میکرو سکوپ تونل زنی روبشی - (Scanning Tunneling Microscope STM)

میکروسکوپ تونل زنی روبشی (STM) یکی از انقلابی‌ترین اختراعات در تاریخ علوم تجربی است که در سال ۱۹۸۱ توسط **گِرد بینیگ (Gerd Binnig)** و **هاینریش رورر (Heinrich Rohrer)** در آزمایشگاه IBM زوریخ ساخته شد. این دو دانشمند به دلیل این اختراع، جایزه نوبل فیزیک سال ۱۹۸۶ را دریافت کردند.

STMاولین ابزاری بود که به دانشمندان اجازه داد **اتم‌ها را به صورت مستقیم و زنده** ببینند و حتی آنها را جابجا کنند.

۱. هدف و کاربرد(Purpose and Applications)

STMبر اساس پدیده **کوانتومی تونل زنی (Quantum Tunneling)** کار می‌کند. هنگامی که یک نوک فلزی بسیار تیز (به ضخامت یک اتم) در فاصله بسیار نزدیک (چند آنگستروم) از سطح یک نمونه رسانا قرار می‌گیرد، الکترون‌ها می‌توانند از شکاف خلا عبور کرده و جریانی به نام **جریان تونل زنی (Tunneling Current)** ایجاد کنند. این جریان به شدت به فاصله نوک تا سطح حساس است (با افزایش هر آنگستروم فاصله، جریان حدود ۱۰ برابر تغییر می‌کند).

کاربردهای اصلی در آزمایشگاه:

زمینه	کاربرد
علوم سطح	مطالعه بازآرایی اتمی سطح مواد) مثل سطح سیلیکون ۷×۷ که اولین بار با STM دیده شد (
نانوتکنولوژی	جابجایی اتم‌ها و ساخت ساختارهای نانومتری) مانند «دور کوانتومی IBM «با ۳۵ اتم زنون (
علوم مواد	بررسی نقص‌های بلوری، مرز دانه‌ها، و ناخالصی‌ها در سطح
فیزیک حالت جامد	مطالعه چگالی حالت‌های الکترونی (density of states) در نانوساختارها
نیمه‌رساناها	بررسی نانوسیم‌ها و نقاط کوانتومی با دقت اتمی

مقایسه با AFM: STM فقط برای نمونه‌های **رسانا یا نیمه‌رسانا** قابل استفاده است، در حالی که AFM می‌تواند نمونه‌های نارسانا (مانند شیشه، پلیمر، سلول‌های زیستی) را نیز تصویربرداری کند. اما قدرت تفکیک STM در بهترین حالت از AFM نیز بهتر است.

۲. اصول عملکرد و اجزای اصلی(Working Principle & Components)

STMاز شش جزء اصلی تشکیل شده است:

اجزای اصلی دستگاه

جدول اجزای اصلی و عملکرد آنها

جزء	توضیح و عملکرد
نوک(Tip)	معمولاً از **تنگستن (Tungsten)** یا **پلاتین-ایریدیم (Pt/Ir)** ساخته می‌شود. نوک باید به قدری تیز باشد که در راس آن تنها یک اتم قرار داشته باشد . برای ساخت نوک تنگستن از روش **خوردگی الکتروشیمیایی (Electrochemical Etching)** در محلول KOH یا NaOHاستفاده می‌شود.
اسکنر پیزوالکتریک (Piezoelectric Scanner)	از مواد سرامیکی مانند PZT ساخته شده است که با اعمال ولتاژ، تغییر ابعاد می‌دهد (پدیده پیزوالکتریک). این ماده می‌تواند با دقت کمتر از **۱ آنگستروم)** کمتر از قطر یک اتم) منقبض یا منبسط شود.
پیش‌تقویت‌کننده(Pre-amplifier)	جریان تونل زنی بسیار ضعیف (معمولاً حدود **۱ نانوآمپر**)را تقویت می‌کند تا قابل پردازش توسط مدار بازخورد باشد.
مدار بازخورد (Feedback Electronics)	وظیفه حفظ جریان تونل زنی ثابت در حین ا سکن را بر عهده دارد. اگر جریان کم شود (نوک دور شده)، ولتاژ Z را افزایش می‌دهد تا نوک به سطح نزدیکتر شود.
سیستم جداسازی ارتعاشات (Vibration Isolation)	STMبه شدت به لرزش حساس است. برای تصویربرداری اتمی، دستگاه روی سیستم‌های ضد لرزش (فنر، پایه‌های فلزی، محفظه خلا) نصب می‌شود.
کامپیوتر و کنترلر	شامل مبدل‌های دیجیتال به آنالوگ (D/A) و آنالوگ به دیجیتال (A/D) برای کنترل اسکنر، دریافت داده و پردازش تصویر است.

