



لیتوگرافی مثبت و منفی

در فرآیند لیتوگرافی، اگر تغییر حلالیت ماده مقاوم، منجر به شکسته شدن پیوندها شود به آن لیتوگرافی مثبت و ماده مورد استفاده آن مقاوم مثبت نام دارد. از جمله مواد مقاوم مثبت می توان به (پلی متیل متاکریلات) PMMA اشاره نمود. اما چنانچه این تغییر در خاصیت انحلالی، باعث ایجاد اتصالات عرضی در ماده شود، لیتوگرافی منفی با ماده مقاوم منفی مانند SU-8 داریم.

از جمله تفاوت بین این دو روش، حد تفکیک کمتر مواد مقاوم منفی نسبت به مواد مقاوم مثبت می باشد.

ویژگی هایی که یک ماده مقاوم باید داشته باشد عبارت اند از:

- کنتراست بالا بین ناحیه های حل شدنی و حل نشدنی
- حساسیت نوری بالا
- مقاومت بالا نسبت به دسته خاصی از فاکتورهای شیمیایی که در خواص نهایی الگو و کیفیت آن بسیار اثر گذار هستند. [۳]

روش های مختلف لیتوگرافی

حدود سال های ۱۹۷۰، روش های مبتنی بر EBL یا لیتوگرافی باریکه الکترونی رواج پیدا کرد و در دهه ۸۰ و ۹۰ میلادی روش های لیتوگرافی اشعه ایکس گسترش یافت اما از اواسط ۱۹۹۰ تا اواسط ۲۰۰۰ روش EUV-L یا لیتوگرافی اشعه ماوراء بنفش قوی، بیشتر مورد استفاده قرار گرفت.

اصولا در فرآیند لیتوگرافی نحوه رسیدن به الگوها توسط دستگاهها و روش های مختلف حائز اهمیت می باشد، که از این رو می توان تکنیک های گوناگون لیتوگرافی را به صورت زیر دسته بندی نمود.

- لیتوگرافی نوری^۳
- لیتوگرافی باریکه الکترونی^۴
- لیتوگرافی چاپی^۵
- لیتوگرافی پروب روبشی^۶

در لیتوگرافی نوری از نورهای با طول موج کوتاه برای انجام فرآیند استفاده می کنند و لیتوگرافی اشعه ایکس و اشعه ماوراء بنفش قوی از زیر مجموعه این روش به حساب می آیند. برای تولید اشعه ماوراء بنفش، از یک دستگاه لیزر پلاسمای قلع، استفاده می کنند. اشعه تولید شده توسط آینه ها و عدسی های متعدد تقویت می شود. اما در روش لیتوگرافی باریکه الکترونی از منبع گسیل گرما یونی لاتانیوم هگزابورید برای وضوح پایین و از تنگستن و اکسید زیرکونیوم گرم شده برای وضوح بالا استفاده می شود و الکترون های ساطع شده از این منابع، توسط عدسی های متمرکز کننده برای لیتوگرافی آماده می شوند.

روش لیتوگرافی چاپی، یک روش غیر تابشی مبتنی بر قالب گیری است که با ایجاد کردن طرحی بر روی قطعه ای از جنس کوارتز یا سیلیکون انجام می شود. سپس الگوی درست شده بر روی ماده

امروزه بکار گیری دستگاه AFM در ساخت مدارات الکترونیکی با ساختارهای نانومتری و میکرومتری کاربرد بسیاری پیدا کرده است. همچنین استفاده از آن در روش لیتوگرافی رواج پیدا کرده و گزینه مناسبی نسبت به سایر روش های موجود لیتوگرافی در حال حاضر است. لیتوگرافی بر پایه AFM می تواند طرح های نانومقیاس زیادی را ایجاد کند که ساختارهای پیچیده و نوین به شدت قدرتمندی را به همراه داشته باشد.

