NAISL
Volume 2, Number 3, 2018
Pages:87-104
Print ISSN: 2588-6401
Online ISSN: 2588-641X
Website: shaajournal.msrt.ir

Scanning probe microscopes

Hadi Basharnavaz[1*],Seyed-Hossein Kmali[2]

Abstract

Scanning probe microscopy (SPM) is a collection of techniques that can detect the surface of different materials with high resolution and examine the nanometer range, even in the angstrom scale and take pictures of a physical, chemical, and mechanical characteristics and also topography of the surfaces. Moreover, SPM can manipulate surfaces to atomic-scale provided. The flexibility of the operating conditions of these microscopes provides different processing conditions in a various situation such as gas, liquid, and vacuum. Components of SPM are including sensor, probe, feedback control system, quick access system, camera, and processing system and software. It should be noted that in comparison with scanning tunneling microscope (STM), atomic force microscope (AFM) cannot reach a resolution at the atomic dimension level. Also, STM can only be used for investigation of conductor surfaces, while AFM utilized for study all of the conductor, semiconductor and insulating surfaces.

Key Words:

Scanning probe microscope,
Scanning tunneling microscope,
Atomic force microscope,
Probe,
Cantilever

(*) Corrosponding author
1. Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
E-mail: h.basharnavaz@uma.ac.ir
Tel: 09143535812
2. Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
E-mail: kamali.hossein2020@gmail.com
Tel: 09148442542

میکروسکوپ‌های پروبی روبشی

هادی بشرنواز[1*]، سید حسین کمالی[2]

نشریه رویکردهای نوین در آزمایشگاه‌های علمی ایران
سال دوم، شماره ۳, ۱۳۹۷
صفحات ۱۰۴-۸۷
شاپای چاپی: ۶۴۰۱-۲۵۸۸
شاپای الکترونیکی: ۶۴۱X-۲۵۸۸
وب‌سایت: shaajournal.msrt.ir

چکیده

هادی بشرنواز

سید حسین کمالی

میکروسکوپ پروبی روبشی مجموعه‌ای از تکنیک‌هایی است که سطح ماده را با قدرت تفکیک بالا، در محدوده نانومتر و حتی آنگستروم بررسی کرده و تصاویری از یک خاصیت فیزیکی یا شیمیایی یا مکانیکی سطح یا توپوگرافی آن ارائه می‌دهد. علاوه بر این، در این میکروسکوپ‌ها امکان جمع‌آوری اطلاعاتی غیر از وضعیت سطح ماده نیز وجود دارد. حوزه کاربرد میکروسکوپ‌های پروبی روبشی، علاوه بر این که میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی را شامل می‌شود، می‌تواند امکان دستکاری سطوح تا مقیاس اتمی را فراهم آورد. انعطاف‌پذیری حالات کاری این میکروسکوپ‌ها، امکان پردازش‌های مختلف را در شرایط محیطی متفاوت نظیر محیط‌های گازی، مایع و خلاء ایجاد می‌کند. اجزای میکروسکوپ‌های پروبی روبشی شامل حسگر، روبشگر، سیستم کنترل بازخوردی، سیستم دستیابی سریع، دوربین و سیستم پردازش و نرم‌افزار هستند. هم‌چنین در مقایسه با میکروسکوپ تونلی روبشی (MTS)، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) نمی‌تواند به رزولوشنی در سطح ابعاد اتمی برسد. در سوزن MTS، تنها نزدیک‌ترین اتم که با نزدیک‌ترین اتم سطح نمونه در تماس است در حالی که در سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی اتم‌های متعددی هم‌زمان با اتم‌های زیادی با چندین اتم روی نمونه تاثیر دارند. هم‌چنین میکروسکوپ تونلی روبشی، تنها می‌تواند جهت مطالعه سطوحی که از لحاظ الکتریکی رسانایی قابل قبولی دارند، مورد استفاده واقع شود، اما میکروسکوپ نیروی اتمی این محدودیت را نداشته و جهت مطالعه تمامی سطوح رسانا، نیمه‌رسانا و عایق مورد استفاده قرار می‌گیرد.

واژگان کلیدی:

میکروسکوپ پروبی روبشی،
رسانا،
نیمه هادی،
غیر مخرب،
پروب،
سوزن نوک تیز

(*) مسئول مکاتبات.
۱. دکتری تخصصی شیمی،دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
ایمیل: h.basharnavaz@uma.ac.ir
تلفن: ۰۹۱۴۳۵۳۵۸۱۲
۱. دکتری تخصصی شیمی،دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
ایمیل: kamali.hossein2020@gmail.com
تلفن: ۰۹۱۴۸۴۴۲۵۴۲

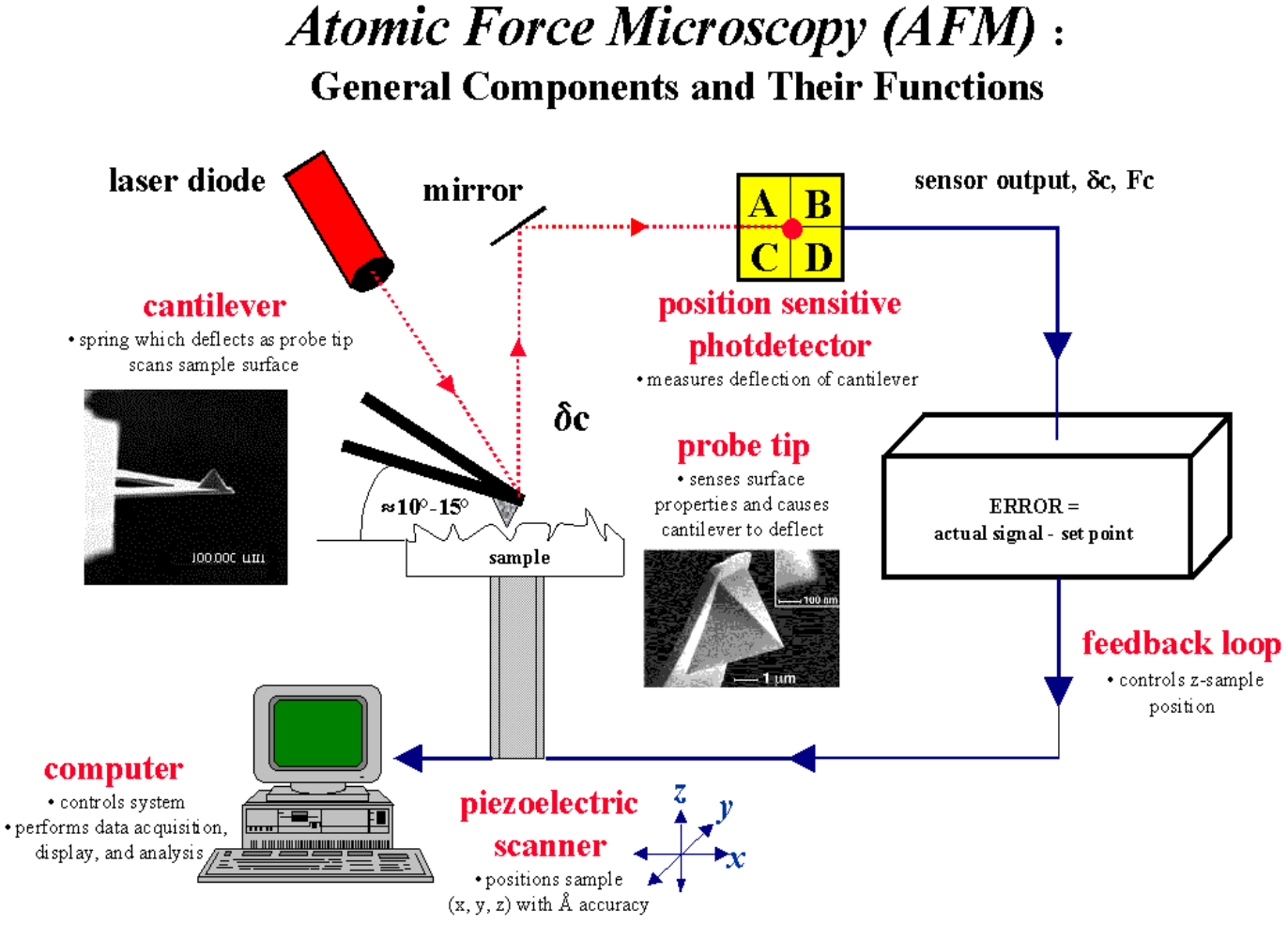
۱ مقدمه

در گستره علم و پژوهش، میکروسکوپ‌های فراواني به منظورمشاهده سطوح مواد مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مهم‌ترین ابزار جدید، میکروسکوپ‌های روبشی با پروب (Microscopy Probe Scanning) با عنوان اختصاری SPM هستند که خدمات شایاني را به محققین ارایه می‌نمایند. SPM ابزاری بی‌نظیر و در دسترس برای بررسی مواد در مقیاس‌های اتمی است. این دستگاه از فن‌آوری‌های قرن بیستم بوده و تحول بزرگی را در علم متالوژی پدید آورده است. SPM در واقع روشی میکروسکوپی در ریزبینی اجسام است که در آن سطح نمونه توسط یك سوزن نوك تیز یا پروب که نوك آن به صورت تك اتمی است روبش می‌شود. این سوزن روبنده به خاطر ابعاد بسیار کوچك خود می‌تواند کوچك‌ترین پستی یا بلندی موجود در سطح را (در حد نانومتر) حس نموده به وسیله دستگاه ردیاب برای استفاده کننده ارسال نماید. بسته به این که اطلاعات گرفته شده توسط سوزن با چه مکانیزمی برای انسان قابل دریافت باشد دو سیستم میکروسکوپی بوجود آمد. یکی از این سیستم‌ها از خاصیت الکتریکیا جسام بهره گرفته با تولید یك جریان الکترونی تونلی و تغییرات آن در اثر نوسان سوزن روی سطح اطلاعات را دریافت می‌کند ودیگری با تابانیدن نور لیزر و بررسی میزان تغییرات بازتاب آن را دراثر نوسانات سوزن در روي سطح این کار را انجام می‌دهد. اولین روش با توجه به نحوه کار آن که به وسیله ایجاد جریان تونلی از الکترون‌هاست با نام میکروسکوپ تونلی روبشی Microscopy Probe Scanning یا STM نامگذاری شده است. روش دوم نیز با توجه به نوع ارتباط سوزن با سطح که توسط نیروهای بین اتمی است میکروسکوپ نیروی اتمی Microscopy Force Atomic یا AFM نام گرفته است این دو میکروسکوپ با وجود تشابهات فراوان حایز تفاوت‌هایی نیز هستند. از بارزترین تفاوت‌های روش‌های مذکور در این است که نمونه در STM حایز پایداری مکانیکی و در AFM دارای هدایت الکتریکی است.