۳. حالت‌های عملکرد(Operation Modes)

STMدر دو حالت اصلی کار می‌کند:

الف) حالت جریان ثابت(Constant Current Mode)

پرکاربردترین و رایج‌ترین حالت. در این روش، مدار بازخورد فعال است و فاصله نوک تا سطح را طوری تنظیم می‌کند که جریان تونل زنی **ثابت** بماند.

پارامتر	توضیح
مکانیزم	نوک در حین اسکن بالا و پایین می‌رود تا جریان ثابت بماند
داده ثبت شده	ولتاژ اعمال شده به) Z-piezo معادل ارتفاع توپوگرافی سطح(
نوع تصویر	) **Height Image**تصویر ارتفاع) – توپوگرافی واقعی سطح
مزایا	مناسب برای سطوح ناهموار، دقت بالا در زوایای تند
معایب	سرعت اسکن محدود (به دلیل زمان پاسخ بازخورد)

ب) حالت ارتفاع ثابت(Constant Height Mode)

در این روش، مدار بازخورد غیرفعال است و نوک در یک ارتفاع ثابت اسکن می‌کند.

پارامتر	توضیح
مکانیزم	نوک بدون حرکت عمودی اسکن می‌کند، تغییرات جریان تونل زنی ثبت می‌شود
داده ثبت شده	جریان تونل زنی(I)
نوع تصویر	**Current Image** (تصویر جریان) – تغییرات جریان مربوط به توپوگرافی
مزایا	سرعت اسکن بسیار بالا (مناسب برای دینامیک‌های سریع)
معایب	فقط برای سطوح بسیار صاف (اتمی-صاف) قابل استفاده است

۴. روش کار گام به گام(Step-by-Step Procedure)

این روش بر اساسSOP های استاندارد آزمایشگاهی تهیه شده است.

مرحله ۰: نکات ایمنی – بسیار حیاتی

خطر	نکته ایمنی
نوک بسیار تیز	هنگام نصب نوک از موچین استفاده کنید، هرگز با انگشت به نوک دست نزنید
بر خورد نوک به ســـطح (Crash)	یکی از رایج‌ترین و پرهزینه‌ترین ا شتباهات. همی شه هنگام نزدیک کردن نوک به سطح با دقت و آرامی عمل کنید
ولتاژ بالا	ا سکنر پیزوالکتریک با ولتاژهای بالا (تا ۱۰۰۰ ولت) کار می‌کند. هرگز داخل محفظه را بدون قطع برق لمس نکنید
ارتعاشات	هنگام کار با STM از هرگونه حرکت ناگهانی در اتاق (راه رفتن، صـــحبت بلند، بســـتن در) خودداری کنید

مرحله ۱: آماده‌سازی نمونه و نوک

آماده‌سازی نمونه:

۱. **نمونه باید رسانا باشد** – اگر نمونه شما نارسانا است، نمی‌توانید از STM استفاده کنید
۲. سطح نمونه باید **بسیار صاف)** در مقیاس اتمی) باشد
۳. نمونه را با چسب رسانا) مانند چسب نقره Dynaloy 325) روی پوک (Puck) فلزی بچسبانید
۴. اطمینان حاصل کنید که نمونه به طور الکتریکی به پوک متصل است (برای عبور جریان تونل زنی)

نکته :برای نمونه‌های فیلم نازک روی زیرلایه عایق، از چسب ر سانا در لبه نمونه ا ستفاده کنید تا مسیر هدایت الکتریکی به سطح ایجاد شود.