لیتوگرافی چیست؟

لیتوگرافی یا سنگ نگاری، فرآیند بسیار مهمی در صنعت و ساخت نیمه هادی ها محسوب می شود. این روش برای الگوبرداری اشکال خاص از یک لایه نازک روی بستر سخت، برای ساخت مدارات الکترونیکی استفاده می شود. به زبان ساده، این روش به منظور ساخت ابزارهای الکترونیکی و نوری شامل ترسیم طرحی از یک الگوی خاص از ماده ای و انتقال و حک کردن آن بر روی ماده دیگر می باشد.

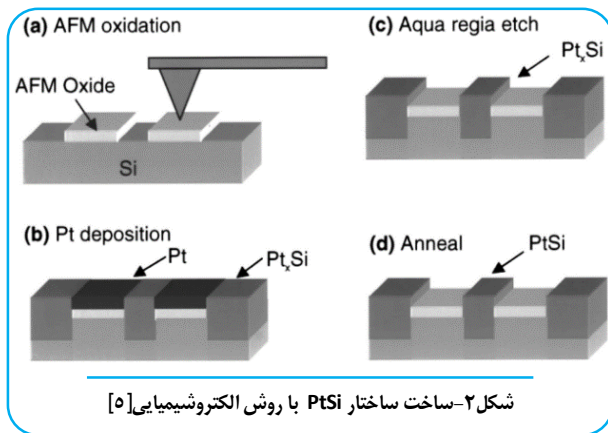
مطابق شکل (۱) بر روی ویفر و زیرلایه، لایه نازکی از مواد اغلب پلیمری مقاوم به نور به عنوان مواد محافظ^۱، با روش های خاص مثل لایه نشانی چرخشی^۲ اعمال می کنیم، سپس بر روی لایه نازک، ماسکی نوری که عمدتاً از جنس کوارتز یا شیشه و دارای الگوی از قبل طراحی شده بوده قرار می دهیم. برای ایجاد طرح، نور پر قدرت فرابنفش (طول موج بین ۱۹۳ تا ۴۳۶ نانومتر) را روی ماسک می تابانیم که این نور در هنگام برخورد به ماده مقاوم، باعث انجام یکسری واکنش ها در ماده مقاوم و تغییر خواص انحلال پذیری آن در حلال می شود. برای از بین بردن ماسک نوری و ماده مقاومی که نور ندیده و تغییری نکرده، توسط محلول شیمیایی مناسب در مرحله develop شستشو داده می شود. سپس در مرحله اچ کردن، طرح نهایی به زیر لایه منتقل می شود و در آخر نیز در مرحله strip، باقی مانده مواد مقاوم، در محلول شسته شده و از بین می رود. معمولاً از ماده DMSO (دی متیل سولفو کسید) برای مرحله لایه برداری نهایی استفاده می شود. [۲]



شکل ۱- مراحل فرآیند لیتوگرافی [۱]

- 1 resist
- 2 spin coating

3 PhotoLithography or optical lithography
4 Electron-Beam Lithography
5 Nano-Imprint Lithography
6 Scanning Probe Lithography



شکل ۲- ساخت ساختار PtSi با روش الکتروشیمیایی [۵]

