

# Passen en meten op de schaal van atomen en in het onderwijs

**Citation for published version (APA):**

Koenraad, P. M. (2007). *Passen en meten op de schaal van atomen en in het onderwijs*. Technische Universiteit Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/2007

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

# TU/e

technische universiteit eindhoven

Intreerede  
29 juni 2007

prof.dr. Paul Koenraad

**passen en meten**  
op de schaal van atomen  
en in het onderwijs

/ faculteit technische natuurkunde

---

Intreerede

Uitgesproken op 29 juni 2007  
aan de Technische Universiteit Eindhoven

# passen en meten op de schaal van atomen en in het onderwijs

prof.dr. Paul Koenraad



## Inleiding

We zeggen vaak *'het is een kwestie van passen en meten'* en daarmee bedoelen we dat we zoeken naar een oplossing. Dat is de kern van wetenschappelijk onderzoek, maar *'passen en meten'* op de schaal van atomen is ook in de letterlijke zin van toepassing op mijn vakgebied omdat we gebruik maken van het passen en mispassen van kristalroosters en omdat we op de atomaire schaal meten om de invloed van roosterspanningen te bestuderen. Ook in omgekeerde richting is *'passen en meten'* van toepassing bij de studie van moderne halfgeleiderstructuren. Als we meten aan moderne halfgeleiderstructuren dan blijkt dat heel veel eigenschappen alleen in exact afgepaste vorm voorkomen. Deze eigenschap is uitermate interessant in toepassingen van halfgeleiderstructuren. Het is duidelijk dat onderwijs geven en organiseren ook een kwestie is van *'passen en meten'*.

## De nanowereld van atomen

Ik wil mijn verhaal beginnen met het motto van de Technische Universiteit Eindhoven: *'Mens Agitat Molem'* wat in vertaling betekent: *'De geest brengt de materie in beweging'*. Daarmee willen we als universiteit uitdrukken dat we ons vernuft moeten aanwenden om materie een zinvolle functie te geven. In de kern is dit wat ons als mens onderscheidt van de rest van de natuur. De soort *'Homo Sapiens'* waartoe wij allen behoren is 100.000 jaar geleden begonnen met van vuursteen functionele objecten te maken van ongeveer twintig centimeter groot. Als we dat vergelijken met wat we tegenwoordig in de halfgeleiderlaboratoria hier aan de Technische Universiteit Eindhoven maken, dan kan ik u verzekeren dat wij objecten creëren van slechts twintig nanometer groot. Dat is maar liefst tien miljoen keer kleiner en er is dus wel het een en ander gebeurd in de afgelopen periode.

Een nanometer is een miljardste van een meter. Het voorvoegsel *'nano'* is afkomstig van het Griekse woord *'nanos'* wat *'dwerf'* betekent. Om U een indruk te geven van wat een nanometer inhoudt, wil ik de volgende vergelijking maken. Een meter verhoudt zich tot een nanometer als de diameter van de aarde tot de diameter van een voetbal, zoals getoond in een opname van Google Earth. En om u echt het gevoel te geven hoe klein die nanometer is, daag ik U allen uit om deze voetbal op Google Earth te gaan zoeken.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> De opname getoond tijdens de intrede is het sight hill voetbalveld in het zuidwesten van Edinburgh in het Verenigd Koninkrijk.

In het onderzoek op de nanometerschaal gebeuren tegenwoordig heel veel interessante zaken in zowel de natuurkunde, scheikunde, biologie als de materiaalkunde. Vooral de onderlinge verbanden tussen deze vakgebieden op de nanometerschaal maakt nanotechnologie tot een erg interessant en actief onderzoeksgebied. Aan de Technische Universiteit Eindhoven hebben we dit onderzoek samengebracht in het Center for NanoMaterials (cNM) waarin de eigen onderzoeksgroep actief deelneemt. Op de lengteschaal van een nanometer zijn we aangeland op de schaal van de atomen die iets minder dan een nanometer groot zijn. Alle ons bekende atomen kunnen prachtig gerangschikt worden in het Periodiek Systeem, zoals weergegeven in figuur 1, dat ongeveer 150 jaar geleden is opgezet door de rus Dimtri Mendeleev. Hij heeft dit gedaan op basis van de chemische eigenschappen van de hem bekende atomen. Tegenwoordig kennen we ongeveer honderd atomen. Alle atomen waar U, ik en alles wat ons hier op aarde omringt van gemaakt zijn, zijn ooit gevormd in het inwendige van sterren. Zware sterren in de buurt van onze eigen zon hebben die atomen geproduceerd tijdens kernfusieprocessen in hun kern en tijdens het explosieve einde van deze sterren. Bij hun explosieve einde hebben deze zware sterren het interstellaire gas verontreinigd met de door hen gevormde atomen en uit dit vervuilde interstellaire gas zijn vervolgens onze zon, aarde en het gehele zonnestelsel opgebouwd.

Periodiek Systeem volgens Dimtri Mendeleev waarin alle bekende atomen zijn gerangschikt.

I																II										III										IV										V										VI										VII										VIII																																																																																																																																																																																																																			
1	H															2	He																																																																																																																																																																																																																																																																														
3	Li															4	Be															5	B															6	C															7	N															8	O															9	F															10	Ne																																																																																																																																																																														
11	Na															12	Mg															13	Al															14	Si															15	P															16	S															17	Cl															18	Ar																																																																																																																																																																														
19	K															20	Ca															21	Sc															22	Ti															23	V															24	Cr															25	Mn															26	Fe															27	Co															28	Ni															29	Cu															30	Zn															31	Ga															32	Ge															33	As															34	Se															35	Br															36	Kr														
37	Rb															38	Sr															39	Y															40	Zr															41	Nb															42	Mo															43	Tc															44	Ru															45	Rh															46	Pd															47	Ag															48	Cd															49	In															50	Sn															51	Sb															52	Te															53	I															54	Xe														
55	Cs															56	Ba															57	La															58	Ce															59	Pr															60	Nd															61	Pm															62	Sm															63	Eu															64	Gd															65	Tb															66	Dy															67	Ho															68	Er															69	Tm															70	Yb																																														
67	Fr															68	Ra															69	Ac															70	Th															71	Pa															72	U															73	Np															74	Pu															75	Am															76	Cm															77	Bk															78	Cf															79	Es															80	Fm															81	Md															82	No																																														

figuur 1

## Halfgeleidermaterialen

Als atomen of moleculen zich regelmatig rangschikken in een rooster spreken we van een kristal. Een halfgeleiderkristal wat iedereen tegenwoordig, meestal ongemerkt, intensief benut bestaat uit enkel silicium atomen. Dit halfgeleidermateriaal is in 1947 door William Shockley, John Bardeen en Walter Brattain, werkzaam bij de Amerikaanse telefoonmaatschappij ATT, gebruikt om de allereerste transistor te maken. Zo'n transistor is eigenlijk niet veel anders dan een kleine stroomversterker, en het is daarmee de basis voor alle elektronica, die ons tegenwoordig overal omringt. De huidige 'Informatie Maatschappij' zou ondenkbaar zijn zonder hoge kwaliteit silicium kristallen die de basis vormen van de rekenprocessoren in een computer. Dit toont direct het belang van de halfgeleiderfysica in onze huidige maatschappij.

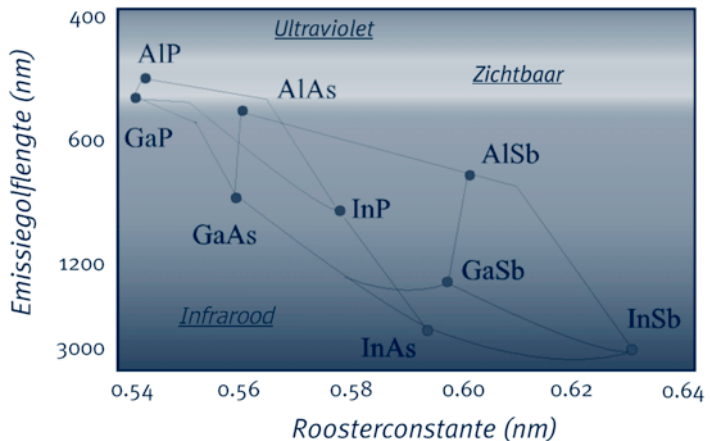
De silicium technologie heeft in de afgelopen decennia een enorme vlucht genomen. De dramatische vooruitgang is goed te begrijpen als we de allereerste commerciële transistor uit 1949 vergelijken met de nieuwste Pentium rekenprocessor. De eerste halfgeleidertransistor kostte ongeveer \$ 2 en was één cm groot. In de huidige silicium technologie is het mogelijk om vierhonderd miljoen transistoren samen te pakken op een vierkante centimeter kristallijn silicium materiaal. In de komende generatie rekenprocessoren, die volgend jaar voor een \$ 200 op de markt komen, zullen de kleinste details slechts 45 nanometer groot zijn. Dit toont aan dat het tegenwoordig noodzakelijk is om halfgeleiders op de atomaire schaal te onderzoeken.