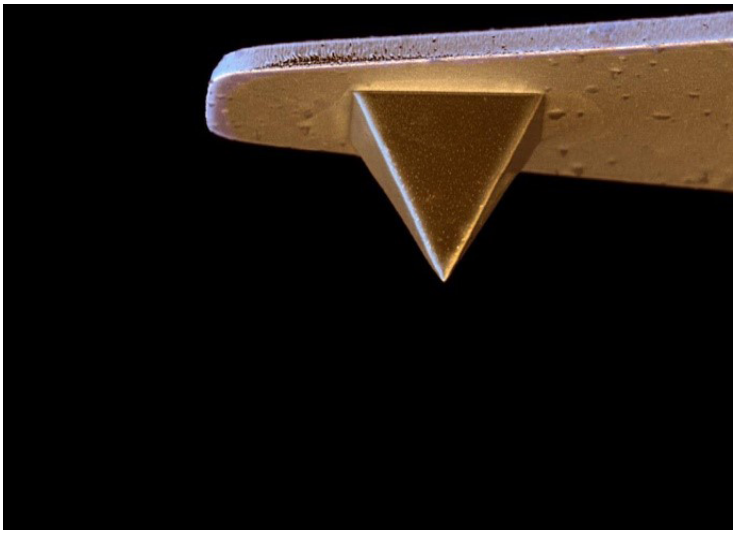
میکروسکوپ نیرویی اتمی(AFM):

تلاش برای دیدن سطوح بسیارنازک، از مهم‌ترین فعالیت‌های علمی در سراسر آزمایشگاه‌های جهان می‌باشد. مشاهده مستقیم سطوح بسیار نازک از قبیل سطح کف دریاها یا سطح اتم‌ها، بسیار مشکل و معمولاً غیراقتصادی است. زیرا روش معمول برای دیدن چنین سطوحی غیرمستقیم است، یعنی جمع‌آوری داده‌های دقیق و پردازش آن‌ها توسط رایانه‌ها و تبدیل‌شان به تصاویر دیدنی. هدف ما در این مقاله، آشنایی با چگونگی کسب اطلاعات از سطوح نادیدنی و تبدیل آن‌ها به مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی می‌باشد. این همان کاری است که میکروسکوپ نیروی اتمی انجام می‌دهد.

میکروسکوپ نیروی اتمی از خانواده میکروسکوپ‌های پروب روبشی (SPM) است و به مانند نسخه‌های دیگر میکروسکوپ‌های پروب روبشی، با اندازه‌گیری خواص قابل لمس از طریق یک کاوشگر (پروب) یا یک سر سوزن بسیار نزدیک به نمونه کار می‌کند. به بیان دقیق، AFM با اندازه‌گیری نیروهای میان سر سوزن و نمونه کار می‌کند. این نیروها برآیند نیروهای جاذبه و دافعه بین اتم‌ها، نیروهای واندروالسی و نیروهای مویینگی هستند. در شکل ۱ طرح شماتیک از دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی نشان داده شده است.

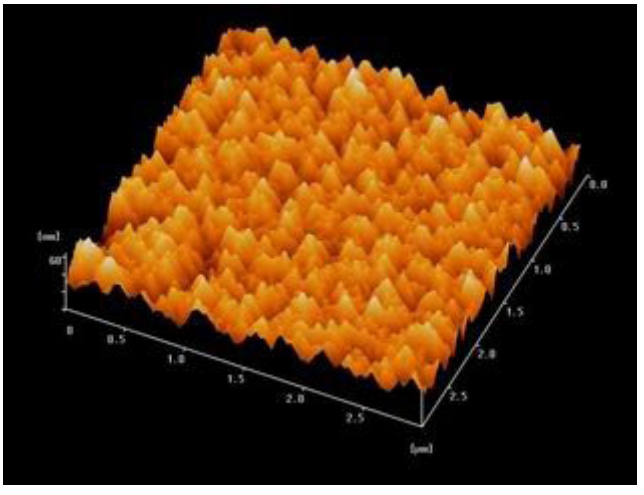


شکل ۱- طرح شماتیک از دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی[۱]



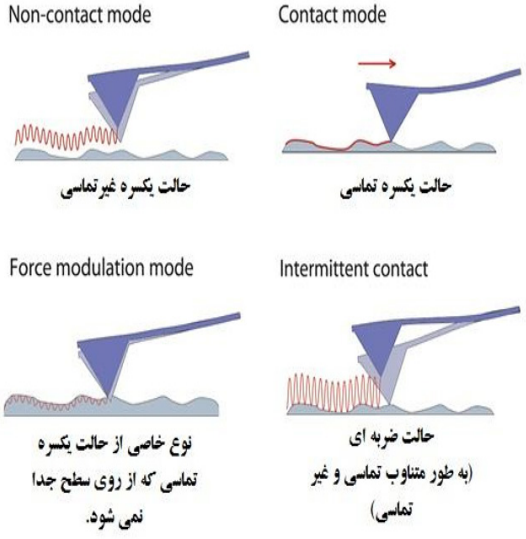
شکل۲- در این تصویر اهرم یک سر آزاد AFM و سوزن نوک آن مشاهده می‌شود.

میکروسکوپ نیروی اتمی در مقایسه با دیگر میکروسکوپ‌های پروب روبشی امید بیش‌تری دارد که بتواند بهترین وضوح (رزولوشن) و انعطاف را در قابلیت‌ها داشته باشد. این میکروسکوپ می‌تواند برای محدوده وسیعی از مواد به کار رود و کنار تصاویر واضح و بسیار مشخص (کنتراست بالا) سه بعدی از سطح ماده، می‌تواند اطلاعات دیگری از اصطکاک و کش‌سانی نمونه تهیه نماید (شکل ۳). مثلاً میکروسکوپ نیروی اتمی می‌تواند نیروهای اصطکاک جانبی یا خواص کش‌سانی نمونه را اندازه‌گیری کند.

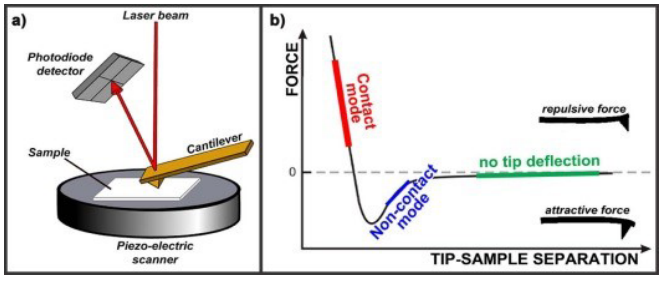


شکل ۳-تصویری سه بعدی از دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی[۲]

میکروسکوپ نیروی اتمی درگستره وسیعی ازکاربردها مانند زیست‌شناسی مولکولی (مثل تحقیقات در بخش ژنتیک) و زمینه‌های مختلف از علوم مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دستگاه می‌تواند امکان اندازه‌گیری‌های نیرو و ارزیابی‌های کیفی سطحی (مانند نقص‌های نیمه هادی) را نیز فراهم نماید. میکروسکوپ نیروی اتمی می‌تواند به روش‌های مختلفی عمل کند مانند: حالت یکسره تماسی، حالت یکسره غیر تماسی و حالت ضربه‌ای (به طور متناوب تماسی و غیرتماسی) که در شکل ٤ نشان داده شده است[۳].



شکل٤-انواع حالت‌های میکروسکوپ نیروی اتمی[٤]



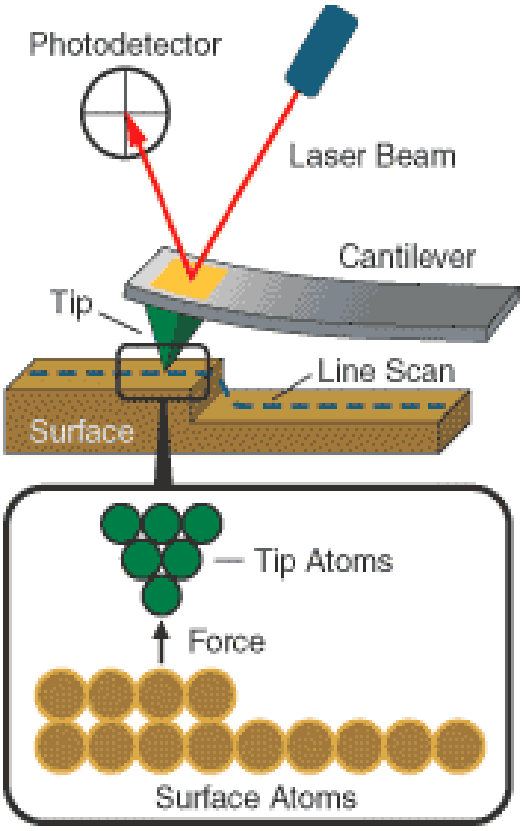
شکل ۵-دیاگرام نیرو برای انواع حالت‌های میکروسکوپ نیروی اتمی[۵]