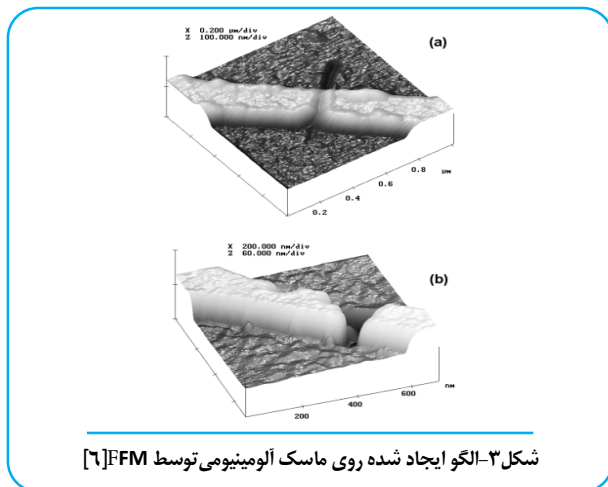
فرآیند انتقال مواد

در روش قبل نیاز به الکتروسیسته خارجی برای انجام واکنش اکسیداسیون بود، اما در روش انتقال مواد به منبع الکتریکی نیازی نیست و مواد از نوک دستگاه با استفاده از جذب شیمیایی به سطح نمونه منتقل می‌شوند. فرآیند مانند جاری شدن جوهر بر روی کاغذ در هنگام نوشتن می‌باشد. مواد داخل مخزنی تعبیه شده در نوک پروب دستگاه نگه داشته شده و با حرکت نوک دستگاه بر روی نمونه مواد به مانند جوهر خودکار بر روی نمونه قرار می‌گیرند و واکنش شیمیایی می‌دهند تا طرح مورد نظر ایجاد شود. از کاربردهای این روش می‌توان به تعمیر ماسک‌های نوری و کاربردهای متعدد در زمینه‌های مواد زیستی مانند چیپ‌های پروتئینی نانو مقیاس نام برد.

لیتوگرافی مکانیکی

در اینجا به وسیله نیروی مکانیکی نوک پروب بر روی مواد جامد شیارهایی به عنوان الگو و طرح بر نمونه ایجاد می‌شود. از چالش‌های جدی این طرح، اصطکاک زیاد نوک پروب با نمونه و امکان آسیب دیدن آن و همچنین تغییر شکل نمونه هنگام لیتوگرافی است که اینها سبب می‌شود این روش و دقت آن تحت تاثیر قرار گیرد.

دستگاه FFM یا میکروسکوپ نیروی اصطکاکی در این زمینه کاربرد زیادی دارد. برای حل مشکل آسیب دیدن نوک پروب، نیروی متوسطی به سطح اعمال می‌شود و هر لحظه از برخورد نوک با سطح نمونه بازخوردهای به دستگاه داده می‌شود تا در صورت لزوم با استفاده از موتورهای پیژو مانع آسیب دیدن نوک پروب بشود.



شکل ۳- الگو ایجاد شده روی ماسک آلومینیومی توسط FFM [۶]

پلیمری قرار گرفته و در اثر اعمال فشار و گرما همزمان با مرحله اچ کردن طرح قطعه به پلیمر انتقال پیدا می‌کند. [۴]

امروزه روش پروب روبشی، به دلیل وجود محدودیت‌های روش‌های قبلی، مورد استقبال بیشتری قرار گرفته است. عمده محدودیت‌های روش‌های بیان شده، در ساخت مدارات ریزتر و پیچیده تر با وضوح‌های بالا می‌باشد، اما با استفاده از روش SPL می‌توان حتی به وضوح زیر ۱۰ نانومتر نیز دست یافت، همچنین قیمت ساخت قطعات با هزینه بیشتر و نیاز به دستگاه‌های پیچیده و گران قیمت برای تولید در روش‌های قبلی از جمله علت‌های محبوبیت روش پروب روبشی می‌باشد. این روش برعکس روش‌های قبل، نیاز به خلأهای بالا ندارد و در اتمسفر محیط هم امکان لیتوگرافی وجود دارد، همچنین نیاز به تهیه ماسک برای انتقال الگو بر روی زیرلایه ندارد، اما سرعت کم این روش در تولید قطعات نسبت به سایر روش‌ها یکی از چالش‌های جدی پیش روی روش SPL است.

SPM ها، میکروسکوپ‌های روبشی هستند که با استفاده از تماس بین نوک پروب و ماده جامد، خواص سطحی ماده را بررسی و اندازه گیری می‌کنند. AFM و STM از جمله پرکاربردترین میکروسکوپ‌های روبشی هستند در STM به خاطر اینکه سطح ماده مورد بررسی، حتما باید رسانا باشد دارای محدودیت در شناسایی و اندازه گیری خواص سطحی ماده بوده، لذا از سال ۱۹۸۶ دستگاه AFM به شدت مورد استقبال قرار گرفت و از آن در زمینه لیتوگرافی نانو مقیاس استفاده شد. تکنیک‌های موجود در این زمینه عبارتند از:

- اکسیداسیون الکتروشیمیایی^۳
- انتقال ماده^۴
- لیتوگرافی مکانیکی^۵
- لیتوگرافی گرمایی^۶

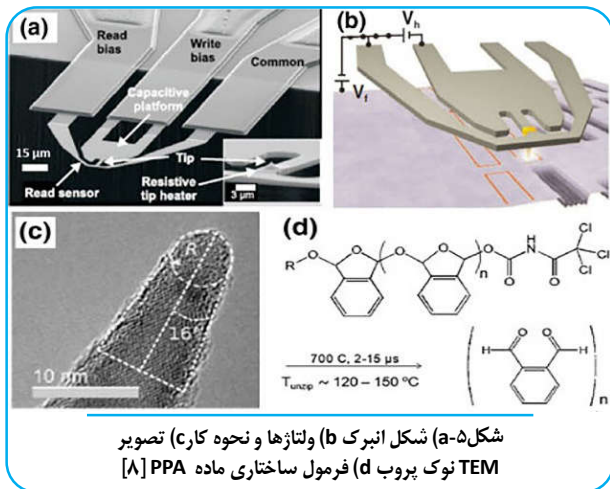
اکسیداسیون الکتروشیمیایی

این روش با اکسیداسیون مستقیم سطح، انجام می‌شود. نوک پروب AFM یا به اصطلاح Tip دستگاه که رسانا هم هست، بین ۳ تا چند ده ولت برق مستقیم بایاس به آن می‌دهیم؛ این کار باعث می‌شود که اکسیژن موجود هوای محیط اطراف نوک دستگاه با ماده زیر نوک واکنش دهد و سطح ماده را اکسید کند. این مقدار از اکسیداسیون در سایر روش‌ها مضر است و فقط در این روش از این مکانیزم انجام می‌شود. نوک دستگاه می‌تواند با سرعت ۱ میلی متر بر ثانیه این عمل را انجام دهد و هر سری محدودهای به اندازه ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر را بسته به مواد مختلف اکسید کند و طرح مورد نظر را بر روی ماده مورد نظر ایجاد کند. بعد از ایجاد طرح مناطقی که اکسید نشده‌اند توسط محلول شیمیایی، اچ می‌شوند و ناحیه‌های اکسید شده باقی می‌مانند. بعد از آن مواد از جنس متفاوت در قسمت‌های اچ شده نشانده می‌شود تا ساختار و قطعه مورد نظر بدست آید. چالش‌های موجود در اینجا، سینتیک اکسیداسیون و کنترل رطوبت و اکسیژن موجود در هوا است که تاثیر مستقیم بر کیفیت نهایی خواهد گذاشت. این روش برای ساخت نانو سیم‌های سیلیکونی و ساختارهای اکسید فلزی مثل SiO₂ و ساخت سنسورهای آرایه‌ای بایو و قطعات نیمه‌رسانا مناسب است.

- 1 Scanning Probe Lithography (SPL)
- 2 Scanning Probe Microscope (SPM)
- 3 electrochemical oxidation
- 4 material transfer
- 5 mechanical lithography
- 6 thermal lithography

