شرکت مهارفن ابزار
Mahar Fan Abzar Co.

میکروسکوپ‌های پروبی روبشی

scanning probe microscopes

SPM

دکتر پیروز مرعشی، دکتر علیرضا ذوالفقاری، مهندس مهرداد نجبا، امید سیفی، مصطفی نجاری،
پروین هادیان، مریم خسروی و فرزانه هویدا مرعشی

شرکت مهارفن‌ابزار
تهران، خیابان مطهری، خیابان میرعماد،
کوچه ۱۳، پلاک ۴۰، طبقه سوم، واحد ۱۶
تلفن: ۸۸۵۲۲۴۲۰ فاکس: ۸۸۵۲۲۴۲۱
دفتر مرکزی:
تلفن: ۸۸۵۰۰۳۲۵ فاکس ۸۸۵۰۰۳۲۶
www.maharfan.com
info@maharfan.com

فهرست

صفحه

مقدمه‌ای بر میکروسکوپ‌های پروبی روبشی ۳
مقدمه ۳
کاربردهای SPM ۶
روبش سطح ۸
ایزوله کردن ارتعاش ۱۲
مدار کنترل ۱۳
۱- میکروسکوپ پروبی جریان تونلی ۱۵
تونل‌زنی: یک اثر مکانیک کوانتوم ۱۶
جنبه‌های دستگاهی ۱۸
سوزن‌های تونل‌زنی ۱۸
کاربرد در محیط‌های مختلف ۲۰
حالت‌های کاری ۲۰
۱- حالت *ارتفاع ثابت* ۲۰
۲- حالت *جریان ثابت* ۲۰
۳- طیف نگاری روبشی جریان تونلی ۲۱
۲- میکروسکوپ روبشی نیروی اتمی ۲۲
تکنیک‌های اندازه‌گیری انحرافات کوچک کانتی‌لیور ۲۳
ثوابت فنری کانتی‌لیورهای مستطیل شکل ۲۵
آماده‌سازی سوزن و کانتی‌لیور ۲۷
نیروهای مربوطه ۲۸
نیروهای کوتاه برد ۲۹
نیروهای واندروالس ۳۰
نیروهای الکترواستاتیک ۳۱
نیروهای مغناطیسی ۳۲
نیروهای مویینگی ۳۳
نیروها در مایعات ۳۴
۲-۱- حالت استاتیکی "DC- AFM" ۳۵
الف- حالت ارتفاع ثابت ۳۶
ب- حالت نیروی ثابت ۳۶
۲-۲- حالت دینامیک "AC- AFM" ۳۷
۲-۳- میکروسکوپ نیروی اتمی هدایتی ۴۱
۲-۴- میکروسکوپ نیروی جانبی ۴۲
۲-۵- میکروسکوپ میدان مغناطیسی ۴۳
۲-۶- میکروسکوپ آشکارسازی فاز ۴۴

۳- میکروسکوپی اپتیکی میدان نزدیک روبشی ٤٥
۳-۱- مقدمه ٤٥
۳-۱-۱- SNOM چیست؟ ٤٥
۳-۱-۲- چه وقت از SNOM استفاده می‌شود؟ ٤٧
۳-۱-۳- مجموعه SNOM ٤٨
۳-۱-۴- حالت‌های کاری مختلف ٤٩
۴- نانولیتوگرافی ٥٤

مقدمه‌ای بر میکروسکوپ‌های پروبی روبشی[1]

مقدمه

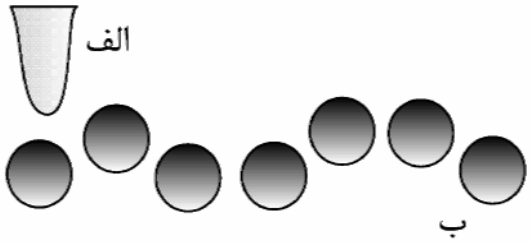
میکروسکوپ پروبی روبشی، در طی دو دهه‌ی بعد از اختراع شدنش، کاربرد گسترده‌ای در آزمایشگاه‌ها و صنایع مختلف از توسعه محیط‌های ذخیره اطلاعات مغناطیسی تا بیولوژی ساختاری یافته است. درنتیجه، کاربران این روش از زیست‌شناسان و پژوهشگران پزشکی تا فیزیک‌دانان و مهندسین، از قدرت تفکیک بی‌رقیب و به کارگیری نسبتا آسان این روش، بهره‌مند می‌شوند.

میکروسکوپ پروبی روبشی می‌تواند نقشه سطح مواد جامد را با قدرت تفکیک اتمی تهیه کند و نه تنها ساختار سطوح کریستالی کامل، بلکه توزیع نقایص نقطه‌ای، ناخالصی‌های جذب شده در سطح و عیوب ساختاری مانند پله‌ها را آشکار می‌سازد. امروزه میکروسکوپ پروبی روبشی به دلیل تواتمندی در انجام آزمایشات موضعی که با تک اتم‌ها یا مولکول‌ها قابل انجام است، به ابزار ضروری کار در حوزه نانو تبدیل شده است. اندازه‌گیری نیروی پیوندهای شیمیایی یگانه یا طیف اپتیکی تک مولکول‌ها، مثال‌هایی از این گونه کاربردها هستند. علاوه‌براین، می‌توان از پروب موضعی برای جابجایی اتم‌ها یا مولکول‌ها و بنابراین تشکیل ساختارهای مصنوعی در مقیاس اتمی، استفاده نمود.

قبل از پرداختن به جزئیات مفصل و دقیق در مورد میکروسکوپ‌های پروبی روبشی، لازم است تا این تکنیک به صورت ساده‌تر شرح داده شود.

میکروسکوپ پروبی روبشی یا SPM عبارتی کلی برای مجموعه‌ای از تکنیک‌ها که سطح ماده را با قدرت تفکیکی در مقیاس نانومتری و یا حتی کمتر از آنگستروم روبش کرده و تصاویر توپوگرافی یا نقشه‌هایی از یک خاصیت فیزیکی یا شیمیایی سطح ماده را تهیه می‌کند.

در این تکنیک همانند سایر روش‌های میکروسکوپی روبشی مانند میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، سطح نمونه توسط یک سوزن[2] یا پروب[3] روبش شده (شکل ۱) و با اندازه‌گیری و پردازش سیگنال به دست آمده از نقاط مختلف سطح روبش شده بر روی نمونه، تصویر آن سطح تهیه می‌شود. قدرت تفکیک و بزرگنمایی میکروسکوپ پروبی روبشی بهتر از میکروسکوپ‌های الکترونی متداول است و توانایی تهیه تصاویر سه بعدی از اتم‌ها را نیز فراهم می‌آورد. علاوه بر تهیه تصویر، این تکنیک امکان جابجایی اتم‌ها را نیز ایجاد می‌نماید.



[1] Scanning Probe Microscopes (SPM)
[2] tip
[3] probe

شکل ۱: تصویر شماتیک نحوه روبش اتم‌های سطح نمونه (ب) توسط سوزن SPM (الف).

برخلاف اغلب میکروسکوپ‌های الکترونی متداول که به خلاء و آماده‌سازی نمونه احتیاج دارد، میکروسکوپ‌های پروبی روبشی علاوه بر خلاء، در هوا و یا زیر سطح مایع و با حداقل آماده‌سازی نمونه (و در مواردی بدون نیاز به آماده‌سازی)، کار می‌کنند. این واقعیت، به همراه امکان اندازه‌گیری و استفاده از سیگنال‌های متفاوت برای تصویرسازی، امکان بررسی طیف وسیعی از مواد سخت، نرم، هادی، نیمه‌هادی, عایق، مغناطیسی و غیره را فراهم می‌آورد. در نتیجه این تکنیک، در کنار سایر دستگاه‌های پژوهشی، کاربرد گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف متالورژی، سرامیک، فیزیک، شیمی، الکترونیک، پلیمر، داروسازی و بیولوژی یافته است. شکل ۲ نمونه‌هایی از تصاویر تهیه شده توسط این تکنیک را نشان می‌دهد.

شکل ۲: نمونه‌هایی از تصاویر SPM از مواد مختلف. الف) سطح سیلیسیوم ب) ویفر ج) دی نوکلئویک اسید (DNA)

STM، EC-STM، AFM، C-AFM، MFM، LFM، و ده‌ها تکنیک تصویرسازی دیگر در گروه SPM قرار می‌گیرند. هر SPM از یک سوزن تیز برای روبش سطح نمونه به صورت نقطه به نقطه و خط به خط استفاده می‌کند تا نقشه‌ای سه بعدی از سطح ایجاد کند. در اغلب تکنیک‌ها سوزن به صورت دائم یا متناوب با سطح نمونه تماس پیدا می‌کند. غالبا این سوزن که به شکل هرم یا مخروط است در انتهای بازویی که کانتی‌لیور نامیده می‌شود، قرار دارد. در شکل ۳ نمونه‌ای از این مجموعه که پروب دستگاه را تشکیل می‌دهند، مشاهده می‌شود.

شکل ۳: الف) نمایی از کانتی‌لیور ب) به همراه سوزن

ساده‌ترین نقشه‌ای که SPM به وجود می‌آورد، نقشهٔ توپوگرافی (سه بعدی) سطح است. نقشه‌های دیگری هم قابل دستیابی است که مناطقی از سطح که به صورت فیزیکی یا شیمیایی از بقیه نقاط متمایز هستند را نشان می‌دهند و اطلاعاتی در مورد خواص الکتریکی، مکانیکی، مغناطیسی، اپتیکی و سایر خواص ماده به دست می‌دهند.

* * *

نقطه شروع SPM، اختراع میکروسکوپ تونلی روبشی (STM) در سال ۱۹۸۲ توسط بنیگ[۱] و روهرر[۲] [۱ و۲] بود که جایزه نوبل فیزیک در سال ۱۹۸۶ برای این اختراع به آنان اختصاص یافت. در STM، یک سوزن فلزی تیز سطح را در فاصله‌ی کمتر از ۱ nm روبش می‌کند. این فاصله توسط جریان تونلی بین سوزن و سطح هادی، تنظیم می‌شود. جریان تونلی یک اثر مکانیک کوانتم با دو اثر مهم برای STM است: اول، این جریان بین دو الکترود، حتی از میان لایه نازکی از عایق یا شکاف نازکی از خلاء برقرار می‌شود و دوم، این جریان در مقیاس طول در حد شعاع یک اتم، افت می‌کند. در STM، جریان تونلی از آخرین اتم نوک سوزن به تک اتم‌های روی سطح نمونه جریان یافته و به این ترتیب، قدرت تفکیک اتمی را فراهم می‌کند.

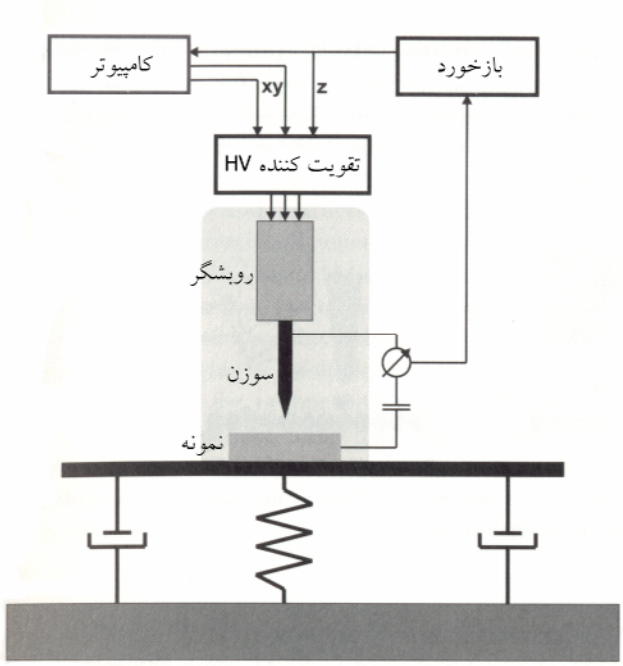
در یک دستگاه معمولی، (شکل ۴)، سوزن به کمک فعال‌کننده‌های[۳] پیزوالکتریک، در سه جهت حرکت می‌کند. یک کنترلر الکترونیک، سوزن را در فاصله سوزن- نمونه مربوط به جریان تونلی از پیش تعیین شده، تنظیم می‌کند. این فاصله توسط یک کامپیوتر به عنوان تابعی از موقعیت جانبی[۴] ثبت شده و به صورت تصویر نمایش داده می‌شود. پایداری مکانیکی زیاد دستگاه، پیش شرط اندازه‌گیری موفقیت‌آمیز در مقیاس اتمی است.

