



Rastertunnelmikroskop

Versuch Nr. 3

Vorbereitung - 19. November 2012

Ausgearbeitet von Martin Günther und Nils Braun

1 Theoretische Grundlagen

Die Rastertunnelmikroskopie ist eine Art der Mikroskopie, welche nicht durch Licht sondern durch Elektronenstrahlen funktioniert. Das Problem bei konventioneller Lichtmikroskopie liegt in der begrenzten Auflösung, welche durch Ernst Abbe zum ersten Mal mit der Lichtwellenlänge in Verbindung gebracht wurde. Die Ausnutzung kleinerer Wellenlängen (wie Röntgenstrahlen) scheitert in erster Linie an den nicht vorhandenen Linsensystemen.

Ein Ausweg bietet - neben anderen Elektronenmikroskopen die vielfach nach ähnlichen Prinzipien wie die Lichtmikroskopie funktionieren - die Rastertunnelmikroskope. Hier wird genauer gesagt kein Transmissionsbild sondern eine Oberflächentopografie erstellt. Dazu wird eine sehr dünne Spitze wenige Ångström über der Probe gehalten. Eine geringe Spannung unter 1 V zwischen Spitze und Probe führt zu Tunneleffekten zwischen Probe und Spitze. Die beiden Materialien liegen nämlich auf verschiedenen Fermi-niveausⁱ. Die Spannung führt zu einer Überhöhung eines Niveaus und damit zu einer endlichen Wahrscheinlichkeit des Tunnelnsⁱⁱ für ein Elektron. Wie einfache Berechnungen (zum Beispiel an einer Potentialbarriere) ergeben, geht die Tunnelwahrscheinlichkeit und damit auch der Tunnelstrom negativ exponentiell mit dem Abstand zwischen Spitze und Probe. Der Tunnelstrom ist also ein sehr präziser Abstandsmesser.

ⁱIn der Fermistatistik können zwei Fermionen nicht den selben Zustand einnehmen (Pauli-Prinzip). Deshalb haben die energetisch höchsten Elektronen auch im Grundzustand des Materials eine endliche nullverschiedene Energie.

ⁱⁱTunnel wäre im klassischen Sinne gar nicht möglich. Es entsteht durch das exponentiell abfallende Eindringen der Wellenfunktion in ein endliches Potential. Die Wahrscheinlichkeit das Teilchen am anderen Ende zu messen ist damit ungleich Null.

ⁱⁱⁱAuf dem zu untersuchende angereicherte Gase oder Flüssigkeiten nennt man Adsorbanten.

$$I = I_0 e^{-2\kappa z} \quad \kappa = \sqrt{\frac{2m_e}{\hbar^2} \phi}$$

mit dem Abstand z und verbleibenden Potentialbarriere ϕ . Aus der Steigung lässt sich der Faktor κ und daraus die Potentialdifferenz errechnen.

Diese einfache Betrachtung für den eindimensionalen Fall lässt sich nur bedingt auf den viel komplizierteren dreidimensionalen Fall mit ausgedehnter Spitze übertragen. Auch hier sehen wir die schon bekannte Abhängigkeit des Stroms vom Abstand. Für kleine angelegte Spannungen ist der Strom näherungsweise proportional zur Spannung (eine Art Ohmsches Gesetz). Weiterhin hängt der Strom nicht nur vom Abstand, sondern auch von der Elektronendichte im Material ab. Punkte mit konstantem Strom haben also nicht nur einen konstanten Abstand von der Messspitze, sondern auch eine gleiche Elektronendichte. Wichtig ist jedoch auch zu sehen, dass diese beiden Effekte zu Bildfehlern führen können. So zeigen so genannte Adsorbatenⁱⁱⁱ zu Bildfehlern in der Art, dass der Abstand zum Material anders gemessen wird als er eigentlich erwartet wird.

