

## Plasmadepositie: van de nanoschaal tot strekkende meters

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

Kessels, W. M. M. (2006). Plasmadepositie: van de nanoschaal tot strekkende meters. In T. Hackeng, & H. Veenhof (editors), *Over de grenzen van het weten: jaarboek 2004 Vereniging van Akademie-onderzoekers* (blz. 47-58). Vereniging van Akademie-onderzoekers.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/2006

**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.

## **Plasmadepositie: van de nanoschaal tot strekkende meters**

Laat ik beginnen met u een vraag voor te leggen: had u zo'n tien jaar geleden verwacht dat nu vrijwel iedereen met een mobiele telefoon op zak door het leven zou gaan? Of dat u er nu aan zit te denken om uw oude vertrouwde beeldbuis te vervangen door een plat beeldscherm gelijk aan dat van uw recent aangeschafte computer? Nee, waarschijnlijk niet en leest u gerust verder indien u zich afvraagt welke ontwikkelingen er aan ten grondslag liggen.

Natuurlijk zijn mobiele telefoons en platte beeldschermen het resultaat van de voortschrijdende wetenschappelijke en technologische vooruitgang en is er een veelvoud aan concrete technische ontwikkelingen aan te wijzen die bovengenoemde zaken mogelijk hebben gemaakt. Een van die ontwikkelingen is te vinden op het gebied van dunne lagen en de synthese ervan met behulp van plasma's. Onder dunne lagen verstaan we laagjes van materialen met een dikte van enkele nanometers tot enkele micrometers en met geleidende, isolerende, of vaak juist halfgeleidende eigenschappen.

Een plasma kan gezien worden als een gas dat verhit wordt met een elektrisch veld waardoor het gas ontleedt in (negatieve) elektronen, (positieve) ionen en andere neutrale maar reactieve gasdeeltjes (figuur 1, blz. 51). De ontleding van het gas vindt voornamelijk plaats door de verhitting van de elektronen die op hun beurt met gasdeeltjes botsen die vervolgens uit elkaar vallen zonder dat de temperatuur van het gas zelf flink opgedreven wordt. Plasma, ook wel als de 4e aggregatietoestand bestempeld, maakt het daarom mogelijk materialen te behandelen met reactieve gasdeeltjes bij relatief lage temperaturen. Een voorbeeld hiervan is dat de reactieve gasdeeltjes kunnen neerslaan op een oppervlak en op deze manier een dunne laag vormen. Dit proces heet plasmadepositie.

Plasmadepositie is een erg belangrijke technologie met een enorme hoeveelheid toepassingen in de industrie. Plasmadepositie maakt het mogelijk om talloze materialen samen te stellen in de vorm van dunne lagen en dat onder de juiste randvoorwaarden: lagen van hoge kwaliteit kunnen verkregen worden bij relatief lage temperatuur (bijvoorbeeld toepasbaar op plastics), bij een relatief hoge aangroeisnelheid (zodat het proces niet te tijdrovend en dus te duur is), onder goed gecontroleerde condities (eventueel op enkele atoomlagen nauwkeurig), in uiterst fijne structuren (tot op de nanoschaal) en met een goede uniformiteit (voor toepassingen met grote oppervlakken).

De toepassing van plasmadepositie beperkt zich dus niet enkel tot mobiele telefoons en platte beeldschermen, al zijn dit natuurlijk twee tot de verbeelding sprekende voorbeelden. Aan de hand van deze voorbeelden zal ik twee recente ontwikkelingen op het gebied van plasmadepositie er uit lichten. Deze twee ontwikkelingen staan centraal in mijn onderzoek.

