بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

اندازه‌گیری زاویه تماس قطره آب با سطح شیشه سودا-لایم به وسیله‌ی میکروسکوپ تداخلی میرائو

سارا مهاجرانی[۱]، احسان احدی اخلاقی[۱و۲]، جعفر مصطفوی امجد[۱و۲]

[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

چکیده - در این پژوهش، روشی برای اندازه‌گیری زاویه تماس نانو قطره‌ها به کمک روش تداخل‌سنجی ارائه شده است. برای اندازه‌گیری زاویه تماس مایعات با حجم از مرتبه نانولیتر، نمی‌توان از روش‌های معمول تصویربرداری استفاده کرد. از این رو در این پژوهش از میکروسکوپ تداخلی میرائو برای بازسازی تصویر سه‌بعدی قطره با دقت ۱۰ نانومتر استفاده شده است. برای تحلیل نتایج روش جابه‌جایی فاز به‌کار رفته است که در آن طرح تداخلی باید بدون تغییر باشد. از این رو با استفاده از خنک‌سازی قطره، نرخ تبخیر آن به صفر رسانده شد. با توجه به نتایج آزمایش زاویه تماس یک قطره ۰/۲ نانولیتری با سطح شیشه سودا-لایم به‌طور متوسط برابر ۶ درجه اندازه‌گیری شد.

کلید واژه- اندازه‌گیری، جابه‌جایی فاز، خنک‌کننده‌ی ترموالکتریک، زاویه‌ی تماس، میکروسکوپ تداخلی میرائو.

The Measurement of the Contact Angle of Water Droplets on Soda-Lime Glass Surface by Mirau Interferometeric Microscope

Sara Mohajerani[1], Ehsan A. Akhlaghi[1,2], Jafar Mostafavi-Amjad[1,2]

[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.

Abstract- In this work we studied the contact angle of Nano liter water droplet on a Soda-Lime glass surface based on Mirau interferometric microscopy. Our analysis is based on the principle of phase shifting interferometry. This method needs a static fringe pattern. As a result we reduced the evaporation rate by a thermoelectric cooler and froze the interference pattern. By analyzing the interferometric patterns we acquired the angle of water droplet with surface. The average of this angle is 6°.

Keywords: Contact Angle, Measurement, Mirau Interferometer Microscope, Phase Shift, Thermoelectric Cooler.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-07]

۱- مقدمه

ترشوندگی سطوح در صنعت از اهمیت خاصی برخوردار است. به‌عنوان مثال، در صنعت برق، ترشدن سطوح کابل‌های انتقال برق باعث اتلاف شدیدی در انتقال انرژی می‌شود. کاهش در میزان ترشوندگی این سطوح، می‌تواند باعث صرفه‌جویی در توان انتقال یافته شود. همچنین در صنایع هوایی و خودروسازی از این پدیده برای جلوگیری از یخ‌زدگی بال‌های هواپیماها و یا شیشه‌های خودرو استفاده می‌شود [۱].

یکی از کمیت‌های مهم در اندازه‌گیری میزان ترشوندگی، زاویه تماس مایع با سطح است. در ابعاد میلی‌لیتر و بزرگ‌تر از آن، این مقدار وابسته به جنس مایع و سطح جامد، ثابت فرض می‌شود. ولی آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که زاویه ترشوندگی برای قطره‌های با اندازه‌های مختلف، متفاوت است. برای بررسی تشکیل قطرات ماکروسکوپی، باید زاویه تماس برای قطره‌های کوچک (از مرتبه میکرو و نانولیتر) مورد بررسی قرار گیرد [۲].

در این پژوهش، روشی برای اندازه‌گیری زاویه قطره آب در ابعاد نانولیتر، بر روی سطح جامد ارائه شده است. برای این منظور از میکروسکوپ تداخلی استفاده شد. روش میکروسکوپ تداخلی روشی غیرتماسی و غیرتخریبی است و به همین دلیل برای بررسی سطح سلول‌ها و سطح مایعات در ابعاد میکرو و نانومتر مناسب است. از جمله کاربردهای این میکروسکوپ می‌توان به بررسی نانوساختارهای سطحی بافت زنده و بررسی کیفیت ساخت مدارهای مجتمع الکترونیکی و نوری اشاره کرد [۳-۵]. در میکروسکوپ تداخلی معمولاً از سه نوع عدسی شیئی مایکلسون، میرائو و لینیک استفاده می‌شود. با توجه به بزرگ‌نمایی‌های مختلف این عدسی‌ها، دقت اندازه‌گیری آن‌ها از مرتبه ۱۰ نانومتر تا ۰/۱ نانومتر تغییر می‌کند [۶].

