



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## Low-energy electron microscopy on two-dimensional systems : growth, potentiometry and band structure mapping

Kautz, J.

### Citation

Kautz, J. (2015, April 30). *Low-energy electron microscopy on two-dimensional systems : growth, potentiometry and band structure mapping*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/32852>

Version: Corrected Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/32852>

**Note:** To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/32852> holds various files of this Leiden University dissertation

**Author:** Kautz, Jaap

**Title:** Low-energy electron microscopy on two-dimensional systems : growth, potentiometry and band structure mapping

**Issue Date:** 2015-04-30

# Samenvatting

Sinds de ontwikkeling van Lage-Energie-Elektronenmicroscopie (LEEM) in de jaren 80 van de twintigste eeuw, wordt deze techniek intensief gebruikt voor het bestuderen van oppervlakken. De werking van een LEEM is vergelijkbaar met die van een optische microscoop. In plaats van licht, worden echter elektronen gebruikt. Het monster wordt beschoten met een loodrecht invallende parallelle bundel elektronen en de gereflecteerde elektronen worden geprojecteerd op een gepixelde detector waarmee een afbeelding gevormd wordt. De inkomende en gereflecteerde bundel worden van elkaar gescheiden middels gekoppelde magnetische prisma's. We kunnen de landingsenergie van de elektronen zo instellen dat ze enkel gevoelig zijn voor de eerste paar atomaire lagen van het monster. In eerste instantie waren de voornaamste toepassingen van LEEM dan ook te vinden in de oppervlaktefysica. Het eerste deel van dit proefschrift behandelt twee onderwerpen die tot dit vakgebied behoren. In het tweede deel, nemen we afstand van de pure oppervlaktefysica en introduceren twee nieuwe toepassingen voor LEEM.

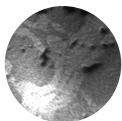
Hoofdstuk 2 behandelt de groei van atomaire (sub)monolagen van goud op silicium, d.w.z. Si(111). Bij lage goudbedekkingen vormt zich een structuur met een  $(5 \times 2)$ -symmetrie. Bij hogere goudbedekkingen wordt een structuur met een  $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$  symmetrie gevormd. Via een combinatie van LEEM experimenten, Lage-Energie-Elektronendiffractie (LEED) en Medium-Energie-Ionenverstrooiing (MEIS), hebben we het fasediagram van dit systeem bepaald. Het meest interessante aspect van het gevonden fasediagram is dat de goudbedekking van de  $(5 \times 2)$ -structuur niet 0.6 is, zoals eerder werd aangenomen, maar varieert tussen  $0.65 \pm 0.02$  en  $0.67 \pm 0.01$  afhankelijk van de omgevingsstructuren. Dit op het eerste gezicht kleine verschil betekent dat het atomaire model van de  $(5 \times 2)$ -structuur compleet herzien moest worden. Naar aanleiding van onze bevindingen is er door Kwon and Kang een nieuw structuurmodel ontwikkeld.

Na deze grondige verkenning van het Au-Si-systeem, beschrijven we in hoofdstuk 3 het gedrag van deze (sub)monolagen bij blootstelling aan alkaanthiolen. De reactie van alkaanthiolen met bulk Au-kristallen is al vele jaren onderwerp van wetenschappelijk onderzoek. De alkaanthiolen vormen in dat geval uit zichzelf een monolaag op het Au-oppervlak, een zogenaamde "Self

Assembled Monolayer” (SAM). We verwachtten dan ook dat wanneer we de Au-(sub)monolagen blootstellen aan alkaanthiolen, er een soortgelijk effect zou optreden. Onze hypothese was dat de  $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$ -structuur, die meer Au-atomen bevat, in dit geval sterker zou reageren dan de  $(5 \times 2)$ -structuur. De resultaten lieten echter iets totaal anders zien. De alkaanthiolen bleken geen enkele reactie te vertonen met de  $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$ -structuur. De  $(5 \times 2)$ -structuur daarentegen, werd compleet afgebroken door de alkaanthiolen. In tegenstelling tot onze verwachtingen, werd dit proces gedreven door een reactie met de Si-atomen in de  $(5 \times 2)$ -structuur in plaats van met de Au-atomen. De Au-atomen werden juist verdreven uit de reactiecentra. De hierdoor veroorzaakte verhoging van de Au-concentratie in de omliggende gebieden resulteerde in een omzetting van de  $(5 \times 2)$ -structuur naar de  $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})$ -structuur aldaar.