In onze onderzoeksgroep werken we aan andere halfgeleidermaterialen als silicium. Wij richten ons op halfgeleiderkristallen die opgebouwd zijn uit atomen afkomstig van kolom 3 en kolom 5 van het Periodiek Systeem, de zogenaamde III/V halfgeleiders. Het GaAs kristal dat opgebouwd is uit gallium en arseen atomen is een zeer belangrijk voorbeeld van III/V halfgeleidermateriaal. In de klasse van de III/V halfgeleidermaterialen zijn veel andere binaire combinaties mogelijk zoals AlAs, InAs, GaP maar ook ternaire verbindingen, zoals AlGaAs, InGaP, en quartenaire verbindingen die uit vier soorten atomen bestaan. Veel III/V halfgeleidermaterialen zijn bijzonder ten opzichte van silicium halfgeleidermateriaal omdat lichtemissie mogelijk is. De meeste III/V halfgeleidermaterialen waar wij mee werken hebben eenzelfde kristalstructuur die enkel wordt gekenmerkt door de roosterconstante die overeenkomt met de afstand waarop het rooster zich periodiek herhaalt. In figuur 2 is voor een groot aantal III/V halfgeleidermaterialen de roosterconstante weergegeven en de golflengte

(kleur) van de lichtemissie van het halfgeleidermateriaal. De *samenstelling* van het halfgeleidermateriaal bepaalt dus de emissie golflengte. Halfgeleiderlichtbronnen komen we op allerlei plaatsen in het dagelijkse leven tegen. Bijvoorbeeld in de vorm van de zogenaamde licht emitterende diodes (LEDs) die gebruikt worden als indicatie lampjes op elektronische apparatuur, in stoplichten en seinen, achterverlichting van fietsen en auto's, enzovoorts. Ook grote videoschermen zoals op het NASDAQ square in New York zijn opgebouwd uit miljoenen LEDs. De halfgeleider LEDs voor het ultraviolette deel van het spectrum hebben een grote toekomst omdat ze toegepast kunnen worden in zeer efficiënte wit-licht bronnen en Philips verwacht daarom dat de komende eeuw de eeuw van de halfgeleiderverlichting wordt.

III/V halfgeleiders kunnen ook gebruikt worden om zeer intense lichtbronnen te maken zoals lasers. Eén zo'n minuscule halfgeleiderlaser zit bijvoorbeeld ingebouwd in de laserpointer die ik gebruik tijdens deze voordracht maar ook in elke dvd- en cd-speler en -brander. Voor optische communicatie, de meest belangrijke toepassing van ons onderzoek, is het belangrijk dat de halfgeleiderlaser efficiënt werkt op een golflengte van 1550 nanometer.

Roosterconstante en emissiegolflengte van een aantal III/V halfgeleidermaterialen.



figuur 2



## Optische communicatie

Optische communicatie wordt gebruikt om computers met behulp van licht met elkaar te laten communiceren. Tegenwoordig gebruiken we een wereldomspannend netwerk van glasdraden om grote hoeveelheden informatie zeer snel uit te wisselen. Aangezien glasdraden maximaal transparant zijn bij een golflengte van ongeveer 1550 nanometer gebruiken we lasers die emitteren bij deze golflengte. Om de noodzaak van de verbetering van optische communicatie weer te geven wil ik een zogenaamde Internet Router bespreken die gebruikt wordt om informatiestromen te sorteren en te verdelen. U moet zich voorstellen dat glasdraden op bepaalde knooppunten bijeenkomen. De aangevoerde informatie moet op dit knooppunt gesorteerd worden zodat het in de juiste glasdraad verder kan reizen om zo de gewenste ontvanger te bereiken. Op dit moment gebeurt dat nog door het optische signaal eerst elektrisch te maken. Elektronica bewerkt al die informatie in de vorm van elektrische signalen en vervolgens wordt de informatie weer omgezet in licht alvorens het in de juiste glasdraad wordt ingekoppeld.

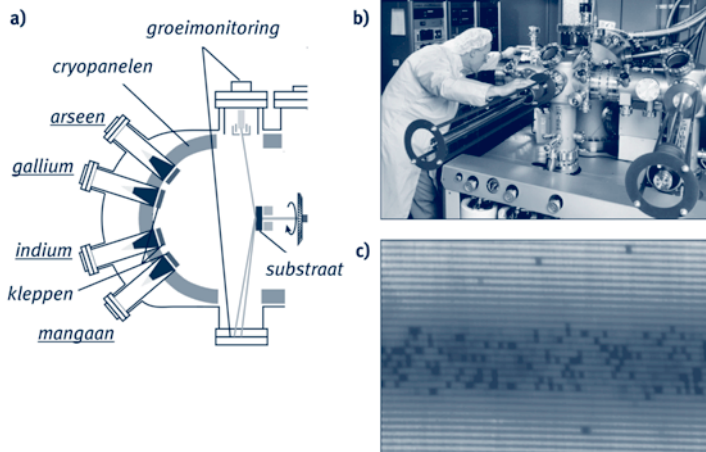
Een *state-of-the-art* Internet Router heeft een verbruik van ongeveer een megawatt en beslaat vele tientallen vierkante meters. Een recente schatting geeft aan dat op dit moment twee procent van het wereldwijde verbruik van elektrische energie nodig is voor dataverwerking, verzending en opslag. In landen zoals Japan kan dit oplopen tot tien procent. Er is dus een grote uitdaging om informatiestromen snel en efficiënt te beheersen. Dit is waar wij ons onder andere mee bezighouden binnen de onderzoeksschool COBRA aan de Technische Universiteit Eindhoven. Wij kiezen voor een benadering waarbij de verwerking van de optische informatie in de knooppunten volledig in het optische domein gebeurt. Dit zal het verwerken van data veel sneller en efficiënter maken omdat we veel hogere verwerkingssnelheden kunnen halen en omdat we geen omzettingverliezen meer hebben. Dit betekent wel dat we allerlei componenten nodig hebben die licht genereren en manipuleren. In samenwerking met de onderzoeksgroepen van Meint Smit, Ton Koonen en Harm Dorren in de faculteit Elektrotechniek hebben we al een groot aantal optische componenten gerealiseerd en deze componenten geïntegreerd in grotere complexe schakelingen. Dit is het vakgebied van de fotonica omdat hier licht in de vorm van fotonen, de lichtdeeltjes, door de schakeling gemanipuleerd worden in plaats van elektronen zoals dat in de elektronica het geval is. De bijdrage van de eigen groep komt er op neer dat wij nieuwe nanogestructureerde halfgeleidermaterialen

ontwikkelen die ingezet kunnen worden in fotonische geïntegreerde schakelingen. De nanostructurering geeft heel nieuwe mogelijkheden om optische maar ook elektrische en magnetische functionaliteit te creëren. Naast de *samenstelling* is nu ook de afmeting, ofwel de *schaal*, bepalend voor het gedrag van een halfgeleidermateriaal.

