

بخش ۱: مقدمه‌ای بر میکروسکوپ پروبی روبشی (SPM)

نویسنده: فرزاد حسینی نسب

مقدمه

از اوایل دهه ۱۹۹۰ میکروسکوپ‌های پروبی روبشی (Scanning Probe Microscope (SPM)) برای دستیابی به قدرت تفکیک‌های مناسب‌تر در حد آنگستروم ابداع شدند. در مقایسه با میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی، میکروسکوپ‌های پروبی روبشی جدید برای مشخصه‌یابی مواد نانوساختار هستند. این میکروسکوپ‌ها علاوه بر تصویردهی از سطح مواد، قابلیت بررسی خواص سطحی مواد نظیر خواص الکتریکی، مغناطیسی، نوع پیوندهای شیمیایی و غیره را نیز دارند. دستگاه‌های این خانواده با استفاده از یک سوزن بسیار تیز سطح را روبش کرده و بسته به نوع دستگاه، خواص سطحی مورد نظر را تصویر می‌کنند. مانند خانواده میکروسکوپ‌های الکترونی که شامل دو زیرمجموعه عبوری و روبشی بودند، خانواده میکروسکوپ‌های پروبی روبشی نیز از زیرمجموعه‌هایی تشکیل شده‌اند که به بررسی خواص سطحی مواد از مقیاس اتمی تا میکرونی می‌پردازند.

به دلیل امکان دیدن اتم‌ها، میکروسکوپ پروبی روبشی به عنوان قدرتمندترین ابزار موجود برای بررسی ساختار سطحی مورد توجه است. ساخت این میکروسکوپ با اختراع میکروسکوپ تونلی روبشی (Scanning Tunneling Microscope (STM)) در سال ۱۹۸۲ آغاز شد. میکروسکوپ تونلی روبشی از جریان تونلی که پدیده‌ای از مکانیک کوانتوم است، برای بررسی سطوح مواد رسانا استفاده می‌کند. جریان تونلی از طریق فاصله اتمی بین نوک فلزی تیز و اتم‌های سطحی، جریان پیدا می‌کند. در اواخر دهه ۱۹۸۰ عضو دیگر میکروسکوپ پروبی روبشی به نام میکروسکوپ نیروی روبشی (Scanning Force Microscope (SFM)) اختراع شد. نام رایج‌تر میکروسکوپ نیروی روبشی، میکروسکوپ نیروی اتمی (Atomic Force Microscope (AFM)) است. میکروسکوپ نیروی اتمی از نیروهای میدان نزدیک بین اتم‌های نوک پروب و سطح برای تولید نشانه‌های ساختار سطح استفاده می‌کند. از آنجایی که میکروسکوپ نیروی اتمی محدود به سطوح هادی الکتریکی نیست، گسترده‌تر از میکروسکوپ تونلی روبشی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱- تجهیزات میکروسکوپ پروبی روبشی

مشخصه‌ی اصلی میکروسکوپ پروبی روبشی، نوک تیز پروب است که سطح نمونه را روبش می‌کند. نوک باید در مجاورت بسیار نزدیک به سطح باقی بماند، زیرا میکروسکوپ پروبی روبشی از برهمکنش‌های میدان نزدیک بین نوک و سطح نمونه استفاده می‌کند. این مشخصه میدان نزدیک، محدودیت قدرت تفکیک میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی را حذف می‌کند، زیرا قدرت تفکیک آنها

توسط برهمکنش‌های میدان دور بین موج‌های نوری یا الکترونی و نمونه محدود می‌شود (پراش موج‌های نوری یا الکترونی مربوط به برهمکنش‌های میدان دور، قدرت تفکیک میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی را تا مقیاس‌های طول موج محدود می‌کند). برهمکنش‌های میدان نزدیک در میکروسکوپ پروبی روبشی امکان به دست آوردن تصویر حقیقی از اتم‌های سطحی را فراهم می‌کند، زیرا میکروسکوپ پروبی روبشی، شکل اتم‌های سطحی را در جهت‌های عمودی و جانبی به دقت اندازه‌گیری می‌کند. قدرت تفکیک جانبی و عمودی و به خصوص قدرت تفکیک جانبی، می‌تواند بهتر از $0/1$ نانومتر باشد. محدوده جانبی و عمودی اندازه‌گیری در میکروسکوپ پروبی روبشی به ترتیب تا 100 و 10 میکرومتر هستند.

