بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

اندازه‌گیری سه‌بُعدی ناهمواری سطح
با استفاده از میکروسکوپ تداخلی میرائو به روش تلفیق فاز

سارا مهاجرانی، مصطفی آخته، جعفر مصطفوی امجد، داریوش عبداله‌پور و احسان احدی اخلاقی

دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان کد پستی ۴۵۱۹۵-۶۶۷۳۱
مرکز پژوهشی اپتیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان کد پستی ۴۵۱۹۵-۶۶۷۳۱

چکیده – در این پژوهش روشی برای اندازه‌گیری سه‌بُعدی ناهمواری سطح با استفاده از میکروسکوپ تداخلی میرائو به روش تلفیق فاز ارائه شده است. یکی از روش‌های تحلیل طرح‌های تداخلی، روش جابه‌جایی فاز است. در این تحقیق از یک ***LCD*** به عنوان تلفیق‌گر فاز برای ایجاد این جابه‌جایی فاز استفاده شده است. مزیت این روش نسبت به روش‌های متداول، عدم استفاده از جابه‌جاگرهای مکانیکی و سرعت بالای داده‌برداری است.

کلید واژه- تلفیق فاز، جابه‌جایی فاز، سطح‌سنجی سه بعدی، میکروسکوپ تداخلی میرائو.

Three Dimensional Surface Topography Measurement by Phase Modulated Mirau Interferometeric Microscope

Sara Mohajerani, Mostafa Aakhte, Jafar Mostafavi-Amjad,
Daryoush Abdollahpour and Ehsan A. Akhlaghi

Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan 45137-66731, Iran.
Optics Research Center, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan 45137-66731, Iran.

Abstract- In this paper, a method for measuring 3D surface topography by using a phase modulated Mirau interferometric microscope is presented. Phase shifting is one of the methods to analyze interference patterns of the microscope. In this research an LCD is used as a phase modulator to apply the phase shifts. The advantages of this method compared to the conventional methods are the possibility of high-speed data acquisition and non-mechanical phase shifting.

Keywords: Phase Modulation, Phase Shift, 3D Topography measurement, Mirau Interferometer Microscope.

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

۱- مقدمه

بررسی سه بعدی ناصافی سطوح از مهم‌ترین چالش‌ها در صنعت و پژوهش‌های علمی است. بررسی سطوح در ابعاد نانومتری کاربردهای گسترده‌ای در سنجش نانوساختارهای سطحی یک بافت زنده و کیفیت ساخت مدارهای مجتمع الکترونیکی و نوری دارد [۱و۲]. به همین دلیل، تحلیل سه بعدی میکروسکوپی اجسام از اهمیت خاصی برخوردار است. در بررسی سطوح از روش‌های مختلفی مانند میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ تداخلی استفاده می‌شود. روش میکروسکوپ تداخلی از نوع غیرتماسی و غیرتخریبی بوده که برای بررسی سطح سلول‌ها و سطح مایعات در ابعاد چندین نانومتر استفاده می‌شود، در صورتی که روش‌های پیشین دارای چنین قابلیتی نیستند[۳-۵].

در میکروسکوپ تداخلی معمولاً از سه نوع عدسی شیئی میرائو، مایکلسون و لینیک استفاده می‌شود. با توجه به بزرگ‌نمایی‌های این عدسی‌ها، دقت اندازه‌گیری آن‌ها از مرتبه ۰/۱ نانومتر تا ۱۰ نانومتر است [۶].

در این پژوهش از عدسی شیئی میرائو برای تحلیل سه بعدی سطوح استفاده شده است. برای این منظور از روش جابه‌جایی فاز برای تحلیل فریزهای تداخلی ناشی از نمونه استفاده شده است. در بسیاری از موارد، برای ایجاد اختلاف فاز مورد نیاز برای تحلیل فریزها، نمونه مورد نظر را روی یک قطعه پیزوالکتریک قرار می‌دهند و با اعمال ولتاژ به قطعه پیزوالکتریک نمونه تحت آزمون را در ابعاد نانومتری جابه‌جا می‌کنند [۷]. اما چون این قطعه با جابه‌جایی مکانیکی همراه است، می‌تواند موجب لرزش نمونه شود و سرعت و دقت اندازه‌گیری را نیز کاهش دهد. اما در این پژوهش این اختلاف فاز را به‌وسیله یک LCD اعمال کردیم که روشی غیرمکانیکی است. این قطعه حاوی ملکول‌های بیضی‌گون مایع است که دارای دو ضریب شکست عادی و غیرعادی هستند. ایجاد اختلاف پتانسیل به این قطعه سبب تغییر جهت‌گیری مولکول‌های درون LCD و در نتیجه تغییر ضریب‌شکست میانگین می‌شود. با قرار دادن این قطعه در مسیر نور و تغییر ضریب‌شکست آن می‌توان فاز ثابتی بر روی نور خروجی، به‌صورت کنترل شده، اعمال کرد.