### Nanostructurering van halfgeleiders

In de onderzoeksgroep groeien we onze halfgeleidernanostructuren epitaxiaal op een halfgeleidersubstraat. Speciale geavanceerde groeitechnieken zoals Molecular Beam Epitaxy (MBE) en Metal-Organic Vapor Deposition (MOCVD) maken het mogelijk om atoomlaag voor atoomlaag de gewenste halfgeleiderstructuur op te bouwen, zie figuur 3. De in figuur 3c weergegeven structuur is slechts in één richting, de groeirichting, op de nanometerschaal gestructureerd. Wij zijn echter meer geïnteresseerd in een volledige nanostructurering in alle drie de richtingen. Om dat te bereiken maken we gebruik van het principe van ‘*mismatching*’ van kristalroosters van twee heterogene lagen. Als InAs, met

- a) Schema van een Molecular Beam Epitaxy (MBE) opstelling voor de epitaxiale groei van halfgeleiderstructuren.
- b) Opname van een epitaxiale groeiopstelling.
- c) Atomair opgeloste afbeelding verkregen met Scanning Tunnel Microscopie van een epitaxiaal gegroeide multilaag. Afmeting van de opname is 15 nanometer bij 23 nanometer.



figuur 3

---

een roosterconstante van ongeveer 0.59 nanometer, gegroeid wordt op een substraat van GaAs, met een roosterconstante van ongeveer 0.56 nanometer, zal het InAs zich, in eerste instantie, netjes passen op het onderliggende rooster. Het InAs kristal heeft in deze situatie in de laterale richting een gelijke roosterconstante als het onderliggende substraat maar omdat de roosterconstante van een vrij InAs kristal ongeveer zeven procent groter is dan die van GaAs, bouwt zich wel spanning op in de InAs laag. Die spanning ontlad zich op het moment dat de laag te dik wordt, in dit geval al na een halve nanometer wat overeenkomt met twee monolagen InAs. De relaxatie resulteert in de vorming van driedimensionale nanostructuren aan het groeioppervlak. In principe is dit proces sterk vergelijkbaar met de vorming van waterdruppels op een plantenblad. Bij de juiste groeiomstandigheden hebben de gevormde nanostructuren, ook wel quantum dots genoemd, vrijwel allemaal dezelfde afmetingen. Met een diameter van ongeveer dertig nanometer en een hoogte van tien nanometer bevatten ze elk ongeveer zo'n vijftig duizend atomen. We kunnen, door slim de groeiomstandigheden te controleren, de vorm, afmeting en samenstelling van dit soort nanostructuren sterk beïnvloeden. Dit is bijvoorbeeld recentelijk door ons gedaan met InAs dots die gegroeid zijn op InP. Door dunne lagen GaAs te groeien op het InP oppervlak voordat de InAs depositie plaatsvindt, kunnen we de emissiegolflengte van de quantum dots aanpassen, zodanig dat we precies op 1550 nanometer uitkomen. Dat is exact de gewenste golflengte voor optische communicatie. Het bleek dat we daar heel goede lasers van konden maken, met als een bijkomend voordeel dat ze niet alleen efficiënt waren, maar ook dat ze veel kleiner gemaakt konden worden doordat we dieper konden etsen zonder grote optische verliezen.

### Zien is begrijpen

Om te begrijpen hoe halfgeleidernanostructuren er werkelijk uitzien moeten we op de atomaire schaal in halfgeleiders kunnen kijken. Dit is belangrijk want '*zien is begrijpen*' welke groeiprocessen belangrijk zijn en hoe de optische en elektrische eigenschappen van de nanostructuur samenhangen met de structuur. Om de atomaire structuur zichtbaar te maken gebruik ik een scanning tunnel microscoop (STM). De werking van een STM berust op het feit dat een zeer scherpe naald, met in de punt slechts één enkel atoom, op een afstand van ongeveer een nanometer boven een geleidend oppervlak kan worden gebracht. Als nu een spanning wordt aangelegd tussen de tip en het oppervlak zal er een heel

---

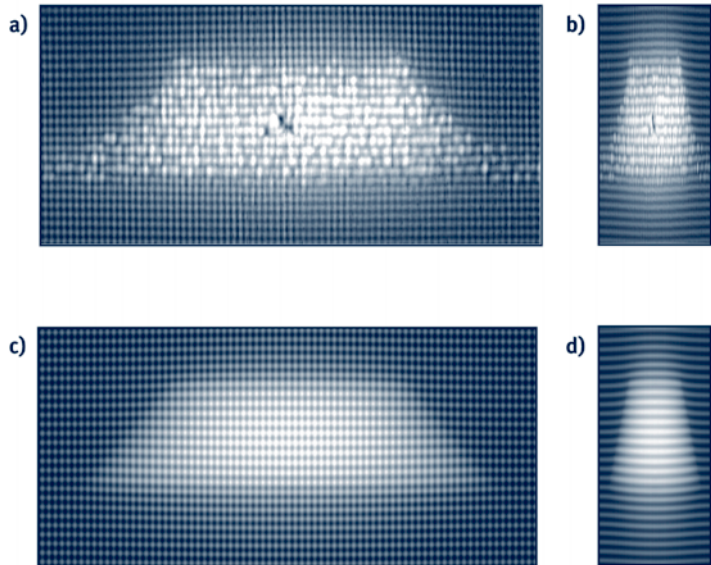
kleine tunnelstroom lopen die zeer sterk afhankelijk is van de afstand tot het oppervlak. Door nu met deze naald het oppervlak af te scannen kunnen we, door een variatie in de stroomsterkte als we van atoom naar atoom bewegen, exact de atomaire structuur van het oppervlak registreren. Om U een indruk te geven van de hoogteresolutie van een STM zal ik de volgende vergelijking maken. Een STM naald wordt geëit uit een wolfram draad van ongeveer een kwart millimeter. De radius van de punt is ongeveer twintig nanometer en deze wordt op één nanometer boven het oppervlak gezet. Tijdens de scanbeweging over het oppervlak moet de hoogteregeling op één duizendste van een nanometer, dat is een picometer, nauwkeurig werken. Om dat op een andere schaal te laten zien, maak ik gebruik van de Eiffeltoren die ongeveer driehonderd meter hoog is. Op deze schaal blijkt dat de Eiffeltoren op één millimeter omgekeerd boven de Champs Elysées moet worden gezet en vervolgens met een nauwkeurigheid in de hoogteregeling van een duizendste millimeter moet bewegen langs de straatstenen. In dat geval zal het mogelijk zijn om microben op de straatstenen te detecteren met de Eiffeltoren. Dit toont hoe krachtig de STM techniek is!

De STM techniek kan op een bijzondere manier worden ingezet voor het onderzoek aan nanogestructureerde halfgeleidermaterialen. Door een halfgeleiderstructuur te klieven langs de groeirichting kunnen we een dwarsdoorsnede van de gegroeide lagen zichtbaar maken. U mag dat vergelijken met wat we zien in de Grand Canyon in de USA. De Colorado rivier heeft daar een één kilometer diepe canyon uitgesleten. In de wanden kunnen alle sedimentlagen worden teruggevonden en op die manier kan men de groeihistorie van het gebied rond de Grand Canyon reconstrueren. In ons STM onderzoek aan halfgeleidernanostructuren doen we eigenlijk niets anders. Het is wel noodzakelijk dat het klieven van het halfgeleidermateriaal gebeurt onder ultrahoogvacuüm condities om contaminatie en oxidatie tegen te gaan. Deze cross-sectie STM techniek is aan het eind van de jaren tachtig ontwikkeld door Huub Saleminck en Ole Albreksten aan het IBM laboratorium in Zürich in Zwitserland en tegelijkertijd door Randy Feenstra aan het IBM laboratorium in York Town Heights in de USA.

## Atomaire diagnostiek

Ik wil nu een paar voorbeelden van de resultaten van atomaire diagnostiek laten zien. Eerder heb ik verteld dat we bij de vorming van quantum dots gebruik maken van de 'mismatching' tussen het kristalrooster van de ge-deponeerde laag en de roosterconstante van het substraat waarop de laag wordt gegroeid. We kunnen deze spanning direct visualiseren met behulp van cross-sectie STM. Figuur 4a toont een InAs quantum dot in GaAs. Deze afbeelding is in figuur 4b sterk gecomprimeerd in de horizontale richting en toont duidelijk de vervorming van het GaAs kristalrooster rond de dot. De vervorming is een direct gevolg van de 'mismatching' van de InAs en GaAs kristalroosters. In figuur 4c en 4d wordt een simulatie getoond die uitstekend overeenkomt met de meting. Uit deze simulatie kan men daarom zeer bruikbare informatie verkrijgen over de interne samenstelling en de opbouw van de InAs quantum dot.