با این مثال از STM، تمام اجزای یک میکروسکوپ پروبی روبشی معرفی شده‌اند. برهم‌کنش کوتاه برد، که قدرت تفکیک مطلوب را می‌دهد، توسط یک پروب موضعی احساس می‌شود. پروب سطح مورد مطالعه را روبش کرده و مقادیر اندازه‌گیری شده، ثبت شده و در سیستم کامپیوتری پردازش می‌شود. دستگاه باید دارای ساختار صلب و از نظر ارتعاشات ایزوله باشد تا بتواند محل قرار گرفتن سوزن روی سطح نمونه را با دقت اتمی و به صورت تکرار پذیر تعیین کند.

خانواده میکروسکوپ‌های پروبی روبشی، که بر اساس برهم‌کنش‌های سوزن- نمونه کار می‌کنند، شامل چندین عضو است. اولین و مهم‌ترین شاخه‌ای که از STM توسعه یافت، میکروسکوپ نیرویی روبشی[۵] (SFM) بود که در سال ۱۹۸۶ توسط بنیگ[۶]، کوئت[۷] و گربر[۸][۳] اختراع شد. در این دستگاه، ارتفاع سوزن از سطح نمونه به گونه‌ای تنظیم می‌شود که نیروی بین سوزن و نمونه ثابت باقی بماند. در حالی که استفاده از STM به سطوح هادی محدود می‌شود، SFM اصولا قادر به تعیین توپوگرافی انواع سطوح، شامل هادی و غیرهادی، می‌باشد. بر مبنای این فرض

[1] G. Bennig
[2] H. Rohrer
[3] actuators
[4] lateral
[5] Scanning Force Microscope
[6] Binnig
[7] Quate
[8] Gerber

که در این دستگاه، نیروهای بین اتم‌های نوک سوزن و اتم‌های سطح نمونه، قدرت تفکیک آن را تعیین می‌کنند، معمولا آن را میکروسکوپ نیروی اتمی[1] (AFM) می‌نامند. سومین عضو شاخص خانواده میکروسکوپ‌های SPM، میکروسکوپ اپتیکی میدان نزدیک روبشی[2] (SNOM) است که از اجزای کوتاه برد میدان الکترومغناطیس برای برهم‌کنش سوزن- نمونه استفاده می‌نماید.



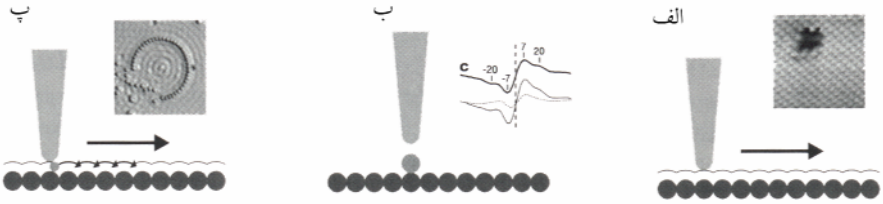
شکل ۴: اجزای اصلی یک STM. از جریان تونلی برای کنترل فاصله سوزن- نمونه z از طریق یک مدار بازخورد[3]، استفاده می‌شود. فاصله z توسط کامپیوتر به عنوان تابعی از مختصات x و y نقطه روبش شده، ثبت می‌شود. یک تقویت کننده ولتاژ بالا برای راندن[4] روبشگر[5] پیزوالکتریک مورد نیاز است. ایزوله ارتعاشی خوب دستگاه، پیش شرط قدرت تفکیک زیاد تصویرگیری است.

کاربردهای SPM

تا اینجا، قابلیت‌های تصویرگیری میکروسکوپ‌های پروبی روبشی، ذکر شد. معمولا گفته می‌شود که حرکت سوزن در جریان تونلی ثابت یا نیروی ثابت، توپوگرافی سطح نمونه را می‌دهد. در استفاده از عبارت توپوگرافی باید قدری ملاحظه کرد. در STM، در واقع، نقشه چگالی ترازها ثبت می‌شود و ممکن است این داده با توپوگرافی هندسی فرق کند. برای مثال، یک مولکول جذب شده بر روی سطح نمونه ممکن است چگالی موضعی ترازها را تغییر داده و به صورت یک فرورفتگی تصویر شود. در میکروسکوپ نیرویی، وضعیت حتی از این هم پیچیده‌تر است، زیرا قسمت‌های مختلف سوزن، برهمکنش متفاوتی با اجزای روی سطح نمونه دارند. برای مثال، ممکن است ارتفاع

[1] Atomic Force Microscope
[2] scanning near-field optical microscopy
[3] feedback
[4] drive
[5] scanner

اندازه‌گیری شده بر روی نمونه انحراف قابل توجه‌ای از ارتفاع هندسی آن داشته باشد. اما، با روش‌های آزمایشی فعلی، اندازه‌گیری‌های SPM بر روی سطوح همگن، مطابقت بسیار خوبی با توپوگرافی واقعی دارد.



شکل ۵ : حالت‌های مختلف SPM. الف) تصویرگیری سطح با قدرت تفکیک اتمی واقعی. ب) طیف‌نگاری موضعی خواص سطحی تک مولکول‌ها بر روی سطح. پ) چیدمان مصنوعی ساختار سطحی با SPM.

اما کاربرد SPM بسیار گسترده‌تر از تصویرگیری صرف است (شکل ۵). ساختار الکترونی سطح را می‌توان در STM با استفاده از حالت‌های طیف‌نگاری، مطالعه نمود. در اینجا، سوزن در ارتفاع مشخصی از سطح، متوقف شده و جریان تونلی به صورت تابعی از ولتاژ اعمالی بین سوزن- نمونه، اندازه‌گیری می‌شود. چگالی الکترونی ترازها در فواصل انرژی مختلف از تراز فرمی[۱] را می‌توان از چنین منحنی‌های I(V)، استخراج نمود. بطور مشابه، منحنی‌های نیرو در برابر ولتاژ ثبت شده توسط SFM، مشارکت نیروهای الکترواستاتیک را آشکار نموده و امکان تعیین تفاوت‌های تابع کار بین سوزن و نمونه را فراهم می‌آورد. جریان تونلی و نیرو را همچنین می‌توان به عنوان تابعی از فاصله سوزن- نمونه ثبت نمود و به این ترتیب، اطلاعات اضافی در مورد برهم‌کنش‌های سوزن- نمونه به دست می‌آید. پایداری[۲] و حساسیت[۳] این روش‌های طیف سنجی را می‌توان با به کارگیری تکنیک‌های قفل کننده[۴]، بهبود بخشید. ولتاژ ارتعاشی کوچکی به ولتاژ سوزن- نمونه افزوده می‌شود و اثر آن بر روی جریان تونلی یا نیرو توسط یک تقویت کننده قفلی[۵]، آنالیز می‌شود. بطور مشابه از اندازه‌گیری فاصله سوزن- نمونه می‌توان برای تعیین وابستگی جریان یا نیرو به فاصله، استفاده نمود.

سومین کاربرد مهم SPM، علاوه بر تهیه تصویر توپوگرافی و اندازه‌گیری‌های موضعی خواص، دستکاری[۶] سطوح است. تک اتم‌های سطح یا مواد جذب شده روی سطح، برای تولید ساختارهای نانومتری به طور سیستماتیک جابجا شده‌اند. این کار را می‌توان با کشیدن یا هل دادن اتم‌ها توسط سوزن، یا حتی با انتقال اتم‌ها به سوزن و از سوزن به نمونه، انجام داد. چنین تجربیاتی در واقع لیتوگرافی در مقیاس مولکولی است. STM، تنها ابزار برای دستکاری سطحی نیست. سوزن SFM می‌تواند برای القاء بار الکترواستاتیک به نمونه‌های عایق، یا برای مطالعه اثرات میکروسکوپی سایش توسط خراش دادن سطح، استفاده شود. به کمک SNOM می‌توان تک مولکول‌ها را به صورت اپتیکی واکنش داد. در تمام این مثال‌ها، از همان سوزنی که برای انجام تغییرات به کار برده شده، برای مطالعه نتایج و اثرات دستکاری هم استفاده می‌شود. میکروسکوپ پروبی روبشی کاربرد گسترده‌ای در علم سطح یافته است

[1] Fermi level
[2] stability
[3] sensibility
[4] lock-in
[5] lock-in amplifier
[6] manipulation

و در این حوزه می‌توان از آن برای مطالعه ساختار سطح، جذب مولکول‌ها یا خواص الکترونیکی موضعی، استفاده نمود. اولین نانوساختارها به روش اتم به اتم ساخته و بررسی[1] شدند. کاربردهای صنعتی‌تر شامل کنترل سطح در علم مواد هستند. زبری و سختی در مقیاس نانومتری، اندازه‌گیری می‌شوند. ساختارهای مغناطیسی در ابزارهای ذخیره اطلاعات و کیفیت اپتیکی پوشش‌ها را می‌توان آنالیز نمود. پژوهش‌هایی در مورد منشاء میکروسکوپی اصطکاک توسط SFM انجام شده است. میکروسکوپ نیرویی امکان تصویرگیری در مقیاس نانومتری از مواد بیولوژیکی که به دلیل شرایط آماده‌سازی نمونه قابل مطالعه توسط میکروسکوپ الکترونی نیستند، را فراهم می‌آورد. علاوه بر تصویرگیری، اندازه‌گیری نیرو بین گروه‌های عاملی[2] مولکولی توجه زیادی را در حوزه بیوفیزیک به خود جلب نموده است.

