میکروسکوپ روبشی تونلی(STM)

مقدمه:

میکروسکوپ روبشی تونلی(STM)[1] دستگاهی است که برای بررسی ساختار و برخی از خواص سطوح مواد رسانا، بیولوژیک که تا حدی رسانا هستند و همچنین لایه‌های نازک نارسانا که روی زیرلایه رسانا لایه-نشانی شده‌اند، در حد ابعاد زیر نانومتر، بکار می‌رود.

مبنای اندازه‌گیری هندسه و خواص سطحی در این دستگاه بر این واقعیت استوار است که هرگاه فاصلهٔ یک سوزن تیز رسانا از یک سطح رسانا حدود چند آنگستروم[2] باشد (متصل نشوند) و اختلاف ولتاژی به بزرگی حدود چند ده میلی ولت به آن اعمال شود جریان الکتریکی حدود چند نانوآمپر بین سوزن و سطح برقرار می‌شود. به این پدیده در اصطلاح «جریان تونل زنی»[3] گفته می‌شود. این پدیده تنها در سایهٔ مکانیک کوانتمی روی می‌دهد چرا که الکترونها در انتقال از سوزن به سطح و برعکس از ناحیه‌ای می‌گذرند که انرژی پتانسیل الکترون از انرژی کل آن بزرگتر است (ناحیهٔ بین سوزن و سطح). مقدار جریان الکتریکی تابعی از فاصلهٔ سوزن از سطح، شکل و جنس سوزن، هندسه و جنس سطح، و اختلاف ولتاژ سوزن وسطح می‌باشد. در دستگاه STM این سوزن تیز رسانا به بازوهای پیزوالکتریکی متصل است که بوسیلهٔ آنها سوزن به هر نقطهٔ دلخواه از سطح با فاصلهٔ دلخواه از آن نقطه منتقل می‌شود و امکان بررسی خواص آن نقطه از سطح فراهم می‌شود. در تعیین خواص نقاط مختلف سطح از STM به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم استفاده می‌شود. در واقع در تعیین خواصی که مستقیماً از روی تغییرات جریان تونلی بر حسب فاصلهٔ سوزن از سطح و اختلاف ولتاژ اعمال شده استنتاج می‌شوند از STM بصورت مستقیم استفاده شده است. خواصی از سطح که بطور مستقیم توسط STM تعیین می‌شوند عبارتند از توپوگرافی هندسی سطح، تابع کار نقاط مختلف سطح، چگالی حالات انرژی نقاط