حالت ارتماسی

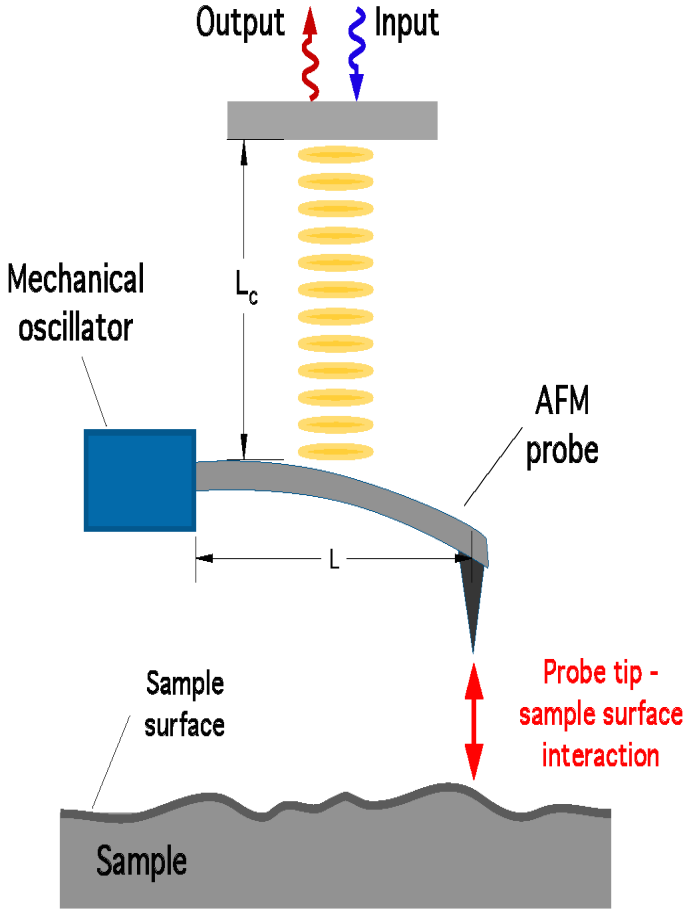
در حالت تماسی سوزن میکروسکوپ در ارتفاعی ثابت اسکن را انجام می‌دهد. تغییرات در میزان خمیده شدن اهرم یک سر آزاد مستقیماً برای تولید مجموعه داده‌های توپوگرافی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حالت نیروی ثابت حرکت اهرم به عنوان ورودی مدار باز خورد که اسکنر را بالا و پایین می‌برد و خمیده شدن اهرم یک سر آزاد را ثابت نگه می‌دارد. در این حالت مجموع نیرویی که اهرم به نمونه وارد می‌کند ثابت می‌ماند[۳] (شکل ۶).

حالت غیرتماسی

اهرم نزدیک فرکانس رزونانسش (از ۵۰ تا ۲۰۰ هرتز) با بزرگی دامنه حدود چند ده نانومتر ارتعاش می‌کند. وقتی که سوزن به سطح نمونه نزدیک می‌شود، نیروهای واندروالسی بین آن‌ها عمل می‌کنند و باعث تغییر در فرکانس یا دامنه ارتعاش می‌شوند. تصاویر سطحی بر اساس اندازه گیری این تغییرات به دست می‌آیند[۳] (شکل ۷).



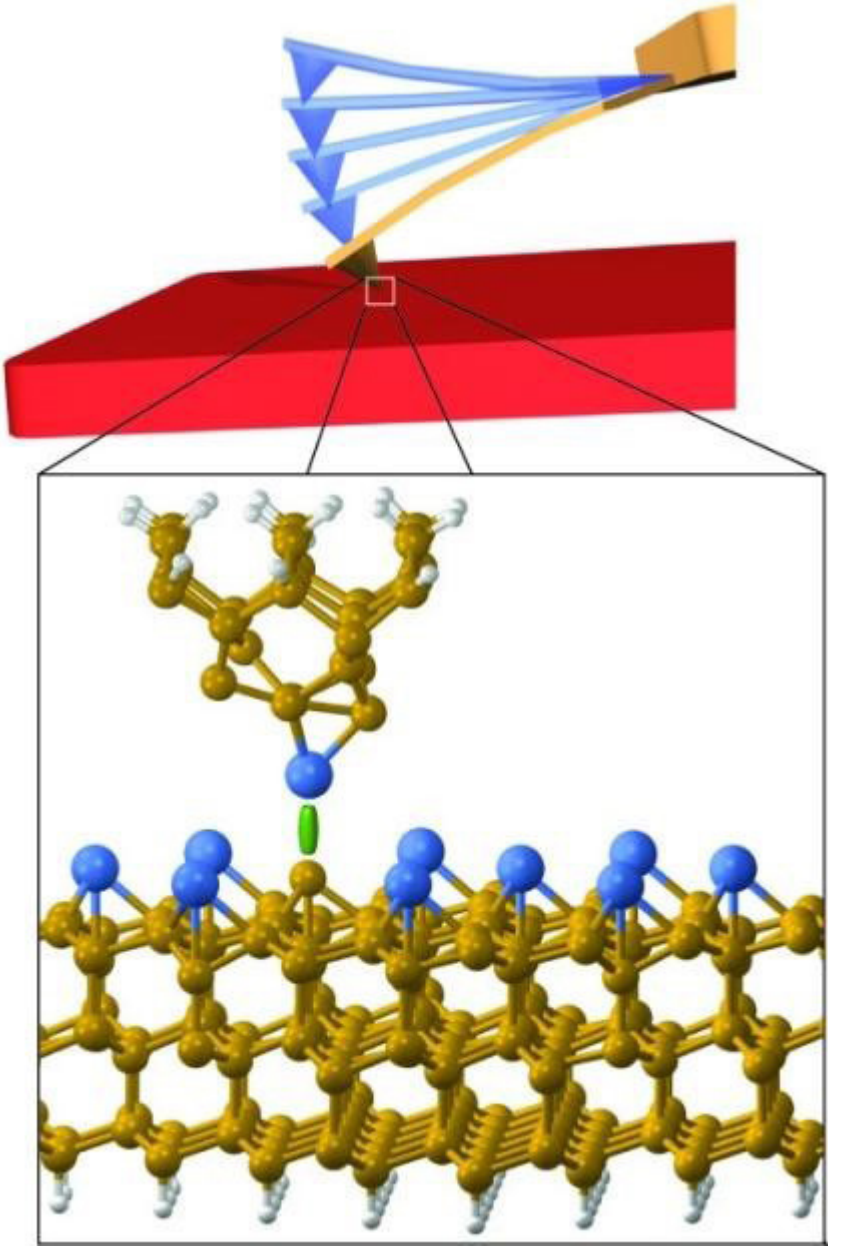
شکل ٦-نمایی از حالت تماسی میکروسکوپ نیروی اتمی[٦]



شکل ۷- نمایی از حالت غیر تماسی میکروسکوپ نیروی اتمی[۷]

حالت ضربه‌ای

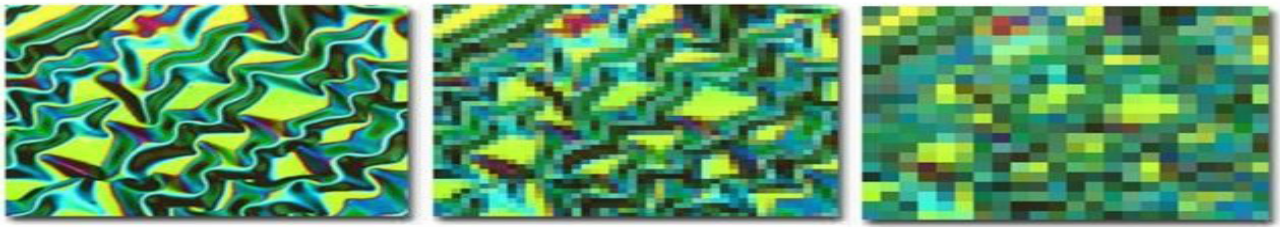
سوزن نوسان کننده با ۵۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰۰ سیکل در ثانیه به سمت نمونه حرکت می‌کند. وقتی که سوزن به سطح می‌رسد ارتعاشات اهرم یک سر آزاد آغاز می‌شود. یک بخش شناسایی یا دتکتور دامنه نوسان اهرم را اندازه می‌گیرد و جدا کردن سوزن و نمونه تنظیم می‌شود که روی یک مقدار ثابت بماند (شکل۸). این حالت از چسبیدن سوزن جلوگیری کرده و از نیروهای چسبندگی ممانعت به عمل می‌آورد[۳].



شکل۸-نمایی از حالت ضربه‌ای میکروسکوپ نیروی اتمی[۸]

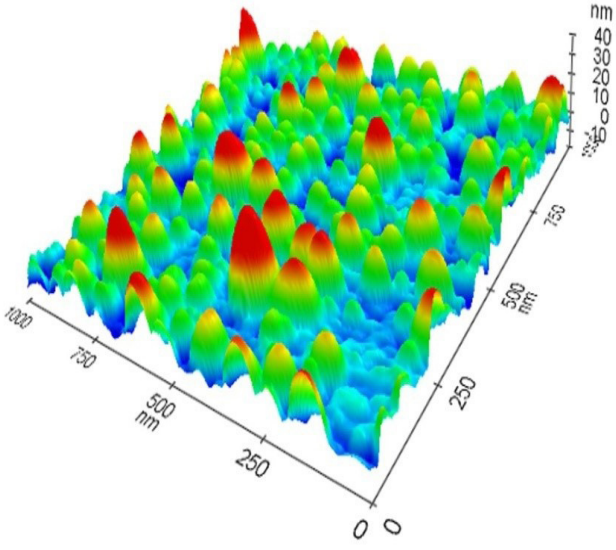
رزولوشن[1] :

اصطلاحی است که به تعداد پیکسل‌های استفاده شده در ساخت یک تصویر دیجیتال اطلاق می‌شود. عکسی که رزولوشن بالاتری دارد شامل شمار بیش‌تری پیکسل نسبت به عکسی با رزولوشن پایی ندارد و طبیعتاً وضوح آن پایین‌تر خواهد بود.



