آزمایشگاه فیزیک پیشرفته

میکروسکوپ تونلی Scanning Tunneling Microscopy (STM)

مقدمه

این میکروسکوپ از مهمترین میکروسکوپ‌های ساخته شده برای مشاهده مستقیم ساختار و خواص الکتریکی سطح در ابعاد اتمی است. اصول کار آن بر اساس اعمال پتانسیل کم بین سوزن با ابعاد زیر میکرونی و سطح جسم و ثبت جریان تونلی بین این دو می‌باشد. شکل 1 شماتیک ساختار یک میکروسکوپ را نشان می‌دهد. سوزن از جنس فلزات سخت مثل W و Mo است که به سه نقطه پیزوالکتریک مثل$PbZrTio_3$ با ثابت$10\text{-}10000A^0/V$ چسبیده است.

احتمال تونل‌زنی بستگی به همپوشانی اربیتالهای الکترونی سطح سوزن وماده مورد نظر دارد و جریان کل در بایاس برابر است با:

$$I = \frac{e}{\hbar}\sum_{1,2}|M_{12}|^2\,\delta(E_1 - E_2)\left[f(E_1) - f(E_2 + eV)\right]$$

تابع f تابع فرمی دیراک، E_1 و E_2 انرژی حالات اتمی و M_{12} ماتریس انتقال از حالت E_2 و E_1 است. در ولتاژ بایاس کم دانسیته این جریان برابر است با:

$$J = \frac{e^2}{\hbar}\frac{K.}{4\eta^2 d}V\exp(-2K.d)$$

که $2K.(nm)=0/1025E$ و $\varepsilon = \frac{E_1 + E_2}{2}$ و d فاصله است. تغییر فاصله $1\overset{0}{A}$ باعث تغییر در جریان قابل اندازه‌گیری می‌شود. قدرت تفکیک عمودی $0/1\overset{0}{A}$ وکمتر است و افقی بستگی به ناصافی سطح و شعاع سوزن دارد. اهمیت ثابت بودن مجموعه منجر به ساخت مجموعه غیرارتعا شی بعنوان نگهدارنده شده ا ست. این میکرو سکوپ معمولاً در خلاءUHV ($p<10^{-9}$Tott) بکار می‌رود تا سطح تمیز مورد مطالعه قرار گیرد ولی می‌توان در هوا و یا آب (مایعات) هم بکار برد. از کاربردهای دیگر این میکرو سکوپ کسب اطلاعات ا سپکترو سکوپی در محل مشخص از اتم‌ها است. با ثبت منحنی I(V) و تغییر ولتاژ، V می‌توان اطلاعات مفیدی از ساختار نواری بدست آورد. سه مود اصلی در این میکروسکوپ وجود دارد.

1- مود Z و V ثابت، مکان سوزن در صفحه تغییر می‌کند در این حالت جریان I اندازه‌گیری می‌شود.

2- مود I و V ثابت و y,x متغیر را در این حالت اندازه می‌گیریم.

3- مود V متغیر در این حالت بقیه پارامترها را ما انتخاب می‌کنیم و اندازه می‌گیریم.

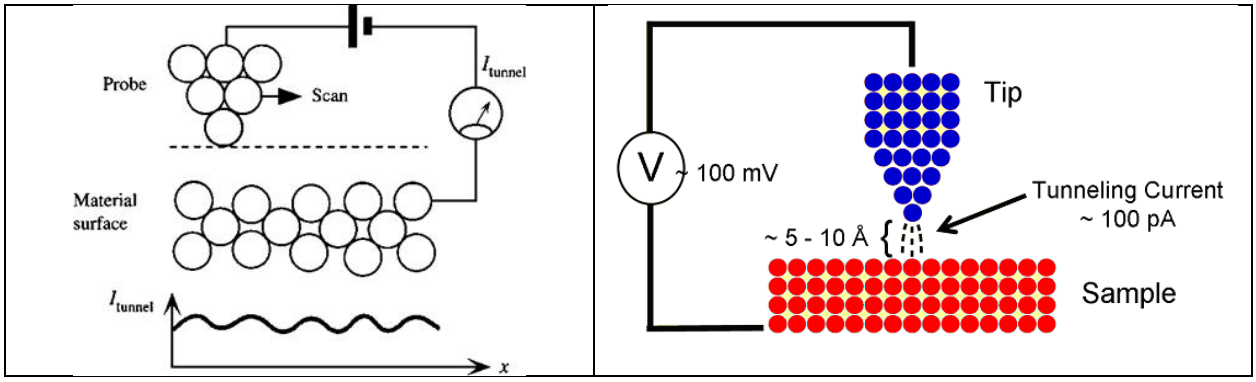
در مورد اول باید سطح تقریباً هموار باشد و در مورد دوم سوزن را در جهت z حرکت می‌دهد تا جریان ثابت باشد. شکل 2 شماتیک این مودها را نشان می‌دهد.

