بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

مطالعه مورفولوژی سطح و ارائه یک روش جدید برای محاسبه طول همبستگی

سعید دیانی، محمدحسین مهدیه

دانشکده فیزیک دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران

saeed_dayyani@physics.iust.ac.ir , mahdm@iust.ac.ir

چکیده – در این مطالعه، دو عامل مهم در تعیین مورفولوژی سطوح در ابعاد نانو با استفاده از کد نویسی در نرم افـزار MATLAB و پردازش تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) اندازه گیری شده است. برای تعیین مورفولوژی سطح دو پارامتر انحراف از معیـار پستی و بلندی نقاط مختلف (Rq) و طول همبستگی (correlation length) قله های سطح بسیار مهم هستند. به طور متداول از تابع خود همبستگی سطح برای محاسبه طول همبستگی استفاده می‌شود. در این مقاله روشی جدید برای محاسبه طول همبستگی سطح ارائه شده که قابل مقایسه با روش متداول است.

کلید واژه- تابع خود همبستگی، طول همبستگی، مورفولوژی، میکروسکوپ نیروی اتمی، MATLAB

Study of surface morphology and introducing a novel method to calculate correlation length

Saeed Dayyani, Mohammad Hossein Mahdieh

Department of physics, Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran Iran

saeed_dayyani@physics.iust.ac.ir , mahdm@iust.ac.ir

Abstract- In this study, morphology of nano-structured surface is measured by image processing of AFM (atomic force microscopy) images using a developed code (in MATLAB environment). For determination of surface morphology two parameters ; RMS roughness and correlation length, are important. In this article a novel method is introduced in which distance distribution function of neighbor peaks around a peak are considered for calculating the surface parameters. This method works well for estimation of surface correlation length and can compete with common technique in which autocorrelation function is used.

Keywords: Autocorrelation function, correlation length, morphology, AFM, MATLAB

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

مقدمه

مورفولوژی سطح نقش مهمی در حوزه های مختلف علم و فناوری ایفا می‌کند. این خصوصیت سطح برای درک بسیاری از مسائل بنیادی مانند اصطکاک، رسانش جریان الکتریکی و گرمایی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. با تعیین انحراف از معیار ارتفاع نقاط مختلف (RMS roughness) و طول همبستگی (correlation length) هندسه سطح مشخص می‌شود [۲]. یکی از روش های متداول مطالعه مورفولوژی سطح، تصویر برداری با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی است. در این روش اطلاعات مربوط به سطح را می‌توان با استفاده نرم افزار های پردازش تصویر (از روی تصاویر گرفته شده) استخراج کرد. این اطلاعات معمولا با استفاده از تابع خود همبستگی سطح استخراج می‌گردد. در این مقاله با کد نویسی در فضای نرم افزار MATLAB و معرفی یک روش جدید برای محاسبه طول همبستگی، اطلاعات مربوط به مورفولوژی سطح استخراج شده است. در این روش ابتدا تمام قله های موجود در تصویر استخراج شده و فاصله هر قله با نزدیکترین همسایه های آن محاسبه می‌گردد و این فرایند برای تمام قله های موجود در تصویر انجام می‌شود و در انتها انحراف از معیار همه فواصل به دست امده از کل تصویر طول همبستگی است. نتایج به دست آمده با این روش ابداعی با مقادیر بدست آمده توسط نرم افزار Gwyddion [۳] که بر اساس تابع همبستگی عمل می‌کند، مقایسه شده است.

روش محاسبه

در این مطالعه ارتفاع هر نقطه از تصویر با استفاده از کدنویسی در فضای نرم افزار MATLAB استخراج شده و سپس با استفاده از رابطه زیر انحراف از معیار پستی و بلندی های سطح (R_q) که در این مقاله مورد نظر است، محاسبه می‌شود[۴]:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{NM}\sum_{x=1}^{N}\sum_{y=1}^{M}(Z(x,y)-\overline{Z}(N,M))^2} \quad (۱)$$

به طور متداول برای محاسبه طول همبستگی از تابع خود همبستگی (ACF) استفاده می‌شود[۴]:

$$ACF(\tau) = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N} y_i \times y_{i+1} \quad (۲)$$

تابع خود همبستگی اطلاعاتی پیرامون توزیع قله ها و دره ها در سراسر سطح به ما می‌دهد[۵]. به طور معمول فاصله ای که در آن تابع خود همبستگی به ۰/۱ و در برخی موارد به ۰/۳۶۸ مقدار بیشینه میرسد، به عنوان طول همبستگی در نظر گرفته می‌شود [۶]. محاسبه و رسم تابع خود همبستگی توسط نرم افزار Gwyddion انجام شده و می‌توان طول همبستگی سطح را از نمودار Auto Correlation Function(ACF) دست آورد.