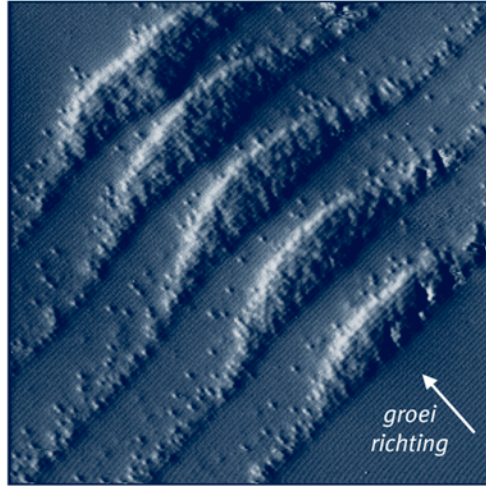
- a) Scanning Tunnel Microscopie opname van een InAs quantum dot in GaAs. Afmeting van de opname is 16 nanometer bij 35 nanometer.
- b) Dezelfde opname als in a) maar nu gecomprimeerd in de horizontale richting zodat de vervorming van het kristalrooster goed zichtbaar is.
- c) Berekende roosterstructuur van de InAs quantum dot afgebeeld in a).
- d) Gecomprimeerde weergave van de afbeelding als in c).



figuur 4

---

Scanning Tunnel Microscopie opname van de doorsnede van een stapeling van 5 InAs quantum dots in GaAs. De groeirichting loopt van rechtsonder naar linksboven en de stapeling is veroorzaakt door roosterspanning geïnduceerde nucleatie. Afmeting van de opname is 55 nanometer bij 55 nanometer.



figuur 5

Het was al langer bekend dat de roostermispassing tussen de quantum dot en het onderliggende substraat waarop hij gevormd wordt van belang is voor de afmeting van de dots maar zeer recentelijk hebben we aangetoond dat de roosterconstante van de bedekkingslaag ook een grote rol speelt bij de vorming van quantum dots. We zien bij een grotere mispassing tussen het quantum dot materiaal en de bedekkingslaag, dat de quantum dot kleiner is. Het blijkt dat de dot aan zijn top sterker ‘erodeert’ als er een roosterspanningsverschil tussen de dot en de bedekkingslaag is. Dit is een nieuwe manier om controle te krijgen over de afmetingen van quantum dots. De roosterspanningen tijdens de groei en de bedekking van de quantum dots kunnen verder gebruikt worden om bijvoorbeeld InAs nanopilaren met een hoogte van meer dan 35 nanometer of InAs nanoringen met een diameter van 30 nanometer te construeren.

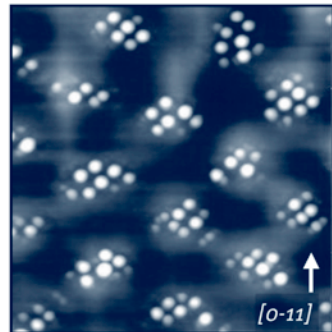
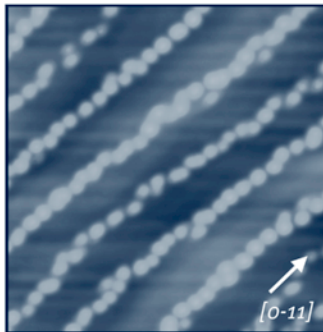
Lokale roosterspanningen ten gevolge van de dots kunnen we ook gebruiken om heel aparte architecturen te verkrijgen. Figuur 5 laat een stapeling van quantum dots zien die het gevolg is van spanningsgeïnduceerde nucleatie. Dit werkt als volgt: eerst is een InAs quantum dot laag gegroeid waarin de dots zich willekeurig op het oppervlak vormen, vervolgens is deze laag quantum dot laag overgroeid met een GaAs laag.

Bij de depositie van een nieuwe InAs laag op de GaAs laag vormen de nieuwe quantum dots zich boven de dots die op dat moment begraven liggen onder het groeioppervlak. Dit komt doordat de nieuwe dots een lokale aanpassing van de roosterconstante aan het groeioppervlak voelen die het gevolg is van de onderliggende dots.

Spanningsgeïnduceerde nucleatie kan ook op een andere manier gebruikt worden om quantum dots te ordenen. Richard Nötzel uit de eigen onderzoeksgroep heeft laten zien hoe de spanningsopbouw tijdens de groei van halfgeleidermultilagen gebruikt kan worden om ervoor te zorgen dat quantum dots in rijtjes of in clusters aan het oppervlak geordend worden, zie figuur 6. De dots zijn nu dus geordend in het horizontale vlak, dat loodrecht op de groeirichting staat, terwijl in figuur 5 sprake is van een ordening langs de groeirichting.

Ik wil hiermee aantonen dat we door uitgekiend gebruik te maken van roosterstressingen een enorme controle over de vorm, de afmeting, de samenstelling en de ordening van halfgeleidernanostructuren hebben. Zoals ik hierna zal laten zien kunnen we hierdoor de optische, elektrische en magnetische functionele eigenschappen van deze nanostructuren precies naar onze hand zetten.

Afbeeldingen van een groot aantal InAs quantum dots op een groeioppervlak. De dots zijn geordend in rijen of regelmatige clusters door gebruik te maken van roosterstressing geïnduceerde nucleatie op een onderliggende speciale InAs/GaAs multilaag. Afmeting van beide afbeeldingen is 1 micrometer bij 1 micrometer.



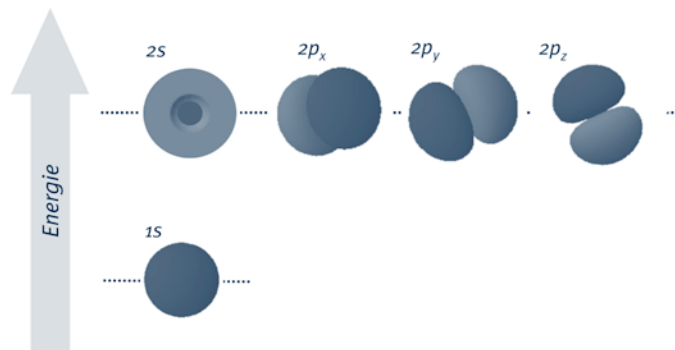
figuur 6

## Quantum fysica

Ik kom nu aan bij een punt, dat ik zou willen omschrijven als de natuurkunde van de nanometerschaal. Ongeveer een eeuw geleden hebben mensen als Albert Einstein, Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Wolfgang Pauli, maar natuurlijk nog vele anderen, vastgesteld dat op de nanometerschaal in de natuurkunde aparte verschijnselen optreden. Het blijkt dat op deze schaal vrijwel alle effecten alleen in afgepaste vorm voorkomen ofwel gequantiseerd. Daarom wordt dit vakgebied aangeduid met de term quantum fysica. Een paar voorbeelden: Lading komt alleen in exact afgepaste hoeveelheden voor, net als magnetische flux die enkel in afgepaste eenheden voorkomt, en ook licht bestaat uit afzonderlijke deeltjes, fotonen genaamd.

Volgens de quantum fysica is de bindingsenergie van elektronen in een atoom gequantiseerd en dus afgepast. De quantum fysica leert ons verder dat die energietoestanden corresponderen met een specifieke verdeling van de elektronlading. In de grondtoestand, dat is de laagste energietoestand, zien we een volledig symmetrische ladingsverdeling, maar in toestanden met een hogere energie is de ladingsverdeling veel complexer zoals is weergegeven in figuur 7. Er is nog een tweede eigenschap, de spin van elektronen, die we moeten beschouwen in de quantum fysica. U kunt zich, in een heel simpele weergave, de spin van elektronen voorstellen door aan te nemen dat elektronen om hun as

Schematische weergave van de ladingsverdeling in de laagste energietoestanden voor een elektron dat gebonden is in een waterstofatoom.



figuur 7



---

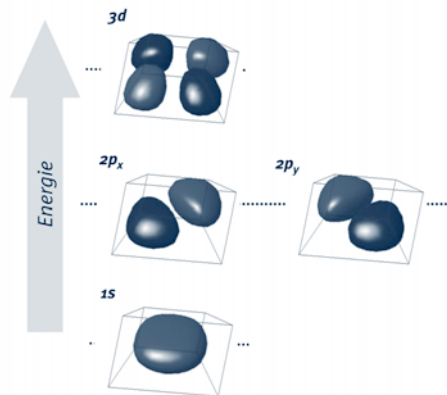
draaien en daardoor een zeer klein magneetveld bezitten. Het zijn daarmee de kleinste magneten die we kennen in de natuur. Het zijn de ultieme nanomagnetten. In de Spintronica proberen we in nieuwe schakelingen gebruik te maken van deze magnetische eigenschappen van de elektronen. Dit is een heel nieuw vakgebied in de halfgeleider-natuurkunde dat sterk in opkomst is en waar we aan werken in samenwerking met de groep van Bert Koopmans en Henk Swagten bij de faculteit Technische Natuurkunde.