در مود سوم چندین بار I(V) اندازه‌گیری می شود. مشتق جریان به ولتاژ به کل نسبت جریان به ولتاژ $\frac{dI/dV}{I/V}$ به دانسیته حالات الکترونی محلی (LDOS) سطح بستگی دارد.

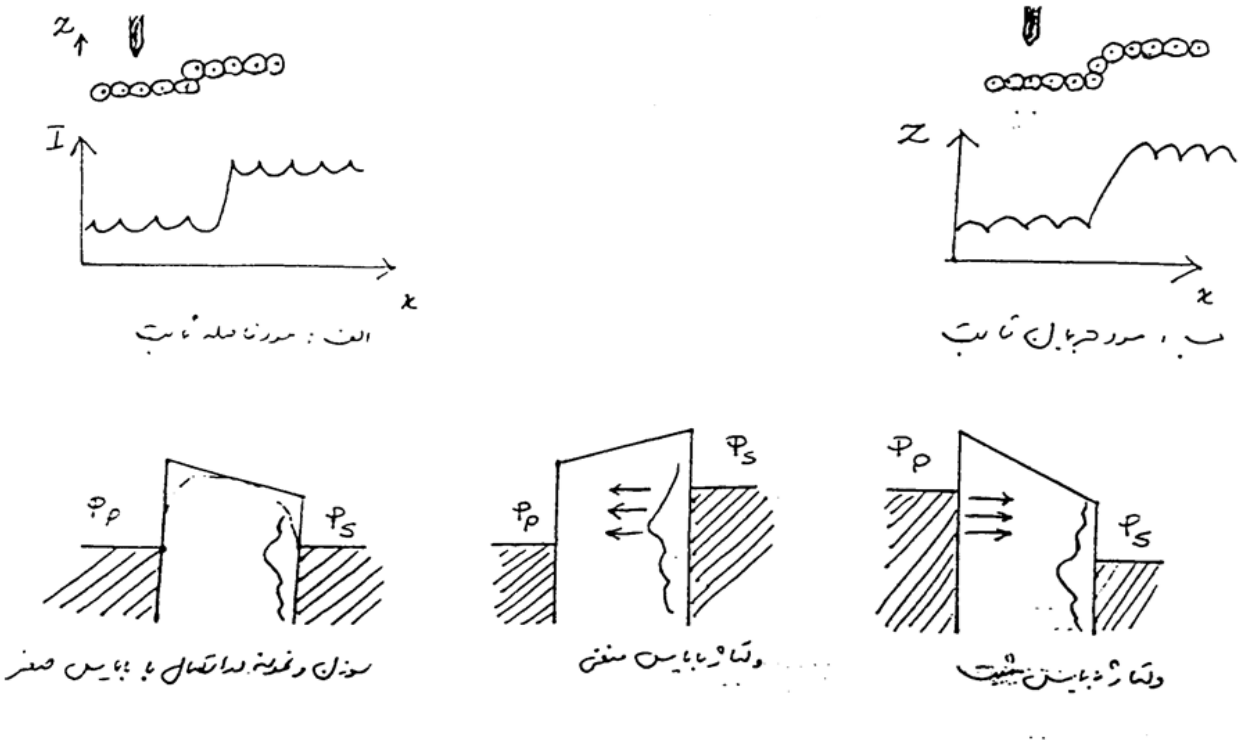
امروزه پیشرفت تکنولوژی در ساخت میکروسکوپ و استفاده از لیزر و الکترونیک پیشرفته‌تر باعث شده که بتوان انواع ذرات برهم‌کنشی دیگر بین سوزن و اتمهای سطح مثل فونونها و فوتونها هم آشکار شود بنابراین اطلاعات از خواص فیزیکی سطح بسیار وسیعتر گردیده است. البته عدم توانایی تونل‌زنی الکترونی از سطح مواد عایق این میکروسکوپ را از مطالعه سطوح مواد عایق عاجز کرده که در این مورد میکروسکوپ نیرو اتمی Atomic Force Microscopy (AFM) بکار می‌رود.