روبش سطح

یکی از نکات کلیدی در میکروسکوپ‌های پروبی روبشی، روبش سطح نمونه با قدرت تفکیک بسیار بالا است. مواد پیزوالکتریک، این امکان را فراهم می‌آورند. این مواد، با اعمال ولتاژ و متناسب با جهت و میزان آن، تغییر طول می‌دهند (شکل ۶ الف). به این ترتیب و با اتصال کانتی‌لیور به همراه سوزن به روبشگر پیزو، امکان روبش سطح نمونه با قدرت تفکیکی در حد ۰٫۱ آنگستروم فراهم می‌آید. ماده استاندارد برای فعال کننده‌های پیزوالکتریک، PZT (تیتانات زیرکونیم سرب) است. تغییر طول نسبی $\Delta l/l$ میله با رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\frac{\Delta l}{l} = d_{31}E$$

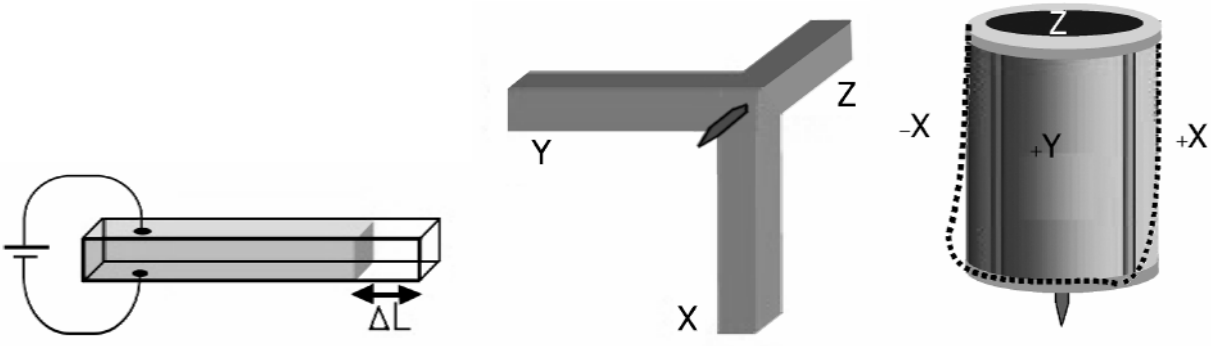
در اینجا E میدان الکتریکی در مقطع میله و d_{31} ، ضریب پیزوالکتریک عرضی است. مقدار معمول آن d_{31} =۰٫۲۶۲ nm/V (PZT-5H) است. برای اینکه میله‌ای به طول ۱cm به اندازه ۱ µm افزایش طول دهد، باید ولتاژی به اندازه ۳۸۰V در ضخامت ۱mm اعمال شود. این اعداد نشان می‌دهند که برای راندن فعال کننده‌های پیزوالکتریک، به یک تقویت کننده ولتاژ بالا نیاز است. برای تولید اثر مطلوب در مواد فعال‌کننده، باید با اعمال ولتاژهای بسیار زیاد آنها را پلاریزه نمود. به مرور زمان و یا در صورت حرارت دیدن ماده تا بالای دمای کوری آن، به طور ناگهانی، ماده خاصیت پلاریزه خود را از دست می‌دهد. بنابراین، باید فعال کننده‌ها مرتبا کالیبره شوند. ممکن است لازم باشد که ماده با اعمال ولتاژ زیاد تا بالای دمای کوری و سرد شدن تحت اعمال ولتاژ، مجددا پلاریزه شود.

در میکروسکوپ‌های SPM اولیه، سه میله عمود بر هم، این روبشگر را تشکیل می‌داد (شکل ۶ ب). در میکروسکوپ‌های جدید، روبش توسط یک استوانه توخالی از ماده پیزو انجام می‌شود (شکل ۶ پ). سطح داخلی استوانه با لایه نازکی از یک فلز رسانای الکتریسیته (مانند نیکل) پوشانده شده (شکل ۷ الف) و چهار نوار فلزی نیز در سطح خارجی این استوانه پیزو نشانده شده است (شکل ۷ ب). 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 چسبیده به آن و یا انقباض و بالا رفتن آن می‌شود (شکل ۷ پ). اعمال ولتاژ با علامت‌های مخالف به الکترودهای مقابل (مثلا X و –

[1] characterized

[2] functional

X) باعث خم شدن استوانه می‌شود که در واقع شامل حرکت در صفحه X, Y و همچنین حرکت در جهت Z است (شکل ۷ پ). با کنترل نرم‌افزاری اعمال ولتاژ، می‌توان سوزن را به دلخواه در هر سه جهت حرکت داد. سیستم الکترونیک دستگاه امکان کنترل این حرکت را با دقت ۰٫۱ آنگستروم فراهم می‌کند.



(الف) (ب) (پ)

شکل۶ : الف) اعمال ولتاژ عامل پیزو را بلندتر یا کوتاه‌تر می‌کند. ب) ترکیب سه عنصر پیزو امکان حرکت نوک SPM را در سه جهت XYZ می‌دهد. پ) بیشتر میکروسکوپ‌های SPM جدید از یک لوله هندسی استفاده می‌کنند.

چندین عامل، عملکرد روبشگر لوله‌ای پیزوالکتریک در تعیین موقعیت[1] را محدود می‌سازند:

- غیرخطی بودن روبشگر لوله‌ای
- هیسترزیس[2] حرکت روبشی
- خزش ماده
- پارازیت و انحراف[3] منبع ولتاژ بالا
- انحراف حرارتی تمام مجموعه مکانیکی دستگاه

غیرخطی بودن خمش لوله باعث می‌شود که به هنگام روبش افقی، تغییری[4] در موقعیت عمودی نوک روبشگر ایجاد شود. برای محدوده‌های بسیار کوچک روبش، در مقایسه با طول لوله، مثلا چند نانومتر به یک سانتیمتر، این اثرات غیرخطی تداخلی در اندازه‌گیری به وجود نمی‌آورند. اما، تصاویر توپوگرافی که در بیش از ۱۰۰ µm ثبت می‌شوند، اغلب خمش[5] قابل توجه سطح را نشان می‌دهند.

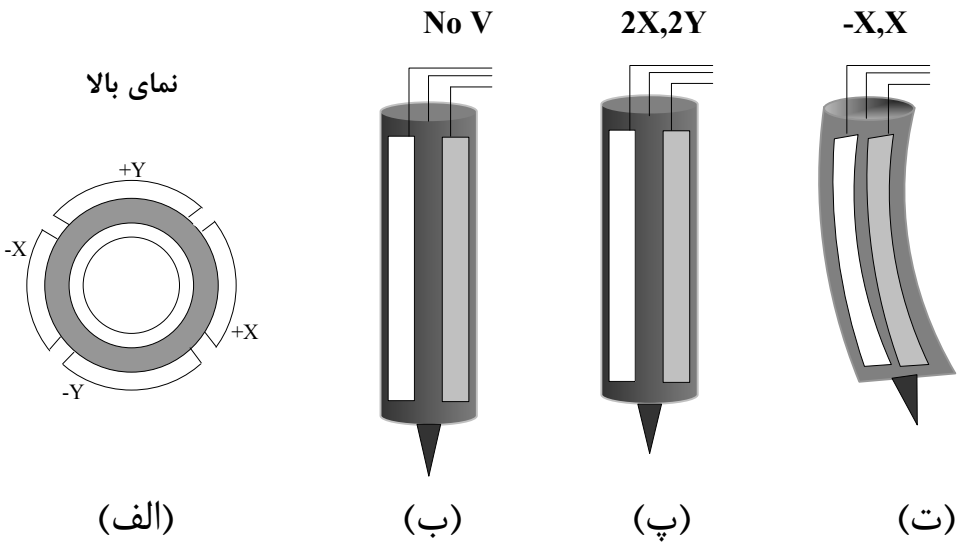
مواد پیزوالکتریک هم مثل مواد مغناطیسی رفتار هیسترزیس دارند. وقتی که یک ولتاژ دندان اره‌ای به روبشگر اعمال می‌شود، موقعیت فعال کننده در اثر اعمال یک ولتاژ مشخص، بسته به اینکه روبشگر در جهت رفت یا برگشت حرکت می‌کرده، ممکن است تا ۱۵٪ اختلاف داشته باشد. علاوه‌براین، مواد پیزوالکتریک بعد از یک جهش

[1] positioning
[2] hysteresis
[3] drift
[4] offset
[5] curvature

ناگهانی در ولتاژ اعمالی، خزش می‌کنند. این خزش پیش‌رونده[1] موقعیت در جهت جهش، به صورت تابع لگاریتمی زمان است. در SPM، خزش دو اثر مهم دارد: اول اینکه هیسترزیس را در نقاط برگشت حرکت‌های روبشی تشدید می‌کند[2]، دوم، موقعیت عمودی سوزن، بعد از نزدیک شدن به نمونه، خزش می‌کند. از آنجا که فاصله سوزن- نمونه توسط کنترلر ثابت نگه داشته می‌شود، توپوگرافی سطحی ثبت شده، یک خم شدگی لگاریتمی در جهت روبش را نشان می‌دهد. یکی از محدودیت‌های قدرت تفکیک در SPM، پارازیت تقویت‌کننده‌های ولتاژ بالا است. محدودیت دیگر، انحراف حرارتی[3] منبع ولتاژ و مجموعه مکانیکی دستگاه است. در آزمایشات دمای پایین، اثر مورد آخر، بسیار کم است. انحراف خطی دستگاه را می‌توان با افزایش مداوم یک ولتاژ صعودی[4] به ولتاژهای فعال‌سازی، جبران نمود. اگرچه می‌توان حساسیت یک روبشگر لوله‌ای را محاسبه کرد، کالیبراسیون روبشگر در جهات جانبی و عمودی، اجتناب ناپذیر است. با توجه به طبیعت غیر خطی اثر پیزوالکتریک، بدیهی است که برای هر محدوده روبشی نیاز به یک کالیبراسیون جداگانه است، یعنی کالیبراسیون روبشگر در مقیاس میکرومتری، نتایج صحیح در مقیاس اتمی را تضمین نمی‌کند. برای محدوده‌های روبش بزرگ، نمونه‌های استاندارد کالیبراسیون[5] به صورت تجارتی در دسترس هستند. این نمونه‌ها الگوها و پله‌های کاملا واضحی برای کالیبراسیون در هر سه جهت، فراهم می‌آورند. میکرسکوپ‌های SPM با قدرت تفکیک بالا را می‌توان در جهت جانبی در طول شبکه اتمی و در جهت عمودی توسط پله‌های تک اتمی، کالیبره نمود. برای دستگاه‌هایی که در اتمسفر کنترل‌شده کار می‌کنند، می‌توان از سطوح تازه شکسته شده در جهات اتمی[6] گرافیت جهت دار (HOPG) برای STM و از میکا برای SFM استفاده نمود. مناسب‌ترین سطح برای دستگاه خلاء بالا (UHV)، سطح از نو ساخته شده[7] Si(111) ۷ × ۷ است. به دلیل فاصله زیاد بین اتم‌های سطح[8]، به آسانی می‌توان این نمونه را تهیه و تحلیل نمود. برای کالیبراسیون در جهت عمودی، باید اختلاف ارتفاع تراس‌ها[9] را در نقطه‌ای که با پله فاصله دارد، ارزیابی نمود زیرا ممکن است خود پله به دلیل اثرات الکترونی یا کنولاسیون سوزن، کاملا واضح نباشد. این روش کار تحت استاندارد ISO 5436، رسمیت یافته است.

فعال کننده‌های پیزوالکتریک به ولتاژ زیادی برای تعیین موقعیت نیاز دارند. برای غلبه بر این شرط، روش‌های جدیدی برای تعیین موقعیت در میکروسکوپ‌های SPM ارزان قیمت توسعه یافته‌اند. مثلا فعال‌سازی مغناطیسی توسط سیم‌پیچ‌ها و مغناطیس‌های دائم انجام می‌شود، درست مثل یک بلندگو.

[1] ongoing
[2] aggravates
[3] thermal drift
[4] ramp
[5] calibration grids
[6] cleaved
[7] reconstruction
[8] adatoms
[9] terraces



شکل۷ : الف) سطح مقطع و ب) نمای از پهلوی استوانه توخالی روبشگر پیزو و الکترودهای نشانده شده بر روی آن که برای اعمال ولتاژ و ایجاد حرکت پ) به سمت بالا و پایین یعنی محور z ت) در جهت‌های جانبی یعنی محورهای x و y استفاده می‌شوند.

روبشگر پیزو، مجموعه کانتی‌لیور و سوزن، سیستم آشکارساز لیزری حساس به موقعیت کانتی‌لیور و در مواردی یک پیش تقویت کننده، مجموعا قسمت روبشگر[1] دستگاه را تشکیل می‌دهند. نمونه‌ای از این روبشگر در شکل ۸ نشان داده شده است.

شکل ۸ : نمونه‌ای از روبشگر. پروب (کانتی‌لیور) در انتهای پایینی آن نصب می‌شود.

