

F-Praktikum Physik: 508 STM

Mirja Richter Felix Spanier

10. April 2001

Institut für Experimentalphysik IV
AG Oberflächen
Ruhr-Universität Bochum

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theorie	3
2.1	Klassischer Tunneleffekt	3
2.2	Reale Systeme	5
2.3	Zustandsdichte	7
3	Aufbau	8
4	Oberflächenphysikalische Grundlagen	10
5	Durchführung	11
5.1	Versuchsteile	12
5.2	Spitzen schneiden	15
6	Auswertung	16

1 Einleitung

In vielen modernen technologischen Prozessen, insbesondere in der Halbleitertechnologie, spielen sowohl dünne Schichten als auch Grenz- und Oberflächen eine entscheidende Rolle. Ein großer Teil der Festkörperphysik beschäftigt sich deshalb mit den Grundlagen der Abscheidung dünner Schichten und der Analytik dieser Schichten mit dem Ziel, Verfahren zu entwickeln, mit denen Materialien mit den gewünschten Eigenschaften hergestellt werden können.

In den letzten Jahren sind die Methoden der Strukturierung und der Mikroskopie von Oberflächen immer mehr in den atomaren Bereich vorgezogen. Neben der Elektronenmikroskopie stellen Rastersondenmikroskopiemethoden heute die am meisten genutzten Verfahren dar, die Struktur einer Oberfläche auf Nanometerskala zu untersuchen. Hierbei wird eine Oberfläche mit einer feinen Tastsonde abgerastert. Unterschiedliche physikalische Wechselwirkungseffekte zwischen Oberfläche und Sonde können genutzt werden, um bestimmte Eigenschaften der Oberfläche wie Topologie, chemische Zusammensetzung, elektronische Struktur, magnetische Domänen etc. zu untersuchen.

In diesem Versuch werden Sie als eine dieser Methoden die Rastertunnelmikroskopie (*STM* – Scanning Tunneling Microscopy) kennenlernen. Hierbei wird ein Tunnelstrom zwischen der untersuchten Oberfläche und einer feinen Metallspitze als Abstandsmaß benutzt. Sie werden sehen, daß sich auf diese Weise Informationen sowohl über topologische Struktur als auch über die elektronischen Zustände an der Oberfläche der Probe gewinnen lassen.

Weiterhin sollen Sie auch selbst Oberflächen und dünne Schichten präparieren, die Sie dann im Mikroskop mit teilweise atomarer Auflösung untersuchen.

2 Theorie

Das grundlegende Prinzip des STM ist der quantenmechanische Tunneleffekt. Im STM wird die Probe einer Spitze auf ca. 0.5 nm angenähert und zwischen beiden eine elektrische Spannung angelegt. Der Spalt zwischen Probe und Spitze stellt eine Barriere für die Elektronen dar. Durch den Tunneleffekt fließt ein Strom, der im Zusammenhang mit dem Abstand zwischen Probe und Spitze steht. Im folgenden wird aus der theoretischen Herleitung dieses Effekts ein Zusammenhang zwischen Strom, Spannung und Abstand ermittelt.

2.1 Klassischer Tunneleffekt

Wir nehmen zuerst ein eindimensionales Kastenpotential der Form

$$V(x) = V_0 \cdot \theta(a - |x|) \quad (1)$$

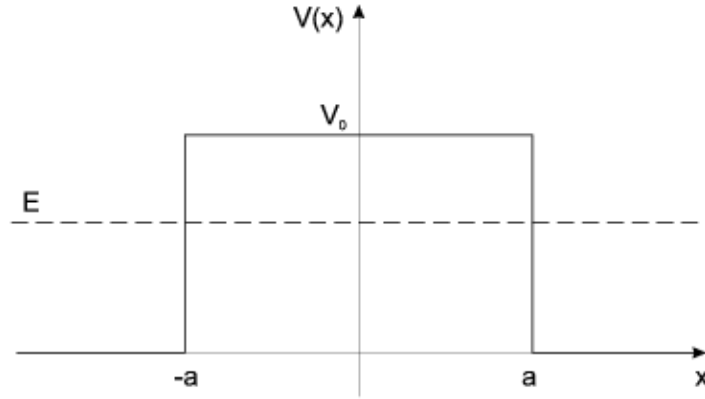


Abbildung 1: Kastenpotential

an ($2a$: Kastenbreite, V_0 Kastenhöhe). Für den Fall, daß sich diesem Potential ein Teilchen aus der negativen x -Richtung nähert, lautet die zeitunabhängige Schrödinger-Gleichung:

$$H\psi(x) = E\psi(x) \quad (2)$$

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(x) \quad (3)$$

$$\Rightarrow \left(\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} - V(x) + E \right) \psi(x) = 0 \quad (4)$$

(E : Energie, m : Masse)

