

آشنایی با میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)

گردآورنده: مرضیه شیرازی

۱- مقدمه

برای مشاهده اجسام و نمونه‌های با ابعاد بسیار ریز در حد مولکول‌های کوچک و اتم‌ها، نمی‌توان از میکروسکوپ‌های معمولی استفاده کرد؛ چرا که این نمونه‌ها، ابعاد نانویی دارند و میکروسکوپ‌های معمولی، قادر به نشان دادن ابعاد نانویی نیستند. بنابراین برای دیدن نمونه‌های نانویی، باید از ابزارهای دقیق‌تر و پیشرفته‌تر استفاده شود. یکی از این ابزارها، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) است. میکروسکوپ نیروی اتمی قادر به تصویربرداری با تفکیک مکانی اتمی از نمونه‌های زسانا، نارسانا و حتی نمونه‌های بیولوژیکی می‌باشد.

این میکروسکوپ نقش به‌سزایی در پیشرفت علوم مختلف از جمله الکترونیک، نانوفناوری و علم مواد ایفا می‌کند. امروزه دستگاه‌های تجاری متفاوتی با مبانی مشابه و حالات کاری مختلف عرضه شده‌اند که از نظر دقت و کیفیت تصاویر با یکدیگر تفاوت دارند. در این مقاله ضمن معرفی میکروسکوپ نیروی اتمی و نحوه عملکرد آن، مدهای کاری مختلف و مزایا و معایب هر کدام مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- تاریخچه

گرد کارل بینینگ^۱ بر اساس طراحی‌های قبلی که با همکاری هاینرک روهرر^۲، در آزمایشگاه تحقیقاتی زوریخ IBM، در جهت طراحی و ساخت میکروسکوپ تونلی روبشی^۳ (STM)، صورت داده بود، در سال ۱۹۸۶ میلادی با همکاری کلونین کوایت^۴ و کریستف گریباز دانشگاه استانفورد، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، را ارائه نمود. هدف او از این کار اندازه‌گیری نیروهای بسیار ناچیز (کمتر از $1\mu\text{N}$)، بین نوک سوزن AFM و سطح نمونه مورد بررسی بود [۱]. تولیدات تجاری این محصولات، با میکروسکوپ STM در سال ۱۹۸۷ میلادی و میکروسکوپهای AFM، در ۱۹۸۹ میلادی کلید خورد. به دنبال اختراع STM و سپس AFM، تلاشهای بسیاری جهت مطالعه مورفولوژی و ساختار سطوح

¹ Atomic Force Microscope

² Gerd Karl Binnig

³ Heinrich Rohrer

⁴ Scanning Tunneling Microscope

⁵ Calvin Quate

⁶ Christoph Geber

و فصل مشترک آن ها صورت گرفت و در بازه کوتاهی از زمان، بسیاری دیگر از ابزارهای شناسایی با مبانی مشابه در عملکرد، تحت عنوان کلی میکروسکوپ های پروبی روبشی، ساخته و به جهان علم ارائه گردیدند [۱۳]

۳- دامنه کاربرد میکروسکوپ نیروی اتمی

در حالی که میکروسکوپ تونلی روبشی، تنها می تواند جهت مطالعه سطوحی که از لحاظ الکتریکی درجاتی از رسانایی دارند، استفاده شود، میکروسکوپ های نیروی اتمی می توانند جهت مطالعه هر نوع سطح مهندسی استفاده شوند؛ بنابراین می توان از آن جهت مطالعه انواع مواد رسانا، نیمه رسانا و نارسا استفاده نمود.