De quantisatie van de bindingsenergie van elektronen in atomen en de elektronspin liggen ten grondslag aan de indeling van atomen in het Periodiek Systeem weergegeven in figuur 1. Laat ons bijvoorbeeld de situatie beschouwen van een waterstofatoom met een éénwaardig positieve kern en één elektron. Het elektron bezet de laagste energietoestand en de spin van het elektron kan willekeurig gericht worden. In het geval van helium met een tweewaardig positieve kern en twee gebonden elektronen bezetten de twee elektronen de laagste energietoestand en moeten de twee magnetische momenten, de spins, van de elektronen antiparallel staan. Bij het volgende atoom in het Periodiek Systeem, lithium, zijn drie elektronen gebonden. Twee elektronen met antiparallele spin bevinden zich in de grondtoestand en een derde elektron bevindt zich in een van de toestanden behorende bij het eerstvolgende toegestane energieniveau. Bij verdere opvulling van de elektrontoestanden voor atomen in de reeks, beryllium, boor, koolstof tot aan neon belanden de elektronen in de  $s$ ,  $p_x$ ,  $p_y$  en  $p_z$  toestanden elk behorende bij het eerste toegestane energieniveau boven de grondtoestand zoals weergegeven in figuur 7. De vier toestanden die elk met maximaal twee elektronen met antiparallele spins bezet kunnen worden vormen de tweede horizontale reeks atomen in het Periodiek Systeem. Steeds blijkt dat elektronen gebonden in een atoom de voorkeur hebben om hun spins zoveel mogelijk antiparallel te zetten zodat atomen netto geen of slechts een heel klein magnetisch moment hebben. Echter in de reeks van transitietaal atomen: vanadium, chroom, mangaan, ijzer, kobalt blijken de spins niet enkel antiparallel te staan. Met name het mangaan atoom bezit een sterk magnetisch moment omdat netto vijf elektronen die gebonden zijn aan de kern hun spin parallel zetten. Niet zonder toeval is de naam mangaan gerelateerd aan het woord magnetisch.

## Kunstmatige atomen

Laten we nu terugkeren naar de halfgeleider quantum dots. Op basis van STM opnames hebben we aangetoond dat de vorm van een quantum dot eruit ziet als een afgeknotte piramide met een vierkant basisvlak en een ontbrekende top. In een quantum dot is de elektron bindingsenergie ook gequantiseerd net als in het geval van elektronen gebonden in een atoom.

Schematische weergave van de ladingsverdeling in de laagste energietoestanden voor een elektron gebonden in een quantum dot die de vorm heeft van een afgeknotte piramide.

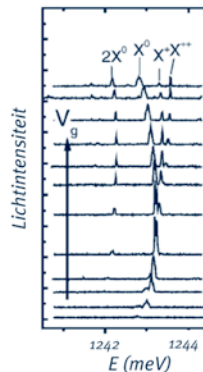


figuur 8

Figuur 8 laat de drie laagste energieniveaus zien met de daarbij behorende ladingsverdeling. Vanwege de sterke analogie met de situatie in echte atomen beschouwen we quantum dots ook wel als 'kunstmatige atomen'. De ladingsverdeling en de bindingsenergie in deze 'kunstmatige atomen' zijn sterk afhankelijk van de vorm, afmeting en samenstelling van de nanostructuur en we kunnen ze daardoor sterk naar onze hand zetten. Halfgeleiders worden gekenmerkt door een bandstructuur die bestaat uit een volledig gevulde energieband gescheiden van een volledig lege energieband die bij een hogere energie ligt. De energiescheiding tussen de twee banden is afhankelijk van het halfgeleidermateriaal en bepaalt de emissiegolflengte van het halfgeleidermateriaal. Doormiddel van optische excitatie, met bijvoorbeeld een laser, kan een elektron vanuit de volledig gevulde energieband naar de hoger gelegen lege energieband geëxciteerd worden. Het ontbrekende elektron in de valentieband wordt in de halfgeleidernatuurkunde aangeduid als een gat. Beide ladingen zullen zich

vervolgens ruimtelijk bewegen naar de quantum dot en daar ingevangen worden in een van de energietoestanden zoals weergegeven in figuur 8. De energietoestanden en de ladingsverdeling van de elektronen verschillen natuurlijk van die van de gaten. Als het elektron-gat paar in de dot recombineert en het elektron in feite de ontbrekende lading, het gat, in de verder volledig gevulde band aanvult, wordt een foton geproduceerd dat de vrijgekomen energie van het elektron-gat paar zal meenemen. Met slimme technieken kunnen we de geëmitteerde fotonen van slechts één enkele quantum dot bestuderen. In figuur 9 is een emissiespectrum weergegeven van een enkele quantum dot. De piek aangeduid met  $X^0$  is afkomstig van een recombinatieproces waarbij één elektron en één gat in de dot aanwezig zijn. Omdat er één positieve en één negatieve lading in de dot aanwezig zijn kunnen we dit als het ware als een ‘waterstof atoom’ beschouwen. Het spectrum in figuur 9 laat ook andere pieken zien die overeenkomen met andere ladingstoestanden in de dot. De piek  $X^+$  correspondeert met de aanwezigheid van twee gaten en één elektron in de dot, wat correspondeert met ‘enkel geïoniseerd  $He^+$ ’. De piek  $X^{++}$  correspondeert met ‘dubbel geïoniseerd  $Li^{++}$ ’ en ten slotte de piek aangeduid met  $2X^0$  met ‘neutraal  $He$ ’ omdat er in dit geval twee elektronen en twee gaten in de dot aanwezig zijn op het moment van de recombinatie. Het hele Periodieke Systeem laat zich als het ware reproduceren in één nanostructuur. Omdat we de vorm, afmeting en samenstelling van de

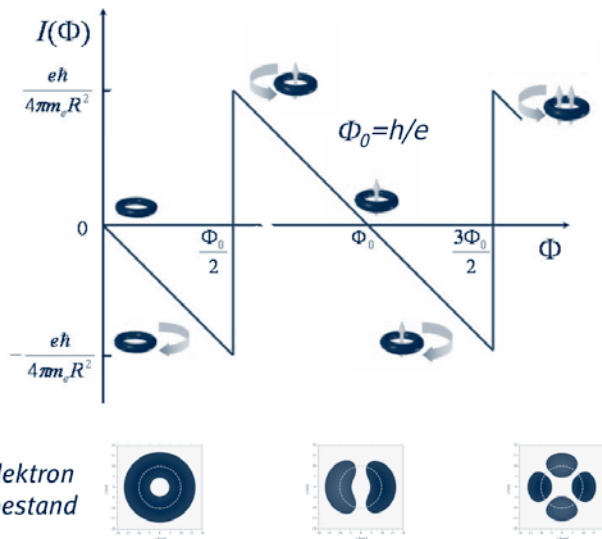
Emissiespectrum van slechts een enkele quantum dot waarvan de bezetting met positieve en negatieve ladingen gevarieerd is met een externe elektrische spanning  $V_g$ . De meting is verricht door David Mowbray van de Universiteit van Sheffield, UK.



figuur 9

nanostructuur controleren tijdens de groei hebben we direct invloed op de interactie tussen de elektronen en de gaten en de resulterende energieniveaus en dus het bijbehorende ‘*Kunstmatige Periodiek Systeem*’. Recentelijk hebben we in de eigen groep een enkele dot in een magneetveld bestudeerd en daarbij hebben we de twee spin, ofwel magnetische, toestanden van het elektron-gat paar kunnen scheiden. Als functie van de excitatie intensiteit van de laser hebben we verder aangetoond dat de energetische ordening van die twee magnetische toestanden omgekeerd kan worden. Hiermee hebben we aangetoond dat ook het magnetische gedrag van de ladingsdragers in een dot gemanipuleerd kan worden. De eerder besproken ringstructuur is een heel bijzonder ‘*kunstmatig atoom*’ wat we in de eigen groep onderzocht hebben. Er is geen enkel atoom in de natuur wat daarmee correspondeert. Ringstructuren geven

Schematische weergave van de invloed van een magnetisch veld op de elektronische toestanden in een quantum ring en de stroom in de ring. Als functie van de sterkte van het aangelegde magneetveld zullen magnetische fluxquanta een voor een in de ring binnendringen .



figuur 10

---

aanleidingen tot zeer interessant magnetisch gedrag wat wordt veroorzaakt doordat de ring magnetische fluxquanta een voor een bij een toenemende magnetische veldsterkte in de ring laat binnendringen. Dit is een prachtig voorbeeld van quantum gedrag dat optreedt op de nanometerschaal. In figuur 10 is het proces schematisch weergegeven. Als de sterkte van het magneetveld toeneemt, blijkt dat de magnetische fluxquanta, aangegeven met een of meerdere pijlen door de ring, een voor een op een periodieke wijze als functie van het aangelegde magneetveld, de ring binnendringen. Dit gaat gepaard met een aanpassing van de ladingsverdeling van de elektronen die aanwezig zijn in de ring. De ladingsverdeling is in eerste instantie symmetrisch om zich vervolgens in twee stukken te splitsen als het eerste fluxquant de ring binnendringt. Bij een volgend fluxquant splitst de ladingsverdeling zich in vier stukken enzovoorts.