Verwendet man nun Gleichung 1, so erhält man die allgemeine Lösung:

$$\psi(x) = \begin{cases} A_1 e^{ikx} + A_2 e^{-ikx}; & -a > x \\ B_1 e^{i\kappa x} + B_2 e^{-i\kappa x}; & -a < x < a \\ C_1 e^{ikx}; & x > a \end{cases} \quad (5)$$

$$k = \sqrt{2mE}/\hbar \quad (6)$$

$$\kappa = \sqrt{2m(V_0 - E)}/\hbar \quad (7)$$

Die Koeffizienten A_1, A_2, B_1, B_2, C werden mit Hilfe der Stetigkeitsbedingungen und der Normierung $\langle \psi | \psi \rangle = 1$ ermittelt [Fli00]. Hier ist nur die Transmissionsamplitude $S(E)$ relevant.

$$S(E) = \frac{C_1}{A_1} \quad (8)$$

$$\Rightarrow |S(E)|^2 = \frac{1}{1 + (1 + \epsilon^2/4) \sinh^2(2\kappa a)} \quad (9)$$

$$\epsilon = \frac{\kappa}{k} - \frac{k}{\kappa} \quad (10)$$

$|S(E)|^2$ ist die *Tunnelwahrscheinlichkeit*, also die Wahrscheinlichkeit, daß ein Teilchen von $x < -a$ den Bereich $x > a$ erreicht. Für breite Potentialbarrieren

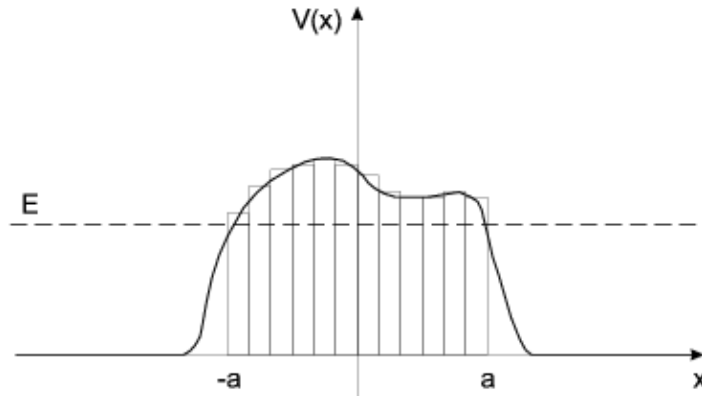


Abbildung 2: Potentialannäherung durch Rechteckpotentiale

($\kappa a \gg 1$) gilt $\sinh(2\kappa a) \approx \exp(2\kappa a)$ ¹ und man kann weitere Vereinfachungen vornehmen.

$$|S(E)|^2 = \frac{16E(V_0 - E)}{V_0^2} \exp\left(-\frac{4a}{\hbar} \sqrt{2m(V_0 - E)}\right) \quad (11)$$

2.2 Reale Systeme

In realen Systemen ist der Potentialverlauf der Tunnelbarriere nicht exakt rechteckig. Durch unterschiedliche Materialien in Probe und Spitze liegen unterschiedliche Austrittsarbeiten vor, die eine Trapezform der Barriere verursachen. Auch das elektrische Feld zwischen Probe und Spitze verzerrt die Rechteckform. Um diese Abweichungen zu berücksichtigen verwendet man die *WKB-Näherung*, die das Potential in Rechtecke zerlegt (Abbildung 2).

Hier ergibt sich:

$$|S(E)|^2 \approx \prod_i^N \exp\left(-\frac{2\Delta x_i}{\hbar} \sqrt{2m(V(x_i) - E)}\right) \quad (12)$$

$$= \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \sum_i^N \Delta x_i \sqrt{2m(V(x_i) - E)}\right) \quad (13)$$

$$\approx \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_{-a}^{+a} dx \sqrt{2m(V(x) - E)}\right) \quad ; \text{für } \Delta x_i \rightarrow 0 \quad (14)$$

Bei realen Systemen muß aber auch beachtet werden, daß das Potential auf beiden Seiten der Barriere nicht zwingend identisch ist. Hier spielt die Austrittsarbeit von Probe und Spitze eine Rolle. In Abbildung 3 sind die Energieniveaus von Probe und Spitze dargestellt. Die Austrittsarbeit ϕ ist die minimale

¹Diese Näherung kann man mit der Eindringlänge $\frac{1}{\kappa}$ begründen, die ungefähr $0.2nm \cdot \sqrt{U}$ beträgt, und somit kleiner als die durchschnittliche Barriere (0.5 nm) ist

Energie, die notwendig ist, um ein Elektron vom Fermienergie E_F (höchster, bei $T = 0$ K besetzter Zustand) auf Vakuumenergie E_{Vac} zu bringen. Die Differenz zwischen den Fermienergien ist die angelegte Spannung U .