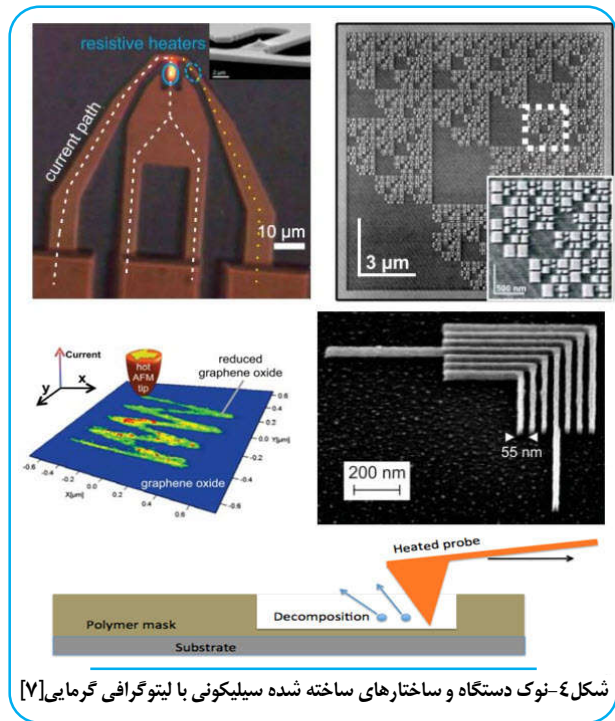
تکنیک به کارگیری از نوکی با قابلیت داغ شدن، برای ایجاد طرح بر روی ماده پلیمری در ساخت قطعات نانومتری بسیار موثر است که در ادامه به تشریح این روش پرداخته خواهد شد. دستگاه از یک cantilever انبرک داغ شونده تشکیل شده است. ایجاد حرارت توسط اعمال ولتاژ به پایه‌های انبرک صورت می‌گیرد یکی از پایه‌ها مسئول کنترل ولتاژ و گرمایی نوک انبرک می‌باشد که به صورت مداوم داده‌هایی از شرایط نوک به دستگاه ارسال می‌کند. پایه وسطی مسئول ایجاد حرارت لازم برای انجام کار است. هنگام ایجاد طرح دو نوع ولتاژ به سیستم اعمال می‌شود که V_h برای گرم کردن نوک است و V_f به زیرلایه اعمال می‌شود تا تماس نوک با سطح نمونه برقرار شود (مطابق شکل ۵). دمای خود انبرک حدود ۱۰۰۰ درجه است اما دمای نوک باید در حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه تنظیم شود تا بتواند به خوبی ماده پلیمری را تبخیر کند و طرح با کیفیتی ایجاد کند.

تنظیم دمای نوک با مباحث انتقال حرارت مرتبط است و از این راه دمای نوک کنترل می‌شود. ماده مقاوم، معمولاً ماده پلیمری polyphthalaldehyde (PPA) پلی فتال آلدئید با نقطه T_g ۱۵۰ درجه‌ای است که برای لیتوگرافی مناسب می‌باشد. در ایجاد الگو، زمانی که نوک پروب به ماده پلیمری برخورد می‌کند ماده فوراً به مونومرهای فرار تبدیل شده و تبخیر می‌شود. سرعت ایجاد الگو در این روش ۲ پیکسل بر میکروثانیه است در حالی که سرعت تصویر برداری آن ۲۰ میلی متر بر ثانیه است. تولید طرح‌های با دقت زیر ۱۰ نانومتر نیز توسط این روش امکان پذیر است.