امروزه AFM، یک کاوشگر سطحی محبوب برای اندازه گیری های توپوگرافیک و محاسبه نیروهای عمودی در مقیاس میکرو تا نانو شناخته شده است. همچنین از این دستگاه مشخصه یابی، می توان برای مطالعه خراش و سائیدگی و نیز اندازه گیری خواص مکانیکی الاستیک و پلاستیک (از قبیل میزان سختی جسم در برابر جسم فرورونده^۷ و مدول الاستیسیته) استفاده نمود [۱۴]

از AFM در بسیاری از مطالعات، جهت نوشتار، دستکاری و جابجایی اتم های منفرد زنون [۱۵] مولکول ها [۱۶]، سطوح سیلیکونی [۱۷] و پلیمری [۱۸] بکار گرفته شده است. علاوه بر این از این میکروسکوپ جهت انواع نانولیتوگرافی و تولید نانو ساختارها [۱۹] و نانوماشینکاری استفاده شده است.

میکروسکوپ های نیروی اتمی که برای اندازه گیری نیروهای عمودی و جانبی، طراحی شده اند، میکروسکوپ های نیروی جانبی (LFM)^۸، یا میکروسکوپ های نیروی اصطکاکی (FFM)^۹ نامیده می شوند [۱]. دسته ای از FFM ها از توانایی اندازه گیری نیروهای جانبی در دو جهت متعامد برخوردارند [۲۰]. محققین بسیاری طراحی های AFM و FFM را اصلاح کرده و بهبود داده اند و هم اکنون این سیستم های بهبود داده شده، جهت اندازه گیری چسبندگی، اصطکاک و نیروهای پیوندی در سطوح جامد و مایع در مقیاس نانو و میکرو بکار می روند [۲۱].

۲- سیستم دستگاهی میکروسکوپ روبشی نیروی اتمی

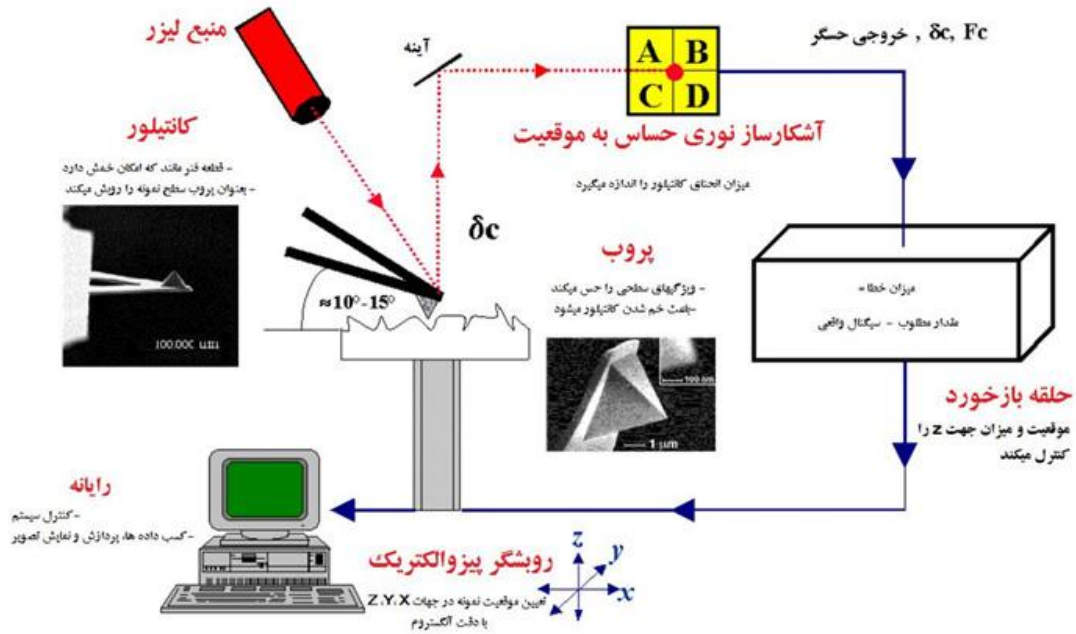
میکروسکوپ روبشی نیروی اتمی AFM سطح نمونه را توسط یک سوزن تیز، به طول ۲ میکرون و غالباً قطر نوک کمتر از ۱۰ نانومتر آنالیز می کند. سوزن در انتهای آزاد یک انبرک (کانتیلور) به طول حدود ۱۰۰ تا ۴۵۰ میکرون قرار دارد.