---

[1] -Scanning Tunneling Microscopy

[2] -یک آنگستروم برابر ۰,۱ نانومتر اس

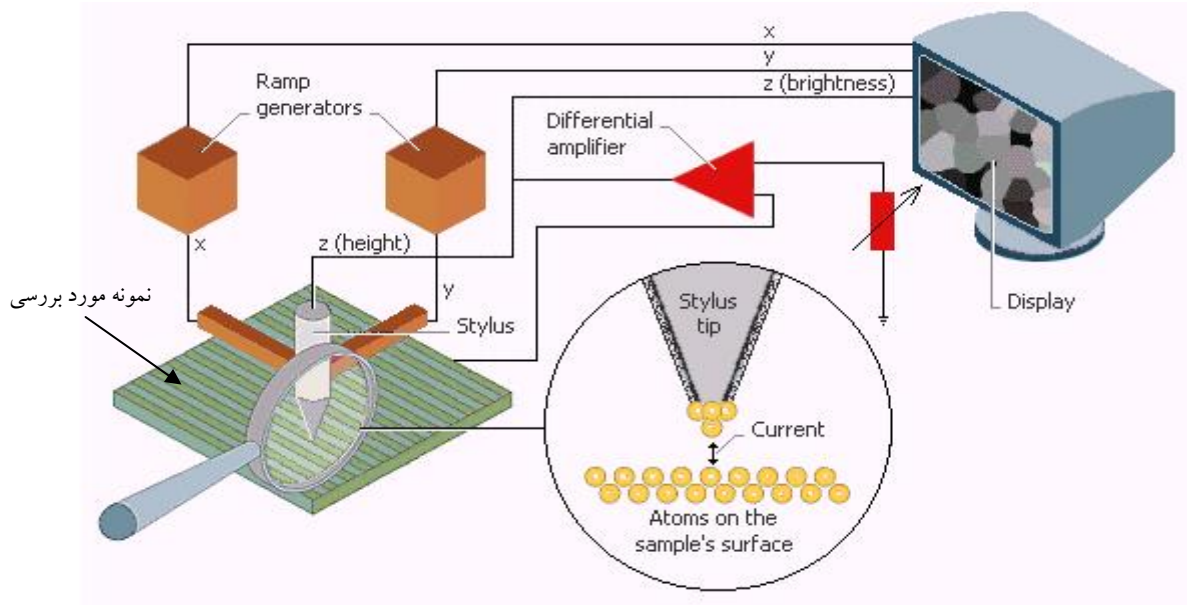
[3] - Tunneling Current

مختلف سطح، ترازهای ارتعاشی نقاط مختلف سطح، حوزه‌های مغناطیسی سطوح و مغناطش آنها.

در دستهٔ دیگری از روش‌های تعیین خواص سطحی، از جریان تونلی برای تحریک الکترونهای یک نقطه از سطح استفاده می‌شود. در این حالت بطور موقت برخی از خصوصیات آن نقطه از سطح تغییر می‌کند که باعث می‌شود این سطوح توسط روش های دیگر اسپکتروسکوپی (مانند اسپکتروسکوپی رامان، لومینسانس) قابل شناسایی شوند. بعنوان مثال آشکار سازی انرژی فوتون‌های لومینسانس (فوتونهایی که در بازگشت الکترونهای تحریک شده بر اثر جریان تونلی به ترازهای پایینتر تولید می شوند) بعنوان اثر انگشت ترازهای انرژی آن نقطه از سطح محسوب می‌شود. همچنین جریان موضعی تونلی باعث افزایش یک میلیون برابری سطح مقطع رامان می‌شود که با اسپکتروسکوپی رامان آشکارسازی خصوصیات آن نقطه از سطح ممکن می‌شود. در بخش‌های بعدی کاربردهای مختلف مستقیم و غیرمستقیم STM در مطالعه و تعیین خواص سطوح با تفصیل بیشتری بیان خواهد شد.

نگاهی اجمالی به اصول کلی عملکرد STM

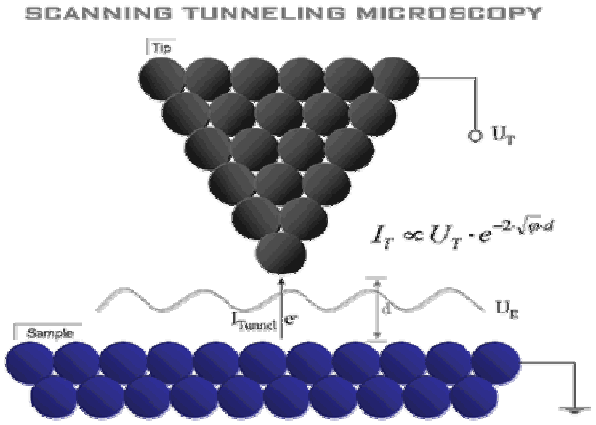
شکل روبرور بطور نمادین اجزای اصلی دستگاه STM را نشان می‌دهد.



شکل۱)نمایش نمادین اجزای اصلی و اصول عملکرد دستگاه STM

اصول کلی کار STM بدین صورت است که یک سوزن[1] بسیار ظریف و نوک تیز رسانا به یک بازوی پیزوالکتریک متصل شده است. به منظور تنظیم مکان سوزن نسبت به سطح نمونه مورد بررسی با اعمال اختلاف ولتاژهای مناسب به پیزوالکتریک[2] (ها) در راستاهای $\hat{x},\hat{y},\hat{z}$ سوزن را به هر نقطهٔ دلخواه از فضای سه بعدی، با دقت آنگستروم، می‌توان منتقل کرد. برای تهیهٔ نقشه خصوصیات یک ناحیه از سطح سوزن به بالای تک تک نقاط سطح منتقل می‌شود (به این‌کار در اصطلاح «روبش سطحی»[3] گفته می‌شود). در این‌حالت در یک ارتفاع معین اختلاف ولتاژ خاصی بین سطح نمونه و سوزن رسانا اعمال می‌شود و جریان الکتریکی تونلی اندازه‌گیری می‌شود. وابسته به مد مورد استفاده STM اینکار ممکن است در ارتفاع‌های متعدد و با اختلاف ولتاژهای متعدد تکرار شود. برای تنظیم ارتفاع از یک مدار فیزیک کنترلی الکترونیکی استفاده می‌شود و در هر گام روبش سطحی فرمان تغییر ارتفاع توسط این مدار به دفعات صادر می‌شود تا ارتفاع سوزن در محدودهٔ مناسب قرار گیرد.