این قطعه نسبت به پیزوالکتریک از پاسخ زمانی کوتاه‌تری برخوردار است، که باعث می‌شود بتوان از آن برای اندازه‌گیری‌های آنلاین استفاده کرد. برای بررسی دقت اندازه‌گیری در این روش و درجه‌بندی آن از نمونه شیشه‌های تبادل یون شده با نقره استفاده شده است.

۲- مبانی نظری

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. با تحلیل فریزهای تداخلی می‌توان طرح سه بعدی ناصافی سطح را به‌دست آورد.

روش‌های مختلفی برای تحلیل فریزها وجود دارد. یکی از این روش‌ها، روش جابه‌جایی فاز است. مزیت این روش نسبت به روش‌های دیگر حساسیت کمتر آن نسبت به 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 ثبت می‌شود و هر طرح نسبت به طرح اولیه اختلاف فاز $\psi_m = m\pi/2$ را دارد. اگر شدت تداخلی را به صورت رابطه (۱) فرض کنیم:

$$I(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos(\Delta\phi(x,y)) \quad (۱)$$

شدت این چهار طرح به صورت زیر خواهد بود:

$$I_m(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos(\Delta\phi(x,y) + \psi_m) \quad (۲)$$

که در روابط بالا، m شماره شدت ثبت شده (m=۰،۱،۲،۳)، $a(x,y)$ شدت زمینه، $b(x,y)$ توزیع دامنه و $\phi(x,y)$ توزیع فاز شدت تداخلی را نشان می‌دهند. با حل معادلات شدت، توزیع فاز جسم به صورت زیر بدست می‌آید [۸]:

$$\phi(x,y) = \tan^{-1}\left[\frac{I_3 - I_1}{I_0 - I_2}\right] \quad (۳)$$

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

برای اعمال اختلاف فاز از LCD استفاده شده است. رابطه اختلاف فاز را به صورت زیر می‌توان بیان کرد:

$$\psi_m = 2k\Delta x\Delta n, \qquad \Delta n = (n_m - n_0) \qquad (۴)$$

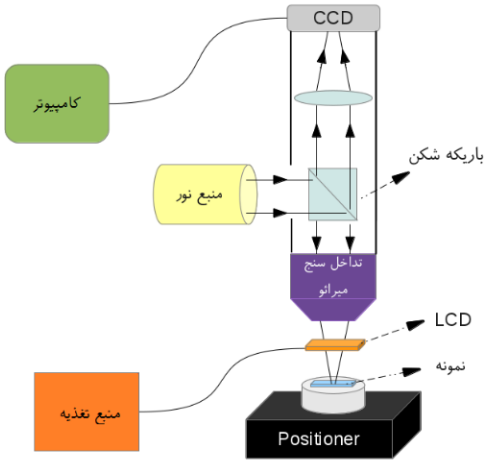
در این رابطه k عدد موج، Δx ضخامت LCD، Δn میزان تغییرات ضریب‌شکست است.

۳- شرح آزمایش و نتایج

۳-۱- چیدمان آزمایش

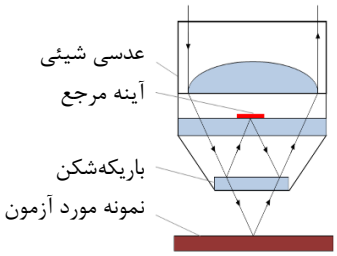
شکل ۱ طرحی کلی از چیدمان آزمایش را نمایش می‌دهد.