انتخاب و نصب نوک:

نوع نوک	مزایا	معایب
تنگستن(Tungsten)	تیزتر، قیمت کمتر، شکل یکنواخت‌تر	اکسید می‌شود (نیاز به تمیزکاری)
پلاتین-ایریدیم(Pt/Ir)	مقاوم به اکسیداسیون، تصویر اتمی بهتر	قیمت بالاتر

نحوه نصب نوک:

۱. نوک را با موچین از قسمت نزدیک به نوک بگیرید
۲. قسمت پهن (blunt end) نوک را داخل هولدر قرار دهید تا حدود **۱ میلی‌متر** از هولدر بیرون بزند
۳. اطمینان حاصل کنید که نوک محکم در جای خود ثابت شده است

مرحله ۲: قرار دادن نمونه و نزدیک کردن نوک

۱. نمونه را با پوک مغناطیسی روی اسکنر نصب کنید
۲. هولدر حاوی نوک را روی اسکنر قرار دهید
۳. **قبل از روشن کردن الکترونیک**، به طور چشمی بررسی کنید که نوک به نمونه برخورد نکند
۴. با استفاده از پیچ‌های تراز (سه پایه)، نوک را تا حد ممکن به نمونه نزدیک کنید بدون اینکه تماس برقرار شود
۵. از یک ذره‌بین یا میکروسکوپ نوری برای مشاهده فاصله کمک بگیرید

مرحله ۳: راه‌اندازی الکترونیک و نرم‌افزار

۱. الکترونیک STM و کامپیوتر را روشن کنید
۲. نرم‌افزار کنترل STM را اجرا کنید
۳. پارامترهای اولیه را تنظیم کنید:

پارامتر	مقدار پیشنهادی اولیه	توضیح
Bias Voltage	۵۰-۱۰ میلی‌ولت	ولتاژ بین نوک و نمونه
Tunneling Current (Setpoint)	۱ نانوآمپر	مقدار جریان هدف
Scan Size	۲۰۰-۵۰ آنگستروم	محدوده اسکن اولیه

مرحله ۴: نزدیک کردن – (Approach) حساس‌ترین مرحله

مرحله Approach: نوک به تدریج به سطح نزدیک می‌شود تا جریان تونل زنی تشخیص داده شود.

۱. فرمان **Engage** را در نرم‌افزار اجرا کنید
۲. نرم‌افزار به تدریج نوک را به سمت نمونه پایین می‌آورد
۳. **در این مدت، نمایشگر جریان تونل زنی را با دقت مشاهده کنید**
۴. اگر نوک به حداکثر مسافت مجاز رسید (مثلاً ۲۵۰ نانومتر) و جریانی مشاهده نشد، پیام **"Tip failed to engage"** ظاهر می‌شود

- در این حالت، فرمان **Withdraw** را سه بار اجرا کنید
- نوک را کمی پایین‌تر بیاورید (با پیچ‌های تراز) و دوباره Engage کنید

مرحله ۵: تنظیم بهینه تصویر وGains

پس از موفقیت درEngage ، به تدریج تصویر اتمی روی مانیتور ظاهر می‌شود.

تنظیمات Gains برای تصویر اتمی:

پارامتر	مقدار اولیه	محدوده تنظیم	توضیح
Integral Gain	۶.۹۷	۵-۱۰	بزرگتر = پاسخ سریعتر به تغییرات سطح
Proportional Gain	۱۱.۲۳	۸-۱۵	بزرگتر = کاهش خطای ماندگار

نکته :ممکن است چند دقیقه طول بکشد تا تصویر تثبیت شود. صبور باشید.

اگر تصویر نویزی یا ناپایدار است:

- **Integral/Proportional Gains**را کاهش دهید (اگر لرزش و نویز زیاد است)
- **Setpoint (جریان هدف)**را کاهش دهید (نیروی کمتری به نمونه وارد می‌شود)
- **Bias Voltage**را تنظیم کنید (معمولاً ۱۰۰-۱۰ میلی‌ولت)

مرحله ۶: اسکن و ذخیره تصویر

۱. **Scan Size**را به مقدار دلخواه تنظیم کنید (برای تصویر اتمی، ۲۰۰-۵۰ آنگستروم)
۲. **Scan Rate**را تنظیم کنید (۰،۵ تا ۱ هرتز برای شروع)
۳. **X Offset**و **Y Offset** را برای جابجایی به ناحیه دیگر از نمونه استفاده کنید (در صورت نیاز)
۴. فایل را با نام مناسب ذخیره کنید (شامل تاریخ، کاربر، نمونه)