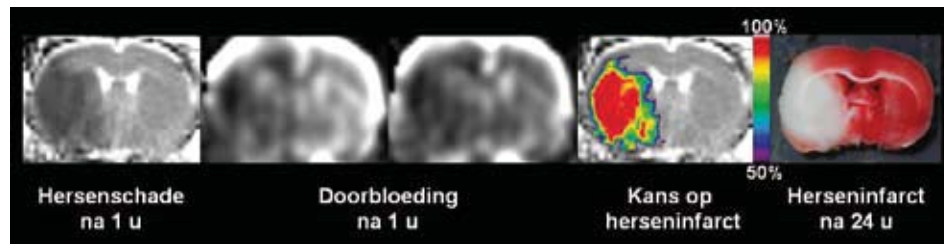
---

*Van de nanoschaal...*

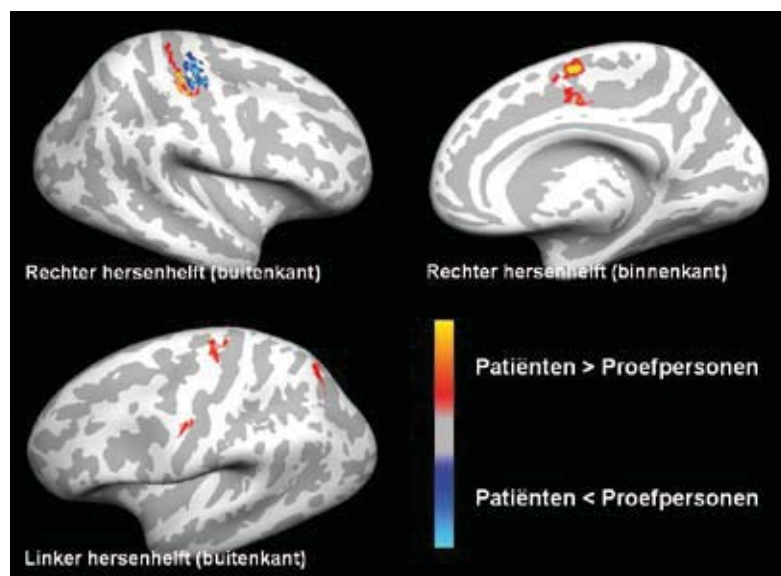
De eerste ontwikkeling houdt verband met de continue miniaturisatie van geïntegreerde schakelingen, vaak aangeduid met de term computerchips. Deze term dekt niet helemaal de lading gezien het feit dat geïntegreerde schakelingen zich vandaag de dag ook bevinden in bijvoorbeeld auto's, tv's en allerlei andere huishoudelijke en elektronische apparatuur. Hieronder bevinden zich dus ook mobiele telefoons die zich tegenwoordig voor veel meer zaken lenen dan enkel een telefoontje te plegen. De miniaturisatie van geïntegreerde schakelingen wordt geregeerd door de zogenaamde wet van Moore. Dit is een empirische wetmatigheid die stelt dat het aantal schakelingen, of beter gezegd het aantal transistors op een computerchip per vierkante centimeter elke 18 tot 24 maanden verdubbelt. Het zal u niet ontgaan zijn dat u huidige pc weer veel sneller is dan uw vorige pc. Momenteel zitten we dan ook op 42 miljoen transistors op een paar vierkante centimeter voor een Pentium-4 processor. Het mag duidelijk zijn dat deze transistors op een computerchip bestaan uit zeer kleine structuren die slechts enkele tientallen nanometers groot zijn. Deze kleine structuren bestaan op hun beurt uit een aantal zeer dunne laagjes. Zo wordt het hart van een transistor – de daadwerkelijke schakelaar – gevormd door een laagje dat momenteel slechts enkele atoomlagen dik is. Zo ver heeft het alleen kunnen komen door een enorme hoeveelheid gedegen wetenschappelijk onderzoek dat verspreid over de wereld uitgevoerd wordt. En om ook in de toekomst aan de wet van Moore te kunnen vasthouden, zullen steeds nieuwe uitdagingen aangegaan moeten worden met grensverleggend onderzoek.

Een van die uitdagingen is om zeer dunne laagjes van verschillende 'nieuwe' materialen uiterst gecontroleerd aan te brengen, dat wil zeggen op de atoomlaag precies ofwel op de nanoschaal. Een nieuwe ontwikkeling op dit gebied is de nieuwe methode van 'atoomlaag depositie', in het Engels 'atomic layer deposition' genoemd. Deze methode maakt het mogelijk om op een uiterst gecontroleerde manier een materiaal atoomlaag voor atoomlaag aan te brengen. In mijn onderzoek probeer ik deze methode uit te breiden naar allerlei nieuwe materialen en onder gunstigere of beter toepasbare condities. Zo heb ik met mijn onderzoek aangetoond dat metallische lagen van een hoge kwaliteit zelfs op kamertemperatuur samengesteld kunnen worden door de introductie van een plasmastap bij atoomlaag depositie. In figuur 2 (blz. 51) staat dit proces geïllustreerd voor de synthese van titaniumnitride, een metallisch materiaal met velerlei toepassingen in geïntegreerde schakelingen. De ontwikkeling van dit proces heeft alleen kunnen plaats vinden door een vergaand inzicht in de reacties van de verschillende deeltjes aan het oppervlak. Met andere woorden door het begrip van hoe een dergelijke dunne laag 'atoom voor atoom' opgebouwd wordt. In mijn onderzoek is dit inzicht verkregen door een aantal geavanceerde analysetechnieken toe te passen tijdens de aangroei van het materiaal.

