

Een microscoop gebaseerd op kwantum-tunnelen

Het kwantummechanisch effect van elektron-tunneling kan gebruikt als basisprincipe van een microscoop. Zo'n microscoop staat bekend als een *scanning tunneling microscoop* (STM) en je kunt er atomen mee zien. Daarnaast kun je er de elektrische eigenschappen van een materiaal op de atomaire schaal mee onderzoeken. In dit experiment leer je hoe een STM werkt en zul je er zelf een aantal experimenten mee doen.

1 Doel van het experiment

Jullie maken kennis met het kwantummechanische fenomeen tunnelen en zien hoe het in de praktijk gebruikt kan worden voor onderzoek aan materialen. Jullie zullen de structuur van een dun laagje goud onderzoeken, en vaststellen hoe de tunnelstroom afhangt van de afstand.

2 Achtergrond

Stel, je hebt een elektrische schakeling om een lampje te laten branden. Wanneer het lichtknopje op 'uit' staat, zijn de twee contacten van de schakelaar niet met elkaar verbonden, de stroomkring is onderbroken. Uit ervaring weten we dat er in zo'n geval geen stroom loopt. Een vraag die je kunt stellen is: 'Wat gebeurt er wanneer de afstand tussen de twee contacten heel klein is?' Loopt er geen stroom loopt totdat de contacten elkaar raken, of is het mogelijk dat er bij een kleine afstand toch al een kleine stroom loopt?

Natuurkundig gezien kun je de twee contacten opvatten als twee energieputten elektronen in opgesloten zitten. Uit de kwantummechanica blijkt dat wanneer twee van zulke energieputten dicht bij elkaar in de buurt komen (denk aan een nanometer), maar elkaar nog niet raken, er een kans is dat een elektron van de ene put naar de andere kan 'tunnelen'. Met andere woorden, vanwege dit kwantummechanische effect kan er een stroompje lopen in een stroomkring *zonder* dat de twee contacten elkaar fysiek raken. Men kan laten zien dat de stroom die in zo'n circuit loopt exponentieel afhankelijk is van de afstand tussen de twee contacten:

$$I(z) = I_0 e^{-2\kappa z}. \quad (1)$$

Hierbij is z de afstand tussen de twee contacten. De constante κ heeft een waarde van ongeveer 1.1\AA . Dit betekent dat de stroom toeneemt met een factor $e^{2.2} \approx 9$ wanneer de afstand tussen de

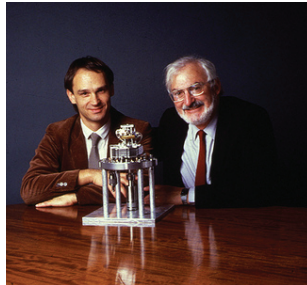


Figure 1: Gerd Binnig (links) en Heinrich Rohrer (rechts) met de door hen gebouwde scanning tunneling microscoop. De foto komt van de website van IBM: <http://www.research.ibm.com/articles/heinrich-rohrer.shtml>.

twee energieputten 1 \AA kleiner wordt. Omgekeerd neemt de stroom af wanneer de afstand groter wordt.

Rond 1980 realiseerden Gerd Binnig en Heinrich Rohrer (Figuur 1), toen werkzaam bij IBM, zich dat dit effect kan worden gebruikt om een microscoop mee te maken waarmee je atomen kunt zien. In 1986 kregen ze de Nobelprijs in de Natuurkunde voor de ontwikkeling van deze scanning tunneling microscoop. Hun idee was om een atomaire scherpe naald, dat wil zeggen dat de punt van de naald bestaat uit 1 atoom, dicht in de buurt van een oppervlak te brengen (Figuur 2a) totdat er een vooraf ingestelde stroom gaat lopen, zeg 100 pA. De volgende stap is om de naald langzaam zijwaarts te laten bewegen.

Oppervlakken zijn echter nooit helemaal vlak op de atomaire schaal. Er liggen altijd wel losse atomen of moleculen op, of er zijn atomaire stappen op het oppervlak. De afstand tussen oppervlak en naald verspringt in zo'n geval met ongeveer een atoomdiameter, dat is een afstand in de orde van enkele \AA . Wanneer de naald over zo'n extra atoom of molecuul heen schuift, zal de stroom dus toenemen (Figuur 2b). Er is echter een regelmechanisme dat de hoogte van de naald zo aanpast dat de tunnelstroom constant gehouden wordt. In dit geval zal dit zogenaamde 'feedbackmechanisme', de naald iets terugtrekken (Figuur 2c). Deze verandering in de positie van de naald kan nauwkeurig bepaald worden.