شکل ۹- در این تصاویر رزولوشن از راست به چپ بالا رفته است. این تصاویر که مربوط به فیلم نازک مغناطیسی از جنس نیکل است،تعداد پیکسل‌ها برابر با ۲۲×۲۲، ٤٤×٤٤ و ۱۷۵×۱۷۵ می‌باشد.

درمیکروسکوپ نیروی اتمی یک کاوشگر (پروب) شامل یک سوزن نوک تیز از روی سطح نمونه آن هم به طور رفت و برگشت از تمام نقاط سطح گذر می‌کند، در حالی که نیروهای جاذبه و دافعه حاکم بین سوزن و سطح اندازه‌گیری می‌شوند.



شکل ۱۰-تصویر سه بعدی بدست آمده از میکروسکوپ نیروی اتمی[۹]

پروب یا کاوشگر یک سوزن نوک تیز است که در انتهای اهرم یک سر آزاد واقع شده است. این اهرم یک فنرمسطح با سطح انعکاس دهنده است. سوزن‌های نوک تیز به طور معمول از جنس سیلیکون (Si) یا نیترید سیلیکون (Si_4N_3) هستند که در ابعاد میکرومتری با ماشین‌کاری تراش داده شده‌اند. یکنواختی سوزن‌ها بسیار بالا است و شعاع انحنای کمتر از ۱۰ نانومتر دارند. حرکت‌های نوک تیز یا نمونه با ابزارهای استقرار بسیار دقیق ازجنس سرامیک‌های پیزوالکتریک انجام می‌شود. حین اسکن، یک مولفه ویژه (نیرو و انعکاس و ...) به اندازه‌ای ثابت نگه داشته می‌شود و شکل سه بعدی بر اساس خروجی تشخیص دهنده نوری (فوتودتکتور) یا بازخورد بین سیستم تشخیص و اسکنر پیزوالکتریک ایجاد می‌شود. سطح نمونه برای ارزیابی به کمک انتقال دهنده‌هایی با گام‌های بزرگ زیرکاوشگر جابجا می‌شود. پویش رفت و برگشتی با استفاده از سرامیک‌های پیزوالکتریک که بسته به ولتاژ اعمال شده به آن‌ها باز یا جمع می‌شوند، انجام می‌شود. لازم به ذکر است که استفاده از یک میکروسکوپ نوری برای تعیین موقعیت شکل‌های سطح نمونه و نمایش فرآیندهای کارکاوشگر ضروری می‌باشد.

[1] Resolution

برخی از اجزای مهم در میکروسکوپ‌های پروبی روبشی:

میکروسکوپ‌های پروبی روبشی از اجزای متفاوتی تشکیل شده است که شامل موارد زیر هستند:

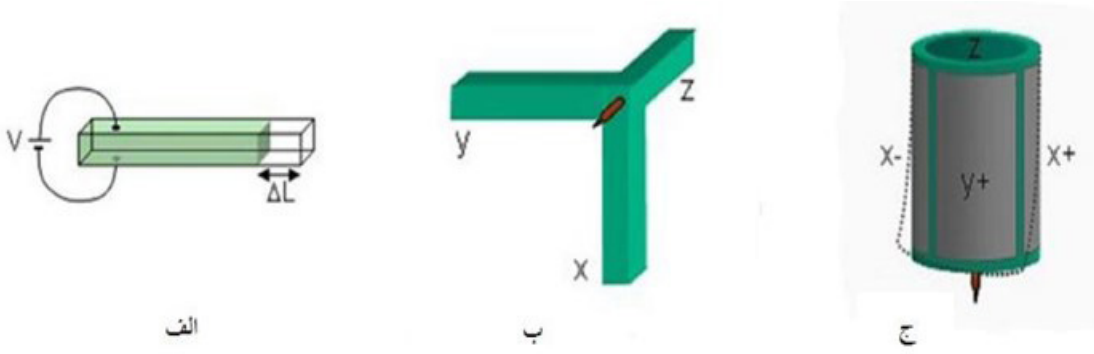
۱-حسگر (sensor)

به منظور بررسی یک خاصیت سطحی ویژه، انواع گوناگونی از حسگرها را می‌توان برای یک پروب استفاده کرد که به تبع آن، ممکن است تجهیزات الکترونیکی خاصی نیز جهت تجهیز دستگاه نیاز باشد. در این جا باید خاصیت اندازه‌گیری شده را به یک سیگنال الکتریکی تبدیل کرد، آن‌گاه امکان تبدیل این خواص به صورت اطلاعات الکترونیکی برای کنترل و پردازش آن‌ها، در میکروسکوپ‌های پروبی روبشی فراهم می‌شود.

۲-روبشگر (scanner)

قسمت روبشگر دستگاه از قسمت‌های روبشگر پیزو، مجموعه انبرک (cantilever) و سوزن، سیستم آشکارساز لیزری حساس به موقعیت انبرک و سوزن و در مواردی یک تقویت‌کننده تشکیل شده است. روبشگر توسط یک سه پایه از جنس آلیاژ فلزی مخصوص با حداقل انبساط و انقباض حرارتی بر روی یک پایه یا میز نصب می‌شود. این پایه به لاستیک‌های جاذب انرژی (Rubber dampers vibration) مجهز است. وقتی که پایه بر روی میز و در محلی غیرقابل ارتعاش قرار گیرد، می‌تواند اندازه‌گیری‌های تکرارپذیر در جهات X، Y، Z و با جزئیات بسیار دقیق را انجام دهد. روبشگر به طور فیزیکی، حسگر را نگه می‌دارد و امکان حرکت روبشی را در طول روبش سطح نمونه تأمین می‌کند. در اغلب موارد، روبشگر می‌تواند حسگر را در هر سه جهت حرکت دهد. لازم به ذکر است خود روبشگر با اجزای پیزوالکتریکی ساخته شده است.

امکان روبش سطح نمونه با قدرت تفکیک بالا، از پارامترهای مهم در میکروسکوپ‌های پروبی روبشی محسوب می‌شود که توسط مواد پیزوالکتریک میسر می‌شود. این مواد، نوعی سرامیک هستند که در صورت اعمال ولتاژ و متناسب با جهت و میزان آن، تغییر طولی از مرتبه یک آنگستروم می‌دهند. از این مواد برای جابه‌جایی‌های بسیار دقیق استفاده می‌شود. در میکروسکوپ‌های پروبی روبشی اولیه، سه میله پیزوالکتریکی عمود برهم، عامل روبشگر (scanner) را تشکیل می‌دهد، که اعمال ولتاژ به هر یک از این سه میله، باعث تغییر طول آن و در نتیجه انحراف سوزن در راستاهای X، Y یا Z می‌شود. در میکروسکوپ‌های پروبی روبشی نوین، روبش سطح توسط استوانه پیزوالکتریکی توخالی انجام می‌شود که بر سطح داخلی آن لایه نازکی از یک فلز رسانای الکتریسیته (مانند نیکل) پوشش داده شده و در سطح خارجی آن نوار فلزی نشانده شده است. سوزن نیز به استوانه متصل شده است. اعمال ولتاژ با جهت و مقدار یکسان به هر چهار الکترود خارجی (نسبت به الکترود داخلی) باعث انبساط و در نتیجه پایین آمدن استوانه و سوزن متصل به آن یا انقباض و بالا رفتن آن‌ها می‌شود. هم‌چنین اعمال ولتاژ با علامت‌های مخالف به الکترودهای متقابل (مثلاً X و X-)، سبب خم شدن استوانه می‌شود که در واقع شامل حرکت در صفحه X و Y و در جهت Z است. با کنترل نحوه اعمال ولتاژ به پیزو الکتریک توسط نرم‌افزار دستگاه، می‌توان سوزن را به دلخواه در هر سه جهت حرکت داد. سیستم الکترونیکی دستگاه، امکان کنترل این حرکت را با دقت ۰/۱ آنگستروم فراهم می‌آورد. شکل ۱۱، از نظر ظاهری قطعات پیزوالکتریکی رایج در میکروسکوپ‌های پروبی روبشی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱-الف) براساس خاصیت موادپیزوالکتریک، ولتاژ اعمالی، قطعه پیزو را بلندتر یا کوتاه‌تر می‌کند. ب) ترکیب سه قطعه پیزو امکان حرکت پروب را در سه جهت فضایی فراهم می‌کند. ج) در میکروسکوپ‌های پروبی روبشی نوین، از استوانه هندسی توخالی استفاده می‌شود[۳].

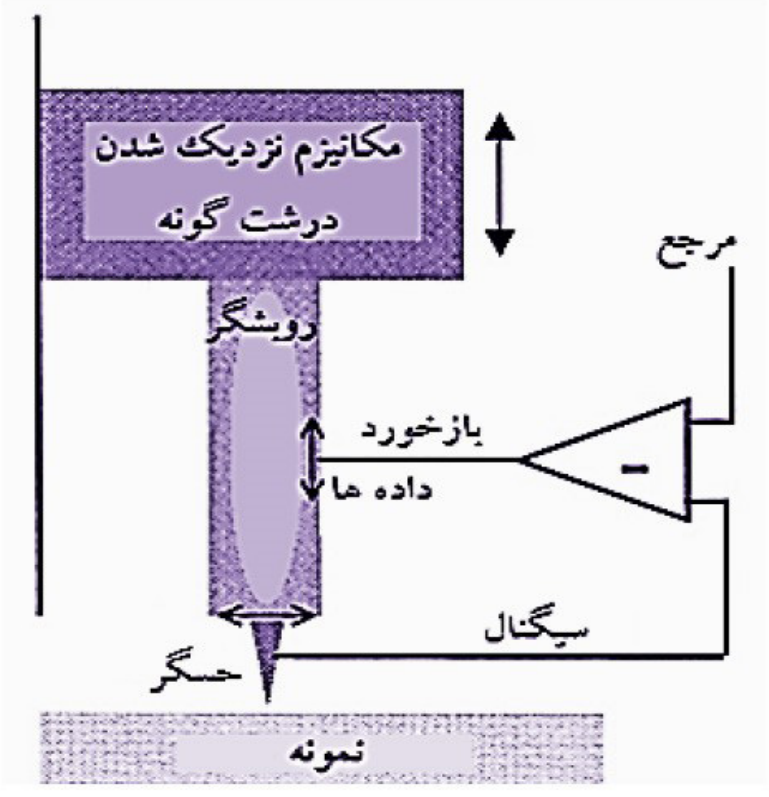
زمانی که یک ولتاژ مشخص به این اجزای پیزوالکتریک اعمال می‌شود، این اجزا منبسط و منقبض می‌شوند. اکثر میکروسکوپ‌های پروبی روبشی، ولتاژ خروجی بالایی را برای حرکت روبشگر ایجاد می‌کنند که معمولاً روبشگر می‌تواند پروب را فراتر از محدوده چند هزار آنگستروم، با کسری از یک آنگستروم در قدرت تفکیک، حرکت دهد.

