

Research Paper

Quantitative and Qualitative Study of Effective Parameters on Surface Lithography with Scanning Tunneling Microscope¹

Reza Saber^{*2}, Mansoureh Karimi Meshkani³, Iraj Baratloo⁴
and Mitra Abedini⁵

Received:2020.02.04

Revised:2020.12.19

Accepted:2021.02.09

Abstract

In this study, we surveyed the possibility of nanometer scale lithography in ambient condition using a scanning tunneling microscope. Optimized parameters for this purpose have been determined. The study will be hopefully an initiative step toward further progress in manufacturing nano-bio chips and nano-bio electromechanical systems utilized for diagnosis and treatment purposes in medical areas. Tests showed that the scanning tunneling microscope lithography yielded the same result in each test and thus it was reproducible. Using STM microscopy, nanostructures were first created in the form of protruding points on the surface. Then we created linear structures, more complex forms, and finally we were able to write some words. Nanostructures were created on gold surfaces by tungsten, gold, platinum-palladium tips. It is found that the voltage used in lithography is effective on creating nanostructures, and also on the size of nanostructures, so that with increasing voltage, the size of nanostructures increases too. The speed of tip is also another important factor that can affect nanostructures size and their continuity. Time interval between consecutive pulses influences on the nanostructures integration and its value should be specified based on conditions and purposes of lithography. The size of nanostructures ranged between 20 and 150 nm. Tip geometry, humidity and temperature are also likely to be influential factors that require further studies to investigate their effects.

Keywords: *STM, Nanostructures, Gold Surfaces, Lithography.*

¹ DOI: 10.22051/ijap.2021.30175.1147

² Assistant Professor, Advanced Medical Technologies and Equipment Institute: Research Center for Science and Technology in Medicine. Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran. (Corresponding Author). Email: rsaber@sina.tums.ac.ir

³ M.Sc. in Photonics, Advanced Medical Technologies and Equipment Institute: Research Center for Science and Technology in Medicine. Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran. Email: Karimi.mansoreh1@gmail.com

⁴ M. Sc. in Electronic Engineering. Advanced Medical Technologies and Equipment Institute: Research Center for Science and Technology in Medicine. Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran. Email: irajbaratlou@gmail.com

⁵ M. Sc. in Medical Nanotechnology. School of Advanced Technologies in Medicine, Department of Medical Nanotechnology, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran. Email: abedinimitra@yahoo.com.

<https://jap.alzahra.ac.ir/>

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهرا
سال دهم، پیاپی ۲۲، پاییز ۱۳۹۹

مقاله پژوهشی

مطالعه و بررسی کمی و کیفی پارامترهای مؤثر در انجام لیتوگرافی سطح با میکروسکوپ تونلی روبشی^۱

رضا صابر*^۲، منصوره کریمی مشکانی^۳، ایرج براتلو^۴ و میترا عابدینی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۱

چکیده

در این مطالعه امکان انجام لیتوگرافی در مقیاس نانومتری در شرایط اتمسفر محیطی با کمک میکروسکوپ STM بررسی و پارامترهای بهینه برای انجام این کار مشخص شد، تا گام نخست برای پیشرفت‌های آینده در زمینه ساخت نانوزیست تراشه‌ها و سامانه‌های نانو الکترومکانیکی برای تشخیص و بعضاً درمان در زمینه پزشکی باشد. آزمایش‌ها نشان داد که لیتوگرافی با میکروسکوپ STM با تکرارپذیری بسیار خوبی انجام می‌شود. به کمک میکروسکوپ STM، ابتدا نانو ساختارهایی به شکل نقاط برآمده بر سطح ایجاد شد.

^۱ DOI: 10.22051/ijap.2021.30175.1147

^۲ استادیار، پژوهشکده فناوری‌ها و تجهیزات پیشرفته پزشکی، مرکز تحقیقات علوم و تکنولوژی در پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). Email: rsaber@sina.tums.ac.ir

^۳ کارشناسی ارشد فوتونیک، پژوهشکده فناوری‌ها و تجهیزات پیشرفته پزشکی، مرکز تحقیقات علوم و تکنولوژی در پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران. Email: Karimi.mansoreh1@gmail.com

^۴ کارشناسی ارشد مهندسی برق الکترونیک، پژوهشکده فناوری‌ها و تجهیزات پیشرفته پزشکی، مرکز تحقیقات علوم و تکنولوژی در پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران. Email: irajbaratlou@gmail.com

^۵ کارشناسی ارشد نانو فناوری پزشکی، دانشکده فناوری‌های نوین پزشکی، گروه نانو فناوری پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران. Email: abedinimitra@yahoo.com

نانوساختارها بر سطوح طلا به وسیله نوک‌های تنگستن، طلا، پلاتین-پالادیوم و رمانیم ایجاد شد و هدایت الکتریکی طلا با مقاومت الکتریکی $10^{-9} \times 22/1$ در روند ساخت نانوساختارها نتایج بهتری را نشان داد. مشخص شد که ولتاژ استفاده شده در لیتوگرافی در ایجاد نانوساختار تأثیر گذار است، همچنین این عامل در اندازه نانوساختارها نیز مؤثر است به طوری که با افزایش ولتاژ اندازه نانوساختارها نیز بزرگ می‌شود. به علاوه، سرعت حرکت نوک در حین انجام لیتوگرافی عامل مؤثر دیگری است که در اندازه نانو ساختار و پیوستگی آن تأثیر گذار است. زمان بین تپ‌های متوالی نیز در مرتب بودن نانوساختارها و پیوستگی آن‌ها مؤثر است و باید بر حسب شرایط و هدف لیتوگرافی مقدار آن مشخص شود. اندازه نانوساختارهای ایجاد شده در این مطالعه بین ۲۰ تا ۱۵۰ نانومتر بود. انجام فرایند لیتوگرافی به صورت کاملاً تکرارپذیر تا حداقل ولتاژ ۳ ولت و حداکثر سرعت ۱۵۰ نانومتر در ثانیه بر سطح طلا صورت گرفت. شکل هندسی نوک، رطوبت و دما نیز احتمالاً جزء عامل‌های تأثیر گذارند که بررسی تأثیر این پارامترها مستلزم مطالعات بیشتر است.

واژگان کلیدی: لیتوگرافی، STM، نوک، نانوساختار، سرعت حرکت.

۱. مقدمه

فناوری تولید نانوساختارها از جمله پژوهش‌های مهم در سال‌های اخیر بوده است. تلاش‌های بی‌شماری برای بهبود این فناوری انجام شده است. در این میان فوتولیتوگرافی و به دنبال آن سونش یونی^۱ از پرکاربردترین تکنیک‌ها هستند و در پیشرفت یکپارچگی در مقیاس بزرگ (LSI) و سامانه‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS) سهم به‌سزایی داشته‌اند. به نظر می‌رسد فوتولیتوگرافی به منظور تولید ریزساختارها و نانوساختارها در حجم انبوه مناسب باشد زیرا یک فرایند ساخت با توان عالی است. فرایند ساخت (LIGA) (لیتوگرافی، آب‌کاری، قالب‌دهی) را می‌توان برای ساخت ساختارهای انبوه استفاده کرد. با این همه، این کار مستلزم استفاده از ابزارهای پیچیده‌ای است که در عین حال وقت‌گیر هم هستند. چندین تلاش موفق در لیتوگرافی با استفاده از میکروسکوپ پروب روبشی (SPM)، باریکه الکترونی (EB) و باریکه یونی متمرکز (FIB) به منظور ساخت و تبدیل ساختارهای میکروسکوپی به نانو مقیاس انجام شده است. لیتوگرافی میکروسکوپ پروبی روبشی (SPM) به دلیل سادگی و دقت و هزینه کم، روشی کاربردی است [۳-۱].