باریکه خروجی از منبع نور، توسط یک باریکه‌شکن به سمت شیئی میرائو هدایت شده و پس از عبور از LCD از سطح نمونه بازتاب می‌شود. طرح تداخلی تشکیل شده پس از خروج از شیئی میرائو توسط آشکارساز ثبت می‌شود.



شکل ۱: طرحی کلی از چیدمان آزمایش

در این تحقیق از شیئی میرائو ۱۰X (ساخت شرکت Nikon، WD = ۷/۴mm، NA = ۰/۳) استفاده شده است. مطابق شکل۲، عدسی شیئی میرائو شامل یک عدسی کانونی کننده، باریکه‌شکن و یک آینه بسیار کوچک است. باریکه نور پس از عبور از عدسی شیئی، توسط باریکه‌شکن به دو قسمت تقسیم می‌شود. یکی از باریکه‌ها، از سطح آینه داخلی عدسی شیئی (باریکه مرجع) و باریکه دیگر از سطح نمونه بازتاب می‌شود (باریکه آزمون).

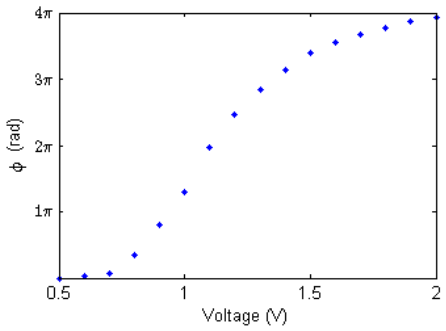


شکل ۲: طرحی کلی از شیئی میرائو

در تداخل‌سنجی برای ایجاد طرح تداخلی، باید طول همدوسی بیشتر از اختلاف راه نوری باریکه‌های تداخلی باشد. از آن‌جایی که در این نوع تداخل‌سنج میکروسکوپی، اختلاف راه نوری از مرتبه چند میکرون است، می‌توان از باریکه نیمه‌همدوس نیز استفاده کرد. اما استفاده از LCD باعث افزایش اختلاف راه نوری بین دو باریکه می‌شود، لذا در این پژوهش از لیزر هلیم - نئون با طول همدوسی بالا به عنوان منبع نور استفاده شده است.

۳-۲- درجه‌بندی و نتایج

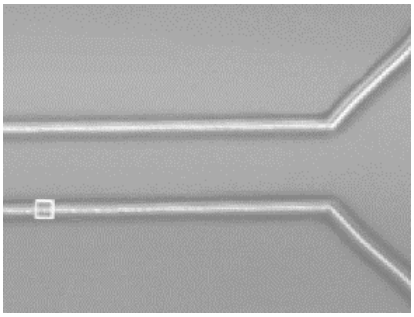
با اعمال ولتاژهای مختلف به LCD اختلاف فازهای مختلفی بین دو باریکه تداخلی ایجاد می‌شود. برای این منظور، لازم است اختلاف فاز ناشی از LCD برحسب ولتاژ اعمال شده به آن درجه‌بندی شده باشد. برای درجه‌بندی از یک آینه به عنوان نمونه استفاده شد، و در هر مرحله با تغییر ولتاژ، طرح تداخلی ثبت و با روش تحلیل فوریه، توزیع فاز آن تعیین شد (شکل ۳). با استفاده از نتایج درجه‌بندی می‌توان ولتاژهای مربوط برای ایجاد اختلاف فاز π/۲، π، ۳π/۲ و ۲π را تعیین کرد.



شکل ۳: تغییرات فاز ایجاد شده در LCD بر حسب ولتاژ

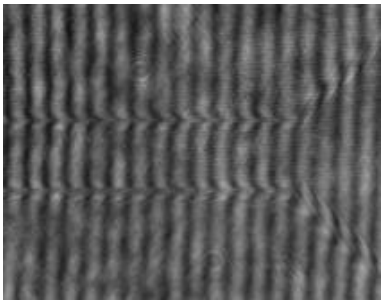
برای آزمون دقت روش استفاده شده، از یک دیواره نانومتری شیشه‌ای با ابعاد مشخص به عنوان نمونه استفاده شد. شکل ۴ تصویر میکروسکوپ عبوری نمونه را نمایش می‌دهد.