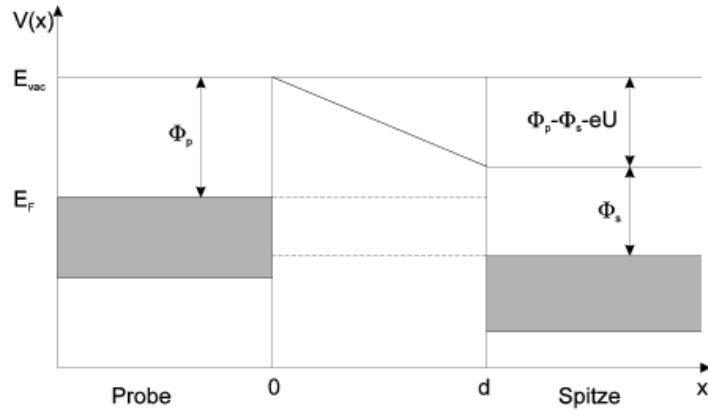


Abbildung 3: Potentialdifferenzen

Wendet man nun die Erkenntnisse über den Tunneleffekt auf diese Potentiale an, ergibt sich die in Abbildung 4 dargestellte Wellenfunktion (in diesem Fall der Realteil):

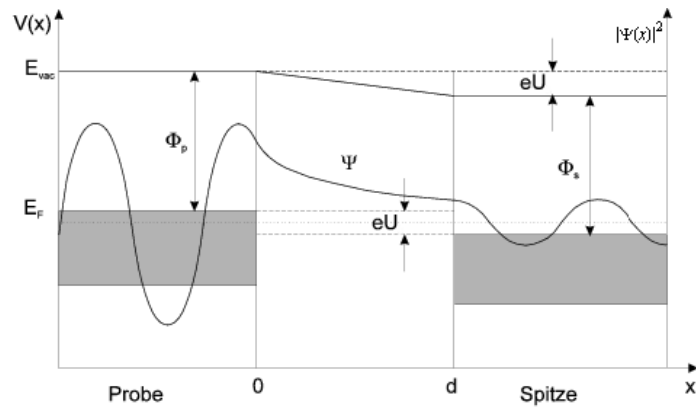


Abbildung 4: Realteil der Wellenfunktionen und Potentialverlauf

Hieraus folgt dann, daß bei angelegter Spannung eine von Null verschiedene Tunnelwahrscheinlichkeit von Elektronen besteht, also ein Strom fließt. Im gezeigten Fall (Abb. 4) stehen den besetzten Zuständen der Probe (links) unbesetzte der Spitze (rechts) gegenüber, so daß die Elektronen von der Probe zur Spitze fließen können. Unter der Annahme, daß sich am Ort der Probe ein Elektron im n -ten Energiezustand befindet ($\psi_n(0)$), ergibt sich nach Gleichung 14 die Tunnelwahrscheinlichkeit:

$$S|E|^2 \sim |\psi_n(0)|^2 e^{-2\kappa d} \quad (15)$$

$$\kappa = \sqrt{2m\phi}/\hbar \quad (16)$$

Der Strom ergibt sich aus der Summation über alle Energiezustände zwischen E_n und der Fermienergie.

$$I \sim \sum_{E_n=E_F-eU_b}^{E_F} |\psi_n(0)|^2 e^{-2\kappa d} \quad (17)$$

Um diesen Ausdruck zu vereinfachen, wird die lokale Elektronenzustandsdichten eingeführt (*LDOS*, Local Density of States)

$$\rho(x, E) = \frac{1}{\epsilon} \int_{E-\epsilon}^{E_F} |\psi_n(x)|^2 dE_n \quad (18)$$

$$\Rightarrow I \sim eU_b \rho(0, E_F) e^{-2\kappa d} \quad (19)$$

Man erkennt nun den exponentiellen Abfall des Stroms mit dem Abstand. Um diese Theorie zu verfeinern, wäre es jetzt noch nötig, den eindimensionalen Fall auf drei Dimensionen zu übertragen. Die Änderung sind aber letztlich nur quantitativ und nicht qualitativ, daher sei an dieser Stelle auf [Bar61] u.a. verwiesen.

2.3 Zustandsdichte

Da also der Tunnelstrom im allgemeinen von der LDOS und dem Abstand zur Probe abhängt, muß man zur Interpretation des Tunnelstroms wissen, wie sich die Zustandsdichte in Abhängigkeit vom Ort auf der Oberfläche verhält.

Bei Metallen liegt ein freies Elektronengas vor, in dem die Leitungselektronen frei verteilt sind. Daher sind auf Metallen oftmals nur einheitliche Flächen gleichen Stroms, nicht aber benachbarte Atome in einer Ebene zu erkennen. Stufenkanten hingegen können in der Regel gut aufgelöst werden. Anders verhält es sich bei Halbleitern. Hier liegen an der Oberfläche ungesättigte Bindungen (*dangling bonds*) vor, die stark lokalisiert sind und mit hohem Kontrast abgebildet werden können.