⁷ indentation hardness

⁸ lateral force microscopy

⁹ friction force microscopy

¹ cantilever



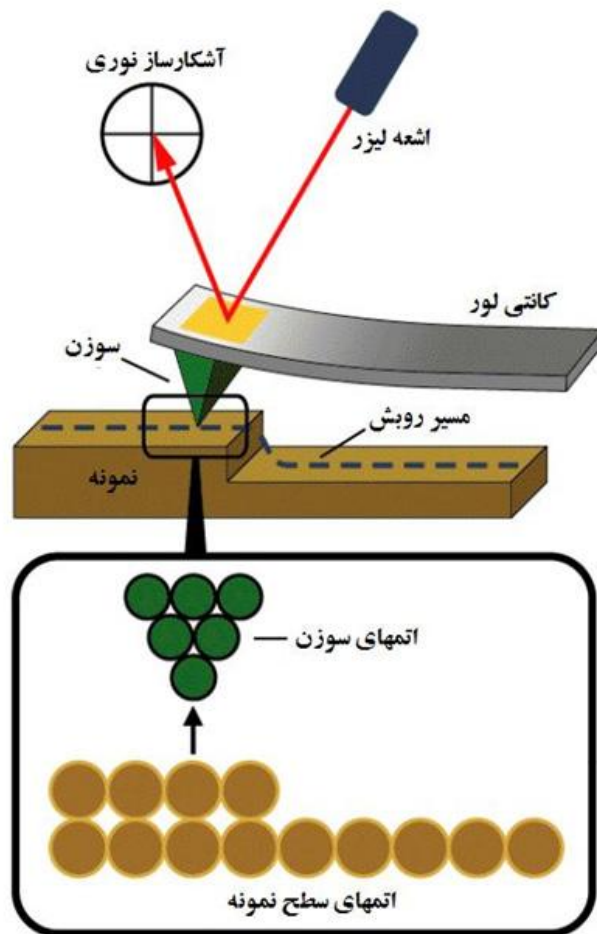
شکل (۱) اجزاء کلی میکروسکوپ نیروی اتمی و عملکرد آنها [۱۵]

نیروهای بین سوزن و سطح نمونه باعث خم شدن یا انحراف کانتیلور شده و یک آشکارساز میزان انحراف کانتیلور را در حالیکه سوزن سطح نمونه را روبش می‌کند یا نمونه در زیر سوزن روبش می‌شود، در سیستم‌هایی که نمونه حرکت روبشی را انجام می‌دهد، اندازه می‌گیرد. می‌توان از انحراف کانتیلور برای ورودی یک مدار بازخورد استفاده کرد که روبشگر پیزوالکتریک^{۱۱} را در مواجهه با توپوگرافی سطح نمونه به گونه‌ای در جهت Z بالا و پایین می‌برد که میزان انحراف کانتیلور ثابت بماند. اندازه‌گیری انحرافات کانتیلور به کامپیوتر امکان تولید تصویر توپوگرافی سطح را می‌دهد.

۳-۱- آشکارسازی موقعیت کانتیلور

در اغلب AFM‌هایی که امروزه عرضه می‌شود، موقعیت کانتیلور را با استفاده از روشهای اپتیکی تعیین می‌گردد. متداولترین آنها در شکل (۲) نشان داده شده است.

^{۱۱} اثر پیزو الکتریک به زبان ساده، قابلیت برخی از مواد و کریستال‌ها برای تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی و تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی است.