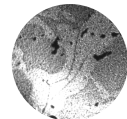
In het tweede deel van het proefschrift nemen we afstand van de pure oppervlaktefysica en creëren we twee nieuwe toepassingen voor LEEM. Met de eerste toepassing, Lage-Energie-Elektronenpotentiometrie (LEEP), brengen we elektrische geleiding in beeld. In het algemeen wordt voor geleidingsmetingen een 2- of 4-puntsmeting gebruikt. Deze manier van meten heeft als nadeel dat enkel de gemiddelde geleiding van een object bepaald kan worden. Met LEEP daarentegen kunnen we op elke positie van het oppervlak de elektrische potentiaal meten en daarmee lokaal de geleidingseigenschappen bepalen. Het principe van LEEP is gebaseerd op de invloed van de lokale potentiaal op de landingsenergie van de elektronen. Wanneer er op het oppervlak een sterke negatieve spanning staat, zullen de elektronen worden afgestoten en gereflecteerd voordat ze het oppervlak raken. De reflectiviteit is dan maximaal. Bij een positievere spanning hebben de elektronen genoeg energie om het oppervlak te bereiken en daar verstrooid te worden. Dit leidt tot een gereduceerde reflectiviteit. Wanneer we de potentiaal van het oppervlak variëren van een negatieve spanning naar een positievere spanning, is er dus een overgang van hoge naar lage reflectiviteit. De spanning waar deze overgang plaatsvindt, dus daar waar de landingsenergie van de elektronen 0 eV is, noemen we de spiegelovergangsspanning. Wanneer het gehele oppervlak eenzelfde spanning heeft, zal deze spiegelovergang op het hele oppervlak tegelijk plaatsvinden. Echter, wanneer er op het oppervlak spanningsverschillen aanwezig zijn, wordt de spiegelovergangsspanning positieafhankelijk. Uit de lokale waarde van de spiegelovergangsspanning kan vervolgens het lokale voltage afgeleid worden. Deze specifieke vorm van LEEP noemen we “Mirror-Mode LEEP” of M-LEEP. We hebben de werking van M-LEEP gedemonstreerd in hoofdstuk 4 door het Schottkygedrag van een Au-Si-Au-junctie te visualiseren.

In hoofdstuk 5 laten we zien dat we voor een speciale categorie monsters een hogere resolutie kunnen halen in LEEP experimenten. Voor gelaagde



tweedimensionale materialen is de reflectiviteit namelijk ook boven de spiegelovergangsspanning sterk afhankelijk van de landingsenergie van de elektronen. Deze energieafhankelijkheid wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van onbezette elektronentoestanden tussen de atomaire lagen. Wanneer de landingsenergie van een elektron overeenkomt met de energie van een van deze tussenlaagse toestanden, kan het elektron geabsorbeerd worden. Als nu de spanning van het object gevarieerd wordt, is er een minimum in de reflectiviteit bij die resonante landingsenergie. Het aantal minima in de reflectiviteit correspondeert dus met het aantal tussenlaagse toestanden. Wederom geldt, dat wanneer het gehele oppervlak dezelfde spanning heeft, deze minima op het hele oppervlak tegelijk zichtbaar zijn. Echter, wanneer er spanningsverschillen aanwezig zijn op het oppervlak, zal de spanning waarvoor een minimum zichtbaar is, positieafhankelijk zijn. Uit deze verschuiving van de minima kan vervolgens de lokale potentiaal bepaald worden. We hebben deze techniek, Resonante LEEP (R-LEEP), gebruikt om de geleiding van een monster met een wisselend aantal lagen grafen te karakteriseren. Het resultaat is te zien door al bladerend de figuren onderaan de pagina's te bekijken. De even pagina's laten de energieafhankelijk zien bij een oppervlak met een constante potentiaal. Er is een wisselend contrast zichtbaar tussen gebieden met ongelijke laagdiktes en dus een ander aantal tussenlaagse toestanden. Echter, gebieden met dezelfde dikte hebben binnen één afbeelding telkens dezelfde intensiteit. Dit verandert wanneer we een laterale spanning over het sample aanbrengen. Dit is te zien op de oneven pagina's die wederom de energieafhankelijkheid van de reflectiviteit laten zien, maar nu met een aangebracht spanningsverschil. De overgangen van licht naar donker gebeuren niet langer over het gehele oppervlak tegelijk, maar bewegen als golven over het oppervlak. Uit deze resultaten kunnen we op ieder punt de lokale potentiaal afleiden (zie 5.4). Uit deze figuur blijkt dat er een verhoogde weerstand is bij overgangen tussen verschillende laagdiktes. Verrassend genoeg hadden de stappen in het onderliggende SiC substraat geen meetbare invloed op de geleiding.

Tot slot hebben we in hoofdstuk 6 de invloed van laterale elektrische velden op de potentiometrie resultaten geanalyseerd. Door het aanbrengen van een veld parallel aan het oppervlak van het monster, arriveren de elektronen niet langer onder loodrechte inval op het oppervlak. Om te analyseren hoe groot deze invloed is, hebben we de elektronentrajecten gesimuleerd. Deze gewijzigde hoek van inval heeft ook invloed op de reflectiviteit. Voor de M-LEEP resultaten is de invloed van het laterale veld direct af te leiden uit de impuls in het vlak bij landing via de vacuümdispersierelatie. Voor de invloed van de gewijzigde hoek van inval op de R-LEEP resultaten hebben we een aparte set experimenten uitgevoerd. Door de impuls parallel aan het oppervlak te



variëren en de reflectiviteit te meten, kan de invloed van het laterale veld afgeschat worden. Deze metingen gaven echter een zo mogelijk nog fascinerender resultaat. Doordat voor de inkoppeling van de elektronen in de tussenlaagse toestanden geldt dat de laterale impuls behouden blijft, geven onze resultaten direct weer wat de impulsafhankelijkheid is van de energie van deze onbezette toestanden. Hiermee hebben we een nieuwe techniek gecreëerd om de dispersierelatie van onbezette toestanden in tweedimensionale gelaagde materialen te bepalen.