We kunnen dit gedrag detecteren aan de hand van de magnetisatie van een preparaat dat een enorm aantal ringen bevat. In het geval dat het magneetveld opgevoerd wordt in de situatie dat er nog geen fluxquant in de ring is binnengedrongen zal de elektronlading in de ring bij een toenemend magnetisch veld steeds sneller rondlopen in de ring om op die wijze een eigen magneetveld op te wekken wat het externe magneetveld in de ring compenseert. Op deze wijze zal er netto geen magneetveld in de ring aanwezig zijn. Op het moment dat één fluxquant binnendringt, zal de stroomrichting in de ringstructuur plotseling omkeren zoals aangegeven in figuur 10. Deze omkering van de stroomrichting geeft een zeer zwakke maar kenmerkende verandering in de magnetisatie van iedere ring. In samenwerking met de Radboud Universiteit Nijmegen hebben we dit gedrag kunnen waarnemen in zeer sterke magneetvelden. Verder hebben we recentelijk, in samenwerking met de Universiteit van Antwerpen aangetoond dat het magnetische gedrag van ringen, die bezet zijn met meerdere elektronen, sterk beïnvloed wordt door de onderlinge interactie tussen de elektronen. Dit zijn opnieuw voorbeelden van eigenschappen van *'kunstmatige atomen'* die we kunnen manipuleren door de vorm van de nanostructuur te beheersen.

### Quantum technologie

De enorme vrijheid die we hebben om de vorm, samenstelling en afmetingen van halfgeleidernanostructuren te variëren, gecombineerd met de mogelijkheden die we hebben om de nanostructuren te ordenen in stapels, rijen of clusters, maakt het mogelijk om de elektrische, optische

---

en magnetische eigenschappen van halfgeleidernanostructuren naar wens te controleren. Dit geeft aanleiding tot een nieuwe technologie waarin we, door een nauwkeurige controle over de nanostructurering, volledig gebruik kunnen maken van quantum effecten die enkel op de nanometerschaal optreden. Quantum technologie is daarmee een nieuwe tak van technische wetenschap die uitstekend past bij het motto '*Mens Agitat Molem*' van de Technische Universiteit Eindhoven.

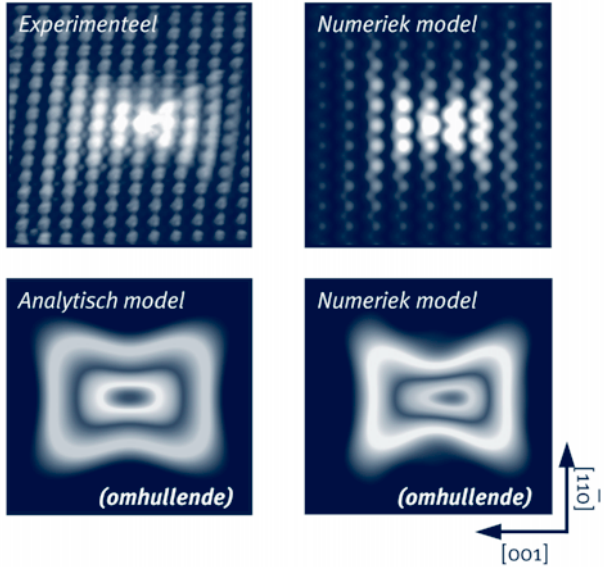
Er zijn naar mijn weten geen gebieden in de technologie waar quantum effecten zo'n prominente rol spelen als in de moderne halfgeleidernanofysica. Het maakt dit gebied daarom uitermate geschikt voor het onderrecht aan studenten, omdat het ze laat zien dat de veelal wonderlijke verschijnselen uit de quantum fysica niet enkel wetenschappelijk interessant zijn maar ook in de moderne technologie kunnen worden toegepast. In dit verband is het altijd prachtig om te zien hoe studenten vaak verrast zijn als we de eigenschappen van een laserstructuur met een paar simpele quantum fysische berekeningen nauwkeurig kunnen beschrijven. Je hoort dan nogal eens '*Je kunt dus echt iets nuttigs doen met quantum fysica*'.

### **Magnetische halfgeleidermaterialen**

Tot nu toe hebben we alleen magnetisme in halfgeleiders beschouwd dat afkomstig is van de elektronen. De magnetische effecten kunnen veel sterker worden als we magnetische atomen inbouwen in het halfgeleidermateriaal. De eerder genoemde transitiemetaal atomen, en vooral mangaan, zijn in dit verband erg interessant. Het onderzoek aan mangaan gedoteerd halfgeleidermateriaal staat dan ook op dit moment internationaal enorm in de belangstelling vanwege de toepassing in de spintronica. Magnetische halfgeleiders zijn uniek in het feit we in één materiaal optische, elektrische en magnetische functionaliteit kunnen samenbrengen. Als we ons realiseren dat dataverwerking, dataverzending en dataopslag respectievelijk in het elektrische, optische en magnetische domein plaatsvinden dan is het niet moeilijk om ons voor te stellen dat hier heel interessante mogelijkheden liggen voor integratie van functionaliteit. Onder andere om dit soort redenen hebben we een gedetailleerde studie gemaakt van mangaan atomen in GaAs.

Een mangaan atoom in GaAs vervangt een gallium atoom in het kristalrooster. Mangaan brengt daarom niet alleen een magnetisch moment in het halfgeleidermateriaal teweeg maar het komt ook een elektron tekort

Experimentele opname van de ladingsverdeling rond een mangaan atoom in GaAs verkregen met Scanning Tunneling Microscopie en de resultaten van de berekende ladingsverdeling volgens een analytisch en een numeriek model.

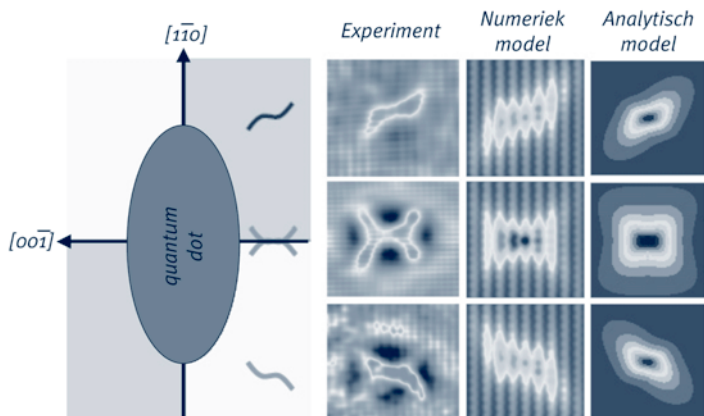


figuur 11

dat in de vorm van een gat, zoals eerder besproken, gebonden is aan het mangaan ion. STM afbeeldingen van mangaan atomen in GaAs, zoals in figuur 11, laten zien dat de ladingsverdeling van dit gat sterk asymmetrisch is. Dit is een totaal onverwacht resultaat omdat we eigenlijk een sferische symmetrische ladingsverdeling verwachten voor een lading in de grondtoestand zoals dat het geval is bij atomen en quantum dots (figuur 7 en figuur 8). In een samenwerking met Michael Flatté van de Universiteit van Iowa, Verenigde Staten en Andrei Monakhov van het Ioffe Instituut in St. Petersburg, Rusland hebben we een numeriek en een analytisch model ontwikkeld dat de waargenomen asymmetrie perfect beschrijft. Het blijkt dat de symmetrie van het kristalrooster verantwoordelijk is voor de bijzondere ladingsverdeling. Roosterspanningen hebben vaak een nuttige invloed op de eigenschappen van halfgeleiderstructuren. Eerder heb ik al laten zien hoe roosterspanningen gebruikt kunnen worden om een groot aantal verschillende

nanostructuren te construeren en te ordenen. Roosterspanningen hebben ook een belangrijke invloed op de elektrische, optische en magnetische eigenschappen van halfgeleidermateriaal. Om de invloed van de roosterspanning op een mangaan atoom te onderzoeken hebben we gebruik gemaakt van quantum dots die, zoals eerder besproken, sterke roosterspanningen in hun omgeving creëren. We hebben mangaan atomen onderzocht die zich op verschillende posities ten opzichte van een quantum dot bevonden en gemerkt dat de symmetrie van de ladingsverdeling sterk beïnvloed kan worden (figuur 12). Dat we een goed begrip hebben van de invloed van de roosterspanning blijkt uit het feit dat we in de modellering de symmetriebreking goed reproduceren zoals is weergegeven in dezelfde figuur. We hebben verder geconcludeerd dat de symmetriebreking ten gevolge van een juist gerichte roosterspanning ook de magnetische eigenschappen van het mangaan atoom zal beïnvloeden. Het magnetische veld van een mangaan atoom in een omgeving zonder roosterspanning heeft geen voorkeursrichting terwijl dat in een materiaal met een geschikte roosterspanning wel het geval is. Dit geeft een geheel nieuwe mogelijkheid om magnetisme in halfgeleidermateriaal te controleren.