شکل (۲) نحوه آشکارسازی موقعیت کانتیلور با روش متداول در میکروسکوپ نیروی اتمی [۱۶]

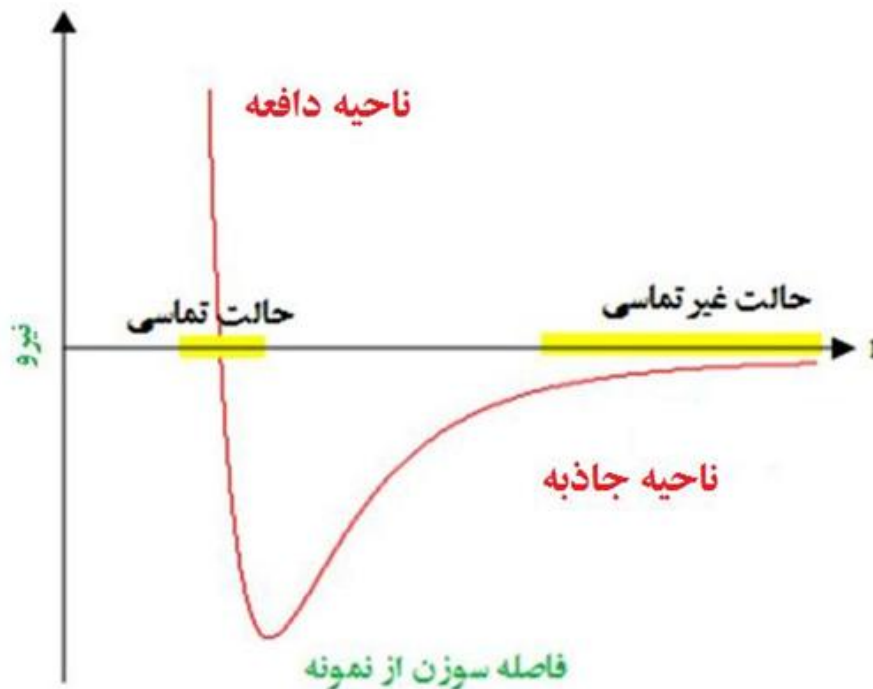
یک اشعه لیزری به پشت کانتیلور به سمت یک آشکارساز نوری حساس به موقعیت (PSPD) منعکس می شود. با خم شدن کانتیلور محل اشعه لیزر روی آشکارساز تغییر کرده و PSPD می تواند جابجایی به کوچکی ۱۰ آنگستروم (۱ نانومتر) را اندازه گیری کند. نسبت فاصله بین کانتیلور و آشکارساز به طول کانتیلور به عنوان یک تقویت کننده مکانیکی عمل می کند. در نتیجه سیستم می تواند حرکت عمودی کمتر از آنگستروم نوک کانتیلور را اندازه گیری کند. روشی دیگر جهت آشکار سازی انحراف آشکارساز بر مبنای تداخل اپتیکی می باشد. از مواد مورد استفاده رایج در ساخت کانتیلورها می توان به الماس، Si ، Si_3N_4 و Ir اشاره نمود [۱۷].

۴- حالات کاری میکروسکوپ روبشی نیروی اتمی

در هنگام کار با میکروسکوپ نیروی اتمی، نیروهای مختلفی در انحراف کانتیلور AFM مشارکت می کنند. از جمله این

¹ Position-sensitive photodetector

نیروها می توان به نیروهای بین اتمی یا نیروهای واندروالس اشاره نمود. وابستگی نیروی واندوالس به فاصله سوزن و نمونه در شکل (۳)، نشان داده شده است.