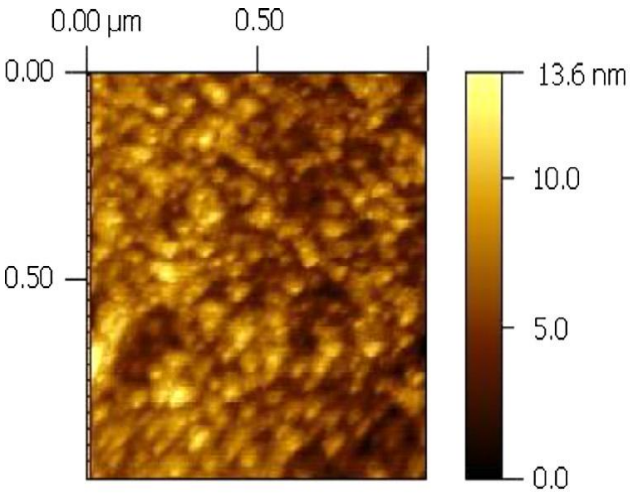
در این مطالعه روش جدیدی برای محاسبه طول همبستگی سطح با کد نویسی در نرم افزار MATLAB ارائه شده است. در این روش، ابتدا قله های موجود در تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی مشخص شده و سپس فاصله نزدیک ترین همسایه های هر قله در هر جهت اندازه گیری می‌شود. این فرایند با حرکت مارپیچ در اطراف هر قله صورت گرفته و نزدیکترین قله ها در هر جهت شناسایی می‌شود و به این ترتیب فاصله تا قله های همسایه را اندازه گیری می‌کنیم، سرانجام نمودار فراوانی فواصل بدست آمده در سراسر تصویر تعیین می‌شود. حال طول همبستگی سطح با محاسبه ریشه میانگین مربعات (Root Mean Square) فواصل به دست آمده محاسبه می‌شود.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

نتایج و مقایسه

در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهاد شده در آنالیز تصویر و استخراج مشخصات سطح، یک تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی از سطح HfO2/Cu/HfO2 با ابعاد $1\mu m \times 1\mu m$ مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱) [۱].



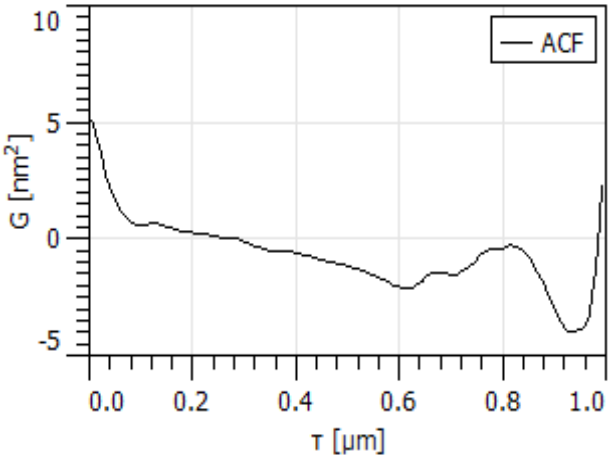
شکل ۱: تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی از سطح $HfO_2/Cu/HfO_2$ [۱].

تابع خود همبستگی، همگردش (convolution) تصویر سطح با سطح انتقال یافته به اندازه τ در راستای افقی است. برای محاسبه این تابع ابتدا τ برابر صفر قرار داده می‌شود که در این حالت تابع خود همبستگی بیشترین مقدار را دارد. با افزایش τ مقدار تابع خود همبستگی نسبت به مقدار بیشینه کاهش می‌یابد[۷]. به عبارت دیگر تابع خود همبستگی معیاری برای همسانی ارتفاعات سطح است.

تابع ACF محاسبه شده توسط نرم‌افزار Gwyddion در شکل۲ آمده است. در این نمودار محور افقی(T) مقدار انتقال سطح و محور عمودی(G) مقدار خود همبستگی سطح به ازای انتقال های متفاوت را نشان می‌دهد.