همانطور که قبلاً گفته شد. اندازهٔ این جریان تابعی از جنس سطح، هندسهٔ سطح، فاصلهٔ سوزن از سطح و اختلاف ولتاژ اعمال شده می‌باشد. بنابراین بررسی اندازهٔ جریان ما به خصوصیات سطح و ارتفاع سوزن از سطح رهنمون می‌شود.



---

[1]- Tip

[2]) پیزو الکتریکها نوعی سرامیک هستند که با اعمال اختلاف ولتاژهای معمولی به دو سر آنها طولشان از مرتبهٔ یک آنگستروم تغییر می‌کند. از این مواد برای جابجاییهای بسیار دقیق استفاده می‌شود.

[3]- Scanning

در بخش بعدی جزئیات عملکرد STM در مدهای مختلف و منطق کسب اطلاعات از مشخصات سطح در مد مربوطه را بطور مختصر مورد بررسی قرار می گیرد.

روش‌های مبتنی بر استفاده مستقیم از STM در تعیین مشخصات سطوح:

در دماهای پایین و در ولتاژهای معمولی ارتباط بین جریان تونلی و مشخصات سوزن و فاصلهٔ بین آنها بصورت $I_T=F(V)\times \exp(-2kz)$ می‌باشدکه z ارتفاع سوزن از سطح، k ثابت نمایی تابعی از «تابع کار»[1] سوزن و سطح و F تابعی از چگالی حالات انرژی الکترونهای سطح است.

بر این اساس با ثابت قرار دادن برخی از این پارامترها امکان بررسی مقدار یا نحوهٔ تغییرات پارامترهای دیگر فراهم می‌شود. به عنوان مثال در ولتاژ ثابت با اندازه‌گیری جریان تونلی در ارتفاع‌های مختلف k تعیین می‌شود. بعنوان مثال دیگر حالتی را در نظر می‌گیریم که جنس و چگالی حالات انرژی الکترونها در نقاط مختلف یکسان (LDOS)[2] است.یعنی k و تابع F در تمام نقاط سطح یکی خواهد بود. در این صورت ثابت ماندن جریان، ثابت بودن فاصلهٔ سوزن از سطح را تضمین می‌کند و در نتیجه توپوگرافی هندسی سطح معلوم می‌شود.

مثال دیگر حالتی است که درصدد کسب اطلاع از ترازهای انرژی یا چگالی حالات انرژی الکترون‌ها در یک نقطه از سطح باشیم. در حالت اخیر با ثابت کردن مکان سوزن نسبت به سطح و بررسی تغییرات جریان تونلی بر حسب ولتاژ از تابع F آگاه می‌شویم. با توجه به اینکه F خود تابعی از ترازهای انرژی و LDOS الکترون‌ها است، آگاهی از F معادل آشکارسازی ترازهای انرژی و LDOS الکترونهاست.

در ادامه جزئیات عملکرد STM در مدهای مختلف و منطق کسب اطلاعات از مشخصات سطح در مد مربوطه با تفصیل بیشتری مطرح می‌شود.