میکروسکوپ پروبی روبشی باید در محیطی عاری از لرزش کار کند، زیرا فاصله پروب تا سطح تنها در حد فاصله اتمی است. جدول ۱ مقایسه مختصری بین میکروسکوپ پروبی روبشی و میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی را فراهم کرده است.

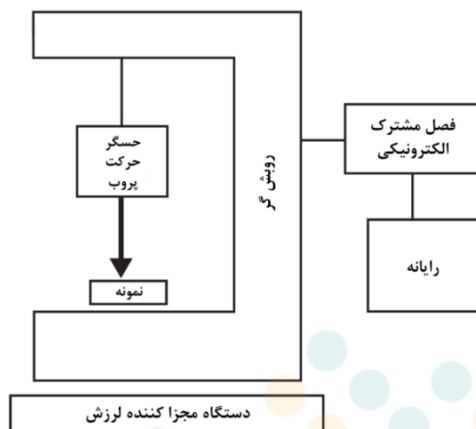
دستگاه میکروسکوپ پروبی روبشی از چند جزء اساسی تشکیل شده است. پروب و حسگر متحرک آن، روبش‌گر، کنترل‌کننده الکتریکی، رایانه و سیستم مجزاکننده لرزش که به صورت طرح‌وار در شکل ۱ نشان داده شده است. این اجزاء به اختصار در قسمت‌های بعدی معرفی می‌شوند.

جدول ۱: مقایسه روش‌های میکروسکوپی سطحی

پروبی روبشی	الکترونی روبشی	نوری	
محیط، مایع، خلاء	خلاء	محیط، مایع، خلاء	محیط عملیات
متوسط کوچک	بزرگ کوچک	کوچک متوسط	عمق میدان عمق تمرکز
$3-0/1$ نانومتر	$10-1$ نانومتر	1 میکرومتر	قدرت تفکیک عرضی
$0/01$ نانومتر	---	---	قدرت تفکیک عمودی
$10^8-10^2 \times 5$ برابر	10^6-10 برابر	$10^2 \times 1-1$ برابر	محدوده بزرگ-نمایی
---	آب‌زدایی، اغلب پوشش هادی	صیقل، حکاکی	آماده سازی نمونه
عدم تغییرات	عدم بار سطحی	عدم شفافیت کامل	ملزومات نمونه

زیاد ارتفاع

روی سطح



شکل ۱: اجزاء اصلی میکروسکوپ پروبی روبشی

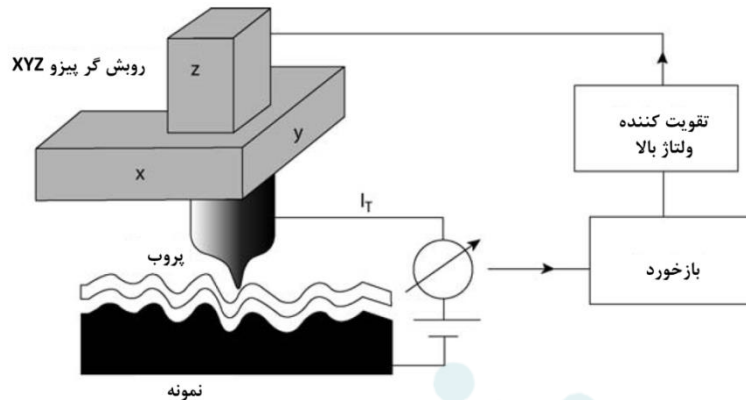
۱-۱- پروب و روبش گر

پروب اساسی ترین جزء میکروسکوپ پروبی روبشی است که به طور مستقیم در واکنش متقابل با سطح نمونه است. پروب می تواند بر روی سطح ثابت روبش کند و یا اینکه ثابت باشد، در حالیکه سطح نمونه توسط روبش گر که زیر آن است، حرکت کند.