روبشگر (۸) توسط یک سه‌پایه از جنس آلیاژ فلزی مخصوص با حداقل انبساط و انقباض حرارتی بر روی یک پایه یا میز x,y نصب می‌شود (شکل ۹). نمونه بر روی میز قرار داده شده و سطح آن توسط سوزن روبش می‌شود. این پایه

[1] scanner

به لاستیک‌های جاذب انرژی[1] مجهز است. وقتی که پایه برروی یک میز محکم، در یک محل تقریبا عاری از ارتعاش قرار گیرد، می‌توان اندازه‌گیری‌های تکرارپذیر در جهت‌های x , y , z و با جزئیات بسیار دقیق به دست آورد.
پایه روبشگر به یک دوربین CCD (شکل ۹ پ) مجهز می‌شود که می‌تواند مستقیما به عنوان یک میکروسکوپ با بزرگنمایی حدود ۳۰۰ برابر استفاده شود. تصویر اپتیکی دوربین CCD بر روی صفحه مانیتور کامپیوتر نشان داده شده و برای انتخاب محل مورد نظر روبش روی سطح نمونه به کار می‌رود.

شکل ۹: نمونه‌ای از مجموعه الف) میز x,y، ب) سه‌پایه نگهدارنده، پ) روبشگر و د) دوربین CCD.

ایزوله کردن ارتعاش

پایداری مکانیکی و ایزوله ارتعاشی، پیش‌شرط‌های دست‌یابی به تصاویر با قدرت تفکیک بالا در SPM هستند. ساختمان نگهدارنده سوزن، نگهدارنده نمونه، و فعال کننده‌ها باید تا حد امکان صلب[2] باشد تا ویژه فرکانس[3] مکانیکی دستگاه را افزایش دهد. سرعت کنترل بازخورد همیشه توسط این ویژه فرکانس، که مقدار معمول آن برای روبشگرهای لوله‌ای ۰٫۵-۱۰ kHz است، محدود می‌شود. دستگاه‌های SPM خیلی به پارازیت صوتی حساس هستند و باید همیشه درون یک جعبه محکم، کارکنند. می‌توان با استفاده از فنرها، انواع مختلف پایه‌های لاستیکی یا با پایه‌های بادی، دستگاه را از ارتعاشات ساختمان، ایزوله کرد. ساخت یک سیستم ارتعاش‌گیر دو مرحله‌ای بسیار مفید است، مثلا میزی با پایه‌های بادی و بدنه دستگاه از لایه‌های متناوب حلقه‌های ویتون[4] و صفحات فلزی سنگین. هر مرحله ارتعاش‌گیری و خود دستگاه یک تابع انتقال دارند که پاسخ وابسته به فرکانس سیستم به ارتعاشات خارجی را شرح می‌دهد. فرکانس رزونانس دو مرحله ارتعاش‌گیر بسیار پایین‌تر از فرکانس‌های صدا و

[1] rubber vibration dampers

[2] rigid
[3] eigenfrequency
[4] Viton

ساختمان است و آنها را به خوبی می‌گیرد (فاکتور Q کم). اگر فرکانس رزونانس SPM، kHz ۱ باشد، تمام پارازیت‌های Hz ۴۰۰-۱۰ به صورت موثری با یک تابع پاسخ تخت[1] حذف می‌شوند.

مدار کنترل

سیگنال‌های به دست آمده ناشی از حرکت سوزن، با یا بدون تقویت اولیه به قسمت کنترل کننده (شکل۱۰) که حاوی مدارهای الکترونیک با نویز کم هستند وارد شده و پس از تقویت و پردازش اولیه جهت تشکیل تصویر به کامپیوتر فرستاده می‌شود (شکل۱۱)کنترل کننده با فرستادن سیگنال‌های الکتریکی، روبشگر را کنترل می‌نماید. نرم‌افزار نصب شده بر روی کامپیوتر سیگنال‌های خروجی از قسمت کنترل کننده را پردازش نموده و به تصویر تبدیل می‌کند. در عین حال نرم‌افزار امکان پردازش و اندازه‌گیری‌های سه بعدی را بر روی تصویر بدست آمده فراهم می‌آورد.

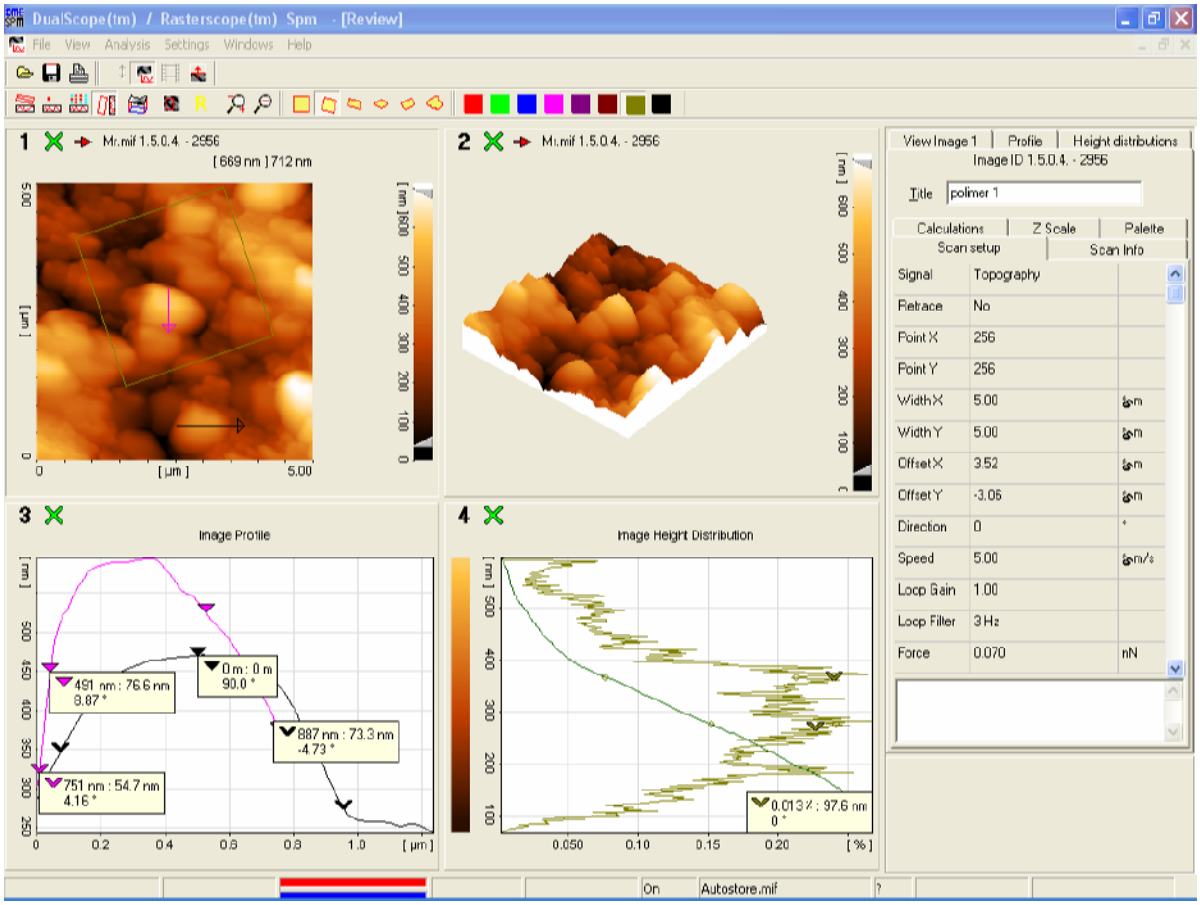
سیگنال‌های الکتریکی، روبشگر را کنترل می‌نماید.

معمولا داده دو بعدی روی صفحه مانیتور کامپیوتر به صورت به اصطلاح نمایش رنگی مجازی[2] نشان داده می‌شود. در این روش، برای سیگنال اندازه‌گیری شده برای هر نقطه (x,y) بر روی نمونه، یک کد رنگی برای نقطه تصویری[3] متناظر آن در تصویر در نظر گرفته می‌شود. معمولا نقاط برجسته در توپوگرافی روشن‌تر، و نقاط فرو رفته، تیره‌تر نشان داده می‌شوند.

اغلب داده‌های جمع‌آوری شده، برای دست‌یابی به کنتراست بهینه برای نمایش، پردازش می‌شوند. انحراف[4] دستگاهی و خزش فعال‌کننده‌های پیزوالکتریک، باعث شیب‌دار شدن یا حتی انحنای داده‌های توپوگرافی در جهت روبش آهسته می‌شود. با کم کردن یک صفحه متوسط یا یک چندجمله‌ای[5] درجه دو از داده‌ها، می‌توان این شیب‌دار شدن را جبران نمود. معمولا اعمال این روش، باعث از دست رفتن داده‌ها نمی‌شود، ولی ممکن است سطوح پله‌ای به شکل چین‌های دندان اره‌ای نمایش داده شوند. روش‌های دیگر پردازش تصویر شامل هموار کردن داده‌های پارازیت‌دار یا فیلتر کردن ساختارهای اتمی توسط آنالیز فوریه[6] است. حتی اگر تصاویر عالی با ساختار کامل به دست بیاید، چنین پردازشی معمولا قدرت SPM در آشکارسازی بی‌نظمی‌های سطحی را می‌پوشاند. برای ارزیابی کمّی اندازه‌گیری‌ها، باید هیستوگرام‌های داده‌های ثبت شده یا خط‌های عبوری[7] از نقاط مورد نظر را استخراج نمود.

[1] flat response function
[2] false color representation
[3] pixel
[4] drift
[5] polynominal
[6] Fourier
[7] line-sections

شکل ۱۰ : نمونه‌ای از سیستم کنترل میکروسکوپ پروبی روبشی، SPM.



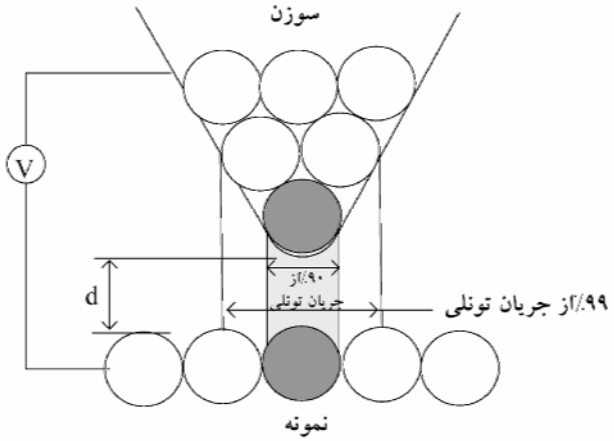
شکل ۱۱ : تصویری از پنجره نرم‌افزار SPM که با استفاده از آن نمایش سه‌بعدی تصویر و اندازه‌گیری‌های مربوطه بر روی تصویر انجام پذیر می‌گردد.

در اینجا شرح مختصری در مورد بعضی از حالت‌های اصلی میکروسکوپ‌های پروبی روبشی داده می‌شود.

۱- میکروسکوپ پروبی جریان تونلی[1]

میکروسکوپ پروبی جریان تونلی، STM اولین نوع از سری میکروسکوپ‌های SPM بود که در سال ۱۹۸۱ توسط گرهارد بنیگ[2] و هاینریش روهرر[3] در شرکت IBM در شهر زوریخ[4] سوییس اختراع شد. پنج سال بعد جایزه نوبل فیزیک برای این اختراع به آنها داده شد. STM اولین دستگاهی بود که تصاویر سه بعدی واقعی[5] با قدرت تفکیک اتمی از سطوح تولید کرد.

STMها از یک سوزن تیز برای روبش استفاده می‌کنند. یک ولتاژ بایاس بین سوزن و نمونه اعمال می‌شود. وقتی که سوزن به فاصله کمتر از ۱۰ آنگستروم سطح نمونه آورده می‌شود، الکترون‌ها بر اساس پدیده تونل‌زنی[6] از نمونه به اتم‌های سوزن یا بالعکس (بسته به جهت ولتاژ بایاس) جریان می‌یابند، بطوریکه بیش از ۹۰ درصد جریان تونلی از انتهایی‌ترین اتم سوزن به نمونه (و یا بلعکس) جاری می‌گردد. (شکل **۲۱** ۱۲).