^۱ Ion etching

تکنیک‌های میکروسکوپ پروبی روبشی (SPM) در سال‌های اخیر به طور گسترده به کار گرفته شده است، تا اتم‌ها و خوشه‌ها بر سطوح نشانده شود و ساخت سازه‌ها در مقیاس نانومتر انجام شود. نانوساختارهای ناشی از SPM بر روی فلزات و نیمرساناها و مواد آلی ساخته شده‌اند. بنابراین، راهبردهای ساخت برای تأمین گزینه‌هایی از نظر فنی ممکن و مقرون به صرفه مورد نیاز است. در حال حاضر، میکروسکوپ پروبی روبشی فناوری مبتنی بر SPM به دلیل کم‌هزینه بودن و قابلیت فنی عالی، در ساخت سازه‌های نانومقیاس به طور روزافزون رایج شده است [۴].

نانولیتوگرافی با استفاده از میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی (STM) و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) را می‌توان در سامانه‌هایی که روش‌های پرتو X و پرتوهای الکترونیکی سنتی به حداکثر توان نظری و کاربردی خود رسیده‌اند، استفاده کرد. روش‌های دست‌کاری اتمی و ملکولی می‌تواند شامل حذف یا رسوب اتم‌های یک ساختار بر یک سطح دیگر باشد. ساخت نانوساختار در مقیاس بزرگ‌تر ممکن است شامل انتقال مواد و اصلاح سطح صدها اتم از طریق فرایندهایی مانند تبخیر عمومی و دفع تحریک الکترونیکی باشد.

رویکردهایی با استفاده از سازوکار STM برای نانوذرات بررسی و آزمایش شده است. یکی از این رویکردها، خراش مکانیکی زیرلایه یا فیلم دارای استحکام است، اما روش تنظیم‌پذیری نیست. با توجه به قرارگیری رأس بسیار تیز نوک که بعضاً به یک اتم نیز می‌رسد و با توجه به آنکه در فاصله‌ای بسیار کم در حد یک الی چهار اتم کربن از سطح قرار می‌گیرد، میدان الکتریکی نسبتاً بزرگی در این حد فاصل ایجاد می‌شود (هر چند که مقدار ولتاژ اعمالی در حد یکی دو ولت در حین فرایند لیتوگرافی بیشتر نیست) که این میدان می‌تواند باعث تبخیر یا ذوب شدن ملکول‌ها و اتم‌ها شود و از این روش برای ساخت سازه‌های کوچک استفاده کرد. همچنین، بمباران‌های الکترون‌های کم‌انرژی می‌تواند سبب ایجاد الگوهای نانویی توسط واکنش‌های شیمیایی شود. اکسایش ناشی از میدان در زیر نوک STM (یا AFM رسانا) در شرایط محیط، روش امیدوارکننده‌ای برای الگوبرداری از بسترهای فلزی و نیمرساناست؛ از این روش برای ساخت دستگاه‌های مختلف در مقیاس نانومتر استفاده کرده‌اند.

نانوساختار ناشی از STM متعاقباً برای انتقال الگو در یک فرایند لیتوگرافی منظم از جمله سونش یونی (خوردگی یونی) واکنش‌پذیر به کار می‌رود. مواد مستحکم مانند پلی متیل متاکریلات (PMMA)، فیلم‌های لانگمویر بلودجت LMS، تک‌لایه‌های خودمونتاژ شده استفاده شده است. سامانه‌های تک‌لایه اتمی جذب شده مانند سیلیکون هیدروژنه به طور فزاینده‌ای به عنوان مواد مستحکم نازک بی‌نقص برای لیتوگرافی مبتنی بر STM استفاده شده‌اند. فیلم‌های مستحکم به دلیل عمق نفوذ بسیار کم الکترون‌های کم‌انرژی در مواد جامد باید بسیار نازک باشد [۵].

امروزه، یکی از پرکاربردترین ابزارهای میکرو، مدارهای مجتمع هستند. روش میکرولیتوگرافی حیاتی‌ترین فرایند در ساخت مدارهای مجتمع در صنایع نیم‌رساناست. فرایند لیتوگرافی برای چاپ الگوهای مداری IC بر روی پوشش انتقال‌دهنده فتورزیست روی ویفر استفاده می‌شود. روش لیتوگرافی به دلیل وضوح آن در تعیین کوچکی اندازه اشکال و زمان در معرض قرارگرفتن مؤثر بر بازده، حیاتی است [۶].

اولین بار ریچارد فاینمن در ۱۹۵۹، طی سخنرانی خود با بیان امکان به راه‌اندازی فرایندی برای دستکاری اتم‌ها و ملکول‌ها با استفاده از ابزارهای دقیق باعث شد تا پژوهشگران به سمت توسعه چنین ابزارها و فرایندهایی متمایل شوند [۷]. در ۱۹۷۴، نوریو تانیگوچی^۱، مدرس دانشگاه علوم توکیو، نخستین بار واژه "فناوری نانو" را به کار گرفت. او در مقاله‌ای با نام "مفهوم اساسی فناوری نانو" اشاره می‌کند که این فناوری اساساً مجموعه‌ای از فرایندهای تفکیک و ادغام و تشکیل مواد در حد یک اتم یا یک ملکول است [۸]. در دهه ۱۹۸۰، این تعریف به طور وسیع‌تر توسط درکسلر (نویسنده کتاب موتور خلقت) بررسی شد [۹، ۱۰]. فناوری نانو و علوم نانو در اوایل دهه ۱۹۸۰ و اختراع میکروسکوپ تونل‌زنی پیمایشی آغاز به کار کرد. این پیشرفت سبب کشف فلورین در ۱۹۸۶ و نانولوله‌های کربنی در چند سال بعد شد [۱۱].

STM که در ۱۹۸۱ توسط بینینگ^۲ و همکاران معرفی شد، اولین میکروسکوپ پروبی در نوع تصویربرداری خود با وضوح جانبی و عمودی در حد انگستروم بود. یک ولتاژ کم در حد چند میلی ولت و بعضاً کمتر بین یک نوک فلزی بسیار تیز و سطح نمونه اعمال می‌شود. هنگامی که رأس این نوک نزدیک به سطح نمونه برسد، الکترون می‌تواند بین دو الکتروود تونل بزند. جریان تونل‌زنی نسبت به فاصله از سطح نمونه متغیر است. لذا، با استفاده از همین فاصله یا فضایی در حدود یک الی یک و نیم نانومتر از سطح نمونه که به آن گاف نیز گفته می‌شود و نیز سعی در ثابت نگاه داشتن فاصله از سطح نمونه می‌توان تغییرات توپوگرافی و یا همان پستی و بلندی‌های سطح را با استفاده از یک نرم‌افزار که برای همین سیستم‌ها طراحی شده است ترسیم کرد و یک تصویر دو یا سه بعدی به دست آورد. محدودیت اصلی STM آن است که تنها می‌توان از آن برای تصویربرداری از نمونه‌های رسانا استفاده کرد و این محدودیت حوزه کار با دستگاه را کم می‌کند، در حالی که با توجه به سازوکار دستگاه و ارتباط آن با الکترون‌ها حساسیت دستگاه و دقت آن بسیار فوق‌العاده است [۱۱].

¹ Norio Taniguchi

² G. Binnig

امکان دستکاری سطح مواد در مقیاس نانومتر بر سطح نمونه توسط پروب‌های تصویربرداری برای اولین بار در ۱۹۸۷ توسط بکر و همکاران نشان داده شد. از آن زمان تاکنون تلاش زیادی در این زمینه انجام گرفته است و به عنوان لیتوگرافی پروب تصویربرداری (SPL) نامگذاری شده است. استافر^۱ و همکاران بر روی $Rh_{25}Zr_{75}$ با استفاده از STM لیتوگرافی کرده‌اند [۱۲]. در ادامه فعالیت‌های صورت گرفته در این زمینه، خطوط اکسید کروم (Cr_2O_3) بر روی ویفر سیلیکون لیتوگرافی شد [۱۳]. از STML در شرایطی خاص و برنامه‌ریزی شده می‌توان جهت اصلاح مواد فلزی و سرامیکی استفاده کرد. داگاتا^۲ و همکاران از STM برای القای اکسیایش موضعی بر روی ویفر سیلیکون استفاده کردند [۱۴]. در حال حاضر، فناوری مبتنی بر SPL در ایجاد ساختارهای نانومقیاس بر روی انواع مختلفی از مواد توجه زیادی را به خود جلب کرده است، در حالی که روش‌های لیتوگرافی معمولی محدودیت‌های اساسی در کوچک‌سازی ابعاد دارند. به ویژه در کوچک‌سازی میکروالکترونیک، SPL امکانات امیدوارکننده‌ای در ساخت دستگاه‌های نانو و توسعه الگوهای مهندسی شده برای رشد فیلم‌های نازک برآراستی ارائه کرده است. بسیاری از سطوح مواد مانند سیلیکون و گرافیت و $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ توسط SPL اصلاح شده‌اند. با تحقیقات انجام شده مشخص شد که ایجاد نانو ساختارها به شدت تحت تأثیر ولتاژ اعمالی، جریان تونل‌زنی، سرعت روبش و شرایط محیط قرار دارد. سازوکار لیتوگرافی بسته به شرایط آزمایشی متفاوت است و هنوز محل بحث است [۱۵].