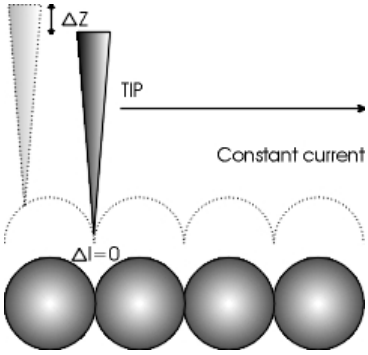
مد جریان ثابت:

---

[1]- Work Function

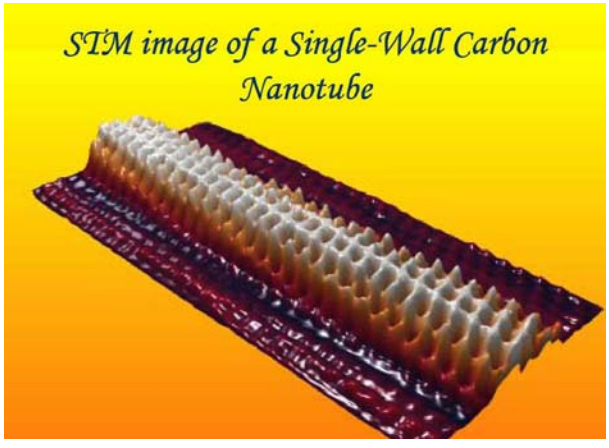
[2]- Local Density Of States

در صورتی‌که جنس سطح [و چگالی حالات انرژی الکترونها] در نقاط مختلف سطح یکسان باشد این روش فرآیند مطمئنی برای تعیین توپوگرافی هندسی سطح مواد، با دقت آنگستروم، محسوب می‌شود. در این روش در هر گام روبش سطحی ارتفاع سوزن از سطح به اندازه‌ای تنظیم می‌شود که جریان تونلی به مقدار معین برسد. از طرفی با توجه به فرض یکسان بودن جنس سطح (و چگالی حالات انرژی الکترون ها) در نقاط مختلف سطح مقدار جریان تونلی تنها تابعی از ارتفاع سوزن از سطح خواهد بود. بنابراین تحت این شرایط، حین فرآیند روبش سطحی، ثابت بودن جریان تونلی به معنی ثابت بودن ارتفاع سوزن از سطح می‌باشد. در نتیجه با ثبت مسیر پیزوالکتریک حین فرآیند روبش سطحی از توپوگرافی هندسی سطح مطلع می‌شویم.

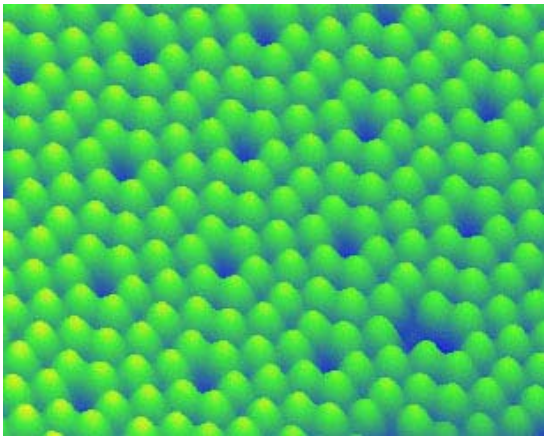


شکل۲) مسیر سوزن در مد جریان ثابت

در صورتی که جنس سطح و چگالی حالات انرژی الکترونها درنقاط مختلف سطح یکسان نباشد یا از یکسان بودن آنها اطمینان نداشته باشیم، روش اخیر نتایج مطمئنی را بدست نخواهد داد. در زیر تصاویر بدست آمده توسط STM از ساختار اتمی یک نانوتیوب و همچنین سطح سیلیکون را مشاهده می کنید.



شکل۳) ساختار اتمی یک نانوتیوب تک جداره بدست آمده توسط STM

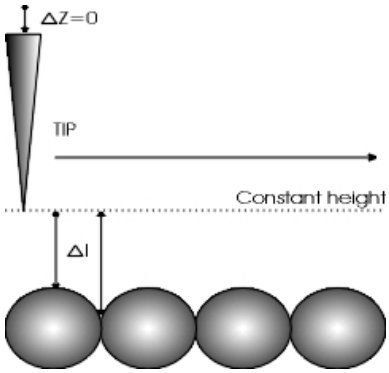


شکل۴) ساختار اتمی سطح سیلیکون بدست آمده توسط STM .

