



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Low energy electron transmission through layered materials and chiral organic films

Neu, P.S.

Citation

Neu, P. S. (2024, June 12). *Low energy electron transmission through layered materials and chiral organic films*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3762501>

Version: 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/1887/3762501>

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

SAMENVATTING

Moleculen, kristalstructuren en virussen zijn te klein om met het blote oog te zien. Toch hebben ze een enorme invloed op ons dagelijks leven. Om deze microkosmos op een steeds kleinere schaal te verkennen werden microscopen uitgevonden. Als we aan microscopen denken, bedoelen we meestal lichtmicroscopen. We kunnen echter ook elektronenmicroscopen gebruiken. Hiermee kunnen we andere eigenschappen en kleinere lengteschalen te onderzoeken dan met conventionele lichtmicroscopen. In dit proefschrift zullen we herhaaldelijk parallellen tussen elektron- en lichtgolven trekken, omdat elektronen zich als kwantummechanische golven gedragen.

In plaats van een monster te belichten met licht en te meten wat wordt weerkaatst en/of doorgelaten, sturen wij elektronen naar het monster en meten we hoe de elektronen worden gereflecteerd of doorgelaten. Dit doen we in onze lage-energie elektronenmicroscop (LEEM). In plaats van de kleur te meten, d.w.z. de golflengte van het licht, kunnen wij de elektronenenergie meten (en instellen), die gerelateerd is aan de kwantummechanische golflengte van het elektron. Bij zowel licht- als elektronenmicroscopie noemen we een meting van intensiteit als functie van golflengte (of energie) een spectrum.

De spectra van dunne materialen in deze studie kunnen grotendeels worden begrepen door middel van interferentie, een ander concept dat we kennen uit de optica. Optische interferentie beantwoordt vragen als: Waarom verschijnen zeepbellen in alle kleuren van de regenboog, ook al zijn ze gemaakt van een kleurloze zeepoplossing? Het antwoord is dat de wanddikte van een zeepbel een paar honderd nanometer is, wat dicht bij de golflengte van het licht komt. Wanneer het licht tussen de voor- en achterkant van de zeepbelwand heen en weer wordt gekaatst, worden sommige golflengtes die overeenkomen met (tweemaal) de optische weglengte bij voorkeur doorgelaten, terwijl andere golflengtes worden gereflecteerd. Hetzelfde geldt voor onze dunne monsters en de golflengte van de elektronen, zij het dat de lengteschaal nu minder dan één nanometer is. De elektronenergieën die we hiervoor gebruiken liggen tussen de 0 en 25 eV wat zeer laag is voor een elektronenmicroscop. Vandaar de keuze voor LEEM.

Grafeen is een kristallijne laag koolstof van slechts één atoom dik. Als we twee lagen grafeen hebben, interfereert de golf van het elektron dat tussen deze lagen heen en weer kaatst net zoals de lichtgolf in een zeepbelwand. Door de elektronenenergie en dus de elektronengolflengte te variëren, kunnen we de spectra meten en we zien een karakteristiek reflectieminimum en transmissiemaximum op 2,5 eV boven het vacuümniveau. Als er meer lagen grafeen worden

toegevoegd, splitsen deze extremen zich en geven ze een spectrale vingerafdruk van het aantal lagen. De intensiteit en breedte van deze spectrale kenmerken zijn gerelateerd aan de waarschijnlijkheid dat het elektron inelastisch (d.w.z. met verlies van energie) uit zijn baan wordt geworpen. Deze inelastische verstrooiing wordt gekarakteriseerd door de inelastische gemiddelde vrije weglengte, die we in hoofdstuk 3 bepalen. De inelastische gemiddelde vrije weglengte geeft aan hoe ver een elektron gemiddeld vliegt voordat het iets raakt en energie verliest. Hoe vaker het elektron heen en weer botst tussen de lagen zonder verstoord te worden, hoe scherper de kenmerken in het spectrum. In optische termen: de finesse van de optische resonator (in de optica is dat het licht dat heen en weer kaatst tussen twee spiegels) neemt toe met de levensduur van de resonantietoestand.