در تحقیقاتی، نانولیتوگرافی STM بر سطوح فیلم نازک SRO انجام شده است. در این بررسی، عمق خط با افزایش ولتاژ اعمالی افزایش می‌یابد، اما با افزایش جریان تونل‌زنی به طرز چشمگیری تغییر نمی‌کند. وابستگی عرض به جهت گیری ولتاژ با نظری مبتنی بر تبخیر ناشی از میدان مطابقت دارد. در این میان، تبخیر ناشی از میدان به طور گسترده‌ای به عنوان یک روش مهم یا در برخی موارد غالب در زمینه آزمایش لیتوگرافی پذیرفته می‌شود [۱۶].

در این مطالعه، نانولیتوگرافی فناوری میکروسکوپ تونل‌زنی STM ارائه و اصول و رویکردهای فناوری و پارامترهای اعمالی حین کار با این ابزار به صورت عملی انجام شد و نتایج آن در ادامه نشان داده شده است.

۲. لیتوگرافی میکروسکوپ تونلی روبشی

اخیراً، گرایش به ساختارهای مفید طراحی شده در مقیاس نانومتر در علم و فناوری به سرعت افزایش یافته است و این فناوری‌ها برای ساخت نانو ساختارها ویژه و پراهمیت هستند. الگوبرداری

¹ Stauffer

² Dagata

از مواد در این مقیاس با اهمیت زیادی در لیتوگرافی آینده به منظور دستیابی به تراکم ادغام بالاتر برای دستگاه‌های نیم‌رسانا صورت می‌گیرد.

ظهور علم و فناوری نانو بستگی به توانایی قرارگیری و دستکاری و ساخت انواع سازه‌ها و مواد و دستگاه‌ها با دقتی در مقیاس نانومتر دارد. روش‌های لیتوگرافی معمولی، مربوط به لیتوگرافی باریکه نوری و الکترونی با توجه به مقرون به صرفه نبودن یا نامناسب بودن آن‌ها برای کنترل انواع زیادی از سامانه‌های آلی و بیولوژیکی موجود در فناوری نانو است. نیروهای محرک مختلف برای توسعه روش‌های جایگزین تولید نانو ساختارها در نظر گرفته شده‌اند. این روش‌ها تقریباً در ۱۹۹۰ ایجاد شده‌اند و سپس آن‌ها به ایجاد سه روش اصلی نانولیتوگرافی انجامیده‌اند:

(۱) لیتوگرافی نانو؛

(۲) لیتوگرافی نرم؛

(۳) لیتوگرافی بر پایه پروبی روبشی؛

از تکنیک‌های SPM می‌توان در تصویربرداری و اندازه‌گیری سطوح استفاده کرد. علاوه بر این، ممکن است از آن‌ها برای اصلاح سطوح نمونه استفاده کرد. SPMها، به ویژه میکروسکوپ‌های نیروی اتمی، به دلیل توانایی تصویربرداری در ابعاد زیر ۱۰ نانومتر، وسیله‌ای عالی در فناوری نانو هستند. طیف گسترده‌ای از سطح اعم از ملکول‌های زیستی تا مدارهای مجتمع نیز به عنوان ابزارهای نانو لیتوگرافی قابلیت خوبی نشان داده‌اند. الگوی کنترل‌شده‌ای از ویژگی‌های مقیاس نانومتر با SPM با عنوان Scan Probe Lithography (SPL) شناخته شده است. تکنیک‌های SPM که برای ساخت شیار بر سطوح استفاده می‌شود عبارت است از: میکروسکوپ تونل‌زنی (STM) و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) [۴].

اولین SPM اختراع شده STM در ۱۹۸۱ توسط بینینگ و همکاران بود. همانطور که در شکل ۱ نشان داده‌ایم، در STM از یک نوک رسانای تیز با ولتاژ اعمالی بین نوک و نمونه هدف استفاده می‌شود. هنگامی که نوک در محدوده اتمی نمونه قرار دارد یعنی در فاصله و گاف یک الی یک و نیم نانومتری، بسته به علامت ولتاژ اعمالی، الکترون‌های موجود در نمونه از خود نمونه تا نوک نوک یا برعکس شروع به تونل‌زنی می‌کنند. افزایش یا کاهش مقدار جریان تونلی تماماً به صورت نمایی است، به طوری که هر انگستروم نزدیکی به نمونه سبب افزایش سه الی ده برابری جریان تونلی بین نمونه و نوک می‌شود. کارکرد یا مدهای کارکردی STM دو حالت عملکرد دارد، که از آن‌ها به عنوان حالت‌های جریان ثابت و ارتفاع ثابت یاد می‌کنیم. در حالت ارتفاع ثابت، رأس نوک در یک صفحه افقی بالاتر از نمونه در حالی که مدار باز خورد تقریباً در حالت

خاموش قرار دارد حرکت می‌کند. در این حالت جریان تونل‌زنی ناشی از انتقال الکترون، که به توپوگرافی و خصوصیات الکترونیکی سطح محلی بستگی دارد، تصویر STM را تشکیل می‌دهد. این حالت بیشتر در تصویربرداری از سطوح بسیار صاف که پستی و بلندی اتمی دارند استفاده می‌شود. در حالت جریان ثابت، ارتفاع نوک توسط سیگنال‌های مدار بازخورد تنظیم می‌شود تا جریان تونل‌زنی را در حین روبش ثابت نگه دارند و تغییر ارتفاع نوک نشان‌دهنده تصویر است. در STM، سیستم در حالت جریان ثابت قرار دارد و سپس زمانی که نوک در جا و محل مناسب قرار گرفت بارها و بارها ولتاژهای مناسب برای آن نقطه خاص مد نظر اعمال می‌شود و سپس در جاهای دیگر به نوک همان ولتاژ جریان ثابت اعمال می‌شود [۱۵].

دو مؤلفه اساسی فناوری لیتوگرافی با استفاده از STM توانایی در تصویربرداری از طرح‌واره سطح و اصلاح یک سطح یا لایه نازک برای الکتروبرداری است. نتایج این پژوهش مربوط به لیتوگرافی با استفاده از تصویربرداری STM و روند فرایند لیتوگرافی در STM است [۴].

لیتوگرافی غیر تماسی مبتنی بر STM قبلاً در حالت انتشار مستقیم مطالعه شده است و عموماً در خلأهای فوق‌العاده شدید (UHV) برای حفظ جریان انتشار پایدار انجام می‌شود [۱۶-۱۹]. اکسایش موضعی سیلیکون نیز با استفاده از AFM در حالت بدون تماس و براساس شیب نیرو انجام شده است [۲۰]. عملکرد در UHV ممکن است دشوار و وقت‌گیر باشد. الگوی STM همچنین از توانایی هم‌ترازی ضعیف برخوردار است، زیرا تصویربرداری می‌تواند مقاومت را تحت تأثیر قرار دهد. وایلدرا^۱ و همکاران [۲۱]، که بخشی از گروه Quate هستند، یک روش جایگزین لیتوگرافی غیر تماسی بر اساس عملکرد AFM در هوا معرفی کردند. آن‌ها در یافتند که با استفاده از یک مدار بازخورد جریان فعال با بازده مطلوب، می‌توانند انتشار پایداری از الکترون‌ها از نوک AFM را حفظ کنند، که بعداً به عنوان سیگنال بازخورد برای تنظیم فاصله نوک به نمونه استفاده شد. دستگاه AFM با موقعیت‌یابی عمودی به علت دقت بسیار عالی پیزوهای به‌کاررفته در راستای عمودی یا Z و تنظیم دقیق جریان ثابت از نوک برای به دست آوردن ساختارهایی به اندازه‌های زیر ۳۰ نانومتر و با قطر ۶۵ نانومتر استفاده شده است [۴].