Schematische weergave van de positie en de oriëntatie van mangaan atomen die door de roosterspanning van een quantum dot beïnvloed worden en weergaves van de gemeten ladingsverdeling en de ladingsverdeling berekend volgens een numeriek en een analytisch model.



figuur 12



### Wetenschappelijk focus

De wetenschappelijke focus van de onderzoeksgroep richt zich allereerst op het maken van halfgeleidermaterialen, waarbij we precies willen begrijpen hoe we nanogestructureerde materialen kunnen maken, hoe ze zijn samengesteld en welke groeiprocessen een rol spelen. Vervolgens willen we de fysica begrijpen van de elektronen en gaten in nanostructuren. Dat betreft zowel hun elektrische als magnetische gedrag, hun onderlinge koppeling en de koppelingen met fotonen. Waarschijnlijk zullen we ook de koppeling aan fononen, dat zijn roostertrillingen, nauwkeurig onderzoeken. We willen deze kennis inzetten om nieuwe en betere functionaliteit in nanogestructureerde halfgeleiders te kunnen creëren. Een functionaliteit die niet alleen ingezet zal worden voor optische communicatie maar ook voor andere toepassingen. Uiteindelijk willen we de ultieme grenzen opzoeken; dit betekent dat we de lading en/of spin van slechts één enkel atoom of elektron willen controleren en manipuleren bijvoorbeeld in interactie met slechts één enkel foton. Dit soort werk heeft zijn toepassing in onkraakbare quantum communicatie en quantum computing. Om de interactie met enkele fotonen te kunnen realiseren zullen we gebruik maken van zogenaamde fotonische kristallen waarin we fotonen heel precies kunnen manipuleren.

Een voorbeeld van een geheel nieuwe activiteit die gericht is op een medische toepassing van onze kennis betreft een zojuist gestart project met de universiteiten van Moskou in Rusland, Kishinev in Moldavië en Antwerpen in België. In het kader van dit project onderzoeken we colloïdale quantum dots van halfgeleidermateriaal die ingezet kunnen worden in de kankertherapie. Het blijkt dat het energieverval tussen twee spinconfiguraties uiteindelijk bepalend is voor de efficiëntie van de therapie. We gaan daarom onderzoeken hoe we die energieafstand kunnen vergroten. Dit geeft aan dat we door een beter begrip van de eigenschappen in halfgeleidernanostructuren ook een zinvolle bijdrage aan de medische wetenschap kunnen geven.

### Passen en Meten in het Onderwijs

Ik zou willen stellen dat een academische opleiding aanvangt op een leeftijd van een jaar of vier, wanneer kinderen een geweldige interesse in hun omgeving krijgen. Denk maar aan de bekende *'waarom, waarom, waarom,...'* vragen. Het is essentieel dat we deze interesse vasthouden in de latere jaren door middel van gerichte activiteiten en lesprogramma's. Aan de Technische Universiteit Eindhoven besteden we hier veel zorg aan,



bijvoorbeeld met de Stichting Techniek Promotie en het Natuurkunde Circus, de Eureka dag en de Masterclasses die zich elk richten op specifieke fases in het lager en/of middelbaar onderwijs. Verder zijn er elk jaar de Publieksdagen in oktober en sinds kort de zogeheten Super TU/esdays die uitstekende mogelijkheden bieden om het grote publiek te bereiken. Het zijn activiteiten, waar ik me graag en vaak voor inzet. Ik vind het ook altijd erg leuk om te zien hoe je daarmee het enthousiasme van mensen voor techniek en wetenschap kunt stimuleren. Ik denk dat het vooral erg belangrijk is om de interesse van jonge kinderen vast te houden om ze daarmee belangstelling te geven voor een technische academische carrière. Het is in dit verband ook erg jammer dat het Evuon niet meer zijn oude functie heeft. De huidige technologische multinationals in de regio Eindhoven zouden daaraan moeten bijdragen ter stimulering van het door hen zo hard gezochte technische talent.

Er is de afgelopen jaren veel veranderd in de middelbare school opleiding. Scholieren hebben tegenwoordig een veel groter vakkenpakket dan een aantal jaren terug en ze moeten daarnaast ook nog andere competenties leren. Hun tijd is gevuld met veel meer activiteiten als in het verleden. Ook mijn vakgebied heeft daar in zekere mate aan bijgedragen door de het succes van het Internet. Kortom, we krijgen studenten binnen aan de Universiteit die heel anders zijn dan vroeger. We merken bij het geven van eerstejaarsonderwijs dat, door de grotere hoeveelheid vakken en de andere competenties die verworven moeten worden op de middelbare school, ze wel heel veel dingen gehoord hebben en zeer mondig zijn. Echter er is minder tijd geweest om kennis en ervaring te laten bezinken zodat ze onbewust ervaren worden en onderlinge verbanden tussen vakken goed doorhebben.

Natuurlijk proberen wij daarop te anticiperen. We hebben dat bij de faculteit Technische Natuurkunde onder andere gedaan door een nieuw college in te voeren: *'Introductie in de natuurkunde'* dat we in de eerste vijf weken van de opleiding geven. Zelf ben ik verantwoordelijk voor één van die vijf weken waarin we de studenten proberen op te leiden in een academische denkwijze bij het aanpakken van vraagstukken, verbanden tussen de wiskunde en de natuurkunde te laten zien en, heel belangrijk, enthousiasme voor het vak natuurkunde op te brengen. Dit laatste is zeer wenselijk omdat in de studie theoretische beschouwingen en wiskunde vaak een zeer belangrijke rol spelen en de 'echte' lol weleens een beetje buiten beeld raakt. Ook in de eigen opleiding aan de faculteit Technische Natuurkunde moeten we 'passen en meten'. Naast het vak *'Introductie in de natuurkunde'* hebben we nog een aantal colleges en practica in het eerste jaar gewijzigd. Als gevolg daarvan is het rendement van het eerstejaars studenten spectaculair omhoog is gegaan. Het is nu zo dat de zestig procent studenten die uiteindelijk doorgaan in het tweede jaar ongeveer negentig procent van alle studiepunten uit het eerste jaar hebben behaald. Dat is een aanmerkelijke verbetering ten opzichte van een aantal jaren terug. Echter, dat lijkt ook een negatieve kant te hebben omdat het studierendement in het tweede jaar is teruggelopen. De uitdaging in het tweede jaar is een grotere stap als in het verleden en we merken dit aan de voortgang van de studie. De invoering van de Major-Minor structuur heeft dit wel heel zichtbaar gemaakt.

Zelf ben ik intensief betrokken bij de invoering van de Major-Minor structuur in de faculteit Technische Natuurkunde en aan de Technische Universiteit Eindhoven als geheel. Het laatste als lid van de Minor

---

implementatie commissie onder leiding van Jan Fransoo. De invoering van de Major-Minor structuur betekent dat studenten in tegenstelling tot in het verleden een hoofdvak (Major) en een bijvak (Minor) volgen. De Minor wordt geacht los te staan van de Major en kan bestaan uit een vakkenpakket van een andere faculteit of een interfacultair vakkenpakket. Het is daarbij van eminent belang dat studenten een grote vrijheid hebben om een Minor te kiezen. Dit laatste is helaas nog niet overal aan de Technische Universiteit Eindhoven het geval. De hele invoering van de Minor is niet alleen een kwestie van passen en meten geweest in de college- en tentamenroosters maar ook om faculteiten te overtuigen om deel te nemen aan het Minor programma. Twee jaar na de invoering kijk ik met redelijke tevredenheid terug op de invoering. Er zijn zeker kleine opstartproblemen geweest maar bij de twee startende faculteiten, Scheikundige Technologie en Technische Natuurkunde, hebben we een goede tevredenheid bij de studenten geconstateerd en is de studievertraging bij Scheikundige Technologie minimaal geweest. Bij Technische Natuurkunde was sprake van een grotere vertraging maar deze blijkt vooral veroorzaakt te worden door de eerder besproken grotere uitdaging in het tweede jaar van de Major opleiding.