٤-سیستم کنترل بازخوردی (Teh feedback control)

اگر سطح نمونه ناهموار باشد، احتمال برخورد و شکستن پروب دستگاه بسیار زیاد است. در این حالت یک کنترل بازخوردی نیاز است تا فاصله مناسب بین سوزن و نمونه را در طول روبش همواره حفظ کند. برای اطمینان از نزدیکی مقادیر اندازه‌گیری شده دستگاه با مقدار پیش فرض، همواره مدار کنترل‌کننده با فرستادن سیگنال‌های الکتریکی، روبشگر را کنترل می‌کند. برای این منظور، اغلب میکروسکوپ‌های پروبی روبشی دارای یک مدار بازخورد استاندارد هستند.

٥-سیستم دستیابی سریع (نزدیک شدن درشت گونه، Teh coarse approach

روبش‌گرهای پیزوالکتریک تنها حرکت‌های چند هزار آنگسترومی را تأمین می‌کنند. تمام سیستم‌های میکروسکوپی پروبی روبشی، برای تأمین حرکت‌ها و جابه‌جایی‌های بزرگ، دارای یک سیستم نزدیک شدن و دستیابی سریع هستند تا پروب بتواند با اطمینان تا حد امکان به نمونه نزدیک شود. طراحی‌های بسیار متفاوتی از سیستم نزدیک شدن درشت گونه وجود دارد. بیش‌ترین نوع تجاری شده آن، ماشین‌های مکانیکی با ترکیبی از فنرهای متغیر، پیچ‌هایی با رزوه بسیار ریز و اهرم‌ها هستند. موتورهای پیزوالکتریکی نیز معمولاً در میکروسکوپ پروبی روبشی نوین استفاده می‌شوند. شکل ۱۲، مؤلفه‌های اصلی در MPSها را نشان می‌دهد.



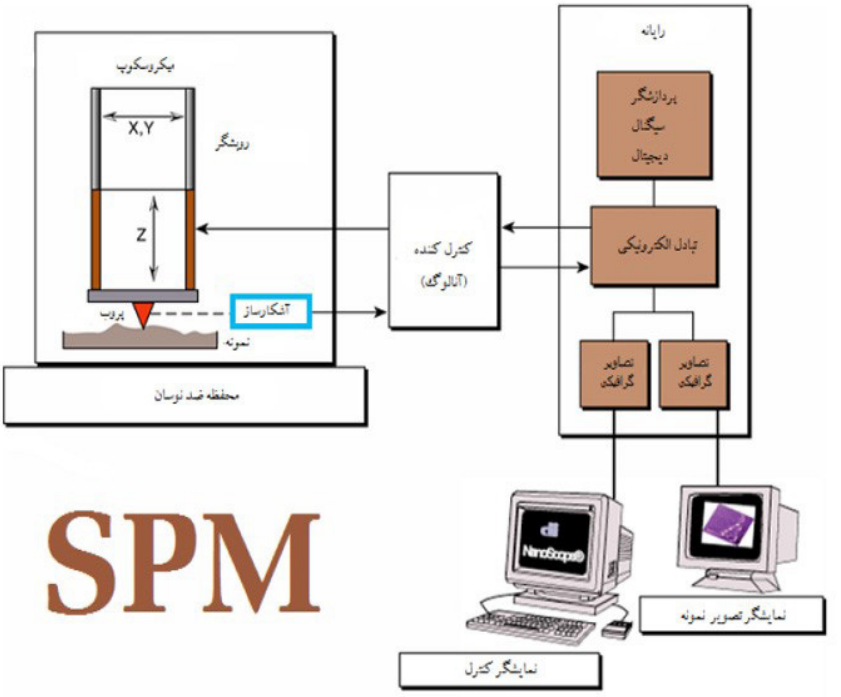
شکل ۱۲-نمایی شماتیک از مؤلفه‌های اصلی دستگاه MPS[۳].

۵-دوربین CCD (Chargecoupled device)

پایه روبشگر به دوربین CCD مجهز است که می‌تواند خود مستقیماً به عنوان یک میکروسکوپ با بزرگ‌نمایی تقریبی ۳۰۰ برابر استفاده شود. تصویر نوری دوربین CCD، بر روی صفحه نمایشگر رایانه نشان داده شده و برای انتخاب محل مورد نظر روبش روی سطح نمونه به کار می‌رود.

۶-سیستم پردازش و نرم‌افزار

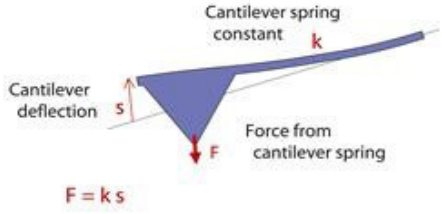
در میکروسکوپ‌های پروبی روبشی، سیگنال‌های به دست آمده ناشی از حرکت سوزن، با عبور از سیستم تقویت‌کننده اولیه یا به طور مستقیم به قسمت کنترل‌کننده که حاوی مدارات الکترونیکی با ارتعاشات کم هستند، وارد شده و پس از تقویت و پردازش اولیه جهت تشکیل تصویر به رایانه فرستاده می‌شود. نرم‌افزار نصب شده بر روی کامپیوتر سیگنال‌های خروجی از قسمت کنترل‌کننده را پردازش کرده و به تصویر تبدیل می‌کند. در عین حال نرم‌افزار امکان پردازش و اندازه‌گیری سه بعدی را بر روی تصویر حاصله فراهم می‌کند. شکل ۱۳، عملکرد میکروسکوپ‌های پروبی روبشی را به طور خلاصه نشان می‌دهد[۳].



شکل ۱۳-عملکرد میکروسکوپ‌های پروبی روبشی[۳]

نیرو:

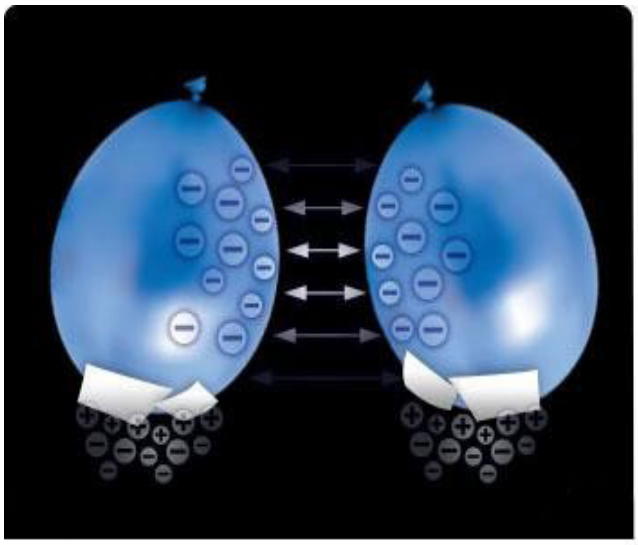
نیرو در میکروسکوپ نیروی اتمی مانند نیروی فنر از قانون هوک ($F = xk$) به دست می‌آید. در این رابطه F بردار نیرو است، k ثابت فنر است و x میزان خمیده شدن اهرم یک سر آزاد است (شکل ١٤). در حین کار میکروسکوپ حالت تماسی سه نیرو کارمی‌کنند: نیروهای دافعه الکترواستاتیکی، نیروهای مویینگی و نیروهای واندروالسی.

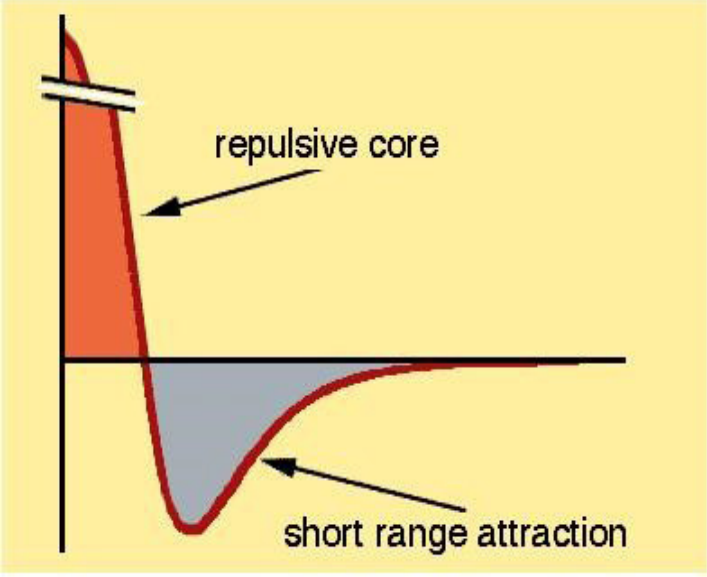


شکل١٤–در این شکل بردار نیرو و جابجایی در جهت عکس هم هستند و منفی حذف شده است.