شکل (۳) نمودار انرژی پتانسیل پروب و نمونه [۱۶]

در شکل (۳)، دو حالت مربوط به دو ناحیه علامت گذاری شده است:

۱- حالت استاتیکی (DC-AFM) یا حالت دفعی

۲- حالت دینامیکی (AC-AFM) یا حالت جذبی

۴-۱- حالت استاتیکی

در حالت استاتیکی کانتیلور در فاصله کمتر از چند آنگستروم از سطح نمونه قرار داده می شود. نیروی بین اتمی بین کانتیلور و نمونه نیروی دافعه است. سوزن به انتهای کانتیلوری با ثابت فنر کم (کمتر از ثابت فنر مؤثری که اتم های نمونه را بهم متصل می کند)، وصل شده است و تماس فیزیکی ملایمی با نمونه برقرار می کند. هنگامی که روبشگر سوزن را به آرامی روی سطح نمونه روبش می کند، نیروی استاتیکی باعث خم شدن کانتیلور می شود تا بتواند تغییرات توپوگرافی سطح را دنبال کند.

با نزدیک کردن اتم ها، از سمت راست منحنی شکل (۳)، ابتدا آنها یکدیگر را بطور ضعیفی جذب می کنند. این جاذبه افزایش می یابد تا جائیکه آنقدر اتمها بهم نزدیک می-شوند که ابرهای الکترونی آنها بصورت الکترواستاتیکی شروع به دفع یکدیگر می کنند. با کاهش فاصله بین اتمی، این دافعه الکترواستاتیکی بطور فزاینده ای نیروهای جاذبه را تضعیف می کند.

وقتی که فاصله بین اتمها به یک یا دو آنگستروم، حدود طول یک پیوند شیمیایی، می رسد، نیرو صفر می شود. در نتیجه نیروی دافعه واندروالس تقریبا با هر نیرویی که بخواهد اتمها را به هم نزدیکتر کند، مقابله می نماید. در چنین فاصله هایی کانتیلور از طریق سوزن به نمونه فشار می آورد و به جای اینکه اتمهای سوزن به اتمهای نمونه نزدیکتر شوند، کانتیلور خم می گردد. در صورت وجود کانتیلور خیلی مقاوم نیروی زیادی به روی نمونه اعمال می گردد و احتمالا سطح نمونه تغییر فرم می یابد که در نانولیتوگرافی^۳ مورد استفاده قرار می گیرد.

۴-۱-۱- حالت ارتفاع ثابت

در حالتی که ارتفاع روبشگر پیژو در حین روبش ثابت است، تغییرات انحراف کانتیلور می تواند مستقیما برای تولید اطلاعات توپوگرافی استفاده شود. از این حالت، اغلب برای ایجاد تصاویر در مقیاس اتمی از سطوحی که در حد اتمی مسطح هستند، استفاده می گردد. در اینجا انحرافات کانتیلور و بنابراین تغییرات در نیروی اعمالی، کوچک است. حالت ارتفاع ثابت برای ثبت تصاویر همزمان^۴ سطوح در حال تغییر، که سرعت بالای روبش ضروری است، مورد نیاز است.

۴-۱-۲- حالت نیروی ثابت

می توان از انحراف کانتیلور برای ورودی یک مدار بازخورد استفاده کرد که روبشگر پیژوالکتریک را در مواجهه با توپوگرافی سطح نمونه به گونه ای در جهت Z بالا و پایین می برد که میزان انحراف کانتیلور ثابت بماند. در این مورد، تصویر از حرکت روبشگر پیژو تولید می شود. با ثابت نگه داشتن انحراف کانتیلور، کل نیروی اعمالی بر نمونه ثابت خواهد بود. در حالت نیروی ثابت، سرعت روبش با زمان واکنش مدار بازخورد محدود می شود، ولی کل نیروی اعمالی توسط سوزن بر نمونه به خوبی کنترل می گردد. برای بسیاری از کاربردها، حالت نیروی ثابت ترجیح داده می شود.