Betreibt man - wie in unserem Experiment - das Rastertunnelmikroskop an Luft und nicht im Vakuum, so kommt noch ein weiterer Effekt hinzu: Zwischen Spitze und Probe befindet sich eine dünne Kontaminationsschicht. Nähert sich die Spitze der Probe, wird diese zusammengedrückt und drückt damit auf die Spitze. Die Hö-

he ist also größer als erwartet und damit der Tunnelstrom (und vor allem seine Ableitung) kleiner. Somit wird der Faktor κ falsch eingeschätzt - die Potentialdifferenz sinkt scheinbar. Zur Messung wird die Spitze durch Piezostellelemente über die Probe gezogen. Die Höhe wird dabei immer so geregelt, dass der Tunnelstrom (also damit der Abstand zur Probe) gleich bleibt. Bei einem Tunnelstrom von ungefähr 1 nA fließen zum Beispiel

$$N = \frac{I \cdot t}{e} = 6.24 \cdot 10^9$$

Elektronen pro Sekunde zwischen Material und Spitze. Es entsteht ein präzises Oberflächenbild mit einer Auflösung von 0.01 Å vertikal und 2 Å lateral (Abhängig von der Genauigkeit der Stellelemente). Die Genauigkeit wird von der Tatsache getrübt, dass die Spitze keine scharfe Kante aufzeigt sondern kugelförmig ist. Somit werden zum Beispiel scharfe Kanten im Material abgeschwächt.

2 Untersuchte Materialien und Effekte

Da die Genauigkeit stark von den piezoelektrischen Elementen abhängt und diese nur eine eingeschränkte Bewegungsfreiheit besitzen, dürfen die untersuchten Materialien nur eine Rauigkeit im Ångströmbereich aufweisen.

In Metallen (in diesem Versuch werden Edelmetalle verwendet aufgrund ihrer fehlenden Oxidation an Luft) ist das Leitungsband schon im Grundzustand durch die Fermiverteilung besetzt. Es ist deshalb einfach, Elektronen her-

auszulösen. Metalle lassen sich somit sehr gut mit einem RTM untersuchen. Isolatoren hingegen haben einen zu großen Abstand zwischen dem energetisch am höchsten besetzten Band und dem Leitungsband. Die Elektronen können deshalb nicht so einfach in die Spitze tunneln. Isolatoren sind nicht mit einem RTM zu untersuchen.^{iv}

Es bietet sich an neben den besprochenen bildähnlichen Abbildungen der Oberflächen der Materialien zur Untersuchung auch noch ganz einfache Strom-Spannungskennlinien aufgenommen werden. Bei wenig Änderung zwischen den einzelnen Kurven (welche hintereinander aufgenommen werden) kann auf einen stabilen Tunnelkontakt geschlossen werden. Weiterhin kann durch die Variation der Spannung die Energie der Tunnelelektronen manipuliert werden. Bei den untersuchten Metallen sollten die Energieniveaus kontinuierlich verteilt sein. Bei einer kontaminierten Spitze jedoch werden die Niveaus verändert (am Fermi-niveau besitzt solch eine isolierende Schicht natürlich keine Zustände). Dies ist in einem Plateau in der Strom-Spannungskurve zu sehen.

Eine Strom-Abstandskurve kann (wie oben beschrieben) Rückschlüsse auf die lokale Potentialdifferenz geben.

2.1 Graphit

Graphit ist ein geschichtetes Material aus Kohlenstoffatomen in einer hexagonalen Struktur (Abstand zwischen übernächsten Atomen ca 2.46 Å). Die einzelnen Schichten sind dabei gegeneinander versetzt. Die Kohlenstoffatome sind

^{iv}Die letzte noch fehlende Klasse von Materialien sind die Halbleiter. Sie sind bedingt für Untersuchungen nutzbar. Trotzdem bieten sie aufgrund ihrer interessanten Eigenschaften viele Themen für die moderne Forschung.

sp^2 hybridisiert - diese drei Valenzelektronen führen zur Bindung der Atome untereinander, das letzte verbleibende Elektron bildet einen Teil des Leitungsbandes. Graphit ist niederomig und bildet keine aus der Grenzfläche herausragenden Valenzelektronen an denen sich Verunreinigungen absetzen könnten. Es ist somit ein passendes RTM-Material. Weiterhin sind die einzelnen Schichten nur durch Van-der-Waals-Kräfte gebunden, was eine Schichtenablösung mit einem einfachen Klebestreifen möglich macht. Weiterhin kann man aufgrund der sehr guten Regelmäßigkeit im Gitter sogar eine Eichung der x - und y -Bewegung an Graphit durchführen.