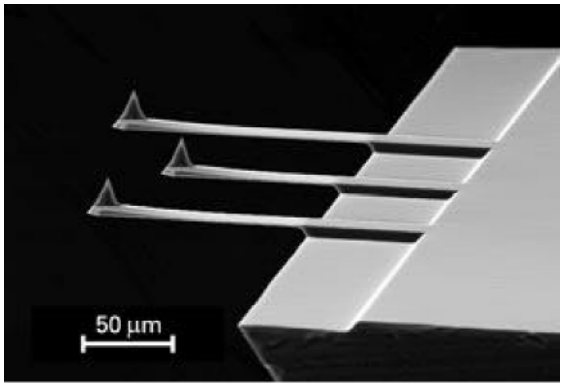


شکل ۱۲: شماتیک بر هم کنش سوزن و نمونه. جریان تونلی در فاصله آنگستورمی از سطح نمونه به سوزن (ویا بلعکس) جاری می‌گردد. در این فرایند بیش از ۹۰ درصد جریان الکترون از انتهایی‌ترین اتم سوزن جاری می‌گردد.

جریان تونلی به وجود آمده که با تغییر فاصله سوزن تا نمونه تغییر می‌کند و به عنوان سیگنالی برای تصویرسازی STM استفاده می‌شود. برای اینکه تونل‌زنی اتفاق بیافتد باید نمونه و سوزن هر دو هادی یا نیمه‌هادی باشند. شکل

[1] STM, Scanning Tunneling Microscope
[2] Gerd Binnig
[3] Heinrich Rohrer
[4] Zurich
[5] real space
[6] tunneling

۱۳ نمونه‌ای از یک نوک با پوشش هادی TiN یا Pt را نشان می‌دهد. برخلاف AFMها که در زیر شرح داده می‌شوند، STMها نمی‌توانند از مواد عایق تصویر تهیه کنند.



شکل ۱۳ : نمونه‌ای از یک سوزن STM با پوشش هادی TiN یا Pt.

تونل‌زنی: یک اثر مکانیک کوانتوم

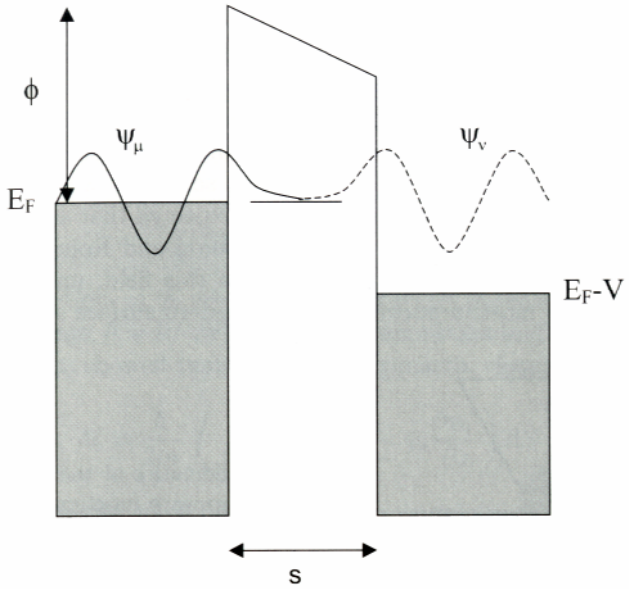
بنابر مکانیک کوانتم، ذره‌ای با انرژی E می‌تواند در سد $E < \phi$ نفوذ کند (شکل ۱۴). در منطقه ممنوعه کلاسیک، تابع موج ψ به صورت نمایی، مطابق با رابطه زیر، افت می‌کند:

$$\psi(z) = \psi(0)\exp-\frac{\sqrt{2m(\phi - E)}z}{\hbar} \qquad (۱)$$

در اینجا "m" جرم ذرات و $\hbar = ۱٫۰۵ \times ۱۰^{-۳۴}$ Js. در STM، سد توسط شکاف خلاء بین نمونه و سوزن، داده می‌شود. سپس، جریان تونلی I_t را می‌توان با در نظر گرفتن چگالی ترازهای نمونه، $\rho_s(E_F)$، در لبه فرمی، از رابطه زیر به دست آورد:

$$I_t \propto V\rho_s(E_F)\exp\left[-2\frac{\sqrt{2m(\Phi - E)}z}{\hbar}\right] \propto V\rho_s(E_F)e^{-1.025\sqrt{\Phi}z} \qquad (۲)$$

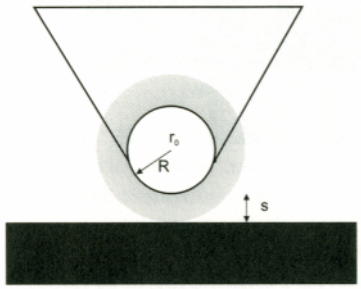
در اینجا ارتفاع سد "Φ" در واحد eV و "z" در واحد آنگستروم است. در مقدار معمول ارتفاع سد Φ = ۵ eV، که مربوط به تابع کار طلا است، با افزایش فاصله به اندازه $\mathring{A}$ ۱، جریان تونلی، نصف می‌شود.



شکل۱۴ : طرح شماتیک میکروسکوپ تونلی روبشی. یک روبشگر پیزوالکتریک xyz سوزن را روی سطح حرکت می‌دهد. می‌توان از یک مدار بازخورد برای ثابت نگه داشتن جریان تونلی استفاده نمود.

اگرچه پیش‌بینی تئوری تونل‌زنی در خلاء در دهه ۱۹۳۰ به دست آمد [۴]، زمان زیادی طول کشید تا این پدیده به صورت عملی مشاهده شود. یانگ[1] و همکارانش [۶,۵] اولین شواهد تونل‌زنی در خلاء را ارائه کردند. منحنی‌های جریان در برابر ولتاژ به دست آمده توسط دستگاه توپوگرافینر[2] آنها، که جد STM محسوب می‌شود، انتقال از رژیم انتشار میدانی به رژیم تونل‌زنی را نشان داد. در سال ۱۹۸۲، بنیگ[3] و همکارانش منحنی‌های جریان در برابر فاصله را برای ارتفاع‌های سد ۰٫۶-۳ eV ارائه کردند [۷]. در ۱۹۸۳، بنیگ و روهرر اولین تصویر موفقیت‌آمیز Au(110) و Si(111) 7×7 را ارائه نمودند. مورد آخر، تصویر آرایش اتم‌های جذبی[4] Si را نمایش می‌داد [۲]. این تصویر، مدل‌های قبلی سطح را نقض نموده و قدم بزرگی در جهت آنالیز کامل ساختار این سطح پیچیده برداشت، که نهایتا توسط تاکایاناجی[5] و همکارانش [۸] با استفاده از آنالیز میکروسکوپ الکترونی عبوری خلاء بالا (UHV-TEM) تعیین شد. مهم‌تر از این، کار بنیگ و روهرر، آغازی برای دنیای میکروسکوپی فضای واقعی بود و دروازه علم و تکنولوژی را بر روی دنیای نانومتر باز کرد. در ابتدای STM، بسیاری از دانشمندان پذیرش این کار را نداشتند زیرا انتظار عمومی بر این بود که قدرت تفکیک اتمی در فضای واقعی، غیر قابل دسترسی است. اما، بنیگ و روهرر موفق شدند گروه‌های بیشتر و بیشتری را برای کار در این حوزه قانع کنند و امروزه STM به صورت مهم‌ترین ابزار علم نوین سطح، درآمده است.

[1] Young
[2] Topographiner
[3] Bennig
[4] adatom
[5] Takayanagi



شکل ۱۵: شماتیک مدل ترسوف- هامان. تابع موج سوزن با یک موج "s" تقریب زده شده است. جریان تونلی متناسب با چگالی محلی ترازهای نمونه در سطح فرمی ($LDOS(E_F)$) در $r_0 = R + s$، مربوط به مرکز انحنای نوک سوزن است.

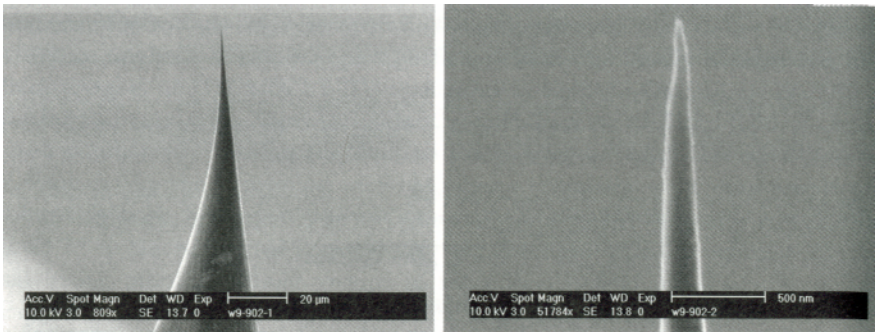
مدلی که در بالا توصیف شد، برای یک بعد اعتبار دارد. اما STM مربوط به هندسه سه بعدی است. برای اولین بار، ترسوف[۱] و هامان[۲] [۱۰،۹] نشان دادند که رابطه (۲) برای سه بعد هم اعتبار دارد، با این فرض که تابع موج سوزن تونل‌زنی، به صورت تقریبی به صورت تابع موج "s" کروی در نظر گرفته شود و $\rho_s(E_F)$، چگالی موضعی حالت‌های نمونه[۳] در لبه فرمی در فاصله $s + R$ باشد، که در اینجا "s" فاصله نوک سوزن و سطح نمونه و "R" شعاع انحنای نوک سوزن است. بنابراین، LDOS نمونه در مرکز سوزن است (شکل ۱۵). این مدل، قدرت تفکیک بالا برای فلزاتی، نظیر Au(110) را نیز توضیح می‌دهد. اما، ارتفاع‌های چین‌های روی سطوحی نظیر Al(111)، Au(111) یا Cu(111) را نمی‌توان به صورت کمّی توضیح داد[۴]. در بخش‌های بعدی بیشتر به این موضوع پرداخته می‌شود. مدل ترسوف- هامان، مدل استاندارد برای STM است، یک مدل درجه اول هوشمندانه برای STM.

جنبه‌های دستگاهی

سوزن‌های تونل‌زنی

تهیه سوزن‌های تونل‌زنی موضوع کم اهمیتی نیست و هنوز هم پارامترهای ناشناخته زیادی وجود دارند. اولین روش، ساخت سوزن‌های صاف با شعاع انحنای کم در حد ۱۰۰۰-۱۰۰ آنگستروم، به روش اچ الکتروشیمی است.

[1] Tersoff
[2] Hamann
[3] LDOS, local density of states
[4] در اینجا، ارتفاع چین‌خوردگی مربوط به اختلاف ارتفاع بین قسمت گود و قسمت برجسته در عملیات جریان ثابت است.



شکل ۱۶: مثال‌هایی از تصاویر SEM سوزن‌های تونل‌زنی. سوزن‌ها به مدت ۶۰ ثانیه با ۱۲ V AC و بعد تا زمانی که شکست اتفاق بیافتد با ۲ V AC اچ شده‌اند.

این روش در دهه ۱۹۵۰ برای میکروسکوپ یونی میدانی[1] توسعه یافته بود [۱۱]. یک سیم تنگستن (با قطر حدود ۰٫۲۵ mm) در محلول آبی یک مولار NaOH غوطه‌ور می‌شود. الکترود مقابل[2] یک قطعه فولاد ضد زنگ یا پلاتین به شکل حلقه است. یک ولتاژ مثبت ۱۲ V - ۲به سیم اعمال می‌شود. فرآیند اچ شدن در فصل مشترک هوا- مایع صورت می‌گیرد. به محض اینکه گردن سیم به اندازه کافی نازک شود، وزن قسمت پایینی سیم به گردن فشار آورده و نهایتا آن را می‌شکند. هر دو سوزن (قسمت افتاده و قسمت ثابت) را می‌توان استفاده کرد. بعضی پژوهشگران، تاخیر قطع جریان (زمانی که بعد از شکستن سوزن طول می‌کشد تا جریان اچ کردن قطع شود) را کنترل نموده‌اند [۱۲]. یک مدار الکترونیک که جریان را اندازه‌گیری نموده و بعد از شکستن سیم، جریان را قطع می‌کند، می‌تواند این تاخیر و شعاع انحناء را کاهش دهد. بعد از اچ الکتروشیمیایی، باید سوزن را کاملا با آب شستشو داد تا بقایای NaOH برطرف شود. حتی استفاده از آب جوش برای اینکار، توصیه می‌شود. اگرچه این سوزن‌ها در SEM به نظر خیلی صاف می‌آیند (شکل ۱۶)، همیشه نمی‌توانند قدرت تفکیک اتمی را تامین کنند. یک مشکل، تشکیل سطح اکسیدی در طی اچ کردن است، که باید قبل از تونل‌زنی، برطرف شود. یک راه برداشتن اکسید، توسط حرارت مقاومتی یا بمباران الکترونی است [۱۳].

