

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



میکروسکوپ نیروی اتمی

- مهدی کدخدائی - کارشناسی ارشد - مهندسی فناوری نانو - دانشگاه شیراز دانشکده فنی و مهندسی گروه مهندسی مواد
- محمد هادی مقیم - دکتری تخصصی - مهندسی مواد - دانشگاه شیراز دانشکده فنی و مهندسی گروه مهندسی مواد

میکروسکوپ های نیروی اتمی (AFM) ، دسته گسترده ای از تجهیزات شناسایی در مقیاس نانو با عنوان میکروسکوپ های نیروی را به خود اختصاص داده اند. امروزه دستگاههای تجاری متفاوتی با مبانی مشابه و حالات کاری مختلف عرضه شده اند 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 می گیرد.

مقدمه

گرد کارل بینینگ (GerdKarl Binnig) بر اساس طراحی های قبلی که با همکاری هاینرک روهرر (Heinrich Rohrer) در آزمایشگاه تحقیقاتی زوریخ IBM ، در جهت طراحی و ساخت میکروسکوپ تونلی روبشی، صورت داده بود، در سال ۱۹۸۶ میلادی با همکاری کلون کوات (CalvinQuate) و کریستف گربر (Christoph Geber) از دانشگاه استنفورد میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، را ارائه نمود. هدف او از این کار اندازه گیری نیروهای بسیار ناچیز (کمتر از $1\mu\text{N}$ ، بین نوک سوزن AFM و سطح نمونه مورد بررسی بود. پس از آنکه در سال ۱۹۸۱ میلادی ، میکروسکوپ تونلی روبشی (STM= scanning tunneling microscope) بوسیله گرهارد بینینگ (Gerd Binnig) و هاینرک روهرر (Heinrich Rohrer) اختراع شد، تلاشهای بسیاری بر اساس آن، در جهت توسعه روش های مشخصه یابی در مقیاس نانو صورت پذیرفت. در سال ۱۹۸۶، گرهارد بینینگ، بر اساس تجربیاتی که از ساخت میکروسکوپ تونلی روبشی بدست آورده بود، با همکاری کلون کوات و کریستف گربر از دانشگاه استنفورد، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) را اختراع نمودند. 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 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.

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 نارسانا 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.

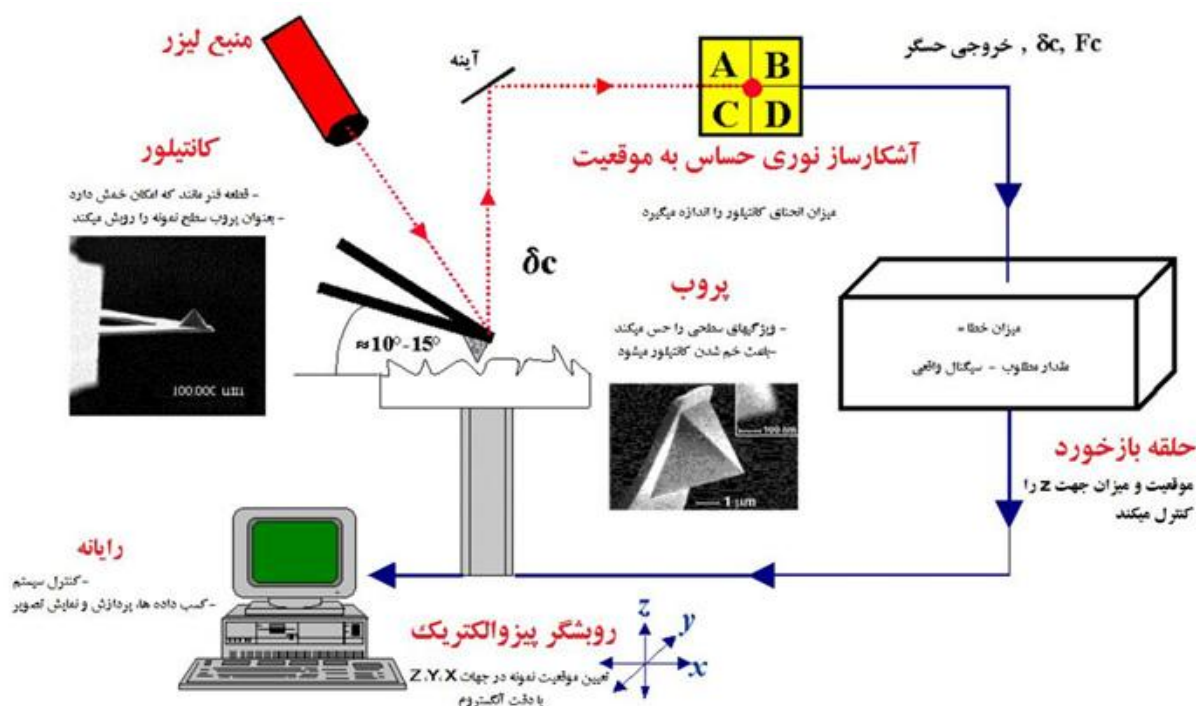
همچنین از این دستگاه مشخصه یابی، می توان برای مطالعه خراش و سائیدگی و نیز اندازه گیری خواص مکانیکی الاستیک و پلاستیک (از قبیل میزان سختی جسم در برابر جسم فرورونده (indentation hardness) و مدول الاستیسیته) استفاده نمود.