Zodra de naald zich niet meer boven zo'n molecuul bevindt, is de afstand plots groter, wat resulteert in een lagere tunnelstroom (Figuur 2d). In respons op deze verandering brengt het regelmechanisme de naald weer dicht naar het oppervlak. Door de naald rij voor rij het oppervlak te laten aftasten, kan een afbeelding van het oppervlak worden gemaakt (Figuur 2e). Indien de naald goed scherp is, kun je met een STM individuele atomen zien. Meer informatie over een STM is te vinden op de wikipedia pagina [1].

3 Oppervlaktescan van een goudlaagje

Voor de experimenten zullen jullie gebruik maken van een Nanosurf NainoSTM. De microscoop wordt aangestuurd door een computer. Bij het experiment krijg je de Nanosurf NainoSTM Operating Instructions. Om je bekend te maken met de opstelling en de software om te bedienen, lees je van tevoren delen van de handleiding.

- Hoofdstuk 18 bevat wat algemene informatie over de meettechniek.
- Hoofdstuk 1, met wat algemene informatie en de naamgeving van de verschillende onderdelen van de opstelling;
- In Sectie 4.3 wordt uitgelegd hoe je met de naald voorzichtig het oppervlak benadert. Dit gebeurt in drie stappen: handmatig, met grote stappen, en met kleine stappen. Als de indicator onderin het scherm groen is, dan heb je "contact"!
Let op! Zorg ervoor dat je de naald nooit in het oppervlak boort! Deze wordt dan onbruikbaar en moet worden vervangen, wat minstens een half uur gaat duren. Verder experimenteren is dan gegeven de beschikbare tijd nagenoeg onmogelijk
- Sectie 4.4 Legt uit hoe je een meting kunt starten, en Sectie 4.5 hoe je een interessant deel van de eerste scan kunt bekijken voor een detailopname.
- Sectie 4.5.3 legt uit hoe je een oppervlaktescan van een stukje goud kunt maken.
- Secties 4.6 en 4.7 beschrijven opslaan en rapporteren van een meting die je hebt gedaan

De practicumstaf zorgt ervoor dat er zich een naald en een goudsample in de microscoop bevinden, en dat de goede *default*-instellingen zijn geladen. Stel vooral vragen wanneer je niet duidelijk is waar een bepaalde instelling voor dient, of hoe je een bepaalde weergave of handeling kunt bereiken.

