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

معرفی دو پارامتر هندسی نوآورانه جهت مدلسازی زبری سطح توسط نتایج آزمون میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)

یسری طاهری[۱] و داود رئوفی*[۲]

۱. دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، همدان

yosratah۹۸@gmail.com

۲. دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، همدان

d_raoufi@ymail.com

چکیده –در پژوهش حاضر دو پارامتر نوآورانه هندسی جهت مدلسازی و بررسی دقیقتر زبری سطح توسط آزمون میکروسکوپ نیروی اتمی معرفی شده است. این پارامترها عبارتند از: میانگین مدول شیب سطح و مدول انحنای قله-دره‌ها. به منظور بررسی کاربرد این دو پارامتر، به مقایسه نتایج حاصل از این دو پارامتر با دو پارامتر معمول حاصل از نتایج آزمون AFM در یک مطالعه موردی پرداخته شد.

کلید واژه‌ها- آزمون AFM، لایه نازک، مدول انحنای قله/دره، میانگین مدول شیب سطح

Introduce of two innovative geometrical parameters for surface roughness modeling by atomic force microscope (AFM) test results

Yosra Taheri[۱], Davood Raoufi[۲]*

۱. Department of Physics, University of Bu Ali Sina, Hamedan, yosratah۹۸@gmail.com
۲. Department of Physics, University of Bu Ali Sina, Hamedan, d_raoufi@ymail.com

Abstract- In the present study, two innovative geometrical parameters have been introduced for modelling and more detailed study of surface roughness in Atomic Force Microscope (AFM) test. These parameters are: the average modulus of surface slope and the modulus of curvature of the peaks-valleys. In order to investigate the applicability of these two parameters, the results obtained from these two parameters were compared with two common parameters obtained from the AFM test results using a case study.

Keywords: AFM analysis, Thin layer, Modulus of curvature of the peaks-valleys, Average modulus of surface slope.

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

مقدمه

ویژگی‌های سطحی لایه‌های نازک از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار بر خواص نهایی این مواد است. ناهمواری یا زبری سطح، یکی از این پارامترها است که در علوم کاربردی و پایه بسیار مورد توجه است [۱]. زبری سطوح همچنین بر روی ساختار الکتریکی، خصوصیات انتقال جریان و بر روی رفتار پراکندگی نور تاثیرگذار است. به عبارتی زبری خصوصیات فیزیکی سیستم را می‌تواند تغییر دهد [۲].

برای توصیف ناهمواری سطح با استفاده از تصویر گیری فضایی واقعی از روش‌های مختلفی مانند میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، میکروسکوپ روبشی تونلی (STM)، میکروسکوپ عبور الکترونی (TEM) و میکروسکوپ ثانویه الکترونی استفاده می‌گردد. میکروسکوپ نیروی اتمی تکنیکی است که به طور گسترده در بررسی ناهمواری سطح مورد استفاده قرار گفته است [۳]. در این تکنیک پارامترهایی از قبیل ارتفاع میانگین حسابی، ریشه میانگین مربعات زبری، ارتفاع ده نقطه‌ای و حداکثر ارتفاع پروفایل پارامترهایی است که معمولا در مطالعات مربوط به زبری از آزمون AFM استخراج می‌شود [۴].

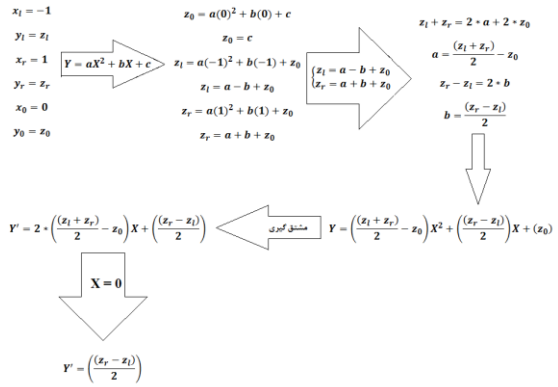
در پژوهش پیش رو ضمن ایجاد لایه نازک TiO_2 بر روی بستره SnO_2 به روش انباشت با پرتو الکترونی به بررسی زبری سطح توسط پرامترهای معمول و همچنین دو پارامتر نوآورانه پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از روش انباشت با پرتو الکترونی جهت ایجاد لایه نازک TiO_2 بر روی بستره SnO_2 استفاده شده است. به منظور ایجاد تفاوت در زبری سطح سه نمونه، نمونه ۱ در دمای ۱۵۰، نمونه ۲ در دمای ۲۵۰ و نمونه ۳ در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد بازپخت (آنیل) شدند.