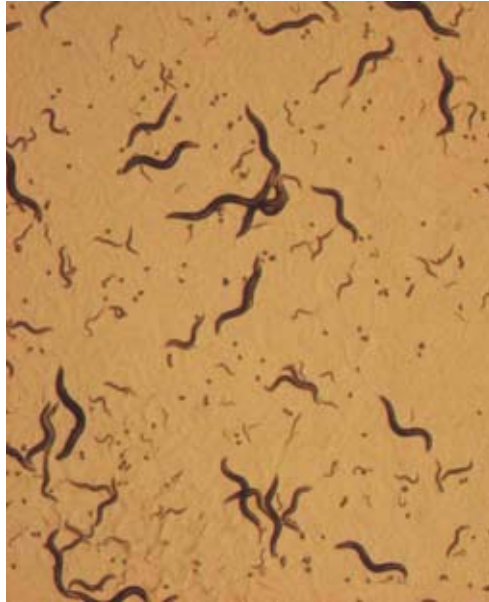
## Kleurillustraties bij verschillende artikelen



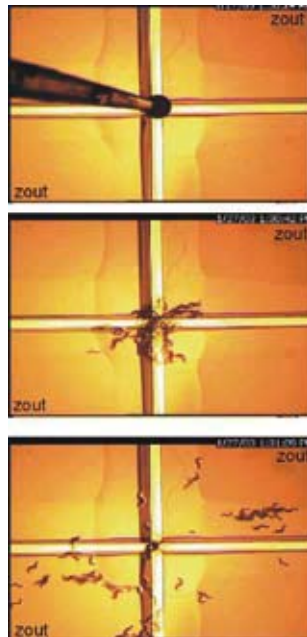
Dijkhuizen, fig. 1. De berekende kans op een herseninfarct aan de hand van MRI van hersenschade en doorbloeding na 1 uur in een rattenmodel voor beroertes komt overeen met het uiteindelijke infarct na 24 uur.



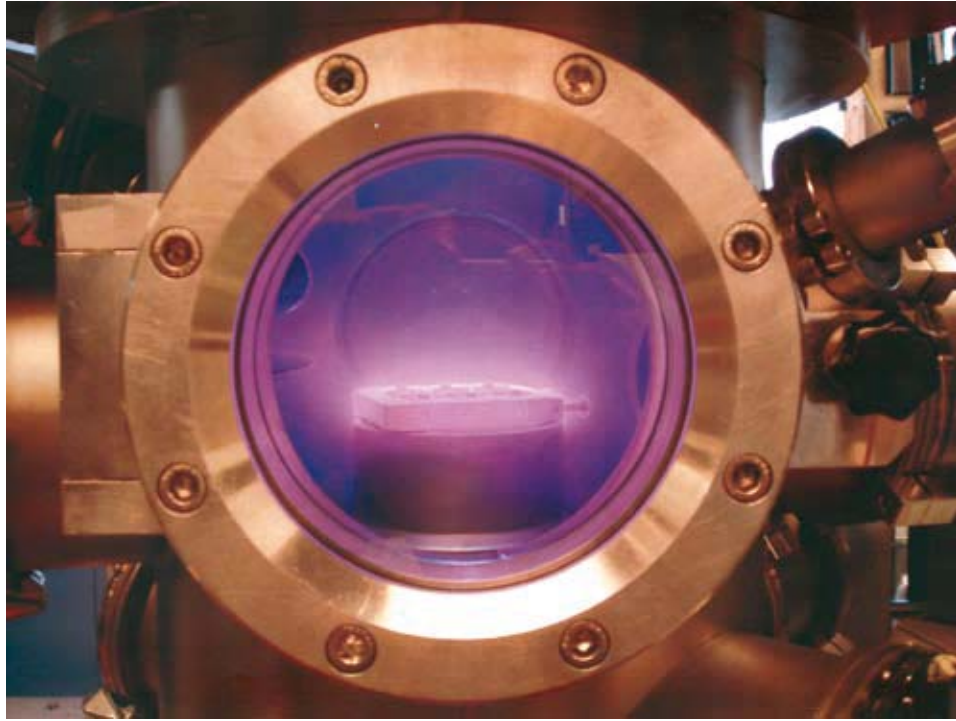
Dijkhuizen, fig. 2. Het verschil in activatiepatronen tussen patiënten met een herseninfarct en gezonde proefpersonen zoals gemeten met fMRI tijdens het knijpen met de hand, in kaart gebracht op een 'opgeblazen' reconstructie van de hersenen. In geel/rood en blauw zijn de gebieden weergegeven die respectievelijk meer en minder actief zijn in de patiëntengroep.