معرفی دستگاه

دستگاه مورد آزمایش ساخت کارخانه Nanosurf AG است که بر روی پایه ضدارتعاشی بنا شده است قبل از آزمایش بدقت موارد احتیاط و جزوه راهنمایی دستگاه خوانده و عمل شود و دستگاه با نرم‌افزار easy scan روشن و اندازه‌گیری می شود که نیاز است ابتدا با این نرم‌افزار آشنا شوید.



شکل 1: شماتیک عملکرد میکروسکوپ



شکل ۲: نمایش سه مود میکروسکوپ

احتیاط‌های لازم

1- هرگز به سوزن و جایگاه آن دست نزنید و در موارد مورد لزوم از دستکش و در یک فضای عاری از گردوغبار کار کنید.

2- برای بهتر دیدن وضعیت سوزن و سطح از ذره بین دستگاه استفاده کنید.

3- تغییرات دمای محیط و یا لرزش باعث از بین رفتن وضوح تصویر می‌شود.

4- قبل از شروع آزمایش حتماً دستورکار خوانده و با نرم‌افزار آشنا شوید.

5- بی‌احتیاطی منجر به شکستن سوزن و خراش نمونه می‌شود.

آشنایی با نرم‌افزار easy scan

همانطور که گفته شده این میکروسکوپ از مهمترین میکروسکوپ‌های ساخته شده برای مشاهده مستقیم ساختار و خواص الکتریکی سطح در ابعاد اتمی است. این مشاهده توسط برنامه نرم‌افزاری easy scan انجام می‌گیرد. دستگاه مورد آزمایش بر روی پایه ضدارتعاشی بنا شده است.

مرحله اول آزمایش تنظیم سوزن میکرو سکوپ د ستگاه ا ست. ابتدا تو سط ذره‌بین این کار به طریقه د ستی انجام می‌دهیم تا جائیکه احساس کنیم دیگر با دقت نمی توانیم با ذره بین آن‌را تنظیم کنیم. بعد تنظیم آن‌را به نرم‌افزار (به طور اتوماتیک) واگذار می کنیم. بهتر اســـت قبل از روشن کردن STM دستگاه با نرم‌افزار آن آشنا شوید. برای اینکار کامپیوتر را روشن کنید. بعد از بالا آمدن برنامه ویندوز، پوشه easy scan را که بر روی desktop یا همان صفحه مانیتور قرار دارد انتخاب کرده و با کلیک دوگانه بر روی این پو شه آن‌را باز کنید. چند پنجره که به طور مناسبی کنار هم قرار گرفته‌اند روی desktop ظاهر می شود که هر کدام حاوی آیکون‌های متفاوتی هستند. در پنجره گوشه سمت راست دو آیکون ↑ و ↓ قرار دارد که آیکون ↑ برای دورکردن سـوزن از سـطح بلور مورد مطالعه، به‌طور دسـتی می‌باشـد، دور کردن دسـتی با کلیک کردن‌های متعدد بر روی آن انجام می‌گیرد و آیکون ↓ برای نزدیک کردن سوزن با همان خصوصیات آیکون ↑ می‌باشد.

برای تنظیم اتوماتیک، بر روی آیکونی بنام Approach در همان پنجره کلیک می‌کنیم و نرم‌افزار با این دستور به طور خودکار سوزن را تنظیم می‌کند و پس از تنظیم پیغام می‌دهد که عملیات انجام شده است. نکته قابل ذکر این است که بر روی میکروسکوپ یک چراغ کوچک قرار دارد که سه رنگ را به نشانه علائم مختلف ارسال می‌دارد؛ 1- قرمز 2- نارنجی 3- سبز

رنگ قرمز: نشانه علامت خطر و احتمال آسیب‌دیدگی سوزن را اعلام می‌دارد که در این حالت سریعاً توسط ↑ آیکون سوزن را دور می‌کنیم و دوباره عملیات تنظیم سوزن را انجام می‌دهیم.

رنگ نارنجی: نشانه وضعیت متعادل می‌باشد و بیان می‌دارد که سوزن در موقعیت خطر نیست و همچنین تنظیم نیست.