روش‌های آماده‌سازی مکانیکی دیگر، سوزن‌های خشن‌تری تولید می‌کنند. برای مثال، برای دستیابی به قدرت تفکیک اتمی، می‌توان سوزن‌های PtIr را به صورت مکانیکی برید یا سوزن‌های تنگستنی را سایید. اما، نسبت قطر به ارتفاع[3] ضعیف خواهد بود و تصویرگیری پله‌های برجسته یا تپه‌ای، بدون کنولسیون سوزن، امکان‌پذیر نخواهد بود.

چندین روش در حوزه میکروسکوپی یونی، برای تولید سوزن‌هایی با ساختار اتمی مشخص، توسعه یافت. فینک[4] یک روش تبخیر میدانی برای تولید سوزن‌های تک اتمی را توسعه داد [۱۴]. بین[5] و گارسیا[6] نانو سوزن‌هایی را در میدان‌های بالا تولید کردند [۱۵].

[1] FIM, field ion microscopy
[2] counterelectrode
[3] aspect ratio
[4] Fink
[5] Binh
[6] Garcia

روش‌هایی برای تولید سوزن در محل[1] نیز وجود دارد. برخورد[2] کنترل شده برای Si(111)7 × 7، توسط بنیگ و روهرر، معرفی شد. عملیات میدان بالا نیز در برخی مراجع ذکر شده است [۱۷،۱۶]. احتمالا این فرآیند مربوط به نفوذ تقویت شده میدانی تنگستن است که باعث تجدید ساختار سوزن می‌شود.

کاربرد در محیط‌های مختلف

STM می‌تواند در محیط‌های مختلف مانند خلاء بالا (UHV)، مایعات و یا در فشار محیط کار کند. بیشتر کار STM به UHV اختصاص یافته است، زیرا تهیه سطوح هادی غالبا به این محیط محدود می‌شود. استثناهای این قاعده، طلا، گرافیت پیرولیتیک کاملا جهت‌دار[3] (HOPG) و سایر مواد لایه‌ای نظیر دی‌چالکوژنیدهای[4] فلزات انتقالی (نظیر TaS_2) هستند که می‌توانند در فشار محیط، بررسی شوند. حوزه‌های کاربردی، الکترولیت‌ها و STM جریان پایین روی مولکول‌های آلی هستند. پارامتر مهم دیگر، دما است. در دمای پایین، نفوذ اتم‌ها کاهش می‌یابد، و این، فرصتی برای جابجایی تک اتم‌های جذب فیزیکی شده[5]، پدید می‌آورد [۱۸]. متقابلا، دمای بالا امکان مشاهده فرآیندهای دینامیکی را پدید می‌آورد [۲۰،۱۹]. تغییرات دمایی، گاهی با ایجاد تغییر ولتاژ گرمایی، باعث تداخل در آزمایش‌های انجام شده دردمای محیط می‌شوند.

حالت‌های کاری

STM می‌تواند در حالت جریان ثابت و ارتفاع ثابت، کار کند (شکل ۱۷). علاوه بر این، تعدادی حالت‌های طیف‌نگاری نیز وجود دارند که در این بخش، شرح داده می‌شوند:

۱- حالت *ارتفاع ثابت*

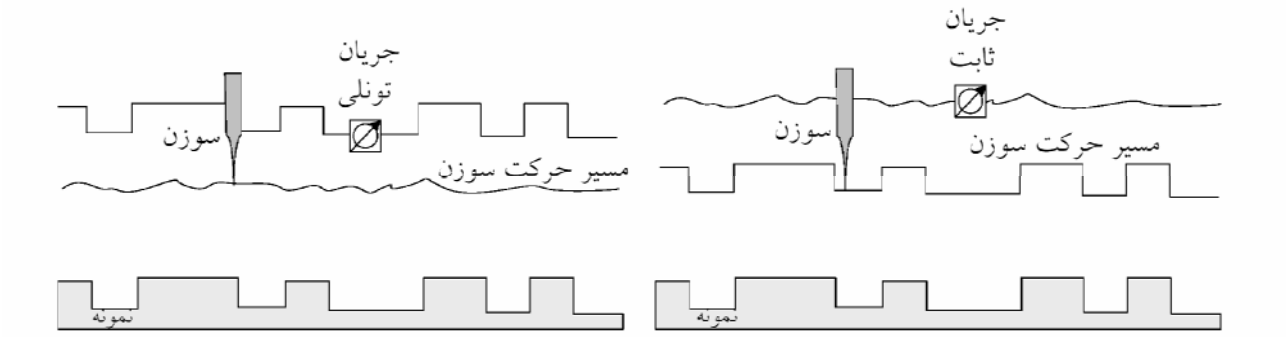
سوزن در یک صفحه افقی در بالای نمونه حرکت می‌کند و جریان تونلی برحسب توپوگرافی سطح و خواص الکترونی موضعی نمونه، تغییر می‌کند. جریان تونلی اندازه‌گیری شده در هر نقطه از سطح نمونه در تشکیل تصویر توپوگرافی مشارکت می‌کند.

۲- حالت *جریان ثابت*

در این حالت STM از مدار بازخورد[6] برای ثابت نگه داشتن جریان تونلی استفاده می‌کند. این کار با تنظیم ارتفاع روبشگر پیزو در هر نقطه اندازه‌گیری صورت می‌گیرد. برای مثال وقتی که سیستم افزایش جریان تونلی را حس می‌کند، ولتاژ اعمال شده به روبشگر پیزوالکتریک[7] را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که فاصله بین سوزن و نمونه را افزایش دهد.

---

[1] in situ
[2] collision
[3] highly oriented pyrolitic graphite
[4] dichalcogenide
[5] physisorbed
[6] feedback
[7] piezoelectric



شکل ۱۷: STM می‌تواند برای تهیه تصویر در دو حالت "ارتفاع ثابت" (چپ) یا "جریان ثابت" (راست) بکار گرفته شود.

در حالت جریان ثابت، حرکت روبشگر پیزو در تشکیل تصویر مشارکت می‌کند. اگر سیستم جریان تونلی را در حد چند درصد، ثابت نگه دارد، فاصله بین سوزن تا نمونه تا حد چند صدم آنگستروم ثابت نگه داشته می‌شود.

هر حالتی مزایا و معایبی دارد. حالت ارتفاع ثابت سریع‌تر است زیرا سیستم مجبور نیست روبشگر پیزو را به بالا و پایین حرکت دهد، ولی اطلاعاتی که تولید می‌کند فقط برای سطوح نسبتا صاف مفید است. حالت جریان ثابت می‌تواند سطوح ناصاف را با دقت زیاد اندازه‌گیری کند ولی به زمان بیشتری نیاز دارد.

حساسیت STM به ساختار الکترونی موضعی در تهیه نقشه توپوگرافی می‌تواند اشکال ایجاد کند. برای مثال، اگر قسمتی از نمونه اکسید شده باشد جریان تونلی با رسیدن سوزن به آن ناحیه ناگهان افت می‌کند. در حالت جریان ثابت، قسمت کنترل کننده به سوزن دستور می‌دهد که به نمونه نزدیک‌تر شود تا جریان تونلی ثابت بماند و در نتیجه ممکن است سوزن باعث ایجاد فرورفتگی در سطح نمونه شود.

ازسوی دیگر، وجود حساسیت STM به ساختار الکترونی می‌تواند مزیت بزرگی باشد. تکنیک‌های دیگری که برای بدست آوردن اطلاعات مربوط به خواص الکترونی نمونه بکار می‌روند، این اطلاعات را از ناحیه نسبتا بزرگی (به مقطع چند میکرون تا چند میلیمتر) از سطح نمونه جمع آوری و متوسط گیری می‌کنند. STM می‌تواند بعنوان ابزار آنالیزی برای بررسی خواص الکترونی با قدرت تفکیک اتمی و بعنوان ابزار طیف نگاری بکار می‌رود که در ادامه این بخش بطور مختصر در زیر توضیح داده شده است.

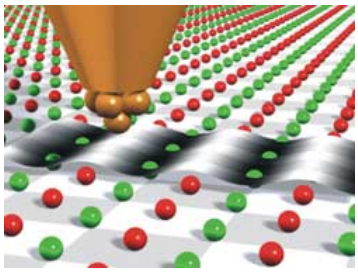
۳- طیف نگاری روبشی جریان تونلی[1]

STS برای بررسی ساختار الکترونی موضعی سطح یک نمونه را مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساختار الکترونی یک اتم به نوع اتم و همچنین به محیط شیمیایی موضعی (چه نوع اتم‌هایی در همسایگی آن هستند و تقارن توزیع آن‌ها) بستگی دارد.(شکل ۱۸)

[1] STS, Scanning Tunneling Spectroscopy

طیف‌نگاری روبشی جریان تونلی، STS شامل روش‌های مختلفی است: تهیه تصاویر توپوگرافی (جریان ثابت) با استفاده از ولتاژهای بایاس مختلف و مقایسه آنها، تهیه تصاویر جریانی (ارتفاع ثابت) در ارتفاع‌های مختلف با قرار دادن سوزن بر روی نقطه مورد نظر و تغییر ولتاژ بایاس در حین ثبت جریان تونلی است.

روش آخر منحنی‌های جریان در برابر ولتاژ (I-V) مشخصه ساختار الکترونی در نقطه x و y معین از سطح نمونه را ایجاد می‌کند. میتوان STM را برای جمع آوری منحنی‌های I-V در تمام نقاط نمونه و تهیه یک نقشه سه بعدی از ساختار الکترونی تنظیم نمود. با یک تقویت کننده می‌توان منحنی‌های dI/dV (هدایت) یا dI/dZ (تابع کار[1]) در برابر V را مستقیما بدست آورد. تمام این روشها راه‌هایی برای بررسی ساختار الکترونی موضعی یک سطح با استفاده از یک STM هستند.