Zusammenfassung

- das STM basiert auf dem Tunneleffekt
- zwischen Probe und Spitze wird eine elektrische Spannung angelegt
- der Tunnelstrom hängt vom Integral über die Zustandsdichte der Elektronen sowie vom Abstand zwischen Probe und Spitze ab

3 Aufbau

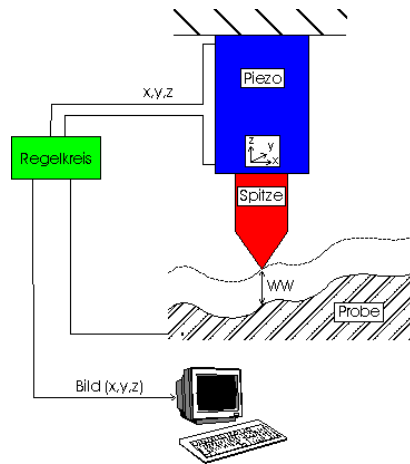


Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines STM

Wie schon im vorherigen Abschnitt beschrieben, besteht das STM im Wesentlichen aus einer Spitze und der Probe (Schema in Abb. 5), zwischen denen eine elektrische Spannung anliegt. Im Falle des von uns verwendeten STM ist die Probe geerdet. Die Spitze ist an Piezo-Kristallen befestigt, die ihre Form verändern, wenn an ihrer Oberfläche eine Spannung (im Bereich von bis zu 100 V) angelegt wird. Ein STM-Bild entsteht durch das “Abrastern” der Oberfläche: Die Spitze wird mit den Piezos in x- und y-Richtung über die Probe bewegt, wobei sich der Tunnelstrom in Abhängigkeit des Abstandes zwischen Spitze und Probe

ändert. Man unterscheidet nun zwischen zwei verschiedenen Abbildungsarten:

- Im sog. *Constant Height Mode* wird die vertikale Position der Spitze konstant gehalten. Auf Grund des Höhenprofils der Probenoberfläche wird man an jedem Meßpunkt einen anderen Tunnelstrom messen, da diese Größe die Information über die LDOS und damit oft auch über die Topologie der Probe beinhaltet. Dieser Modus kann auf Grund der konstanten z-Auslenkung der Spitze nur auf atomar glatten Oberflächen verwendet werden. Der Vorteil dieser Methode ist jedoch eine Erhöhung der Scangewindigkeit, da die Regelung des z-Piezos entfällt.
- Im sog. *Constant Current Mode* wird an jedem Meßpunkt der Abstand der Spitze zur Probe so geregelt, daß ein konstanter Tunnelstrom fließt. Somit stellt die Regelspannung des z-Piezo das eigentliche Meßsignal dar. Dieser Modus bietet sich für Oberflächen mit großen Höhenänderungen an.

Im vorliegenden Versuch wird aus o.g. Gründen ausschließlich der Constant Current Mode verwendet.

Neben den hier genannten topographischen Verfahren kann auch Tunnelspektroskopie betrieben werden. Hierbei wird die Position der Spitze relativ zur Oberfläche in allen drei Richtungen konstant gehalten und die Tunnelspannung kontinuierlich variiert. Gleichzeitig wird der Tunnelstrom gemessen. Die gemessene $I(U)$ -Kurve zeigt in jedem Spannungspunkt das Integral über die

LDOS an. Bei Metallen verläuft die Kurve mit endlicher Steigung durch $U = 0$ (Durchlauf des Fermi-Niveaus) und zeigt damit eine endliche Zustandsdichte am Fermi-Niveau an. Bei Halbleitern sind im Bereich der Bandlücke keine Zustände vorhanden, in diesem Bereich um $U = 0$ ist die Steigung der $I(U)$ -Kurve gleich Null.

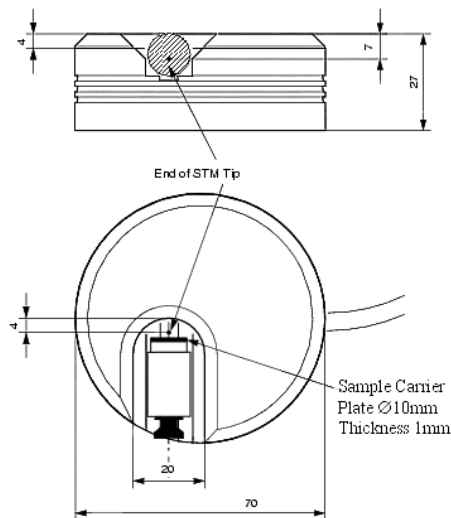


Abbildung 6: Skizze des easyScan-STM

Proportional- und I für den Integralteil. Bei der Regelung sind P- und I-Anteil einstellbar, P regelt mit dem gemessenen Strom, I mit dem Integral über die bisher gemessenen Ströme.

In Abbildung 6 sehen Sie den Aufbau des STMs, das aus dem herausnehmbaren Probenkopf und dem eigentlichen STM, das die Spitze und die Piezos enthält, besteht. Die Spitze ist im Mikroskop eingeklemmt, während die Probe magnetisch auf dem Probenhalter fixiert ist. Der STM-Aufbau ist mit einer Steuer- und Regelelektronik verbunden, deren Daten am PC ausgewertet werden.