با در نظر گرفتن مزیتی همچون دقت فوق‌العاده و دیگر خصوصیات منحصربه‌فرد شامل قیمت ارزان و عملکرد نسبتاً ساده فناوری‌های نانو ساختار براساس SPM به روش‌های گوناگون از نظری تا تجاری شدن توسعه یافته‌اند. در نتیجه، لیتوگرافی SPM یا SPML فرصت بی‌نظیری برای نوآوری فراهم می‌کند و به عنوان ابزاری منحصربه‌فرد برای نانو ساختار مطرح شده است.

^۱ Wilder

حساسیت‌های فضایی بزرگ و فوق‌العاده جریان تونلی، مزایای اساسی استفاده از STML را برای نانوساختار نشان می‌دهد. در حقیقت جریان تونلی را می‌توانیم به عنوان یک باریکه الکترونی بسیار کوچک برای رسیدن به عملکردهای نوشتن کاملاً مستقیم در مقیاس‌های کوچک در نظر بگیریم، که به طور معمول به وسیله لیتوگرافی باریکه الکترونی (EBL) انجام می‌شود. STML نسبت به EBL چندین مزیت دارد. جریان‌های تونلی STM حدود ۳ برابر بیشتر هستند که عملکرد STML را برای در معرض قرار دادن لایه محافظ با وضوح مطلوب ساده‌تر می‌سازد. زیرا رزیت با وضوح مطلوب به طور طبیعی حساسیت کمتری دارد. ولتاژهای به کاررفته در STML به طور معمول ۴ برابر کمتر از EBL هستند [۲۰].

۳. عملکرد STM

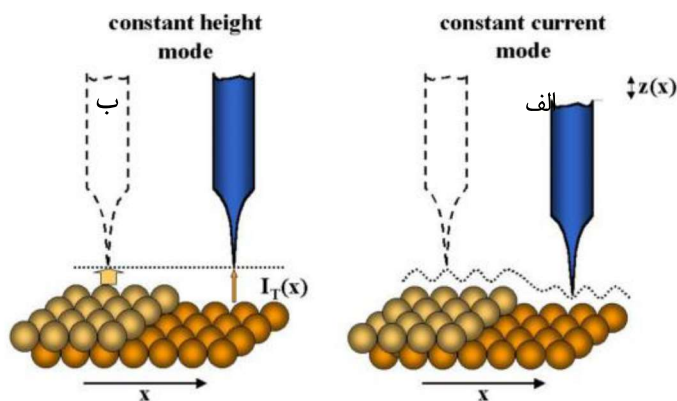
میکروسکوپ‌های تونل‌زنی روبشی STM پیمایشگری است که برای مطالعه ویژگی‌های سطحی مواد از ابعاد میکرون تا کمتر از ابعاد اتمی استفاده می‌شود. میکروسکوپ‌ها قادرند ویژگی‌های فیزیکی سطح مانند هدایت الکتریکی سطحی، توزیع بار الکتریکی ساکن، کشش سطحی نقطه‌ای، میدان مغناطیسی و ماژول کشسانی را اندازه‌گیری کنند.

پروپ STM یک سوزن فلزی تیز نانومقیاس و اغلب با مقیاس اتمی است. وقتی نوک در نزدیکی سطح و معمولاً در یک الی یک و نیم نانومتری از سطح قرار دارد با اعمال ولتاژ، جریان تونلی بین نوک و سطح جاری می‌شود. در یک ولتاژ پیش‌ولت کوچک (V) یا همان اعمالی جریان تونلی (I) به وسیله فرمول زیر تخمین زده می‌شود،

$$I \propto V e^{d \frac{-\sqrt{8m\phi}}{h}} \quad (1)$$

در این معادله d فاصله بین نوک STM و نمونه و Φ تابع کار نوک است [۲۲].

برای یک تابع کار معمول 4eV، جریان تونلی به ازای افزایش فضا یا گاف بین نوک و نمونه، به اندازه ۱ انگستروم حدوداً به اندازه ۳ الی ۱۰ برابر کاهش می‌یابد. به همین دلیل، جریان تونلی به طور معمول کاملاً در انتهای نوک که اغلب یک اتم است محصور می‌شود که تزریق جریان تنها به یک ناحیه با مقیاس نانومتر را امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین تغییر جریان تغییرات فاصله گاف یا فضا را نشان می‌دهد. در STM با مد تصویربرداری ارتفاع ثابت به منظور حفظ فاصله شکاف یا همان گاف ثابت، سیگنال جریان تونلی به وسیله مدار بازخورد بین نوک و سطح پایش می‌شود. در شکل ۱، مدهای تصویربرداری جریان ثابت و ارتفاع ثابت نمایش داده شده است.



شکل ۱ مد جریان ثابت (الف) و مد ارتفاع ثابت (ب) در میکروسکوپ STM.

در مد لیتوگرافی در این میکروسکوپ با این مفهوم که، هنگامی که فاصله نوک نمونه به چندین انگستروم از سطح کاهش می‌یابد، میدان الکتریکی اعمالی به اندازه کافی برای شکستن پیوند اتمی و یونیزه کردن اتم‌ها قوی می‌شود و از سطح نمونه یا نوک ذوب یا تبخیر می‌شود. تبخیر ناشی از میدان القایی فرایندی فعال شده با گرما است و میزان تبخیر توسط رابطه (۲) تعریف می‌شود، که در این معادله Q انرژی فعال‌سازی و ν ضریب بسامد (حدود 10^{13} هرتز) است. نظریه تبخیر میدانی، بسیاری از پدیده‌های کشف شده در آزمایش‌های SPL مانند ولتاژ پیش‌ولت آستانه و برگشت‌پذیری انتقال مواد را با موفقیت توضیح می‌دهد [۱۱]،

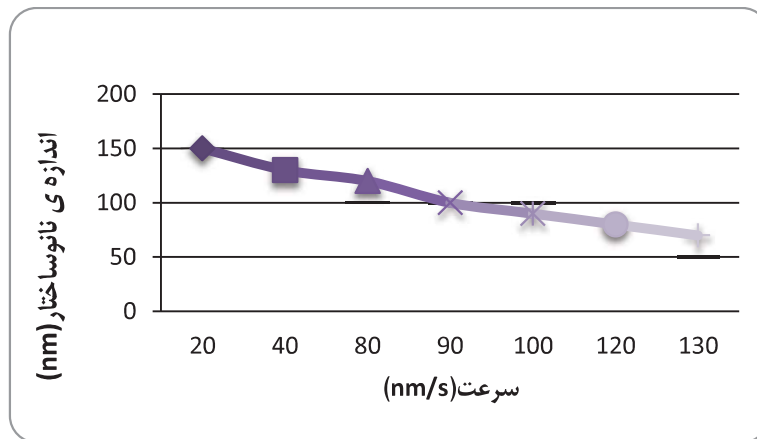
$$\kappa = \nu \exp(-Q / kT) \quad (2)$$

در مطالعه ما، لیتوگرافی میکروسکوپ تونلی روبشی (STM) را بر سطوحی از جنس طلا و تحت شرایط محیط با شرایط ولتاژی مختلف با دستگاه NAMA-STM ساخت شرکت نانوسیستم پارس ایران انجام داده‌ایم.