AFM در بسیاری از مطالعات، جهت نوشتار، دستکاری و جابجایی اتمهای منفرد زنون، مولکولها، سطوح سیلیکونی و پلیمری بکار گرفته شده اند. به علاوه این میکروسوپ ها جهت انواع نانولیتوگرافی و تولید نانو ساختارها و نانوماشینکاری استفاده شده اند.

میکروسکوپ های نیروی اتمی که برای اندازه گیری نیروهای عمودی و جانبی، طراحی شده اند، میکروسکوپ های نیروی جانبی (LFM)، یا میکروسکوپهای نیروی اصطکاکی (FFM) نامیده می شوند. دسته ای از FFM ها از توانایی اندازه گیری نیروهای جانبی در دو جهت متعامد برخوردارند. تعدادی از تحقیقات، طراحی های AFM و FFM را اصلاح کرده و بهبود داده است و این سیستمهای بهبود داده شده، جهت اندازه گیری چسبندگی و اصطکاک و نیروهای پیوندی در سطوح جامد و مایع در مقیاس نانو و میکرو بکار می روند.

سیستم دستگاہی میکروسکوپ روبشی نیروی اتمی

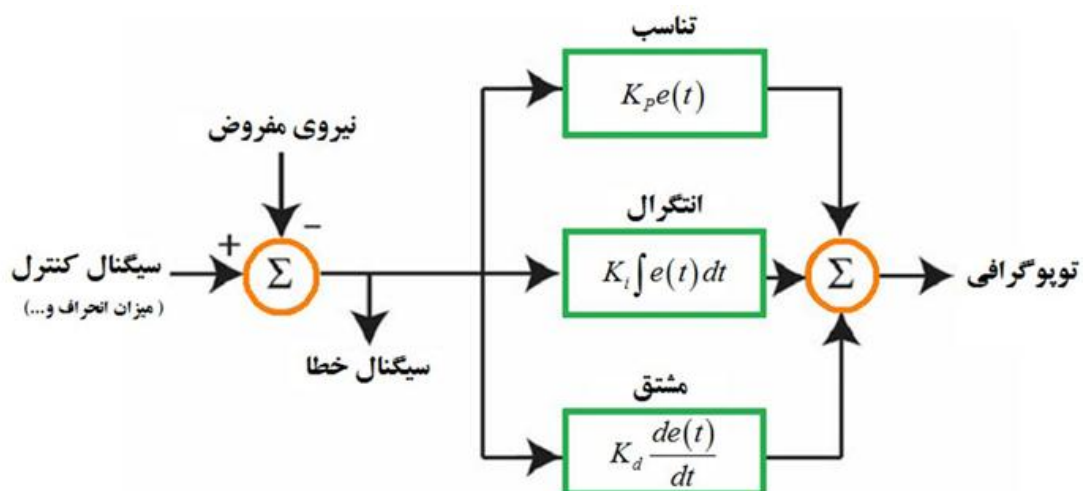
میکروسکوپ روبشی نیروی اتمی AFM سطح نمونه را توسط یک سوزن تیز، به طول ۲ میکرون و غالباً قطر نوک کمتر از ۱۰ نانومتر آنالیز می کند. سوزن در انتهای آزاد یک کانتیلور (انبرک (cantilever) به طول حدود ۱۰۰ تا ۴۵۰ میکرون قرار دارد