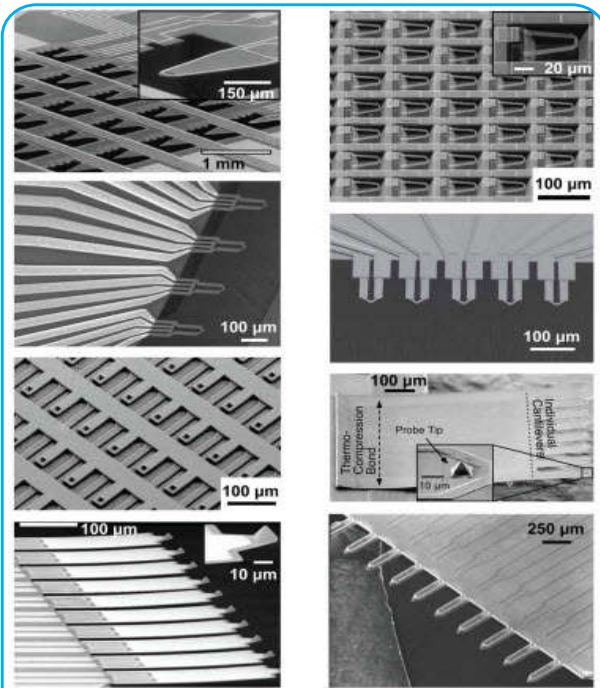
در ادامه، تصویر مربوط به مراحل لیتوگرافی آورده شده که مربوط به ساخت مواد فلزی بر روی زیرلایه سیلیکونی است. برای این منظور ابتدا سه لایه با ضخامت‌های مختلف از موادی مانند SiO_2 ، PMMA و PPA به روش‌های مختلف لایه نشانی بر روی زیرلایه اعمال می‌شود سپس با نوک داغ پروب دستگاه بر روی ماده PPA طرح را ایجاد کرده و گازهای اکسیژن و نیتروژن را برای کم کردن ضخامت ماده PPA و گاز CHF_3 RIE را برای ماسک سخت SiO_2 به کار برده می‌شود تا لیتوگرافی مثبت یا منفی را ایجاد کند. سپس PMMA توسط ماده مخصوص برداشته می‌شود تا به زیر لایه سیلیکونی برسیم. بعد از آن ماده فلزی مورد نظر با روش CVD روی سیلیکون نشاند می‌شود و اضافه مواد فلزی و PMMA توسط محلول، لایه برداری نهایی می‌شود تا ساختار نهایی شکل بگیرد و کامل شود. وجود لایه‌های PMMA و SiO_2 برای دستیابی به وضوح بیشتر در مرحله اچ کردن و نیز به عنوان مانعی بین زیر لایه و نوک داغ دستگاه لازم است.

به طور خلاصه، در لیتوگرافی گرمایی ما با استفاده از اعمال ولتاژ به انبرک دستگاه دمای انبرک و نوک پروب دستگاه را بالا می‌بریم تا بتوانیم بر روی مواد پلیمری به راحتی طرح مورد نظر خود را پیاده کنیم. مواد پلیمری با رسیدن گرمای نوک پروب که حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد است سریعاً به حالت بخار در آمده و نواحی گرما ندیده باقی می‌مانند و برای مراحل اچ و اعمال طرح آماده می‌گردند. در این روش توجه به دمای مورد نیاز برای بخار شدن ماده پلیمری حائز اهمیت است و اگر کنترل دقیقی بر روی دمای نهایی اعمال شده روی سطح نداشته باشیم ممکن است که به زیرلایه آسیب زده و دقت روش را پایین بیاورد. تحقیقات در این روش نوید بخش پیشرفت‌های بیشتر در زمینه صنعت نیمه رسانا می‌باشد، که ممکن است در آینده‌ای نزدیک جایگزین روش‌های حال حاضر لیتوگرافی نوری شود.