نیروهای دافعه الکترواستاتیکی

هنگامی که اتم‌ها کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، ابتدا با نیرویی خیلی ضعیف همدیگر را جذب می‌کنند. این جاذبه رفته رفته زیاد می‌شود تا جایی که اتم‌ها آن‌قدر بهم نزدیک شوند که ابر الکترونی همنام آن‌ها به طور الکترواستاتیکی همدیگر را دفع کنند. هم‌چنان که فاصله بین دو اتم کاهش می‌یابد، دافعه الکترواستاتیکی به مرور نیروهای جاذبه را خنثی می‌کند. وقتی که فاصله اتم‌ها به حدود چند آنگستروم می‌رسد (به اندازه یک پیوند شیمیایی) نیرو به صفرمی رسد. اتم‌ها زمانی که برآیند نیروهای واندروالسی مثبت (دافعه) می‌شود در تماس باهم هستند. وقتی اهرم یک سر آزاد به نمونه فشار داده می‌شود به جای آنکه سوزن نوکش را به نمونه هل دهد خمیده می‌شود چرا که منحنی نیروهای واندروالسی در حالت فشاری یا تماسی شیب بالایی دارد.





شکل ١٥–محور افقی فاصله نمونه و میکروسکوپ است و محورعمودی جهت(در واقع دافعه بودن یا جاذبه بودن نیرو) و اندازه نیرو را نشان می‌دهد[١٠].

نیروهای واندروالس

اهرم یکسر آزاد در میکروسکوپ نیروی اتمی درحالت تماسی نیروهای متغیر وارد می‌کند. کل نیروی وارد شده از تیغه به نمونه حاصل جمع نیروهای مویینگی و نیروهای اهرم است و با نیروهای واندروالس تعدیل می‌شود.

نیروی کل بین 10^{-8} یا 10^{-6} نیوتن است. موقعیت اهرم با برخورد یک پرتو لیزری به یک تشخیص دهنده مکانی تعیین می‌گردد.

نیروهای موینگی

نیروی موینگی وقتی ایجاد می‌شود که آب پل می‌زند و مثل نفت در فتیله از سوزن بالا می‌رود و یک نیروی جاذب آن را در تماس با سطح نگه می‌دارد. بزرگی این نیرو به میزان فاصله سوزن میکروسکوپ اتمی و نمونه مرتبط است. بزرگی و علامت (جاذب یا دافع بودن) نیرو یا هرم یک سر آزاد به میزان خمیده شدن اهرم و ثابت فنر آن دارد. با این فرض که لایه آب همگن باشد، تا زمانی که سوزن در تماس با نمونه است نیروی موینگی باید ثابت باشد. در برخی حالت‌ها مثلاً مد تماسی به خاطر نیروهای بزرگ (ایجاد کننده خش، خرابی و خط) کاوشگر روی نمونه مشکلاتی را ایجاد می‌کند. در این شرایط سطح نمونه با لایه‌ای از گازها (بخار آب و نیتروژن) پوشش داده می‌شود که نیروهای موینگی نسبتاً محکمی در حدود ۱۰۰ Nn ایجاد می‌کنند.

نیروهای اصطکاک جانبی

اندازه‌گیری نیروهای اصطکاک جانبی وقتی ممکن است که نمونه عمود بر محور اهرم حرکت داشته باشد. اصطکاک بین سوزن و نمونه باعث تاب خوردن اهرم می‌شود. یک تشخیص دهنده مخصوص می‌تواند حرکت چپ و راست پرتو لیزر انعکاسی را از حرکت بالا و پایین ایجاد شده از تغییرات توپوگرافی تمایز دهد.

مزایای میکروسکوپ نیروی اتمی:

۱. مزایای میکروسکوپ نیروی اتمی وقتی بارزتر می‌شود که آن را با تکنیک‌های دیگری از قبیل میکروسکوپ‌های تونلی روبشی (STM) و میکروسکوپ‌های الکترونی عبوری (SEM) مقایسه کرد. هر چند STM می‌تواند رزولوشن بهتری از AFM داشته باشد، اما در قدرت انعطاف در کاربردهای مختلف AFM است که موفق است. درحالی‌که STM تنها می‌تواند برای مواد رسانا مورد استفاده قرار گیرد، AFM می‌تواند با هر دو دسته مواد رسانا و عایق و حتی فراتر ازآن مواد آلی، ماکرومولکول‌های زیستی، پلیمرها، سرامیک‌ها، شیشه‌ها و ... مورداستفاده قرار گیرد. همه این مواد می‌توانند در محیط‌های مختلف مثل مایع یا خلاء ارزیابی شوند.

۲. AFM تمایز یا کانتراست سه بعدی بهتری در مقایسه با میکروسکوپ‌های الکترونی SEM ایجاد می‌کند و از تفاوت‌های انعکاسی بین مواد تاثیر نمی‌گیرد، برخلاف SEM این میکروسکوپ به آماده‌سازی پرهزینه نمونه نیاز ندارد.

۳. با احتساب اینکه نیروهای بین سر سوزن و محدوده نمونه بین 10^{-11} تا 10^{-6} نیوتنی است، به کمک میکروسکوپ نیروی اتمی تصویربرداری غیر مخرب هم امکان پذیر است. در کنار تصاویر سه بعدی، میکروسکوپ نیروی اتمی می‌تواند نرمی نمونه و ارزیابی‌های الاستیسیته و اندازه‌گیری‌های نیروی اصطکاک جانبی را انجام دهد.

٤. قابلیت تصویردهی در ابعاد اتمی، از میکرون به پایین

۵. تصاویر حاوی اطلاعات مستقیم عمق و فرورفتگی برای اندازه‌گیریی زبری

٦. سرعت تصویردهی از هادی‌ها وعایق‌ها بدون نیاز به پوشش

۷. امکان مشاهده مستقیم فرآیندهای سطحی در محیط مایع و یا در هوا

کاربردهای میکروسکوپ نیروی اتمی

۱. میکروسکوپ نیروی اتمی اولین بار در زیست‌شناسی استفاده شد تا خواص نانومکانیکی (مثل الاستیسیته) و توپوگرافی نمونه‌های زیستی را اندازه بگیرد. امروز AFM در حوزه‌هایی مثل میکروبیولوژی، ژنتیک، زیست‌شناسایی مولکولی، داروسازی و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲. بسیاری از اجزای زیستی (مثل پروتئین‌ها، چربی،DNA، RNA، ویروس‌ها و سلول‌های زنده) در شرایط محیطی مختلف می‌توانند به کمک میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی شوند.

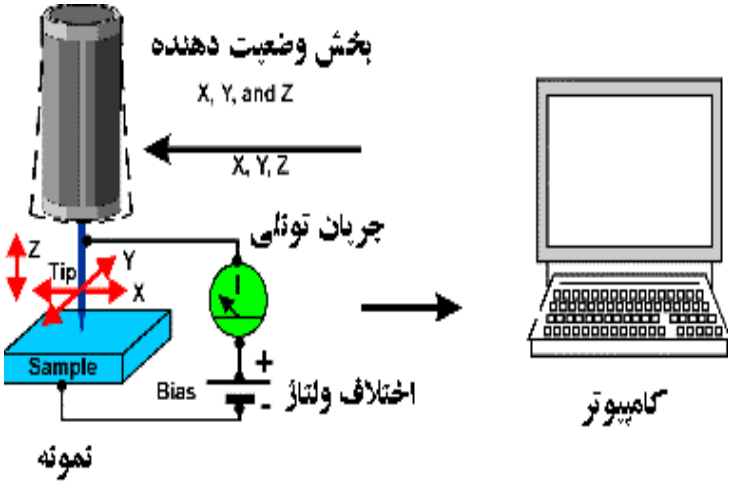
۳. در کنار تصویربرداری مستقیم از اشیای زنده میکروسکوپ نیروی اتمی می‌تواند برای بررسی واکنش‌های مولکولی هم مورد استفاده قرار گیرد. این میکروسکوپ‌ها برای نمایش زمانی کریستالی شدن کریستال‌های ماکرو مولکولی و فرآیندهای دیگر در دوره حیات سلولی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

میکروسکوپ تونلی روبشی (STM)

وقتي كه ميكروسكوپ تونلی روبشی در سال ۱۹۸۲ بوسيله Binnig براي اولين بار مطرح شد به نظر می‌رسید که میکروسکوپی براي مطالعه ساختار سطوح در مقياس اتمی است. چهار سال بعد یعنی در سال ۱۹۸٦ Binnig Gerd و Rohrer Heinrich به خاطر اختراع میکروسکوپ STM وکشف این مطلب که این میکروسکوپ می‌تواند از صفحه نفوذ اتمی بدون تجزیه و تحلیل درصدی تصویر بردارد جایزه نوبل را به خود اختصاص دادند. اگر چه بعدها با استنتاج از تئوری اولیه و آزمایش‌های گوناگون مشخص شد که اطلاعات بیش‌تری را می‌توان از فرآیند تونلی که در میکروسکوپ بوجود می‌آید استخراج نمود این میکروسکوپ امروزه کاربردهای وسیعی یافته و ابزاری قوی در مطالعات مواد در مقیاس اتمی است. در ادامه این بحث ابتدا بر اصول کارکرد STM مروری شده و سپس به پاره‌ای از اهم کاربردهای آن اشاره می‌شود.

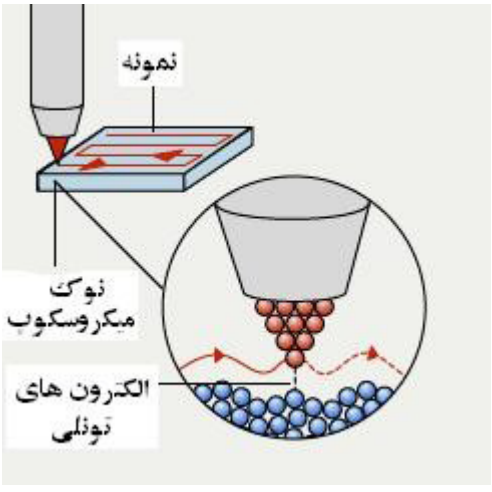
اصول عملکرد میکروسکوپ STM

درشکل ۱٦ طرح اصول عملکرد میکروسکوپ STM نشان داده شده است.