شکل ۱- اجزاء کلی میکروسکوپ نیروی اتمی و عملکرد آنها

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 می کند یا نمونه در زیر سوزن روبش می شود، در سیستم هایی که نمونه حرکت روبشی را انجام می دهد، اندازه می گیرد. میتوان از انحراف کانتیلور برای ورودی یک مدار بازخورد استفاده کرد که روبشگر پیزو را در مواجهه با توپوگرافی سطح نمونه به گونه ای در جهت Z بالا و پایین می برد

که میزان انحراف کانتیلور ثابت بماند. اندازه گیری انحرافات کانتیلور به کامپیوتر امکان تولید تصویر توپوگرافی سطح را می دهد.

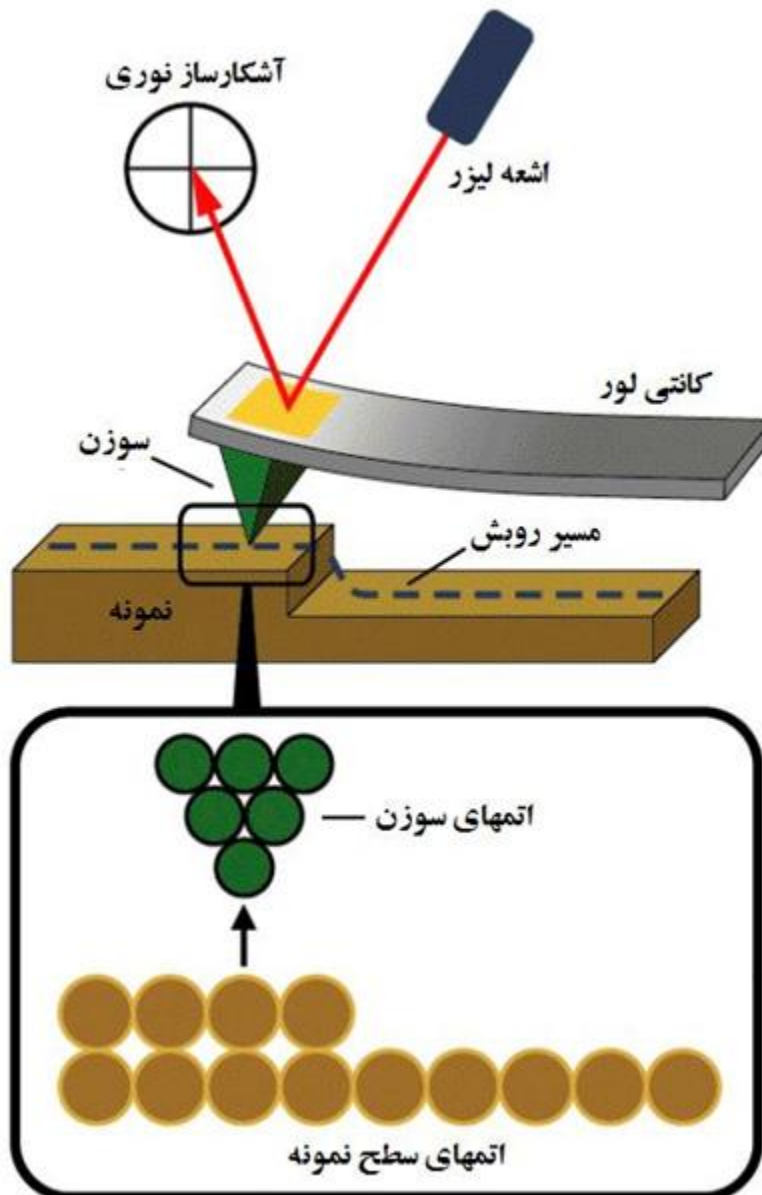


شکل ۲- بلاک دیاگرام حلقه بازخوردی میکروسکوپیهای AFM. متغیرهای K_p ، تناسب بدست آمده، K_i ، انتگرال بدست آمده، K_d ،

مشتق بدست آمده و e ، میزان خطاست

آشکارسازی موقعیت کانتیلور

در اغلب AFM هایی که امروزه عرضه می شود، موقعیت کانتیلور را با استفاده از روشهای اپتیکی تعیین می گردد. متداولترین آنها در شکل ۳ نشان داده شده است .