We passen dit interferentiemodel toe op verschillende tweedimensionale materialen, van geleidend grafeen tot isolerend hexagonaal boornitride (hBN) en halfgeleidend molybdeendisulfide (MoS_2). MoS_2 verschilt van grafeen en hBN doordat de molybdeenatomen zich in een laag bevinden, die van boven en onder wordt omsloten ('gesandwich') door een laag zwavelatomen. Daarom zijn de monsters van twee- en drielaags MoS_2 , die we in hoofdstuk 5 meten al relatief dik in verhouding tot drie lagen grafeen. Een vergelijking met berekende reflectie- en transmissiespectra laat zien dat we de interacties met elektronen zelfs in dit tamelijk ingewikkelde materiaal kunnen meten en modelleren.

Een ander centraal concept in de natuurkunde is symmetrie. In het bijzonder vragen wij ons hier af of een elektron kan weten of het de voorkant of de achterkant van het monster raakt. In een monster dat alleen uit grafeen bestaat, zijn de voor- en achterkant niet te onderscheiden. Voor een monster dat bestaat uit grafeen aan de ene kant en hexagonaal boornitride aan de andere kant, kan er echter een verschil in elektronenreflectie zijn. In hoofdstuk 4 beschouwen we zo'n monster met gebroken symmetrie en laten we zien dat inelastische verstrooiing cruciaal is om de ongelijke reflectie van de onder- en bovenkant te begrijpen.

In het laatste hoofdstuk kijken we naar een ander type symmetriebreking. Een chiraal object is een object dat niet gedraaid en/of verplaatst kan worden zodat het lijkt op zijn gespiegelde versie. Het naamgevend voorbeeld van chiraliteit (van het Griekse *cheir* = hand) zijn onze handen, die elkaars spiegelbeeld zijn maar toch duidelijk verschillend. Op moleculair niveau hebben chirale moleculen dezelfde chemische samenstelling maar een andere driedimensionale ordening. Opmerkelijk genoeg speelt deze ordening een belangrijke rol in biologische processen.

In hoofdstuk 6 gebruiken we ultraviolet (UV) licht om elektronen uit een oppervlak bedekt met chirale moleculen te bevrijden (foto-elektrisch effect). We onderzoeken de interactie tussen de chiraliteit van de lichtpolarisatie en de chiraliteit van de chirale organische moleculen. In de wetenschappelijke literatuur is gerapporteerd dat de chiraliteit van de moleculen koppelt aan de spin van de doorgelaten elektronen en deze filtert: een fenomeen dat bekend staat als het *chirality-induced spin selectivity-effect* (CISS-effect). We laten zien dat we de polarisatietoestand van het licht willekeurig kunnen variëren, door licht op 400 nm lange goudnanostaafjes te schijnen. Aangezien de grootte van de goudnanostaafjes vergelijkbaar is met de UV-golflengte, kan het elektrische veld (van de lichtgolf) een resonante elektronenbeweging van de goudelektronen opwekken als het langs de lange as van de staafjes

gepolariseerd is. Deze versterking van het elektrische veld leidt tot een grotere elektronenemissie.

Daarnaast tonen we foto-emissie aan van chirale BINAP-moleculen. We zagen echter geen significant verschil tussen excitaties door licht van tegengestelde chiraliteit. Wellicht was onze moleculaire laag niet voldoende geordend. We karakteriseren onze opstelling en schatten dat deze gevoelig genoeg is om een emissieverschil van 1% te detecteren tussen excitatie met rechts- en linksdraaiend circulair gepolariseerd licht. Het in kaart brengen van het CISS-effect met een resolutie op nanometerschaal, in tegenstelling tot het meten van gemiddelden van een hele laag, zal een beter begrip en de constructie van betere apparaten die dit effect benutten mogelijk maken.