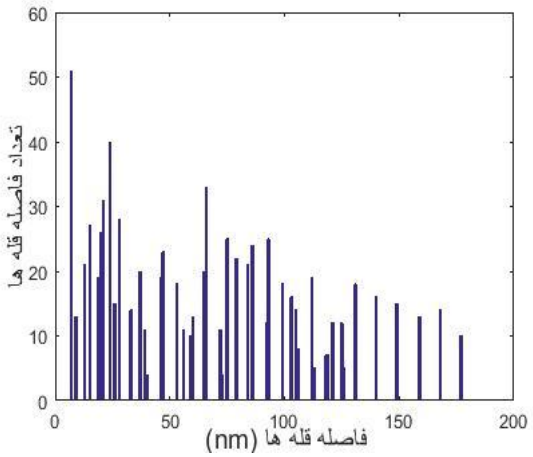
طول همبستگی در نقطه‌ای که تابع خود همبستگی به ۰/۳۶۸ مقدار بیشینه خود می‌رسد، برابر ۴۹ نانومتر است.

همچنین مقدار Rq محاسبه شده توسط Gwyddion برابر با ۲/۳ نانومتر است.



شکل ۲: تابع خود همبستگی محاسبه شده توسط نرم افزار Gwyddion برای سطح مورد بررسی(شکل۱).

در شکل۳، نمودار فراوانی فواصل قله‌های موضعی طبق روش پیشنهادی در این مقاله ارائه شده است. در این نمودار محور افقی فاصله قله‌ها بر حسب نانومتر و محور عمودی تعداد فاصله قله‌ها را نشان می‌دهد. طول همبستگی به دست آمده توسط روش ارائه شده ۴۵ نانومتر است. این پارامتر نشان می‌دهد قله‌های همسایه در سراسر سطح به طور متوسط ۴۵ نانومتر از یکدیگر فاصله دارند. همچنین Rq بدست آمده توسط رابطه(۱) برابر ۲/۲ نانومتر است.



شکل ۳: نمودار فراوانی فاصله قله ها توسط روش ارائه شده در این مقاله.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]

پارامترهای مورد بررسی توسط نرم افزار Gwyddion و روش ارائه شده در این مقاله در ارائه شده است.

جدول ۱: مقایسه اطلاعات دو روش.

	R_q(nm)	طول همبستگی(nm)
Gwyddion	۲/۲	49
روش پیشنهادی	۲/۳	45

نتیجه گیری

پارامتر Rq محاسبه شده توسط کد نویسی در نرم افزار MATLAB اختلاف بسیار کمی با مقدار بدست آمده توسط نرم افزار Gwyddion دارد. همچنین طول همبستگی بدست آمده توسط روش ارائه شده در این مقاله (۴۵ نانومتر) با طول همبستگی به دست آمده از تابع خود همبستگی در نقطه ای که تابع به ۰/۳۶۸ مقدار اولیه خود می‌رسد(۴۹ نانومتر) قابل مقایسه است.

مرجع‌ها

[1] M. Ramzan *et al.*, "AFM applications to study the morphology of HfO2 multilayer thin films," *Superlattices and Microstructures*, vol. 82, pp.399-405, 2015.

[2] T. Thomas, "Recent advances in the measurement and analysis of surface microgeometry," *Wear*, vol. 33, no. 2, pp.205_233, 1975.

[3] D. Nečas and P. Klapetek, "Gwyddion: an open-source software for SPM data analysis," *Open Physics*, vol. 10, no. 1, pp. 181-188, 2012.

[4] M. Raposo, Q. Ferreira, and P. Ribeiro, "A guide for atomic force microscopy analysis of soft-condensed matter," *Modern research and educational topics in microscopy*, vol. 1, pp.758-769, 2007.

[5] J. P. Davim, *Tribology for engineers: A practical guide*. Elsevier, 2011.

[6] S. M. O. Tavares, "Analysis of surface roughness and models of mechanical contacts," Ph. D. dissertation (Università di Pisa,2005),2005

[7] B. Bhushan, "Surface roughness analysis and measurement techniques," in *Modern Tribology Handbook, Two Volume Set*: CRC press, 2000, pp. 74-144.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-04]