شکل۱۸:

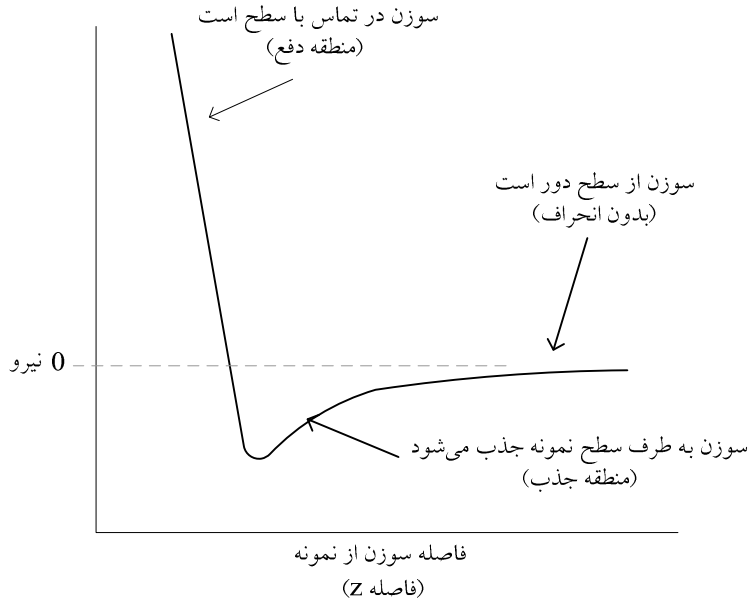
۲- میکروسکوپ روبشی نیروی اتمی[2]

میکروسکوپ روبشی نیروی اتمی AFM سطح نمونه را توسط یک سوزن[3] تیز، به طول حدود ۲ میکرون و غالبا قطر نوک کمتر از ۱۰ nm حس می‌کند. سوزن در انتهای آزاد یک کانتی‌لیور[4] به طول حدود ۱۰۰ تا ۴۵۰ میکرون قرار دارد. نیروهای بین سوزن و سطح نمونه باعث خم شدن یا انحراف کانتی‌لیور می‌شود. یک آشکارساز میزان انحراف کانتی‌لیور را درحالیکه "سوزن" سطح نمونه را روبش می‌کند یا نمونه در زیر سوزن روبش می‌شود (در سیستمهایی که نمونه حرکت روبشی را انجام می‌دهد) اندازه می‌گیرد. اندازه‌گیری انحرافات کانتی‌لیور به کامپیوتر امکان تولید تصویر توپوگرافی سطح را می‌دهد. می‌توان از AFM برای مطالعه مواد هادی، نیمه‌هادی و عایق استفاده نمود.

نیروهای مختلفی در انحراف کانتی‌لیور AFM مشارکت می‌کنند. از جمله این نیروها، می‌توان نیروهای بین اتمی یا نیروهای واندروالس را نام برد. وابستگی نیروی واندروالس به فاصله سوزن و نمونه در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

[1] work function
[2] AFM, Atomic Force Microscope
[3] tip
[4] cantilever

در شکل ۱۹ دو ناحیه علامت گذاری شده است: ۱) حالت استاتیکی و ۲) حالت دینامیکی. در حالت استاتیکی کانتی‌لیور در فاصله‌ای کمتر از چند آنگستروم از سطح نمونه قرار داده می‌شود و نیروی بین اتمی بین کانتی‌لیور و نمونه نیروی دافعه است. در حالت دینامیکی کانتی‌لیور در فاصله چند ده تا چند صد آنگستروم از سطح نمونه قرار داده می‌شود و در این حالت نیروی بین اتمی بین کانتی‌لیور و نمونه (بیشتر به دلیل بر هم‌کنش‌های واندروالس دوربرد[1]) نیروی جاذبه است. هر دو تکنیک تصویرسازی استاتیکی و دینامیکی در قسمت‌های بعدی به تفصیل شرح داده شده‌اند.

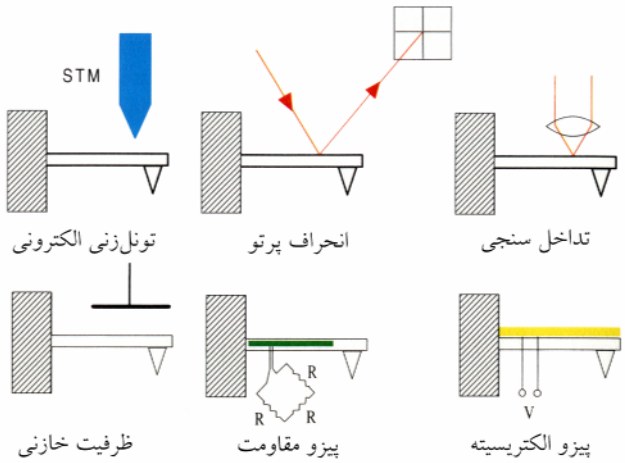


شکل ۱۹: منحنی نیروی بین اتمی در برابر فاصله.

تکنیک‌های اندازه‌گیری انحرافات کوچک کانتی‌لیور

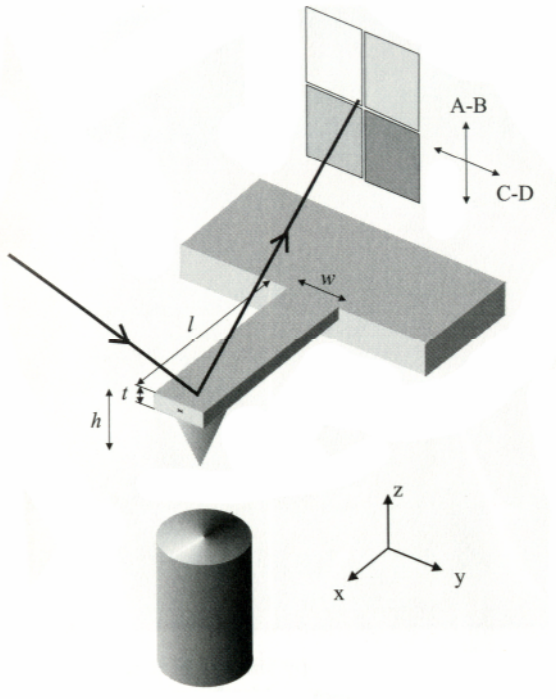
تکنیک‌های مختلفی برای آشکارسازی خمش کم کانتی‌لیور در اثر نیروهای سوزن- نمونه ، وجود دارد (شکل ۲۰).

[1] long-range



شکل ۲۰: سنسورهای انحراف برای میکروسکوپ نیرویی روبشی.

در اغلب دستگاه‌ها، از روش انحراف پرتو لیزر استفاده می‌شود [۲۱-۲۳]. یک پرتو نور لیزر از پشت کانتی‌لیور منعکس شده و انحراف آن توسط یک دیود نوری حساس به موقعیت[1] (PSD) ، آشکار می‌شود. شماتیک دستگاه در شکل ۲۱ نشان داده شده است. یک دیود نوری چهار قسمتی، نه تنها انحراف معمول، بلکه پیچش کانتی‌لیور در اثر نیروهای جانبی اعمال شده بر روی سوزن را نیز اندازه‌گیری می‌کند.



شکل ۲۱: نمودار شماتیکی SFM انحراف پرتویی. نیروهای عمودی و جانبی عمل کننده روی سوزن از طریق حرکت‌های عمودی و پیچشی روی کانتی‌لیور، اندازه‌گیری می‌شوند. یک پرتو نوری از پشت کانتی‌لیور منعکس می‌شود. انحرافات زاویه‌ای پرتو لیزری توسط یک آشکارساز حساس به موقعیت (دیود نوری چهار قسمتی)، اندازه‌گیری می‌شوند. سیگنال A-B با نیروی عمودی و سیگنال C-D با نیروی پیچشی، متناسب است.

[1] position-sensitive photodiode

نوع دیگری از حسگر انحراف را نیز می‌توان نصب کرد، بدین صورت که از کانتی‌لیور به عنوان آیینه‌ی تداخل‌سنج[1] لیزر اپتیکی، استفاده می‌شود [۲۴]. برتری مهم این تکنیک سادگی کالیبراسیون با طول موج نور است. علاوه بر این، در صورت محدود بودن فضا (در آزمایش‌های دمای پایین) نیز می‌توان آن را به‌کار برد. حساسیت هردو روش اپتیکی، با پارازیت حرارتی کانتی‌لیور، محدود می‌شود.

انحراف کانتی‌لیور را می‌توان به وسیله تغییر در ظرفیت خازنی بین کانتی‌لیور و یک الکترود کمکی[2] نیز اندازه‌گیری نمود [۲۵]. سرعت اندازه‌گیری این تکنیک بسیار سریع بوده و تمام سنسور نیرو را می‌توان با تکنیک‌های ساخت میکرو[3]، تولید نمود [۲۶].

در میکروسکوپ نیرویی اولیه بنیگ و همکارانش [۳]، انحراف کانتی‌لیور توسط یک جریان تونلی از کانتی‌لیور به سوزن STM که در قسمت عقب کانتی‌لیور نصب شده بود، اندازه‌گیری می‌شد.

کانتی‌لیورهای خود حسگر[4]، دسته‌ی خیلی جالبی از حسگرهای انحراف را تشکیل می‌دهند. اغلب آنها با استفاده از یک لایه مقاومت پیزویی[5] در پشت یک کانتی‌لیور سیلیکونی، تولید شده‌اند [۲۷] اگرچه نسبت سیگنال به پارازیت کمی بدتر از روش‌های انحراف پرتو است، اولین اندازه‌گیری با قدرت تفکیک اتمی، با کانتی‌لیورهای مقاومت پیزویی، انجام شده بود [۲۸]. طرح‌های خاص دیگر، امکان اندازه‌گیری نیروهای جانبی با استفاده از مقاومت پیزویی را فراهم می‌آورد [۳۰،۲۹].

کانتی‌لیورهای پیزوالکتریک این مزیت را دارند که برای اندازه‌گیری‌های دینامیکی، به صورت همزمان، نقش حسگر و فعال شونده را ایفا می‌کنند. از این قابلیت در طراحی فشرده‌ی میکروسکوپ نیرویی دینامیکی خلاء بالا [۳۱] و برای بهبود قابل توجه سرعت میکروسکوپ نیرویی حالت نوک‌زنی[6] [۳۲]، استفاده می‌شود.

چنگال‌های کوارتزی[7] که به صورت تجارتی در دسترس هستند، حسگرهای پیزوالکتریک ارزان با فرکانس و ثابت فنر زیاد هستند. تصاویر با قدرت تفکیک بالا در حالت دینامیکی، با اتصال سوزن‌های فلزی به این چنگال‌های کوارتزی، به دست آمده است [۳۴،۳۳].

ثوابت فنری کانتی‌لیورهای مستطیل شکل

ثابت فنر یک کانتی‌لیور مستطیل شکل (شکل ۲۲) می‌تواند از شکل هندسی آن، محاسبه شود. ثابت فنر k_N برای خمش معمولی با رابطه زیر داده می‌شود:

$$k_N = \frac{Ewt^3}{4l^3} \qquad (۳)$$

[1] interferometer
[2] Counter electrode
[3] microfabrication
[4] self-sensing
[5] piezoresistive
mode [6] Tapping
[7] quartz tuning forks

در اینجا w عرض، l طول، t ضخامت کانتی‌لیور و E مدول یانگ ماده است. عرض و طول را می‌توان به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) اندازه‌گیری نمود. ضخامت t را می‌توان با رابطه زیر از فرکانس رزونانس f کانتی‌لیور تعیین نمود:

$$t = \frac{2\sqrt{12}\pi}{1.875^2}\sqrt{\frac{\rho}{E}}fl^2 \qquad (۴)$$

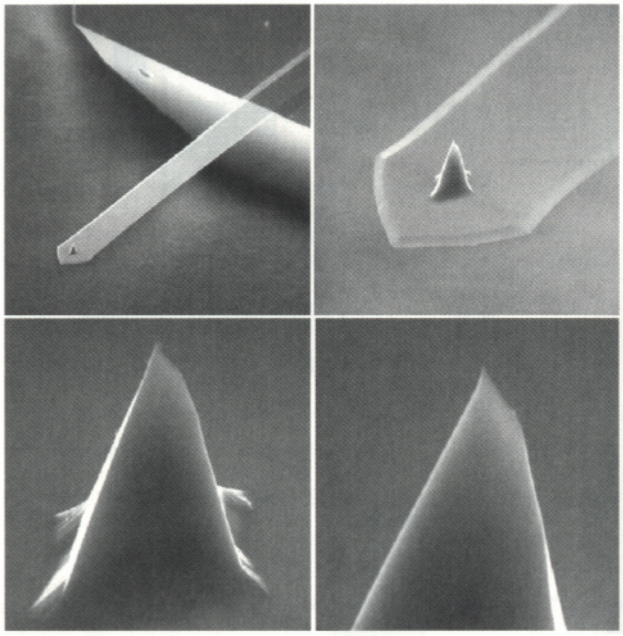
در اینجا ρ چگالی جرمی است. در مورد سیلیکون، $\rho = ۲۳۳۰\ \mathrm{kg/m^3}$ و $E = ۱٫۶۹ \times ۱۰^{۱۱}\ \mathrm{N/m^2}$ و ضخامت از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$t = 7.23 \times 10^{-4}\ \mathrm{s/m} \times \mathrm{f}\,\mathrm{l}^2 \qquad (۵)$$

ثابت فنر پیچشی k_T، که برای آنالیز کمّی اندازه‌گیری‌های نیرویی جانبی مورد نیاز است، از رابطه زیر به دست می‌آید:

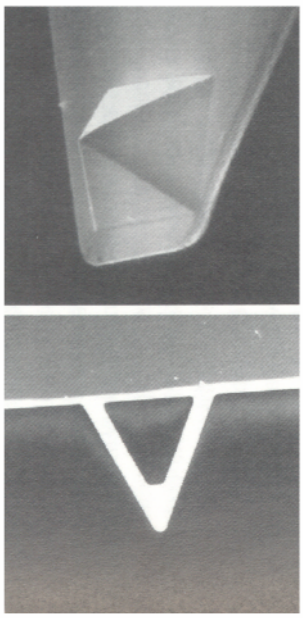
$$k_T = \frac{Gwt^3}{3h^2l} \qquad (۶)$$

در اینجا $G = ۰٫۶۸ \times ۱۰^{۱۱}\ \mathrm{N/m}$، مدول برشی سیلیکون است.