میکروسکوپ تونلی روبشی (STM) و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) در جنس ماده پروب و چگونگی کار حسگر متفاوت هستند. در میکروسکوپ تونلی روبشی، پروب بیشتر از سیم تنگستنی ساخته می شود. سیم تنگستنی جریان تونلی جاری بین اتم های سطح و اتم های نوک را هدایت می کند. در میکروسکوپ نیروی اتمی، نوک پروب بیشتر از اکسید سیلیسیم یا نیتريد سیلیسیم ساخته می شود و بر روی فنر تیرک نصب می شود. در میکروسکوپ تونلی روبشی، جریان تونلی برای دریافت فاصله بین پروب و سطح نمونه استفاده می شود. در میکروسکوپ نیروی اتمی، نیروهای میدان نزدیک بین نوک و نمونه برای دریافت فاصله استفاده می شوند. پروبی که بر روی نمونه در سه جهت و با دقت حرکت می کند، توسط روبش گر کنترل می شود. اگر قدرت تفکیک در حد اتمی مورد نیاز باشد، لازم است تا پروب روبش کننده با دقت ۱ پیکومتر (10^{-12} متر) موضع گیری کند. برای رسیدن به این سطح از دقت، روبش گر از مواد پیزوالکتریک ساخته می شود. مواد پیزوالکتریک در میدان الکتریکی تغییر شکل داده و یا اینکه به دلیل تغییر شکل، تولید میدان الکتریکی می کنند. طول نسبی تغییر شکل متناسب با ولتاژ اعمالی (E) است.

۲-۱- کنترل و ایزوله کردن لرزش

بر خلاف میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی که می‌توانند بدون رایانه کار کنند، میکروسکوپ پروبی روبشی دستگاهی وابسته به رایانه است.



شکل ۲: میکروسکوپ تونلی روبشی. روبش گر نوک را به روی سطح نمونه حرکت می‌دهد و حلقه بازخورد جریان تونلی را ثابت نگه می‌دارد.

رایانه اطلاعات جمع‌آوری شده را پردازش می‌کند. این دستگاه همچنین می‌تواند نقص در اطلاعات هنگام بی‌ثباتی تجهیزات و نیز قسمت‌های ساختگی که می‌تواند به دلیل اثرات پیزوالکتریک در اطلاعات سطحی ظاهر شود را تصحیح کند. رایانه تصویرهای سطحی میکروسکوپ پروبی روبشی را با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده توسط نرم افزار قوی پردازش و تولید می‌کند. برای رسیدن به قدرت تفکیک بالا، میکروسکوپ پروبی روبشی باید از هرگونه لرزش در اطراف خود جدا شود زیرا کارایی آن به تنظیم دقیق فاصله بین پروب مکانیکی و سطح نمونه وابسته است. تداخل‌های رایج، لرزش‌های کف اتاق و لرزش صوتی هستند. حذف لرزش کف با نصب میکروسکوپ پروبی روبشی بر روی فنر پایه لاستیکی به دست می‌آید. حذف لرزش صوتی نیز با عملیات دستگاه در جعبه جامد حاصل می‌شود.

منابع

1. Meyer, E., Hug, H.J. and Bennewitz, R. (2004) *Scanning Probe Microscopy: the Lab on a Tip*, Springer-Verlag, Berlin.
2. Birdi, K.S. (2003) *Scanning Probe Microscopes*, CRC Press, Boca Raton.
3. Wiesendanger, R. (ed.) (1998) *Scanning Probe Microscopy*, Springer, Berlin.
4. Wiesendanger, R. (1994) *Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
5. Braga, P.C. and Ricci, D. (eds) (2004) *Atomic Force Microscopy*, Humana Press.

6. Morita, S., Wiesendanger, R. and Meyer, E. (eds) (2002) *Noncontact Atomic Force Microscopy*, Springer-VerlagGmbH, Berlin.
7. Ratner, B.D. and Tsukruk, V.V. (eds) (1998) *Scanning Probe Microscopy of Polymers*, American Chemical Society, Washington DC.

