات فاز ناشی از یک صفحه سرد در مجاورت یکی از سیم‌ها تعیین شده است. سپس با اعمال جریان الکتریکی به سیم در مجاورت صفحه سرد نمایه فاز این حالت به دست آمد. دقت فاز اندازه‌گیری شده در این روش بستگی به دقت آشکارساز شدت دارد. در این کار از یک آشکارساز ۸ بیتی استفاده شد که در نتیجه دقت اندازه‌گیری فاز حدود $\pi/200$ است.

کلیدواژه- پراش، تداخل‌سنج ماخ-زندر، گرادیان فاز.

Phase change measurement between a hot wire and a cold plane using superimposing of diffracted waves from two similar wires

F. Jafariani^{1,*}, E. A. Akhlaghi^{1,2}, M. A. Charsooghi^{1,2}, M. T. Tavassoly³

- 1-Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, 45137-66731, Iran.
- 2- Optics Research Center, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, 45137-66731, Iran.
- 3- Department of Physics, Faculty of Science, University of Tehran, North Kargar Avenue, Tehran, Iran.

Abstract- In this paper, heat transfer between a cold plane next to a wire is studied. We measured phase distribution around the wire near the cold plane, using superimposing the waves diffracted from two similar wires of diameter 320 μm in a Mach-Zehnder interferometer. Also by passing electrical current through the wire, the phase distribution in this case is also determined. In this work an 8bit detector is used and achievable accuracy for phase is about $\pi/200$.

Keywords: Diffraction, Mach-Zehnder interferometer, Phase gradient.

۱- مقدمه

انتقال گرما و شارش سیال از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و در این میان انتقال گرمای همرفت طبیعی نسبت به دیگر مسائل انتقال گرما مورد توجه خاصی واقع شده است [۱-۲]. به‌طور کلی انتقال گرما با برهم‌کنش گرمایی بین یک سطح و سیال در حال حرکت مجاور آن سروکار دارد [۳].

روش‌های حل عددی پیچیده در این زمینه نیاز به اندازه‌گیری‌ها، مشاهدات کیفی و روش‌های تجربی را در جهت فهم بهتر این پدیده و اعتبار بخشیدن به مدل‌های عددی بیشتر کرده است. روش‌های اپتیکی در مقایسه با روش‌های تجربی دیگر از مزیت بیشتری برخوردار هستند. به عنوان مثال روش‌های اپتیکی باعث اختلال در میدان دمایی نمی‌شوند و همچنین خطای لختی به سیستم وارد نمی‌کنند، بنابراین می‌توان فرایندهای با تغییرات سریع را با دقت زیادی دنبال کرد [۴].

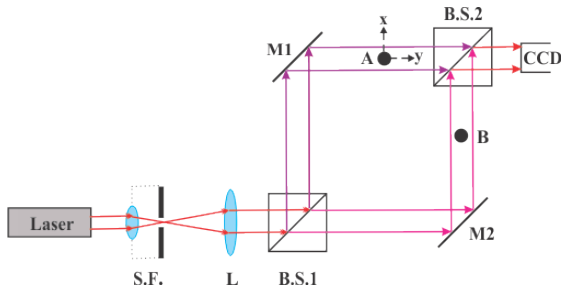
روش‌های اپتیکی که بر اساس تغییر ضریب شکست سیال (به علت تغییر چگالی بر اثر گرادیان دما) عمل می‌کنند به دو گروه انحراف نور منتشر شده در محیطو اختلاف در مسیر اپتیکی تقسیم می‌شوند. روش‌های مبتنی بر تداخل‌سنجی مانند تداخل‌سنجی کلاسیک، تداخل‌سنجی چینشی و تمام‌نگاری [۵] و روش‌های برپایه انحراف نور مانند تکنیک شرن، عکاسی پیسه و تداخل‌سنجی تالپوت هستند [۶].