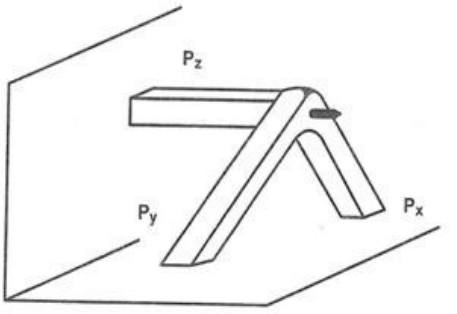
شکل ۱۶- طرح شماتیک از عملکرد میکروسکوپ STM[۹]

در این میکروسکوپ از یك سوزن نوک تیز هادي با ولتاژ نفوذی (اختلاف پتانسیلی که جهت بهبود جریان در ادوات الکترونیکی مورداستفاده قرار می‌گیرد) استفاده میشود. این ولتاژ در حد میلی ولتبوده جریان الکتریکی میان نوک سوزن و نمونه در حدود ۱An میباشد. سوزن مورد اشاره دارای نوکی اساساً تك اتمی است. این سوزن سطح نمونه را از فاصله‌ای نزدیك روبش می‌کند[۳].



شکل ۱۷- نوک قلم MTS آنقدر تیز و باریک است که به راحتی در بین اتم‌ها بالا و پایین می‌رود[۹]

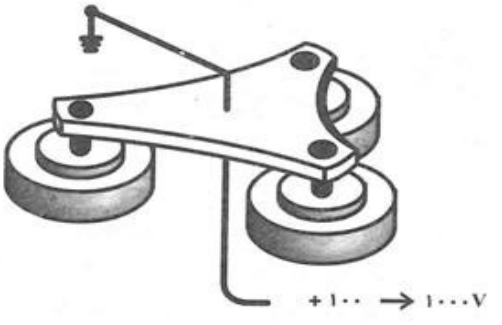
براي ايجاد پديده تونل زنی الکترون‌ها لازم است که هم نمونه و هم سوزن هادی یا نیمه هادی باشند. اهرمی که سوزن بر روی آن نصب می‌شود در شکل زیر ارایه شده است و نمونه نیز بر روی دستگاهی موسوم به شپشك Louse قرار می‌گیرد.



اهرمی که سوزن روی آن نصب می‌شود.

شکل ۱۸- نمایی از اهرمی که سوزن روی آن نصب می‌شود[۹].

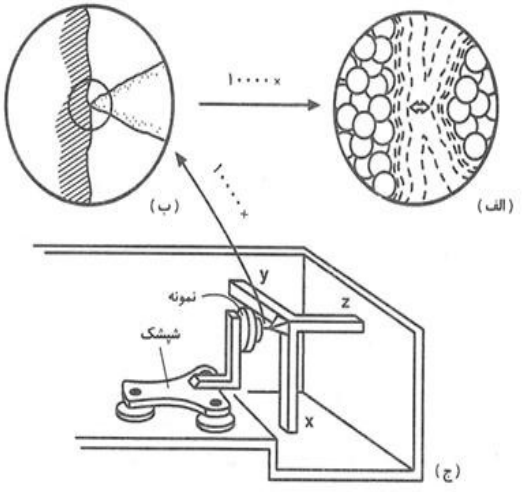
علت این نامگذاری حرکت فوق‌العاده نامحسوس دستگاه است که به صورت تشبیه از حرکت شپشك برداشت شده است این دستگاه موجبات حرکت آرام نمونه را فراهم می‌سازد. شمايي از این دستگاه را می‌توانید در شکل ۱۹ ملاحظه نمایید.



طرح دستگاه موسوم به شپشک.

شکل ۹- نمایی از دستگاه موسوم به شپشک[۹]

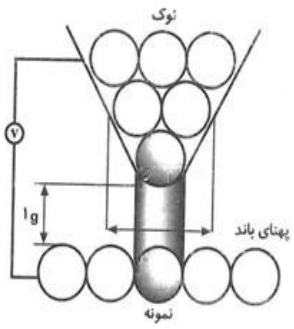
درشکل ۲۰ شمايي از ارتباط سوزن وسطح نمونه مشاهده مي‌شود. شکل (الف) نوك سوزن و سطح نمونه را دربزرگنمايي ۱۰۸ نشان مي‌دهد.



ارتباط میان نوک سوزن و سطح نمونه در STM.

شکل ۲۰- نمایی از ارتباط مابین نوک سوزن و سطح نمونه[۹]

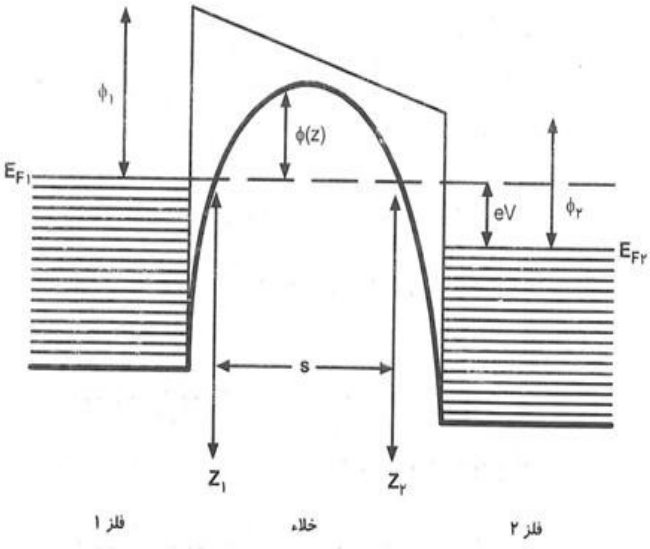
دایره‌ها بیانگر اتم‌ها و خطوط نقطه چین نمایانگر چگالي الکترون هستند. جهت جریان تونلي با پیکان نمایش داده شده است. شکل (ب) همین تصویر را در بزرگ‌نمایی ۱۰۴ نشان می‌دهد. در شکل محورهای قایم پیزو الکتریك x، y و z نیز مشخص‌اند که طول هر یك ۵ سانتی‌متر بوده و سوزن به آن‌ها متصل است. هم‌چنین نمونه با حرف L نشان داده شده است. در این دستگاه سوزن ثابت بوده و نمونه توسط شپشك که با حرف L نشان داده شده، بسیار ظریف و آرام در مقابل سوزن حرکت می‌کند بسته به جهت ولتاژ الکترون‌ها فاصله نمونه تا نوك سوزن و یا برعکس را تونل‌زنی می‌کنند مشابه آن چه که در شکل زیر مشاهده می‌شود اثر تونلی مناسب در حقیقت احتمال محدودی از نفوذ یك الکترون به سطح مانع را به وسیله تابع کار سوزن و سطح ریزساختار بیان می‌دارد.



تونل زنی الکترون‌ها بین نمونه و سوزن.

شکل ۲۱- نمایی شماتیک از پدیده تونل زنی مابین نمونه و سوزن[۹]

در اثر حرکت سوزن نزديك سطح نمونه يك جريان الكتروني موسوم به جريان تونلي TI ميان نوك سوزن و سطح نمونه ايجاد مي‌شود. اين جريان با اختلاف پتانسيل بين سطح و سوزن، تابع كار موضعي و فاصله بين سوزن و سطح ارتباط مستقيم دارد. TI بيانگر ميزان توليد انرژي الكترون بوده و اگر انرژي استخراج موضعي الكترون ثابت باشد آنگاه TI اندازه گرفته شده در جهت‌هاي x و y يك تصوير پرتونگاري فضايي واقعي را از سطح روبش شده با دقت تفكيكي در حد اتمي ايجاد مي‌نمايد. اين دقت در حدود ۲ تا ۵ آنگستروم به صورت افقي و ۰/۱ آنگستروم به صورت عمودي است. به علت رابطه نمايي جريان تونلي با فاصله بين نوك سوزن و نمونه، STM شديدا به تغييرات ارتفاع (فاصله) نمونه حساس مي‌باشد. ولتاژ تونلي ميان نوك سوزن و سطح نمونه در STM معمولاً بين چند ميلي ولت تا چند ولت و شدت جريان تونلي بين ۱ تا ۱۰ نانوآمپر مي‌باشد. اندازه‌گيري جريان تونلي به خلاء شديد احتياجي ندارد. ولي در مورد مواد بيولوژيكي كه نيازمند پردازش قوي هستند از خلاء شديد استفاده مي‌شود. شايان ذكر است از اين ميكروسكوپ جهت بررسي عايق‌ها نمي‌توان استفاده نمود. اگر ولتاژ تونلي و قطبيت سوزن و نمونه عوض شود، امكان دارد كه اطلاعاتي از پيوند شيميايي بدست آيد. ميكروسكوپ‌هاي STM فعلي كه به صورت تجاري در دسترس مي‌باشند در شرايط اتمسفري (فشار ۱ اتمسفر) در زير مايعات و يا در خلاء شديد كار مي‌كنند. تونل با اثر مناسب اولين بار به وسيله Giaver (برنده جايزه نوبل سال ۱۹۷۳) كشف شد. بر طبق نظريه او احتمال اينكه يك الكترون بتواند از سد انرژي استخراج الكترون از سوزن و ريز ساختار نمونه بگذرد محدود است[۳]. درشكل ۲۲ نمودار تراز انرژي براي جريان تونلي بين دو فلز تحت خلاء رسم شده است.



نمودار تراز انرژی برای ایجاد جریان تونلی

شکل ۲۲- نمودار ترازهای انرژی الکترونی برای ایجاد جریان تونلی[۹]

اين دو فلز تحت اختلاف پتانسيل V قرار دارند. ارتفاع سد انرژي $\phi(z)$ نسبت به سد انرژي ϕ_1 و ϕ_2 پايين‌تر آمده است. دراين حالت الكترون‌ها مي‌توانند از مكان‌هاي پرتجمع در زير E_{1F} به مكان‌هاي خالي در بالاي E_{1F} تونل زده جريان برقرار كنند.