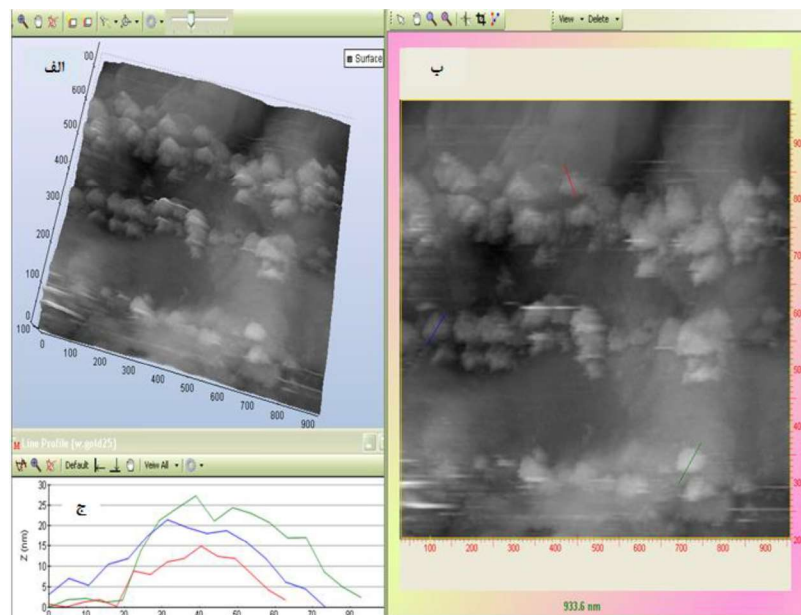
۴. نتایج

عوامل بسیاری از جمله نوع نوک، ولتاژ اعمالی در هنگام لیتوگرافی، سرعت حرکت نوک در فاصله حدود یک نانومتر بر سطح و فاصله زمانی تپ‌ها در هنگام لیتوگرافی در ایجاد و کیفیت نانوساختارها تأثیر دارد. افزایش ولتاژ با افزایش اندازه نانوساختارهای ایجادکننده هر الگو همراه است. با کاهش سرعت، اندازه نانوساختارهای نقطه‌ای افزایش و پیوستگی نانوساختارها بیشتر می‌شود. علت این پدیده به فرصت لازم جهت انجام لیتوگرافی بر می‌گردد که با کاهش سرعت زمان لازم جهت لیتوگرافی و ایجاد نانوساختارها فراهم می‌آید. در شکل ۲، نمودار ارتباط اندازه نانوساختار با افزایش سرعت و در شکل ۳ تصاویر سطوح در سرعت‌های مختلف نمایش داده شده است.

۲۶ / مطالعه و بررسی کمی و کیفی پارامترهای مؤثر در انجام لیتوگرافی سطح با میکروسکوپ تونلی روبشی



شکل ۲ نمودار ارتباط اندازه نانوساختار با افزایش سرعت.



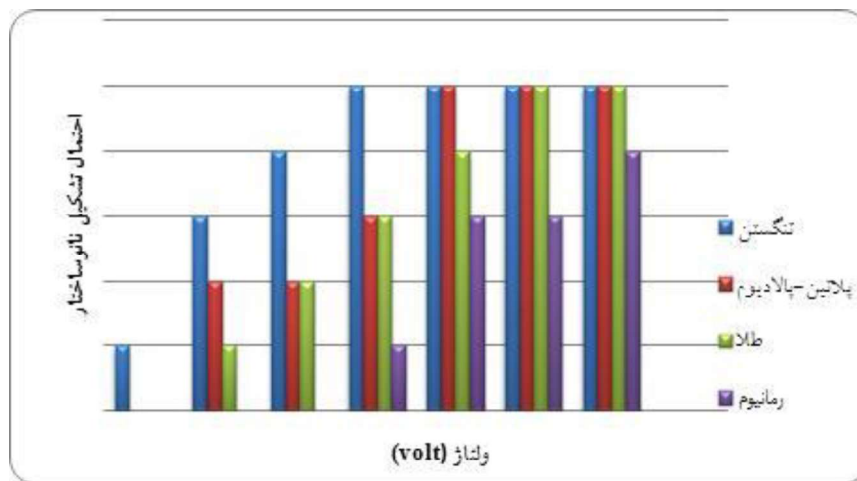
شکل ۳ تصویر (الف) تصویر سه بعدی سطح نشان دهنده ایجاد نانوساختارهای خطی با سه سرعت متفاوت (الف) از بالا به پایین ۲۰ نانومتر در ثانیه، ۴۰ نانومتر در ثانیه، ۸۰ نانومتر در ثانیه. تصویر (ب) همان سطح به صورت نمایش دوبعدی و تصویر (ج) نمودار اندازه نانوساختارهای ایجاد شده.

در این مطالعه، عواملی چون جریان اعمالی در ایجاد نانوساختارها و تغییر اندازه آن‌ها تأثیر چندانی نداشت. البته رابطه بین جریان و ولتاژ اعمالی به هم وابسته بوده و این عامل جریان در ولتاژ

لحاظ شده و ولتاژ به نحوی این پارامتر را پوشش داده است. پارامتر نوع نوک در هنگام لیتوگرافی از جمله پارامترهای تأثیرگذار بوده که در ادامه به طور مفصل تشریح شده است.

امکان ایجاد نانوساختار به وسیله نوک‌های مختلف تنگستن، پلاتین-پالادیوم، رمانیم و طلا در ولتاژهای مختلف بر سطح طلا بررسی شد. نتایج ایجاد نانوساختارها با ولتاژهای مختلف در نمودار زیر نمایش داده شده است. از بررسی نتایج این آزمایش‌ها در می‌یابیم که احتمال ایجاد نانوساختار به وسیله نوک طلا با افزایش ولتاژ به صورت خطی افزایش می‌یابد و ایجاد نانوساختار به وسیله نوک از ۴ ولت به بالا امکان‌پذیر است. نوک پلاتین-پالادیوم نتایج مشابهی با طلا نشان می‌دهد اما رابطه ایجاد نانوساختار به وسیله نوک طلا با ولتاژ، خطی‌تر از این رابطه درباره نوک پلاتین-پالادیوم است. نوک تنگستن از ولتاژ ۳ تا ۱۰ ولت را پوشش می‌دهد. البته ایجاد نانوساختار با نوک تنگستن نیز همچون سایر نوک‌ها در ولتاژ کمتر از ۴ ولت با مشکل مواجه می‌شود که با تغییر پارامتر سرعت ایجاد نانوساختار در ولتاژ کمتر از ۴ ولت با نوک تنگستن امکان‌پذیر می‌شود، در حالی که در سایر موارد (نوک‌های طلا، پلاتین-پالادیوم، رمانیم) این گونه نیست. نوک رمانیم نسبت به سایر نوک‌ها نتایج خوبی نشان نمی‌دهد. با استفاده از این نوک در ولتاژهای کمتر از ۶ ولت ما قادر به ایجاد نانوساختار نشدیم و در ولتاژ ۶ ولت نیز احتمال ایجاد نانوساختار پایین و حدود ۲۰٪ است و حتی در ولتاژهای بالا نیز احتمال ایجاد نانوساختار به وسیله این نوک از ۸۰٪ تجاوز نمی‌کند.

شاید بتوان نتایج این آزمایش‌ها را با توجه به مقاومت الکتریکی هر یک از این فلزات بررسی کرد. مقاومت الکتریکی تنگستن $9-10 \times 54$ ، طلا $9-10 \times 22$ ، پلاتین-پالادیوم $9-10 \times 105$ و رمانیم $9-10 \times 110$ است (مقاومت‌های الکتریکی بر حسب اهم و در دمای ۲۰ درجه سلسیوس هستند). بر طبق این مقاومت‌های الکتریکی می‌توان نتیجه گرفت که هدایت الکتریکی طلا بهتر از تنگستن، تنگستن بهتر از پلاتین-پالادیوم و همگی بهتر از رمانیم هستند. پس باید نوک طلا نتایج بهتری نسبت به نوک‌های دیگر نشان دهد و نتایج این آزمایش‌ها مطابق با شکل (۴) تا حدودی با میزان هدایت الکتریکی این فلزات هم‌خوانی دارد، اما تفاوت‌های کوچکی نیز وجود دارد که برای بررسی این تفاوت‌ها بر آن شدیم تا علاوه بر بررسی احتمال ایجاد نانوساختارها به وسیله هریک از این نوک‌ها میزان مرتب بودن نانوساختارهای ایجادشده و پیوستگی آن‌ها و پیروی از الگوی داده‌شده برای ایجاد نانوساختارها به وسیله هر یک از نوک‌ها نیز بررسی شود تا به نتیجه‌گیری دقیق‌تری دست یابیم.