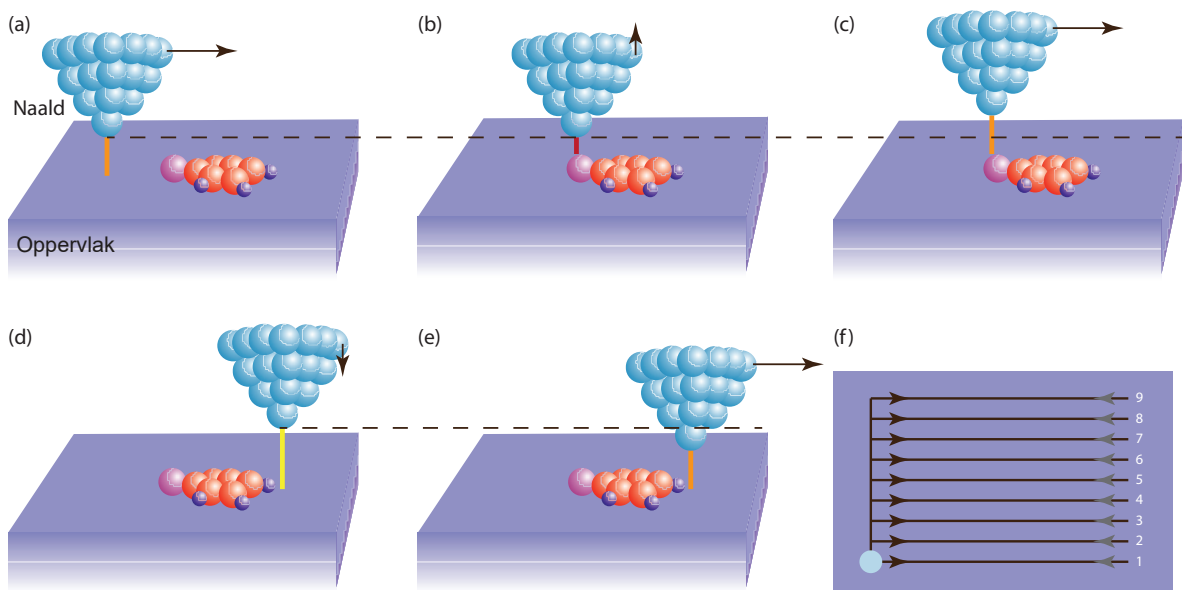


Figure 2: (a) De naald wordt naar het oppervlak gebracht, totdat de tunnelstroom een bepaalde waarde heeft (oranje). (b) Wanneer de naald boven een atoom/molecuul komt, wordt de afstand kleiner, wat voor een toename in de stroom zorgt (rood). (c) Het regelmechanisme trekt de naald net zo lang terug totdat de stroom weer de gewenste waarde heeft (oranje). Vergelijk de positie van de naald boven het oppervlak met behulp van de stippellijn. (d) Wanneer de afstand toeneemt, wordt de tunnelstroom kleiner (licht geel). (e) Het regelmechanisme verkleint de afstand tot de tunnelstroom weer de gewenste waarde heeft (oranje). (f) Bovenanzicht. De naald (lichtblauw) beweegt naar rechts langs lijn 1 en weer terug langs dezelfde lijn. Vervolgens verschuift de naald een stukje in de verticale richting en beweegt langs lijn 2, etc. Op deze manier wordt een afbeelding van het oppervlak gemaakt.

Het is beter om tijdens het experiment de labtafel zo min mogelijk te verstoren, en niet te luide geluiden te maken; dit zorgt voor waarneembare ruis in de opnames.

3.1 Onderzoeksvraag

Wanneer je een opname maakt van een dun goudlaagje, dan zul je zien dat het oppervlak plateaus heeft. Die plateaus zijn gebieden waar je naar dezelfde atomaire laag kijkt. Uit de grootte van een stap tussen plateaus kun je daarom de atomaire afstand afleiden.

- Neem een aantal STM-scans van een dun goudlaagje. Probeer een aantal verschillende scan-groottes uit. Vergeet niet het aantal pixels aan te passen. Beantwoord op basis van je resultaten de volgende vragen: Hoe groot zijn de atomaire stappen? Komt dit overeen met de literatuurwaarde van 2.35 \AA ?

4 Tunnelstroom als functie van afstand naald-oppervlak

Wanneer er tijd is, kun je het volgende experiment uitvoeren.

In bovenstaand experiment gebruik je de STM in zogenaamde Constant Current mode. Hierbij houdt het regelsysteem de stroom tussen oppervlak en naald constant en corrigeert het dus voor veranderingen in de oppervlaktestructuur. De STM heeft ook een Spectroscopy mode. Hierin wordt de afstand tussen naald en oppervlak variabel, maar wordt geen scan gemaakt over het oppervlak (je kijkt naar één plekje op het oppervlak).

Lees Sectie 11.2 over de Spectroscopy Wizard. Met Tip Current-Distance Curve kun je de tunnelstroom als functie van de afstand bepalen.

4.1 Onderzoeksvragen

- Zorg ervoor dat er niet gescand wordt en start de Spectroscopy Wizard. Kies de afstand tot het oppervlak waarvandaan je wilt starten. Met de standaardparameters wordt dan in 256 stappen richting het oppervlak gelopen, tot een maximale tunnelstroom die voorkomt dat je de naald in het oppervlak boort.
- Meet de stroom als functie van de afstand tussen naald en oppervlak. Herhaal het experiment tot je een goede startafstand hebt ingesteld. Je kunt ook een andere plek op het oppervlak kiezen als je op de huidige plek geen goede resultaten behaalt.
- Lukt het niet om een goede opname te maken? Roep dan een assistent of docent erbij.
- Als je een goede dataset (of meer) hebt verzameld, bepaal dan of vergelijking 1 klopt. Bepaal de waarde van κ (dit kan door de dataset buiten het programma te analyseren, maar je kunt hem ook ruwweg afschatten uit het gemeten profiel).

References

- [1] De Wikipedia pagina over STM. https://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_tunneling_microscope