۴-۱-۳- انواع نیروهای موجود در عملیات روبش

¹ nanolithography 3
¹ Real time 4

میکروسکوپ های نیروی اتمی در حین کار با نیروهای نظیر نیروهای کوتاه برد، الکترواستاتیک، موئینگی و ... روبرو هستند. بعنوان مثال در زیر به دو نیرویی که علاوه بر نیروی دافعه واندروالس، در حین عملیات AFM استاتیکی حضور دارند، اشاره می شود:

۴-۱-۳-۱- نیروی اعمالی توسط کانتیلور

نیرویی که توسط خود کانتیلور اعمال می شود، مانند نیروی یک فنر فشرده است. اندازه و علامت (جاذبه یا دافعه) نیروی کانتیلور به انحراف کانتیلور و ثابت فنر آن بستگی دارد.

۴-۱-۳-۲- نیروی موئینگی^{۱۵}

نیروی موئینگی معمولا توسط لایه نازک آب (که ممکن است از رطوبت محیط ناشی گردد) اعمال می شود. نیروی موئینگی هنگامی بوجود می آید که لایه ای از آب دور سوزن ایجاد گردد. در این حالت نیروی جاذبه قوی حدود 10^{-8} نیوتن را پدیدار می شود که در این حالت سوزن را در تماس با سطح نگه می دارد. بزرگی نیروی موئینگی به فاصله سوزن تا نمونه بستگی دارد. تا زمانی که سوزن با نمونه تماس دارد، نیروی موئینگی ثابت می باشد. همچنین فرض می شود که لایه آب تقریبا همگن است.

در نتیجه نیروی متغیر در AFM استاتیکی باید توسط نیروی دافعه واندروالس جبران گردد. اندازه نیروی کل اعمال شده بر نمونه از 10^{-8} نیوتن (در شرایطی که تقریبا آب سوزن را به طرف نمونه می کشد و کانتیلور آن را از نمونه می راند) تا محدوده معمول تر 10^{-6} تا 10^{-7} نیوتن تغییر می کند [۳].

۴-۲- حالت دینامیکی

میکروسکوپ های نیروی اتمی دینامیکی، یکی از چند تکنیک کانتیلور ارتعاشی است که در آن کانتیلور AFM در نزدیکی سطح نمونه ارتعاش می کند. در حالت دینامیکی کانتیلور در فاصله چند ده تا چند صد آنگستروم از سطح نمونه قرار داده می شود و در این حالت نیروی بین اتمی بین کانتیلور و نمونه (عمدتا به دلیل برهمکنش های واندروالس دوربرد)، نیروی جاذبه است. فاصله حدود چند ده تا چند صد آنگستروم در منحنی واندروالس، به عنوان منطقه دینامیکی یا جذبی مشخص شده است.

¹ capillary

در حالت دینامیکی سیستم کانتیلور را در نزدیکی فرکانس رزونانس آن (۱۰۰-۴۰۰ هرتز) و دامنه چند دهم آنگ استروم می لرزاند. سپس تغییرات فرکانس رزونانس یا دامنه لرزش با نزدیک شدن سوزن به سطح نمونه اندازه گیری می شود. حساسیت این روش، دستیابی به قدرت تفکیک عمودی زیر آنگ استروم تصویر را (مانند AFM های استاتیکی) فراهم می کند.

در حالت AFM دینامیکی، سیستم، فرکانس رزونانس یا دامنه ارتعاش کانتیلور را اندازه گیری می کند و آن را به کمک یک سیستم بازخورد که روبشگر پیزو را بالا و پایین می برد، ثابت نگه می دارد. با ثابت نگه داشتن فرکانس رزونانس یا دامنه، سیستم متوسط فاصله سوزن تا نمونه را نیز ثابت نگه می دارد. همانند AFM استاتیکی (در حالت نیروی ثابت)، حرکت روبشگر پیزو برای تولید اطلاعات استفاده می شود.