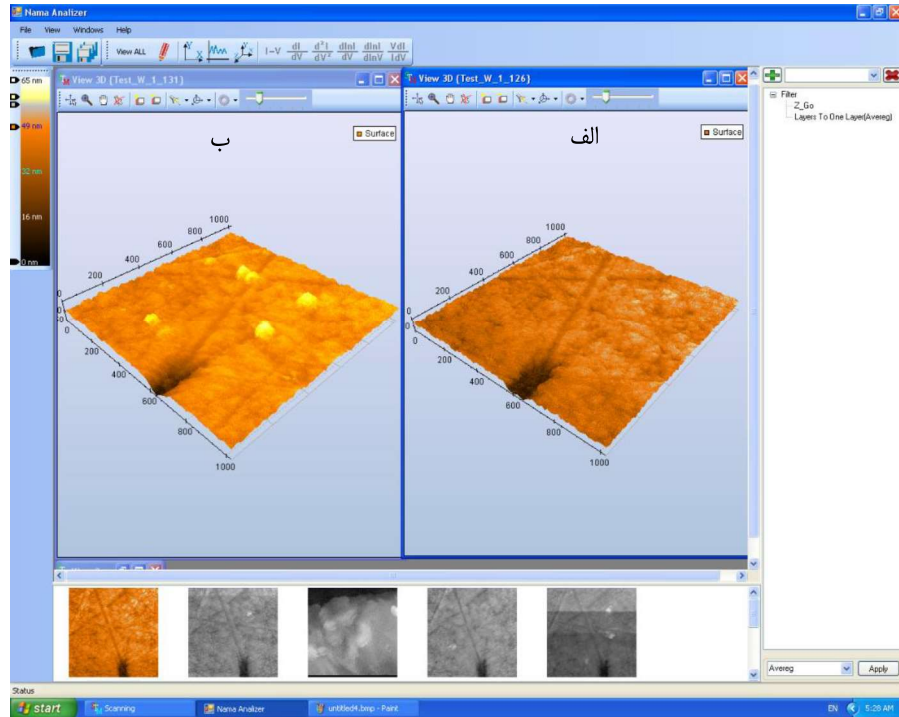


شکل ۴ نمودار نتایج کلی آزمایش‌های مربوط به اثر نوک.

در مرحله قبل، برای بررسی ایجاد نانوساختار تنها ایجاد یک ساختار نقطه‌ای برای ما کافی بود و گاهی هیچ الگوی خطی یا پیچیده‌ای برای ایجاد نانوساختار در نظر گرفته نمی‌شد. در مرحله بررسی پیوستگی و مرتب بودن نانوساختارها از الگوهای خطی و پیچیده‌تری استفاده شد. نتایج نشان داد که نوک تنگستن ساختارهای مرتب‌تری ایجاد می‌کند و با درصد بالایی، از الگوی ایجادشده پیروی می‌کند. بعد از نوک تنگستن که بهترین نوک در ایجاد ساختارهای مرتب بود، نوک‌های رمانیم، پلاتین-پالادیم و طلا در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرد. این نتایج را می‌توان به میزان محکم بودن و سختی این فلزات نسبت داد. نوک تنگستن نسبت به بقیه فلزات جنس سخت‌تری دارد و سخت بودن نوک موجب می‌شود که میزان ارتعاشات احتمالی نوک حین روبش و ولتاژدهی هنگام لیتوگرافی به کمترین میزان برسد، در حالی که نوک طلا به علت نرمی، در حین جایگذاری نوک در قسمت نگهدارنده نوک در پیزو نیز ممکن است دچار انحراف از زاویه ۹۰ درجه با سطح شود و به این ترتیب ولتاژ را به خوبی در نقاط تعیین شده در الگو اعمال نکند و به این ترتیب ساختارها از نظم و ترتیب کافی برخوردار نشوند. علت دیگری که برای این پدیده به نظر می‌آید روش تهیه این نوک‌هاست. نوک تنگستن به روش الکتروشیمیایی و سه نوک دیگر به روش مکانیکی تهیه می‌شود. هر چند تهیه نوک با رأس اتمی با روش مکانیکی نیز امکان‌پذیر است، اما کار ساده‌ای نیست و نیاز به مهارت دارد. به این ترتیب احتمال داشتن نوکی با رأس اتمی و یکنواخت‌تر به لحاظ شکل هندسی سطح از جنس تنگستن بیشتر از داشتن نوکی با رأس اتمی از سایر سیم‌های فلزی است و این خود می‌تواند دلیلی برای مرتب شدن نانوساختارهای

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهراء، سال دهم، پیاپی ۲۲، پاییز ۱۳۹۹ / ۲۹

ایجادشده و بیشتر بودن احتمال ایجاد نانوساختار به وسیله نوک تنگستن در ولتاژهای ۳ تا ۱۰ ولت باشد. در شکل ۵، نمونه‌ای از لیتوگرافی بر سطح طلا نمایش داده شده است. این نتایج با کارهای انجام گرفته در سال ۲۰۰۳ هم‌خوانی دارد [۵].



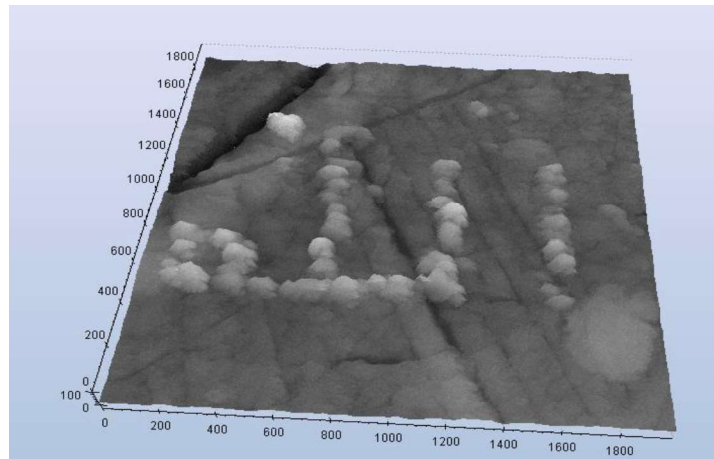
شکل ۵ انجام لیتوگرافی به وسیله نوک تنگستن، تصویر (الف) سطح طلا را پیش از لیتوگرافی و تصویر (ب) سطح طلا پس از لیتوگرافی. پارامترهای لیتوگرافی شامل ولتاژ ۶ ولت، مدت زمان هر تپ ۰,۶ میلی‌ثانیه و فاصله بین تپ‌ها ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه.

در شکل ۵ (الف)، سطح پیش از لیتوگرافی و در شکل ۵ (ب)، ۴ نانوساختار ایجادشده به وسیله نوک تنگستن در ولتاژ ۶ ولت مشاهده می‌شود. برای ایجاد این نانوساختارها الگوی خاصی در نظر گرفته نشد و تنها سعی شده در نقاط خاصی از سطح با اعمال ولتاژ، نانوساختار ایجاد شود. در این شیوه ایجاد نانوساختار، سرعت در حین انجام لیتوگرافی جزء پارامترهای مؤثر نیست زیرا نوک بر سطح حرکت نمی‌کند و تنها از طریق نشانگر نوک در بالای صفحه نرم‌افزار روبش نوک در نقطه خاصی بالای سطح قرار می‌گیرد. فاصله تپ‌ها برای تنظیم اینکه یک تک تپ در یک نقطه اعمال شود بلند در نظر گرفته می‌شوند. مثلاً، در این آزمایش فاصله تپ‌ها ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه در

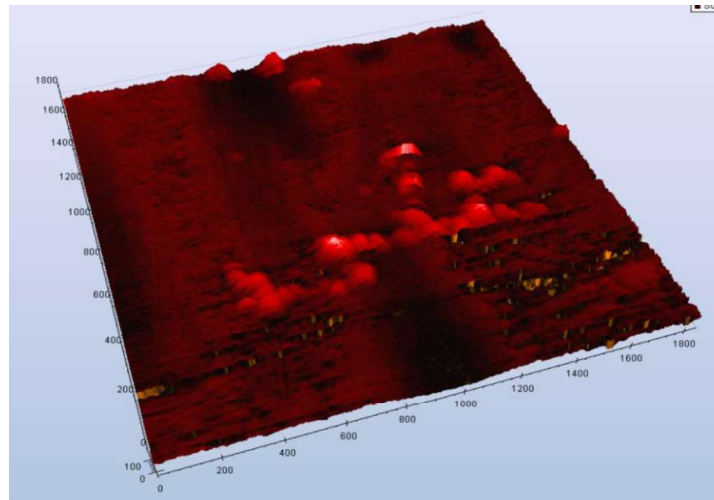
۳۰ / مطالعه و بررسی کمی و کیفی پارامترهای مؤثر در انجام لیتوگرافی سطح با میکروسکوپ تونلی روبشی

نظر گرفته شد و پس از مشاهده یک تک تپ در نقطه مد نظر ولتاژدهی متوقف می‌شود. در این روش اگر تعداد تپ‌ها زیاد شود اندازه نانو ساختار بزرگ‌تر می‌شود. دامنه تصویربرداری در این آزمایش ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ نانومتر است.