Aufgrund der versetzt hexagonalen Schichtung haben jeweils abwechseln die Atome einer Schicht ein anderes Kohlenstoffatom unter sich oder eben nicht. Man unterscheidet zwischen den α Atomen und den β Atomen. Die beiden Atomsorten haben natürlich eine andere Wellenfunktion und damit eine andere Reaktion im Tunnelverhalten. Tatsächlich sieht man auf einem RTM-Bild nur die β -Atome (das sind die mit den Atomen erst in der übernächsten Schicht).

2.2 Gold

Das zweite zu untersuchende Material ist Gold. Auch Gold lässt sich als Edelmetall sehr gut mit einem Luft-RTM untersuchen, da es nur im geringen Maß mit Luftmolekülen reagiert. Gold bildet ein kubisch flächenzentriertes Kristallgitter aus. Dabei sind die Elektronen im Leitungsband nahezu delokalisiert und bilden deshalb keine diskrete Zustandsdichte aus wie zum Beispiel die Kohlestoffatome beim Graphit. Des-

halb ist bei Gold die atomare Auflösung viel schwieriger zu erhalten.

Da zur Untersuchung nur Flächen mit geringen Höhenunterschieden in Frage kommen, muss das Gold diese flachen Oberflächen aufweisen. Entweder man verwendet sehr teure Goldeinkristalle oder man dampft Gold auf. Dabei entstehen Schichten mit einer Körngröße von ungefähr 300 Å und einer Kornhöhe von ungefähr 100 Å. Nach dem Aufdampfen wird das Gold stark erhitzt (zum Beispiel mit einem Bunsenbrenner auf 600 - 700 °C). Die dadurch zugeführte thermische Energie lässt die Goldatome die energetisch günstigere flache Struktur ausbilden. Die einzelnen Sektionen sind bevorzugt in (111)-Richtung orientiert und haben einen Netzebenenabstand von 2.4 Å. Dieser Abstand ist so gut messbar, dass daran sogar die Eichung in z -Richtung durchgeführt werden kann.

2.3 Bildfehler

Es gibt einige Bildfehler beim RTM, welche elektrischer oder mechanischer Natur sind. Viele davon können schon im Versuch vermieden werden.

Die verwendeten Piezoelemente vergrößern sich bei angelegter Spannung (beziehungsweise ziehen sich zusammen in die andere Richtung). Dieser Prozess ist jedoch nicht linear, sondern zeigt stattdessen eine Art Hysterese. Deshalb sollten die angelegten Feldstärken so gering wie möglich gehalten werden. Weiterhin passiert die Längenänderung nicht in Nullzeit. Das Piezoelement "kriecht" auch noch nach einiger vergangener Zeit nach. Die Bewegung gleicht mehr einem begrenzten Wachstum. Deshalb muss nach einer Längenänderung das Gerät erst sozusagen zur

Ruhe kommen gelassen werden.

Weiterhin steht das RTM in einer bewegten Umgebung. Sowohl das Gebäude, als auch seine Umgebung im Zimmer können zu Schwingungen führen. Auch Schall und die dadurch zu Schwingungen angeregten Luftmoleküle können zu scheinbaren Sprüngen aufgrund der Schwingung der Tunnelspitze im Bild führen. Deshalb montiert man ein RTM (wie in diesem Fall auch) meist auf einer schweren Metallplatte, welche auf Federn mit großer Dämpfung aufgehängt ist. Zu den genannten mechanischen Bildartefakten kommen auch noch einige elektrische. Ne-

ben den schon genannten Schwierigkeiten in der endlichen Ausdehnung der Spitze kommen auch noch Effekte wie zum Beispiel Fehler in der Digital-Analog-Wandlung oder der Datenverarbeitung. Ein letzter hier genannter Effekt sind die Mehrfachspiten, was zu Geisterbildern und Mehrfachabbildungen führt.

Quellen

”**Blaues Buch**”
wikipedia.de