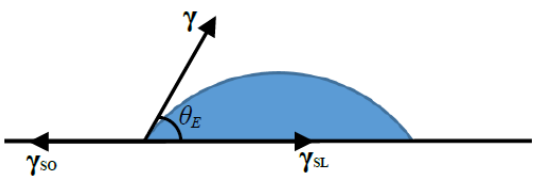
در این پژوهش عدسی شیئی میرائو برای اندازه‌گیری زاویه قطره به‌کار گرفته شده است. برای تحلیل فریزهای تداخلی ناشی از نمونه، از روش جابه‌جایی فاز و برای ایجاد اختلاف فاز مورد نیاز در این روش، از پیزوالکتریک استفاده شده است.

۲-۱ مبانی نظری - ترکنندگی

مایع به عنوان بخشی از مواد چگال محسوب می‌شود که شکل نامنظمی دارد. مایع برای رسیدن به حالت تعادل و کمینه انرژی، در کمترین مساحت شکل می‌گیرد. کشش سطحی، منشا فیزیکی این پدیده است، که موجب کروی شدن شکل قطره می‌شود. هنگامی‌که یک قطره مایع روی سطح صاف جامد قرار می‌گیرد، متناسب با نوع جامد و مایع، می‌تواند روی سطح پخش شود یا به شکل کروی روی آن باقی بماند [۷].

زاویه تعادل قرار گرفتن مایع روی سطح جامد θ_E، از طریق رابطه یانگ به دست می‌آید:

$$\cos\theta_E = \frac{\gamma_{so} - \gamma_{sl}}{\gamma} \qquad (۱)$$



شکل ۱: طرحی از نیروهای وارد بر قطره در تماس با یک سطح جامد تخت.

که در این رابطه، γ_{so} تنش سطحی جامد-هوا، γ_{sl} تنش سطحی مایع-جامد و γ کشش سطحی است. واحد این پارامترها نیوتن‌برمتر است. اندازه این زاویه بیان‌گر میزان ترشوندگی سطح است. شکل ۱ بردارهای تنشی و کششی را نمایش می‌دهد [۷].

۲-۲- مبانی نظری - تداخل در میکروسکوپ میرائو

در میکروسکوپ تداخلی، باریکه نور به دو قسمت تقسیم می‌شود. یکی از باریکه‌ها، پس از بازتاب از آینه مرجع با باریکه بازتابی از سطح نمونه، تداخل می‌کند. اختلاف در ضریب‌شکست و ضخامت نمونه، باعث تغییر راه نوری و در نتیجه، تغییر شکل فریزهای تداخلی می‌شود. با تحلیل فریزهای تداخلی می‌توان تصویر سه بعدی سطح را به‌دست آورد.

روش‌های مختلفی برای تحلیل فریز وجود دارد. یکی از این روش‌ها، روش جابه‌جایی فاز است. مزیت این روش نسبت به روش‌های دیگر حساسیت کمتر آن نسبت به

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-07]

شکل و نحوه توزیع فریزها در صفحه مشاهده است. بنابراین از این روش می‌توان برای اندازه‌گیری توزیع فازهای پیچیده با دقت بیش‌تر استفاده کرد [۸].

در این روش با اضافه کردن فاز ثابت به اختلاف فاز شدت تداخلی در چندین مرحله و حل معادلات شدت‌های ثبت شده، می‌توان توزیع اختلاف فاز را در صفحه مشاهده تعیین کرد. برای این منظور، از الگوریتم‌های متعددی مانند، جابجایی سه پله ، چهار پله و n پله استفاده می‌شود [۸].

در این پژوهش از تکنیک جابجایی فاز چهار پله استفاده شده است، که در آن چهار طرح تداخلی (I_0، I_1، I_2 و I_3) ثبت می‌شود و هر طرح نسبت به طرح قبلی اختلاف فاز $\pi/2$ دارد. برای اعمال اختلاف فاز از پیزوالکتریک استفاده شده است. با حل معادلات شدت، توزیع فاز تداخلی ناشی از جسم به صورت زیر به‌دست می‌آید [۸]:

$$\Delta\phi(x,y) = \tan^{-1}[\frac{I_3 - I_1}{I_0 - I_2}] \qquad (۲)$$

با مشخص بودن توزیع اختلاف فاز و استفاده از رابطه زیر می‌توان توزیع ضخامت نمونه را محاسبه کرد.