Die Regelung des STM ist in Abbildung 7 beschrieben. In diesem Schema erkennen Sie, daß der Strom zwischen Probe und Spitze in eine Spannung umgewandelt wird, die als Regelparameter den z-Piezo steuert (im constant current mode). Der Regler, der den Strom konstant hält, ist ein P/I-Regler. P steht dabei für den

Input-Line Schematics

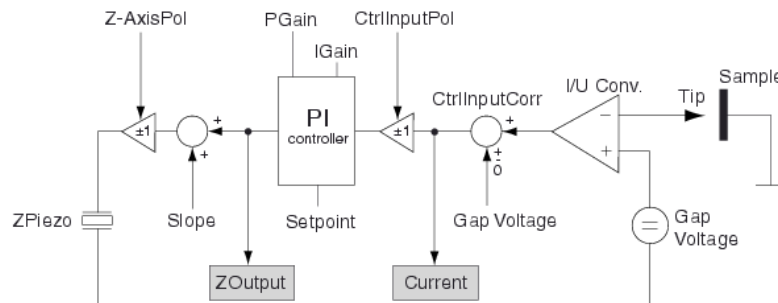


Abbildung 7: Regelschema des STM

Wenn beide Regelparameter niedrig eingestellt werden, so reagiert die Piezosteuerung nur langsam auf Oberflächenänderungen.

Zusammenfassung

- Das STM scannt in diesem Versuch bei konstantem Strom
- Die Spitze wird von Piezokristallen gesteuert

4 Oberflächenphysikalische Grundlagen

In der Oberflächenphysik werden meistens kristalline Substanzen untersucht. Kristalle weisen charakteristische Symmetrien auf, die sich in verschiedene Gruppen gliedern. In diesem Versuch werden das flächenzentrierte Gitter (*fcc* – face centred cubic) und das hexagonale Gitter (*hcp* – hexagonal close packed) betrachtet. Die Oberflächenstruktur ergibt sich nicht nur aus der Kristallstruktur, sondern auch aus der betrachteten Schnittebene, die man mit den Miller'schen Indices kennzeichnet. [Kit99]

Die Oberfläche ist aber nicht ein direktes Abbild des Kristallinneren, da es zu Randeffekten wie der Relaxation kommt, durch die sich u.a. der Ebenenabstand durch fehlende Bindungspartner an der Oberfläche ändert. Häufig beobachtet man auch Umordnungen der Oberflächenatome, sog. Rekonstruktionen.

Die Oberflächenphysik beschäftigt sich nicht allein mit der Charakterisierung von Oberflächen, sondern auch mit ihrer Herstellung (dem Wachstum auf bzw. von Oberflächen) und der gezielten Modifikation. In diesem Versuch wird z.B. das Wachstum von Gold auf Glimmer durch sogenanntes "Sputtern" untersucht. Näheres dazu im Kapitel 5.

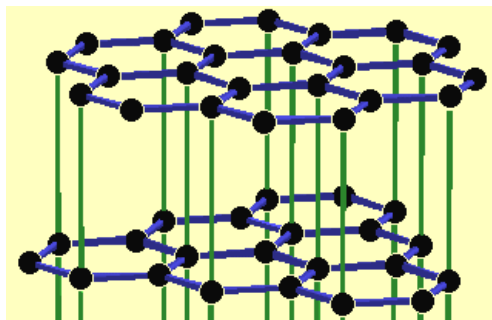


Abbildung 8: Struktur von Graphit

von der Temperatur (also der Energie der Atome) abhängig unterschiedliche Wachstumsmodi auf. In [Sem99] ist beschrieben, wie die Struktur der Goldschichten vom Substrat abhängt.

Bei Wachstumsprozessen unterscheidet man epitaktisches und nicht-epitaktisches Wachstum. Epitaktisch bedeutet, daß das wachsende Material kristallin ist und sich an der Struktur der Unterlage ausrichtet.

Gold wächst auf Glimmer epitaktisch (s. [Kaw97]). Da sich die aufgebrachtten Atome auf der Oberfläche nicht völlig frei bewegen können (durch Bindungen oder Schwöbel-Barrieren), treten

Im Verlauf der Messung auf Graphit wird Ihnen auffallen, daß Sie von diesem Material nur eine Oberflächensymmetrie beobachten können, da bei diesen Kristallen nur eine Schnittfläche thermodynamisch stabil ist. Betrachtet man die Volumenstruktur von Graphit (s. Abb. 8), so wird schnell klar, daß man am leichtesten parallel zu den sechseckigen Waben schneiden kann, wodurch man die (0001)-Fläche erhält.

Für das Aufbringen eines Materials auf eine Substratoberfläche gibt es verschiedenen Verfahren:

CVD: Chemical Vapor Deposition, die Substanz wird reaktiv aus der Gasphase auf dem Substrat abgeschieden.

PVD: Physical Vapor Deposition, aus einem gesättigten Dampf wird die Substanz abgeschieden.

MBE: Molecular Beam Epitaxy, ein Molekül- oder Atomstrahl (aus einem Verdampfer etc.) trifft auf das Substrat.

Sputtern: Ionen treffen auf ein Target, aus dem sie Atome lösen. Diese werden auf dem Substrat abgeschieden.

Wir werden uns in diesem Versuch mit dem Sputtern beschäftigen. In der von uns verwendeten Apparatur wird ein Goldtarget auf negatives Potential gelegt und mit Ionen (in unserem Fall hauptsächlich O_2^+ und N_2^+ , da Luft als Sputtergas verwendet wird) mit einer Energie von $\approx 1\text{keV}$ beschossen. Dadurch lösen sich die Goldatome aus dem Verband und treffen auf das Substrat.