شکل ۳- نحوه آشکارسازی موقعیت کانتیلور با روش متداول در میکروسکوپ نیروی اتمی

یک اشعه لیزری به پشت کانتیلور به سمت یک آشکارساز نوری حساس به موقعیت (PSPD= Position-sensitive photo detector) منعکس می شود. با خم شدن کانتیلور محل اشعه لیزر روی آشکارساز تغییر کرده و PSPD میتواند 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 .

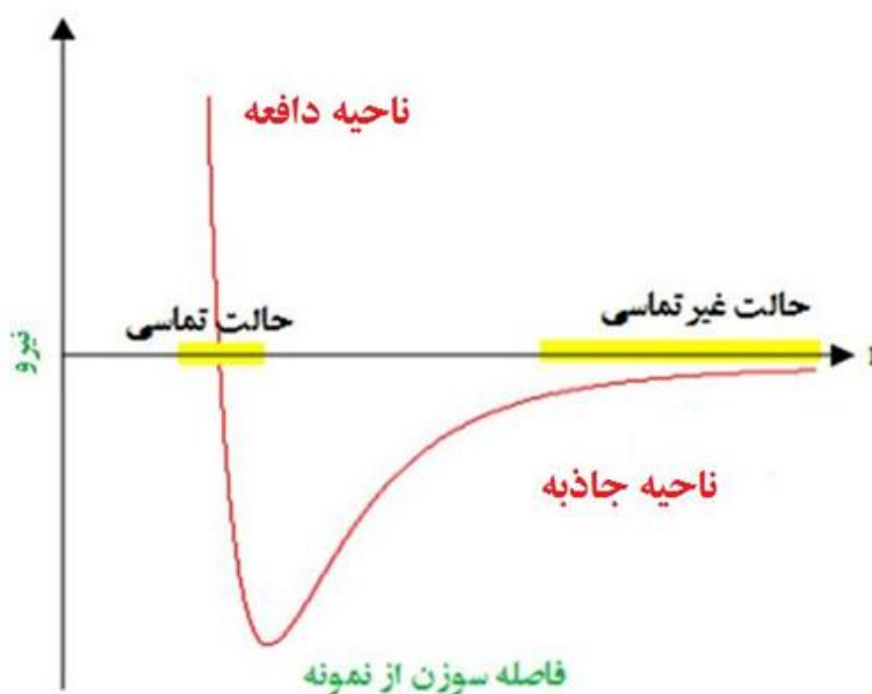
یک تکنیک بسیار ظریف دیگر جهت آشکارسازی، ساختن کانتیلور از یک ماده پیزومقاومتی (piezoresistive) است به گونه ای که انحراف را بصورت سیگنال الکتریکی آشکار کند. در مواد پیزوی مقاومتی، تنش ناشی از تغییر فرم مکانیکی باعث تغییر مقاومت الکتریکی ماده می شود. برای آشکارسازی پیزومقاومتی نیازی به اشعه لیزر و PSPD نیست. وقتی که AFM انحراف کانتیلور را آشکار کرد، می تواند اطلاعات توپوگرافی را در دو حالت ارتفاع ثابت یا نیروی ثابت تولید کند. در جدول ۱، خواص مربوط به مواد مورد استفاده رایج در ساخت کانتیلورها ذکر شده اند.