رنگ سبز: اعلام می‌دارد که در وضعیت تنظیم سوزن قرار داریم و در کلیه مراحل آزمایش باید رنگ این چراغ سبز باشد و اگر احیاناً قرمز شود باید فاصله سوزن را از سطح بلور افزایش دهیم. پس از این مرحله، جاروب، scan را شروع کنید، برای اینکار نخست روی آیکون full در زمینه بالای پنجره بزرگ در صفحه کلیک کنید و پس از آن روی start کلیک کرده آنگاه تصاویری روی صفحه کامپیوتر رؤیت می شود که عکس سطح بلور را با توجه به مکانیسمی که توضیح داده شده است، ارسال می‌دارد.

در مرحله بعد، نوک سوزن را بایست به طور عمودی روی سطح بلور تنظیم کنیم این کار تو سط دو آیکون x-slop و y-slop انجام می شود، روی صفحه دو تصویر ظاهر می شود، یک تصویر کل محدوده مربوطه را نمایش می‌دهد و دیگری تصویر یک خط را نمایش می‌دهد. با کلیک کردن روی هر دو آیکون x-slop و y-slop تا جائیکه تصویر خط به صورت کاملاً افقی درآید ادامه دارد حال سوزن بر سطح بلور عمود شده است و این مرحله نیز به پایان می‌رسد. در این بخش خوبست تعدادی از تصاویر ثبت شده از قبل را نمایان کرده و با تنظیم توسط نرم‌افزار آشنا شوید.

آزمایش 1

مشاهده تصویر اتمی سطح نمونه گرافیت و ثبت نمودار I(V)

دستگاه STM را روشن کنید. مطمئن شوید نمونه در محل خوبی قرار دارد. هرگونه جابجایی نمونه حتماً توسط مسئول آزمایشگاه انجام شود. حال پس از آشنائی مقدماتی با نرم‌افزار فاصله سوزن با نمونه را تنظیم کنید. حین کاهش پله‌ای فاصله، مساحت مورد عکس بردای را مشاهده و در صـورت خوب بودن مسـاحت را کاهش دهید. کاهش فاصـله در این مرحله با آیکون z-Range انجام می‌شـود و کاهش مسـاحت با scan-Range صورت می‌گیرد. مرحله به مرحله تصویر واضحتر قابل لمس‌تر می‌شود. البته بایست به این نکته توجه کرد که باید فرود سوزن به روی مکان مناســبی بگیریم که در این صــورت بهتر اســت بر روی آیکون full کلیک کرده (یعنی ســوزن را از ســطح دور کنید) مجدداً در ناحیه

دیگری start کنید یا می‌توان از ابتدای مراحلی که گفته شده بار دیگر شروع کرد. البته برای گرفتن تصاویر دقیق و واضح از آیکون zoom نیز می‌توان استفاده کرد. روی آیکون zoom کلیک کرده قسمتی از تصویر را انتخاب می‌کنیم [چه برنامه در حال start باشد چه در حالت stop] بعد از این عمل نرم‌افزار فقط تصویر آن ناحیه را می‌دهد. سعی کنید در جایی که فرود می‌آییم حتی‌الامکان یکنواخت باشد.

برای سه بعدی کردن تصویر یا اگر سه بعدی است، دوبعدی کردن تصویر از Display استفاده می‌کنیم روی display کلیک سه مورد Lineview, 3D view, Top view رؤیت می‌شود.

Top view مربوط به دوبعدی کردن تصویر و 3D view برای سه بعدی کردن تصویر به کار می‌رود، با کلیک کردن روی هر کدام از آن‌ها و کلیک روی Apply که بعد از کلیک روی هر یک از سه مورد بالا ظاهر می شود، وارد فضای دوبعدی یا سه‌بعدی می شویم. برای بهتر کردن کیفیت تصویر از لحاظ پررنگ و کمرنگ بودن، از optimize استفاده می‌کنیم. در اینجا نرم‌افزار مساحت‌های مربع شکل را انتخاب میکند و وقتی مقدار scan rang را تغییر می‌دهیم در واقع هر دو بعد به‌یک مقدار تغییر می یابد. sampls بیانگر تعداد نقاط نمونه است که در آزمایش، نرم‌افزار برای نشان دادن شکل استفاده می‌کند. با افزایش مقدار sampls تعداد نقاط که در نمایش تصویر بکار می‌رود بیشتر می‌شود.