جهت مشخصه یابی پوشش اعمال شده بر روی سطح از آزمون XRD استفاده شده است. برای این کار از دستگاه XRD مدل D۸ ADVANCE ساخت کمپانی Bruker آلمان، جهت بررسی زبری سطح از آزمون AFM استفاده شد. این آزمون‌ها توسط دستگاه Philips Xl۳۰ انجام گردید.

جهت محاسبه پارامتر میانگین مدول شیب سطح (SSMA) از روابطی که در ادامه تشریح شده است استفاده شد. می‌دانیم که در یک فضای سه بعدی اگر یک صفحه به صورت عمود بر سطح نمونه که دارای پستی و بلندی است عبور دهیم، محل تقاطع صفحه با سطح یک منحنی دو بعدی خواهد بود. با داشتن سه نقطه از این منحنی دو بعدی می‌توان معادله خط درجه دوم گذرکرده از این سه نقطه را بدست آورد. بنابراین با مشتق گیری از هر نقطه این منحنی دو بعدی، شیب منحنی در آن نقطه قابل محاسبه است. بنابراین می‌توان تغییرات مقادیر عرضی و ارتفاع را توسط روابطی که به صورت فلوچارت در شکل ۱ نشان داده شده است، به یکدیگر مربوط نمود.



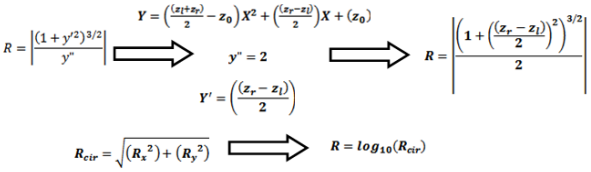
شکل ۱. فلوچارت روابط ریاضی مورد استفاده جهت محاسبه پارامتر SSMA

مطابق روابط بالا مقدار مشتق هر نقطه در راستای Y به ارتفاع دو نقطه از سه نقطه‌ی قرار گرفته بر روی منحنی دو بعدی مربوط گردید. همین عملیات را می توان برای راستای X نیز بدست آورد و مشتق هر نقطه در راستای X را نیز به دو مقدار ارتفاع ثابت مربوط نمود. در مرحله بعد می‌توان

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

یک مدول شیب شامل هر دو شیب در دو راستای X و Y معرفی نمود که میانگین تغییرات این مدول می‌تواند نماینده‌ای از پستی و بلندی‌های سطح باشد.

پارامتر نوآورانه دیگر معرفی شده در این مقاله، بر پایه بررسی انحنای قله‌ها و دره‌های موجود در نمونه است. میزان انحنای قله/دره برابر یک تقسیم بر شعاع انحنا است و شعاع انحنا شعاع کره‌ای است که اگر در ناحیه داخلی دره یا قله قرار گیرد به سه نقطه (در سه صفحه مربوط به سه بعد) مماس می‌شود. فلوچارت روابط ریاضی مورد استفاده برای این پارامتر در شکل ۲ نشان داده شده است.