۵- مزایا و معایب حالات استاتیکی و دینامیکی

مزایای میکروسکوپ های نیروی اتمی دینامیکی بدین صورت می باشد که توپوگرافی نمونه بدون تماس یا با تماس خیلی کم بین سوزن و نمونه اندازه گیری می شود. کل نیروی بین سوزن و نمونه در حالت دینامیکی بسیار کم است (معمولاً حدود 10^{-12} نیوتن). این نیروی کم مزیتی، برای مطالعه نمونه های نرم یا الاستیک به شمار می رود. همچنین نمونه هایی مانند ویفرهای سیلیکونی از طریق تماس با سوزن آلوده نمی شوند. از طرف دیگر به دلیل اینکه نیروی بین سوزن و نمونه در حالت دینامیکی کم است، اندازه گیری آن مشکل تر از نیروی چندین بار بزرگتر حالت استاتیکی است. علاوه بر این کانتیلور های استفاده شده برای AFM های دینامیکی باید نسبت به کانتیلور های AFM های استاتیکی سفت تر باشند، زیرا کانتیلور نرم می تواند به طرف سمت سطح نمونه کشیده شده و در تماس با آن قرار گیرد. از طرفی، حالت دینامیکی برای اندازه گیری نمونه های نرم بر حالت استاتیکی ترجیح داده می شود. مقدار کم نیرو و سفت بودن کانتیلورها، در حالت دینامیکی، هر دو عواملی هستند که سیگنال AFM دینامیکی را کوچک می کنند. در مورد حالت دینامیکی، مشکل از بین رفتن سوزن یا نمونه، که گاهی بعد از اسکنهای فراوان توسط حالت استاتیکی مشاهده می شود، وجود ندارد.

در مورد نمونه های صلب ممکن است تصاویر AFM استاتیکی و دینامیکی به یک گونه بنظر برسند. ولی اگر برای مثال چند لایه آب روی سطح یک نمونه صلب میعان کرده باشد، ممکن است تصاویر کاملاً متفاوت باشند AFM. که در حالت استاتیکی کار می کند می تواند به این لایه نفوذ کند و سطح زیر آن را تصویر کند، در حالیکه در حالت AFM دینامیکی، سطح مایع را تصویر می کند. در جدول (۱) نقاط ضعف و قوت AFM در حالت های کاری مختلف ارائه شده است.

جدول (۱) نقاط قوت و ضعف حالات کاری AFM [۱۶]

غیر تماسی	تماسی	
<p>✓ نیروی کمی به سطح نمونه وارد شده و تخریبی در نمونه های نرم ایجاد نمی شود.</p>	<p>✓ سرعت روبش بالایی دارند.</p> <p>✓ دستیابی به رزولوشن اتمی بسهولت امکان پذیر است.</p> <p>✓ روبش آسانتر نمونه های زیر با حداکثر تغییرات در توپوگرافی عمودی</p>	نقاط قوت
<p>× رزولوشن جانبی کمتری دارند.</p> <p>× جهت جلوگیری از تماس با لایه سیالات، سرعت روبش کمتری دارد.</p> <p>× معمولا در نمونه های بشدت آبگریز با حداقل لایه سیال موجود، کاربرد دارد.</p>	<p>× نیروهای جانبی امکان تحریف تصویر حاصله را دارند.</p> <p>× نیروهای مومینگی حاصل از وجود لایه ای سیال، باعث اعمال نیروهای عمودی بزرگی در برهمکنش نمونه و سوزن می شوند.</p> <p>× ترکیب سایر نیروها رزولوشن فضایی را کاسته و موجب تخریب در سطوح نرم نمونه ها می گردند.</p>	نقاط ضعف

جمع بندی

در میکروسکوپ نیرو اتمی بین سوزن روبشگر و سطح نمونه که باعث خم شدن کانتیلور می شود، توسط آشکارساز اندازه گیری می شود. از این میکروسکوپ ها علاوه بر اینکه می توان جهت انواع نانولیتوگرافی و تولید نانو ساختارها و نانوماشینکاری استفاده کرد، برای مطالعه خواص مکانیکی، سایش یا خراش و ... نیز بکار می روند. این میکروسکوپ ها با دو حالت کاری استاتیکی (تماسی) و دینامیکی (غیر تماسی) کار می کنند. در حالت استاتیکی، کانتیلور در فاصله کم از سطح نمونه قرار دارد که هنگام روبش سوزن روی سطح نمونه، نیروی استاتیکی باعث خم شدن کانتیلور می شود. در این