شکل ۲۲: تصاویر SEM یک کانتی‌لیور مستطیلی مجهز به سوزن روبش کننده، ساخته شده توسط شرکت نانوسنسورز (Nanosensors). ارتفاع سوزن روبش کننده ۱۲٫۵ µm است [۳۵].

کانتی‌لیورهای سه‌گوش، به طور گسترده‌ای برای تصویرگیری توپوگرافی استفاده می‌شود زیرا سفتی[1] پیچشی بالای آنها، اثر نیروهای جانبی روی اندازه‌گیری‌ها را کاهش می‌دهد. محاسبه ثوابت فنر برای کانتی‌لیورهای سه‌گوش (شکل ۲۳) در مرجع [۳۶] مطرح شده است.



شکل ۲۳: تصاویر SEM یک کانتی‌لیور نیترید سیلیکون سه‌گوش مجهز به سوزن، تولید شده توسط شرکت Park Scientific. ارتفاع سوزن حدود ۲ µm است [۳۷].

چند شرط ساده را باید در طی ساخت کانتی‌لیور رعایت کرد. فرکانس رزونانس f_R باید بیشتر از ارتعاشات ساختمان محل نصب دستگاه (۱-۱۰۰ Hz)، و امواج صدا (۱-۱۰ kHz) باشد. درصورت نیاز به قدرت تفکیک بالا، ثابت فنر k_N کانتی‌لیور باید قابل مقایسه با ثوابت فنرهای اتمی باشد. یک تخمین ساده از فنرهای اتمی k_{atom}، با فرمول $k_{atom} = mw^2$ تعیین می‌شود، در این رابطه، $m = ۵ \times ۱۰^{-۲۶}$ kg، جرم معمول یک اتم و $w = ۱۰^{۱۳}$ Hz، فرکانس معمول فونون است. بنابراین، یک فنر اتمی، مقداری در حدود ۵ N/m دارد که با توجه به آن، ثابت فنر کانتی‌لیور $k_N \approx ۰/۱$-۱۰۰ N/m، تخمین زده می‌شود. ارتعاشات کانتی‌لیور باید کمتر از ۰/۱ nm باشد. با $k_N\langle \Delta z^2 \rangle = k_BT$، در $T = ۳۰۰$ K، این حد به $k_N \geq ۰/۴$ N/m، مربوط می‌شود. می‌توان نشان داد که فقط کانتی‌لیورهایی با ابعادی در محدوده میکرومتر، می‌توانند این شرایط طراحی را برآورده کنند [۳۸]. معمولا، برای فرکانس‌های رزونانس بالاتر، به کانتی‌لیورهای کوچک‌تری نیاز است.

آماده‌سازی سوزن و کانتی‌لیور

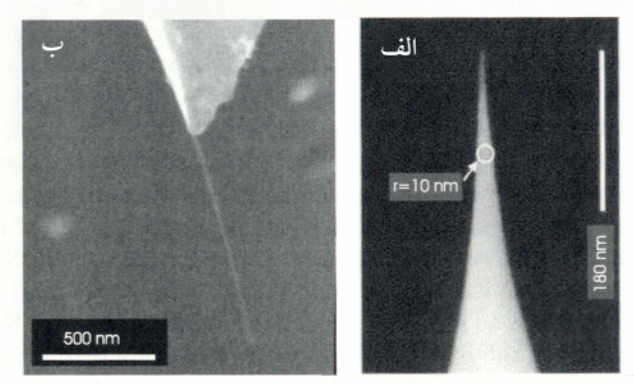
امروزه، اغلب کانتی‌لیورها به صورت یک تکه، همراه با سوزن، توسط فرآیند میکروساخت با استفاده از روش‌های متداول صنایع نیمه‌هادی، ساخته می‌شود. سیلیکون و نیترید سیلیکون، موادی هستند که برای ساخت کانتی‌لیور

[1] stiffness

ترجیح داده می‌شوند. کانتی‌لیورهای سیلیکونی معمولا از مواد تک‌کریستال ساخته می‌شوند. در نوک سوزن، زاویه کاهش یافته و ممکن است به ۱۰ nm برسد. از سیلیکون شدیدا آلاییده[1] برای اجتناب از تجمع بار الکتریکی و امکان کاربرد برای آزمایش‌های تلفیقی میکروسکوپی نیرویی و تونلی، استفاده می‌شود.

کانتی‌لیورهای نیترید سیلیکون به صورت تجارتی، به شکل مثلثی ارائه می‌شوند و اغلب چند کانتی‌لیور با ثابت فنر مختلف، به یک سوزن متصل است. می‌توان به شعاع نوک ۲۰-۵۰ nm نیز دست یافت. پوشش طلا یا آلومینیم بر روی کانتی‌لیورها باعث قابلیت انعکاس زیاد برای دستگاه‌های انحراف پرتو می‌شود.

شعاع نوک سوزن و نسبت اضلاع[2] دو پارامتر مهم برای قدرت تفکیک جانبی روی سطوح خشن و همچنین برای رابطه بین نیروهای دور برد و نزدیک کوتاه برد، هستند. چندین روش بهبود بخش گران‌قیمت، بر پایه تکنیک‌های اچ کردن پیچیده (شکل ۲۴ الف) توسط سازندگان پیشنهاد شده است. احتمال دیگر، نشاندن انتخابی آلودگی‌ها روی سوزن، در یک میکروسکوپ الکترونی روبشی است. اخیرا، استفاده از نانو لوله‌های کربنی، به عنوان سوزن‌هایی که از نظر شیمیایی، خنثی و از نظر مکانیکی، پایدار هستند، نمایش داده شده است. آن نانو لوله‌ها یا زیر میکروسکوپ‌های نوری، با چسب به کانتی‌لیور چسبانده می‌شوند [۳۹]، و یا با استفاده از تکنیک‌های نشاندن بخار شیمیایی (CVD)، مستقیما روی سوزن، رشد داده می‌شوند (شکل ۲۴ ب) [۴۰]. برای کاربردهای بر پایه برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک، یک پوشش فلزی روی سوزن یا حتی یک سوزن فلزی، دارای مزیت است [۴۱]. از پوشش الماس نیز برروی سوزن استفاده شده است [۴۲].



شکل ۲۴: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سوزن‌های سیلیکونی اصلاح شده. الف) سوزن سیلیکونی بسیار تیز (Nanosensors). ب) نانو لوله کربنی رشد داده شده توسط CVD بر روی یک سوزن سیلیکونی.

نیروهای مربوطه

در این بخش، مرور کوتاهی بر نیروهای عمل کننده بین سوزن و نمونه، ارائه می‌شود. محدوده برهم‌کنش انواع مختلف نیرو، برای میکروسکوپی نیرویی، بسیار مهم است زیرا قسمت‌های مختلف سوزن و کانتی‌لیور، مشارکت

[1] highly doped
[2] aspect ratio

متفاوتی در نیروی کل اندازه‌گیری شده، دارند. نیروهای واندروالس[1] بین سوزن مزوسکوپی[2] و سطح عمل می‌کنند، در حالی که نیروی الکترواستاتیک می‌تواند از کل کانتی‌لیور ناشی شود.

نیروهای کوتاه‌برد

نیروهای شیمیایی کوتاه‌برد، از همپوشانی توابع موج الکترونی و از دافعه هسته‌های یونی، ناشی می‌شوند. بنابراین، محدوده این نیروها قابل مقایسه با محدوده توابع موج الکترونی، یعنی کمتر از یک نانومتر است. وقتی که همپوشانی امواج الکترونی، انرژی کل را کاهش دهد، نیروها جذبی هستند. این وضعیت، قابل مقایسه با اتصالات شیمیایی است. از سوی دیگر، اصل طرد پائولی[3] می‌تواند باعث نیروهای دافعه ناشی از همپوشانی قوی امواج الکترونی شود. این نیروها، مستقیما به چگالی الکترونی کل مربوط می‌شوند. دافعه یونی در فاصله‌های کوتاه، جائیکه هسته‌های یونی با کنار رفتن الکترون‌ها نمایان می‌شوند، عمل می‌کند. پتانسیل‌هایی مانند پتانسیل لنارد- جونز[4] یا پتانسیل مورس[5] برای توصیف نیروهای کوتاه‌برد، پیشنهاد شده‌اند. اما، کاربرد آنها اساسا به برهم‌کنش‌های بین دو اتم[6] محدود می‌شود. برای برهم‌کنش سوزن- نمونه، باید حداقل برهم‌کنش با نزدیک‌ترین اتم‌های همسایه را شامل نمود و علاوه بر این، جابجایی اتم‌ها در اثر نیروی کوتاه‌برد را باید به حساب آورد.

نیروهای کوتاه‌برد جذبی، در محدوده ۱- ۰٫۵ nN برای هر اتم برهم‌کنش کننده در فواصل سوزن- نمونه‌ی مشابه با کارکرد STM هستند. انتظار می‌رود که طول افت این نیروها در محدوده واحدهای اتمی، یعنی ۰٫۰۵ nm برای اتصال فلزی و برای اتصال کووالانت حدود ۰٫۲ nm باشد

در فاصله ۰٫۵ nm از سطح، نیروهای کوتاه‌برد بین نوک سوزن و اتم‌های سطح، با نیروهای دوربرد بین سوزن و نمونه، قابل مقایسه هستند. در نتیجه، این فاصله مشخصه‌ای است که در آن، قدرت تفکیک اتمی در حالت‌های غیرتماسی به دست می‌آید

آزمایش‌های دمای پایین، حتی امکان مطالعات موضعی خاص[7] نیروهای کوتاه‌برد را فراهم می‌آورد که منشاء نیرو را در پیوندهای آویزان[8] سطح، تایید می‌کند [۴۳]. در این مورد، طول افتی نزدیک به پیش‌بینی‌های تئوری به دست آمد. به هنگام مقایسه منحنی‌های تجربی نیرو- فاصله با پتانسیل‌های بین اتمی، باید جابجایی سوزن و اتم‌های سطح که باعث آشفتگی محور فاصله می‌شود را در نظر گرفت.

تغییرات نیروهای کوتاه‌برد در مقیاس اتمی، امکان دست‌یابی به قدرت تفکیک اتمی را در میکروسکوپی نیروی اتمی به وجود می‌آورد.

[1] Van der Waals
[2] mesoscopic
[3] Pauli exclusion principle
[4] Lennard-Jones
[5] Morse
[6] pairwise
[7] site-specific
[8] Dangling bonds