---



## Dankwoord

Als je twintig jaar rondloopt in dit vakgebied is het onmogelijk om iedereen te bedanken. Dit is dus slechts een bescheiden poging om alle mensen te benoemen met wie ik heb samengewerkt en die me hebben gestimuleerd. Allereerst wil ik alle studenten bedanken, het zijn er echt veel te veel om te noemen, die in hun stages en afstudeerwerk hebben bijgedragen aan het onderzoek in de groep. Jullie leveren een daadwerkelijke bijdrage aan het wetenschappelijk onderzoek en de uitstekende sfeer in de onderzoeksgroep. Het is een echte stimulans voor me als jullie succesvol zijn. Vervolgens kan ik mijn promovendi onmogelijk genoeg bedanken: Arnout van de Stadt, Martijn Kemerink, Dominique Bruls, Andrei Yakunin, Peter Offermans, Cem Celebi, Niek Kleemans en Murat Bozkurt, dankzij jullie tomeloze inzet hebben we al een groot aantal mooie wetenschappelijke successen behaald. Het is een fantastisch plezier om jullie te zien opgroeien tot volwassen wetenschappers en persoonlijkheden die zelfverzekerd hun carrière kunnen vervolgen als ze de onderzoeksgroep verlaten. In die zin ben ik ook zeer trots op Twan van Lippen en Dayong Zhou waarvoor ik als promotor mocht optreden.

Ik wil ook mijn vaste groepsleden hartelijk bedanken voor de fijne samenwerking. In de wetenschappelijke staf zijn dat Andrei Silov, Richard Nötzel, Jos Haverkort en Rob van der Heijden. Ik hoop dat we samen in de toekomst de groep naar grotere successen en een mooiere toekomst kunnen brengen. In dit verband wil ik ook Herman Beijerinck hartelijk danken voor zijn inzet voor de groep in de afgelopen periode. De technici, Peter Nouwens, Jos van Ruyven, Frans van Setten, Tom Eijkemans, Frank van Otten, René van Veldhoven en Rian Hamhuis die er continu voor zorgen dat alle opstellingen uitstekend in orde zijn en betrouwbaar en goed functioneren. En dan is er nog één duizendpoot, die niet mag ontbreken en dat is de vakgroepsecretaresse, Margriet van Doorne. Heel hartelijk bedankt voor alles wat jij doet voor de groep en ieder van ons persoonlijk. Je bent een echte steunpilaar en spil in het functioneren van de groep. Ik verheug mij ook op de samenwerking met mijn nieuwe collega Andrea Fiore die op 1 oktober als hoogleraar in onze groep zal beginnen. Ik hoop van harte dat het ons lukt om de groep tot een internationaal zeer succesvol team te maken.

Graag wil ik mijn mentoren bedanken die me vooral in het begin van mijn carrière op weg hebben geholpen: Frans Blom als mijn copromoter en Joachim Wolter als mijn promotor. In mijn tijd bij IBM in Zürich heb ik veel geleerd van Huub Saleminck en Ole Albrektsen. Ik wil jullie allen

hartelijk bedanken voor de stimulering van mijn wetenschappelijke interesse en de bijdrage aan mijn carrière. In dit verband wil ik Wim de Jonge bedanken voor zijn inzet, als decaan, voor de hoogleraarbenoeming van de VICI laureaten van de faculteit Technische Natuurkunde. Het is jammer dat ik je wens om in Nature te publiceren nog niet in vervulling heb kunnen laten gaan, maar ik denk dat we een aardig eind in de richting zijn gekomen met onze recente publicatie in Nature Materials. Je stimulatie voor een optimale samenwerking in de faculteit neem ik ter harte en ik wil in dit verband dan ook mijn collega's in de faculteit hartelijk bedanken voor de fijne samenwerking in de afgelopen jaren. Veel van het werk dat we in de afgelopen jaren hebben verricht was onmogelijk zonder een intensieve samenwerking met vele collega's in het buitenland. Ik waardeer de theoretische samenwerking met Jos Devreese en Vladimir Fomin van de Universiteit van Antwerpen, Michael Flatté en Jian-Ming Tang van de Universiteit van Iowa in de VS, Andrei Monakhov van het Ioffe Instituut in St. Petersburg in Rusland. Experimenteel werk zonder een gedegen theoretische beschrijving is naar mijn mening onmogelijk. Jullie bijdragen zijn essentieel voor het begrip wat we hebben opgebouwd. We hebben in Eindhoven uitstekende groei-faciliteiten maar voor sommige experimenten maak ik graag en succesvol gebruik van een samenwerking met specialisten op deelgebieden van de groei. De samenwerking met Wim van Roy van het IMEC in België, Klaus Pierz in Braunschweig, Nicolas Betru in Rennes, Erik Bakkers van Philips in Eindhoven, Henri Mariëtte in Grenoble, Mark Hopkinson in Sheffield, Tom Foxon in Nottingham, Jorge Garcia in Madrid, Maria Kaminska in Warschau en vele anderen maakt het mogelijk om een grotere reikwijdte aan ons onderzoek te geven. Daarnaast zijn er veel meer waardevolle samenwerkingen met collega's in Duisburg, Hamburg, Aken, Leicester, enzovoorts. Het is een groot genot om in echte vriendschap met velen mijn werk te kunnen uitvoeren. Ook wil ik de faculteit Technische Natuurkunde en het College van Bestuur hartelijk danken voor het vertrouwen dat zij in mij hebben gesteld. Ik vind het een eer en een genot om werkzaam te zijn aan de Technische Universiteit in Eindhoven waar ik me *'als een vis in het water voel'*. Vanzelfsprekend wil ik ook mijn familie en vrienden bedanken voor hun ondersteuning en bijdrage aan het succes van mijn carrière. Het is erg jammer dat mijn ouders dit niet meer mee kunnen maken, want ze zouden er oprecht van hebben genoten om mij vandaag te horen spreken.



De laatste persoon die ik wil noemen is zeker niet de minste. Anne-Marie, ik wil je hartelijk danken voor je steun en motivatie door alle jaren van mijn carrière heen. Jij draagt alle last van mijn ego, ambitie en succes. Jij bent het ook geweest die me indertijd gestimuleerd heeft om mijn hart te volgen en te gaan promoveren. Het is een prachtig avontuur geworden. Ik hoop dat ik je op dezelfde manier kan ondersteunen bij het avontuur dat je nu zelf gaat beginnen. Ik wens je daar al het mogelijke succes bij.

### Ten slotte...

Graag wil ik nog een keer terugkeren naar het thema van mijn lezing *'Passen en meten'*. Daartoe wil ik teruggaan naar de kroegen van de zeventiende eeuw. Passen en meten was daar vaak een spel met een speciaal bierglas, het zogenaamde pasglas. De bedoeling van het spel was dat men een flinke teug van het bier nam en dat het vloeistofniveau daarna overeenkwam met een van de ringen om het glas. Blijkbaar was men in de zeventiende eeuw al bekend met het begrip quantisatie van vloeistof. Wat ik eigenlijk met dit verhaal wil zeggen is dat niet alleen met *'passen en meten veel tijd wordt versleten'* zoals het gezegd luidt, maar dat we er ook nog heel veel plezier aan kunnen beleven!

Ik heb gezegd.

Een pasglas uit de zeventiende eeuw.



figuur 13



# Curriculum Vitae

---

**Prof.dr. Paul Koenraad is per 1 januari 2006 benoemd tot voltijds hoogleraar op het gebied van de halfgeleidernanofysica aan de faculteit Technische Natuurkunde van de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e).**

Paul Koenraad (1959) is afgestudeerd aan de faculteit Natuurkunde van de Universiteit Utrecht. In zijn promotieonderzoek bij de faculteit Technische Natuurkunde aan de TU/e onderzocht hij de invloed van geladen onzuiverheden op de elektrische transporteigenschappen van halfgeleiders. Na zijn promotie in 1990 zette hij zijn carrière voort aan de TU/e als KNAW-fellow en werkte hij enige tijd bij IBM-research in Zürich. Na zijn aanstelling als universitair docent en hoofddocent verkreeg hij in 2005 een Vici-beurs voor de studie van spinmanipulatie op de atomaire schaal. Op dit moment onderzoekt hij de eigenschappen van afzonderlijke doteringsatomen en nanostructuren in halfgeleiders.

---

## Colofon

### Productie:

Communicatie Service  
Centrum TU/e  
Communicatiebureau  
Corine Legdeur

### Fotografie cover:

Bart van Overbeeke,  
Eindhoven

### Ontwerp:

Grefo Prepress,  
Sint-Oedenrode

### Druk:

Drukkerij van Santvoort,  
Eindhoven

ISBN 978-90-386-1087-0

NUR 926

### Digitale versie:

[www.tue.nl/bib/](http://www.tue.nl/bib/)

Postbus 513  
5600 MB Eindhoven  
Telefoon (040) 247 91 11

Bezoekadres:  
Den Dolech 2  
5612 AZ Eindhoven