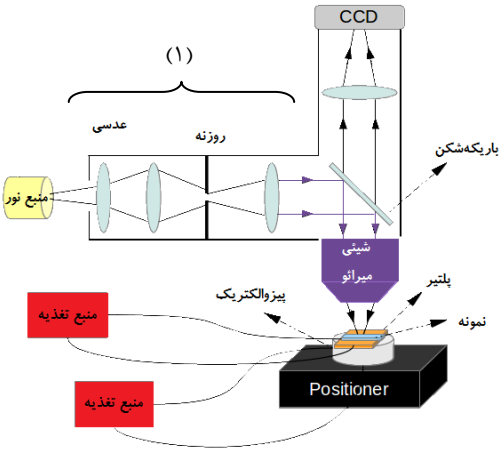
$$\Delta\phi = 2k\Delta x \qquad (۳)$$

در رابطه بالا، k عدد موج و Δx ضخامت نمونه است.

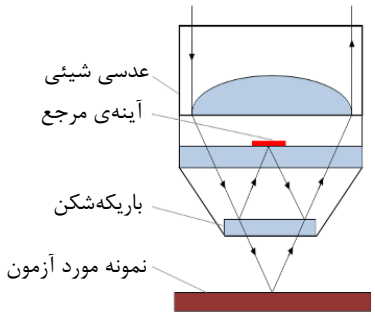
۳- شرح آزمایش و نتایج

شکل ۲ طرحی کلی از چیدمان تداخل‌سنج میکروسکوپی میرائو را نمایش می‌دهد. چیدمان شامل، منبع نور LED پرتوان با طول موج ۶۲۰ نانومتر است. به دلیل گسترده و واگرا بودن این منبع نوری، لزوم چینش چیدمان اپتیکی جهت موازی کردن آن وجود دارد که بخش (۱) در شکل ۲ برای همین منظور طراحی شده است.

باریکه خروجی، توسط یک باریکه‌شکن به سمت شیئی میرائو هدایت شده و از سطح نمونه بازتاب می‌شود. طرح تداخلی باریکه‌های خروجی از شیئی میرائو توسط آشکارساز ثبت می‌شود. در این آزمایش از عدسی شیئی میرائو ۱۰x (ساخت شرکت Nikon، WD = ۷/۴mm، NA = ۰/۳) استفاده شده است. شکل ۳ ساختار داخلی عدسی شیئی میرائو را که شامل یک عدسی کانونی کننده، باریکه‌شکن و یک آینه بسیار کوچک است، نمایش می‌دهد.



شکل ۲: طرحی کلی از چیدمان آزمایش



شکل ۳: طرح کلی از شیئی میرائو

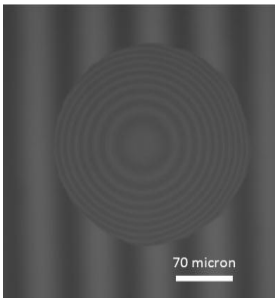
نمونه مورد بررسی در این پژوهش، آب مقطر با حجم اولیه‌ی ۰/۵ میکرولیتر بود که روی یک لام شیشه‌ای کاملا تمیز قرار گرفته و با گذشت زمان تبخیر می‌شد تا در نهایت به حجم ۰/۲ نانولیتر رسید. برای کاهش نرخ تبخیر آب، از یک خنک‌کننده‌ی ترمو-الکترونیکی یا پلتیر استفاده شد که لام بر روی آن قرار می‌گرفت. پلتیر قطعه‌ای است که با اتصال به منبع ولتاژ یک سطح آن سرد و سطح مقابل آن گرم می‌شود و این دو سطح همواره در یک اختلاف دمایی نسبت به هم قرار می‌گیرند.

به منظور افزایش کارکرد پلتیر در کاهش دمای سطح از یک سیستم خنک کننده که در آن، جریان آب دمای سطح گرم‌شونده‌ی پلتیر را کاهش می‌داد، استفاده کردیم. این کار موجب کاهش دمای سطح خنک‌شونده شد. پس از کاهش نرخ تبخیر آب، با اعمال ولتاژ به پیزوالکتریک، فاز مورد نیاز برای تحلیل را اعمال و طرح‌های تداخلی ثبت شدند.