جدول ۱ - خواص مربوط به مواد مورد استفاده رایج در ساخت کانتیلورها

نوع ماده	مدول یانگ E (GPa)	دانشیه $(\rho)(\text{Kg/m}^3)$	ریز سختی (GPa)
الماس	۹۰۰-۱۰۵۰	۳۵۱۵	۷۸/۴-۱۰۲
Si ₃ N ₄	۳۱۰	۳۱۸۰	۱۹/۶
Si	۱۳۰-۱۸۸	۲۳۳۰	۹-۱۰
W	۳۵۰	۱۹۳۱۰	۳/۲
Ir	۵۳۰	-	~۳

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 نیروها می توان به نیروهای بین اتمی یا نیروهای واندروالس اشاره نمود. وابستگی نیروی واندوالس به فاصله سوزن و نمونه در شکل ۴، نشان داده شده است .



شکل ۴- نمودار انرژی پتانسیل پروب و نمونه

در شکل ۴، دو حالت مربوط به دو ناحیه علامت گذاری شده است:

- حالت استاتیکی (DC-AFM) یا حالت دفعی)
- حالت دینامیکی (AC-AFM) یا حالت جذبی)

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 اتمهای 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 ۴، ابتدا آنها یکدیگر را بطور ضعیفی جذب می کنند. این جاذبه افزایش می یابد تا جاییکه 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 (nanolithography) مورد استفاده قرار می گیرد.

حالت ارتفاع ثابت

در حالتی که ارتفاع روبشگر پیزو در حین روبش ثابت است، تغییرات انحراف کانتیلور می تواند مستقیماً 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 (Real time) سطوح در حال تغییر، که سرعت بالای روبش ضروری است، مورد نیاز است.

حالت نیروی ثابت

می توان از انحراف کانتیلور برای ورودی یک مدار بازخورد استفاده کرد که روبشگر پیزو 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 پیزو تولید می شود. با ثابت نگهداشتن 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.

انواع نیروهای موجود در عملیات روبشی

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:

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.

$$10^{-8}N$$

نیروی موئینگی (capillary)

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 میشود 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.

حالت دینامیکی

میکروسکوپ های نیروی اتمی دینامیکی، یکی از چند تکنیک کانتیلور ارتعاشی (vibrating) 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 برهمکنشهای واندروالس دوربرد (Long-range)، نیروی جاذبه است. فاصله حدود چند ده تا چند صد آنگستروم در منحنی واندروالس، به عنوان منطقه دینامیکی یا جذبی مشخص شده است.

در حالت دینامیکی سیستم کانتیلور را در نزدیکی فرکانس رزونانس آن (۱۰۰-۴۰۰) هرتز (و دامنه چند دهم آنگستروم 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 آنگستروم تصویر را (مانند AFM های استاتیکی) فراهم می کند.

رابطه بین فرکانس کانتیلور و تغییرات توپوگرافی نمونه را می توان بدینگونه توضیح داد:

فرکانس رزونانس کانتیلور متناسب با جذر ثابت فنر آن تغییر می کند. علاوه بر این ثابت فنر کانتیلور با گرادیان اعمال نیرو بر کانتیلور تغییر می کند. بالاخره گرادیان نیرو که از منحنی نیرو در برابر فاصله مشتق می شود، با فاصله سوزن تا نمونه تغییر می کند. بنابراین تغییر فرکانس رزونانس کانتیلور می تواند به عنوان معیاری برای تغییر نیرو استفاده شود که به نوبه خود تغییرات فاصله تا نمونه (یا توپوگرافی نمونه) را منعکس 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 نگهداشتن 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.

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 (معمولا حدود 10^{-12} نیوتن). این نیروی کم مزیتی، برای مطالعه نمونه های نرم یا الاستیک به شمار می

رود. همچنین نمونه هایی مانند ویفرهای سیلیسی (Silicon wafers) 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. از همین رو اندازه گیری تغییرات در سیگنال مشکل است و نیاز به یک روش آشکارسازی AC حساس می باشد.

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.

جدول ۲- نقاط قوت و ضعف حالات کاری AFM

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 مؤینگی 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

نتیجه گیری

در میکروسکوپ نیرو اتمی نیروی بین سوزن روبشگر و سطح نمونه که باعث خم شدن کانتیلور می شود، توسط آشکارساز اندازه گیری می شود. از این میکروسوپ ها علاوه بر اینکه می توان جهت انواع نانولیتوگرافی و تولید نانوساختارها 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.