5 Durchführung

Bevor Sie sich an das STM begeben, sollten sie einige wichtige Punkte beachten:

- **Proben und STM nie mit der Hand berühren, immer Handschuhe benutzen.**
- **Die Spitze des STM nicht berühren (weder mit den Händen noch mit der Probe), da diese sonst stumpf wird und ersetzt werden muß.**
- **Auch kleine Erschütterungen stören die Messung, also den Versuchstisch nicht berühren, während die Probe angenähert ist.**
- **Halten Sie sich genau an die Präparationsanweisung dieser Anleitung.**

Sind die Probe oder die Spitze verschmutzt, so müssen sie gereinigt (oder im Falle der Spitze ersetzt) werden, da Schmutzpartikel oder Fettablagerungen

makroskopisch groß gegenüber der Oberflächenstruktur sind. Auch eine Verschmutzung des Meßkopfes ist kritisch, da Schmutz die Annäherung der Probe an die Spitze erschwert. Wenn die Spitze berührt wird, so führt dies zu ihrer Abstumpfung, denn die Spitze sollte im Idealfall in einem einzelnen Atom enden. Nach einer Berührung ist dies nicht mehr gewährleistet. In diesem Fall muß eine neue Spitze hergestellt werden (s.u.). [Nan00]).

Die Tatsache, daß die Bewegung der Spitze nur in sehr kleinen Rahmen stattfindet, macht das STM sehr erschütterungsempfindlich. Auch Schall kann schon Störungen hervorrufen! Während des Messens sollte Sie das STM auch nicht direkt beleuchten, da sonst thermische Drift des Piezos die Messung stört.

In diesem Versuch wird auch ein Laborbuch geführt. Zu Beginn des Versuchs sollten Sie dort das Datum und Ihre Namen eintragen. Im Laufe des Versuchs sollten Sie eintragen:

- Wechsel der Probe
- evtl. Austausch der Spitze
- Regelparameter und erzielte Ergebnisse
- evtl. Probleme

Es ist in der Regel hilfreich, aus den Erfahrungen der Vorgruppen zu lernen, sofern diese ihre Ergebnisse dokumentiert haben.

5.1 Versuchsteile

Im Rahmen des Versuchs sollen Sie zunächst die Kalibrierung des STM anhand eines Gitters verifizieren. Anschließend sollen Sie auf einer Graphitoberfläche die Oberflächenstruktur atomar abbilden. Für den letzten Versuchsteil stellen Sie eine Goldschicht auf einem Glimmersubstrat her, die Sie dann mit dem STM abbilden.

Die Anleitung zum Schneiden einer neuen Spitze finden Sie in Kapitel 5.2.

Kalibrierung: Das Gitter besteht aus Platin mit einem organischem Substrat, seine Kantenlänge beträgt 160 nm. Das Substrat wiederum ist auf einem runden Probenhalter aus Stahl, den Sie am Rand mit einer Pinzette anfassen können, befestigt. Befestigen Sie ihn mit der Rückseite auf dem Magneten des Meßkopfes, und legen Sie diesen in das STM. Achten Sie darauf, mit der Probe nicht die Magnete des Schrittmotors zu berühren. Nähern Sie den Meßkopf mit der Probe per Hand (grob) an die Spitze an, bis Sie das Spiegelbild der Spitze auf der Probe sehen können. Betrachten Sie nun mit einer Lupe das Spiegelbild der Spitze auf der Probe und versuchen Sie eine feinere Annäherung mit Hilfe der elektronischen

Steuerung des Programms unter Verwendung der Maus. Sobald sich Spiegelbild und Spitze nahe gekommen sind (aber nicht berühren) starten Sie den automatischen Annäherungsmodus.

Beobachten Sie dabei auch die am STM angebrachte LED, ihre Farbe gibt Aufschluß über den Status der Spitze: orange bedeutet nicht angenähert, grün angenähert, rot heißt, daß sich Probe und Spitze berühren, wozu es nicht kommen sollte. Ein grün-orangenes Blinken bedeutet, daß sich das STM im automatischen Approach-Modus befindet. Grün ist der Meßmodus.

Starten Sie nun das Meßprogramm (es ist vorteilhaft, die Anleitung zum Programm [Spa00] *vorher* gelesen zu haben) und beginnen die Annäherung. Anschließend können Sie einen Full-Scan starten.

Während des Scannens werden Sie jetzt im linken Fenster “gezackte” Linien erkennen, dies ist der Linescan des rechts angezeigten Bildes. Um die Ergebnisse zu optimieren, versuchen Sie jetzt, den Verlauf der Linie so zu legen, daß er parallel zu x-Achse ist. Dies geschieht mit Hilfe von x-Slope und y-Slope (näheres s. Programmanleitung). Nun können Sie versuchen, durch Zoomen und Erhöhen der z-Auflösung ein deutlicheres Bild zu erzielen. Das Ändern der Werte des P- und I-Reglers ist auch hier hilfreich.