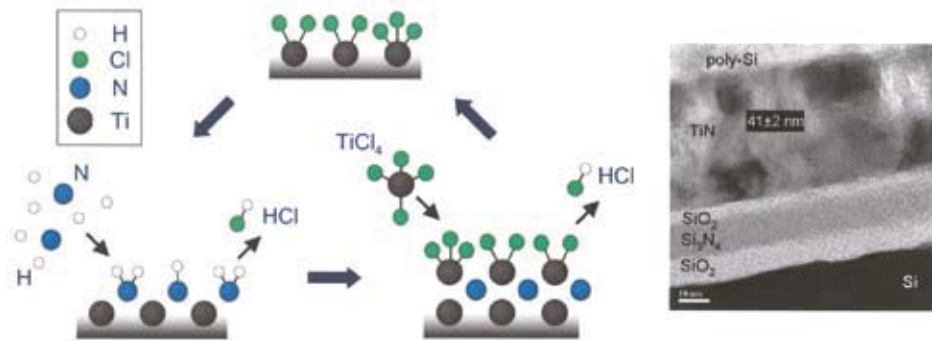
Jansen, fig. 1. *Caenorhabditis elegans*. Alle ontwikkelingsstadia van *C. Elegans* op een kweekplaat: eieren, larven en volwassen dieren.



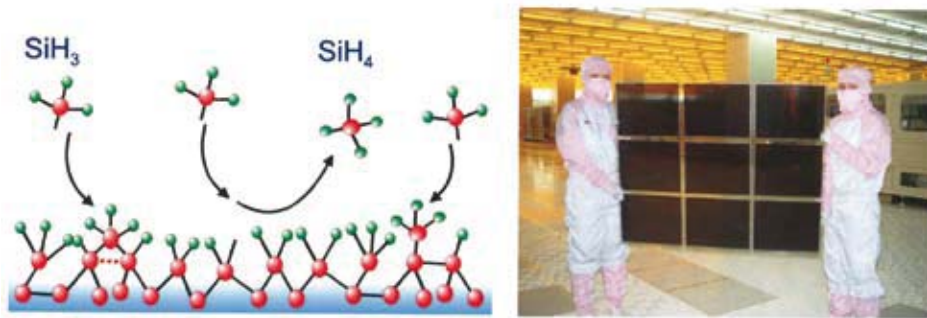
Jansen, fig. 2. Zout smaak test. Volwassen *C. elegans* worden in het midden van de test geplaatst en gaan naar de kwadranten die zout bevatten (rechts boven en linksonder bevatten 25mM NaCl).



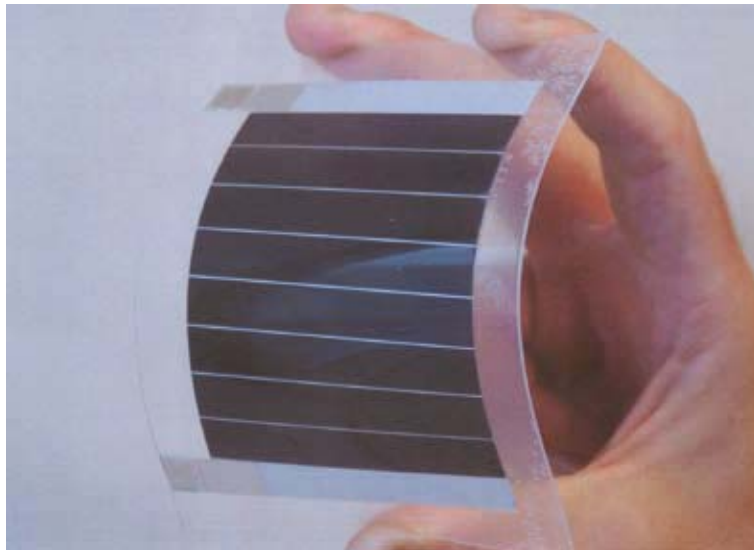
*Kessels, fig. 1. Een plasma zoals het gebruikt wordt voor de depositie van dunne lagen.*