طریقه ذخیره‌سازی اطلاعات

برای ذخیره کردن تصویر دلخواه ابتدا سیستم را به حالت ساکن درآورده که این کار با کلیک کردن دکمه start که در حین اجرایscan به stop تغییر فرم می دهد، انجام می‌شود و دوباره فرم آن (با این کلیک) به start برمی گردد و عمل scan متوقف می‌شود و در این حالت سیستم آماده ذخیره‌سازی تصویری است که بر روی مانیتور مشاهده می‌شود.

روی دکمه photo کلیک می‌کنیم و سپس دکمه file در زمینه فعال بالای صفحه کلیک کرده آنرا open می‌کنیم، به دو طریق می‌توانیم ذخیره‌سازی اطلاعات را انجام دهیم:

1- از save as استفاده می‌کنیم، در save as باید اطلاعات را با توجه به پسوندی که برایeasy scan تعریف شده است، ذخیره‌سازی کنیم.

2- مورد دوم Export است، که از آن نیز می‌توان استفاده کرد. ولی در این حالت می‌توان اطلاعات را با پسوند دلخواه ذخیره‌سازی کرد. در این قسمت اطلاعات را به صورت bmp وAscii ذخیره‌سازی میکنیم، برای این امر آدرس زیر مورد احتیاج است:

Data set as\plotfile Ascii

لازم به یادآوری می‌باشد که دانشجویان بایستی یک پوشه در مکان C\easy scan\expriment به تاریخ روز به نام خودشان ایجاد کنند و بعد از آن به ذخیره اطلاعات بپردازند. بعد از ذخیره سازی تصاویر، نوبت مشاهده و ذخیره سازی اسپکتروسکوپی I بر حسب V می‌رسد. توجه داشته باشیم spectroscopy در یک نقطه (محل مشخص از اتم‌ها) انجام می‌گیرد، برای این امر روی دکمه spec کلیک می‌کنیم و سپس روی start کلیک می‌کنیم آنگاه نموداری با پنجره‌ای جدید همراه به آیکون های مختلف بر روی آن ظاهر می‌شود، که با آن دکمه ها می‌توان Voltage و همچنین فاصله را کم و زیاد کرد و نمودارهای مختلف تحت این تغییرات را مشاهده و ذخیره کرد.

لازم است از یک تصویر واضح برای انجام محاسبات استفاده شود، در گام اول از روی این تصویر باید بتوانیم در مورد شبکه اتمی آن اطلاعات بدست آوریم، درگام دوم محاسبات صفحه بعد را انجام دهید.

خواسته‌های آزمایش

1- سعی کنید تصاویر واضحی از سطح نمونه بدست آورده و ثبت کنید.

2- در نقاط مشخصی از سطح، چند تصویر I-V گرفته و ثبت کنید.

فایل‌ها را بصورت تصویر عددی برای انجام محاسبات از روی کامپیوتر کپی کنید.

آزمایش 2

محاسبه زبری سطوح

مشاهده شده است در رشد سطوح، واریانس ضخامت نقاط سطح از ابتدای رشد شروع به افزایش و پس از مدت Δt_x به مقدار ثابتی می‌رسد که آنرا واریانس اشباع سطح $W_{sat}(L)$ می‌نامیم.

$$W(L,t)=\sqrt{\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}\left[h(i,t)-\bar{h}(t)\right]^2}$$

در این فرمول h ارتفاع هر نقطه i در زمان t از سطح است و $\bar{h}$ متوسط ارتفاع نقاط است.

W_{sat} برای مدل‌های با بعد محدود بستگی به اندازه نمونه، L دارد و این مقدار با نمای زبری، بدین صورت تغییر می‌کند.

$$W_{sat}(L)\approx L^{a} \qquad [t\rangle\rangle t_x]$$

که a یک عدد است. در آزمایشات تجربی، برای بدست آوردن نمای رشد یک لایه نازک بخصوص، از روش دیگری مشابه روش فوق استفاده می‌شود. تابع همبستگی ارتفاع به صورت زیر می‌باشد.

$$C(t)=\left[\langle(h(x)-h(x'))^2\rangle x\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (|x-x'|=l)$$

که < > میانگین‌گیری روی نقاط نمونه است و در این رابطه مکان انتخابی است.