مرحله ۷: خاموش کردن و جمع‌آوری(Shutdown)

۱. فرمان **Withdraw** را اجرا کنید تا نوک از سطح دور شود
۲. نرم‌افزار را ببندید
۳. الکترونیک و کامپیوتر را خاموش کنید
۴. نوک را با موچین خارج کنید و در جای مناسب نگهداری کنید
۵. نمونه را خارج کنید

۶. عیب‌یابی مشکلات رایج (Troubleshooting)

مشکل	علت احتمالی	راه‌حل
Engage انجام نمی‌شود (Tip failed to engage)	نوک خیلی دور از سطح است	فرمان Withdraw را سه بار بزنید، نوک را پایین‌تر بیاورید و دوباره Engage کنید
تصویر نویزی / ناپایدار	لرزش محیطی، Gains خیلی زیاد	Gainsرا کاهش دهید. سیستم ضد لرزش را بررسی کنید
تصویر بسیار تاریک یا خیلی روشن	Setpointیا Bias Voltageنامناسب	Setpointرا کاهش یا افزایش دهید Bias .را تنظیم کنید
قله دوتایی در / FFT الگوی تکراری	نوک دو قلو (Double Tip)است	نوک را تعویض کنید
در حین اسکن نویز ناگهانی ظاهر می‌شود	ذره‌ای روی نمونه یا نوک	نوک را خارج کرده، نمونه را تمیز کنید
تفاوت زیاد بین Trace و Retrace	Setpointخیلی بالا (نیروی کم)	Setpointرا افزایش دهید
تصویر خطوط افقی دارد	Scan Rateخیلی بالا یا نویز الکتریکی	Scan Rateرا کاهش دهید

آزمایشگاه‌های STM پیشرفته(UHV)

برای تصویربرداری اتمی با کیفیت بسیار بالا، از STM در **محفظه‌های خلأ فوق‌بالا - (Ultra-High Vacuum UHV)** استفاده می‌شود. این دستگاه‌ها از آلودگی سطح توسط مولکول‌های هوا جلوگیری می‌کنند.

پارامترهای بهینه برای تصویربرداری نانوسیم‌ها (مطالعه ۲۰۲۵):

پارامتر	مقدار بهینه یافت شده
Bias Voltage	۷-۱۰ ولت
Tunneling Current	تا ۴۰۰ پیکوآمپر
Scan Rate	۵۰۰-۱۵۰۰ نانومتر بر ثانیه
بهترین زیرلایه	نیکل (نیکل-پوشش)

۶. نکات کلیدی برای موفقیت(Key Principles)

قانون	توضیح
✅**سطح رسانا و صاف**	STMفقط روی نمونه‌های رسانا یا نیمه‌رسانا کار می‌کند. سطح باید در مقیاس اتمی صاف باشد
✅**نوک تیز و تمیز**	نوک شایع‌ترین منبع آرتیفکت است. پیش از هر اسکن، کیفیت نوک را بررسی کنید
✅**شروع با Gains پایین**	با Gains پایین شروع کنید و به تدریج افزایش دهید تا تصویر بهینه شود
✅**صبوری درEngage**	فرآیند نزدیک کردن نوک زمان‌بر است. عجله نکنید
✅**کاهش لرزش**	از میز ضد لرزش استفاده کنید. در حین اسکن حرکت نکنید

✨جمع‌بندی نهایی

میکرو سکوپ تونل زنی روب شی (STM) اولین ابزاری بود که دید م ستقیم اتم‌ها را برای ان سان ممکن کرد . با رعایت ا صول زیر می‌توانید تصاویر اتمی با کیفیتی ثبت کنید:

۱. 🎯**انتخاب صحیح نمونه** STM – فقط برای نمونه‌های رسانا و نیمه‌رسانا مناسب است
۲. 🔧**آماده‌سازی دقیق نوک** – نوک باید تک اتمی باشد. از نوک تنگستن خوردگی شده یا Pt/Ir استفاده کنید
۳. 📊**تنظیمات بهینه** – با Gains پایین شروع کنید Bias .معمولاً ۵۰-۱۰ میلی‌ولت، Setpointحدود ۱ نانوآمپر
۴. 🧲**سیستم ضد لرزش** – برای تصویر اتمی، جداسازی ارتعاشات ضروری است