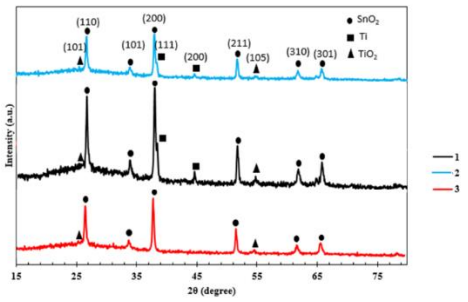


شکل ۲. فلوچارت روابط ریاضی مورد استفاده جهت محاسبه پارامتر مدول انحنای قله/دره

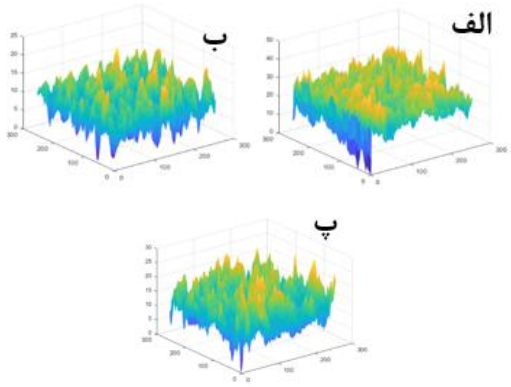
نتایج و بحث

الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به نمونه‌های پوشش داده شده توسط پوشش نازک TiO_2 در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق شکل ۳ مشخص است که در نمونه‌های ۱ و ۲ سه فاز (اکسید قلع، اکسید تیتانیوم و تیتانیوم خالص) و در نمونه ۳ تنها دو فاز (اکسید قلع و اکسید تیتانیوم) شناسایی شده است. این نتایج بیانگر آن است که در نمونه های ۱ و ۲، پوشش بر پایه تیتانیوم به طور کامل اکسید نشده و مقادیری از فاز تیتانیوم خالص در نمونه ها مشاهده می شود. این در حالی است که در نمونه ۳ که نمونه در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد آنیل شده است هیچگونه فاز تیتانیومی مشاهده نشده است که این می تواند بیانگر اکسیداسیون کامل این ماده در این نمونه باشد.

نتایج سه بعدی مربوط به آزمون AFM برای نمونه های مورد بررسی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳: الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به نمونه‌های ۱، ۲ و۳



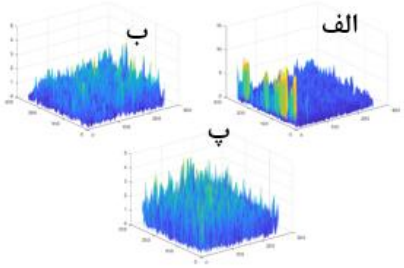
شکل ۴. توپوگرافی سه بعدی سطح حاصل از آزمون AFM و تصاویر شبیه سازی شده توسط نرم افزار متلب مربوط به نمونه‌های (الف) ۱، (ب) ۲ و (پ) ۳

با محاسبه پارامتر ارتفاع میانگین حسابی (Ra) این پارامتر برای نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۳,۷۹، ۲,۶۲ و ۳,۴۸ نانومتر بدست آمده است. همچنین با محاسبه پارامتر ریشه میانگین مربعات (RMS) برای این نمونه مقدار این پارامتر برای نمونه های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۴,۷۱، ۳,۲۸ و ۴,۲۷ نانومتر بدست آمده است.

تغییرات پارامتر میانگین مدول شیب سطح در هر نقطه برای کل سطح به صورت سه بعدی به دست آمده و در شکل ۵ نشان داده شده است. مشخص است که هرچقدر تغییرات مدول شیب بیشتر باشد، پستی و بلندی‌های سطح بیشتر است. با مقایسه سه تصویر نشان داده شده در شکل ۵ مشخص است که تغییرات مدول شیب در نمونه ۱ بیشتر بوده و بین ۵ تا ۱۰ نانومتر قرار گرفته است در حالی که در نمونه ۲ این تغییرات کمتر از ۳ نانومتر و در نمونه ۳ تغییرات

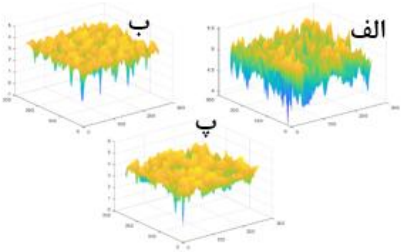
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مدول شیب کمتر از ۴ نانومتر بوده است. با میانگین گیری از این تغییرات می توان شاخصی که نماینده کل سطح است بدست آورد. مطابق این پارامتر، مقدار میانگین تغییرات مدول شیب برای نمونه های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۱,۳۹، ۰,۷۴ و ۱,۰۴ بدست آمده است که پارامتر نیز مطابق پارامترهای قبلی موید پستی و بلندی بیشتر نمونه ۱ نسبت به دو نمونه دیگر و در مقابل مسطح تر بودن نمونه ۲ در بین این سه نمونه است.