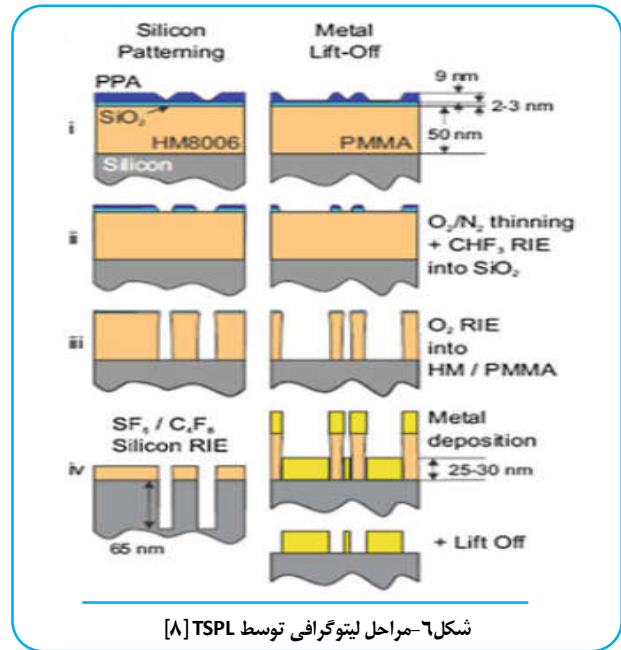


استفاده از T-SPL¹ در الکترونیک

در طول ۷۰ سال گذشته، نیمه‌هادی‌ها به یک عنصر مهم در ساخت الکترونیک تبدیل شدند. از زمان اختراع ترانزیستور، دنیای الکترونیک همواره از نظر تحقیق، توسعه، ساخت، تولید دستگاه‌ها و فناوری‌های جدید پیشرفت سریعی داشته است. دستگاه‌های الکترونیکی هم به واسطه این پیشرفت سریع، دستخوش تحولات بسیار بودند و کاربردهای گسترده آن در صنایع و تولید پزشکی و هنر هر روز افزایش یافته است. به موازات، روش‌های ساخت این دستگاه‌ها، از گذشته تا به امروز در حال تغییر کردن بوده و روش‌های نوین، جایگزین روش‌های قبلی شدند. یکی از این روش‌ها لیتوگرافی گرمایی می‌باشد که امروزه کاربرد بسیاری در حوزه‌های مختلف پیدا کرده است. لیتوگرافی گرمایی بیش از دو دهه است که در شرکت IBM استفاده می‌شود و در ساخت حافظه‌های ذخیره اطلاعات با نام پروژه Millipede توسعه یافته است.

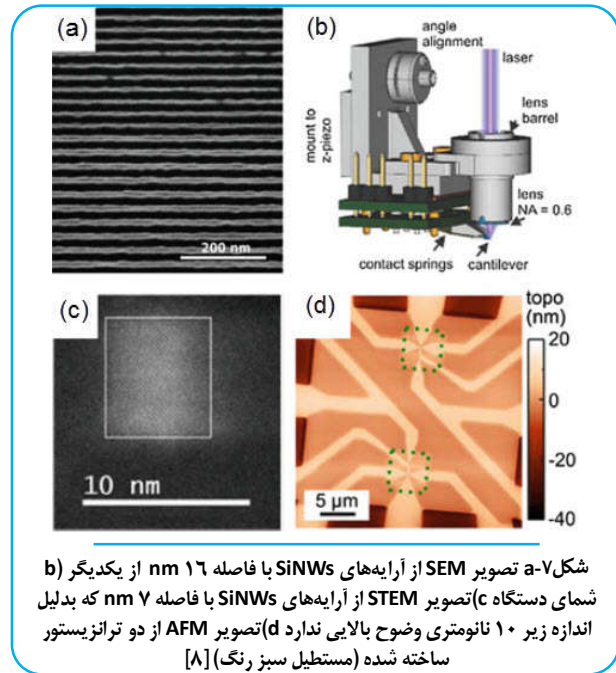


شکل ۸- دستگاه مورد استفاده در پروژه Milipede شرکت IBM با آرایه ای متشکل از ۱۰۲۴ انبرک داغ شونده [۹]