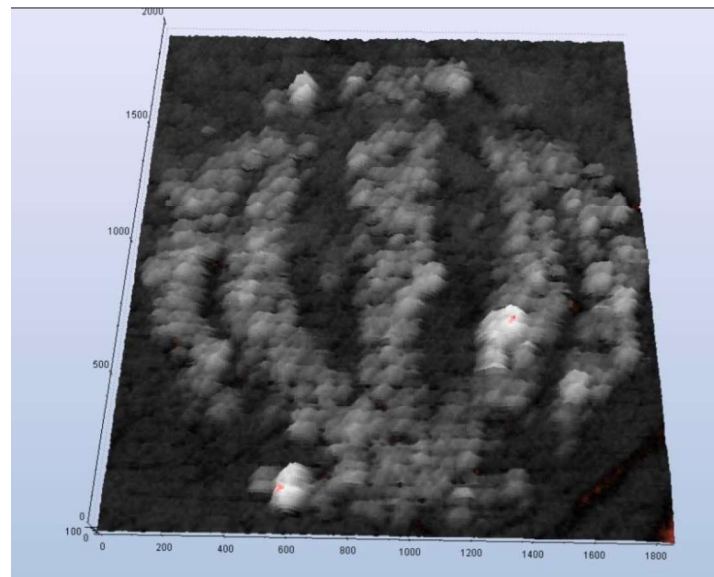
در ادامه، در شکل‌های ۶ تا ۹ از لیتوگرافی برای نوشتن روی سطح استفاده کردیم. در این جا هدف، نوشتن و قرائت پذیر بودن کلمه مد نظر بود. نتایج این روش در ادامه آمده است. این تصاویر با نرم‌افزار NAMA STM ویژه دستگاه STM تحلیل شده است. لازم است ذکر کنیم که، این اولین بار است که نام الله یا نام حضرت علی و آرم جمهوری اسلامی در ابعاد ملکولی و با دستگاه ساخت داخل کشور انجام می‌شود و بنا بر یافته‌های ما تاکنون در دنیای کشورهای اسلامی هنوز کشوری این دستگاه را نساخته یا تاکنون در این ابعاد و با این نوع دستگاه‌ها و الفبای عربی و فارسی نام و علامتی را در محافل علمی و غیر علمی ثبت نکرده است.



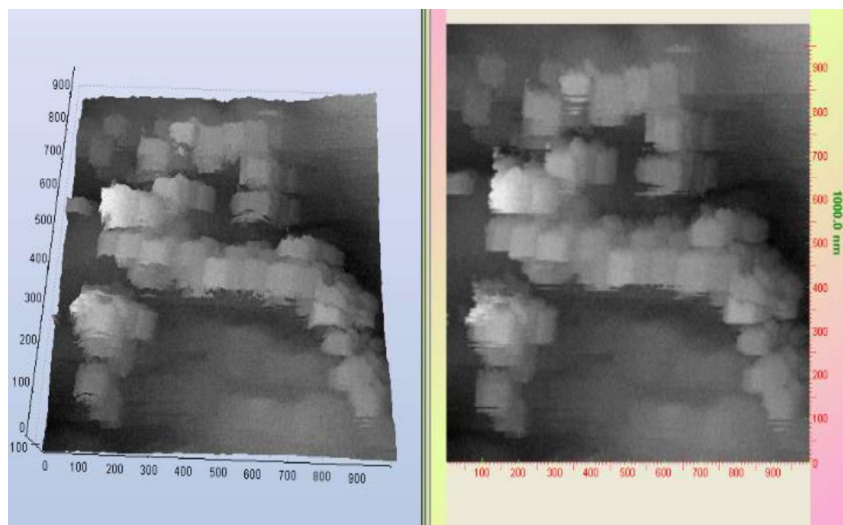
شکل ۶ کلمه جلاله الله نوشته بر سطح طلا به وسیله نوک تنگستن در ولتاژ ۶ ولت، مدت زمان هر تپ ۰٫۶ میلی‌ثانیه، فاصله زمانی بین تپ‌ها ۲۰ میلی‌ثانیه سرعت حرکت نوک در سطح زمینه ۹۰۰ نانومتر در ثانیه، سرعت حرکت نوک در نقاط ایجاد الگو به صورت کسر ۰٫۱ از سرعت کل یعنی ۹۰ نانومتر در ثانیه تعیین شده است. دامنه تصویربرداری ۲۰۰۰ در ۲۰۰۰ نانومتر و لیتوگرافی با دستگاه NAMA-STM.



شکل ۷ کلمه علی نوشته بر سطح طلا به وسیله نوک تنگستن در ولتاژ ۶ ولت، مدت زمان هر تپ ۰,۶ میلی ثانیه، فاصله زمانی بین تپها ۲۰ میلی ثانیه سرعت حرکت نوک در سطح زمینه ۹۰۰ نانومتر در ثانیه، سرعت حرکت نوک در نقاط ایجاد الگو به صورت کسر ۰,۱ از سرعت کل یعنی ۹۰ نانومتر در ثانیه تعیین شده است. دامنه تصویربرداری ۲۰۰۰ در ۲۰۰۰ نانومتر و لیتوگرافی با دستگاه NAMA- STM NATSYCO.



شکل ۸ آرم جمهوری اسلامی ایران نوشته بر سطح طلا به وسیله نوک تنگستن در ولتاژ ۶ ولت، مدت زمان هر تپ ۰,۶ میلی ثانیه، فاصله زمانی بین تپها ۲۰ میلی ثانیه، سرعت حرکت نوک در سطح زمینه ۹۰۰ نانومتر در ثانیه، سرعت حرکت نوک در نقاط ایجاد الگو به صورت کسر ۰,۱ از سرعت کل یعنی ۹۰ نانومتر در ثانیه تعیین شده است. دامنه تصویربرداری ۲۰۰۰ در ۲۰۰۰ نانومتر و لیتوگرافی با دستگاه NAMA- STM NATSYCO.



شکل ۹ حرف A نوشته بر سطح طلا به وسیله نوک تنگستن در ولتاژ ۶ ولت، مدت زمان هر تپ ۰,۶ میلی ثانیه، فاصله زمانی بین تپ‌ها ۲۰ میلی ثانیه، سرعت حرکت نوک در سطح زمینه ۶۳۸ نانومتر در ثانیه، سرعت حرکت نوک در نقاط ایجاد الگو به صورت کسر ۱/۰ از سرعت کل یعنی ۶۳/۸ نانومتر در ثانیه تعیین شده است. دامنه تصویربرداری ۲۰۰۰ در ۲۰۰۰ نانومتر و لیتوگرافی با دستگاه NAMA- STM NATSYCO.