مد ارتفاع ثابت:

این مد روش سریعی برای تعیین توپوگرافی هندسی سطح می‌باشد. در اختلاف ولتاژ ثابت ارتباط جریان تونلی بر حسب فاصلهٔ سوزن از سطح مطابق رابطه $I_T \sim \exp(-2kz)$ می‌باشد که z نشانگر فاصله سوزن از سطح و k[1] ثابتی است که به جنس سطح و جنس و شکل سوزن بستگی دارد. در نتیجه با آگاهی از اندازهٔ جریان تونلی علی‌الاصول می‌توانیم از فاصلهٔ سوزن از سطح آگاه شویم.

با توجه به مطالب بالا اگر ارتفاع پیزوالکتریک نسبت به افق حین فرآیند روبش ثابت باشد در نقاط مختلف جریان‌های تونلی مقدار متفاوتی خواهد داشت. در نتیجه از روی رابطهٔ بالا فاصلهٔ سوزن از سطح در نقاط بدست می‌آید که به معنی معلوم شدن توپوگرافی هندسه سطح می‌باشد .



شکل۵) مسیر سوزن در مد ارتفاع ثابت

مزیت مد«ارتفاع ثابت» به مد« جریان ثابت» سرعت بالای فرآیند اندازه‌گیری است چرا که برخلاف مد«جریان ثابت» مدار فیدبک نقشی در کنترل ارتفاع ایفا نمی‌کند ودر نتیجه تأخیر زمانی وابسته به سیکلهای متعدد مدار فیدبک وجود نخواهد داشت. محدودیت این مد لزوم همواری بالای سطح مورد بررسی و اطمینان از این مسأله است چرا که برای بدست آمدن سیگنال مناسب. جریان تونلی، فاصله سوزن از سطح باید در محدودهٔ چند آنگستروم باقی بماند. از طرفی در صورت ناهمواری زیاد سطح حین فرآیند روبش سطحی، سوزن به سطح گیر می‌کند و سطح و سوزن تخریب می‌شوند.

مد نقشه برداری از تابع کار سطح:

---

[1] $k \approx \sqrt{2m_e(u_s + u_t)}/h$ که m_e جرم الکتروم، U_t تابع کار سوزن و U_s تابع کار سطح می‌باشد.

همانطور که در بخش قبل گفتیم در اختلاف ولتاژ ثابت جریان بر حسب فاصله بطور نمایی افت می‌کند. ($I_T \sim \exp(-2kz)$) که ارتباط ثابت افت k با تابع کار سطح وسوزن تقریباً بصورت:

$$k \approx \sqrt{2m_e(U_s + U_t)}/h$$

می‌باشد که U_s , U_t تابع کار سوزن و سطح می‌باشد و m_e و h به ترتیب جرم الکترون و ثابت پلانک است. با مشتق گیری از رابطهٔ I می‌توان به رابطه زیر رسید:

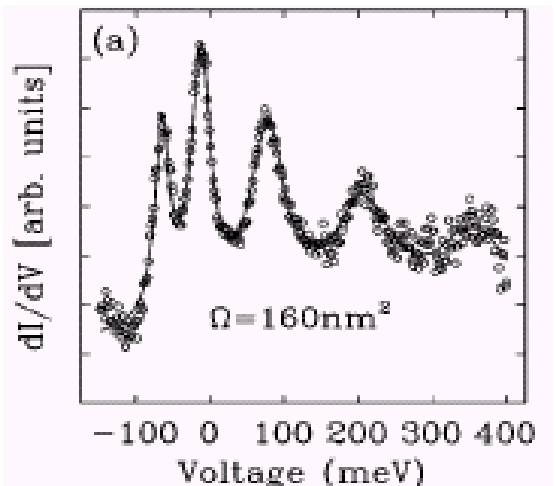
$$\frac{U_s + U_t}{2} = 0.95\left(\frac{\Delta I_t / \Delta Z}{I_t}\right)^2$$

اگر تابع کار سوزن U_t معلوم باشد آنگاه با اندازه‌گیری سمت راست رابطهٔ بالا تابع کار سطح U_s معلوم می‌شود. برای این‌کار در هر گام روبش سطحی در دو نقطه با ارتفاع نزدیک به هم جریان تونلی I_t اندازه گرفته می شود.