شکل ۵. تغییرات مدول شیب سطح به صورت سه بعدی مربوط به نمونه های (الف) ۱، (ب) ۲ و (پ) ۳

در شکل ۶، تغییرات مدول انحنای قله و دره‌ها برای کل سطح به صورت سه بعدی نشان داده شده است.



شکل ۶. تغییرات مدول انحنای قله/دره‌ها به صورت سه بعدی مربوط به نمونه های (الف) ۱، (ب) ۲ و (پ) ۳

در این تصاویر نیز تغییرات انحنای قله-دره ها در نمونه ۱ تیز تر و شدیدتر بوده و پس از آن نمونه ۳ قرار داشته است. همچنین مطابق این پارامتر نیز نمونه ۲ کمترین مدول انحنا و بنابراین مسطح ترین توپوگرافی سطحی بین سه نمونه را دارا بوده است. مقادیر میانگین این پارامتر نیز برای نمونه های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۴,۹۹، ۳,۷۸ و ۴,۱۵ بدست آمده است که این مقادیر نیز در تایید نتایج مشاهده شده از تصاویر سه بعدی نشان داده شده در شکل ۶ بوده و موید مسطح‌تر بودن نمونه ۲ و ناهموارتر بودن نمونه ۱ در بین این سه نمونه مورد بررسی است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش دو پارامتر نوآورانه هندسی جهت مدلسازی و بررسی دقیقتر زبری سطح معرفی گردید. پارامتر اول پارامتر میانگین مدول شیب سطح بود که بر پایه شیب پستی و بلندی‌های موجود بر روی سطح در دو بعد بدست آمد، و پارامتر دوم که مدول انحنای قله-دره‌ها نام داشت و بر پایه شعاع انحنای ناهمواری‌ها بنیان نهاده شد. به منظور بررسی کاربرد این دو پارامتر، با اعمال پوشش اکسید تیتانیوم بر روی اکسید قلع به مقایسه نتایج حاصل از این دو پارامتر با دو پارامتر معمول حاصل از نتایج آزمون AFM (پارامترهای ارتفاع میانگین حسابی و ریشه میانگین مربعات) پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان داد که پارامترهای هندسی معرفی شده در این پژوهش توانستد به خوبی دیگر نتایج حاصل از آزمون AFM را تایید نموده و این قابلیت را دارند که به عنوان پارامترهای جدیدی برای بررسی زبری سطح مورد استفاده قرار گیرند.

مراجع

[۱] E.S. Gadelmawla, M.M. Koura, T.M.A. Maksoud, I.M. Elewa, H.H. Soliman, "Roughness parameters", Journal of Materials Processing Technology. Vol ۱۲۳ pp. ۱۳۳–۱٤٥, ۲۰۰۲

[۲] D.A. Ramsey, K.C. Ludema, "The influences of roughness on film thickness measurements by Mueller matrix ellipsometry", Review of Scientific Instruments. Vol ۳۱, □□. ۲۸۷۴□۲۸۸۱, ۱۹۹۴.

[۳] S. Senapati, S. Lindsay, "Recent Progress in Molecular Recognition Imaging Using Atomic Force Microscopy", Accounts of Chemical Research. Vol ٤۹, pp. ٥۰۳–٥۱۰, ۲۰۱٦.

[٤] Y. Zhang, T. Fu, K. Cui, F. Shen, J. Wang, L. Yu, et al., "Evolution of surface morphology, roughness and texture of tungsten disilicide coatings on tungsten substrate", Vacuum. Vol ۱۹۱, pp. ۲۹۷-۳۱۲, ۲۰۲۱.

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