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

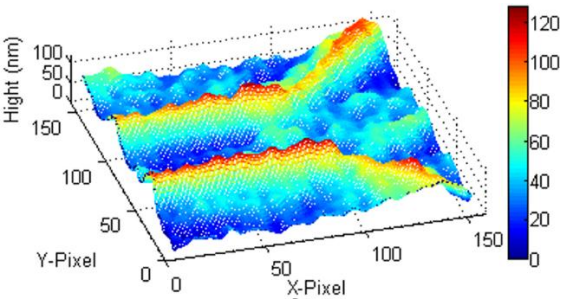


شکل ۴: تصویر میکروسکوپی از دیواره به عنوان نمونه [۹].

شکل ۵ یکی از چهار تصویر میکروسکوپی ثبت شده با استفاده از میکروسکوپ تداخلی میرائو را نمایش می‌دهد. بعد از تحلیل داده‌های به‌دست آمده با استفاده از رابطه (۳) و بازسازی توزیع فاز به‌دست آمده از سطح نمونه، ارتفاع دیواره برحسب نانومتر اندازه‌گیری شده است. نتیجه حاصل در شکل ۶ نمایش داده شده است. در این شکل سطح نمونه با رنگ آبی مشخص شده است و هر چه ارتفاع افزایش می‌یابد، رنگ آن منطقه به سمت قرمز متمایل می‌شود. با توجه به شکل، میانگین ارتفاع دیواره، برابر ۱۱۲ نانومتر اندازه‌گیری شده است.

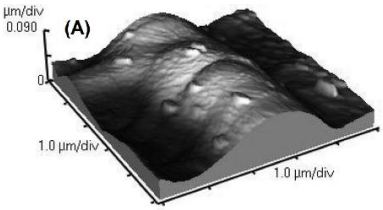


شکل ۵: تصویر میکروسکوپی ثبت شده بوسیله میکروسکوپ تداخلی میرائو.



شکل ۶: نمایش سه بعدی سطح نمونه اندازه‌گیری شده توسط میکروسکوپ تداخلی میرائو.

شکل ۷ تصویر سه بعدی ثبت شده با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی را نمایش می‌دهد (قسمت مشخص شده در شکل ۴) [۹].



شکل ۷: تصویر سه بعدی ثبت شده از نمونه توسط میکروسکوپ نیروی اتمی [۹].

براساس نتایج به دست آمده از میکروسکوپ نیروی اتمی ارتفاع میانگین این دیواره برابر ۱۰۷ نانومتر است. مقایسه این نتیجه با نتایج به‌دست آمده مشخص می‌سازد که خطای این روش از مرتبه ۵ نانومتر است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تصویر سه بعدی سطح یک نمونه با استفاده از روش جابه‌جایی فاز در میکروسکوپ میرائو اندازه‌گیری شد. برای این منظور از یک LCD برای ایجاد اختلاف فاز بین باریکه آزمون و مرجع استفاده شد که روشی غیرمکانیکی و کم هزینه است، در صورتی که معمولاً برای اعمال اختلاف فاز از پیزوالکتریک استفاده می‌شود. ولی پیزوالکتریک به علت اثرات پسماند، نیازمند درجه‌بندی و سیستم‌های کنترل جانبی است، که باعث می‌شود روشی پرهزینه باشد. بنابراین روش ارائه شده جایگزین خوبی برای ایجاد جابه‌جایی فاز در روش‌های تحلیل فریزهای تداخلی است.

مراجع

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

[2] 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.** (2001) 22.

[3] Lal R., John S.A., *Biological applications of atomic force microscopy*, **APS** (1994) 266.

[4] Bogner A., Jouneau P.H., Thollet G., Basset D. and Gauthier C., *A history of scanning electron microscopy developments: Towards wet-STEM imaging*, **Mic**. 38 (2007) 390-401.

[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] Creath K., *Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry*, **Appl. Opt.** 26 (1987) 2810-2816.

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

[۹] جعفر مصطفوی امجد، *تشکیل و رشد انبوهه‌های نقره در بستر شیشه‌های سودا-لایم تبادل یون شده Ag^{+}/Na^{+} در برهمکنش با باریکه لیزر آرگون و بررسی اثرهای حرارتی و کوانتمی ناشی از این پدیده*، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان ۱۳۹۱.

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