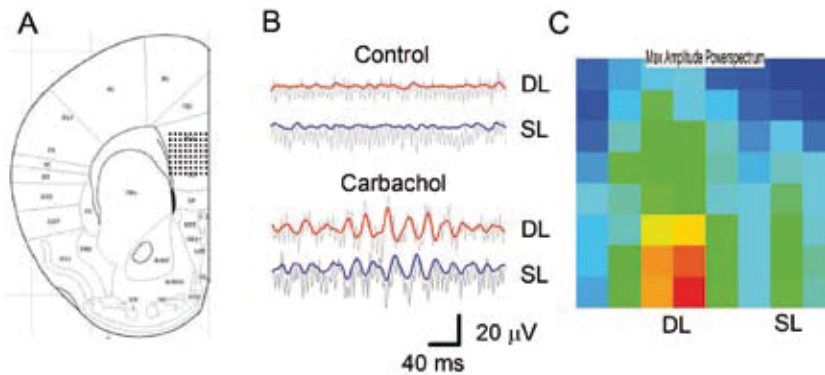
*Kessels, fig. 2. Schematische weergave van het atoomlaag depositie proces van titanium-nitride met gebruik van een plasma. Tevens is een opname met een elektronen microscoop weergegeven van een aantal dunne lagen zoals deze voorkomen in geïntegreerde schakelingen.*



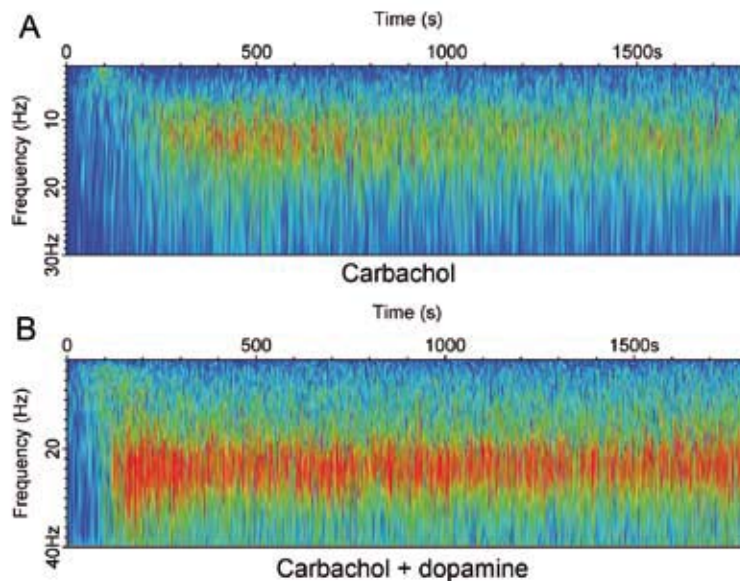
*Kessels, fig. 3. Schematische weergave van de oppervlaktereacties tijdens het depositieproces van amorf silicium met een plasma. Het figuur rechts toont een glasplaat voorzien van amorf silicium TFT's voor negen beeldschermen.*



*Kessels, fig. 4. Zonnecellen op folie (met dank aan AKZO-Nobel).*

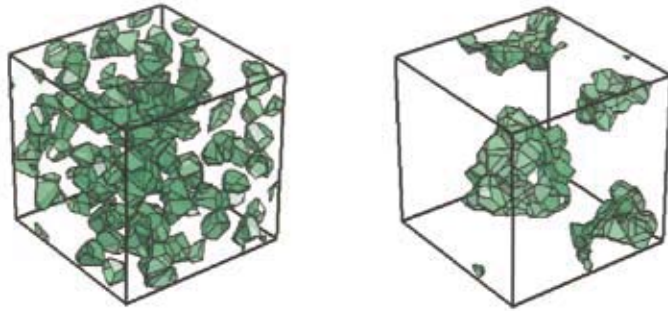


Mansvelder, fig. 1. Snelle oscillaties in de levende hersenplakken van de prefrontale cortex. A: Overzicht van de verschillende hersengebieden in de hersenplak. De mediale prefrontale cortex is op een reeks van 64 elektroden (8 bij 8) geplaatst voor metingen van oscillaties, aangegeven door de zwarte stippen. B: Carbachol wekt oscillaties op in de prefrontale cortex. De rode lijnen laten het signaal in de diepe lagen zien (Deep layers, DL), de blauwe lijnen laten het signaal in de oppervlakkige lagen zien (Superficial layers, SL). Merk op dat de oscillaties in de verschillende lagen in tegenfase zijn. C: Overzicht van de spatiële verspreiding van de oscillaties in aanwezigheid van carbachol. Hoe sterker de oscillaties zijn, hoe warmer de kleuren. De oriëntatie van de elektroden is zoals in figuur A. Diepe lagen laten een sterkere oscillatie zien.