Um die Strukturen besser zu erkennen, sollten Sie die z-Skalierung so weit verkleinern, daß der Linescan mit maximaler Amplitude angezeigt wird. Da es sich bei der Probe um einen schlechten Leiter handelt, ist eine Tunnelspannung um 1 V die beste Wahl. Wenn der Kontrast des Scans schlecht ist, sollten Sie P- und I-Regler verändern, allerdings nur in kleinen Schritten. Warten Sie nach Änderungen dieser Parameter in jedem Fall einige Zeilen bis sich das STM eingeschwungen hat. Als guter Wert für P und I hat sich **11** herausgestellt. Beachten Sie aber auch den Parameter Time/Line (also die Zeit für einen Linescan), er sollte > 0.3 s sein.

Wenn Sie das Gitter erkennen können, messen Sie mit Hilfe des Programms die Kantenlänge aus und vergleichen sie mit den Angaben des Gitters. Eine Umeichung des STMs sollte nur unter Aufsicht des Betreuers erfolgen. Zusätzlich können Sie den Winkel zwischen den Kanten messen und so die Verzerrung bestimmen.

Graphit: Im Gegensatz zum Gitter muß die Graphitprobe präpariert werden, da wir auf dieser Probe atomare Auflösung erzielen wollen. Da die einzelnen Graphitschichten nur sehr schwach gebunden sind, können Sie mit einem Streifen Tesafilm die obersten Schichten leicht abziehen.

Die Tunnelspannung können Sie hier niedriger wählen, da die Leitfähigkeit von Graphit deutlich besser als die des Gittersubstrats ist. Die Leitfähigkeit von Graphit basiert auf der Tatsache, daß in den Netzebenen ein Elektronengas vorliegt (wie in Metallen). Senkrecht zu den Ebenen liegt kein Elektronengas vor, also auch keine Leitfähigkeit. Eine Tunnelspan-

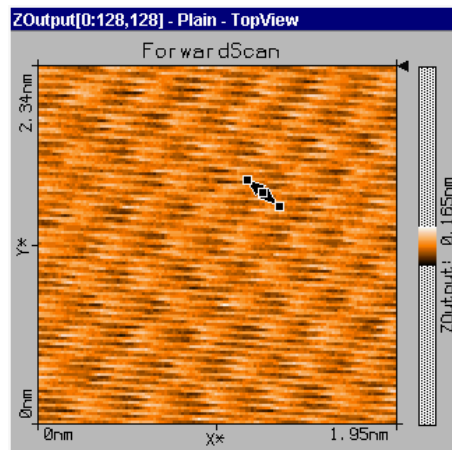


Abbildung 9: STM-Aufnahme auf Graphit

nung von $-0.3V \dots +0.3V$ liefert gute Bilder. Nachdem Sie weiter hineingezoomt haben, sollten Sie auch die Time/Line, also die Zeit für einen Linescan, niedriger setzen (< 0.1 s), damit die Auflösung sich verbessert.

Bei optimaler Auflösung sollten Sie ein regelmäßiges Muster auf dem Bildschirm erkennen (s. Abb. 9). Die hellen Bereiche an den Kreuzungspunkten sind die Kohlenstoff-Atome. Wenn Sie, wie im vorherigen Versuch, deren Abstand bestimmen, erhalten Sie die Gitterkonstante von Graphit. Der Literaturwert ist 0.242 nm. In Abbildung 8 haben Sie gesehen, daß es noch eine zweite Gitterkonstante für Graphit gibt, nämlich den Netzebenenabstand. Wenn Sie nun im Linescan den Abstand zwischen den obersten und den untersten Punkten bestimmen, werden Sie feststellen, daß dieser Wert viel kleiner als 0.6 nm ist. Daraus folgt, daß man mit dem STM die zweite Netzebene nicht mehr erkennen kann, da die Spitze nicht zwischen die Atome der ersten Lage eindringen kann.

Mit etwas Glück sehen Sie aber auf Ihrer Probe eine Stufenkante, an der sich dann der Netzebenenabstand bestimmen läßt.

Herstellung einer Goldschicht auf Glimmer: Zuerst müssen Sie ein Stück Glimmer von den bereitliegenden Plättchen abtrennen und mit Hilfe eines Skalpell die oberste Schicht abziehen. Den so präparierten Glimmer legen Sie nun in die Sputterkammer (und zwar mit der abgezogenen Seite nach oben). Die Kammer wird hermetisch versiegelt und evakuiert (nachdem die Pumpe ruhig läuft noch etwa 5 min warten). Das Sputtergerät wird dann auf volle Leistung geregelt (Output-Knopf). Damit der Sputterprozeß beginnt, muß jetzt der Druck in der Apparatur nachgeregelt werden. Dies geschieht mit Hilfe eines Nadelventils, das Luft nachströmen läßt. Beim langsamen Öffnen des Ventils sehen Sie eine Plasmaentladung, deren Stärke mit zunehmender Öffnung des Ventils ansteigt. Die höchste Sputterrate erhalten Sie, wenn Sie das Ventil wieder soweit schließen, daß die Entladung fast wieder erlischt (Sie sehen auf der Stromanzeige

ca. 8 - 10 mA).