بدین منظور برای هر سطح بازاء l های متفاوت $1\le l\le 50$ میانگین $\langle h(x)-h(x')\rangle$ را روی سطح محاسبه نموده مقدار $C(l)$ را بدست آورید. برای فواصل کوچکتر از طول همبستگی رابطه $C(l)\sim L^{a}$ و $[L\langle\langle\xi]$ برقرار است که بدین وسیله می‌توان محاسبه نمود. در نمونه‌ها واریانس از یک حدی بیشتر نمی‌تواند باشد این مسئله گویای آن است که نقاط مختلف نمونه به یکدیگر وابسته‌اند. بیشترین فاصله‌ای که در آن نقاط مختلف نمونه به هم وابسته می‌شوند را طول همبستگی ξ می‌گوئیم.

قدمهای نوشتن برنامه محاسبه a

ابتدا باید از تصـویر خود یک آرایه $N \times N$ بسـازید که در هر یک از اعضـای آن ارتفاع نقطه مورد نظر را در خود دارد. داشـتن فایل تصـویر بصورت Ascii لازم است.

میانگین‌گیری

میانگین‌گیری بدین صورت انجام می‌شود:

$$C'(L) = \frac{\sum \left(h_{ij} - h_{ij+l}\right)^2 + \sum \left(h_{ij} - h_{i+lj}\right)^2}{2}$$

$$C(l) = \frac{C'(l)}{number}$$

روی آرایه فوق با تغییر مقادیر j,i از مقدار 1 تا (N-1) می‌توان مجموع فوق را بدست آورد با تقسیم بر تعداد جملات، میانگین $C(l)$ را بدست آورد.

برای ثابت بودن تعداد جملات در هر میانگین‌گیری می‌توان جمع $\sum_{t=1}^{N-\eta'}$ انجام داد که η' بزرگترین قدمی اسـت که $C(l)$ برای آن محاسـبه می‌شود.

مقادیر $C(l)$ به ازاء l=1,...,20 و رسـم منحنی $C(l)$ بر حسـب (l) در رابطه نمایی به ازاء طول‌های ابتدایی آن $C(l) \propto L^a$ مشـاهده می‌شـود و از روی آن نمای زبری a محاسـبه می‌شـود. می‌توان برای کوتاه شـدن برنامه تنها روی یک خط میانگین‌گیری کرد و میانگین به صورت زیر می‌شود.

$$C(l) = \sum \left[\frac{\left(h_{ij} - h_{i,i+l}\right)^2 + \left(h_{ii} - h_{i+l,i}\right)^2}{2} \right]$$

البته فقط این روش بخاطر کمتر بودن تعداد عناصر در جمع کمتر خواهد بود.

1- یک فایل به صورت ماتریس $1 \times n$ را در ورودی می‌خواهیم.

2- ماتریس $\left[h(i)\right]_{1\times n}$ را می‌سازیم.

3- تعریف تابع همبستگی در یک بعد چنین است: $C(l) = \left(\langle h(x) - h(x+1)^2 \rangle x\right)^{\frac{1}{2}}$

به این صورت باید برای هر l یک $C(l)$ بدست آوریم.

4- برنامه پیشنهادی:

While l<120
h_2=0; n=0
For l=1 to 120

$$h_L = h_2 + \left(y(i) - y(i+1)\right)^* \left(y(i) - y(i+1)\right);$$

n=n+1;

end;

m=m+1

l=l+1

end;

lr(m) آرایه‌ایست که در آنها l های مربوط به هر C(m) نگهداری می‌شود.

5- در نهایت باید C(m) را بر حسب lr(m) رسم کرد.

6- و می‌توان نمای a را حساب کرد.

بررسی نتایج و سؤالات

1- با مقایسه ابعاد اتمی شبکه گرافیت با تصویر بدست آمده با دقت اتمی سعی کنید فواصل اتم‌ها و آرایش آن‌ها را تعیین کنید.

2- نمای زبری سطح را با تصویر $0/5 \times 0/5 \mu m^2$ از نمونه محاسبه نمائید. به این منظور نمودار $C(l)$ بر حسب l رسم شود.

3- نمودارهای اسپکتروسکوپی I بر حسب V را ثبت کنید (در چند نقطه تصویر) و سپس با استفاده از فایل آن اطلاعات نمودار dI/dV تقسیم بر $\frac{I}{V}$ را بر حسب V رسم نمایید.