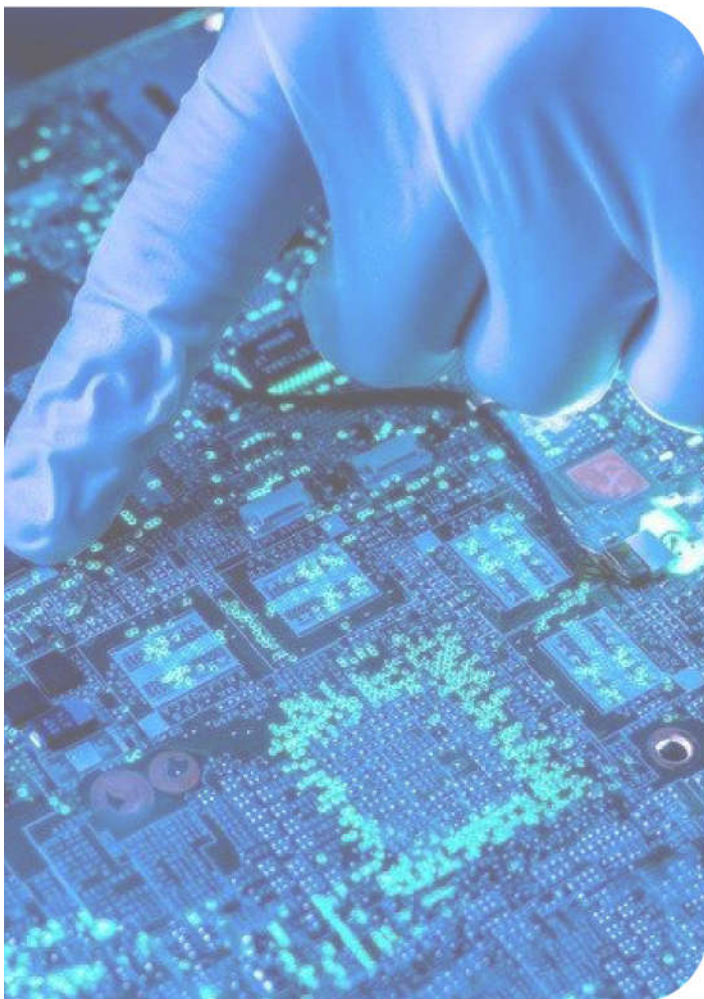


شکل ۶- مراحل لیتوگرافی توسط TSPL [۸]

در ادامه تصاویر برخی از ساختارهایی که با استفاده از این روش تولید شده را مشاهده می‌کنیم:



شکل ۷- a) تصویر SEM از آرایه‌های SiNWs با فاصله ۱۶ nm از یکدیگر (b) شمای دستگاه (c) تصویر STEM از آرایه‌های SiNWs با فاصله ۷ nm که بدلیل اندازه زیر ۱۰ نانومتری وضوح بالایی ندارد (d) تصویر AFM از دو ترانزیستور ساخته شده (مستطیل سبز رنگ) [۸]



روش TSPL علی‌رغم ویژگی‌های بسیاری که در تولید ساختار و قطعات نانومتری در وضوح بالا دارد، اما همچنان این روش صنعتی نشده و سرعت کم تولید این دستگاه‌ها مانعی بزرگ برای شرکت‌های فعال در حوزه ساخت قطعات الکترونیکی است. همچنین انتخاب ماده مقاوم مناسب و با خلوص ثابت برای داشتن یک الگو دقیق و نیاز بودن به مرحله اچ کردن دقیق مشکل‌زا است اما پیشرفت‌هایی برای حل مشکلات صورت گرفته است، مثل استفاده از دستگاه‌هایی با چندین انبرک در یک دریف به جای یک انبرک برای ایجاد طرح که علاوه بر حفظ راندمان کار، سرعت انجام این کار را بالا برده و در آینده نزدیک جایگزین روش‌های متداول کنونی لیتوگرافی می‌شود. [۸]

- 1-<https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/materials-science/lithography-nanopatterning/tutorial.html>
- 2- PHOTORESIST REMOVAL/basic of microstrucring/ MicroChemicals
- 3- <http://edu.nano.ir/paper/957>
- 4- McCord, M. A.; M. J. Rooks (2000). "2". SPIE Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication
- 5- ATOMIC FORCE MICROSCOPE LITHOGRAPHY NORITAKA KAWASEGI Central Research Institute, Toyama Industrial Technology Center, 50 Futagami, Takaoka, Toyama 933-0981, Japan
- 6- Atomic force microscopy lithography as a nanodevice development technique/ A Notargiacomo, V Foglietti/ Nanotechnology 10 (1999) 458-463. Printed in the UK
- 7- Advanced scanning probe lithography/ Ricardo Garcia, Armin W. Knoll and Elisa Riedo/ Nature Nanotechnology 9, 577-587 (2014)
- 8- Oxidation and Thermal Scanning Probe lithography for High-Resolution Nanopatterning and Nanodevices/ Yu Kyung Byun and Armin Wolfgang Knoll/ Springer Nature Switzerland AG 2019 U. Celano (ed.), Electrical Atomic Force Microscopy for Nanoelectronics, NanoScience and Technology
- 9- Heated Atomic Force Microscope Cantilevers and their Applications/ Jonathan R Felts/ Annual Reviews of Heat Transfer January 2013