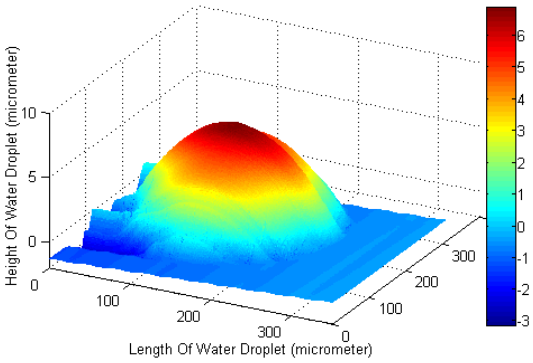
[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-07]

۳- نتایج

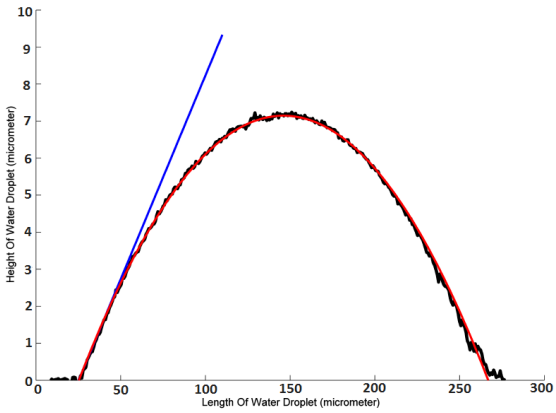
شکل۴، فریزهای ایجاد شده از قطره آب و سطح شیشه را نمایش می‌دهد. بعد از تحلیل داده‌های به‌دست آمده با استفاده از رابطه (۲) و بازسازی توزیع فاز به‌دست آمده از سطح نمونه، شکل قطره بازسازی شده است. شکل ۵، تصویر سه بعدی قطره آب مورد آزمون را نمایش می‌دهد. در این شکل سطح شیشه با رنگ آبی مشخص شده است و هر چه ارتفاع افزایش می‌یابد، رنگ به سمت قرمز متمایل می‌شود.



شکل ۴: نمایش طرح تداخلی ایجاد شده از قطره روی سطح.



شکل ۵: نمایش سه بعدی قطره آب توسط میکروسکوپ تداخلی میرائو.



شکل ۶: زاویه به‌دست آمده از قطره آب. خط سیاه: داده‌های آزمایشگاهی. خط قرمز: منحنی درجه دو برازش شده. خط آبی: خط مماس از نقطه‌ی تماس که شیب آن زاویه را مشخص می‌کند.

شکل ۶ نمایه عرضی قطر قطره را نمایش می‌دهد. بر روی نمودار تابع چند جمله‌ای درجه ۲ برازش شده است. خطای برازش برابر ۴ درصد است. با رسم خط مماس به این نمودار در لبه قطره، زاویه تماس قطره با سطح به طور میانگین برابر ۶ درجه به‌دست آمده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش هدف ارائه روشی برای اندازه‌گیری زاویه قطره آب بر روی سطح با حجم از مرتبه نانولیتر بود. برای این منظور از میکروسکوپ تداخلی میرائو استفاده شد. برای تحلیل نتایج، روش جابه‌جایی فاز به‌کار گرفته شد و برای ایجاد اختلاف فازهای مورد نیاز، از قطعه‌ی پیزوالکتریک استفاده شد. به دلیل اختلاف کم ضریب شکست بین آب و شیشه، شدت باریکه‌ی بازتابی کم بود که باعث کاهش نمایانی فریزها می‌شد و در نتیجه اثر نوفه افزایش یافت. در نهایت شکل سه بعدی قطره بازسازی شد و زاویه قطره با ارتفاع تقریبی ۷ میکرومتر و حجم ۰/۲ نانولیتر، به طور میانگین برابر ۶ درجه به‌دست آمد.

مراجع

[1] H. B. Eral & D. J. C. M. Mannetje & J. M. Oh, *Contact angle hysteresis: a review of fundamentals and applications*, DOI 10.1007/s00396-012-2796-6, (2012).

[2] G. Bracco, B. Holst, *Surface Science Technique*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2013).

[3] Huang D., Swanson E.A., Lin C.P., al.et, *Optical coherence tomography*, **Science**, 254 (1991), 1178-1181.

[4] Espinosa H.D., Prorok B.C., and Fischer M., *A Novel Experimental Technique for Testing Thin Films and MEMS Materials*, **Pros. SEM Ann. Conf. Exp. Appl. Mech**. 22 (2001).

[5] Anna T., Srivastava V., Singh Mehta D., and Shakher C., *High-resolution full-field optical coherence microscopy using a Mirau interferometer for the quantitative imaging of biological cells*, **Appl. Opt**. **50** (2011) 6343-6351.

[6] Harding K., *Handbook of Optical Dimensional Metrology*, CRC Press, (2013).

[7] P.G de Gennes, F. Brochard-Wyart, and D. Quere, *Capillarity and wetting phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves Springer*, New York, (2004).

[8] Malacara D., *Optical Shop Testing*, John Wiley & Sons, Inc. (2007).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-07]