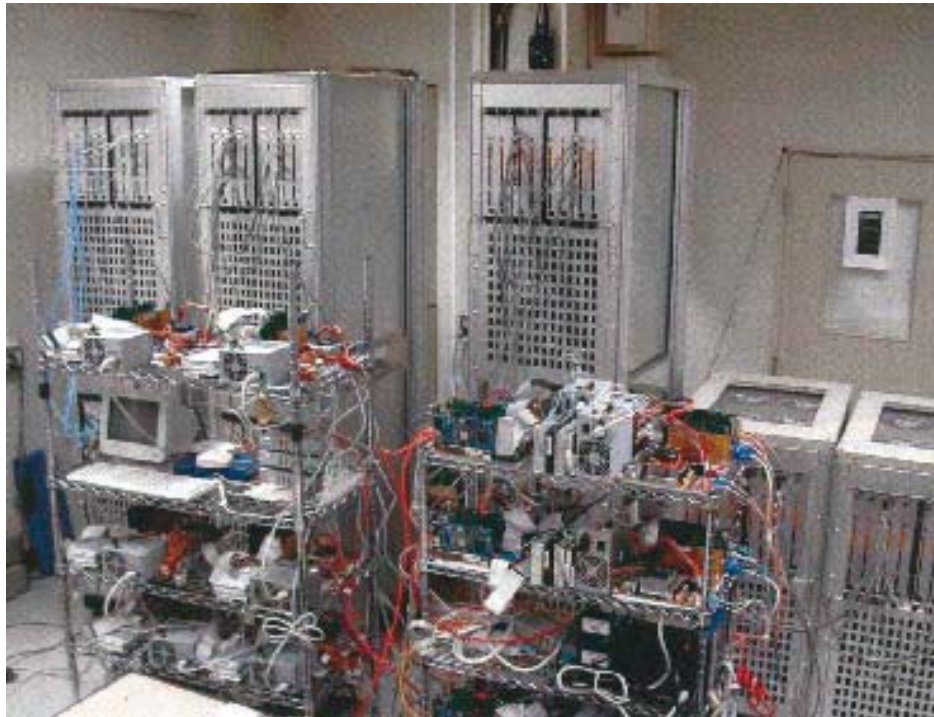


Mansvelder, fig. 2. Lage concentraties dopamine versterken snelle oscillaties in de prefrontale cortex. A: Temporeel profiel van oscillaties opgewekt door carbachol bij kamertemperatuur. De frequentie van oscillaties zijn sterk temperatuursafhankelijk. De sterkte van oscillaties zijn gecodeerd in kleur. Hoe sterker de oscillatie, hoe warmer de kleur. B: Toevoeging van een lage concentratie dopamine (150 nM) verandert de frequentie en duur van oscillaties.

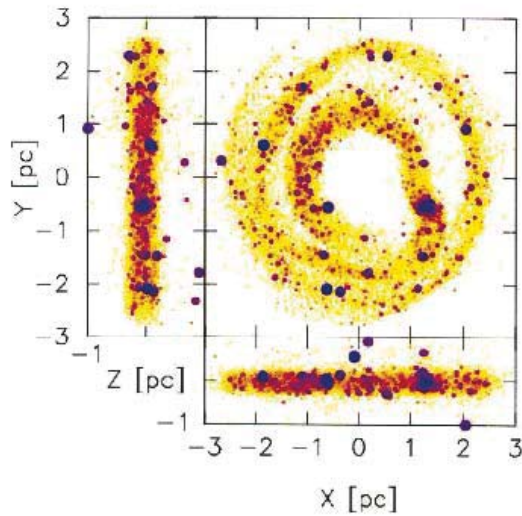




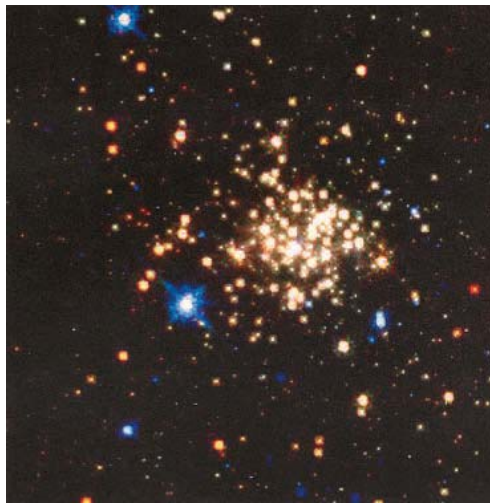
*Peters, fig. 1. De simulatie met duizend cellen, 100 van type A en 900 van type B in een periodieke doos. De oppervlakjes zichtbaar in de plaatjes zijn grensvlakken tussen type A en B cellen. Beide typen zijn gelijk, behalve dat oppervlakten waar de twee typen elkaar ontmoeten een oppervlaktespanning hebben. Het eerste plaatje is een begintoestand. In het tweede plaatje is te zien dat er een druppel gevormd is.*