حالت نیروی بین کانتیلور و نمونه، نیروی دافعه است. حالت استاتیکی با دو مد کاری ارتفاع ثابت و نیرو ثابت کار می کند. در حالت دینامیکی، فرکانس رزونانس کانتیلور می تواند به عنوان معیار تغییر نیرو (یا تغییر فاصله سوزن تا نمونه) استفاده شود. در این حالت نیروی اتمی بین کانتیلور و نمونه، از نوع جاذبه است. در این حالت بعلت عدم تماس با نمونه های نرم، تخریبی ایجاد نمی شود اما نسبت به حالت تماسی، سرعت روبش کمتری دارد.

منابع و مراجع

¹ G. Binnig, C. Gerber, E. Stoll, T.R. Albrecht, C.F. Quate, Atomic resolution with atomic force microscope, *Europhys. Lett.* 3, 1281–1286 (1987).

² Bharat Bhushan, "Springer Handbook of Nanotechnology", USA, Springer, (2004).

³ علیرضا ذوالفقاری، محمدالماسی، پیروز مرعشی، مهرداد نجبا، امیدسیفی، "میکروسکوپ پروبی روبشی آزمایشگاهی روی نوک سوزن"، تهران، پیکنور، (۱۳۸۵).

⁴ G.Meyer, N.M. Amer, Novel optical approach to atomic force microscopy, *Appl. Phys. Lett.* 53, 1045–1047 (1988).

⁵ B. Bhushan, S. Sundararajan, Micro-/nanoscale friction and wear mechanisms of thin films using atomic force and friction force microscopy, *Acta Mater.* 46, 3793–3804 (1998).

⁶ D.M. Eigler, E.K. Schweizer, Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope, *Nature* 344, 524–528 (1990).

⁷ A.L. Weisenhorn, J.E. MacDougall, J.A.C. Gould, S.D. Cox, W.S. Wise, J. Massie, P. Maivald, V.B. Elings, G.D. Stucky, P.K. Hansma, Imaging and manipulating of molecules on a zeolite surface with an atomic force microscope, *Science* 247, 1330–1333 (1990).

⁸ I.W. Lyo, P. Avouris, Field-induced nanometer-to-atomic-scale manipulation of silicon surfaces with the STM, *Science* 253, 173–176 (1991).

⁹ O.M. Leung, M.C. Goh, Orientation ordering of polymers by atomic force microscope tip-surface interactions, *Science* 225, 64–66 (1992).

¹ A.Majumdar, P.I. Oden,⁹ J.P. Carrejo, L.A. Nagahara, J.J. Graham, J. Alexander, Nanometer scale lithography using the atomic force microscope, *Appl. Phys. Lett.* 61, 2293–2295 (1992).

¹ B. Bhushan, O. Marti, "Scanning Probe Microscopy – Principle of Operation, Instrumentation, and Probes" , Nanotribology and Nanomechanics, Springer, (2011).

¹ D. Bonnell, (Ed.), "Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: Theory, Techniques, and Applications", 2nd ed., Wiley-VCH, New York, (2001).

¹ M. Binggeli, R. Christoph, H.E. Hintermann, J. Colchero, O. Marti, Friction force measurements on potential controlled graphite in an electrolytic environment, Nanotechnology 4, 59–63 (1993).

¹ Paolo Samori, "Scanning Probe Microscopies Beyond Imaging", WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, (2006).

¹ <http://www.natsyco.com/>

¹ <http://edu.nano.ir/paper/110>

¹ B. Bhushan, O. Marti, "Scanning Probe Microscopy – Principle of Operation, Instrumentation, and Probes" , Nanotribology and Nanomechanics, Springer, (2011).