شرايط كار با STM

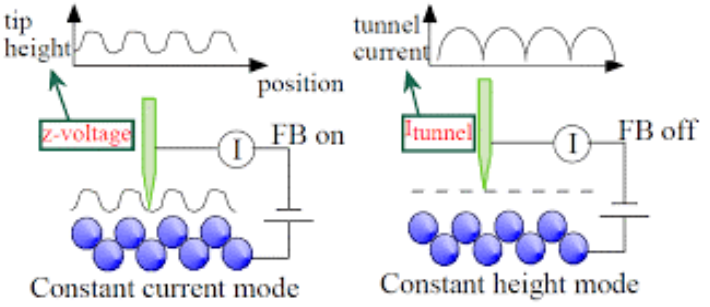
در بحث پيشين به تاثير فراوان ميان سوزن و سطح نمونه (و بالطبع جريان تونلي) بر كارايي سيستم و حداكثر بزرگنمايي قابل حصول پرداخته شد. امروزه براساس شرايط اين فاصله به دو گونه از STM استفاده به عمل مي‌آيد:

۱- در شرایطي که فاصله مذکور ثابت است.

۲- در شرایطي که فاصله مذکور متغیر است.

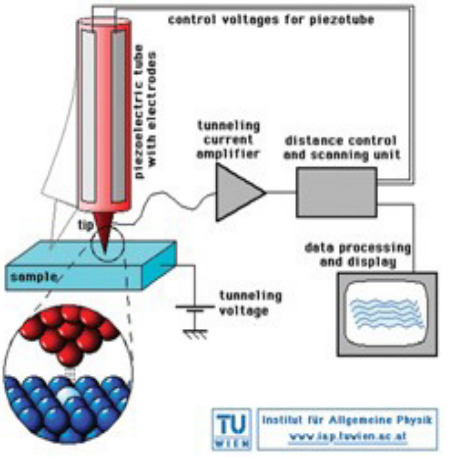
با ذکر این نکته که کاربرد حالت دوم رایج‌تر مي‌باشد.

درشکل ۲۳ نحوه حرکت سوزن و نحوه تصویرسازی درهر دو روش بالا آمده است.



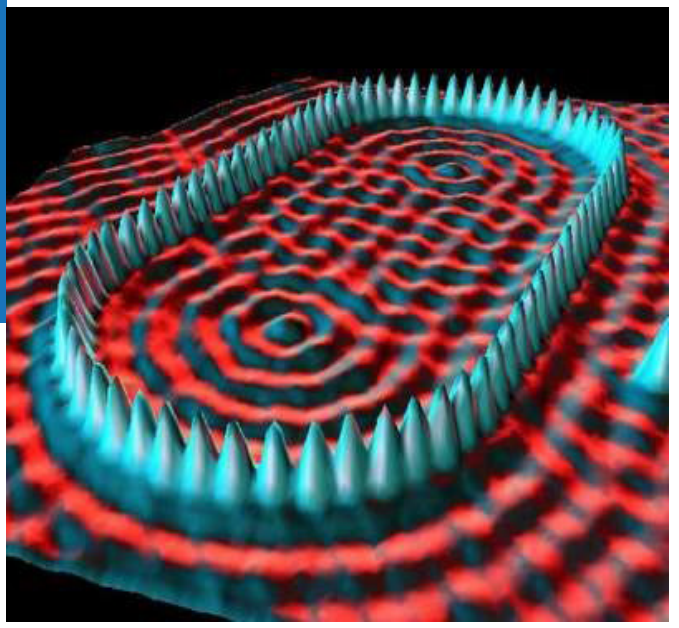
شکل ۲۳-طرح شماتیک از نحوه تصویرسازی در انواع حالت‌های STM

ثابت بودن فاصله سوزن و سطح بدین معناست که سوزن ضمن حرکت در جهات x و y در جهت z طوری جابجا می‌شود که پستی و بلندی‌های روی سطح نمونه تاثیری در فاصله مذکور نداشته باشند در این حالت به دلیل ثابت ماندن فاصله جریان تونلی نیز ثابت خواهد ماند. در حالت دوم، حرکت سوزن بر روی یك صفحه، و تنها در جهات x و y امکان‌پذیر می‌باشد. بدین ترتیب پستی و بلندی‌های سطح نمونه باعث می‌شود که فاصله سوزن و سطح دستخوش تغییر شده در نتیجه جریان تونلی تغییر نماید. سایر جریان تونلی مشخصه‌ای برای سیستم خواهد بود که بتواند سطح را مورد مطالعه و پردازش قرار دهد. طرحی عملیاتی از نحوه‌ی عملکرد STM مشاهده می‌شود.



شکل ۲٤-نمایی شماتیک از عمل‌کرد دستگاه STM[۱۱]

مزیت این نوع تصویربرداری این است که نیاز نیست با کار درخلاء انجام شود (در اکثر موارد از خلاء برای جلوگیری از آلوده شدن نمونه استفاده می‌شود) بلکه می‌توان از آن برای آنالیز اجسام در هوا یا مایعات نیز استفاده کرد. شکل ۲۵ نمایی از سطح فلز مس رانشان می‌دهد.



شکل ۲۵- تصویری از سطح نمونه مس با استفاده از دستگاه STM [۱۲]

کاربردهای STM

STM دارای قابلیت‌های خاصی است که هر یك به سهم خود کارایی ویژه‌ای را ایجاد می‌نمایند. از STM در موارد گوناگونی نظیر:

۱. مطالعه مورفولوژی و توپوگرافی سطوح رسانا

۲. تصویردهی از چگالی موضعی در سطح

۳. تصویردهی از تابع کار (انرژي استخراج الکترون)

۴. تصویردهی از نیروی مغناطیسی MFM[۴]

۵. تصویردهی الکتریکی

۶. تصویردهی از تغییرات سطح

۷. اگر ولتاژ تونلی و میزان قطبیت یا اختلاف پتانسیل سوزن و نمونه تغییر یابد امکان دارد اطلاعاتی از پیوندهای شیمیایی و موضعی نیز بدست آید.

[۴] Magnetic force microscope

ویژگی‌های روش STM

۱. غیر مخرب بودن روش

۲. قدرت تفکیک عمودی : ۰/۰۱آنگستروم

۳. قدرت تفکیک عرضی : در مقیاس اتمی

۴. قابلیت ارائه اندازه گیری‌ها : در سه بعد

۵. دقت : بیش از ۱۰ ٪ درطول

۶. تصویر برداری و نقشه برداری سطحی : بله

۷. میدان دید : ازاتم ها تا بیش از ۲۵۰ میکرومتر

نکته: اگر نمونه عایق یا نیمه‌هادی باشد، بایستی از مواد رسانا جهت اعمال پوشش بر روی آن‌ها استفاده نمود.

نتیجه گیری

میکروسکوپ پروبی روبشی مجموعه‌ای از تکنیک‌هایی است که سطح ماده را با قدرت تفکیک بالا، در محدوده نانومتر و حتی آنگستروم بررسی کرده و تصاویری از یک خاصیت فیزیکی یا شیمیایی یا مکانیکی سطح یا توپوگرافی آن ارائه می‌دهد. علاوه بر این، در این میکروسکوپ‌ها امکان جمع‌آوری اطلاعاتی غیر از وضعیت سطح ماده نیز وجود دارد. حوزه کاربرد میکروسکوپ‌های پروبی روبشی، علاوه بر این که میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی را شامل می‌شود، می‌تواند امکان دستکاری سطوح تا مقیاس اتمی را فراهم آورد. انعطاف‌پذیری حالات کاری این میکروسکوپ‌ها، امکان پردازش‌های مختلف را در شرایط محیطی متفاوت نظیر محیط‌های گازی، مایع و خلأ ایجاد می‌کند. اجزای میکروسکوپ‌های پروبی روبشی شامل حسگر، روبشگر، سیستم کنترل بازخوردی، سیستم دستیابی سریع، دوربین و سیستم پردازش و نرم‌افزار هستند. همچنین در مقایسه با STM، AFM نمی‌تواند به رزولوشنی در سطح ابعاد اتمی برسد. در سوزن STM، تنها نزدیکترین اتم که با نزدیکترین اتم سطح نمونه در تماس است در حالی که در سوزن میکروسکوپ نیروی اتمی اتم‌های متعددی هم‌زمان با اتم‌های زیادی با چندین اتم روی نمونه تاثیر دارند. همچنین میکروسکوپ تونلی روبشی، تنها می‌تواند جهت مطالعه سطوحی که از لحاظ الکتریکی رسانایی قابل قبولی دارند، مورد استفاده واقع شود، اما میکروسکوپ نیروی اتمی این محدودیت را نداشته و جهت مطالعه تمامی سطوح رسانا، نیمه‌رسانا و عایق مورد استفاده قرار می‌گیرد.

[1] Y. Sugimoto, P. Pou, M. Abe, P. Jelinek, R. Perez, S. Morita and O. Custance, Chemical Identification of Individual Surface Atoms by Atomic Force Microscopy, Nature 446 (2007) 64-67.

[2] G Amin, ZnO and CuO nanostructures: low temperature growth, characterization, their optoelectronic and sensing applications, Science and Technology, (2012).

[3] http://edu.nano.ir

[4] Mode Afm / www.picswe.com

[5] U. Maver, T. Velnar, M. Gaberscek, O. Planinsek, M. Finsgar, Recent progressive use of atomic force microscopy in biomedical applications, TrAC Trends in Analytical Chemistry, 80 (2016) 96-111.

[6] www.keysight.com

[7] Quantum mechanical squeezing' enables quantum state atomic force microscopy, by Oak Ridge National Laboratory, (2017)

[8] Y. Sugimoto, P. Pou, M. Abe, P. Jelinek, R. Perez, S. Morita and O. Custance, Chemical identification of individual surface atoms by atomic force microscopy, Nature, 446 (2007) 64-67.

[9] https://www.umass.edu/ials/afm

[10] Atomic Force Microscopy of Chromatin, Book, (2012).

[11] https://commons.wikimedia.org

[12] https://www.slideserve.com/