همانطور که گفته شد رابطهٔ I رابطه‌ای تقریبی است وعملاً در بسیاری مواد تابع کار سطح U_s بدست آمده از این روش اندکی بزرگتر از مقدار واقعی است، با وجود این نتایج بدست آمده اطلاعات کیفی مفیدی از نقشهٔ تابع کار سطح محسوب می‌شود.

تعیین نقشهٔ "چگالی حالات انرژی الکترونها" در نقاط مختلف سطح:

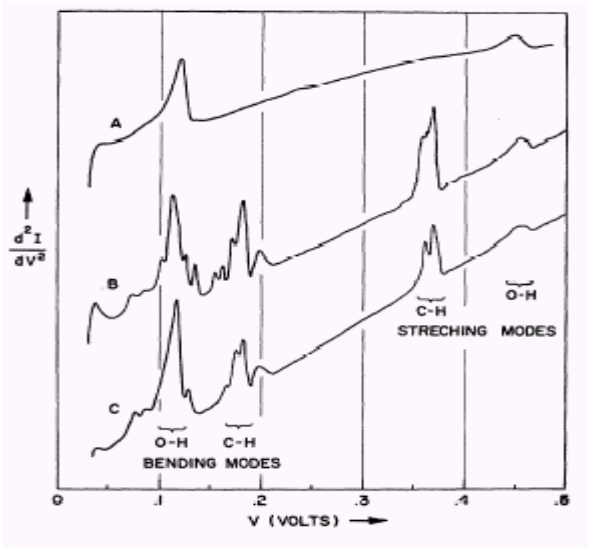
در این مد مکان و ارتفاع سوزن در یک نقطه از فضا ثابت می‌شود و تغییر نمی‌کند. سپس با تغییر دادن اختلاف ولتاژ، جریان تونلی را اندازه می‌گیرند. در نتیجه تابع F ($I_T \propto F_{(V)}$) مشخص می‌شود. همانطور که در مقدمهٔ این فصل اشاره شد F تابعی از چگالی حالات انرژی الکترونها (LDOS) در آن نقطه از سطح است . درنتیجه اصولاً LDOS از F قابل استنتاج است. می‌توان نشان داد که تحت شرایطی چگالی حالات انرژی در نزدیکی انرژی فرمی (با انرژی کمی بیشتر یا کمی کمتر) از رابطهٔ $DOS(E_f - eV) \propto \frac{dI_T}{dV} \propto \frac{df}{dV}$ بدست می‌آید.



مد سنجش نقشهٔ "ترازهای انرژی ارتعاشی الکترونها" در نقاط مختلف سطح:

مشابه حالت قبل در این مد مکان وارتفاع سوزن در یک نقطه از فضا ثابت می‌شود و تغییر نمی‌کند. سپس با تغییر دادن اختلاف ولتاژ، جریان تونلی اندازه‌گیری می‌شود. درنتیجه تابع F ($I_t \propto F_{(V)}$) مشخص می‌شود همانطور که در مقدمه این فصل گفته شد F تابعی از ترازهای انرژی الکترونها در آن نقطه از سطح است. در نتیجه علی الاصول ترازهای انرژی الکترونها از F قابل استنتاج است. می‌توان نشان داد که ترازهای جاذب انرژی جریان الکترونهای تونلی (برخورد غیر الاستیک) منجر به بروز پیک هایی در منحنی $\frac{d^2 I_T}{dV^2}(V)$ می‌شود، ولتاژهایی که پیک ها در آنها مشاهده می‌شوند بیانگر بزرگی ترازهای جاذب انرژی می‌باشد)

در میان ترازهای جاذب انرژی ترازهای ارتعاشی در محدودهٔ انرژیهای بررسی شده قرار می‌گیرند(ولتاژهای معمولی) و پیکهای دیده شده عملاً ترازهای ارتعاشی می‌باشد.



شکل۷)نمودار مشتق دوم جریان نسبت به ولتاژ بر حسب ولتاژ برای سه نقطه سطحی A،B وC

(همانطور که دیده می شود در ماده A پیکهای ترازهای ارتعاشی مربوط به ترکیبات C-H دیده نمی شود.)