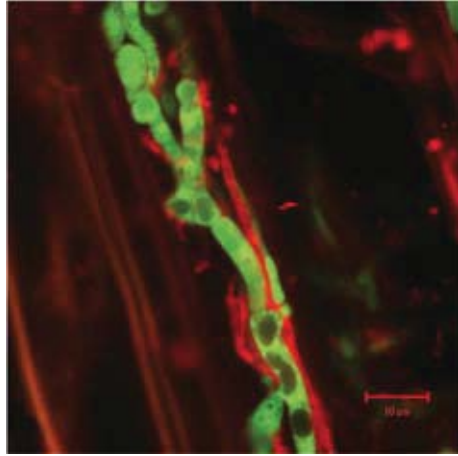
*Portegies Zwart, fig 1. Foto van de huidige 64 Tflop/s opstelling van de GRAPE-6 in Tokio, gebouwd door Jun Makino. Deze computer voert ongeveer 100 duizend berekeningen uit in de tijd dat een snelle pc één berekening uitvoert. In Amsterdam staat een kleinere NWO gefinancierde uitvoering van de GRAPE-6 met een snelle (30 Gbit/s) netwerkverbinding verbonden is aan de machine in Tokio. De Amsterdamse computer heet MoDeSta, een acroniem voor Modeling Dense Stellar systems in Amsterdam (zie <http://modesta.science.uva.nl>)*



Portegies Zwart, fig. 2. Boven- en zijaanzichten van een gesimuleerde hllp van 65536 sterren in een baan om het Galactisch centrum (in de oorsprong). Om verwarring te voorkomen zijn de sterren van het Galactisch centrum niet afgebeeld. Deze gefingeerde sterrenhoop werd 300 duizend jaar geleden geboren op een afstand van ca. 6.5 lichtjaar van het Galactisch centrum. Intussen is de hoop grotendeels uit elkaar gevallen waardoor de afgelegde weg goed zichtbaar wordt. De afmeting en kleuren van de sterren (afgebeeld als stippen) zijn evenredig met hun massa en effectieve temperatuur. De zwaartste (grootste) en heetste (blauwste) sterren blijven het langst in de sterrenhoop en zakken gezamenlijk naar de kern van de melkweg. De assen zijn aangeduid in parsec; één parsec komt overeen met ongeveer 3,3 lichtjaar. Gedurende het inspiraliseren laat de sterrenhoop een grote hoeveelheid lichtere sterren achter die vervolgens in een baan om het Galactisch centrum blijven.



Portegies Zwart, fig. 3. (ca. 5 bij 5 lichtjaar) van de Arches sterrenloop genomen in 1999 door Don Figer met behulp van de hubble Space Telescope. Arches bestaat uit ca. 70.000 sterren en staat op en afstand van ca. 100 lichtjaar van het Galactisch centrum, net iets te ver om effectief naar binnen te spiraliseren.



Rep, fig. 1. *Fusarium oxysporum* in een xyleemvat van een tomatenplant, zichtbaar gemaakt met behulp van een Confocal Scanning Laser Microscoop. *Fusarium* is groen omdat deze een fluorescerend eiwit (GFP) produceert onder controle van de promotor van het *six1* gen. Hiermee wordt aangetoond dat het *six1* gen actief is tijdens kolonisatie van xylemvaten. Celwanden van plantencellen zijn rood gekleurd (zichtbaar door autofluorescentie).



Rottschäfer, fig. 1.



Rottschäfer, fig. 2.

---

... tot strekkende meters

De tweede ontwikkeling behelst de trend naar elektronica op steeds grotere oppervlakken, denk hier bijvoorbeeld aan platte beeldschermen, elektronisch papier, zonnecellen, etc. Deze ontwikkeling kan als het ware gezien worden als een tegenovergestelde trend van de eerder beschreven miniaturisatie, al is dat strikt genomen onjuist. Ook in dit geval worden de elektronische onderdelen voortdurend kleiner, maar worden ze wel steeds op grotere oppervlakken aangebracht. LCD beeldschermen zijn hiervan een sprekend voorbeeld. Bevonden deze beeldschermen zich voorheen enkel in laptops, inmiddels zitten ze standaard bij de meeste pc's en verdringen ze ook de traditionele beeldbuis tv's. De toename in toepassingen en de steeds grotere afmetingen van deze beeldschermen wordt mogelijk gemaakt door nieuwe productiemethoden die ter beschikking zijn gekomen. Deze productiemethoden hebben voor een technische doorbraak gezorgd en – zeker zo belangrijk – hebben platte beeldschermen tot een betaalbaar alternatief gemaakt. Onder deze nieuwe productiemethoden bevinden zich ook enkele productiestappen waarin plasmadepositie een essentiële rol speelt.