اخیراً دکتر توسلی و همکارانش با استفاده از پراش فرنل روش جدیدی برای اندازه‌گیری توزیع دما در اطراف یک سیم نازک داغ ارائه کردند و توانستند تغییرات فاز را با دقت $\pi/200$ اندازه‌گیری کنند [۷]. در این روش که مبنای کار این پژوهش است، امواج پراشیده از دو سیم کوچک مشابه در دو بازوی تداخل‌سنج برهم‌نهی می‌شوند. مشاهده می‌شود که با اعمال تغییر فاز π بین دو بازوی تداخل‌سنج تغییر شدت قابل توجهی به‌وجود می‌آید.

۲- مبانی نظری مسئله

اگر در تداخل‌سنج ماخ-زندر (شکل ۱) دو جسم کوچک مشابه مثلاً دو سیم کاملاً یکسان طوری قرار داده شوند که تصویر جسم A در باریکه‌شکن BS2 دقیقاً بر روی

جسم B منطبق شود، مطابق اصل بابینه شدت برهم‌نهی شده در صفحه مشاهده حدود چهار برابر شدت پراشیده از یکی از اجسام می‌شود. اگر اختلاف فازی معادل با π یا مضرب فردی از π به یکی از بازوهای تداخل‌سنج اعمال شود، نقش الگوی پراش برهم‌نهی شده محو می‌شود.



شکل ۱: هندسه تداخل‌سنج ماخ-زندر و دو سیم A و B برای بررسی روش برهم‌نهی امواج پراشیده از دو سیم.

اگر اختلاف فاز $\Delta\phi(x)$ بین دو بازوی تداخل‌سنج ایجاد شود، شدت در صفحه مشاهده برابر است با:

$$I(x) = I_A(x) + I_B(x) + 2\sqrt{I_A(x)I_B(x)}\cos\Delta\phi(x). \quad (2)$$

در این رابطه $I_A(x)$ و $I_B(x)$ شدت پراشیده از جسم A و B در صفحه مشاهده است.

شدت‌های بیشینه و کمینه در هر نقطه‌ی صفحه مشاهده به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} I_{\min}(x) &= I_A(x)(1-r^2) \\ I_{\max}(x) &= I_A(x)(1+r^2) \end{aligned} \quad (2)$$

که r نسبت میدان‌های دو موج پراشیده از A و B را نشان می‌دهد. اگر شدت به‌هنگام به صورت زیر تعریف شود:

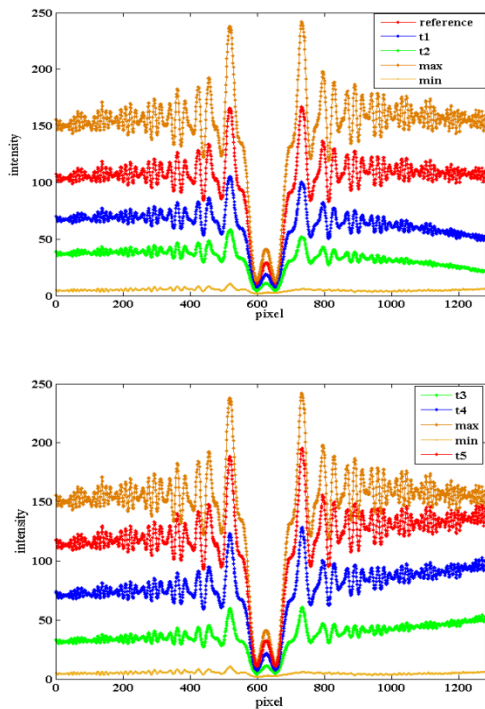
$$I_n(x) = \frac{I(x) - I_{\min}(x)}{I_{\max}(x) - I_{\min}(x)} \quad (3)$$

در این صورت با قرار دادن روابط (۱) و (۲) در رابطه (۳) فاز $\Delta\phi(x)$ به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\Delta\phi(x) = \cos^{-1}(2I_n(x) - 1) \quad (4)$$

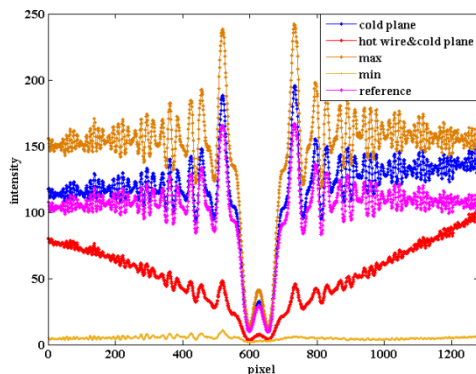
بنابراین در این روش با مشخص بودن توزیع شدت‌های بیشینه و کمینه می‌توان تغییر فاز ایجاد شده را تنها با