در این بخش نیز از برخی پارامترهای مشخص شده در آزمایش‌های قبلی همچون ولتاژ، مدت زمان تپ‌ها و فاصله زمانی بین تپ‌ها استفاده شد. درباره سرعت حرکت سوزن در حین الگودهی سطح نیاز به آزمایش‌های بیشتری است. زیرا در اکثر موارد سرعت ۹۰۰ نانومتر در ثانیه سرعت مؤثر برای ایجاد الگو بود و در سرعت‌های غیر از این مقدار احتمال ایجاد اشکال طبق الگو بسیار کاهش می‌یافت.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله هدف ما استفاده از دستگاه STM ساخت داخل و انجام لیتوگرافی با این دستگاه است که برای اولین بار در ایران انجام شده است. در این راستا پارامترهای مختلفی از دستگاه آزمون شد و مطابق با موارد مشابه انجام گرفته خارجی، دستگاه توانایی لازم جهت انجام لیتوگرافی را نشان داد. تکرارپذیری لیتوگرافی با این دستگاه نیز از جمله نقاط قوت این دستگاه بود که از حالت تصادفی بودن پدیده لیتوگرافی به حالت تکرارپذیر بودن با استفاده از نرم‌افزار و سخت‌افزار ارائه شده در سیستم امکان‌پذیر شده بود. با توجه به این آزمون‌ها، ایجاد نانوساختار به وسیله نوک‌های تنگستن، طلا، پلاتین-پالادیوم و رمانیم امکان‌پذیر است. هر چند در مطالعه ما نوک تنگستن، نوک مناسب‌تری برای این منظور تشخیص داده شد. ولتاژ استفاده شده در لیتوگرافی در

ایجاد نانوساختار تأثیرگذار است به طوری که در مطالعه ما امکان ایجاد نانوساختار در ولتاژ زیر ۳ ولت امکان پذیر نبود. همچنین این عامل در اندازه نانوساختارها نیز تأثیرگذار است به طوری که با افزایش ولتاژ اندازه نانوساختارها نیز بزرگ می شود. سرعت حرکت نوک در حین انجام لیتوگرافی عامل مؤثر دیگری است که در اندازه نانوساختار و پیوستگی آن تأثیرگذار است. به طوری که در سرعت های کم، اندازه نانوساختارها بزرگ شده و پیوستگی آنها نیز بیشتر می شود و با افزایش سرعت اندازه نانوساختارها کوچک شده و از پیوستگی و مرتب بودن نانوساختارها کاسته می شود در ترکیب اثر پارامترهای سرعت و ولتاژ می توان گفت، در ولتاژهای کمتر از ۳ ولت حتی با کم کردن سرعت نمی توان نانوساختار ایجاد کرد و در ولتاژهای زیاد نیز با سرعت بیشتر از ۱۵۰ نانومتر امکان ایجاد نانوساختار نیست و در واقع کمترین ولتاژ لازم برای ایجاد نانوساختارها ۳ ولت و بیشترین سرعت هم ۱۵۰ نانومتر در ثانیه می باشد. زمان بین تپ های متوالی نیز در مرتب بودن نانوساختارها و پیوستگی آنها تأثیرگذار است و باید بر حسب شرایط و هدف لیتوگرافی مقدار آن را مشخص کرد. شکل هندسی رأس نوک و رطوبت و دما نیز جزء عامل های تأثیرگذارند که بررسی اثر این پارامترها مستلزم مطالعات بیشتر است. البته با توجه به آنکه لیتوگرافی با نوک که به روش الکتروشیمیایی یا روش مکانیکی برش دستی انجام می شود، تیزی نوک متغیر است و تماماً این تیزی نوک به صورت تجربی به دست کاربر می آید و نمی توان نتایج لیتوگرافی دیگران را با نتایج این مطالعه به صورت کمی مقایسه کرد.

۶. تقدیر و تشکر

مقاله حاضر بخشی از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مصوب دانشگاه علوم پزشکی تهران است، که نویسندگان این مقاله از حمایت های: دانشگاه علوم پزشکی تهران و پژوهشکده فناوری ها و تجهیزات پیشرفته پزشکی مرکز تحقیقات علوم و تکنولوژی در پزشکی: بیمارستان امام خمینی^(ه) تشکر می کنند. همچنین از همکاری و همراهی شرکت نانو سیستم پارس به منظور فراهم کردن دستگاه میکروسکوپ تونلی روبشی با نام NAMA-STM برای تصویربرداری و پژوهش در زمینه علمی این تحقیق، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع

- [1] Becker E. W., Ehrfeld W., Hagmann P., Maner A. and Munchmeyer D., Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, aalvanoforming, and plastic moulding (LIGA process), *Microelectron. Eng.* **4**, 35-56, 1986.
- [2] Yamazaki K., Yamaguchi T. and Namatsu H., Three-dimensional nanofabrication with 10-nm resolution, *Jpn. J. Appl. Phys* **43**, 1111-1113, 2004.

- [3] Schmidt B., Bischo L. and Teichert J., Writing FIB implantation and subsequent anisotropic wet chemical etching for fabrication of 3D structures in silicon, *Sensors Actuators A* **61**, 369–373, 1997.
- [4] Kawasegi N., Lee D. W., Morita N., and Park J. W., *Nanofabrication fundamentals and applications*, Chapter 2: Atomic force microscope lithography, Ampera A Tseng, Arizona State University, 33-64, 2008.
- [5] Sattler K., *Nanolithography Using the Scanning Tunneling Microscope*, *Jpn. J. Appl. Phys* **42**, 4825–4829, 2003.
- [6] Owen G., *Method and apparatus for hybrid IC lithography*, Google Patents, US4812661A, 1989.
- [7] Toumey C., Plenty of room, plenty of history, *Nature Nanotechnology* **4**, 783-784, 2009.
- [8] Taniguchi N., *On the Basic Concept of 'Nano Technology*, Proceedings of the International Conference on Production Engineering, Tokyo, Japan, 1974.
- [9] Drexler KE, *Nanosystems- Molecular machinery, manufacturing, and computation*, John Wiley & Sons, New York, 449-458, 1992.
- [10] Drexler KI, *Engines of Creation: The coming era of nanotechnology*, 1986. New York, NY, Anchor Press/Doubleday .Retour, 2008.
- [11] Binnig G, Rohrer H. In touch with atoms, *Reviews of Modern Physics* **71**, 324-330, 1999.
- [12] Staufer U., Wiesendanger R., Eng L., Rosenthaler L., Hidber H. R., Guntherodt H.J., and Garcia N., Nanometer scale structure fabrication with the scanning tunneling microscope, *Applied Physics Letters* **51**, 244-246, 1987.
- [13] Zhou L., Xu G. Q., Ng H. T., and Li S. F. Y., Scanning thermal microscope tip-induced chemical reaction on solid organometallic compound thin films, *Journal of Vacuum Science & Technology*, **B15**, 1871-1875, 1997.
- [14] Dagata J. A., Schneir J., Harary H. H., Evans C. J., Postek M. T. et al., Modification of hydrogenpassivated silicon by a scanning tunneling microscope operating in air, *Appl. Phys. Lett* **56**, 2001-2003, 1990.
- [15] Tseng, A. A., Notargiacomo, A. & Chen, Nano fabrication by scanning probe microscope lithography: A review, *Ampere A. Tseng, J. Vac. Sci. Technol.* **B23**, 877-894, 2005.
- [16] Liu Yun and Zhang Jia, Nanolithography on SrRuO₃ thin film surfaces by scanning tunneling microscopy, *Physica B* **405**, 1890–1893, 2010.
- [17] McCord M. A. and Pease R. F. W., Lift-o metallization using poly (methyl methacrylate) exposed with a scanning tunneling microscope, *J. Vac. Sci. Technol.* **B6**, 293–296, 1988.
- [18] Marrian C. R. K., Dobisz E. A. and Colton R. J., Lithographic studies of an e-beam resist in a vacuum scanning tunneling microscope, *J. Vac. Sci. Technol.* **A8**, 3563–3569, 1990.
- [19] Marrian C. R. K., Dobisz E. A. and Dagata J. A., Electron-beam lithography with the scanning tunneling microscope, *J. Vac. Sci. Technol.* **B10**, 2877–2881, 1992.
- [20] Moreland J. and Rice P., High-resolution, tunneling-stabilized magnetic imaging and recording, *Appl. Phys. Lett* **57**, 310–312, 1990.
- [21] Wilder K., Quate C. F., Adderton D., Bernstein R. and Elings V., Noncontact nano lithography using the atomic force microscope, *Appl. Phys. Lett* **73**, 2527–2529, 1998.
- [22] Tikkanen T., Computer simulation of scanning tunneling microscopy of adsorb molecules on metal surfaces, master of science thesis, Tampere University of Technology Master's Degree Program in Science and Engineering, Zurich, Switzerland, 2012.