Nach etwa 7-9 Min haben Sie eine hinreichend dicke Goldschicht erzeugt. Diese Schicht sollte deutlich als goldener Film erkennbar sein. Wenn Sie keine Schicht sehen, müssen Sie den Sputterprozeß nochmal durchführen. Um eine glattere Schicht zu erhalten, werden Sie nun die Probe tempern, also mehrfach durch eine Butan-Flamme ziehen. Achten Sie darauf, nur den blauen Teil der Flamme zu benutzen. Anschließend schrecken Sie die Probe in dest. Wasser ab.

Befestigen Sie nun den Glimmer am Probenhalter, am besten mit zweiseitig klebenden Pads. Da Glimmer nicht elektrisch leitend ist, müssen Sie noch einen Kontakt herstellen. Wir verwenden dazu flüssiges Leitsilber, den Sie einfach vom Rand der Probe zum Stahlrand verteilen.

Messung an Gold: Gehen Sie wie bei den letzten Messungen vor und versuchen Sie die Stufenhöhe zu bestimmen. Wie schon in Kap. 2.3 beschrieben, werden Sie wahrscheinlich keine lateral atomare Auflösung erzielen. Allerdings sollten Sie atomare Stufen erkennen und deren Höhe bestimmen können. Bestimmen Sie durch Linescans die Rauigkeit der Probe auf größerer Skala und die laterale Strukturgröße. Zeigen Sie mit Hilfe der Tunnelspektroskopie, daß die Probe metallisch ist.

5.2 Spitzen schneiden

Sollten Sie auch nach mehreren Versuchen keine gute Auflösung erzielen oder sollte das Annähern an die Probe mehrfach mißlingen, so ist es wahrscheinlich notwendig, eine neue Spitze zu schneiden.

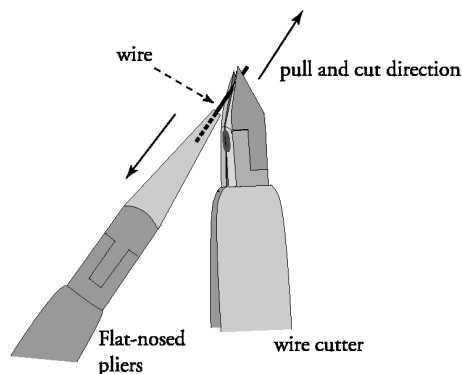


Abbildung 10: Präparation einer STM-Spitze

In Abbildung 10 sehen Sie den prinzipiellen Ablauf.

1. Legen Sie sich eine Flachzange, einen Seitenschneider und eine Pinzette bereit.

2. Reinigen Sie die Geräte mit Isopropanol.
3. Schneiden Sie ein 5 - 10 mm langes Stück Pt-Ir-Draht.
4. Halten Sie den Draht etwa zur Hälfte mit der Flachzange fest.
5. Setzen Sie den Seitenschneider unter sehr spitzen Winkel an, bis Sie Kontakt spüren.
6. Mit kräftigem Druck des Seitenschneiders reißen Sie jetzt den Draht ruckartig ab.
7. Nehmen Sie mit einer Pinzette den Draht aus der Flachzange. Berühren Sie die Spitze nicht und merken Sie sich welche Seite spitz ist.
8. Im STM sehen Sie zwei Golddrähte. In flachen Bereich der Golddrähte befindet sich ein kleines Loch, in dieses muß das stumpfe Ende der Spitze hinein.

Die Abbildung 11 zeigt eine Rasterelektronenmikroskopaufnahme der Spitze. Auch wenn das Abreißverfahren nicht hochtechnisiert ist, liefert es dennoch gute Spitzen.



Abbildung 11: REM-Aufnahme einer Spitze

6 Auswertung

Ihre Auswertung sollte enthalten:

- Ausdruck der aufgenommenen Bilder
 - Die Kalibrierungsdaten des STM
 - Die Gitterkonstante von Graphit
 - Das Tunnelspektrum von Gold, sowie Rauigkeit und Strukturgröße
 - Ein exaktes Protokoll ihrer Tätigkeit (z.B. Tunnelspannungen, Sputterzeit ...)
-

Literatur

- [Bar61] J. Bardeen. Tunneling from a many-particle point of view. *Physical Review Letters*, 6(2):57, 1961.
- [Fli00] T. Fließbach. *Quantenmechanik*. Spektrum, 2000.
- [Kaw97] Kawasaki. Sputter deposition of atomically flat au(111) films. *Surface Science*, 388:1121–1126, 1997.
- [Kit99] Ch. Kittel. *Einführung in die Festkörperphysik*. Oldenbourg Verlag, 1999.
- [Nan00] Nanosurf. *easyScan STM-System*, 2000.
- [Nog92] Nogues. Fractal dimension of thin film surfaces of gold. *Physica A*, 182:532–541, 1992.
- [Sem99] Wilson Semaltianos. Investigation of surface morphology.. *Thin Solid Films*, 366:111–116, 1999.
- [Spa00] F. Spanier. *Anleitung zum Meßprogramm Easyscan*, 2000.
-