های شدت برهم‌نهی شده برای زمان‌های مختلف سرد شدن صفحه در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳: نمایه توزیع شدت مربوط به نقش تداخل امواج پراشیده از دو سیم در حالتی که صفحه به 0.9°C سرد شده است. این دو شکل منحنی‌ها شدت برهم‌نهی شده را با گذشت زمان (کاهش دما صفحه) نمایش می‌دهد. شکل پایین شدت برهم‌نهی شده را برای حالتی که اختلاف فاز بیشتر از π شده است نمایش می‌دهد.

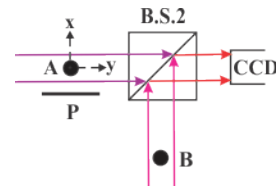
پس از آن که دمای صفحه به مقدار ثابتی رسید به سیم A جریان الکتریکی 1.08 آمپر اعمال می‌شود. شکل ۴ منحنی‌های شدت مربوط به صفحه سرد و سیم گرم در مجاورت صفحه پس از رسیدن به حالت پایا را نمایش می‌دهد.



اندازه‌گیری توزیع شدت در صفحه مشاهده تعیین کرد.

۳- روش انجام آزمایش

چیدمان آزمایش برای مطالعه انتقال گرما مطابق شکل ۱ است. در چیدمان از یک لیزر هلیوم-نئون به عنوان منبع نور، از قطعات اپتیکی با صافی سطوح $\lambda/4$ و یک دوربین ساخت شرکت Thorlabs با پیکسل‌های مربعی به ابعاد $5/2$ میکرون، استفاده شده است. همچنین از دو سیم A و B به قطر 320 میکرون برای ایجاد طرح پراش استفاده شده است. برای ایجاد گرادیان دما در مجاورت سیم A عمود بر محور x یک صفحه خنک کننده الکترونیکی^۱ تخت (P) قرار داده شده است (شکل ۲).



شکل ۲: چیدمان آزمایش برای بررسی انتقال گرمای همرفت بین سیم داغ A و صفحه سرد P.

برای تنظیم چیدمان بایستی تصویری سیم A در باریکه‌شکن BS2 دقیقاً بر روی سیم B واقع شود. برای این کار ابتدا جلوی باریکه نور در یکی از بازوها را گرفته و شدت پراشیده از دیگری روی آشکارساز ثبت می‌شود و سپس اندازه‌گیری برای بازوی دوم انجام می‌شود. با انطباق شدت پراشیده از این دو سیم می‌توان محل دو سیم را به نحو مطلوبی تنظیم کرد.

در مرحله بعد برای تحلیل فریزهای پراشی لازم است شدت‌های کمینه و بیشینه تعیین شده باشد. برای این منظور ابتدا تداخل‌سنج به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که فریزی با گام تقریباً بی‌نهایت ایجاد شود سپس یکی از آینه‌های تداخل‌سنج توسط انتقال‌دهنده‌ی پیزوالکتریک به آرامی جابه‌جا می‌شود و در همین حین از نقش پراش برهم‌نهی فیلم ثبت می‌شود. در نهایت از روی فریم‌های فیلم ثبت شده شدت‌های بیشینه و کمینه تعیین می‌شود. در مرحله آخر با اعمال ولتاژ به صفحه P، دمای آن به حدود صفر درجه سانتیگراد کاهش پیدا می‌کند. منحنی-