LCD schermen maar ook andere platte beeldschermen bestaan uit een groot aantal beeldelementjes die aan of uit kunnen staan en waarmee een bewegend beeld opgebouwd kan worden door ze heel snel aan of uit te schakelen. Het aan of uitschakelen gebeurt normaliter met kleine schakelaars, wederom transistors. Om prijstechnische redenen zijn deze transistors voor platte beeldschermen geheel opgebouwd uit dunne lagen, de zogenaamde 'thin film transistors' of TFT's, wat ook de naam TFT beeldscherm verklaard. Het hart van deze transistors bestaat uit een aantal dunne laagjes van silicium houdende materialen zoals onder andere amorf silicium. Deze laagjes kunnen enkel kosteneffectief aangebracht worden door plasmadepositie. Met een plasma kunnen silaan-moleculen ( $\text{SiH}_4$ , vergelijkbaar met methaan ( $\text{CH}_4$ ) waarbij het koolstofatoom vervangen is door een siliciumatoom) omgezet worden in reactieve deeltjes die vervolgens neerslaan op het oppervlak van een substraatmateriaal (figuur 3, blz. 52), bijvoorbeeld een glasplaat. Dit is op het moment al een gangbare methode maar de uitdaging zit vooral in het aanbrengen van dunne lagen van voldoende kwaliteit op zeer grote oppervlakken met een perfecte uniformiteit. Dit is nodig om grote platte beeldschermen te kunnen produceren en om kosten te besparen door schaalvergroting waarbij een aantal beeldschermen tegelijkertijd op een glasplaat geproduceerd worden. Ter illustratie: het meeste onderzoek vindt plaats op substraatjes van enkele vierkante centimeters groot terwijl de industrie momenteel overstapt naar glasplaten van enkele vierkante meters groot. Bovendien zullen LCD beeldschermen in de nabije toekomst ook concurrentie krijgen van beeldschermen gemaakt van organische verbindingen, de zogenaamde organische LED's of OLED's die aangebracht worden op plastic dragermateriaal. Ook hierbij spelen plasma-gedeponeerde dunne lagen een belangrijke rol. In dit geval worden er niet alleen hoge eisen aan het proces gesteld met betrekking tot goede uniformiteit op grote oppervlakken. Het vereist ook dat plasmadepositie bij voldoende lage temperaturen plaatsvindt, niet ver van kamertemperatuur. Zulke ontwikkelingen zijn vrijwel onmogelijk zonder beschikking te hebben over gedetailleerd inzicht in het proces

van plasmadepositie, bijvoorbeeld op het gebied van de oppervlaktereacties tussen de reactieve gasdeeltjes en het oppervlak (figuur 3, blz. 52). Mijn onderzoek heeft ook bijgedragen aan dit inzicht en momenteel vinden er een aantal studies plaats om de interactie van de gasdeeltjes aan het oppervlak nog dieper te bestuderen, zelfs tot op de atomaire schaal. Zulk onderzoek zal nodig zijn om het proces nog verder te optimaliseren en te sturen zodat de gewenste laageigenschappen verkregen kunnen worden onder de juiste omstandigheden.

Een productietechnologie die gerelateerd is aan die van platte beeldschermen is de productie van flexibele zonnecellen. Van dunne lagen amorf silicium kan namelijk ook een type zonnecel geproduceerd worden die zich bij uitstek leent om aangebracht te worden op een flexibele folie, zogenaamde zonnecellen op folie (figuur 4, blz. 52). Dit vereist plasmadepositie van amorf silicium op vele strekkende meters folie. Het mag duidelijk zijn dat dit additionele technische eisen aan het proces stelt, niet in de laatste plaats omdat het proces zeer lage kosten met zich mee moet brengen. Op dit moment is de consument wel bereid om relatief veel geld neer te tellen voor een plat beeldscherm, maar niet voor dure zonnecellen. De consument kiest liever voor goedkope energie uit ‘vervuilende’ conventionele energiebronnen in plaats van voor dure, schone zonne-energie. Een aanzienlijk gedeelte van mijn onderzoek vindt dan ook plaats om zonnecellen op folie goedkoper te maken zodat zonne-energie beter kan concurreren met de traditionele energiebronnen. Al lijkt het vooralsnog onvoorstelbaar, laten we hopen dat we over tien jaar zonnecellen op het dak de normaalste zaak van de wereld vinden.

---

Project: *Oppervlakte-fysica en -chemie van plasmadepositie.*

Dr. W.M.M.K. Kessels is verbonden aan het Centrum voor Plasmafysica en Stralingstechnologie van de Faculteit Technische Natuurkunde van de Technische Universiteit Eindhoven.

E-mail: w.m.m.kessels@tue.nl