^۱Thermoelectric Cooler

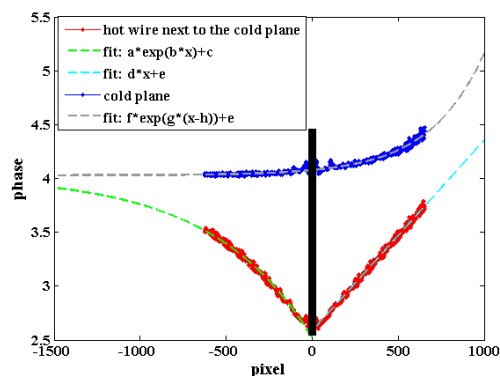
(بدون اعمال جریانی الکتریکی به سیم) و با استفاده از تداخل امواج پراشیده از دو سیم توانستیم تغییرات فاز را در اطراف صفحه سرد شده به دست آوریم. همچنین با گرم کردن سیم مجاور صفحه سرد و ایجاد گرادیان دمایی زیاد بین آنها تغییرات فازی بین سیم و صفحه بررسی شد. این عدم تقارن به وضوح در فاز به دست آمده مشاهده می شود. به نظر می رسد در ادامه می توان نمایه دما را به دست آوریم.

مراجع

- [1] D. Ambrosini, P.K. Rastogi, "Optical methods in heat transfer and fluid flow", Optics and Lasers in engineering, Vol. 44, pp. 155-158, 2006.
- [2] A. Bejan, *Convective heat transfer*, Wiley-Interscience, 1984.
- [3] M.J. Latif, *Heat convection*, USA, 2nd ed., 2009.
- [4] O.G. Martynenko, P.P. Khramtsov, *Free-convective heat transfer*, p. 44, Cambridge University Press, 2000.
- [5] D. Naylor, "Recent developments in the measurement of convective heat transfer rates by laser interferometry", *J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 24, pp. 345-355, 2003.
- [6] P.V. Farrell, L.D. Hofeldt, "Temperature measurement in gases using speckle photography", *Appl. Opt.*, Vol. 23, pp. 1055-1059, 1984.
- [7] R. Aalipour, M.T. Tavassoly, A. Darudi, "Superimposing the waves diffracted from two similar hot and cold wires provides the temperature profile around the hot one", *App. Opt.*, Vol. 49, No. 19, pp. 3768-3773, 2010.

شکل ۴: نمایه توزیع شدت مربوط به نقش تداخل امواج پراشیده از دو سیم. رنگ صورتی: هنگامی که دو بازو نسبت به هم یک اختلاف فاز ثابت دارند. رنگ آبی: هنگامی که صفحه P تا دمای 0.9°C سرد شده است. رنگ قرمز: حالتی که صفحه سرد شده در مجاورت سیم گرم قرار دارد.

در نهایت با حذف فاز اولیه از نمایه شدت و استفاده از روابط (۳) و (۴) توزیع فاز در عرض نقش پراش به دست می آید. نمایه فاز ناشی از گرادیان دما اطراف صفحه سرد و همچنین گرادیان دما بین سیم گرم و صفحه سرد در شکل ۵ نمایش داده شده است. خط چین ها برازش منحنی به بخش های مختلف داده های تجربی را نشان می دهند. همان طور که از شکل مشخص می شود قرار دادن صفحه سرد در سمت راست سیم گرم باعث برهم خوردن تقارن گرادیان فاز در اطراف سیم می شود (نقاط قرمز رنگ در شکل). همچنین به دلیل گرادیان شدید دما در این سمت مطابق انتظار رفتار فاز خطی است. در صورتی که رفتار فاز در سمت چپ سیم نمایه است.



شکل ۵: نقاط آبی رنگ نمایه فاز اندازه گیری شده از نمایه توزیع شدت در شکل ۴ است برای حالتی که صفحه تا دمای 0.9°C سرد شده است. خط چین، منحنی نمایه برازش شده به این نقاط است. و نقاط قرمز رنگ نمایه فاز مربوط به سیم با جریان 1.08A در مجاورت صفحه سرد شده قبلی است. خط چین در سمت راست مبدأ مختصات، خط راست برازش شده به این نقاط و در سمت چپ منحنی نمایه برازش شده به نقاط سمت چپ است. خط مشکی موازی محور فاز مکان سیم را نشان می دهد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله گرادیان فاز ناشی از گرادیان دما بین دو منبع گرمایی به روش تداخل امواج پراشی بررسی شد. با قرار دادن یک صفحه سرد در مجاورت یک سیم نازک